

People's Democratic Republic of Algeria  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
Mohamed Boudiaf University of M'sila  
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة المسيلة  
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

### MASTER

En Génie Mécanique

**Option** : Fabrication Mécanique et productique

Présenté par :

BOURAYOU Zohair & BENCHOUCHE Khaled

### Thème

**Etude de l'effet d'une soudure multi-passe sur la structure de la zone thermiquement affectée**

Devant le jury composé de :

| NOM et Prénom | Grade | Qualité   |
|---------------|-------|-----------|
| ZAOUI Moussa  | MCA   | Président |
|               |       | Encadreur |
|               |       | Examineur |

*Année Universitaire : 2020 / 2021*

N° d'ordre : GM/...../2021

# Remerciements

*Ce travail a été réalisé au faculté de science et technologie de l'Université Mohamed Boudiaf de Msila.*

*Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude et reconnaissance à Monsieur*

*Le Docteur M,ZAOUL de m'avoir proposé ce sujet et consenti tant d'efforts et de temps pour diriger ce travail.*

*mes vifs remerciements vont également a ma famille mes amis pour leurs soutiens,*

*Compréhension et patience tout au long de mon cursus.*

*Enfin , que toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail trouvent ici ma profonde reconnaissance.*

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère Mère et mon très cher Père, pour leurs soutiens, leurs

patiences et leurs confiances.

Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils font pour moi « que Dieu vous garde et vous bénisse ».

Toute la famille.

Tous mes amis (es) du quartier et ceux de la fac, sans oublier tous les résidents de m'sila.

Et Toute ma promotion.

Zohair et Khaled

## Liste des tableaux

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Tableau 01 :</b> Les différences classes d'aciers .....                                      | <b>09</b> |
| <b>Tableau 02 :</b> Les limites des teneurs en éléments d'alliage .....                         | <b>09</b> |
| <b>Tableau 03 :</b> composition chimique d'acier inoxydable (duplex 2205) .....                 | <b>52</b> |
| <b>Tableau 04:</b> Propriétés mécaniques de l'acier inoxydable (duplex) métal de base .....     | <b>52</b> |
| <b>Tableau 05:</b> composition chimique d'acier au carbone- A106- (laboratoire essai GTP) ..... | <b>53</b> |
| <b>Tableau 06:</b> Propriétés mécaniques de l'acier au carbone métal de base(A106) .....        | <b>53</b> |
| <b>Tableau 07:</b> Composition chimique du métal d'apport ER 2209 .....                         | <b>53</b> |
| <b>Tableau 08:</b> composition chimique métal d'apport ER70S-6 .....                            | <b>54</b> |
| <b>Tableau 09:</b> Propriétés mécaniques de métal d'apport .....                                | <b>54</b> |
| <b>Tableau 10:</b> Paramètre de soudage ER 2209 .....   | <b>54</b> |
| <b>Tableau 11:</b> Paramètre de soudageER70S-6 .....  | <b>55</b> |

## Liste des figures

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Figure 01:</b> Variation de la structure cristalline du fer en fonction de la température..... | <b>02</b> |
| <b>Figure 02:</b> Diagramme d'équilibre Fer-Carbone.....  | <b>03</b> |
| <b>Figure 03:</b> Microstructure d'un acier eutectoïde.....                                       | <b>04</b> |
| <b>Figure 04:</b> Microstructure d'un acier hypoeutectoïde.....                                   | <b>04</b> |
| <b>Figure 05:</b> un image présente les traitement thermiques des.....                            | <b>05</b> |
| <b>Figure 06:</b> un image présente de traitement thermique (la trempe) .....                     | <b>06</b> |
| <b>Figure 07:</b> un image présente de traitement thermique-unison tek.....                       | <b>07</b> |
| <b>Figure 08:</b> recuit acier et normalisation par induction.....                                | <b>08</b> |
| <b>Figure 09:</b> image présente acier inox 304 ou 316.....                                       | <b>12</b> |
| <b>Figure 10:</b> Trempe à la flamme (au chalumeau) .....   | <b>13</b> |
| <b>Figure 11:</b> Trempe avec chauffage par induction en moyenne ou haute.....                    | <b>14</b> |
| <b>Figure 12:</b> Soudage par résistance par point.....   | <b>17</b> |
| <b>Figure 13:</b> principe Soudage par résistance par point.....                                  | <b>18</b> |
| <b>Figure 14:</b> Soudage oxyacétylénique.....  | <b>19</b> |
| <b>Figure 15:</b> Chalumeau soudeur (OFW) .....   | <b>20</b> |
| <b>Figure 16:</b> Chalumeau coupeur (OFC) .....   | <b>20</b> |
| <b>Figure 17:</b> Les trois types de flamme pour le soudage oxyacétylénique.....                  | <b>21</b> |
| <b>Figure 18:</b> Principe du procédé (SMAW) .....  | <b>22</b> |
| <b>Figure 19:</b> Circuit électrique du soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) .....       | <b>23</b> |
| <b>Figure 20:</b> Principe de soudage TIG.....  | <b>24</b> |
| <b>Figure 21:</b> Principe de soudage MIG et MAG .....  | <b>25</b> |
| <b>Figure 22:</b> Les trois principaux régimes de transfert du métal .....                        | <b>26</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Figure 23:</b> Principe de soudage avec fil fourré (sans protection gazeuse) .....  | <b>27</b> |
| <b>Figure 24:</b> Principe de soudage avec fil fourré (avec protection gazeuse) .....  | <b>28</b> |
| <b>Figure 25:</b> Soudage au plasma.....   | <b>29</b> |
| <b>Figure 26:</b> Soudage par faisceau d'électrons – Schéma de principe.....   | <b>30</b> |
| <b>Figure 27:</b> Soudage par faisceau laser.....  | <b>31</b> |
| <b>Figure 28:</b> Principe de soudage par friction.....  | <b>32</b> |
| <b>Figure 29:</b> Structure d'un alliage métallique, vu au microscope électronique.....  | <b>35</b> |
| <b>Figure 30 :</b> Macrographie d'une soudure d'acier.....   | <b>36</b> |
| <b>Figure 31:</b> Métal de base, zone affectée thermiquement, soudure, source de chaleur, métal d'apport, zone de liaison .....  | <b>37</b> |
| <b>Figure 32:</b> Soudure Arc Submergé – a) Aspect macrographique – b) Microstructure des zones brutes de solidification – c) Microstructure des zones recuites .....  | <b>38</b> |
| <b>Figure 33:</b> Exemple de soudage mono passe (gauche) et multi passe (droite) d'après (Bonaventure, 2012) .....   | <b>39</b> |
| <b>Figure 34:</b> Evolution de la température en fonction du temps au voisinage de la ligne de soudure d'après (Saint-Germain, 2006 ) .....  | <b>41</b> |
| <b>Figure 35:</b> Evolution de la température en fonction du temps pour des points situés à des distances croissantes de l'origine du cordon d'après(Saint-Germain, 2006).....   | <b>41</b> |
| <b>Figure 36:</b> Exemple de cycles thermiques rencontrés en soudage multi passe d'après (Radaj, 2003).....  | <b>42</b> |
| <b>Figure 37:</b> Identification des différentes structures métallurgiques en ZAT selon les températures maximales atteintes et le diagramme d'équilibre Fer-Carbone (Blondeau, 2001b) d'après (Esterling, 1992) ..... | <b>43</b> |
| <b>Figure 38:</b> Représentation schématique des cycles thermiques et des microstructures issues d'un soudage multi passe d'après (Blondeau, 2001b) .....  | <b>45</b> |
| <b>Figure 39:</b> Modification de l'action thermique en fonction du nombre de passes exécutées...47  |           |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Figure 40:</b> Température des zones atteintes.....   | <b>48</b> |
| <b>Figure 41:</b> Observation de l'effet de la température sur la grosseur des grains d'une plaque d'acier au carbone..... | <b>49</b> |
| <b>Figure 42:</b> Sens de prélèvement des éprouvettes de traction .....  | <b>55</b> |
| <b>Figure 43:</b> Schéma illustratif du dispositif d'attaque électrolytique .....  | <b>57</b> |
| <b>Figure 44:</b> Microscope optique Carl Zeiss .....  | <b>57</b> |
| <b>Figure 45:</b> Microstructure la ZAT de acier (2205).GX200 .....  | <b>58</b> |
| <b>Figure 46:</b> Microstructure la ZAT de A106 GX200 .....  | <b>58</b> |
| <b>Figure 47:</b> Microstructure la ZL d'acier (2205) GX200 .....  | <b>59</b> |
| <b>Figure 48:</b> Microstructure la ZL de A106 GX100 .....   | <b>59</b> |
| <b>Figure 49:</b> Microstructure la ZL ; ZF; ZAT(2205/A106) .....  | <b>60</b> |
| <b>Figure 50:</b> la microstructure de la soudure hétérogène coté duplex .....   | <b>61</b> |
| <b>Figure 51:</b> la microstructure de la soudure hétérogène coté A106 a) MB, b)ZAT-ZF, c)ZF .....                         | <b>62</b> |

# Sommaire

|                    |   |
|--------------------|---|
| Remerciements      |   |
| Dédicaces          |   |
| Liste des tableaux |   |
| Liste des Figures  |   |
| Introduction ..... | A |

## Chapitre I: Etude sur les aciers

|  |    |
|--|----|
| Introduction .....   | 01 |
| I.1 Définition d'un acier .....                              | 01 |
| I.2 Constituants des aciers .....                            | 02 |
| I.2.1 Diagramme simplifié fer-carbone.....                   | 03 |
| II.2.2 Acier eutectoïde (0,77 %C).....                       | 04 |
| II.2.3 Aciers hypoeutectoïdes (0,008 à 0,77 %C).....         | 04 |
| II.2.4 Aciers hypereutectoïdes (entre 0,77 et 2,11 %C) ..... | 04 |
| II.3 Traitements thermiques des aciers .....                 | 05 |
| La Trempe .....  | 06 |
| Procédé .....  | 06 |
| Le Revenu .....  | 07 |
| Le Recuit .....  | 08 |
| Différents recuits .....                                     | 08 |
| Classification des aciers .....                              | 08 |
| La composition chimique .....                                | 08 |
| Propriétés d'usage ou qualité .....                          | 08 |
| I.3.1 Aciers non alliés et aciers alliés .....               | 09 |
| I.3.2 Aciers de qualité .....                                | 10 |

|  |    |
|--|----|
| A- Aciers de qualité non alliés .....                                      | 10 |
| A.1 Aciers au carbone pour appareils à pression .....                      | 10 |
| A.2 Aciers pour emboutissage et pliage à froid .....                       | 10 |
| B- Aciers de qualité alliés .....  | 10 |
| I.3.3 Les aciers spéciaux .....  | 11 |
| A- Aciers spéciaux non alliés .....  | 11 |
| B- Aciers spéciaux alliés .....  | 11 |
| I.3.4 Aciers inoxydables .....   | 11 |
| I.4 Traitement de Surface des Aciers .....                                 | 12 |
| I.4.1 Les trempes superficielles .....                                     | 12 |
| a. Trempe à la flamme (au chalumeau) .....                                 | 13 |
| b. Trempe avec chauffage par induction en moyenne ou haute fréquence ..... | 14 |
| I.5 Les traitements thermochimiques .....                                  | 15 |
| I.5.1 La carburation .....   | 15 |
| I.5.2 La nituration .....  | 15 |
| I.5.3 La carbonituration .....   | 15 |

## **CHAPITRE II : Procédés de soudage**

|   |    |
|---|----|
| II.1. Les procédés de soudage .....                       | 17 |
| II.2. Soudage par résistance par point (RSW) .....        | 17 |
| II.2.1. définition.....                                   | 17 |
| II.2.2. Principe de Soudage par résistance par point..... | 18 |
| II.3. Soudage oxyacétylénique .....                       | 18 |
| II.3.1. définition .....                                  | 18 |
| II.3.2. Principe de Soudage oxyacétylénique .....         | 19 |
| II.3.3. Soudage (OFW) .....                               | 19 |

|  |    |
|--|----|
| II.3.4. Brasage (TS et TB).....  | 20 |
| II.3.5. Coupage (OFC) .....  | 20 |
| II.3.6. Les trois types de flamme pour le soudage oxyacétylénique..... | 21 |
| II.4. soudage à l'arc avec électrodes enrobées (SMAW) .....            | 21 |
| II.4.1.définition.....   | 21 |
| II.4.2. Principe de soudage à l'arc avec électrodes enrobées.....      | 22 |
| II.4.3. Fondant et gaz de protection.....                              | 22 |
| II.4.4. Circuit secondaire Dans le procédé SMAW.....                   | 22 |
| II.5. soudage TIG (pour Tungsten Inert Glas) (GTAW) .....              | 23 |
| II.5.1.définition .....  | 23 |
| II.5.2.Principe de soudage TIG.....                                    | 24 |
| II.5.3. Gaz de protection.....   | 24 |
| II.5.4. métal d'apport .....   | 24 |
| II.5.5. Circuit secondaire .....                                       | 24 |
| II.6. soudages MIG et MAG (GMAW) .....                                 | 25 |
| II.6.1. définition .....   | 25 |
| II.6.2. Principe de soudages MIG et MAG .....                          | 25 |
| II.6.3. Régimes de transfert du métal.....                             | 25 |
| II.6.4. Le transfert par arc pulsé .....                               | 26 |
| II.7. soudage avec fil fourré (FCAW) .....                             | 26 |
| II.7.1.Principe de soudage TIG.....                                    | 27 |
| II.7.2. Soudage sans protection gazeuse.....                           | 27 |
| II.7.3.Soudage avec protection gazeuse .....                           | 28 |
| II.8. soudage au plasma.....   | 29 |
| II.8.1 Gaz utilisés .....  |    |
| II.8.2 Domaines d'application.....                                     | 29 |
| II.9. soudage par faisceau d'électrons .....                           | 29 |

|  |    |
|--|----|
| II.9.1. Principe du soudage par faisceau d'électrons ..... | 29 |
| II.9.2. Domaines d'application .....                       | 30 |
| II.10. soudage par faisceau laser .....                    | 30 |
| II.10.1 Principe .....                                     | 30 |
| II.10.2 Domaines d'application .....                       | 31 |
| II.11 soudage par friction .....                           | 32 |
| II.11.1 Principe .....                                     | 32 |
| II.11.2 Application .....                                  | 32 |

### **Chapitre III : La métallurgie du soudage**

|   |    |
|---|----|
| III.1. Introduction.....  | 34 |
| III.2. Rôle de la métallurgie .....   | 34 |
| III.3. Rôle de la métallurgie du soudage .....  | 34 |
| III.4. comprendre le comportement métallurgique.....                                    | 36 |
| III.4.1. Métal de base (MB).....  | 37 |
| III.4.1. La zone fondue (ZF) .....  | 37 |
| III.4.2. La zone de liaison .....   | 38 |
| III.4.4. La zone affectée thermiquement (ZAT).....                                      | 38 |
| III.5. Généralités sur le soudage multi passe .....                                     | 39 |
| III.5.1. Définition .....   | 39 |
| III.5.2. Mode opératoire de soudage multi passe .....                                   | 39 |
| III.5.2.1 Phénomènes thermiques lors du soudage .....                                   | 40 |
| III.5.3 Cas du soudage multi passe .....  | 42 |
| III.6. Transformations métallurgiques en ZAT .....                                      | 43 |
| III.6.1. Zones de transformation dans la ZAT .....                                      | 43 |
| III.6.2. Cas du soudage multi passe .....   | 45 |
| III.7. Les différences zones .....  | 03 |
| III.7.1. SRCGHAZ ( <i>Sub critically Reheated Coarse Grain Heat Affected Zone</i> ) ... | 46 |

|  |    |
|--|----|
| III.7.2. ICCGHAZ ( <i>Inter critical Reheated Coarse Grain Heat Affected Zone</i> )..... | 46 |
| III.7.3. FGHAZ ( <i>Fine grain Heat Affected Zone</i> ) .....                            | 46 |
| III.8. Influence de la position et distance du point.....                                | 46 |
| III.9. Influence du procédé de soudage et ses paramètres .....                           | 47 |
| III.10. effets métallurgiques du cycle thermique .....                                   | 48 |
| III.10.1. Température des zones atteintes .....  | 48 |

### **Chapitre IV : La métallurgie du soudage**

|  |    |
|--|----|
| IV.1. Introduction.....                                      | 52 |
| IV.2. matériaux.....   | 52 |
| IV.2.1. l'acier inoxydable duplex .....                      | 52 |
| IV.2.2. Les métaux d'apport .....                            | 53 |
| IV.2.3. les paramètres de soudage.....                       | 54 |
| IV.3. Préparation des échantillons et éprouvettes.....       | 55 |
| IV.3.1. prélèvement et réalisation des éprouvettes .....     | 55 |
| IV.4. Caractérisation métallographique .....                 | 56 |
| a. Enrobage.....   | 56 |
| b. Polissage.....  | 56 |
| c. Attaque chimique .....                                    | 56 |
| IV.5. Observation métallographique .....                     | 57 |
| IV.5.1. Examen au microscope optique .....                   | 57 |
| IV.5.1.1 Examen de la zone affectée thermiquement (ZAT)..... | 57 |
| IV.5.1.2 Examen de la zone de liaison .....                  | 58 |
| CONCLUSION.....  | 63 |
| Référence .....  | 64 |

## INTRODUCTION

Le soudage est un mode d'assemblage très fréquent. Le développement sans cesse croissant de nouveaux procédés toujours plus performants permet de garantir des joints soudés de bonne qualité, avec une très bonne reproductibilité. La maîtrise du comportement des structures et des assemblages est une nécessité croissante pour les différents secteurs de l'industrie. La connaissance approfondie des phénomènes intervenants dans le matériau utilisé, et les facteurs influençant son comportement, permet de prévenir des anomalies et de choisir des conditions adaptées à son utilisation.

L'assemblage par soudage est l'un des procédés les plus utilisés dans le monde de l'industrie. Son développement est passé par plusieurs étapes jusqu'aux nouveaux procédés qui sont le MIG, MAG, ASW, soudage par faisceau laser...etc.

Les pièces assemblées sont soumises à des sollicitations tel que la traction, le cisaillement ...etc.

L'étude illustrée dans ce mémoire est composée en quatre chapitres :

- Le premier chapitre, nous abordons une étude sur les aciers.
- Le deuxième chapitre, une généralité sur les procédés de soudage .
- Le troisième chapitre, la métallurgie de soudage.
- Le quatrième chapitre, commence par une présentation des matériaux utilisés lors de cette étude ainsi que les métaux d'apports utilisés pour l'assemblage de ces matériaux. Dans une seconde partie, nous présentons les différentes techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation métallurgique des soudures hétérogènes et homogènes élaborées par procédé TIG.

# Chapitre I

## *Etude sur les aciers*

### **Introduction**

Sur le plan technologique, les aciers sont toujours d'une importance capitale dans l'industrie, presque tous les domaines ; l'électroménager, l'automobile, aérospatiale, ferronnerie...etc. L'histoire de l'évolution technologique des civilisations, est d'ailleurs strictement liée au développement des alliages à base de fer et au degré de facilité de leur élaboration, cette importance technologique repose sur plusieurs facteurs tel que :

- les composés contenant du fer existent en grandes quantités dans la croûte terrestre.
- l'extraction, l'affinage, l'obtention des alliages et la fabrication du fer métallique et des aciers alliés, sont relativement peu coûteux.
- Ils offrent une grande souplesse d'emploi, car on peut le façonner de manière à obtenir une grande variété de propriétés mécaniques et physiques, notamment en recourant aux traitement thermiques et à l'addition d'éléments d'alliage, ce qui permet de les adapter aux exigences de fabrication et d'utilisation les plus divers.

En termes de performance, les constructions en acier offrent une excellente résistance mécanique (résistance à la torsion, traction etc..) et permettent de travailler sous fortes contraintes. L'acier garantit aussi une excellente longévité aux constructions.

On peut néanmoins leur reconnaître quelques inconvénients notamment leur mauvaise résistance à la corrosion, mais à laquelle on peut remédier, par divers traitements de surface (Peinture, Zincage, Galvanisation à chaud...etc.).

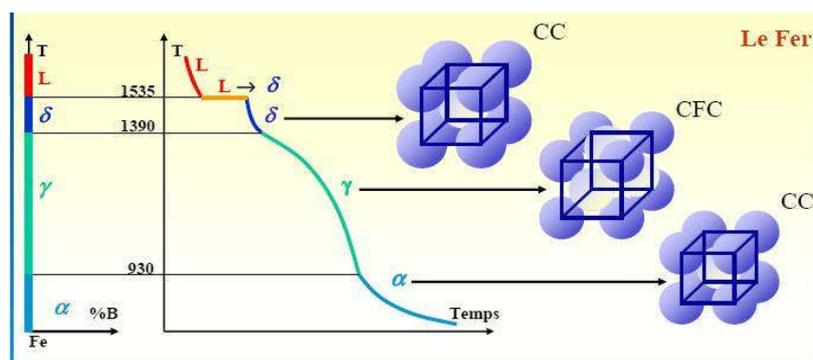
### **I.1 Définition d'un acier**

Un acier est un alliage métallique constitué principalement de fer additionné d'un faible pourcentage titrent moins de 2 % de carbone ,qui contiennent en outre certains autres éléments introduits en faible quantités au moment de leur élaboration. La teneur en carbone à une influence considérable sur les propriétés de l'acier, par apport à la ductilité, il peut subir des changements de forme par compression ou extension à chaud ou à froid. Il est caractérisé, en outre, par une propriété fondamentale qui est la raison du développement considérable de ses emplois : il (prend la trempe), c'est- à-dire qu'il est susceptible d'acquérir une grande dureté lorsqu'il est chauffé à une température suffisamment élevée et refroidi à une vitesse assez grande. [1]

En dessous de 0,008%, l'alliage est plutôt malléable et on parle de fer, au-delà de 2,14% l'inclusion de carbone sous forme graphite, fragilisent la microstructure et on parle de fonte. Entre ces deux valeurs, l'augmentation de la teneur en carbone a tendance à améliorer la résistance mécanique et la dureté de l'alliage, on parle d'aciers (doux, mi-doux, mi-durs, durs, extra- durs). On modifie également les propriétés des aciers en ajoutant d'autres éléments principalement métalliques, et on parle d'aciers alliés. Les aciers au carbone ordinaires ne contiennent que des concentrations résiduelles en impuretés autres que le carbone et un peu de manganèse, et on parle d'aciers non-alliés. De plus, on peut encore améliorer grandement leurs caractéristiques par des traitements thermiques (notamment les trempes) prenant en surface ou à cœur de la matière on parle alors d'aciers traités. En fonction du nombre d'élément d'alliage ajoutés au fer et de leur teneur, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes

## I.2 Constituants des aciers :

Les constituants de l'acier sont alliés au fer qui est un élément métallique de symbole Fe, de numéro atomique 26, de masse atomique 55,85g/mole. Il est solide à la température ambiante, devient liquide à la température 1538°C et gazeux à la température de 2880°C [2]. Il existe sous plusieurs formes cristallines différentes (allotropies) selon la température (Fig. I.1). A basse température, la structure cristalline du fer est du type cubique centrée (CC), c'est-à-dire qu'ils occupent les sommets et le centre d'un cube, avec un paramètre cristallin de 2,9Å, on l'appelle fer- $\alpha$ . Cette structure est stable jusqu'à une température de 910°C. Aux températures comprises entre celle-ci et 1390 °C, le fer- $\alpha$  se transforme en fer- $\gamma$ , de structure cristalline cubique à faces centrées (C.F.C). Au-delà de 1394°C, la structure cristalline stable est de nouveau du type cubique centrée que l'on appelle alors fer- $\delta$ .



