



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Mécanique

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**  
**Filière: Métallurgie**  
**Spécialité : Génie Métallurgique**

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :  
**Younes Gheriani**

Le: mardi 28 juin 2022

## **Soudage des aciers inoxydables pour le transport des hydrocarbures**

### **Jury :**

<b>Dr. Athmani Moussa</b>	<b>MCB</b>	Université de Biskra	Président
<b>Dr. Djellab Mounir</b>	<b>MCA</b>	Université de Biskra	Examineur
<b>Pr. Boumerzoug Zakaria</b>	<b>Pr</b>	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2021 - 2022

## ***Dédicaces***

*Je dédie ce travail de recherche à mes parents et  
à mes frères et sœurs*

*Je dédie aussi ce travail de recherche à toute la famille  
Gherianiet Touggourti*

## Remerciements

Je remercie vivement mon encadreur, professeur Boumerzoug Zakaria qui m'a proposé ce thème de recherche et aussi sa disponibilité durant toute cette année universitaire.

Je remercie les membres de jury DrAthmani Moussa Nadhir et Dr Djellab Mounir qui ont expertisé mon travail de recherche.

Je remercie le maître Hamada Abdelkader et maître Gheriani Nouredin et Chacha Mohammed Elamin vous accompagner tout au long de l'année scolaire et obtenir des échantillons

Je remercie le personnel du laboratoire de métallurgie de département de génie mécanique.

Enfin, je remercie Bourennane Mabrouk et Ben Ameer Mohamed Cherif et Djimaoui Nour Elimane et toutes les personnes qui m'ont aidé dans mon travail de recherche

## Sommaire

Introduction générale	<b>1</b>
<b>Chapitre I Les procédés de soudage des pipelines</b>	
Introduction	<b>2</b>
I.1- Type de soudage de pipelines	<b>2</b>
I.1.1. Soudage à l'arc sous protection métallique (SMAW)	<b>2</b>
I.1.2. Soudage à l'arc sous gaz et métal (GMAW)	<b>3</b>
I.1.3. Soudage à l'arc avec fil fourré (FCAW)	<b>3</b>
I.1.4. Soudage à l'arc submergé	<b>4</b>
I.1.5. Soudage au gaz inerte au tungstène (TIG)	<b>4</b>
I.1.5.1. Soudage à l'arc sous gaz de protection procédé (TIG)	<b>5</b>
I.1.5.2. Soudage avec fil électrode sous protection gazeuse (M.I.G et M.A.G)	<b>6</b>
I.2. Étapes pour le soudage de canalisations	<b>7</b>
I.3. Sélection du processus de soudage de pipeline	<b>8</b>
I.4. Meilleures méthodes de soudage de l'acier inoxydable	<b>8</b>
I.5. Aspect métallurgique d'un joint d'acier soudé	<b>9</b>
Références	<b>12</b>
<b>Chapitre II Soudage des aciers inoxydables</b>	
II.1. Types d'aciers inoxydables	<b>13</b>
II.1.1. Définition	<b>13</b>
II.1.2- Classification	<b>13</b>
II.1.2.1- Les aciers inoxydables <b>martensitiques</b>	<b>13</b>
II.1.2.2- Les aciers inoxydables à <b>durcissement par précipitation</b>	<b>14</b>
II.1.2.3- Les aciers inoxydables ferritiques (série 400 ASTM)	<b>14</b>
II.1.2.4- Les aciers inoxydables <b>austénitiques</b> (série 300 ASTM)	<b>15</b>
II.1.2.5- Les aciers inoxydables austéno-ferritiques	<b>17</b>

II.1.3- Les aciers inoxydables 316, 316L et A 790	<b>20</b>
II.2. Soudage des aciers inoxydables	<b>21</b>
II.2.1. Soudage des aciers inoxydables austénitiques	<b>21</b>
II.2.2. Soudage des aciers inoxydables ferritiques	<b>23</b>
II.2.3. Soudage des aciers inoxydables martensitiques	<b>24</b>
II.2.4. Soudage des aciers inoxydables martensitiques	<b>25</b>
II.2.5. Soudage des aciers inoxydables duplex	<b>26</b>
Références	<b>28</b>
<b>Chapitre III Matériaux et Méthodes Expérimentales</b>	
Introduction	<b>29</b>
III.1. Matériaux étudiés	<b>29</b>
III.2. Technique de soudage	<b>30</b>
III.3. Techniques de caractérisation.	<b>32</b>
III.3. 1. Microscopie optique	<b>32</b>
III.3.2. Dureté Vickers	<b>35</b>
<b>Chapitre IV : Résultats et interprétation</b>	
Introduction	<b>38</b>
IV.1.Observations microstructurales	<b>38</b>
IV.1.1.Métaux de base	<b>38</b>
IV.1.1.1. Acier inoxydable A 790	<b>38</b>
IV.1.1.2. Acier inoxydable 316	<b>39</b>
IV.1.1.3. Acier inoxydable 316L	<b>39</b>
IV.1.2. Joints soudés	<b>40</b>
IV.1.2.1. Joint soudé des deux aciers inoxydables semblables A 790	<b>40</b>
IV.1.2.2. Joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L	<b>43</b>
IV.2. Mesure de dureté Vickers	<b>45</b>
IV.2. 1. Joint soudé des deux aciers inoxydables semblables A 790	<b>45</b>
IV.2.2. Joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et	<b>46</b>

316L	
IV.3. Traitement thermique isothermes à 300 °C	<b>47</b>
IV.3.1. Joint soudé des deux aciers inoxydables semblables A 790.	<b>47</b>
IV.3.2. Joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L	<b>50</b>
Conclusion Générale	<b>57</b>
Résumé	<b>58</b>

## Liste de Figures

<b>Figure I.1.</b> Principe de soudage TIG	<b>6</b>
<b>Figure I.2.</b> Pipeline soudé par le procédé TIG.	<b>6</b>
<b>Figure I.3 :</b> Principe de soudage MIG/MAG	<b>7</b>
<sup>2</sup> <b>Figure I.4.</b> Schéma représentatif des différentes zones du joint soudé	<b>10</b>
<b>Figure I.5.</b> Microstructure du joint soudé	<b>11</b>
<b>Figure II. 1.</b> Microstructure typique d un acier inoxydables martensitique.	<b>14</b>
<b>Figure II.2.</b> Microstructure typique d un acier inoxydable austénitique	<b>16</b>
<b>Figure II.3.</b> microstructure typique d un acier inoxydable austénitique	<b>17</b>
<b>Figure II.4.</b> Microstructure typique des aciers inoxydables duplex (UR45N)	<b>18</b>
<b>Figure II.5.</b> Microstructure typique des aciers inoxydables duplex	<b>19</b>
<b>Figure II.6.</b> Micrographie d'un acier inoxydable duplex	<b>20</b>
<b>Figure II.7</b> Zone fondue du joint soudé d un acier inoxydable austénitique	<b>22</b>
<b>Figure II.8</b> profils de dureté Vickers le long du joint soude avant traitement thermique et après traitement thermique	<b>22</b>
<b>Figure II.9</b> Microstructures d'un joint d acier inoxydable ferritique ( a ) Metal de base , ( b ) : Zone de fusion et ( c ) Zone Affectee thermiquement	<b>24</b>
<b>Figure II.10.</b> Microstructures des différentes zones dans le joint soudé	<b>27</b>
<b>Figure III.1</b> Joint préparé pour le soudage et la méthode de déposition des passes.	<b>31</b>
<b>Figure III.2.</b> Soudage de deux tubes d'aciers similaires A790 et dissimilaires 316 avec 316.	<b>32</b>
<b>Figure III.3 :</b> Microscope optique de type Olumpus.	<b>33</b>
<b>Figure III.4 :</b> Polisseuse de type Forcipol.	<b>34</b>
<b>Figure III.5.</b> Réactif d'attaque chimique.	<b>34</b>