**Fig. I.1** Variation de la structure cristalline du fer en fonction de la température

L'existence des deux variétés allotropiques du fer joue un grand rôle pour les propriétés de l'acier. Le fait essentiel réside dans la différence de solubilité du carbone dans chacune de ces formes, cette solubilité est nulle ou extrêmement faible dans le fer- $\alpha$ , alors qu'elle est notable dans le fer- $\gamma$ , voisine de 2% à 1145°C. La solution de carbone dans le fer est appelée austénite, tandis que la solution très diluée (0,0218% à 727°C) dans le fer- $\alpha$  est appelée ferrite. En raison de cette faible solubilité, le carbone forme un troisième constituant le carbure de fer ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) ou cémentite. Ainsi, un acier est constitué à la température ordinaire d'un mélange de ferrite et de cémentite, mais à température plus élevée, le fer s'est transformé en fer  $\gamma$ . Le chauffage destiné à provoquer cette transformation est appelé austénisation. La présence de carbone entraîne d'ailleurs des modifications de la température à laquelle se fait la transformation, ces modifications sont exprimées dans le diagramme Fer-Carbone.

### I.2.1 Diagramme simplifié fer-carbone :

Le carbone a une influence considérable (et assez complexe) sur les propriétés mécaniques des aciers : au-dessous de 0,008 %, l'alliage est malléable et c'est pratiquement de fer pur au-delà de 2,11 %, les inclusions de carbone sont sous forme de graphite fragilisent la microstructure et on parle de fontes. L'augmentation de la teneur en carbone a tendance à améliorer la résistance mécanique de l'alliage.

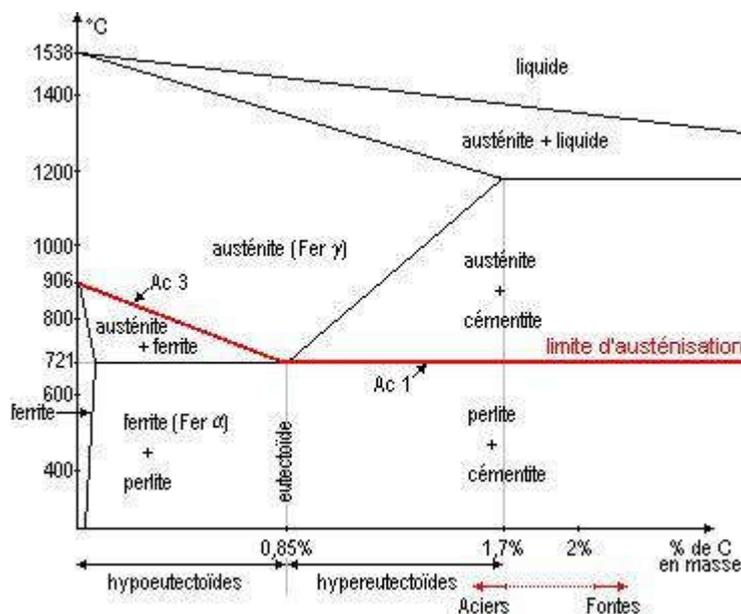


Fig. I.2 Diagramme d'équilibre Fer-Carbone

Le diagramme simplifié représente en fonction de la température et de la teneur en carbone, les domaines d'existence des différents constituants des aciers. Au-dessus de 2% de carbone on parle de fontes, en dessous de 1,7% de carbone, on parle d'acier. La ligne AC3-AC1 dite limite d'austénisation

### II.2.2 Acier eutectoïde (0,77 %C)

Toute l'austénite initiale est précipitée en perlite : un seul constituant de base contenant 0,77 %C.

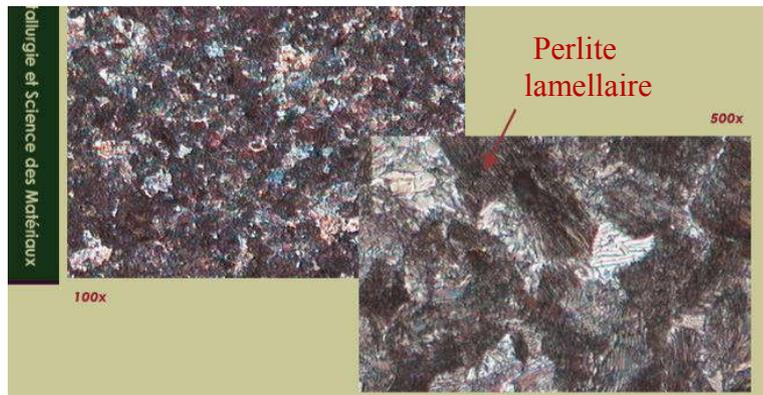


Fig. I.3 Microstructure d'un acier eutectoïde [3]

### II.2.3 Aciers hypoeutectoïdes (0,008 à 0,77 %C)

Ce sont les plus utilisés industriellement ; ils ont deux constituants de base, la perlite et la ferrite. Au refroidissement l'austénite se transforme d'abord en perlite, mais comme il n'y a pas assez d'atomes de carbone pour n'obtenir que de la perlite, il reste toujours une certaine quantité de ferrite dont la proportion est fonction du pourcentage de carbone initial.[6]

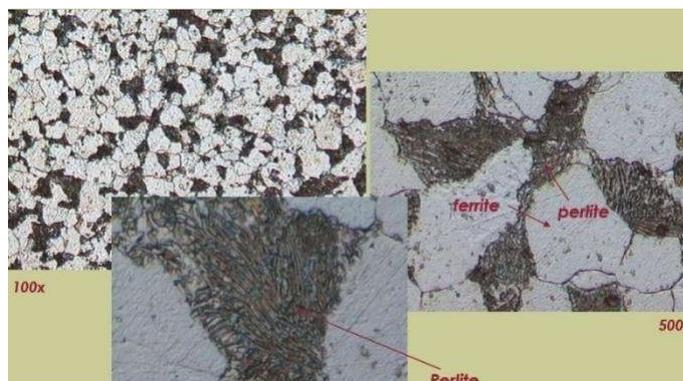


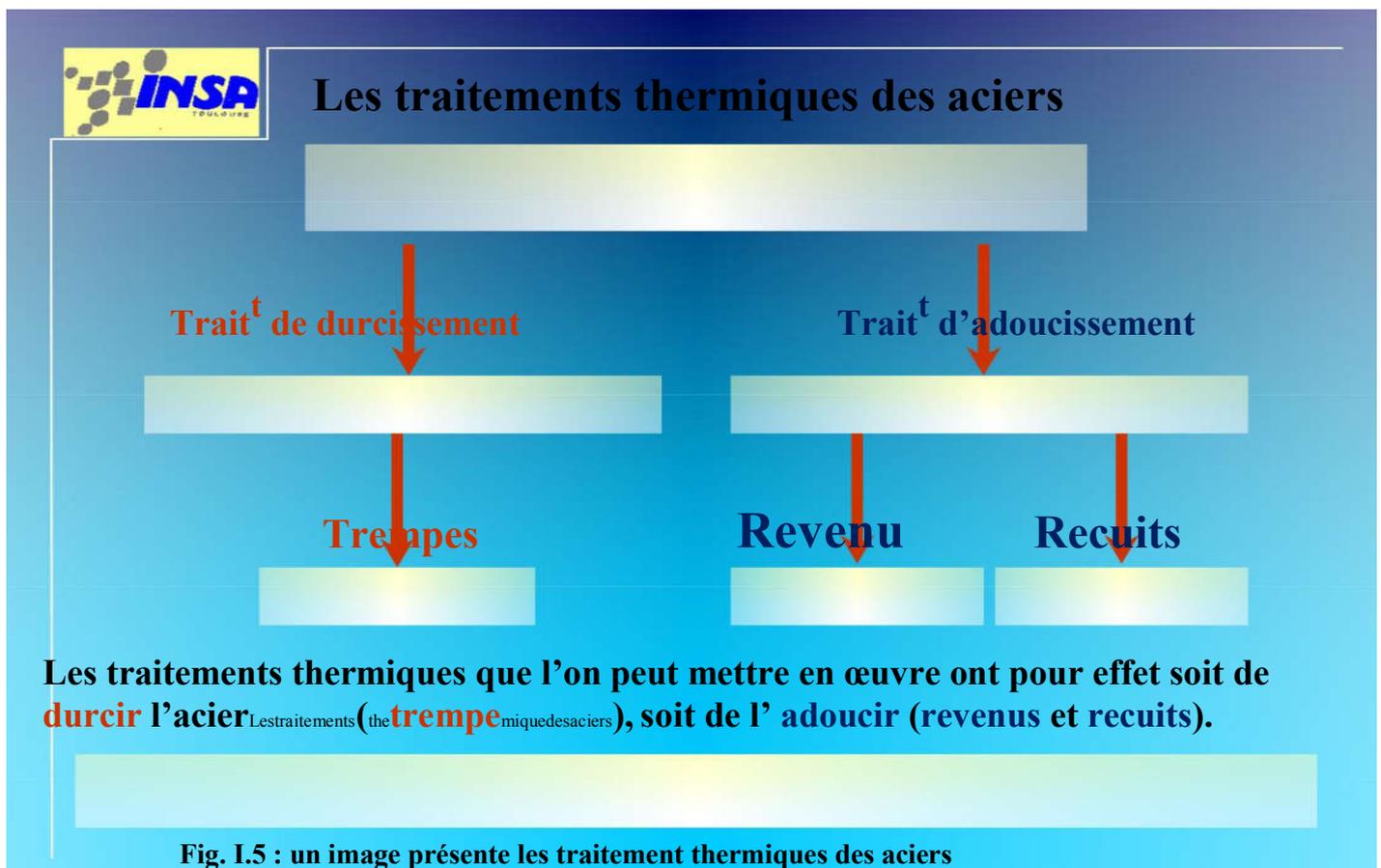
Fig. I.4 Microstructure d'un acier hypoeutectoïde [3]

### II.2.4 Aciers hypereutectoïdes (entre 0,77 et 2,11 %C)

Ils ont deux constituants de base, la perlite et la cémentite. Tout le carbone initial ne pouvant être dissous et consommé par la perlite, les atomes restants s'amalgament avec le fer pour former de la cémentite, dans des proportions qui sont fonction du pourcentage de carbone initial.

### II.3 Traitements thermiques des aciers

modifie la structure interne d'un acier, influençant les propriétés mécaniques et certaines propriétés physiques et chimiques [4]. Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but d'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes : Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique  $R_m$ ,  $R_e$ , Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux ayant subi une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage). En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité [5].



**La Trempe:**

Consiste à chauffer l'acier à une température légèrement supérieure à la transformation et à refroidir celui-ci très rapidement. La trempe peut suivant la composition de l'acier s'effectuer à l'air, dans l'huile, ...

La trempe a pour objet d'empêcher la précipitation du carbone au cours du retour depuis la température d'austénitisation jusqu'à la température ambiante, et cela dans la plus grande partie possible de la section de la pièce. Pour des raisons économiques (économie d'éléments d'alliage), on admet qu'une certaine proportion de bainite puisse se substituer à la martensite dans la mesure où le revenu est réalisé à une température supérieure à 500 °C. Pour un acier donné, les deux facteurs qui vont conditionner le résultat de la trempe sont : la trempabilité de l'acier dans les conditions d'austénitisation adoptées , les conditions de refroidissement de l'austénite [4]



**Fig. I.6 : un image présente de traitement thermique (la trempe)**

**Procédé :** on chauffe la pièce jusqu'à température d'austénitisation suivi d'un maintien en température afin d'homogénéiser la structure, puis on refroidit rapidement (eau, huile...).

La transformation de toute l'austénite en martensite n'est possible que si la vitesse de refroidissement est suffisamment rapide.

Dans le cas contraire il y a formation d'autres constituants plus tendres : bainite, perlite...

**le Revenu :**

Appliqué aux aciers au carbone alliés ou non alliés, après une trempe martensitique et/ou martensito-bainitique, le revenu a pour objet de provoquer une précipitation du carbone sous une forme et dans des conditions contrôlées afin de parvenir au durcissement optimal. Cette opération engendre une évolution structurale depuis l'état métastable obtenu après trempe vers un état plus proche de l'équilibre physico-chimique. Éventuellement, ce revenu peut provoquer la transformation de l'austénite résiduelle en bainite pendant le maintien ou en martensite secondaire au cours du refroidissement final. Les paramètres qui définissent les conditions d'exécution d'un revenu sont :

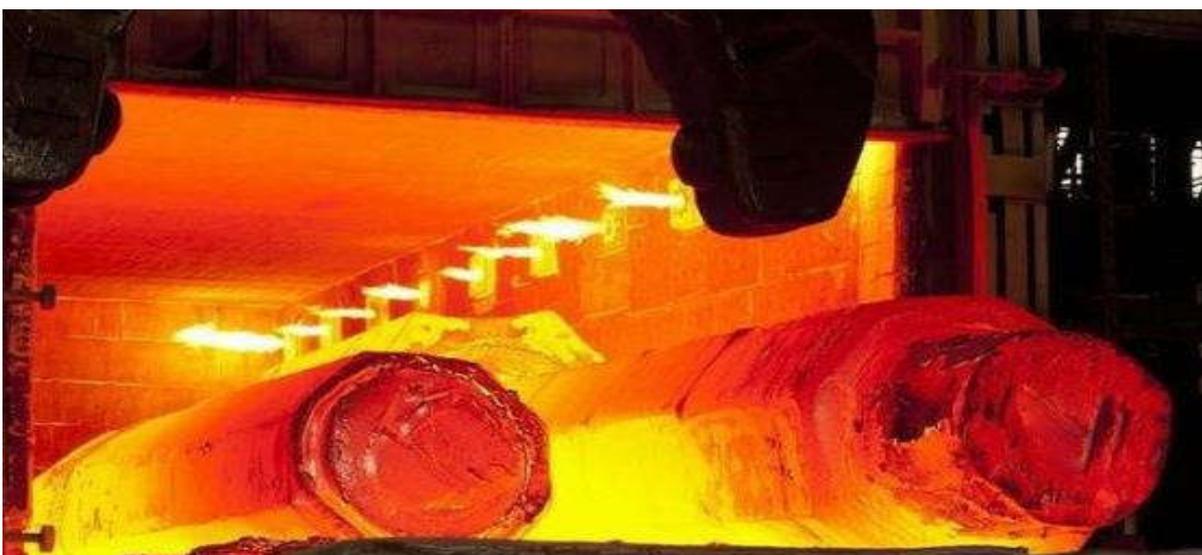
la température de revenu ou température maximale à laquelle est porté l'acier ;

la durée du maintien à la température maximale, c'est-à-dire le temps pendant lequel la température des zones martensitiques et/ ou martensito-bainitiques est maintenue constante et égale à la température de revenu ;

la loi de refroidissement à laquelle la pièce est soumise à la fin du revenu. Pour apprécier ou prévoir le comportement au revenu d'un acier.

Différents type de revenu (après trempe) existe :

- le revenu de détente
- le revenu habituel (ou banal)
- le revenu de durcissement secondaire [5]



**Fig. I.7 : un image présente de traitement thermique-unison tek**

**Le Recuit :**

Le recuit est un traitement qui consiste en premier lieu à mettre une pièce à une température élevée, entre 450 ° et 1100 °. La température est déterminée selon les résultats recherchés. En second lieu, il consiste à garder la pièce chauffée à la température pendant un certain temps, puis à la refroidir convenablement pour obtenir le résultat escompté.

Grâce au recuit, toute déformation du métal est éliminée ou diminuée. Ces contraintes pourraient être des conséquences d'un précédent traitement thermique ou de n'importe quelle action antérieure au traitement en cours. Le recuit permet d'avoir un métal structuré et prêt à un usinage ou une déformation ultérieure. Le recuit intervient avant et après la formation du métal. [6]



**Fig. I.8 : recuit acier et normalisation par induction**

**Procédé :** Le procédé consiste en un chauffage au-dessus de la température d'austénitisation suivi d'un maintien en température pour homogénéiser la structure, puis d'un refroidissement lent.

**Différents recuits :**

- Recuit d'homogénéisation : il détruit l'hétérogénéité chimique des aciers bruts de coulée.
- Recuit de régénération il affine et uniformise le grain du métal.
- Recuit de détente il fait disparaître les contraintes internes après moulage ou soudage.
- Recuit de recristallisation : pour les aciers forgés ou écrouis.
- Recuit complet : il facilite l'usinage et la déformation à froid en faisant disparaître les constituants les plus durs.

**Classification des aciers :**

Les familles d'aciers sont classées en deux critères :

**A- La composition chimique :** nature et teneur des éléments d'alliage, aciers non alliés ( $\leq 1\%$  d'éléments d'alliage), aciers peu alliés (teneur de chaque éléments d'alliage  $\leq 5\%$ ), aciers très alliés.

**B- Propriétés d'usage ou qualité :** aciers de qualité, aciers spéciaux, (aciers d'usage général, aciers de construction mécanique, aciers pour appareils à pression, aciers à outils, aciers inoxydables) C'est ainsi que la norme NF EN 10020 distingue selon des classes de qualité définies dans le Tableau I 1

| Aciers     | Non alliés                   | Alliés                   |
|------------|------------------------------|--------------------------|
| De qualité | Aciers de qualité non alliés | Aciers de qualité alliés |
| Spéciaux   | Aciers spéciaux non alliés   | Aciers spéciaux alliés   |
| Inoxydable |                              | Aciers inoxydables       |

**Tableau I 1** Les différentes classes d'aciers [4]

### I.3.1 Aciers non alliés et aciers alliés

Pour définir ces 2 classes d'aciers, il faut prendre en compte :

- pour un élément d'alliage autre que Mn, la teneur minimale imposée pour l'analyse de coulée ou 70 % de la teneur maximale imposée si seule cette dernière est fixée;
- pour le manganèse, la teneur minimale imposée pour l'analyse de coulée ou la teneur maximale imposée si seule cette dernière est fixée (la limite prévue au tableau suivant est alors portée à 1,80%).

Les limites des teneurs en éléments d'alliage qui séparent le domaine des aciers non alliés du domaine des aciers alliés sont indiquées dans le Tableau : II.2. Un acier est considéré comme allié dès qu'une de ces limites est atteinte

| Élément spécifié            | Limite % |
|-----------------------------|----------|
| Al                          | 0,30     |
| B                           | 0,008    |
| Cr                          | 0,30     |
| Cu                          | 0,40     |
| Mn                          | 1,65(2)  |
| Mo(1)                       | 0,08     |
| Nb(2)                       | 0,08     |
| Ni(1)                       | 0,30     |
| Si                          | 0,60     |
| Ti(2)                       | 0,05     |
| V(2)                        | 0,10     |
| W                           | 0,30     |
| Zr                          | 0,05     |
| Autres éléments(C S P N...) | 0,05     |

**Tableau I 2** Les limites des teneurs en éléments d'alliage

(1)et (2) lorsque ces éléments sont spécifiés par 2 ou 3 ou 4 la valeur limite de la somme est égale à 70 % de la somme des valeurs individuelles. (3) Si Mn est défini par un maximum la limite est 1,80

### I.3.2 Aciers de qualité

Les aciers de qualité sont des aciers pour lesquels il existe, par exemple, des exigences de propriétés spécifiées de ténacité, de grosseur de grain et/ou de formabilité.

**A- Aciers de qualité non alliés** Tous les aciers non alliés qui ne sont pas des aciers spéciaux.

#### A.1 Aciers au carbone pour appareils à pression

Aciers de qualité non alliés (Fe/C ou Fe/C/Mn) auxquels il est demandé de retrouver leur structure d'emploi par normalisation (et éventuellement revenu) après mise en forme à chaud (à l'état austénitique). Ces aciers doivent satisfaire à des exigences particulières relatives à leur résistance à la rupture fragile et, lorsqu'ils sont employés à température supérieure à l'ambiante, à leur limite d'élasticité à chaud et à leur tenue au fluage .

#### A.2 Aciers pour emboutissage et pliage à froid

Aciers de qualité livrés en produits plats auxquels il est demandé de présenter des propriétés particulières de ductilité, d'emboutissage et d'état de surface. En général, les teneurs en éléments interstitiels de ces aciers sont réduites le plus possible (sauf parfois en phosphore ajouté pour augmenter la limite d'élasticité). Parmi ces aciers, on peut classer les aciers pour emballages, aciers de qualité auxquels, outre l'aptitude à l'emboutissage, on demande une propreté inclusionnaire particulière et, dans certain cas, une protection spécifique contre la corrosion (fer blanc et fer chromé notamment).

### B- Aciers de qualité alliés

Aciers qui contiennent des éléments d'alliage mais ne sont pas, en général, destinés à un traitement thermique. Font partie de cette catégorie :

- des aciers à grains fins soudables de construction métallique;
- des aciers pour tôles magnétiques;
- des aciers pour rails, palplanches ou cadres de mine;
- des aciers en produits plats destinés à un formage à froid sévère et contenant des éléments d'affinement du grain tels que B, Nb, Ti, V et/ou Zr;
- des aciers ne contenant comme élément d'alliage que Cu;

– des aciers dits « dual phase » (aciers biphasés ferritiques avec 10 à 35 % de martensite) [4].

### I.3.3 Les aciers spéciaux :

Les aciers spéciaux présentent, par rapport aux aciers de qualité une plus grande pureté, notamment vis-à-vis des inclusions non métalliques. Ils sont généralement destinés à un traitement thermique et se caractérisent par une réponse régulière à ce traitement.

**A- Aciers spéciaux non alliés** : Font partie de cette catégorie : – des aciers avec garantie de résilience à l'état trempé et revenu; – les aciers avec garantie de réponse aux traitements thermiques; – des aciers à teneur faible en inclusions; – des aciers à teneur en S et P ne dépassant pas 0,020 % à l'analyse sur coulée et 0,025 % à l'analyse sur produit; – des aciers dont la résilience KV en long à – 50 °C est supérieure à 27 J sur éprouvettes prélevées en long et 16 J sur éprouvettes prélevées en travers; – des aciers pour réacteurs nucléaires avec  $Cu \leq 0,10 \%$ , Co

$\leq 0,05 \%$  et  $V \leq 0,05 \%$ ; – des aciers ferrito-perlitiques micro-alliés au V et/ou Nb dont la teneur

en carbone n'est pas supérieure à 0,25 %; – des aciers pour armature de précontrainte du béton[4].

**B- Aciers spéciaux alliés** : Tous les aciers alliés qui ne sont ni des aciers de qualité ni des aciers inoxydables. Font partie de cette catégorie : – les aciers de construction mécanique; – certains aciers soudables à grains fins pour appareils à pression; – certains aciers résistant au fluage; – les aciers pour roulement; – les aciers à outils et les aciers à coupe rapide; – des aciers à propriétés physiques spéciales.

**I.3.4 Aciers inoxydables** : Les aciers inoxydables ont été mis au point pour résoudre les problèmes de corrosion humide posés par les alliages ferreux. Développés industriellement à partir du début du vingtième siècle, la croissance de leur production se poursuit régulièrement. Ces aciers inoxydables, pour des raisons précisées ultérieurement, sont définis comme des aciers titrant plus de 10,5 % de chrome, moins de 1,2 % de carbone et contenant éventuellement d'autres éléments d'alliages (norme européenne NF EN 10088-1). Il s'agit donc d'aciers spéciaux très alliés. Dans la normalisation européenne (NF EN 10027) ils sont donc désignés : – Symboliquement par la lettre X suivie de la teneur en carbone multipliée par 100, des principaux éléments d'alliage selon les symboles de la chimie et de leur concentration en pour-cent (par exemple : X6CrNi18-10). Ces dénominations sont précédées de la lettre G pour les produits moulés. À titre d'information, rappelons que cela correspond à l'ancienne dénomination française Z6CN18-10, qui était suivie de la lettre M pour les nuances moulées. – De façon alphanumérique

par le chiffre 1 suivi de deux chiffres indiquant la famille d'acier et d'un numéro d'ordre à deux chiffres. Dans le cas des aciers inoxydables, les familles d'aciers sont toutes de 40 à 49. Leur désignation sera donc toujours du type 1.4XXX (par exemple, 1.4308 = X5CrNi19-10). Dans la normalisation des États Unis que l'on rencontre souvent, les aciers inoxydables : – de type Fe-Cr sont désignés par un chiffre de la série 400 (exemple AISI 430), – de type Fe-Cr-Ni sont désignés par un chiffre de la série 300 (exemple AISI 316). [1]



Fig. I.9 : image présente acier inox 304 ou 316

#### I.4 Traitement de Surface des Aciers : [7]

Suivant l'utilisation de la pièce élaborée, ce sont surtout les propriétés de surface qui prédominent (ex : résistance à l'usure).

Pour préserver les outils et des accessoires de machines de l'usure et des déformations on cherche à réaliser une grande dureté superficielle à ces pièces.

Dans ces cas, le traitement de surface est préféré afin que le cœur de la pièce conserve une bonne ténacité et que la peau soit plus résistante.

Les traitements de surface sont généralement appliqués sur des aciers ordinaires ou des aciers peu chargés en éléments d'addition.

Deux types de traitements de surface peuvent être identifiés :

- les trempes superficielles font modifier la structure de la peau des pièces
- les traitements thermo-chimiques font modifier la composition de la peau des pièces

Remarque : on peut aussi protéger la surface contre la corrosion par :  
Isolation par revêtement étanche, Protection par un métal résistant à l'oxydation, Protection par modification chimique en surface et Protection par électrode de sacrifice.

##### I.4.1 Les trempes superficielles :

Elles consistent à austénitiser rapidement la peau de la pièce suivie d'une trempe. Ce traitement porte sur quelques millimètres d'épaisseur de la pièce.

Les méthodes les plus pratiques pour le chauffage superficiel sont :

- Le chauffage au chalumeau;
- Le chauffage par induction électrique.

Cette dernière technique est plus intéressante car la pénétration de la chaleur peut être réglée avec plus de précision et elle est automatisable.

### I-a) Trempe à la flamme (au chalumeau) :

La surface de la pièce est portée en quelques secondes au-delà de 900°C à l'aide d'un chalumeau ou d'un jeu de brûleurs judicieusement répartis, puis trempée plus ou moins violemment selon l'épaisseur relative chauffée.

La profondeur durcie peut varier entre un millimètre et la pleine section de la pièce (typiquement jusqu'à 75 mm) selon la durée d'interaction de la flamme et l'efficacité du refroidissement vis-à-vis de la trempabilité de l'acier.

Les différents procédés de trempe à la flamme sont soit :

- de type stationnaire
- soit de type au défilé (« de proche en proche »)

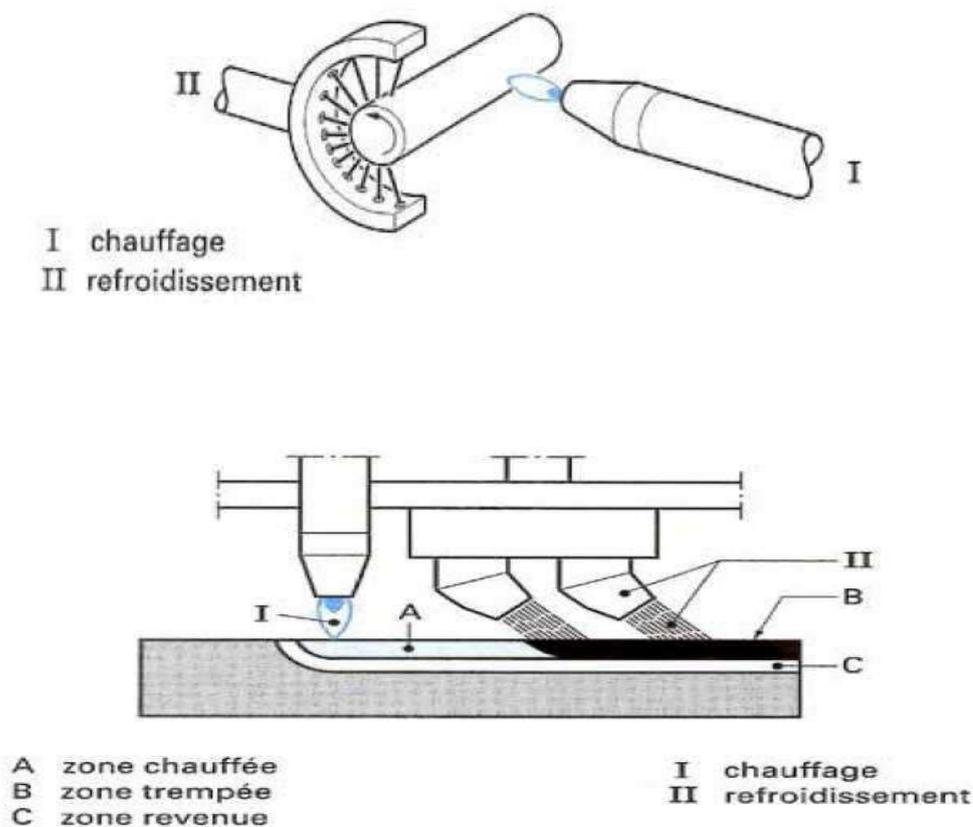


Fig. I.10 : Trempe à la flamme (au chalumeau)

### I-b) Trempe avec chauffage par induction en moyenne ou haute fréquence :

La partie de pièce à traiter est soumise, en statique ou au défilé au champ électromagnétique d'un inducteur alimenté en courant de HF, typiquement quelques kHz à 400 kHz . Il en résulte échauffement de la pièce par effet Joule et conduction thermique

Le refroidissement se fait par trempe sous douche d'eau, celle-ci :

- se substituant à l'inducteur (procédé statique);
- s'opère juste derrière l'inducteur (procédé au défilé).

Il en résulte un durcissement martensitique sur des épaisseurs superficielles ( $\sim 0,5$  à  $5$  mm).

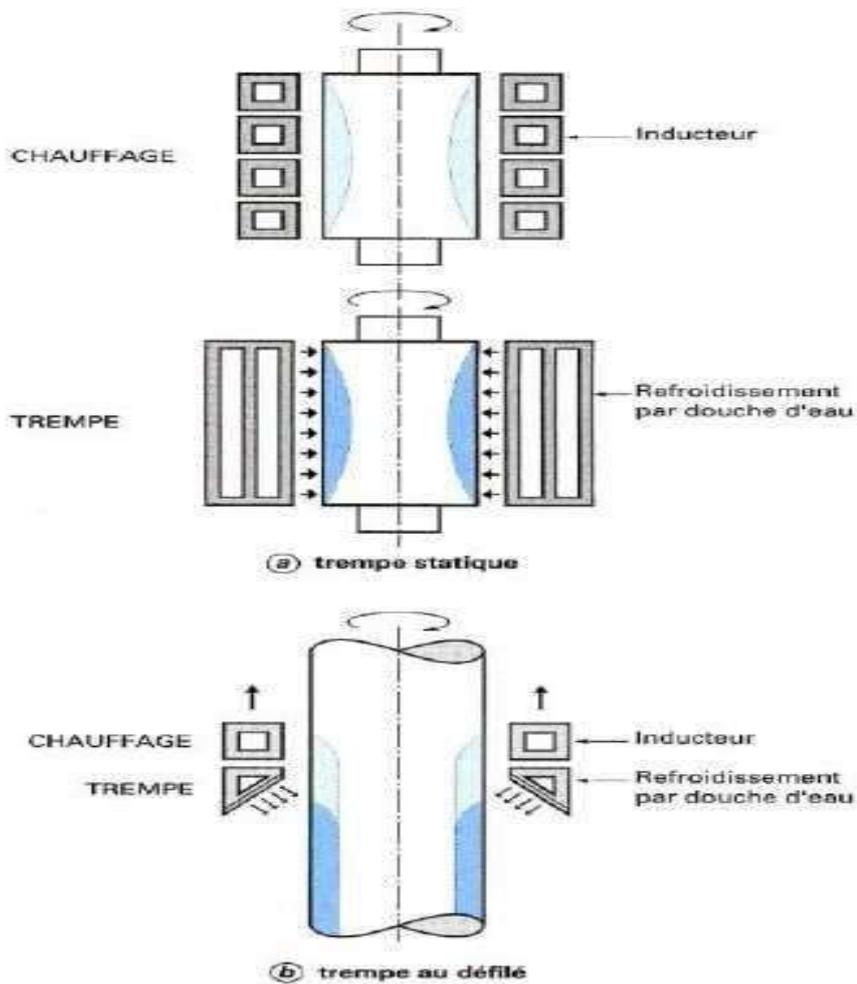


Fig. I.11 : Trempe avec chauffage par induction en moyenne ou haute

## **I.5 Les traitements thermochimiques :**

Ces traitements consistent à modifier la microstructure de la peau de la pièce en réalisant un gradient de composition chimique. Seule la peau durcie par trempe, tandis que le centre de la pièce reste doux et ductile.

Bien souvent, ce gradient de composition s'effectue par diffusion d'un métalloïde (C, N, ou les deux). Les profondeurs atteintes ~ 1 ou 2 mm.

Les traitements les plus connus sont des traitements de cémentation (consiste à faire pénétrer superficiellement du carbone ou de l'azote (ou les 2) dans un acier afin de le transformer en surface en un acier fortement carburé susceptible d'être trempé. On distingue trois types de traitement de surface :

- Carburation (diffusion du carbone)
- Nitruration (diffusion de l'azote)
- Carbonitruration (diffusion des deux)

### **I.5.1 La carburation :**

Les agents de cémentation sont des matières solides, liquides ou gazeuses qui, à des températures du domaine austénitique de l'acier, peuvent libérer du carbone .

### **I.5.2 La nitruration**

La solubilité de l'azote dans le fer  $\alpha$  est de 0,4% à 590°C. Sa mise en solution est réalisée entre 500 et 550°C. Les agents de nitruration le plus couramment utilisé sont l'ammoniac sous forme gazeuse.

Avant de saturer le fer (0.4%) l'azote tend à former des nitrures finement dispersés. Les duretés superficielles obtenues après nitruration sont supérieures à celles obtenues par carburation.

La zone traitée est de faible épaisseur : 0,2 mm pour un traitement de 10h à 525°C et 0,6mm pour 60h à 525°C. Ces faibles épaisseurs sont liées à la température du traitement.

Comme la nitruration s'opère sur du fer  $\alpha$  et que le durcissement n'est dû qu'à la formation de nitrure aucun traitement thermique ultérieur n'est nécessaire.

### **I.5.3 La carbonitruration**

Il s'agit d'une diffusion simultanément de carbone et d'azote en surface. C'est un traitement très proche de la carburation s'effectue sur du fer sous la forme .

Les milieux de carbonitruration sont des bains de cyanures ou des mélanges gazeux.

Les propriétés de la couche traitée sont intermédiaires aux propriétés des traitements de carburation et de nitruration.

## **CHAPITRE II : Procédés de soudage**

## II.1 Procédés de soudage :

les principaux procédés de soudage, très nombreux, sont au centre de ce travail exhaustif :

- le Soudage par résistance par point (RSW)
- la flamme oxyacétylénique (OXW)
- le soudage à l'arc avec électrodes enrobées (SMAW)
- le soudage TIG (pour Tungsten Inert Gas) (GTAW)
- les soudages MIG et MAG (GMAW)
- le soudage avec fil fourré (FCAW)
- le soudage au plasma
- le soudage par faisceau d'électrons
- le soudage par faisceau laser
- le soudage par friction

## II.2 Soudage par résistance par point (RSW) :

### II.2.1 Définition :

Le soudage par point est de loin le plus répandu des deux. Il sert pour l'assemblage de tôles minces destinées à la fabrication de meubles en métal, de boîtiers métalliques, de casiers et d'étagères ainsi que de treillis faits de tiges métalliques (paniers d'épicerie, grilles, présentoirs, etc.). L'industrie de l'automobile fait souvent appel à des robots pour effectuer le soudage par résistance par point. L'assemblage d'un véhicule automobile peut nécessiter de 10 000 à 15 000 points de soudure par résistance. [8]

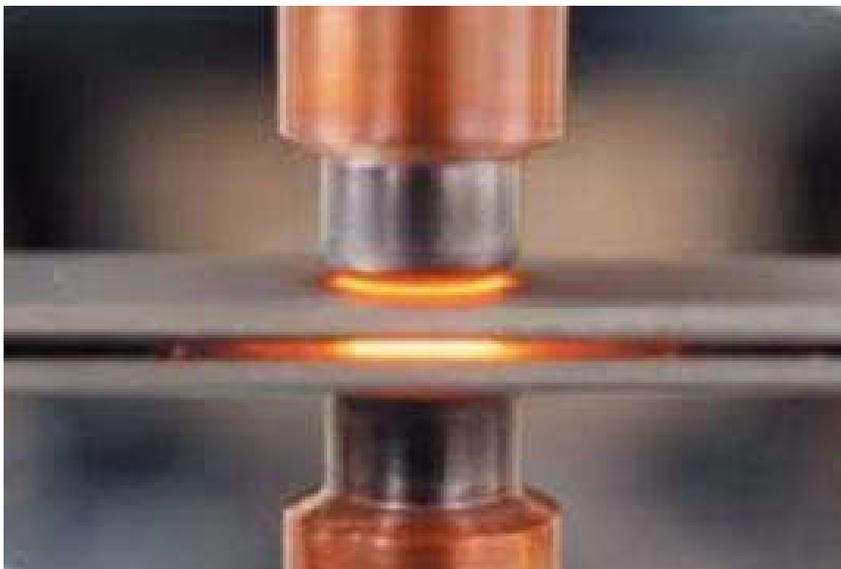


Figure II.1 : Soudage par résistance par point

## II.2.2 Principe de Soudage par résistance par point :

Le procédé de soudage par résistance consiste à faire passer un courant électrique entre deux électrodes sans produire d'arc électrique. Placées de chaque côté des deux pièces minces à fusionner, les électrodes laissent passer le courant, ce qui élève la température et amorce la fusion du métal. Le soudage se produit sous l'effet de la chaleur, du temps et de la pression qu'exercent les électrodes. Le poste de soudage par résistance consiste en un transformateur électrique qui fonctionne sur le courant alternatif (CA); il produit un courant de forte intensité, de plusieurs milliers d'ampères à une faible tension d'environ 10 volts. [8]

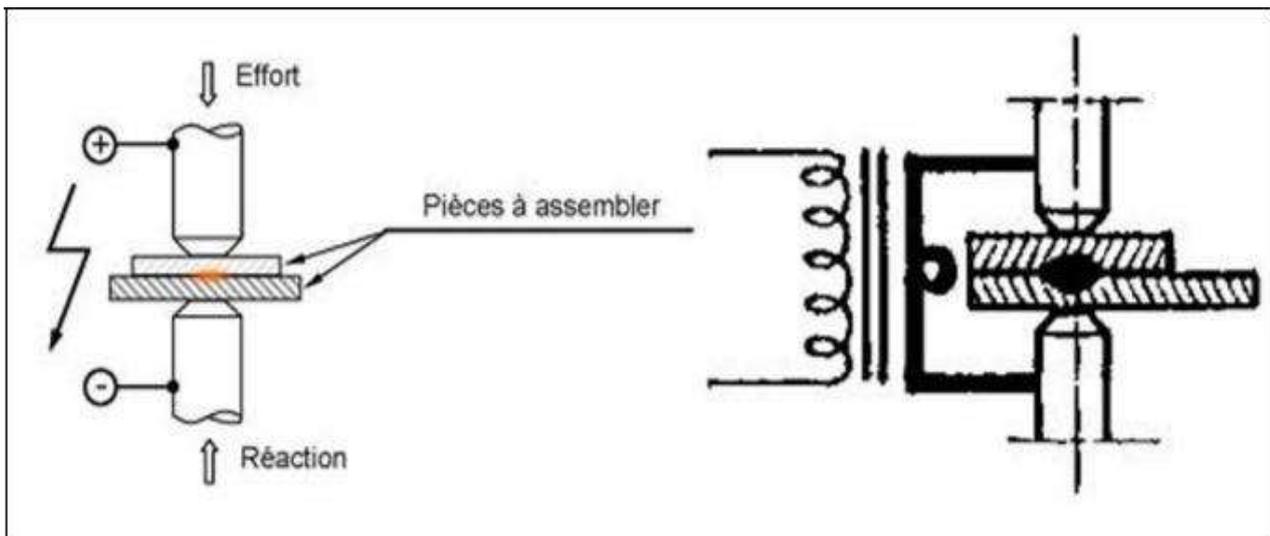


Figure II.2 : principe Soudage par résistance par point

## II.3 Soudage oxyacétylénique :

### II.3.1 Définition :

Le soudage au gaz (oxyacétylénique) est l'un des procédés de soudage les plus anciens et a longtemps été le plus répandu. Beaucoup moins utilisé aujourd'hui, il a toujours le triple avantage de sa polyvalence, de sa simplicité de mise en œuvre et du faible coût du matériel nécessaire. Il convient parfaitement pour les travaux de réparation ou de construction ou encore pour le soudage de tubes et de structures faits de matériaux (comme la fonte) particulièrement sujets à la fissuration, avec des parois de 0,5 à 6 mm d'épaisseur. Il est également très utilisé pour la soudure de métaux non ferreux ainsi que pour le placage ou le rechargement dur, mais aussi pour le coupage, le chauffage et le redressage à la flamme. [9]

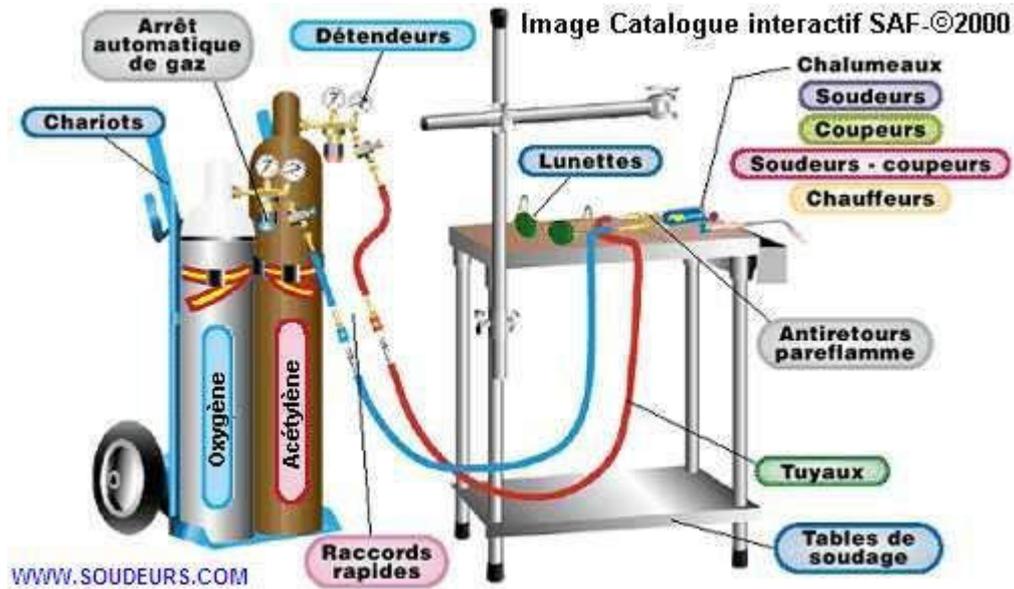


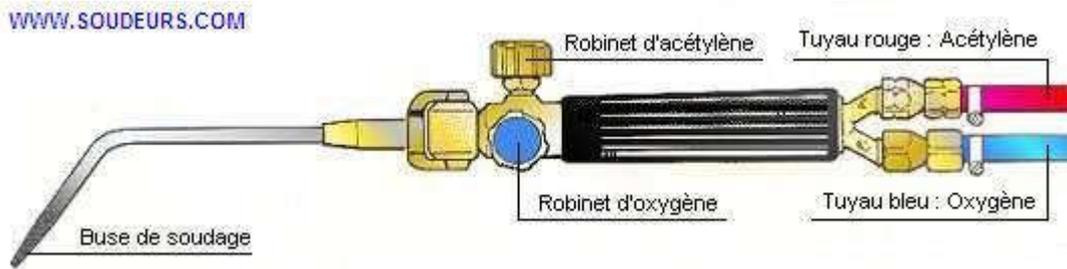
Figure II.3 : Soudage oxyacétylénique

### II.3.2 Principe de Soudage oxyacétylénique: [8]

Ce procédé utilise : l'oxygène et un gaz combustible, le plus souvent l'acétylène ou le propane. La combustion des gaz qui sortent du mélangeur du chalumeau produit une flamme qui peut atteindre des températures de 3 100 °C à 3 500 °C (5 600 °F à 6 330 °F). [8]

### II.3.3 Soudage (OFW) :

Le soudage s'effectue par la fusion des parois des pièces à souder. On pourra ajouter manuellement du métal d'apport à l'aide d'une baguette de soudure. Le soudage à l'oxygaz est peu utilisé dans les applications industrielles, où des procédés beaucoup plus performants le remplacent. Le chalumeau ou la torche est l'appareil qui produit et dirige le jet de gaz enflammé. Il reçoit les gaz et les mélanges selon la proportion voulue. La buse est l'extrémité du chalumeau qui dirige les gaz.



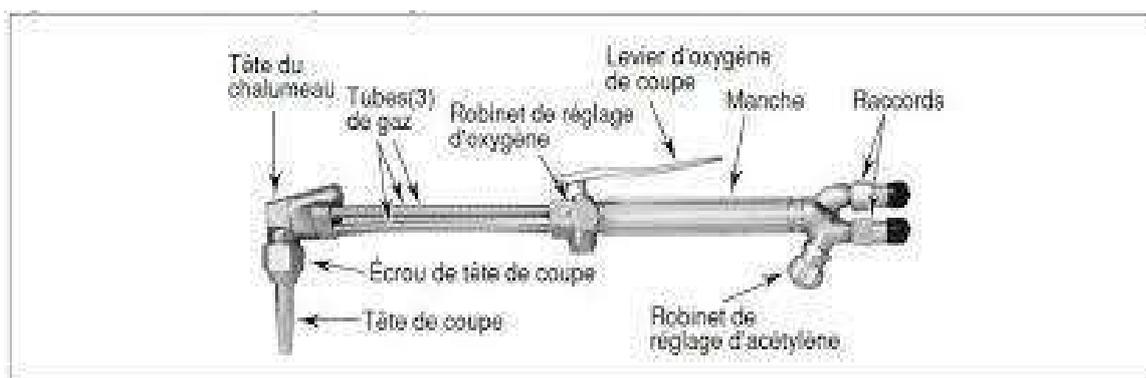
**Figure II.4 : Chalumeau soudeur (OFW)**

### II.3.4 Brasage (TS et TB) :

-Pour le brasage, il n'est pas nécessaire de fondre le métal de base, car la fonte du métal d'apport d'un point de fusion inférieur au métal de base, suffit. On chauffe le métal d'apport et on le laisse couler sur un décapant (flux) appliqué à la surface à souder. On utilise généralement un décapant en pâte qui permet de nettoyer le métal à braser mais qui améliore aussi l'adhérence du bain de fusion. Le brasage au gaz est couramment utilisé en plomberie pour réaliser des joints entre deux canalisations. On s'en sert également pour la réparation d'outils et d'équipements.

### II.3.5 Coupage (OFC) :

Le type d'opérations le plus répandu, est le coupage au chalumeau, qui s'effectue essentiellement sur l'acier doux. Cette méthode consiste à diriger une flamme sur la pièce à couper en y couplant un jet d'oxygène pur, ce qui a pour effet de dégager le métal fondu et de séparer la pièce. Le chalumeau coupeur diffère du chalumeau soudeur en ce qu'une ouverture placée au centre de la buse laisse passer le jet d'oxygène.



**Figure II.5 : Chalumeau coupeur (OFC)**

### II.3.6 Les trois types de flamme pour le soudage oxyacétylénique : [10]

**Flamme neutre ou normale** : c'est la flamme normalement utilisée pour le soudage. Le dard est de couleur

blanc brillant et de forme très nette en sortie de buse. Cette flamme est utilisée pour le soudage de l'acier et des cuivres.

**Flamme oxydante** : c'est une flamme avec un excès d'oxygène. Le panache et le dard sont raccourcis. La flamme émet un sèment. Le panache est plus lumineux. Cette flamme est utilisée pour le soudé-

brasage, le soudage des laitons et du bronze.