<b>Figure III .6.</b> Essai de dureté Vickers.	<b>35</b>
<b>Figure III .7.</b> Microduromètre de type INNOVATEST.	<b>36</b>
<b>Figure III .8.</b> Ecran de l'appareil de dureté Vickers.	<b>37</b>
<b>Figure IV.1.</b> Microstructure de l'acier inoxydable A 790	<b>38</b>
<b>Figure IV.2.</b> Microstructure de l'acier inoxydable 316.	<b>39</b>
<b>Figure IV.3.</b> Microstructure de l'acier inoxydable 316L.	<b>40</b>
<b>Figure IV.4.</b> Macrographie du joint soudé des deux aciers inoxydables semblables A 790.	<b>40</b>
<b>Figure IV.5.</b> Microstructure du joint soudé des deux aciers inoxydables semblables A 790.	<b>41</b>
<b>Figure IV.6.</b> Microstructure du joint soudé des deux aciers inoxydables semblables A 790. (Microstructures agrandies des trois zones : MB, ZAT et ZF)	<b>42</b>
<b>Figure IV.7.</b> Macrographie du joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L	<b>43</b>
<b>Figure IV.8.</b> Microstructure du joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L.	<b>44</b>
<b>Figure IV.9.</b> Microstructure de la zone fondue du joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L.	<b>45</b>
<b>Figure IV.10.</b> Profil de micro dureté Vickers sur le joint soudé des deux aciers inoxydables semblables A 790.	<b>46</b>
<b>Figure IV.11.</b> Profils de micro dureté Vickers sur le joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L.	<b>47</b>
<b>Figure IV.12.</b> Microstructure du joint soudé des deux aciers inoxydables semblables A 790 après un traitement thermique isotherme de 9 h à 300 °C.	<b>49</b>
<b>Figure IV.13.</b> Profil de micro dureté Vickers sur le joint soudé avant et après traitement thermique a 300 C pendant 9 h, des deux aciers inoxydables semblables A 790.	<b>50</b>
<b>Figure IV.14.</b> Microstructure du joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L après un traitement	<b>55</b>
<b>Figure IV.15.</b> Profil de micro dureté Vickers sur le joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L avant et après un traitement thermique isotherme de 9 h à 300 °C.	<b>56</b>

## Liste Tableaux

<b>Tableau III.1.</b> Composition chimique de l'acier inoxydable 316L	29
<b>Tableau III.2.</b> Composition chimique de l'acier inoxydable 316	29
<b>Tableau III.3.</b> Composition chimique de l'acier inoxydable A 790.	30
<b>Tableau III.4.</b> Les paramètres de soudage	31

# Introduction générale

Le transport des hydrocarbures par pipeline reste le moyen le plus sécurisant pour acheminer de grandes quantités de pétroles et de gaz sur de longues distances. Dans le domaine du transport des hydrocarbures, des tubes en acier, sont toujours soudés bout à bout. On note que le soudage est un procédé consistant à assembler deux éléments métalliques, par fusion et re-solidification. La structure d'une soudure est fortement influencée par les cycles thermiques du soudage. La taille et la forme des anciens grains ainsi que les transformations de phase qui se produisent lors du refroidissement sont des caractéristiques essentielles qui définissent les propriétés mécaniques des assemblages.

Dans ce contexte, nous avons opté pour l'étude métallurgique des joints soudés des tubes en acier inoxydables. Notre objectif est de souder des aciers inoxydables semblables et non semblables afin de voir la différence entre joint semblables et non semblables.

Les techniques de caractérisation utilisées sont les suivantes :

- Microscopie optique.
- Microdureté.

Le mémoire est composé de quatre chapitres :

- Chapitre. I Les procédés de soudage des pipelines
- Chapitre. II Soudage des aciers inoxydables
- Chapitre III Matériaux et méthodes expérimentales.
- Chapitre IV : Résultats et interprétation

# **Chapitre I**

## **Les procédés de soudage des pipelines**

## **Introduction**

Le soudage est une opération qui consiste à assurer la liaison permanente de deux ou plusieurs parties constitutives de nature identique ou différente, soit par chauffage, soit par pression, soit par l'action simultanée des deux, de la chaleur et de la pression. Le soudage peut être effectué avec ou sans métal d'apport. Dans ce chapitre on présente dans la première partie les différents types de soudage des pipelines en acier et ensuite l'aspect métallurgique d'un joint soudé.

### **I.1- Type de soudage de pipelines**

Le soudage de tuyaux et de pipelines est généralement effectué à l'aide de l'un des nombreux procédés de soudage à l'arc, notamment :

- Soudage à l'arc sous protection métallique (Shielded Metal Arc Welding )
- Soudage à l'arc sous gaz (Gas Metal Arc Welding)
- Soudage à l'arc avec fil fourré (Flux-Cored Arc Welding)
- Soudage à l'arc submergé (Submerged Arc Welding)
- Soudage à l'arc sous gaz tungstène (Gas Tungsten Arc Welding)

#### **I.1.1. Soudage à l'arc sous protection métallique (SMAW)**

Shielded Metal Arc Welding (SMAW) également connu sous le nom de Manual Metal Arc Welding (MMA ou MMAW) [ 1 ].

Le soudage à l'arc sous protection métallique des pipelines est également connu sous le nom de soudage Stovepipe. Dans SMAW, les pipelines sont soudés en faisant fondre les électrodes avec la chaleur générée par un arc électrique. Le nombre de passages requis varie généralement en fonction de

l'épaisseur du tuyau, de la taille de l'électrode, de la position de soudage et du courant utilisé pour le soudage du pipeline. La règle empirique habituelle pour le soudage de pipelines par SMAW est de considérer une passe pour chaque 1/8 de pouce (3,2 mm) d'épaisseur de tuyau. Les diamètres d'électrode pour le soudage de pipeline SMAW varient normalement de 1/8 pouce à 3,16 pouces (3,2 mm à 4,8 mm).

Le principal avantage du soudage de pipelines par SMAW est que l'équipement de soudage est simple et portable. De plus, aucun flux ou gaz de protection n'est requis pendant le soudage. Cependant, la productivité par cette méthode est moindre en raison de la vitesse de déplacement plus faible [2].

### **I.1.2. Soudage à l'arc sous gaz et métal (GMAW)**

Le soudage à l'arc sous gaz et métal (GMAW), y compris le soudage sous gaz inerte (MIG) et le soudage sous gaz actif (MAG). Offrant une plus grande productivité qu'avec SMAW, ces techniques nécessitent un meilleur contrôle des variables de soudage pour fournir un travail efficace et de haute qualité. Généralement réalisée avec un équipement semi ou entièrement automatique, la GMAW offre des taux de dépôt élevés avec une faible génération de fumée [1].

Le soudage en pipeline par soudage à l'arc sous gaz offre une productivité élevée par rapport à la méthode SMAW Mais cette méthode nécessitait un meilleur contrôle des variables de soudage pour un travail de qualité efficace. Une efficacité de dépôt élevée (90 à 97%) avec une faible génération de fumées sont les avantages du GMAW. Ceci est généralement effectué à l'aide d'un équipement semi-automatique/automatique et le coût de soudage est augmenté[2].

### **I.1.3. Soudage à l'arc avec fil fourré (FCAW)**

Le FCAW sous protection gazeuse utilise des machines semi-automatiques pour fournir une solution de soudage à haute productivité pour les tuyaux.

Le soudage à l'arc avec fil fourré sous protection gazeuse est effectué à l'aide de machines semi-automatiques. Outre une productivité élevée et d'excellentes capacités de soudage, le soudage de pipelines par cette méthode offre une plage de fonctionnement plus large par rapport au GMAW. Cependant, le vent perturbe généralement le gaz de protection qui, à son tour, peut provoquer des défauts de porosité. Dans le cas du soudage à l'arc avec fil fourré autoprotégé, un gaz de protection externe n'est pas nécessaire. Cependant, cela a des taux de dépôt inférieurs par rapport au procédé de soudage à l'arc sous protection gazeuse [2].

#### **I.1.4. Soudage à l'arc submergé**

Le soudage à l'arc submergé est un processus semi-automatique, où l'arc n'est pas visible et il offre les efficacités de dépôt les plus élevées par rapport à toutes les autres méthodes de soudage par pipeline. Un tel soudage fournit des surfaces de soudage saines et sans défaut, mais le traçage est très difficile en raison de l'arc invisible [2].

#### **I.1.5. Soudage au gaz inerte au tungstène (TIG)**

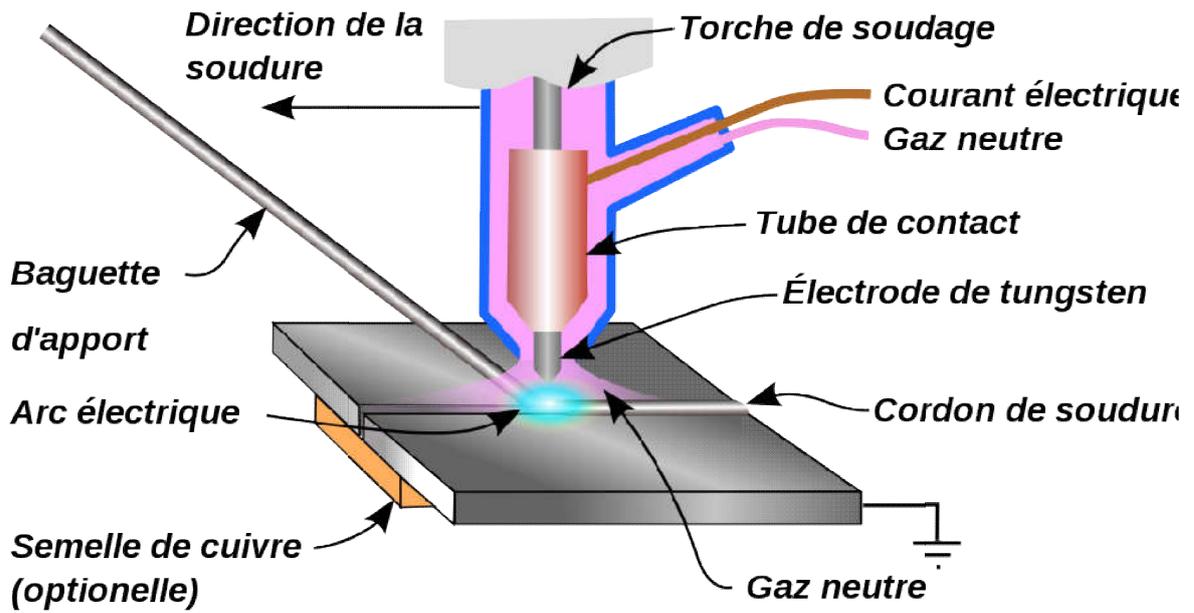
Soudage au gaz inerte au tungstène (TIG) également connu sous le nom de soudage à l'arc au tungstène au gaz (GTAW). Le soudage TIG a de faibles taux de dépôt et des coûts d'équipement plus élevés que les autres méthodes de soudage de tuyaux. Cependant, il produit des soudures de très haute qualité (selon les compétences du soudeur), ce qui le rend parfait pour les travaux de soudage critiques et de haute précision [ 1 ].

Le soudage TIG est utilisé pour souder des joints critiques nécessitant des soudures de précision car cette méthode produit un soudage de pipeline de haute qualité utilisant des électrodes en tungstène. Mais, le soudage des pipelines par soudage à l'arc au tungstène gazeux a des taux de dépôt plus faibles et des coûts d'équipement plus élevés [2].

#### **I.1.5.1.Soudage à l'arc sous gaz de protection procédé (TIG)**

Le soudage TIG est un procédé de soudage à l'arc avec une électrode non fusible, en présence d'un métal d'apport si besoin (FigI.1). TIG est un acronyme de *Tungsten Inert Gas*, où *Tungsten* (Tungstène) désigne l'électrode et *Inert Gas* (Gaz inerte) le type de gaz plasmagène utilisé. L'arc électrique se crée entre l'électrode et la pièce à souder qui est protégée par un gaz ou un mélange de gaz rares tels que l'argon et l'hélium. De fait, l'arc électrique remplace la flamme du chalumeau traditionnel. La soudure à l'arc s'appuie sur l'élévation de la température des pièces à assembler jusqu'au point de fusion grâce au passage d'un courant électrique alternatif ou continu [3].

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



**Figure I.1.** Principe de soudage TIG [4].

La figure I.2 présente un joint soude de pipelines effectuée par le procédé TIG.

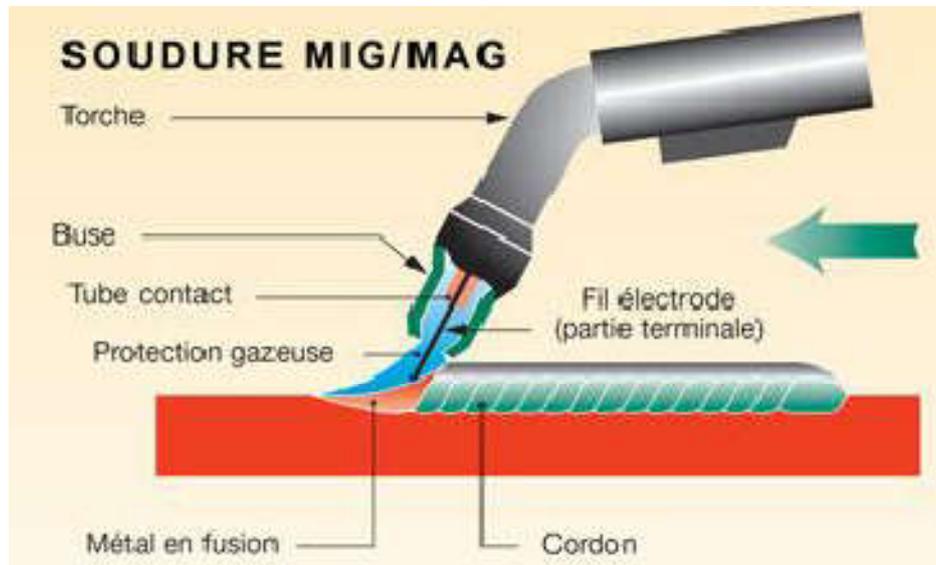


**Figure I.2.** Pipeline soudé par le procédé TIG. [5]

### **I.1.5.2. Soudage avec fil électrode sous protection gazeuse (M.I.G et M.A.G)**

Dans ce procédé le métal d'apport est constitué par un fil qui arrive en continu au niveau de l'arc. Le bain de fusion est protégé par un gaz inerte (Fig. I.3).

Nous pouvons souder avec ce procédé pratiquement tous les métaux avec une grande vitesse de soudage.



**Figure I.3** : Principe de soudage MIG/MAG [6].

## I.2. Étapes pour le soudage de canalisations

Habituellement, les étapes suivantes sont effectuées pour souder un pipeline:

- Préparation du joint : Habituellement, les directives fournies dans l'API 1104 sont utilisées pour la préparation du joint.
- Nettoyage de l'extrémité du tuyau : L'humidité indésirable, la peinture, l'apprêt, la rouille, l'huile, le vernis et les autres revêtements doivent être éliminés en nettoyant les extrémités du tuyau. Notez qu'une propreté appropriée empêche la génération de défauts entraînant des soudures rejetées et des réparations coûteuses.
- Suivez le processus de soudage spécifique aux tuyaux et aux matériaux de canalisation (sélection de l'électrode, exigence de préchauffage, etc.). Tous ces détails sont disponibles dans les spécifications de soudage du projet.
- Soudage de la passe racine

- Soudage des passes à chaud
- Passes de remplissage et de capuchon de soudage
- Réparations en cas de défauts inacceptables

### **I.3.Sélection du processus de soudage de pipeline**

Le soudage de pipelines est l'épine dorsale de la construction de pipelines. Par conséquent, la sélection du procédé de soudage du pipeline doit être effectuée en tenant compte de divers facteurs, comme mentionné ci-dessous :

- Matériau de canalisation
- Diamètre du tuyau et épaisseur de paroi
- Emplacement de soudage
- Propriétés de la soudure
- Direction de soudage (en montée ou en descente)
- Qualité de soudage
- Considération économique
- Considération HSE :

### **I.4.Meilleures méthodes de soudage de l'acier inoxydable**

Le soudage de l'acier inoxydable est la principale méthode d'assemblage utilisée lors de la fabrication de produits et de composants en acier inoxydable. En raison de son excellente résistance à la corrosion, de ses propriétés de température élevée et cryogénique, l'acier inoxydable est l'un des matériaux d'ingénierie les plus utilisés. L'acier inoxydable est largement utilisé dans les industries du pétrole et du gaz, de la chimie, de la pétrochimie, des centrales électriques, de l'alimentation et de la pharmacie[7].

Le soudage de l'acier inoxydable est généralement effectué par les deux méthodes de base : le soudage par fusion et le soudage par résistance.