**Flamme carburante** : c'est une flamme avec un excès d'acétylène. Le panache et le dard sont augmentés avec des formes irrégulières. Cette flamme légèrement carburante est utilisée pour le soudage des alliages d'aluminium, du plomb, du zinc et des fontes. Une flamme fortement carburante est utilisée pour le revêtement de stellite.

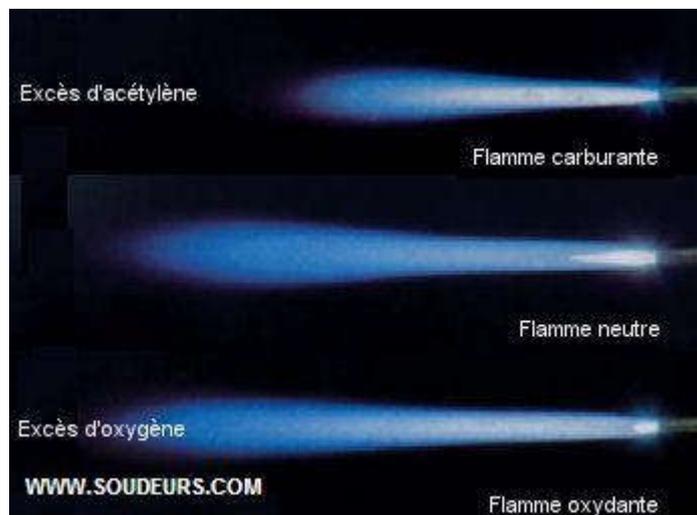


Figure II.6 : Les trois types de flamme pour le soudage oxyacétylénique

## II.4. soudage à l'arc avec électrodes enrobées (SMAW) :

### II.4.1 Définition :

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (SAEE / MMA / SMAW /111) est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'âme métallique de l'électrode et la pièce à souder. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre simultanément et très localement la pièce à assembler, l'âme métallique de l'électrode et l'enrobage pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier protecteur qui se détache plus ou moins facilement. L'enrobage de l'électrode fond avec un léger retard par rapport à l'âme métallique. Un générateur électrique fournit le courant continu ou alternatif avec une intensité variant de 30 à 400 ampères en fonction de différents paramètres comme le diamètre de l'électrode, la

nature de l'enrobage, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler. La tension à vide du générateur ( $U_0$ ) doit être supérieure à la tension d'amorçage (surtout en courant alternatif). Sa valeur doit être comprise entre 40 et 80 volts. [11]

#### II.4.2 Principe de soudage à l'arc avec électrodes enrobées : [8]

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée exige l'utilisation manuelle d'une baguette. Une fois l'arc amorcé, la température très élevée, soit de 5 500 °C à 6 650 °C (9 990 °F à 12 000 °F), fait fondre l'électrode et une partie du métal de base. Le remplacement de l'électrode se fait manuellement.

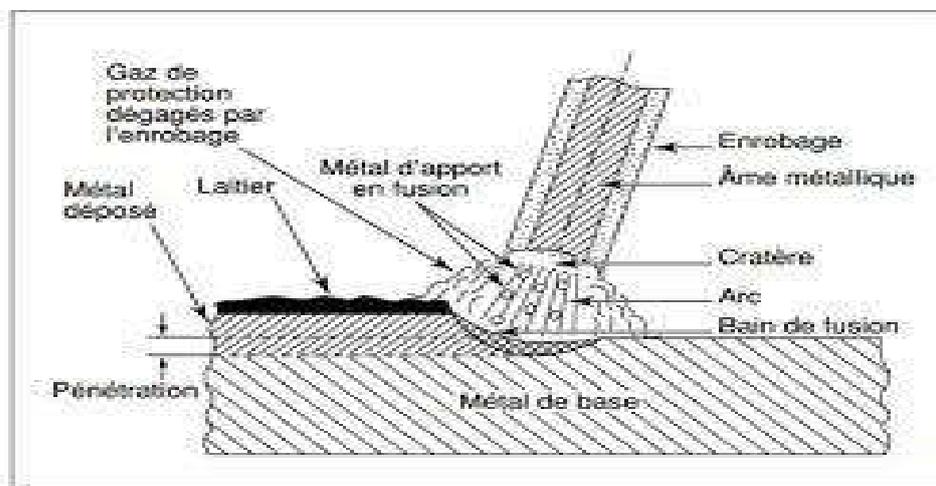


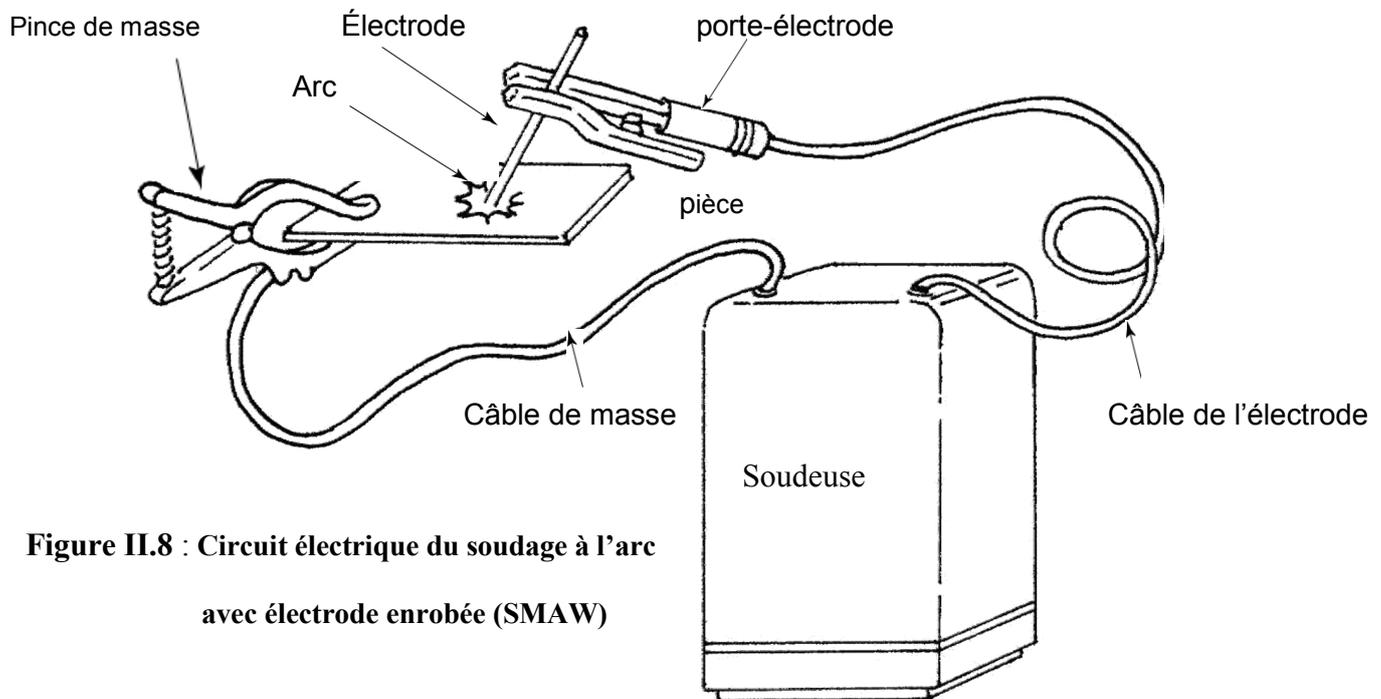
Figure II.7 : Principe du procédé (SMAW)

#### II.4.3 Fondant et gaz de protection :

L'électrode servant au procédé SMAW diffère de celle qu'on utilise dans le FCAW. Dans le SMAW, le métal d'apport qui forme l'intérieur de l'électrode est une âme métallique enrobée de fondant. Sous l'effet de la chaleur, le fondant libère des gaz de protection qui isolent le bain de fusion. Ce procédé présente le même inconvénient que le FCAW : il produit une couverture solide, appelée laitier, qui doit être enlevée, soit à coups de marteau ou à l'aide d'un outil pneumatique. Les gaz de protection ne sont jamais utilisés, car la combustion du fondant produit les gaz nécessaires pour protéger le bain de fusion.

#### II.4.4 Circuit secondaire Dans le procédé SMAW :

la tension de l'arc électrique du circuit secondaire peut varier de 17 à 45 volts et le courant, de 10 à 550 ampères. Ce procédé fonctionne tant sur le courant direct que sur le courant alternatif.



**Figure II.8 : Circuit électrique du soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)**

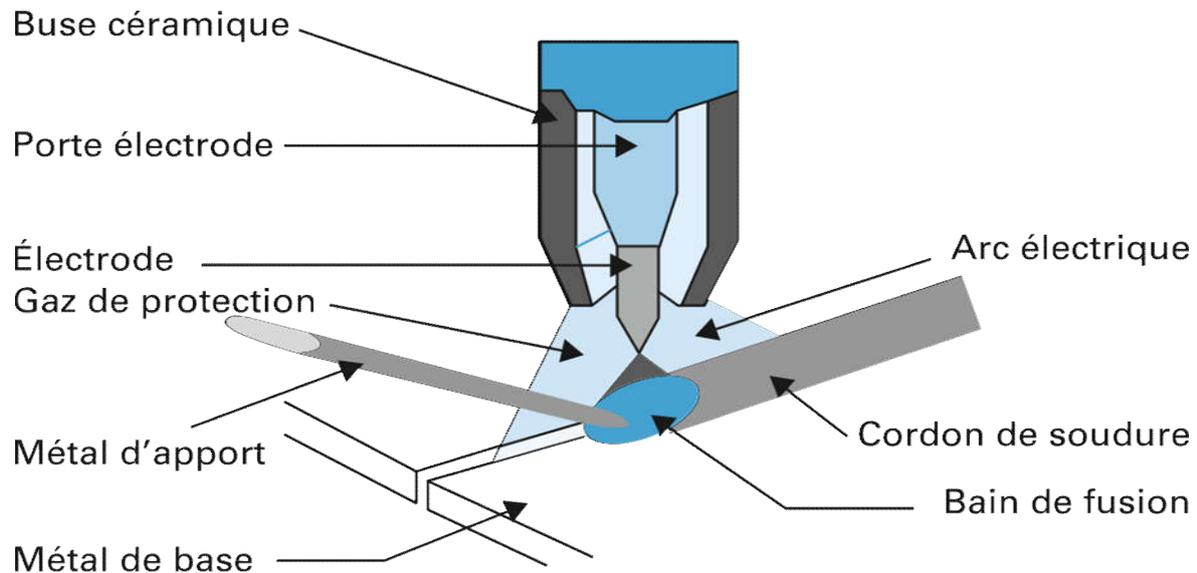
## II.5. soudage TIG (pour Tungsten Inert Gas) (GTAW) :

### II.5.1 Définition :

Le procédé GTAW permet de souder la plupart des métaux et des alliages commerciaux, en particulier l'acier inoxydable et l'aluminium. Il est également utilisé lorsque les soudures sont soumises à des contrôles de qualité stricts. Par exemple, on l'utilisera pour faire la première passe de soudure des tuyauteries à haute pression, puis on appliquera le FCAW ou le GMAW pour la deuxième passe. Le GTAW est un procédé lent, bien adapté à des tôles de moins d'un quart de pouce d'épaisseur.

### II.5.2 Principe de soudage TIG (pour Tungsten Inert Gas) (GTAW) :

Par définition, le terme (TIG) est l'abréviation de (Tungstène InertGas) et sert à désigner le procédé de soudage en atmosphère inerte avec électrode de tungstène. Aussi dans les pays anglo-saxons, on le désigne également par (G.T.A.W) gas tungstène arc welding) (Fig.5.). L'appareillage comporte une source de courant alternatif ou continu, un dispositif d'amorçage, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires[12]. A l'aide d'un courant électrique approprié dont la nature varie avec celle du métal de base, on fait jaillir dans une veine de gaz inerte (argon ou mélange gazeux) un arc électrique entre une électrode de tungstène (infusible) et la pièce à souder. La chaleur dégagée par cet arc fait fondre localement la pièce ainsi que le métal d'apport (éventuel) formant ainsi le joint soudé après refroidissement. Ce gaz inerte généralement à base d'argon ou d'hélium isole de métal en fusion, les zones chaudes environnantes et évite toute oxydation de l'électrode au tungstène[13]



Extrait de : TIG - soudage à l'arc sous protection gazeuse avec électrode non fusible.  
 Ref: BMT733, F. PAILLARD - Techniques de l'ingénieur (2017).  
 Copyright © 2017 | Techniques de l'ingénieur | tous droits réservés

**Figure II.9 : Principe de soudage TIG.**

### II.5.3 Gaz de protection :

Des gaz inertes comme l'hélium, l'argon ou un mélange des deux sont souvent utilisés pour protéger le bain de fusion.

### II.5.4 métal d'apport :

le soudeur tient la baguette de métal d'apport d'une main et la torche de l'autre. L'électrode de tungstène sert à orienter le courant électrique. Toutefois, à force de toucher le métal de base pour amorcer l'arc électrique, la pointe de l'électrode s'arrondit et le soudeur doit l'aiguiser; c'est pourquoi certains optent pour une amorce à haute fréquence de façon à réduire la fréquence de l'aiguisage. La pointe des électrodes est généralement aiguisée à l'aide d'une meule d'établi ou, dans certains cas, par aiguisage chimique. Une pointe bien aiguisée permet une plus grande précision et une soudure de meilleure qualité.

### II.5.5 Circuit secondaire :

L'ampérage du circuit secondaire varie de 1 à 500 ampères en courant direct et de 5 à 500 ampères en courant alternatif, tandis que le voltage s'ajuste automatiquement au poste de soudage.

## II.6. soudages MIG et MAG (GMAW) : [14]

### II.6.1 Définition :

Ces deux procédés s'appliquent au soudage des métaux ferreux et non ferreux.

Les symboles MIG et MAG ont été adoptés par l'Institut international de la soudure. Ils sont par conséquent d'un emploi universel.

-MIG (Métal inerte gaz) : pour le soudage sous gaz inerte, avec fil électrode consommable.

-MAG (Métal actif gaz) : pour le soudage sous gaz actif  $\text{CO}_2$  ou plus souvent argon +  $\text{CO}_2$  avec fil électrode consommable.

### II.6.2 Principe de soudages MIG et MAG (GMAW) :

Ce type de soudage est un procédé dans lequel la fusion du métal destiné à former la soudure est produite principalement par la chaleur d'un arc établi et maintenu entre un fil électrode consommable et la pièce à souder ( Fig. II.10 ).

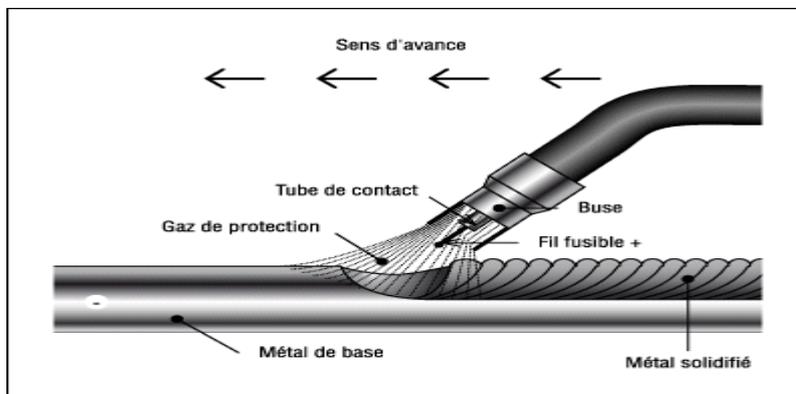


Figure II.10 : Principe de soudage MIG et MAG

Le fil est dévidé automatiquement à vitesse convenable, afin de compenser sa fusion et maintenir la longueur d'arc optimale.

L'opération peut s'effectuer avec ou sans l'intervention d'un flux gazeux. Dans les deux cas, le soudeur conserve en permanence le contrôle visuel de l'arc et du bain.

Selon la nature du gaz de protection employé, le procédé GMAW se divise en deux catégories et est désigné par un acronyme spécifique. Ainsi, on distingue :

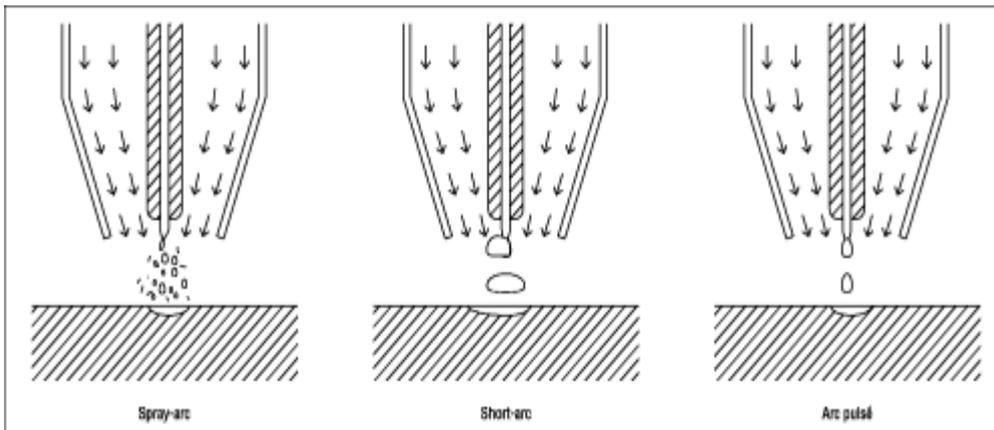
-Le procédé MAG (Métal Active Gaz) qui utilise un gaz actif. Il peut s'agir de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ), d'un mélange d'argon et de gaz carbonique ( $\text{Ar-CO}_2$ ) ou d'un mélange d'argon et d'oxygène ( $\text{Ar-O}_2$ ).

- Le procédé MIG (Métal Inerte Gaz) qui emploie un gaz inerte, à savoir de l'argon ( $\text{Ar}$ ), de l'hélium ( $\text{He}$ ) ou un mélange d'argon et d'hélium ( $\text{Ar-He}$ ).

### II.6.3 Régimes de transfert du métal :

Suivant l'importance des courants, des tensions utilisées ainsi que des gaz de protection il a été mis en

évidence trois principaux régimes de transfert du métal en fonction de la fusion du fil et du dépôt de métal constituant la soudure ( Figure II.11) :



**Figure II.11 : Les trois principaux régimes de transfert du métal**

### II.6.3.1 Le régime de forte intensité (transfert par pulvérisation axiale) appelé spray-arc :

Le métal est transféré sous la forme d'une pulvérisation de fines gouttelettes, d'un diamètre nettement moindre que celui du fil. Ce type de régime assure de grandes vitesses de soudage, d'appréciables pénétrations et un taux de dépôt élevé. Mais le bain est trop chaud et trop fluide, il interdit donc le soudage en position et celui des tôles fines. Ce régime fait appel à des courants de soudage importants (intensité supérieure à 200 A) et des tensions de 25 à 35 V.

### II.6.3.2 Le régime de faible intensité (transfert par courts-circuits successifs) appelé également short-arc :

Ce procédé se distingue suffisamment du précédent car ce régime est caractérisé par l'établissement d'une succession de courts-circuits (60 à 200 par seconde). Les intensités mises en œuvre sont relativement faibles, 30 à 200 A, et les tensions d'arc varient entre 14 et 20 V.

Le fil plonge périodiquement dans le bain de fusion. L'augmentation du courant provoque le court-circuit et la fusion de l'extrémité du fil. Ce mode de transfert est caractérisé par des projections parfois très abondantes et des risques de collage du fil lors du court-circuit. On l'utilise pour le soudage de faibles épaisseurs, il facilite les travaux en position et permet l'exécution de passes de fond de chanfrein sans utiliser de support à l'envers.

### II.6.4 Le transfert par arc pulsé :

Ce nouveau mode de transfert est consécutif à l'apparition de nouvelles sources de générateurs MIG. On se situe dans la plage intermédiaire des tensions (20-26 V), avec un arc naturellement instable. Mais la superposition d'un courant pulsé permet une stabilisation de l'arc et un transfert régulier des gouttelettes métalliques. Cette technique (développée vers 1965) assure une excellente pénétration, améliore l'aspect et la compacité du dépôt et supprime les projections. Ces avantages amènent à considérer l'utilisation du

procédé MIG pour les productions de haute qualité et représentent un progrès indéniable pour la robotisation en soudage.

## II.7 soudage avec fil fourré (FCAW) :

### II.7.1 principe :

Avec ou sans protection gazeuse, ce procédé de soudage s'apparente au soudage MIG ou MAG à ceci près que le fil d'apport est tubulaire et rempli d'un flux comparable à la poudre constituant l'enrobage d'une électrode par son rôle et ses propriétés. Il existe deux modes de fabrication de fils fourrés, l'étirage (fils tubulaires) ou le formage au train de galets (fils plissés ou sertis).

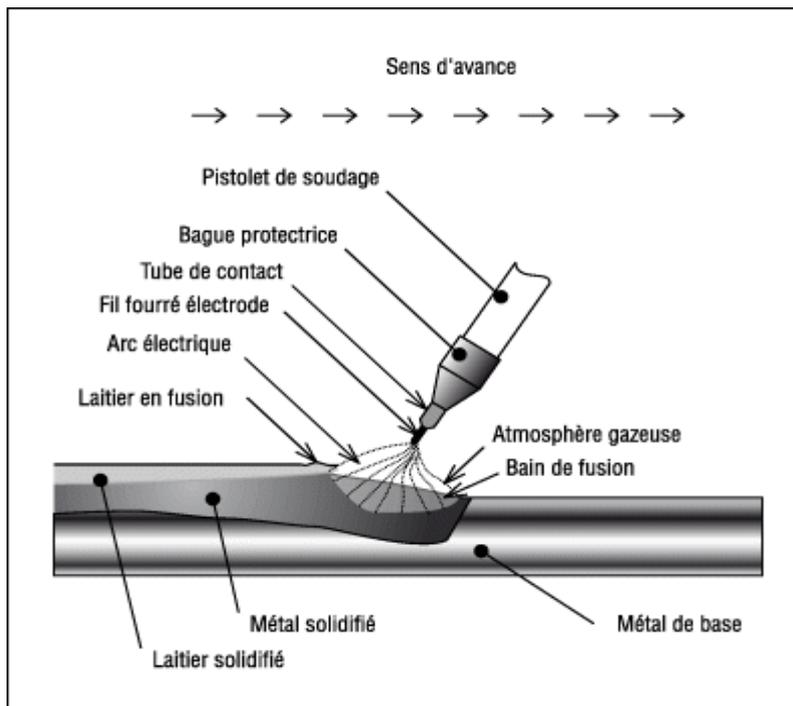


Figure II.12 : Principe de soudage avec fil fourré (sans protection gazeuse)

### II.7.2 Soudage sans protection gazeuse :

L'emploi de fils fourrés ne nécessitant pas de protection gazeuse tend actuellement à se développer en raison des avantages qui en résultent. En effet, il n'y a plus de circuits de gaz de protection et il est possible d'adopter de grandes longueurs de fil sorti à l'extrémité du guide-fil, ce qui permet de souder dans des chanfreins très fermés.

La protection du bain de fusion est assurée par le laitier et par la formation d'une atmosphère protectrice produite par le flux formé à l'extrémité même du fil-électrode. Le volume de fumées dégagées par ce procédé étant conséquent, des dispositifs de captation et d'extraction des fumées sont nécessaires. N'ayant plus le souci de ne pas perturber l'écoulement du gaz de protection de l'arc de soudage, des essais réalisés avec des torches aspirantes ont donné toute satisfaction.

### II.7.3 Soudage avec protection gazeuse :

D'un point de vue technique, les soudures réalisées avec un fil-électrode fourré se révèlent de bonne qualité, avec des vitesses de dépôt élevées et une pénétration importante. Les meilleurs fils fourrés possèdent des caractéristiques mécaniques égales à celles des fils pleins. D'un point de vue opératoire, ils sont attrayants par la forte diminution des risques de collage et la facilité du soudage en position qu'ils procurent. Enfin économiquement, les fils fourrés procurant un taux de dépôt une fois et demie supérieur à celui du procédé avec fil plein et ceci quel que soit le facteur de marche, ils contribuent à diminuer le coût du poste le plus onéreux, c'est-à-dire la main-d'œuvre.