Le soudage par fusion de l'acier inoxydable génère de la chaleur par un arc électrique créé entre l'électrode métallique et le matériau en acier inoxydable. Les quatre principaux procédés largement utilisés pour le soudage par fusion des aciers inoxydables sont :

SMAW (soudage à l'arc sous protection métallique)

GTAW (soudage à l'arc sous gaz tungstène)

GMAW (soudage à l'arc sous gaz métal)

SAW (soudage à l'arc submergé)

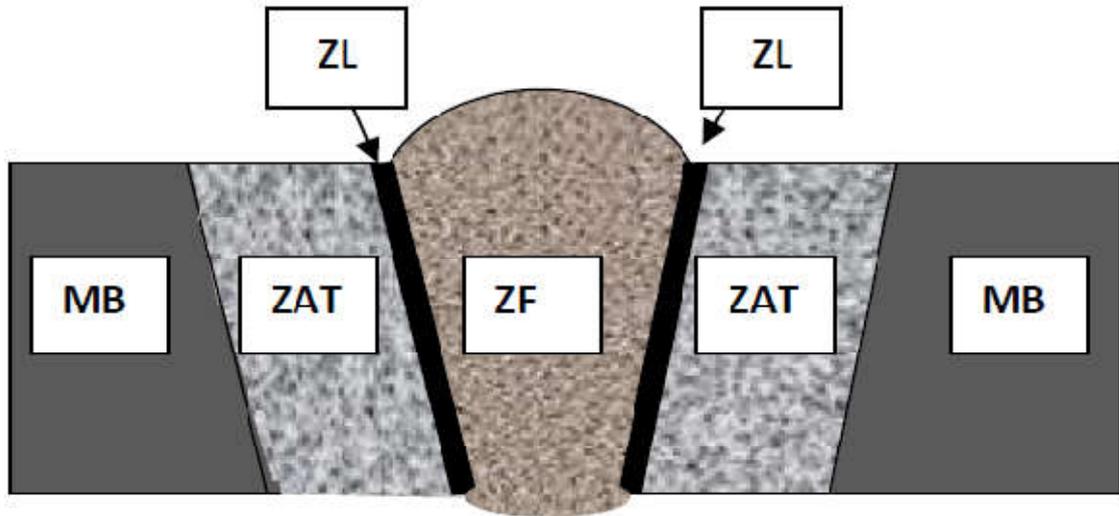
Il existe d'autres méthodes de soudage par fusion comme le soudage par faisceau d'électrons, laser et plasma. A noter que, pour conserver au joint une résistance à la corrosion et des propriétés mécaniques optimales, la zone de soudure doit être protégée de l'atmosphère par un gaz, du vide ou du laitier[7].

## **I.5. Aspect métallurgique d'un joint d'acier soudé**

Le procédé de soudage par fusion comme le soudage à l'arc provoquera la formation de plusieurs zones distinctes et qui sont observables par microscopie optique sur une section transversale d'un joint soudé. Ces zones sont :

- 1 zone fondue ou zone de fusion (ZF)
- 2 zone de liaison ( ZL )
- 3 zone affectée thermiquement (ZAT )
- 4 Métal de base (MB).

La figure I.4 présente un schéma représentatif des différentes zones du joint soudé



**Figure I.4.** Schéma représentatif des différentes zones du joint soudé

Les caractéristiques de chaque zone est expliquée dans la partie suivante :

### **I.5.1 – Zone fondue**

C'est la zone durant l'opération de soudage où l'état liquide a été obtenu qu'il y aie eu ou non apport de métal.

### **I.5.2 – Zone de liaison**

C'est la frontière entre le métal fondu et le métal de base non fondu

### **I.5.3 – Zone affectée thermiquement**

Elle concerne le métal de base qui n'a pas fondu mais qui a subi des modifications de structure (grosseur des grains) ou physico-chimiques (natures et proportions des constituants). Pour les aciers, la ZAT est la zone du métal de base qui a été austénitisée au cours du cycle de soudage.

### **I.1.4 – Métal de base**

Le métal de base est la zone qui n'a pas été affectée par l'opération de

soudage du point de vue des modifications physico-chimiques. La figure I.5 présente la microstructure du joint soudé. On constate la différence microstructurale entre les différentes zones.



**Figure I.5.** Microstructure du joint soudé[8].

## Références

- [1] Document téléchargé le 03/06/2022 de <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-pipe-welding> ( document traduit de l'anglais ).
- [2] Written by Anup Kumar Dey in Construction, Mechanical, Pipeline, Piping Design Basics, Piping Interface téléchargé le 03/06/2022 de <https://whatispiping.com/pipeline-welding/> ( document traduit de l'anglais
- [3]. <https://www.wikiforhome.org/>
- [4] <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=104625159>
- [5] Document téléchargé le 03/06/2022 de <https://www.youtube.com/watch?v=VZNc1iXRROA>
- [6] Soudage MIG-MAG, téléchargé le 15/06/2022 de <https://www.telwin.com/fr/telwin-academy/saldatura/mig-mag-welding/>  
<https://www.telwin.com/fr/telwin-academy/saldatura/mig-mag-welding/>
- [7] Written by Anup Kumar Dey in Engineering Materials, Mechanical telechargée le 03/06/2022 de <https://whatispiping.com/welding-stainless-steel/>
- [8] Yacine Kchaou. Etude comparative de la tenue mécanique des joints soudés des réservoirs sous pression de deux aciers inoxydables super austénitique et duplex.. Autre. ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers; École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie), 2015.

# **Chapitre II**

## **Soudage des aciers**

### **inoxydables**

Dans ce chapitre; on présente les types des aciers inoxydables et leurs soudage

## **II.1.Types d'aciers inoxydables**

### **II.1.1.Définition :**

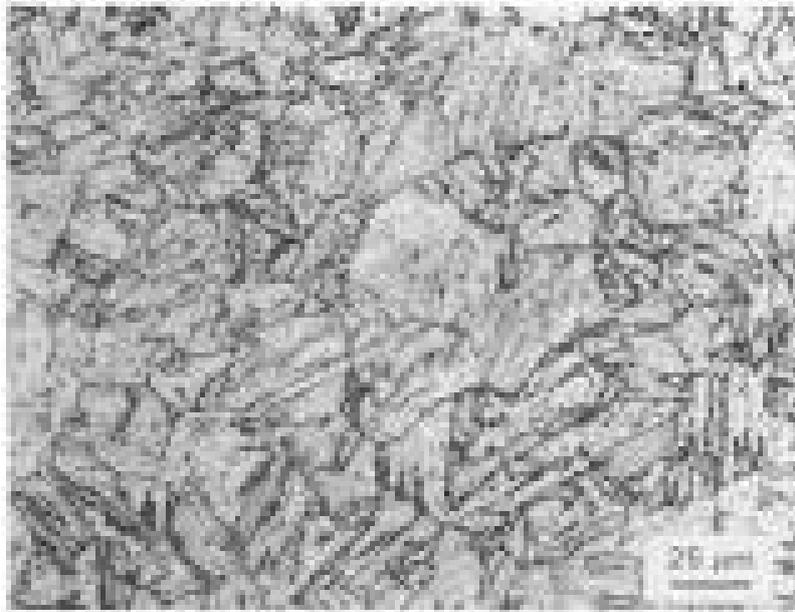
Un acier inoxydable est, d'après la définition de la norme NF EN 10020, un acier contenant au minimum 10,5 % de chrome et au maximum 1,2 % de carbone [1].

### **II.1.2-Classification :**

La classification ci-après est fondée sur la structure cristalline. On peut ainsi distinguer :

#### **II.1.2.1- Les aciers inoxydables martensitiques:**

Les aciers inoxydables martensitiques sont des aciers contenant de 12 à 18 % de chrome, de teneur en carbone assez élevée (jusqu'à 1,2 %). Ils présentent une résistance à la corrosion modérée, un allongement à la rupture faible et des caractéristiques mécaniques élevées. Ces aciers sont magnétisables[1]. La figure II.1 présente la microstructure typique d'un acier inoxydable martensitique. Cette martensite est formée de lattes.



**Figure II. 1.** Microstructure typique d'un acier inoxydable martensitique.

#### **II.1.2.2- Les aciers inoxydables à durcissement par précipitation**

Les aciers inoxydables à durcissement par précipitation ont une teneur en chrome souvent comprise entre 15 et 17 %. Ces aciers ont une matrice martensitique (parfois avec de l'austénite) et ont subi un traitement spécifique permettant la précipitation de composés, par exemple riches en cuivre. Ils permettent d'améliorer les caractéristiques mécaniques de résistance à la rupture des aciers inoxydables [1].