Les bonnes performances du courant pulsé en soudage MAG avec fil plein ont incité à explorer cette voie avec le fil fourré. Avec fil plein en effet, les transferts de métal sont très stables, les projections inexistantes, et la soudabilité opératoire est améliorée en toutes positions, diminuant notablement les risques de collage.

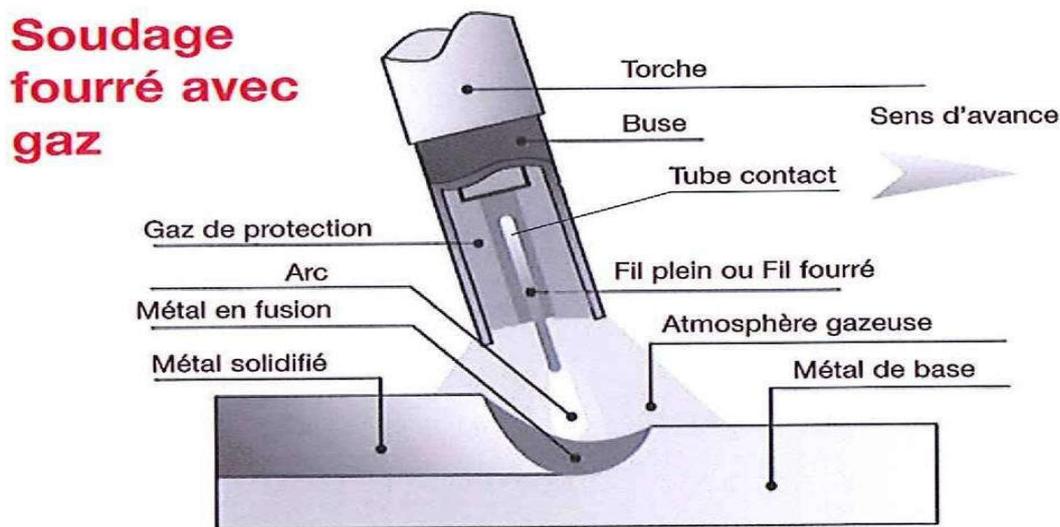
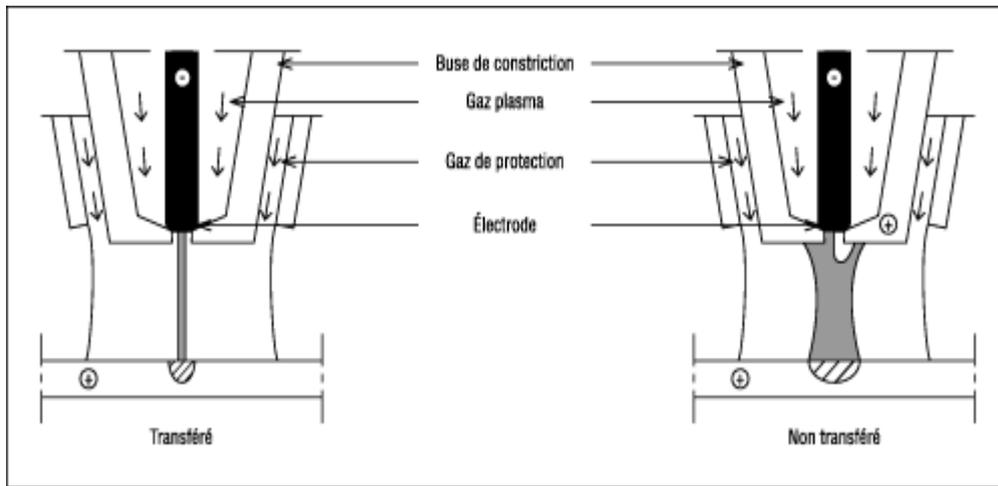


Figure II.13 : Principe de soudage avec fil fourré (avec protection gazeuse)

### II.8.1 soudage au plasma :

#### Définition :

Le mot plasma désigne une atmosphère gazeuse ionisée (donc conductrice) à haute température et globalement neutre. On désigne par soudage au plasma un procédé dérivé du TIG et caractérisé par un arc colonnaire de très forte densité énergétique résultant de la constriction par effets thermomécanique et électromagnétique de la colonne gazeuse présente à l'extrémité de l'électrode de tungstène. Les températures ainsi atteintes sont très élevées (20 000 °C) (Figure II.14 ).



**Figure II.14 : Soudage au plasma**

### II.8.1 Gaz utilisés :

Pour souder, il est nécessaire d'utiliser un gaz « plasmagène » (argon, hélium, mélanges argon-hydrogène ou argon-hélium) et un autre gaz de protection généralement composé d'un mélange d'argon-hydrogène qui joue le même rôle qu'en soudage TIG.

### II.8.2 Domaines d'application :

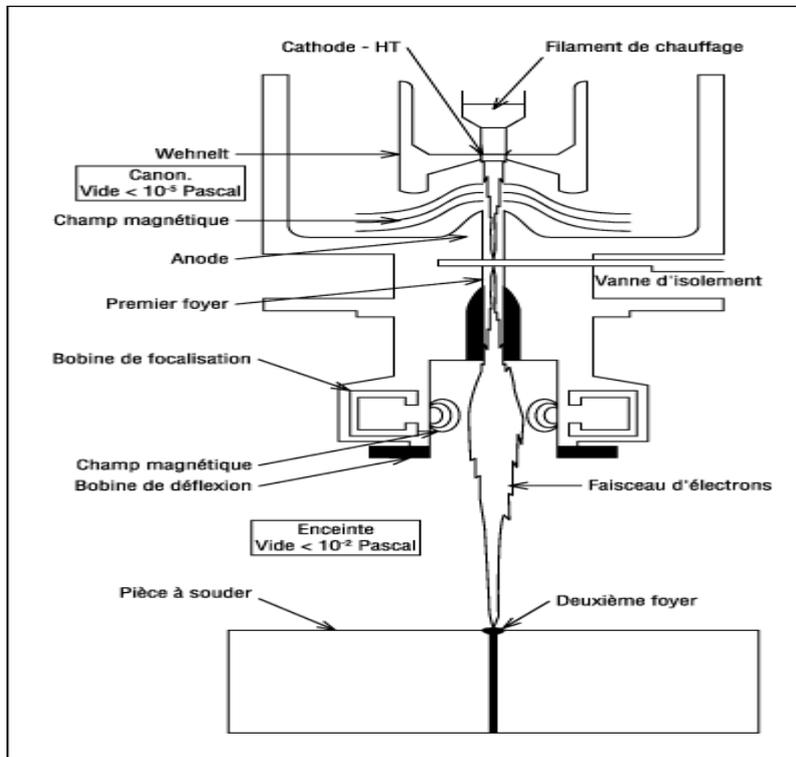
Ce type de soudage à forte énergie est employé essentiellement en automatique et peut souder des pièces d'épaisseur allant jusqu'à 10 mm, alors que le soudage à faible énergie « mini ou micro-plasma » est plutôt réservé aux tôles fines d'épaisseurs comprises entre 1/100 et 8/10 mm et peut être soit manuel, soit automatique.

Le soudage avec métal d'apport nécessite un dispositif de dévidage annexe. Tous les matériaux soudables par le procédé TIG peuvent être soudés avec une torche plasma sauf l'aluminium.

## II.9 soudage par faisceau d'électrons :

### II.9.1 Principe du soudage par faisceau d'électrons :

Cette technique consiste à utiliser, dans le vide ( $10^{-2}$  à  $10^{-5}$  Pascal), un faisceau d'électrons que l'on focalise sur le joint à souder. L'énergie cinétique des électrons est transformée en énergie calorifique au moment de leur impact sur les pièces, provoquant ainsi la fusion ( Figure II.15 ).



**Figure II.15 : Soudage par faisceau d'électrons – Schéma de principe**

Le vide régnant dans les chambres de soudage confère aux assemblages une excellente qualité compte tenu qu'il entraîne un dégazage du métal en fusion et élimine ainsi les gaz occlus. Il n'y a pas d'oxydation superficielle des métaux.

La très grande concentration d'énergie du faisceau d'électrons (de 25 à 50 kW par mm) qui agit plus rapidement que la diffusion de la chaleur à travers le métal, permet d'obtenir une soudure à bords sensiblement parallèles avec un rapport pénétration/largeur pouvant atteindre 40. Le métal fond. Il se forme un trou qui suit le faisceau et se referme derrière lui par les forces tensio-superficielles.

La zone affectée par la chaleur est plus faible que dans tout autre procédé et les déformations sont pratiquement nulles.

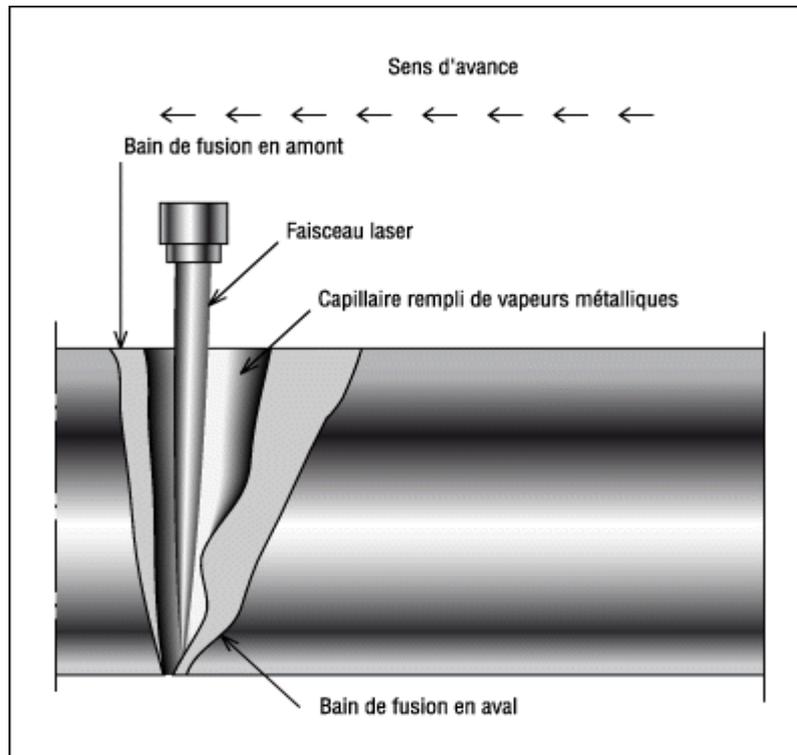
### II.9.2 Domaines d'application :

Grâce à ces propriétés, ce procédé peut s'appliquer au soudage des pièces préusinées (industries mécanique, automobile, aéronautique, nucléaire) pour une gamme d'épaisseurs variant de quelques centièmes de millimètres à 300 mm environ, pratiquement pour tous les métaux et particulièrement ceux sensibles à l'oxygène. Il est possible d'assembler plusieurs pièces différentes à l'aplomb les unes des autres.

## II.10 soudage par faisceau laser :

### II.10.1 Principe :

Le soudage laser, comme le soudage par faisceau d'électrons, fait partie des procédés de soudage dits « à haute énergie » ( Figure II.16).



**Figure II.16: Soudage par faisceau laser**

Comme pour le découpage laser, le soudage est une source de lumière monochromatique cohérente permettant d'obtenir des densités d'énergie suffisantes pour provoquer localement la fusion ou la volatilisation de la plupart des matériaux sur lesquels il est concentré au moyen d'une lentille dite « de focalisation ». Cette concentration du faisceau permet d'obtenir au point d'impact des densités de puissance supérieures au  $\text{MW/cm}^2$ .

Contrairement aux procédés conventionnels, les procédés à haute énergie ne réalisent pas la fusion des matériaux à souder par transfert thermique de la surface vers l'intérieur de la pièce mais bénéficient de la formation d'un capillaire rempli de vapeurs métalliques. La formation de ce capillaire permet donc un transfert direct de l'énergie au cœur de la matière, permettant ainsi l'obtention de cordons de soudure beaucoup moins larges que pénétrants.

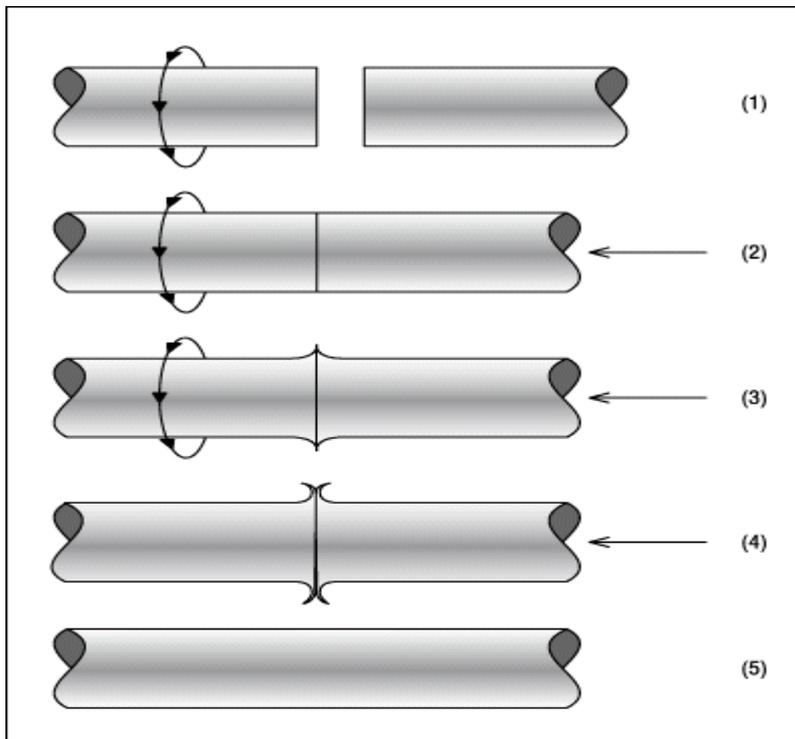
### II.10.2 Domaines d'application :

Ce procédé est moderne et utilisé industriellement, exclusivement en automatique pour le soudage de pièces ne devant pas supporter des effets thermiques importants. En effet, ce procédé limite les déformations ainsi que les transformations métallurgiques. Il est employé sur des pièces de 0,5 à 5 mm d'épaisseur et pour des puissances dépassant 10 kW des épaisseurs supérieures à 10 mm.

## II.11 soudage par friction :

### II.11.1 Principe :

Le principe du soudage par friction consiste à transformer l'énergie cinétique d'une pièce mise en rotation, en énergie calorifique produite par friction à l'interface des éléments à assembler (Figure II.17).



**Figure II.17 : Principe de soudage par friction**

Les pièces, généralement de révolution, sont serrées l'une contre l'autre, l'une est mise en rotation de sorte que le frottement engendre à l'interface la chaleur nécessaire au soudage. Quand la région du joint devient suffisamment plastique sous l'effet de l'élévation de température, on arrête la rotation et on augmente l'effort axial pour forger. Le cycle est le suivant :

- 1-Une des pièces est en rotation et l'autre est fixe.
- 2-Les deux pièces sont mises en contact avec une pression axiale.
- 3-La pression augmente et l'interface est amenée à l'état plastique.
- 4-La rotation est arrêtée et on applique une pression supplémentaire de forgeage.
- 5-Reste à enlever le bourrelet par tournage si nécessaire.

### II.11.2 Application :

Les particularités de ce mode de soudage sans fusion ni dilution font qu'il permet l'assemblage de matériaux métalliques pour lesquels les autres procédés entraînent des difficultés d'ordre métallurgique. C'est aussi le procédé qui permet la réalisation d'une soudure autogène par excellence.

## **CHAPITRE III: la métallurgie du soudage**

### III.1 Introduction :

Le soudage est également une opération de micro-métallurgie consistant à exécuter un cordon fondu liant les bords de deux pièces; on le dit homogène quand ces deux pièces, ainsi que l'état du métal d'apport du joint, ont une composition chimique identique ou voisine, et hétérogène dans les autres cas. Il constitue un moyen privilégié d'assemblage pour toute construction faisant intervenir des matériaux métalliques. Son but est d'assurer la continuité de la matière à assembler. Dans le cas des métaux, cette continuité est réalisée à l'échelle de l'édifice atomique.

la métallurgie la métallurgie est une science ancienne qui a débuté lorsque nos ancêtres ont commencé à utiliser des outils en métal il y a des milliers d'années. elle a parcouru un long chemin depuis que les hommes des cavernes ont découvert que lorsqu'on chauffait des pierres, des grumeaux sombres restaient dans le foyer. ces grumeaux étaient durs et solides et ils ne savaient pas pourquoi - la magie noire était née. aujourd'hui, les métallurgistes explorent les structures atomiques des métaux. la métallurgie du soudage est la dernière application de la métallurgie. [15]

D'une manière tout à fait générale, les caractéristiques mécaniques d'un acier résultent de sa structure et de sa composition chimique. Pour une structure donnée, la composition chimique influence les propriétés mécaniques par l'effet des éléments en solution solide.

### III.2 Rôle de la métallurgie :

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

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

Aussi le rôle principal de la métallurgie est-il de comprendre le fonctionnement d'un matériau, sa structure métallurgique , afin de maîtriser ses propriétés . [16]

### III.3 Rôle de la métallurgie du soudage

- Lors d'une opération de soudage, en terme métallurgique, tout est remis en question; les

structures des pièces à assembler tendent à évoluer lors de soudage. En effet, dans la plupart des cas, chauffés puis refroidis par la source de chaleur de soudage, les matériaux assemblés subissent un nouveau traitement thermique.

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

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

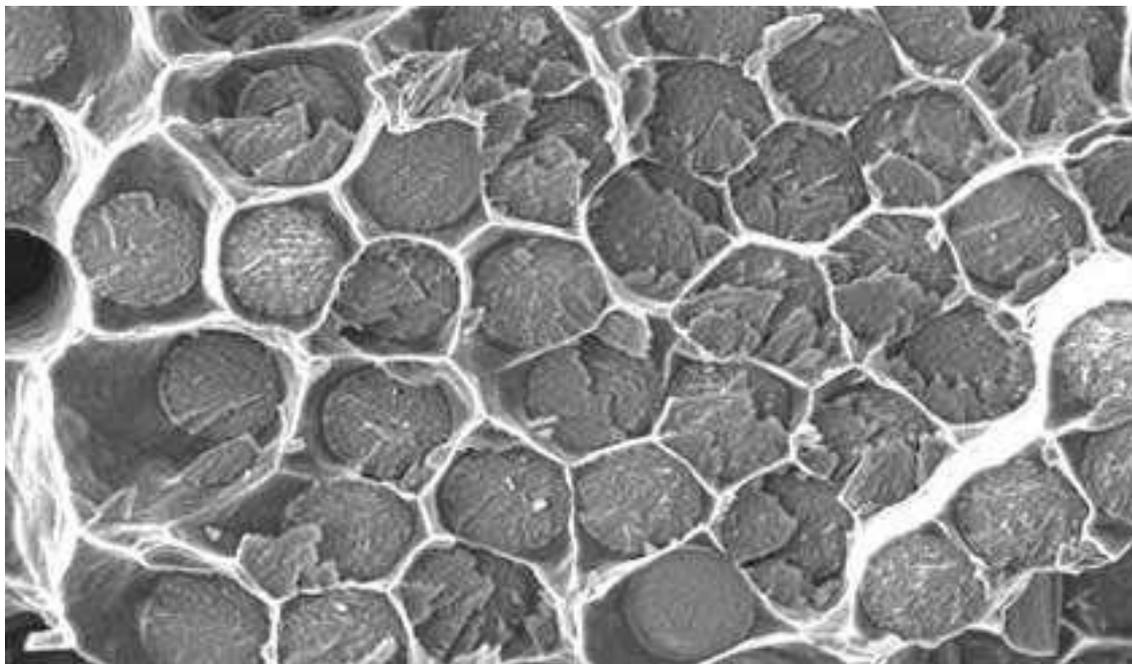
- Et dans tout les cas, ils quittent la structure du métal de base pour passer (au moins dans un premier temps).

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

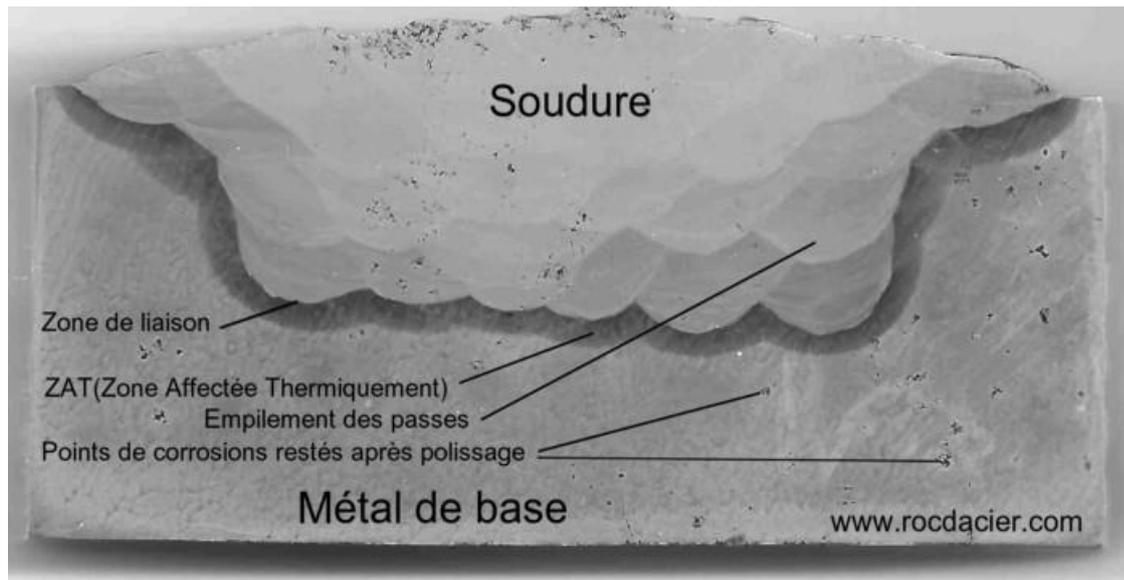
- Le rôle principal de la métallurgie du soudage est de connaître la façon dont évolue la structure métallurgique d'un matériau soudé dans les régions où il est modifié par le soudage

(région soudées), et ce dans le but de maîtriser les propriétés d'une soudure. [16]  
**(Figure 1: Structure d'un alliage métallique, vu au microscope électronique,**

**et figure 2: Macrographie d'une soudure d'acier)**



**Figure 1: Structure d'un alliage métallique, vu au microscope électronique**



**figure 2: Macrographie d'une soudure d'acier**

### **III.4 comprendre le comportement métallurgique :**

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

Avant toute chose, le fonctionnement métallurgique du matériau qui va être soudé; ce matériau est appelé par le métallurgiste du soudage: métal de base (MB).

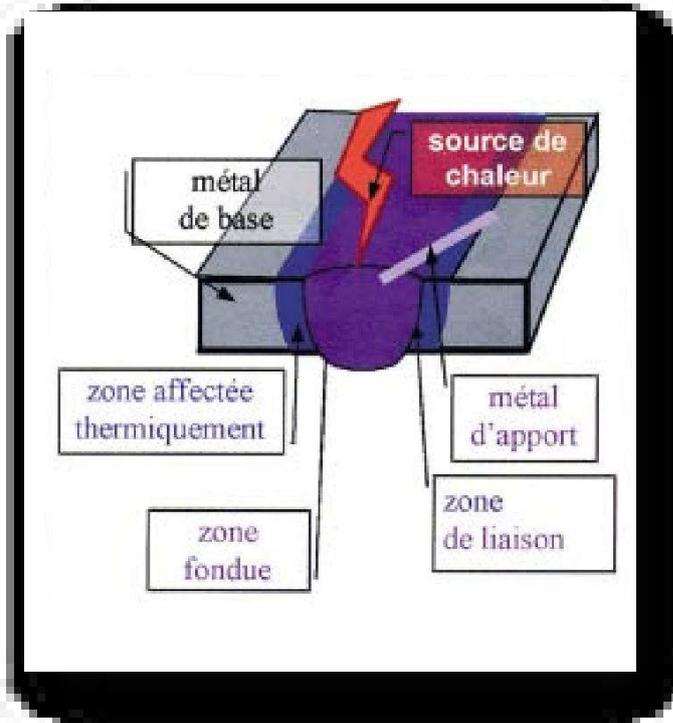
-La façon dont une soudure chauffe et refroidit dans le temps et dans l'espace (traitement thermique au soudage), ainsi que les facteurs d'influence (énergie, épaisseur soudée...); on parle d'aspect thermique de l'opération de soudage.