#### **II.1.2.3- Les aciers inoxydables ferritiques (série 400 ASTM) :**

Les aciers inoxydables ferritiques sont des aciers à faible teneur en carbone (inférieure à 0,1 %) dont la structure est ferritique. La résistance à la corrosion s'améliore avec l'augmentation de la teneur en chrome. Les ferritiques disposent de bonnes caractéristiques mécaniques. Leur limite d'élasticité est plus importante que celle des austénitiques. Il faut aussi signaler leur plus faible coefficient de dilatation ( $12 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ), leur plus grande conductivité thermique,

leur insensibilité à la corrosion sous contrainte. Ces aciers sont magnétisables.

On distingue :

- Les aciers ferritiques faiblement alliés à 11-14 % de chrome,
- Les aciers ferritiques à 15-18 % de chrome, non stabilisés.
- Les aciers ferritiques à 16-20 % de chrome stabilisés. Des additions de titane, niobium et/ou plus rarement de zirconium présentant une grande affinité au carbone et à l'azote permettent la formation de carbonitrides limitant la croissance des grains. Cette « stabilisation » est importante en particulier pour le contrôle de la taille des grains en ZATet donc des caractéristiques mécaniques des soudures ainsi que pour les propriétés de tenue au fluage.
- Les aciers ferritiques à 18-20 % de chrome contenant du molybdène (1-2 %) pour améliorer leur tenue à la corrosion
- Les aciers ferritiques à très haute teneur en chrome (22-25 %) et « super-ferritiques » (plus de 25 % de chrome et jusque 3 % de molybdène) ; ces aciers présentent une résistance à la corrosion améliorée dans les milieux neutres chlorurés tels que l'eau de mer. Un apport de nickel (jusque 4 %) permet d'améliorer leur ténacité.
- Les aciers ferritiques « réfractaires » (à 14-20 % de chrome) destinés aux températures élevées (corrosion sèche) dont la majorité ont des additions de niobium pour améliorer la tenue au fluage. Certaines nuances ont également des ajouts d'aluminium [1].

#### **II.1.2.4- Les aciers inoxydables austénitiques (série 300 ASTM) :**

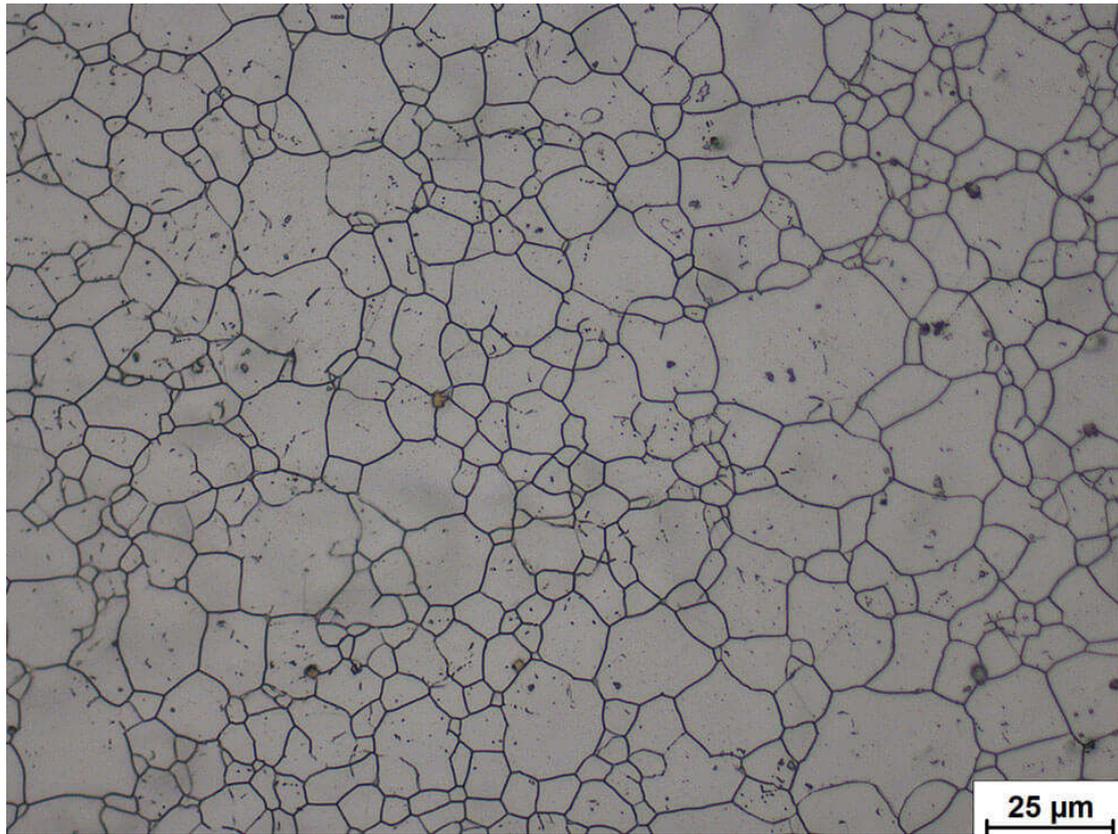
Les aciers inoxydables austénitiques ce sont des aciers contenant du chrome (couramment 18 %) et du nickel (couramment de 8 à 10 %) dont la structure est austénitique à température ambiante. Ils allient une facilité de mise en œuvre avec une grande aptitude à la déformation et une résistance à la

corrosion satisfaisante dans de très nombreux milieux (mais pas, sans entretien, en milieu marin). Une grande stabilité structurale permet leur utilisation à hautes températures (échangeurs de chaleur) et aux basses températures (stockage de gaz liquéfié). Ces aciers ne sont pas magnétisables[1]. La figure II.2. présente la microstructure typique d'un acier inoxydable austénitique (attaqué par une solution dite de Braha).



**Figure II.2.** Microstructure typique d'un acier  
Inoxydable austénitique[2].

La figure II.3. Présente la microstructure typique d'un acier inoxydable austénitique(attaqué par le Nital).



**Figure II.3.** Microstructure typique d'un acier inoxydable austénitique [2].

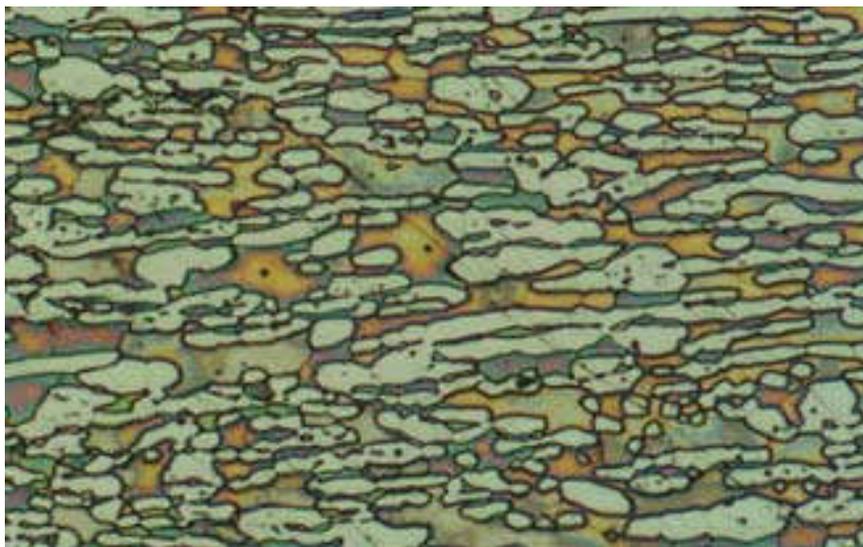
#### **II.1.2.5- Les aciers inoxydables austéno-ferritiques (souvent appelés aciers duplex) :**

Les aciers inoxydables austéno-ferritiques présentent des parts de ferrite et d'austénite sensiblement voisines. Les caractéristiques mécaniques sont plus élevées que celles des aciers inoxydables austénitiques ou ferritiques, tout en gardant un allongement à la rupture voisin de 40 %. Leur emploi est généralement limité aux températures inférieures à 300 °C. On distingue :

- Les aciers duplex sans molybdène avec 20-23 % de chrome, 1-4 % de nickel et 0,12 à 0,3 % d'azote considérés comme les nuances duplex d'entrée de gamme mais dont la tenue à la corrosion est équivalente aux nuances 304/316 suivant l'équilibrage chimique et les conditions d'emploi.

- Les nuances duplex avec une teneur en chrome voisine de 22 % mais avec additions de 1,5 % ou plus (généralement 3 %) de molybdène et 0,15 à 0,25 % d'azote. Parmi ces aciers, la nuance dite 2205 est le standard des nuances duplex, avec des applications essentiellement pour les biens d'investissements en milieux sévères (pétrole-gaz, eau de mer, dessalement, pâte à papier, chimie et pétrochimie...).
- Les nuances superduplex avec 25 % de chrome mini, 6-7 % de nickel, 3,5-4 % de molybdène et 0,25-0,4 % d'azote. Ces nuances peuvent contenir des additions complémentaires de tungstène ou/et de cuivre. Elles sont destinées aux milieux les plus corrosifs comme ceux de la chimie minérale, les Ombilical, l'eau de mer chaude [1].

La figure II.4. Présente la microstructure typique d'un acier inoxydable duplex. La microstructure est formée par des îlots d'austénite, allongées dans une matrice ferritique.



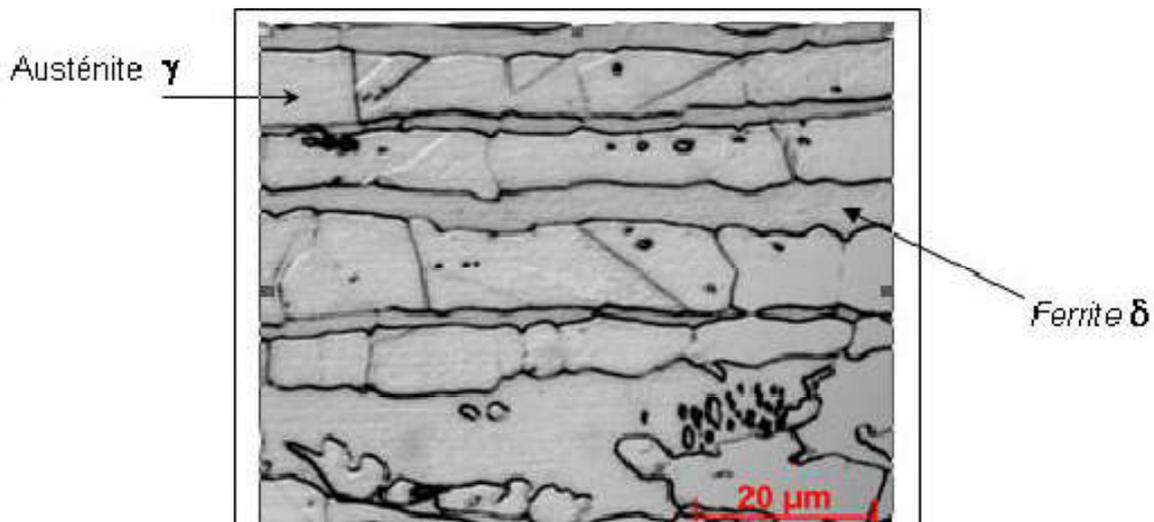
**Figure II.4.** Microstructure typique des aciers inoxydables duplex (UR45N) [3].

La figure II.5 montre aussi un acier inoxydable duplex. Cet Acier duplex a été attaqué par électrolyse avec une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium à 40 %, montrant de l'austénite marron et de la ferrite bleue. Fond clair.



**Figure II.5.** Microstructure typique des aciers inoxydables duplex[2].

Belkessa et al. [4] ont présenté la micrographie d'un acier inoxydable duplex austéno-ferritique de nuance SAF 2205 (UNS S31803). (Fig. II. 6) qui montre l'existence d'une structure en bande biphasique (ferrite  $\delta$  et austénite  $\gamma$ ); à cet état, aucune forme de précipité n'a été observée. La forme allongée des grains de ferrite et d'austénite est due au procédé de laminage à chaud lors de l'élaboration du matériau.



**Figure II.6.** Micrographie d'un acier inoxydable duplex[4].

### II.1.3- Les aciers inoxydables 316, 316L et A 790

**L'acier inoxydable 316** est généralement composé de 16 à 18 % de chrome, de 10 à 14 % de nickel, de 2 à 3 % de molybdène et d'environ 0,08 % de carbone. L'acier inoxydable 316 est largement utilisé dans les environnements hautement corrosifs tels que les usines chimiques, les raffineries et les équipements marins. On note que l'acier inoxydable 316 est un acier austénitique.

**L'acier inoxydable 316L** a une teneur en carbone plus faible et il est utilisé dans des applications qui soumettent le métal à des risques de sensibilisation. L'acier inoxydable 316L est un acier austénitique.

**L'acier inoxydable A790** est un acier duplex. Les aciers inoxydables duplex sont dits « duplex » car ils présentent une microstructure biphasique constituée de grains d'acier inoxydable ferritique et austénitique. L'image montre la phase austénitique jaune comme des "îlots" entourés de la phase ferritique

bleue. L'acier inoxydable duplex est supérieur à celui des nuances d'acier inoxydable les plus couramment utilisées, à savoir 304 et 316[].

## **II.2. Soudage des aciers inoxydables**

### **II.2.1. Soudage des aciers inoxydables austénitiques**

**Le soudage des aciers inoxydables austénitiques** à l'électrode enrobée ou par le procédé TIG et MIG ne présente pas de difficultés particulières si on observe quelques règles simples. Dans la majorité des cas, réaliser un joint soudé dans ces conditions permet d'obtenir une bonne résistance à la corrosion [5].

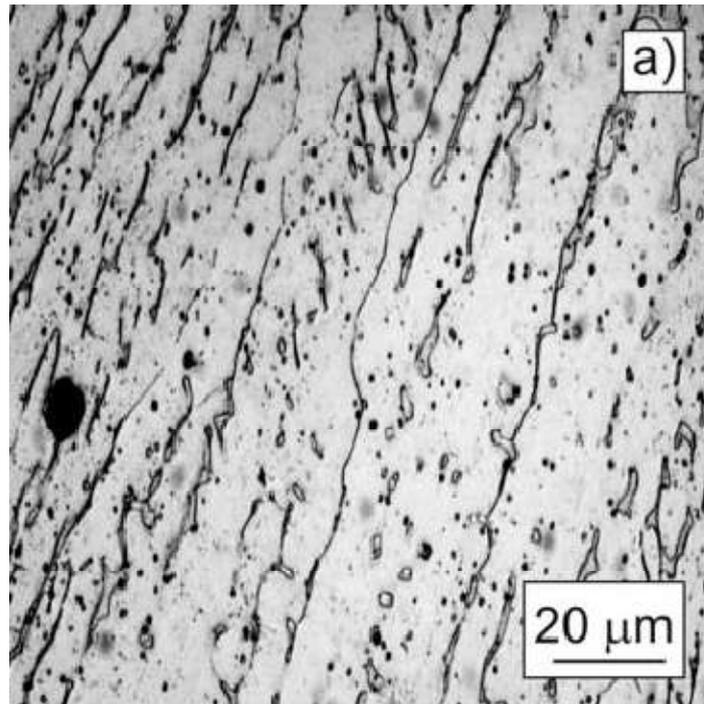
Les règles à adopter pour garantir ces bonne résistance à la corrosion sont :

– Adopter un métal d'apport de composition chimique analogue à celle du métal de base. Les fabricants de produits d'apports proposent pour chaque nuance d'acier un vaste choix d'électrodes, de fils d'apports dont la composition chimique est en principe équilibrée de façon à obtenir une structure après soudage qui comporte moins de 5% de ferrite. On évite ainsi la fissuration à chaud.

– Éviter toute pollution des bords à souder qui pourrait être préjudiciable à la tenue à la corrosion de l'assemblage ou encore provoquer une fissuration à chaud de la soudure.