-Les modifications subies par le métal de base dans les régions où il a chauffé et refroidi sans fondre; cette région est appelée: zone affectée thermiquement (zat).

Et s'il s'agit de soudage par fusion:

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

-Les modifications particulières qui peuvent s'opérer à la frontière de la ZF et de la ZAT; cette région est appelée la zone de liaison (ZL).



**Figure 3: Métal de base, zone affectée thermiquement, soudure, source de chaleur, métal d'apport, zone de liaison**

**III.4.1 Métal de base (MB):** C'est le matériau des pièces à joindre. Cette zone n'est pas affectée par

le processus de soudage. La température de cette zone n'est pas très élevée pour causer des transformations microstructurales.

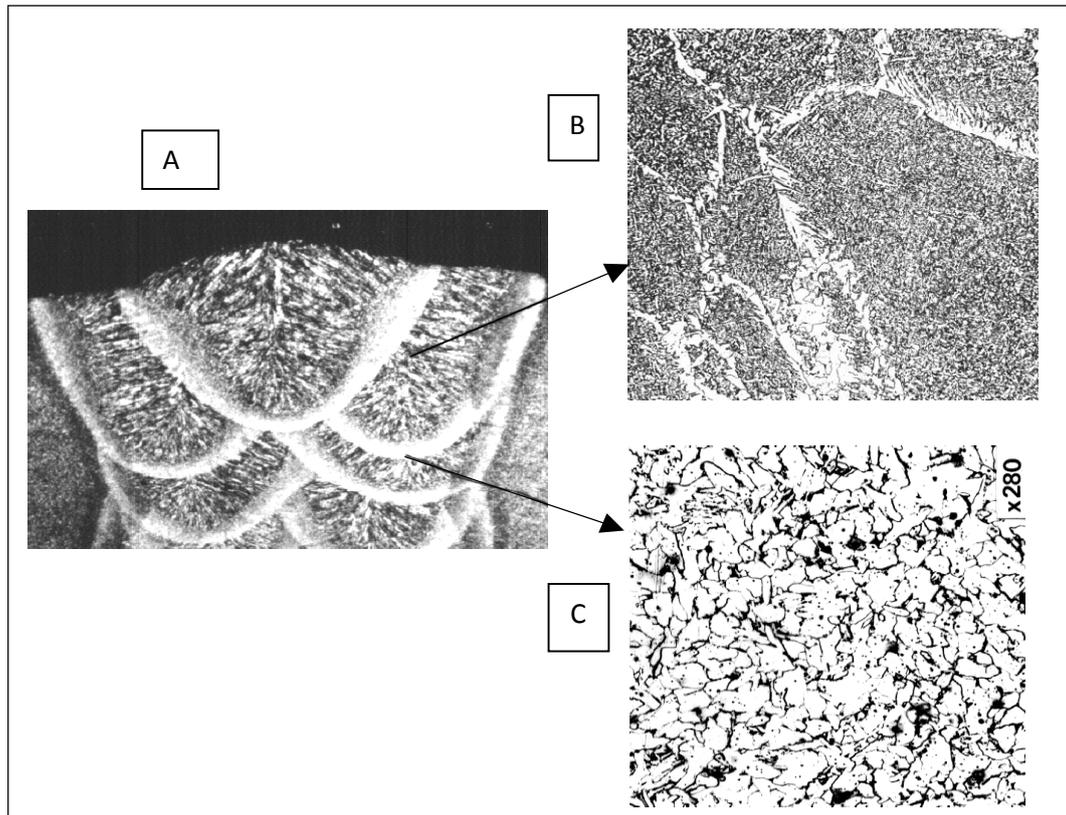
**III.4.2 La zone fondue (ZF):** C'est le mélange, effectué pendant le soudage, de métal d'apport avec

le métal de base. Après solidification, ce mélange correspond au joint entre les pièces. Les modifications microstructurales, observées dans cette zone, dépendent du cycle de refroidissement.

les propriétés mécaniques du métal fondu dépendent de sa structure et de sa composition chimique.

S'il est aisé de définir une analyse chimique du métal fondu de manière à le rendre compatible avec les propriétés de traction du métal de base, il n'en est pas de même du point de vue de la ténacité. C'est la raison pour laquelle nous limiterons notre propos à cet aspect que nous traiterons en terme de résilience car cet essai simple et peu coûteux est systématiquement pratiqué en soudage.

Dans un joint multi passes, on peut toujours distinguer deux types de zones (figure 4) : les premières ont conservé une structure brute de solidification tandis que les secondes ont été ré-austénitisées durant l'exécution des passes successives. Les composants microstructuraux de ces diverses zones sont en général très différents. [17]



**Figure 4 : Soudure Arc Submergé – a) Aspect macrographique – b) Microstructure des zones brutes de solidification – c) Microstructure des zones recuites. [17]**

**III.4.3 La zone de liaison:** c'est la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement.

**III.4.4 La zone affectée thermiquement (ZAT) :** C'est la partie du métal de base adjacente au

métal fondu et qui est chauffée à des températures suffisamment élevées pour modifier sa microstructure et ses propriétés mécaniques [18]. La 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

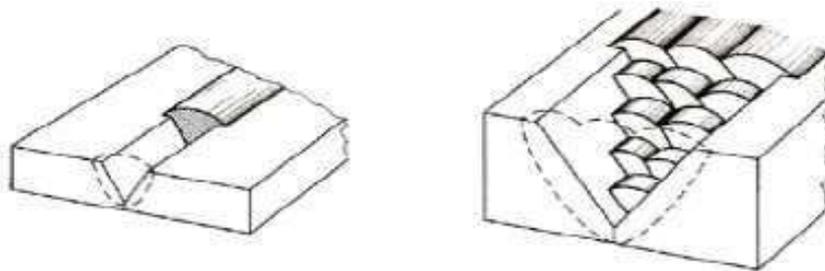
refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

### III.5 Généralités sur le soudage multi passe :

#### III.5.1 Définition :

D'une manière générale, une opération de soudage consiste à assembler plusieurs pièces en assurant la continuité de la matière entre ces pièces. Cette continuité est assurée en portant localement les pièces au-dessus de leur température de fusion au niveau de l'interface les séparant (Murry, 1998). La réalisation du joint soudé permettant de lier les pièces peut être effectuée en une seule étape (soudage mono passe) ou en plusieurs étapes successives (soudage multi passe) cf. Figure 5. Le soudage de type multi passe est généralement utilisé pour assembler des pièces ayant des épaisseurs importantes. [18]

#### III.5.2 Mode opératoire de soudage multi passe :



**Figure 5 : Exemple de soudage mono passe (gauche) et multi passe (droite) d'après (Bonaventure, 2012)**

Un mode opératoire de soudage réunit l'ensemble des conditions et opérations réalisées pour obtenir un assemblage soudé. Généralement, le descriptif du mode opératoire de soudage (DMOS) comprend :

**la préparation des pièces à souder** (décapage, usinage préalable, etc.). La réalisation de chanfreins sur les extrémités des pièces à souder peut revêtir une grande importance sur la bonne exécution de la séquence de soudage. Il existe plusieurs géométries de chanfreins dépendant du procédé de soudage, de

l'épaisseur des pièces, du nombre de passes et de la nature des matériaux.

**Le préchauffage**, utilisé afin d'éviter la formation de microstructures fragiles lors du refroidissement après une passe de soudage (pouvant conduire au phénomène de fissuration à froid). L'apparition de ce type de microstructure dépend en effet de la composition chimique du matériau mais aussi de la vitesse de refroidissement de la soudure. Il est également possible de maintenir la structure assemblée à une température proche de celle du préchauffage pendant une certaine durée avant de subir le dernier cycle de refroidissement, on parle alors de post chauffage. Si la température est maintenue jusqu'au soudage de la passe suivante, la température de post chauffage de la passe  $i$  devient la température de préchauffage de la passe  $i+1$ , on parle alors de température inter passe (Rhorer, 1981).

**Le procédé de soudure** ainsi que les paramètres qui y sont associés (décrits ci-après). **Le traitement thermique** après exécution des soudures dont le but est d'améliorer la résistance du joint soudé à la corrosion et à la rupture fragile. Dans le cas des aciers faiblement alliés, ce traitement thermique permet également de modifier l'état microstructural de la liaison soudée. Pour certaines nuances d'acier, des structures martensitiques et bainito- martensitiques indésirables à l'état final sont en effet susceptibles d'apparaître au cours de refroidissements après soudage. Le traitement thermique post-soudage est généralement équivalent à un traitement de revenu.

### III.5.2.1 Phénomènes thermiques lors du soudage : [19]

Pendant une opération de soudage, l'énergie générée par l'arc électrique produit localement un bain de fusion à l'intérieur duquel la chaleur se transmet par des mouvements de convection. Dans le reste de la structure, le transfert d'énergie se fait par conduction tandis que les échanges avec le milieu environnant mettent en jeu des phénomènes de convection et de rayonnement. Les phénomènes physiques régissant les mouvements dans le bain fondu ne seront pas détaillés dans cette étude. Pour de plus amples détails, le lecteur pourra se référer

entre autres à (DebRoy and David, 1995) et (Perry, 2000).

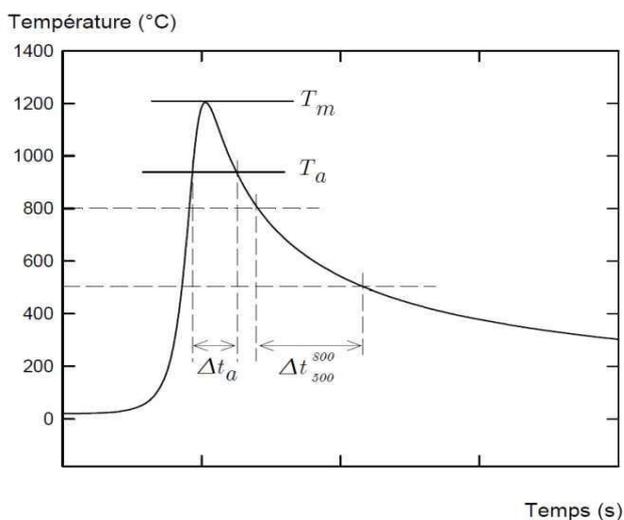
Pour étudier les phénomènes mis en jeu au cours du soudage, il faut connaître le cycle thermique de soudage qui correspond à la variation de la température  $T$  en fonction du temps  $t$ . Ce cycle thermique est caractérisé par un chauffage rapide suivi d'un bref passage à très haute température puis par un refroidissement plus lent (Figure 6). Dans le cas des aciers cette courbe met en évidence trois grandeurs caractéristiques (Saint-Germain, 2006) :

**la température maximale** : atteinte  $T_m$ ,

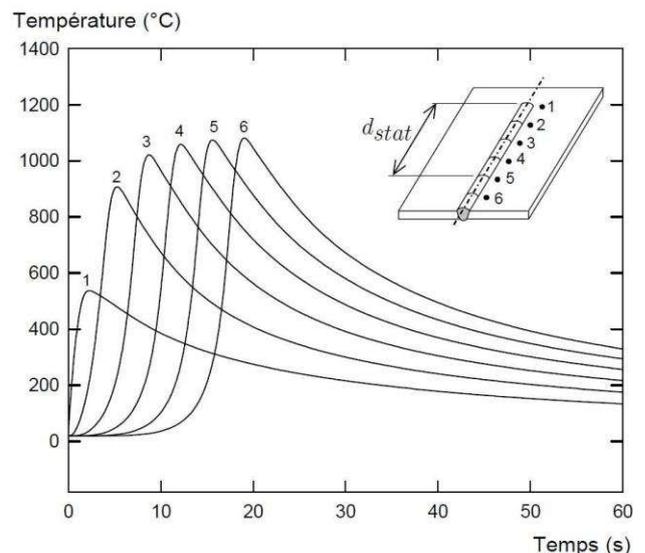
**la durée d'austénitisation** :  $\Delta t_a$  au-dessus de la température d'austénitisation  $T_a$

**la vitesse de refroidissement** : traduite habituellement par la durée de refroidissement  $\Delta t_{500}^{800}$  entre 800 et 500 °C.

-Grâce à la connaissance du cycle thermique en un point de l'assemblage, il est alors possible d'analyser les évolutions des phénomènes métallurgiques apparaissant en ce point.



**Figure 6 : Evolution de la température en fonction du temps au voisinage de la ligne de soudure d'après (Saint-Germain, 2006)**



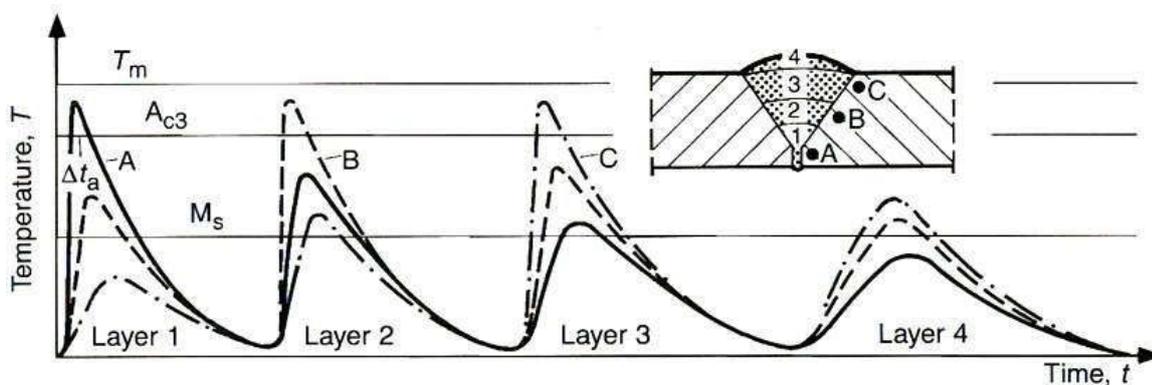
**Figure 7 : Evolution de la température en fonction du temps pour des points situés à des distances croissantes de l'origine du cordon d'après (Saint-Germain, 2006)**

Si on analyse les thermo grammes obtenus en des points situés à la même distance par rapport au centre du cordon de soudure (Figure 7), on constate alors que les cycles thermiques évoluent en fonction de l'avancée de la torche jusqu'à une certaine distance  $d_{stat}$  où ils

deviennent identiques. Le champ de température a alors atteint un régime dit stabilisé ou quasi-permanent.

### III.5.3 Cas du soudage multi passe :

L'évolution de la température dans le cas du soudage multi passe dépend de la température initiale mais aussi du nombre et de la disposition des passes ainsi que de l'intervalle de temps entre les passes. La (Figure 8) montre un exemple de cycles thermiques subis par différents points de la structure lors d'une opération de soudage comprenant quatre passes (Radaj, 2003).



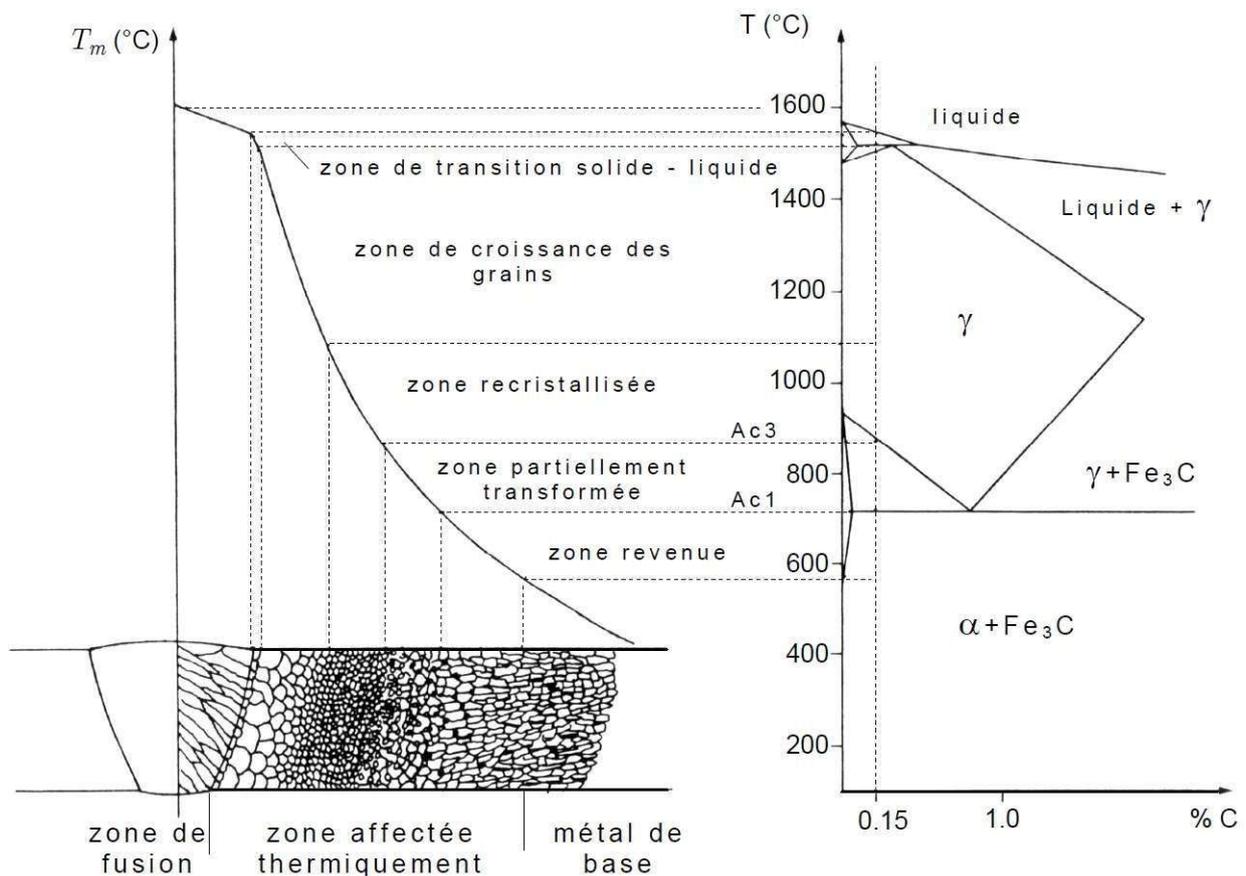
**Figure 8: Exemple de cycles thermiques rencontrés en soudage multi passe d'après (Radaj, 2003)**

Au cours de l'opération de soudage, tous les points de la ZAT subissent une succession plus ou moins complexe de cycles thermiques. Suivant la position d'un point donné dans la ZAT l'enchaînement des différentes passes conduit à une succession de pics d'amplitudes variées et dont la température maximale dépend de la distance du point considéré à la passe de soudage. Par ailleurs toujours pour un point donné, l'éloignement progressif des passes suivantes rend leur influence négligeable. Suivant la position du capteur, le cycle thermique se résume en fonction des températures atteintes, en une combinaison de plusieurs pics thermiques. La microstructure finale résulte donc d'une succession de cycles thermiques pouvant être relativement variés et conduisant ainsi à l'établissement d'une microstructure complexe sur l'ensemble de la ZAT.

### III.6 Transformations métallurgiques en ZAT : [19]

#### III.6.1 Zones de transformation dans la ZAT :

La Figure 9, utilisable pour les aciers de construction et faiblement alliés, présente le diagramme métastable Fer-Carbone en parallèle des températures maximales atteintes dans un joint soudé (Esterling, 1992). A noter que dans la majorité des procédés de soudage, la source étant généralement considérée comme stabilisée loin des bords, on considère un état thermique quasi- stationnaire. En conséquence les observations réalisées sur la tranche sont valables tout le long de la soudure.



**Figure 9 : Identification des différentes structures métallurgiques en ZAT selon les températures maximales atteintes et le diagramme d'équilibre Fer-Carbone (Blondeau, 2001b) d'après (Esterling, 1992).**

Lorsque l'on se rapproche de la zone fondue, on trouve successivement les zones suivantes :

- Le métal de base n'ayant pas subi de transformation de phase au chauffage, c'est-à-dire ayant été chauffé à une température inférieure à la température de revenu (environ 600 °C) ; le matériau reste dans son état initial.
- Une zone subcritique, où l'on ne constate pas encore de changement de phase. Cependant, lorsque la température atteinte est suffisamment importante (entre 600 °C et Ac1) certains phénomènes tels que le revenu de la martensite ou de la bainite, la globalisation des lamelles de cémentite, la recristallisation dans le cas de soudage sur produit écroui, le vieillissement, etc., peuvent éventuellement intervenir.
- Une zone de transformation partielle (ou inter critique), avec une température maximale située entre Ac1 et Ac3. Dans ce domaine coexistent les phases Ferritiques initiales et l'austénite nouvellement formée. C'est à partir de cette zone que débute la zone affectée thermiquement.
- A partir de la température Ac3 et jusqu'à la température de fusion, la transformation en austénite et/ou en ferrite  $\delta$ , en fonction de la composition de l'acier, est complète. La nouvelle structure ainsi formée remplace et « efface » toute trace de la structure antérieure. C'est au sein de cette zone qu'intervient un grossissement du grain austénitique : limitée à des températures légèrement supérieures à Ac3, cette croissance peut atteindre quelques centaines de micromètres pour les plus hautes températures. Dans ce cas, on parle de zone à gros grains, il s'agit de la zone la plus susceptible de causer certaines faiblesses métallurgiques (zone de fragilisation sous cordon). Suite au refroidissement les phases présentes peuvent être ferrite-perlitiques, bainitiques ou martensitiques.
- Une zone portée partiellement à l'état liquide, ou coexistent une phase Ferritique solide ( $\delta$ ) et une phase liquide. De très petite taille (et donc difficile à observer micrographiquement), cette zone constitue la zone de liaison entre le métal de base et le métal fondu. Sur le diagramme d'équilibre, celle-ci correspond à l'intervalle de température entre le début et la fin de la fusion (*intervalle solidus-liquidus*).

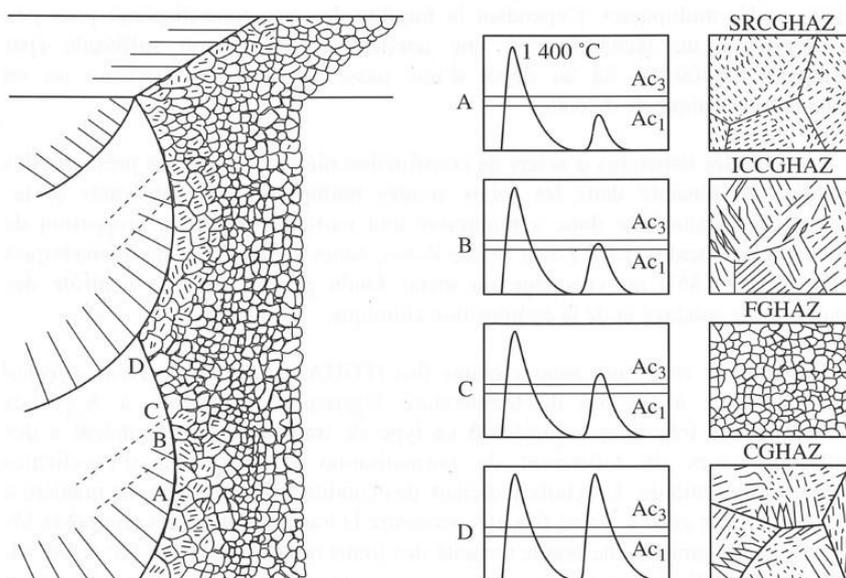
Enfin le métal fondu qui a souvent une composition différente de celle du métal de base, en

raison de la volatilisation de certains éléments, de réactions avec le milieu environnant, ou d'enrichissement par des éléments extérieurs (produits d'apport).

### III.6.2 Cas du soudage multi passe :

Lorsque l'assemblage nécessite la réalisation de plusieurs passes successives, les différents points de la ZAT subissent au cours des passes une succession complexe de réchauffages. Si l'on considère un point situé en ZAT à proximité immédiate d'une passe donnée, l'influence des dépôts sur l'évolution microstructurale diminue au fur et à mesure de l'enchaînement des passes. L'influence du dépôt est considérée négligeable lorsque la température maximale reste inférieure à 500 °C (Blondeau, 2001b). De plus, il est possible de considérer qu'une austénitisation à très haute température « efface » l'influence des cycles thermiques précédents lors du retour à des températures plus basses. Ainsi, dans la ZAT d'un soudage multi passe, l'histoire thermique « métallurgiquement efficace » se résume à quelques combinaisons caractéristiques comportant trois ou quatre pics thermiques tout au plus.

Il existe une terminologie anglo-saxonne utilisée pour désigner les cycles thermiques typiques du soudage multi passe tel que présenté en Figure 10 (Blondeau, 2001b).



**Figure 10 : Représentation schématique des cycles thermiques et des microstructures issues d'un soudage multi passe d'après (Blondeau, 2001b)**

### III.7 Les différentes zones sont nommées :

#### III.7.1 SRCGHAZ (*Sub critically Reheated Coarse Grain Heat Affected Zone*) – Zone A :

Zone à gros grains non affectée par les passes ultérieures puisque les températures atteintes par ces dernières n'ont aucune influence sur l'évolution métallurgique du matériau.

#### III.7.2 ICCGHAZ (*Intercritical Reheated Coarse Grain Heat Affected Zone*) – Zone B :

Zone à gros grains réausténitisée partiellement dans le domaine inter critique entre Ac1 et Ac3. Il est considéré que cette zone est, avec la zone à gros grains précédente, la zone où la ténacité est la moins élevée du joint soudé. Cependant, la fragilité de cette zone peut diminuer si les températures des passes ultérieures sont suffisantes pour provoquer un revenu du matériau.

#### III.7.3 FGHAZ (*Fine grain Heat Affected Zone*) – Zone C :

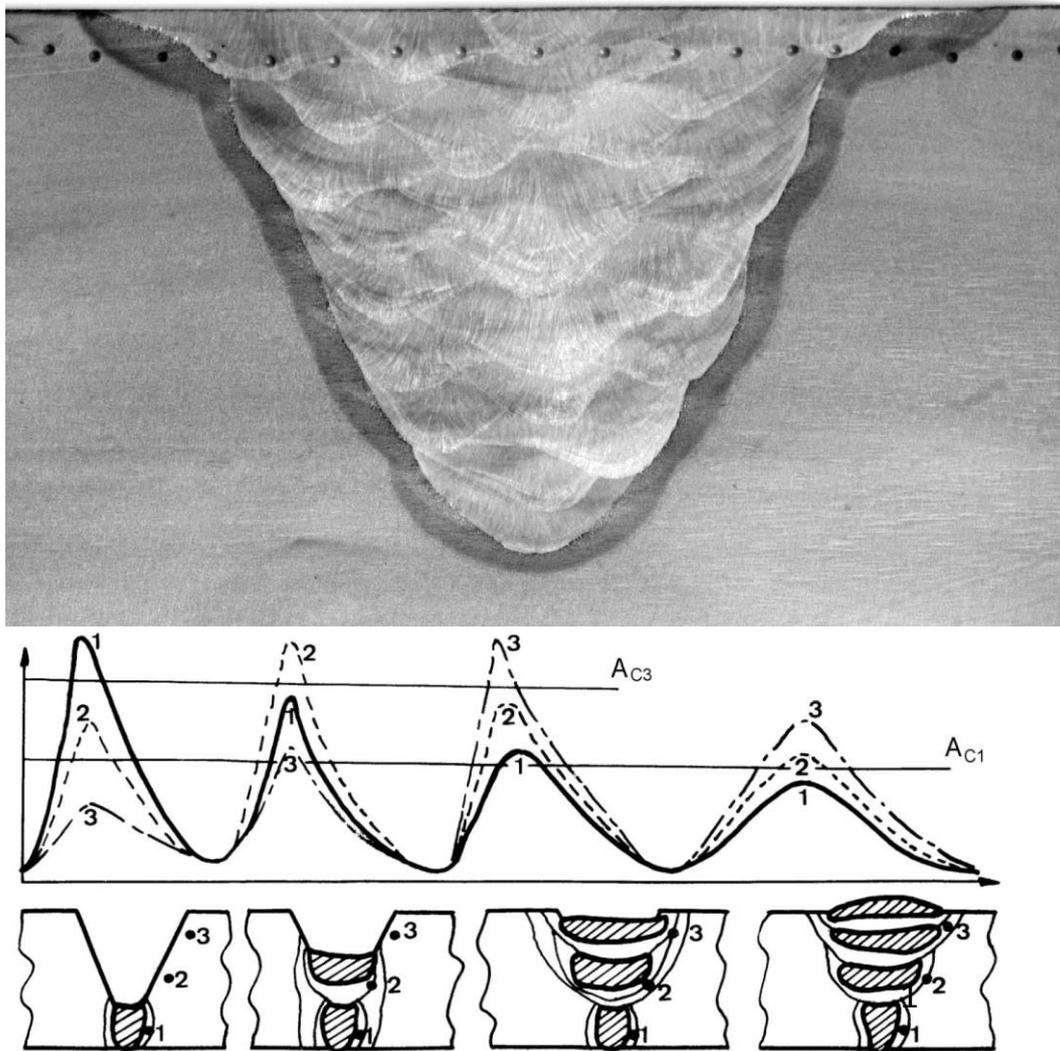
Zone à grains fins générée par un pic de réausténitisation dépassant légèrement Ac3. Les microstructures très fines associées à ce type de chargement thermique sont similaires aux structures obtenues lors d'opérations de normalisation. Cette zone présente généralement des propriétés mécaniques intéressantes et favorise la bonne tenue du joint soudé.

#### CGHAZ (*Coarse Grain Affected Zone*) – Zone D

Zone à gros grains où les passes ultérieures atteignant une température d'austénitisation élevée effacent l'effet métallurgique des passes précédentes.

### III.8 Influence de la position et distance du point considéré par rapport à la ligne de soudure :

En soudage multi-passes, l'analyse des cycles thermiques devient plus Complexe. Sur de grandes longueurs, chaque passe a le temps de se refroidir presque complètement avant le dépôt de la passe suivante et les cycles thermiques de chaque passe sont pratiquement indépendants les uns des autres. Par contre, l'action thermique atténuée des passes postérieures peut modifier la structure de la ZAT, allant même jusqu'à provoquer le revenu de certaines structures de trempe. [20]



**Figure 11 : Modification de l'action thermique en fonction du nombre de passes exécutées**

**III.9 Influence du procédé de soudage et ses paramètres :**

La variable qui, du point de vue des cycles thermiques, distingue les différents procédés de soudage, est la quantité de chaleur (ou d'énergie) introduite par unité de longueur de joint soudé, aussi appelée énergie linéaire.

$$E \left( \frac{\text{J}}{\text{mm}} \right) = \frac{V \times I \times 60 \times K}{1000 \times S}$$

Facteur *K*

*V* = tension à l'arc (volt)

SAW : 0.90-1

*I* = intensité à l'arc (ampère)

GMAW : 0.65-0.85

$K$  = facteur d'efficacité thermique (entre 0 et 1, selon procédé)

FCAW : 0.65-0.85

$S$  = vitesse de soudage (mm/min)

SMAW : 0.50-0.85

### III.10 Effets métallurgiques du cycle thermique : [21-22]

#### III.10.1 Température des zones atteintes :

La zone fondue est la partie du joint dans laquelle le métal devient en fusion pendant le soudage. Puisque la température du métal fondu est très élevée, la chaleur de la zone fondue se répand dans la région avoisinante et fait augmenter la température de celle-ci. On appelle zone affectée thermiquement (ZAT) la région voisine de la zone fondue qui atteint une température très élevée mais ne fond pas. Selon la structure des grains du métal de base, on peut diviser en différentes régions la zone du métal atteinte par la chaleur du Soudage.

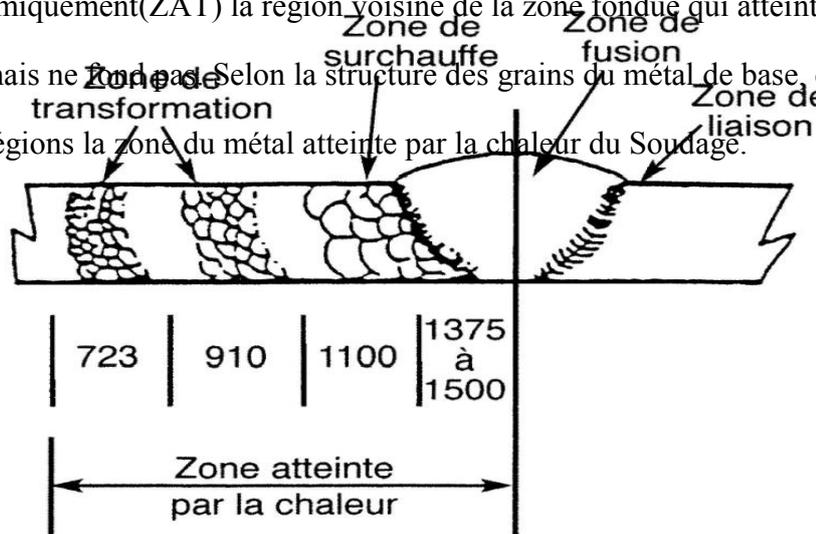
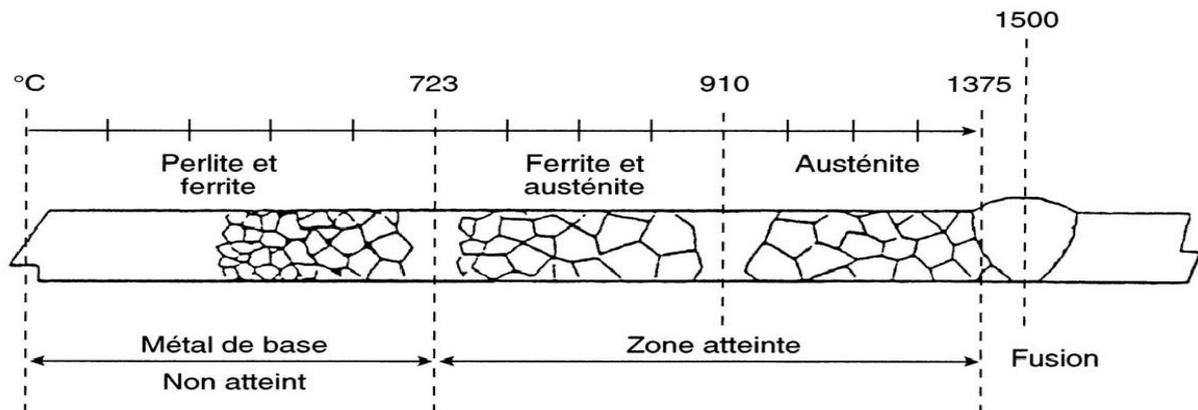


Figure 12 : Température des zones atteintes

La zone de fusion est la partie du joint de soudure dans laquelle le métal est venu en fusion et s'est solidifié après le soudage. Comme son nom l'indique, la zone de liaison est la région dans laquelle le métal de base et le métal d'apport se sont mélangés pendant la fusion. La zone de surchauffe est la zone adjacente à la zone de fusion. Dans cette région, les grains de la structure subissent un grossissement exagéré sous l'effet de la température élevée (au-dessus d'environ 1100°C). Dans la zone de transformation, l'acier peut se durcir sous l'effet d'un

refroidissement rapide. La transformation peut être totale dans la zone où la température a dépassé  $A_{c3}$  (910°C pour le fer pur) ou partielle dans la zone où la température est demeurée comprise entre  $A_{c1}$  et  $A_{c3}$  (entre 723°C et 910°C).

Les températures engendrées par le soudage influencent la grosseur des grains dans les différentes zones. On peut observer l'effet de la température sur la grosseur des grains d'une plaque d'acier au carbone à partir de la zone de fusion jusqu'à la zone non atteinte par la chaleur du soudage.



**Figure 13 : Observation de l'effet de la température sur la grosseur des grains d'une plaque d'acier au carbone**

Près du joint de soudure, les grains sont gros; ce sont les grains caractéristiques de l'austénite. À mesure que la température diminue (en s'éloignant du joint de soudure), les grains rapetissent et se retrouvent sous forme de ferrite et d'austénite. Enfin, au-dessous de 723°C, la structure de l'acier ne subit plus de transformation et ses grains sont sous forme de perlite et de ferrite.

D'une manière générale, les grains rapetissent à mesure que la température diminue, puis leurs dimensions se stabilisent lorsque l'effet de la chaleur ne se fait plus sentir. Ces changements de structure sont influencés par :

- Procédé de soudage
- La méthode de soudage
- Les propriétés physiques du métal
- L'épaisseur à souder

**Le procédé de soudage :** Par exemple, le soudage oxyacétylénique produit une plus grande ZAT que le soudage à l'arc électrique; puisque le métal demeure plus longtemps à l'état liquide, la chaleur a le temps de se diffuser plus lentement. En raison du refroidissement rapide, le soudage à l'arc électrique risque davantage de provoquer la trempe de l'acier;

**La méthode de soudage :** La méthode de soudage peut contribuer à diminuer le durcissement du métal soudé. Par exemple, en utilisant plusieurs petites passes de soudure, on peut ralentir la vitesse de refroidissement globale du métal et prévenir la trempe de l'acier. Dans ce cas, chaque passe a pour effet de maintenir la chaleur de la précédente, ralentissant ainsi le refroidissement.

Ces passes successives modifient la zone de surchauffe. Elles permettent de rendre la structure plus homogène;

**Les propriétés physiques du métal :** Chaque métal possède des caractéristiques qui influencent les effets du soudage sur sa structure;

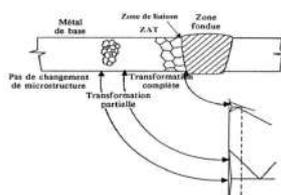
**L'épaisseur à souder :** L'étendue de la ZAT dépend de l'épaisseur des plaques à souder.

Comme nous l'avons mentionné déjà, plus les plaques sont minces, plus la ZAT est grande.

En outre, l'épaisseur des plaques détermine également la vitesse de refroidissement: plus les plaques sont épaisses, plus la vitesse de refroidissement est rapide.

Dans les zones voisines du métal fondu de la soudure, le métal est soumis à certains changements de structure qui varient en fonction de la température maximale et de la vitesse de refroidissement atteintes au sein de ces zones. Près de la zone de liaison, la température maximale atteinte est suffisante pour former une structure entièrement constituée d'austénite et permettre une certaine croissance des grains. Dans les zones plus éloignées de la zone de liaison, la température maximale atteinte n'engendre aucun changement de microstructure.

Entre ces deux régions extrêmes, on peut retrouver différentes microstructures, provenant de transformations partielles.



**CHAPITRE IV :**  
**Partie expérimentale**

## IV.1 Introduction :

Ce chapitre commence par une présentation des matériaux utilisés lors de cette étude ainsi que les métaux d'apports utilisés pour assemblage de ces matériaux. Dans une seconde partie, nous présentons les différentes techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation mécanique et métallurgique des soudures hétérogènes et homogènes élaborées par procédé TIG.

## IV.2 Matériaux :

Les produits de base utilisés pour réaliser les joints soudés sont des tubes de 170 mm de diamètre et de 7mm d'épaisseur en acier inoxydable Duplex (2205) et l'acier au carbone (A106)

**IV.2.1 l'acier inoxydable duplex :** c'est un acier inoxydable austéno-ferritique dont la nuance est du type SAF 2205 et dont la composition chimique est précisée dans le Tableau IV.1. La structure biphasée de l'alliage permet d'obtenir des limites d'élasticité élevées tout en conservant une bonne ductilité (Tableau IV.2). En effet, le durcissement est obtenu par la phase Ferritique, tandis que la matrice austénitique permet de conserver ductilité et ténacité. La structure mixte donne au 22-05 une résistance élevée à la corrosion sous contrainte et le rend insensible à la corrosion inter granulaire. Ses teneurs élevées en chrome et en molybdène lui confèrent une excellente résistance à la corrosion par piqûres et à la corrosion généralisée.

Tableau IV.1 composition chimique d'acier inoxydable  
(duplex  
2205)

| Element    | C     | Mn   | Si   | P     | S     | Ni   | Cr    | Mo   | N    |
|------------|-------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|
| Percentage | 0.024 | 0.74 | 0.61 | 0.016 | 0.001 | 5.43 | 22.43 | 3.21 | 0.17 |

Tableau IV.2 Propriétés mécaniques de l'acier inoxydable (duplex) métal de base

| Propriété | Limite élastique MPa | Résistance à la rupture MPa | Allongement à la rupture % |
|-----------|----------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Valeur    | 415                  | 655                         | 20                         |

A) l' **acier au carbone** : ASTM A106 est une norme de spécification pour les tuyaux d' acier au carbone sans soudure pour les services à haute température. Les usages les plus communs se font dans les raffineries et dans les centrales où les gaz et fluides sont transportés à haute température et à haute pression la réalisation de tubes. La composition chimique et les propriétés mécaniques de cet acier sont précisées sur les tableaux (IV.3. et IV.4) respectivement.

Tableau IV.3 composition chimique d' acier au carbone- A106- (laboratoire essai GTP)

| Elément     | C           | Mn          | Cu          | Ni          | Cr          | Mo           | V            | Si          | P            | S            | Al           | Ti           | Sn           | N             | B             | Nb           |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|
| Pourcentage | <b>0.16</b> | <b>0.79</b> | <b>0.11</b> | <b>0.09</b> | <b>0.12</b> | <b>0.022</b> | <b>0.003</b> | <b>0.28</b> | <b>0.014</b> | <b>0.003</b> | <b>0.033</b> | <b>0.001</b> | <b>0.009</b> | <b>0.0075</b> | <b>0.0002</b> | <b>0.002</b> |

Tableau IV.4 Propriétés mécaniques de l' acier au carbone métal de base(A106)

| Propriété | Limite élastique MPa | Résistance à la rupture MPa | Allongement à la rupture % |
|-----------|----------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Valeur    | <b>290</b>           | <b>415</b>                  | <b>25</b>                  |

Compte tenu de faible teneur en carbone (0.16%) et en carbone équivalent (0.33%) inférieur à 0.4%, présage une excellente soudabilité de ce matériau.

$$NB : \text{Carbone équivalent} = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15 = 0.33\%$$

#### IV.2.2 Les métaux d' apport

:

Les différentes combinaisons de soudures élaborées sont:

Soudures homogènes : - Acier A106- Acier A106

- Acier duplex-Acier Duplex Soudure

hétérogène : Acier Duplex- Acier A106

Ces soudures sont réalisées par le procédé TIG(Tungsten Inerte Gas) en deux (02) passes en utilisant différents métaux d' apport.

✓ **Métal d' apport ER2209** :Ce même métal d' apport dont la composition chimique est donnée dans le tableau II.5 est utilisé pour élaborer la soudure homogène (duplex / duplex) et la soudure hétérogène (duplex / A106).

Tableau IV.5 Composition chimique du métal d' apport ER 2209

| Elément | C | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | N | Mn |
|---------|---|----|---|---|----|----|----|----|---|----|
|         |   |    |   |   |    |    |    |    |   |    |

|           |             |             |              |              |             |             |              |             |             |             |
|-----------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| ER2209(%) | <b>0.01</b> | <b>0.49</b> | <b>0.019</b> | <b>0.001</b> | <b>0.05</b> | <b>8.60</b> | <b>23.04</b> | <b>3.11</b> | <b>0.16</b> | <b>1.47</b> |
|-----------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|

- ✓ **Métal d'apport ER70S-6:** dont la composition chimique est donnée par le tableau II.6 est utilisé pour la réalisation des soudures homogène (A106 /A106)

**Tableau IV.6 composition chimique métal d'apport ER70S-6**

| Elément    | C           | Si          | Mn          | Cu         | P            | S            | Cr          | Ni          | Mo           | V             |
|------------|-------------|-------------|-------------|------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|---------------|
| ER70S-6(%) | <b>0.07</b> | <b>0.87</b> | <b>1.46</b> | <b>0.2</b> | <b>0.011</b> | <b>0.012</b> | <b>0.03</b> | <b>0.02</b> | <b>0.003</b> | <b>0.0005</b> |

D'après le code de construction Américains du piping et pipeline, il est exigé que la résistance à la rupture du métal d'apport doit être supérieure à celle du métal de base.

**Tableau IV.7 Propriétés mécaniques de métal d'apport**

|         | Limite élastique<br>MPa | Résistance à la rupture<br>MPa | Allongement à la rupture<br>% |
|---------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| ER 2209 |                         | 770                            | 30.4                          |
| ER70S-6 | 440                     | 560                            | 25                            |

### IV.2.3. Les paramètres de soudage :

Les différentes configurations d'assemblage (homogènes et hétérogènes) sont réalisées avec les paramètres du procédé tableau (II.8 et II.9)

**Tableau IV..8 Paramètre de soudage ER 2209**

| Passé    | Métal d'apport | Ø mm       | Longueur mm | nature    | Polarité   | I (A)           | U (V)          | Vitesse cm/min | Type argon   | Débit L/min |
|----------|----------------|------------|-------------|-----------|------------|-----------------|----------------|----------------|--------------|-------------|
| <b>1</b> | <b>ER2209</b>  | <b>2.4</b> | <b>1000</b> | <b>DC</b> | <b>(-)</b> | <b>81 - 92</b>  | <b>9 - 11</b>  | <b>4.1</b>     | <b>99.99</b> | <b>17</b>   |
| <b>2</b> | <b>ER2209</b>  | <b>2.4</b> | <b>1000</b> | <b>DC</b> | <b>(-)</b> | <b>94 - 97</b>  | <b>9 - 11</b>  | <b>6.74</b>    |              |             |
| <b>3</b> | <b>ER2209</b>  | <b>2.4</b> | <b>1000</b> | <b>DC</b> | <b>(-)</b> | <b>94 - 99</b>  | <b>9 - 11</b>  | <b>5.43</b>    |              |             |
| <b>4</b> | <b>ER2209</b>  | <b>2.4</b> | <b>1000</b> | <b>DC</b> | <b>(-)</b> | <b>95 - 100</b> | <b>10 - 11</b> | <b>7.12</b>    |              |             |
| <b>5</b> | <b>ER2209</b>  | <b>2.4</b> | <b>1000</b> | <b>DC</b> | <b>(-)</b> | <b>95 - 98</b>  | <b>10 - 11</b> | <b>5.36</b>    |              |             |

**Tableau IV .9 Paramètre de soudageER70S-6**

| Passé | Métal d'aport | Ø mm | Longueur Mm | nature | Polarité | I (A)     | U (V)     | Vitesse cm /min | Type argon | Débit L/min |
|-------|---------------|------|-------------|--------|----------|-----------|-----------|-----------------|------------|-------------|
| 1     | ER70S-6       | 2.4  | 1000        | DC     | (-)      | 75 – 80   | 10.5 – 12 | 3.78            | 99.99      | 16          |
| 2     | ER70S-6       | 2.4  | 1000        | DC     | (-)      | 105 - 115 | 11 – 12   | 5.18            |            |             |
| 3     | ER70S-6       | 2.4  | 1000        | DC     | (-)      | 110 – 115 | 11 – 12   | 5.31            |            |             |
| 4     | ER70S-6       | 2.4  | 1000        | DC     | (-)      | 110 – 115 | 11 – 12   | 5.34            |            |             |

### IV.3. Préparation des échantillons et éprouvettes :

Avant découpage des éprouvettes, un contrôle visuel des cordons de soudures est nécessaire pour localiser les éprouvettes d'essais.