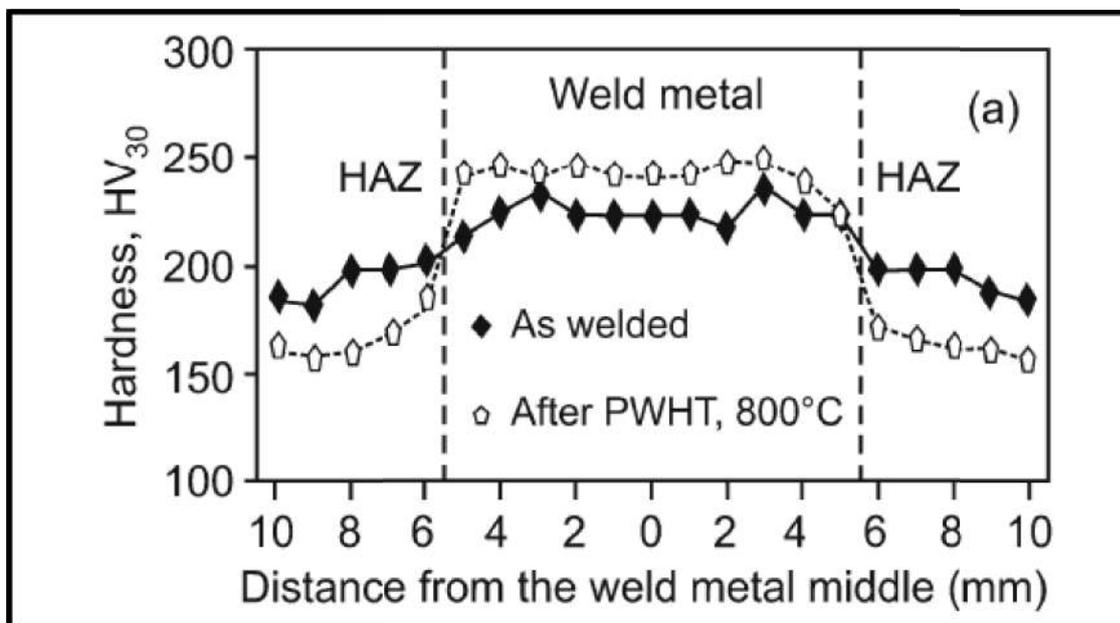
– Tout préchauffage et post-chauffage est inutile, voire nuisible[5].

La figure II.7 montre la zone fondue du joint soudé d'un acier inoxydable austénitique.



**Figure II.7** Zone fondue du joint soudé d un acier inoxydable austénitique[6].

La figure II.8 montre deux profils de dureté Vickers le long du joint soude avant traitement thermique et après traitement thermique [6].



**Figure II.8** profils de dureté Vickers le long du joint soude avant traitement thermique et après traitement thermique [6].

## II.2.2. Soudage des aciers inoxydables ferritiques

Les aciers à 13% de Chrome présentent une teneur en carbone de 0,05% maximum. Leur aptitude au soudage est bonne car elle peut se comparer à celle des aciers au carbone “soudables”. On les soude de préférence à l’arc électrique avec soit des électrodes déposant un acier de même composition chimique ou soit pour une utilisation à une température inférieure à 500°C, des électrodes au nickel-chrome-molybdène 18-12-3, pour l’assemblage de pièces de fortes masses ou particulièrement bridées.

Pour les aciers dont la composition chimique est de 16 à 30% de Chrome, il y a un fort grossissement des grains de ferrite dans la ZAT (Zone affectée thermiquement). Leur soudabilité est médiocre. Ils ne subissent pas de transformation de leur structure et ne peuvent pas être régénéré par un quelconque traitement thermique. Le préchauffage est à proscrire, ainsi que les procédés de soudage à forte énergie.

On emploie alors pour les souder, une méthode de soudage par multi-passe, des électrodes de petit diamètre et une faible énergie de soudage.

Le choix d’une électrode ferritique ou austénitique est délicat, car pour l’emploi d’une électrode ferritique (sans nickel), quand la température de service est supérieure à 700°C, que l’atmosphère est réductrice (la quantité d’air réellement utilisée est inférieure à celle théoriquement nécessaire.) et chargée en soufre, il y a un risque de corrosion.

L’emploi d’une électrode ferritique coté corrosion et d’une électrode austénitique pour le remplissage peut s’envisager. On peut utiliser des fils d’apport de même nuance pour le soudage TIG et MIG[5]. La figure II.9 présente la microstructure d’un joint d’acier inoxydable ferritique [7].

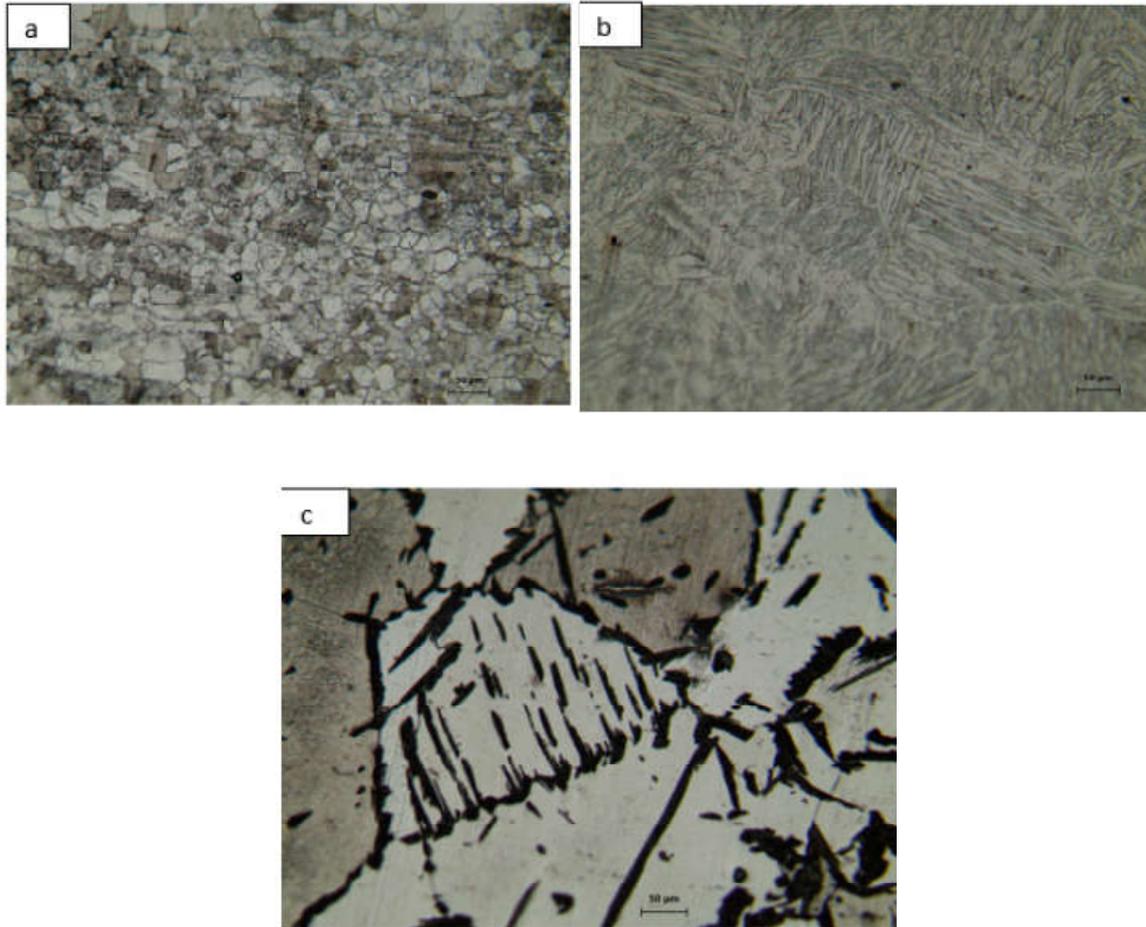


Figure II.9 Microstructures d'un joint d'acier inoxydable ferritique ( a ) Metal de base , ( b ) : Zone de fusion et ( c ) Zone Affectée thermiquement [7].

### II.2.3. Soudage des aciers inoxydables martensitiques

Ces aciers prennent la trempe par refroidissement rapide. Leur soudage implique des précautions particulières.

A l'échauffement et au refroidissement, les aciers subissent des transformations :  
 Etat Ferritique  $\implies$  Austénitique  $\implies$  Ferrite  $\implies$  Austénique  $\implies$  Ferritique  
 Cette transformation peut se comparer aux aciers soudables d'usage général avec :

- risques de ségrégation importante à la solidification
- précipitation de carbure de chrome dans la ferrite.

Le risque de fissuration à froid croît avec la teneur en carbone. Si la teneur en carbone est supérieure à 0,1%, un préchauffage de 250°C est nécessaire. Au-delà

de 0,2% et pour un soudage de pièces de forte épaisseur, un préchauffage de 400°C est nécessaire. Celui-ci est complété par un post-chauffage et un traitement thermique de revenu.