Le cordon est considéré comme correct dès qu'une géométrie de joint correcte et régulière est obtenue et qu'aucune projection ne se produit sur l'assemblage. En effet, pour atteindre une bonne résistance le cordon doit présenter une géométrie n'introduisant pas de concentration de contrainte

#### IV.3.1 prélèvement et réalisation des éprouvettes :

Le découpage et usinage des éprouvettes des essais (traction et résilience) a été effectué au niveau des ateliers d'usinage

Quatres (04) éprouvettes, de longueur de 300mm et de 27mm de largeur, sont prélevées de chaque configuration d'assemblage (homogène et hétérogène) dans le sens transversal au cordon de soudure



FigureIV.1: Sens de prélèvement des éprouvettes de traction

#### IV.4. Caractérisation métallographique :

Chaque avant l'analyse de la microstructure échantillon subi les opérations suivantes :

##### **a -Enrobage :**

Enrobage des échantillons dans une résine thermodurcissable afin de mieux les manipuler durant l'opération de polissage. La figure montre une photo de l'enrobeuse de marque STRUERS utilisée.

##### **b- Polissage :**

Le polissage est effectué au labo SDM à l'aide d'une polisseuse a pour but d'éliminer l'irrégularité de

surface et donne une surface plus ou moins lisse, La polisseuse utilisée est montrée dans les figures – IV.4 ; IV.5-

Le polissage a été fait en deux étapes :

##### **b-1. Pré polissage :**

Il a été fait par frottement de l'échantillon sur des papiers abrasifs de granulométrie de plus en plus fins. Le polissage est fait sous eau (ou avec arrosage) pour éliminer tout risque d'échauffement de l'échantillon.

Granulométries du papier abrasif utilisé : 280-400-600-800-1000-1200-2800. Une durée de polissage que l'on peut estimer 5 minutes par granulométrie.

##### **b-2. Polissage de finition :**

A fin de donner à nos échantillons un effet miroir, on utilise une polisseuse de finition avec une poudre alumine

La figure II.11 montre la polisseuse de finition utilisée dans notre laboratoire.

##### **C- Attaque chimique :**

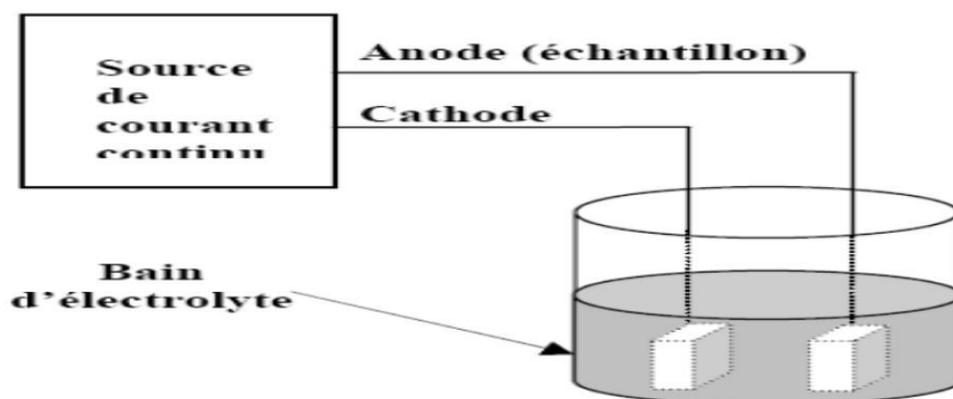
on a deux différentes soudure d'attaque chimique qui sont :

- Attaque chimique des soudures homogène A106/A106 la solution chimique est la suivante; le natal ( $\text{HNO}_3$ )

- Attaque électrolytique de soudure homogène duplex / duplex

Cette attaque est réalisée à température ambiante avec des durées allant de 60 à 90s sous une tension de 4.5V dans un bain contenant de ( $\text{NaOH}$ ) .

ainsi dans soudure hétérogène on a fait les deux attaques qui sont : attaque chimique et attaque électrolytique.



**Figure II.2:** Schéma illustratif du dispositif d' attaque électrolytique

### Microscope optique :

Le microscope qui se trouve dans notre laboratoire est équipé de quatre objectifs d' agrandissement de 20X jusqu'à 100X, un oculaire de 10X (alors si on est en train de voir avec un objectif de 20X accouplé à l' oculaire de 10X alors l' agrandissement de la microstructure est de 200X. La figure 3.10 montre le microscope optique de marque Carl Zeiss à plateau inversé. Il est équipé d' un appareil photo numérique afin de photographier les microstructures obtenues.



**Figure II.3 :** Microscope optique Carl Zeiss

## IV.5. Observation métallographique :

### IV.5.1 Examen au microscope optique :

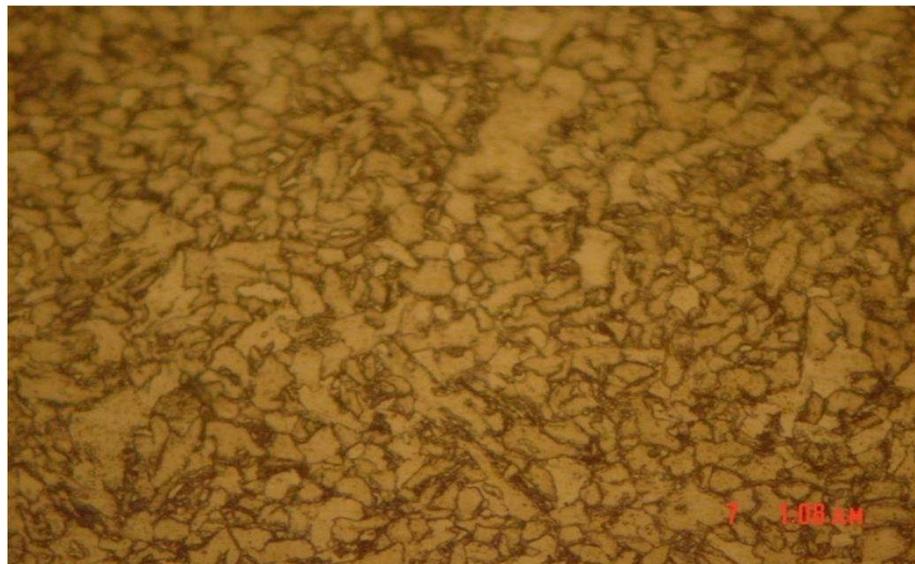
#### IV.5.1.1 Examen de la zone affectée thermiquement (ZAT) :

a) A proximité de la zone fondue (la zone affectée par la température), microstructure se révèle comme celle du métal de base, néanmoins la taille des grains a connu un grossissement très significatif sous l' influence de l'élévation de la température apportée par la source de chaleur lors de l'opération du soudage. Cette observation est bien mise en relief dans les (figure IV.6)



**Figure IV.4: Microstructure la ZAT de acier (2205).GX200**

b) la figure représente la microstructure de la zone affectée thermiquement t de la soudure homogène qui montre une transformation de la forme lamellaire a la forme équiaxiale



**Figure IV.5: Microstructure la ZAT de A106 GX200**

#### IV.5.1.2 Examen de la zone de liaison :

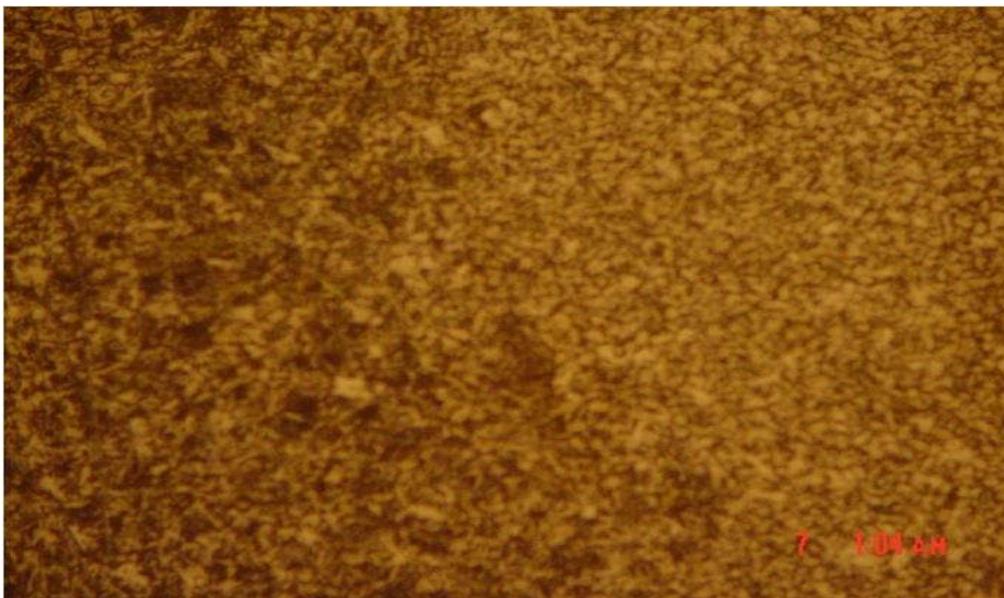
A la frontière entre zone fondue ( ZF) et zone affectée thermiquement ZAT est très nette dans les deux configurations de soudure homogènes. Dans le cas de la soudure Duplex/Duplex, la zone surchauffée (ZL) est caractérisée par une faible densité de grains austénitiques (figure IV..8) comparée à la zone fondue et la ZAT. Ceci est du au gradient thermique élevé enregistré dans cette

zone lors de l'opération de soudage. La structure de l'acier dans cette zone a subi une transformation complète en ferrite au cours du chauffage, les grains d'austénite se sont reformés, probablement, par la suite lors du refroidissement de l'échantillon.



**Figure IV.6 : Microstructure la ZL d'acier (2205) GX200**

Dans le cas de la soudure homogène A106/A106, nous constatons la présence de grains de grande taille à côté de grains plus fins (Figure IV..8). Ce qui traduit la surchauffe importante subit par cette partie au cours de l'opération du soudage.



**Figure IV.7: Microstructure la ZL de A106 GX100**

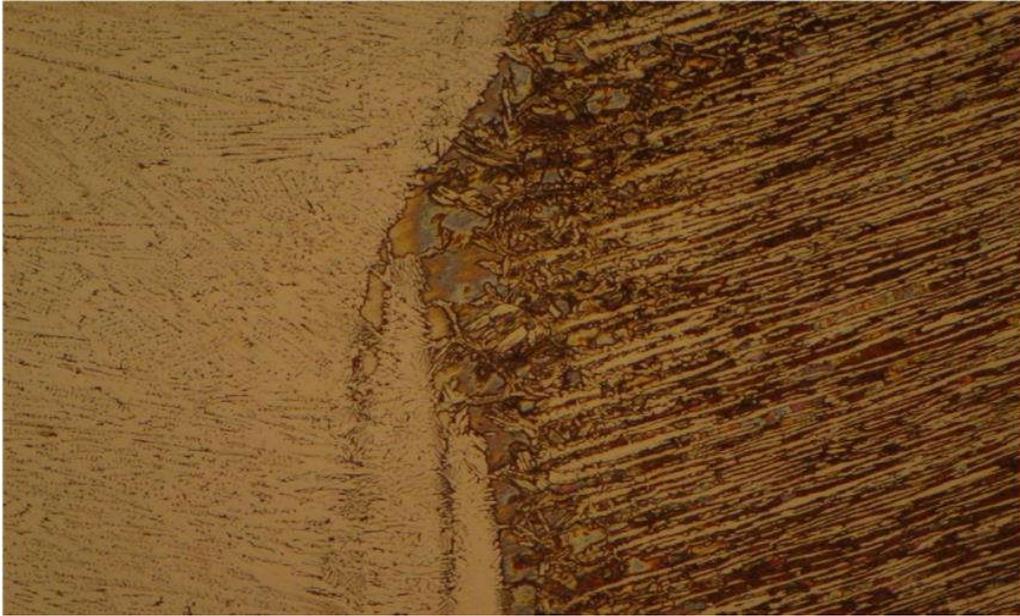


Figure IV.8: Microstructure la ZL ; ZF; ZAT(2205/A106)

On observe dans cette structure qui correspond à un contraste de deux zones (ZF sombre, ZAT plus claire)

Dans les (figures IV.11 (a, b et c)) Nous constatons la présence de grains de grande taille à côté de grains plus fins qui est expliqué par le sur échauffement important subit au cours de l' opération du soudage

La ZF (figure IV.11 (d)) est constituée de grains colonnaires de ferrite et austénite à structure dendritique

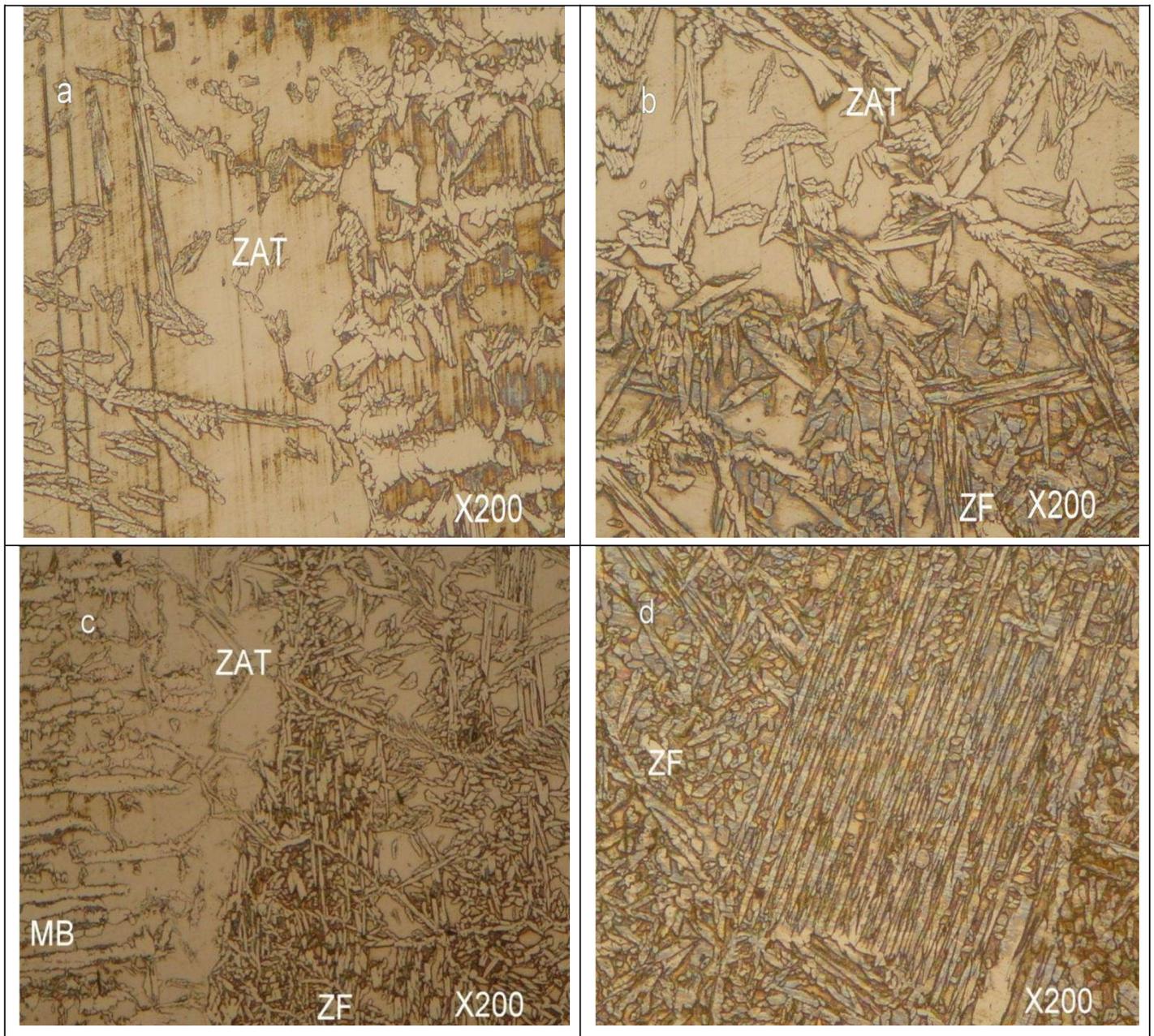
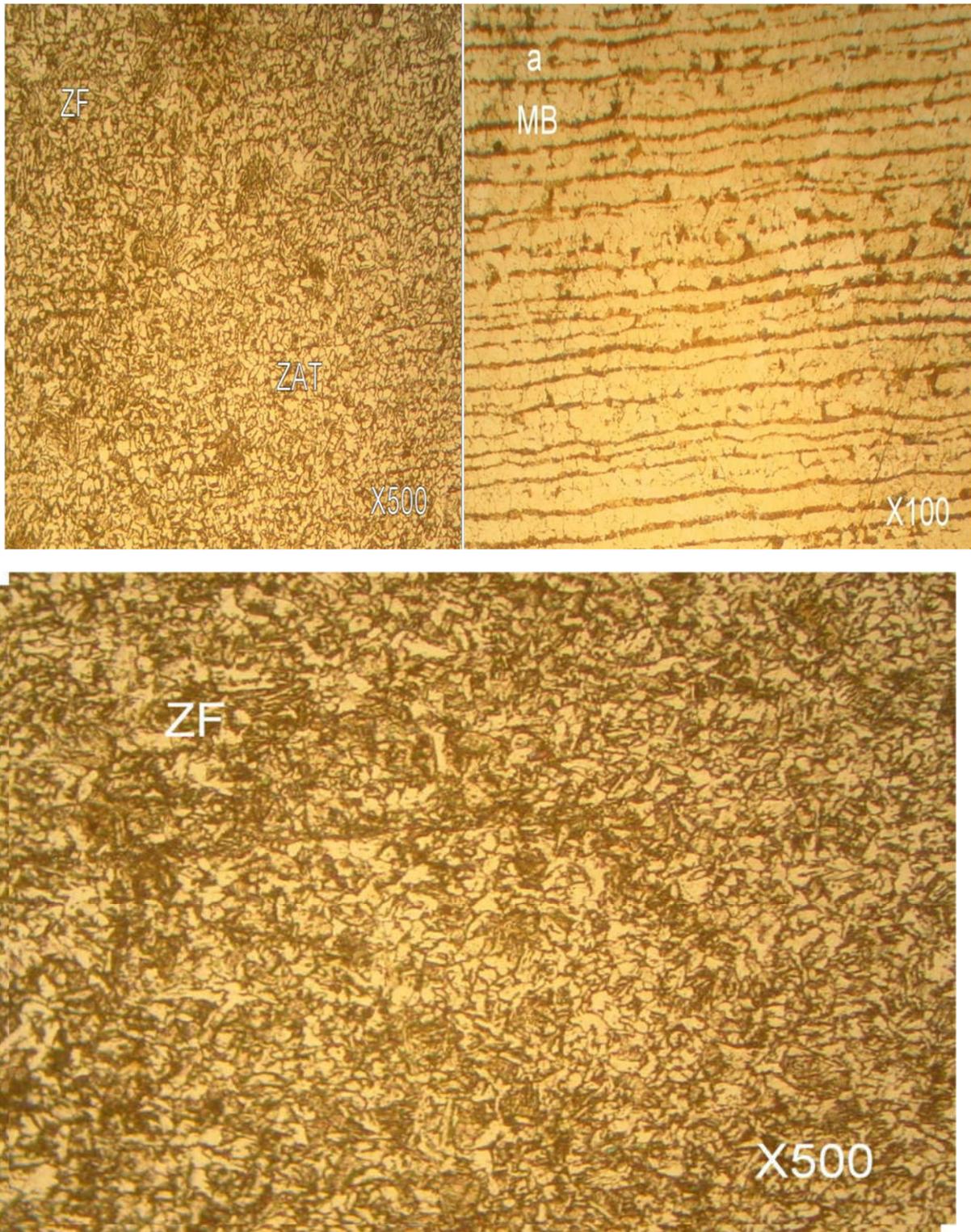


Figure IV.9: la microstructure de la soudure hétérogène coté duplex

D'après les figures on observe que la zone affectée thermiquement est claire par rapport à la zone fondue (sombre et plus petite)

**Figure IV.10: la microstructure de la soudure hétérogène coté A106 a) MB, b)ZAT-ZF, c)ZF**



## CONCLUSION

Ce modeste travail consisté à l'analyse et la compréhension de l'effet de soudage multi passe sur la structure de la ZAT .

L'examen par microscopie optique pour l'analyse de la microstructure des différentes régions constituant le joint soudé a révélé que le métal de base et la zone affectée thermiquement ont une microstructure plus proche de grain fin contrairement à la microstructure de la zone fondue.

Nous nous sommes limités aux principales propriétés mécaniques pour constater l'effet de ces réparations, il se confirmé que l'on ne peut réparer indéfiniment par ce que à chaque réparation effectuée, elle rapporte à un grandissement de la zone affectée thermiquement qui est la région la plus vulnérable d'un assemblage soudé.

Donc en conclusion en constate de cet étude qu'un grand nombre des réparations sur les mêmes sections augmentent la fragilité et diminuent les propriétés mécaniques d'acier ce qui influe négativement à son efficacité et son bon fonctionnement.

# Référence

- [1] Michel Colombié et coll. Livre "MATÉRIAUX MÉTALLIQUES" , 2 e édition page 109
- [2] G. Beranger, G. Henry, G. Sanz. " livre de l'acier", Ed. SOLLAC, 1996.
- [3] Christine BRASSINE Laboratoire 1 : Article Métallographie page 39 à 42
- [4] Guy Murry, 2004, Aide Mémoire Métallurgie, Dunod, Paris
- [5] M. Wiest, E.Kassa, W.Davas, J.C.O Nielsen and H.Ossberger :assessment of methods for calculating contact pressure in wheel-rail/switch contact.wear
- [6] Recuit : <https://www.ats-ffa.org/traitements-thermiques/>
- [7] Licence professionnelle - Génie Civil et construction – Pr. M. KADDAMI – FSTS page 97 à 103
- [8] AUTEUR Caroline Godin, ing , livre (guide multi prévention soudage-coupage)
- [9] Auteur klas weman, livre procédés de soudage, Dunod page 15
- [10] Article technique : <https://www.soudeurs.com/site/qu-est-ce-que-le-brasage-et-le-soudage-la-flamme-oxyacetylenique-341/>
- [11] Article technique : <https://www.soudeurs.com/site/le-procede-de-soudage-l-arc-e-e-mma-smaw-111-263/>
- [12] Guide de soudage, Soudage l'arc sous gaz de protection TIG ,MIG ,MAG, T ou V, publications de la soudure autogène, 1996(En cyclopie).
- [13] R.GAZES. Soudage à l'arc. Techniques de l'ingénieur B7730, AOOUT1995.
- [14] article documentaire "Le soudage des aciers de construction"
- [15] linnert, G.E. welding metallurgy of carbon and alloy steels, volume 1 and 2 (1965 and 1967) american welding society, 550 N.W. Le jeune Rd., miami FL 33126 ? U.S.A
- [16] Laurent Carbonell la métallurgie et la métallurgie du soudage (Institut de Soudure - France)
- [17] Christian Bonnet, livre « le soudage métallurgie et produits » page 14
- [18] : The Procedure Handbook of Arc Welding : The Lincoln Electric Company, Cleveland, Ohio (1995).

[19] Constant Ramard. Étude expérimentale et numérique du soudage multipasse : application à un acier de construction navale. Physique [physics]. Université de Bretagne Sud, 2018. Français. NNT

[20] Grangon (H.). – Bases métallurgiques du soudage, Publ. De la soudure autogène, Eyrolles (1989).

[21] Murry (G.). – Soudage et soudabilité métallurgique des métaux ESSA.

[22] Dadian (M.). – Métallurgie du soudage ESSA