Dans le cas où un traitement thermique après soudage s'avère impossible, on peut employer des électrodes austénitiques au Chrome et Nickel. On utilisera alors des électrodes de faible diamètre, avec une faible intensité pour réduire l'échauffement du métal de base.

La structure martensitique est sensible à la fissuration en dessous de 400°C d'où :

- préchauffage nécessaire (200–300°C)
- choix des produits d'apport à faible teneur en hydrogène
- postchauffage à 300°C
- traitement thermique après soudage recommandé (~750 °C)[5].

#### **II.2.4. Soudage des aciers inoxydables martensitiques**

On peut comparer leur soudabilité à celle des aciers austénitiques avec quelques particularités.

Les produits d'apport devront être choisis de manière à obtenir un métal fondu austéno-ferritique dont la proportion de ferrite/austénite reste la même que celle du métal de base.

Les produits d'apport auront la même composition que le métal de base avec en plus 2 à 3% de Nickel ou de l'Azote pour reformer l'austénite. Le métal d'apport le plus courant est composé de 22% de Chrome, 9% de Nickel et 3% de Molybdène. Ce métal d'apport contient de l'azote qui est gammagénisant, ou austénisant.

Le préchauffage est formellement déconseillé, car cela entraînerait une formation de criques ou un phénomène de précipitation de carbures de chrome aux joints des grains. On utilise des électrodes de petits diamètres, sous faible

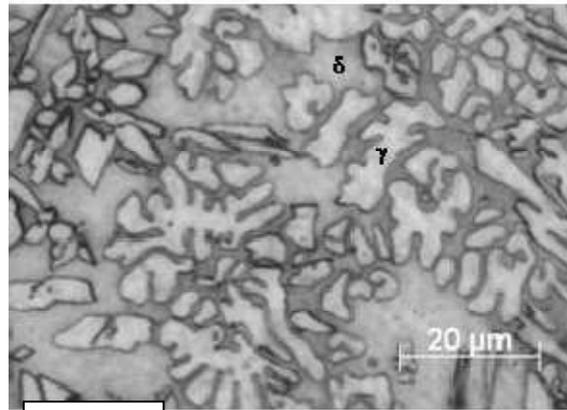
intensité pour réduire l'échauffement du métal de base. La température entre les passes aux abords du joint ne devra pas excéder 150°C. Un traitement de détensionnement ou de relaxation peut être exécuté à une température de 475 à 525°C[5].

### **II.2.5. Soudage des aciers inoxydables duplex**

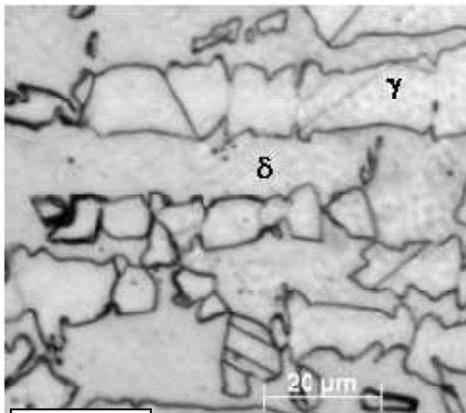
Belkessa et al. [4] ont étudié le soudage par le procédé tig d'un acier inoxydable austéno-ferritique de nuance SAF 2205. D'après ces auteurs, lors des opérations de soudages des aciers inoxydables duplex, la structure se solidifie en mode ferritique, la transformation en austénite  $\gamma$  se poursuit à l'état solide. L'observation au microscope optique du métal fondu a montré la structure dendritique et aussi la présence de l'austénite sous forme Widmanstätten dans une matrice ferritique comme le montre la figure II.10a

La zone affectée thermiquement est constituée de deux zones : la zone de surchauffée et la zone recuite partiellement. La zone de surchauffée (adjacente à la zone fondue), est caractérisée par une faible densité de grains austénitiques (figure II.10.b), comparée à la zone fondue et la ZAT partiellement recuite. Ceci est dû 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 par la suite lors du refroidissement de l'échantillon [3].

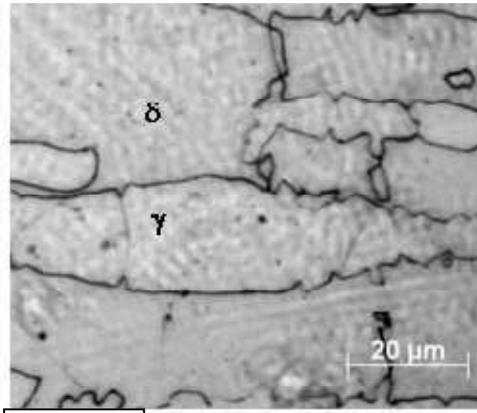
La zone recuite partiellement (adjacente au métal de base), (figure II.10.c) est caractérisée par une croissance remarquable de la taille des grains comparés au métal de base.



**a** Micrographie de la zone fondue



**b** Microstructure de la ZAT surchauffée



**c** Microstructure de la ZAT partiellement recuite

**Figure II.10.** Microstructures des différentes zones dans le joint soudé[4].

## Références

- [1] Document téléchargé le 06/06/2022 de <https://www.a3ms.fr/les-aciers-inoxydables/>
- [2] Document téléchargé le 06/06/2022 de <https://www.struers.com/fr-FR/Knowledge/Materials/Stainless-Steel#main>
- [3] R. Dakhlaoui, C. Brahamet A. Baczmański, MATERIAUX 2006 13-17 Novembre 2006 – Dijon, France.
- [4] Brahim BELKESSA, Riad BADJI, Mabrouk BOUABDALLAH, Naima Ouali, Youcef Yahmi, Comportement microstructural et mécanique d'une soudure en acier inoxydable duplex 2205 à haute température. Article téléchargé le 07/06/2022 du <https://www.google.com/url?esrc=s&q=&rct=j&sa=U&url=https://library.crti.dz/cf383/document&ved=2ahUKEwigxYnnipv4AhUPiv0HHTVKBugQFnoECA YQAg&usg=AOvVaw38c3ncA0dijIpVx0z10XbG>
- [5]. téléchargé le 06/06/2022 de <https://www.rocdacier.com/soudage-aciers-inoxydables-austenitiques/>
- [6] S. Kožuh, M. Gojić, L. Kosec, Mechanical properties and microstructure of austenitic stainless steel after welding and post-weld heat treatment, Kovove Mater. 47 2009 253–262.
- [7] Shahid Zaman, Muhammad Adil Khattak, Mohd Nasir Tamin, Effects of Welding on the Microstructural Properties of AISI430 Ferritic Stainless Steel, Journal of Advanced Research in Materials Science 44, Issue 1 (2018) 25-32.

**Chapitre III**  
**Matériaux et**  
**Méthodes**  
**Expérimentales**

## Introduction.

Dans ce chapitre, on présente les matériaux utilisés, les méthodes de soudage et les techniques de caractérisation.

### III.1. Matériaux étudiés :

Pour cette étude, on a choisi de souder deux aciers inoxydables semblables et non semblables: A 790, 316 et 316L, sous forme de tube. L'acier A 790 est utilisé pour les installations pétrolières et surtout pour les têtes des puits. Par contre les aciers 316 ou 316L sont utilisés pour les installations pétrolières.

La composition chimique de l'acier 316L est présentée dans le tableau III.1.

**Tableau III.1.** Composition chimique de l'acier inoxydable 316L

C, ≤	Si, ≤	Mn, ≤	P, ≤	S, ≤	Cr	Ni	Mo	N, ≤
0.03	0.75	2.00	0.045	0.030	16.0-18.0	10.0-14.0	2.00-3.00	0.10

(Ref : <https://matieredumonde.com/acier-inoxydable-316>)

La composition chimique de l'acier 316 est présentée dans le tableau III.2.

**Tableau III.2.** Composition chimique de l'acier inoxydable 316

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	16.0-18.0	10.0-14.0	2.00-3.00	
0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	16.0-18.0	10.0-14.0	2.00-3.00	0.10

(Réf : <https://matieredumonde.com/acier-inoxydable-316>)

La composition chimique de l'acier A 790 est présentée dans le tableau III.3.

**Tableau III.3.** Composition chimique de l'acier inoxydable A 790.

carbone C	≤0,15
manganèse Mn	≤1.25
silicium Si	≤1.00
chrome Cr	12,0 ~ 14,0
nickel Ni	≤0,60 %
phosphore P	≤0.06
soufre S	≤0,15
Molybdène	≤0,60

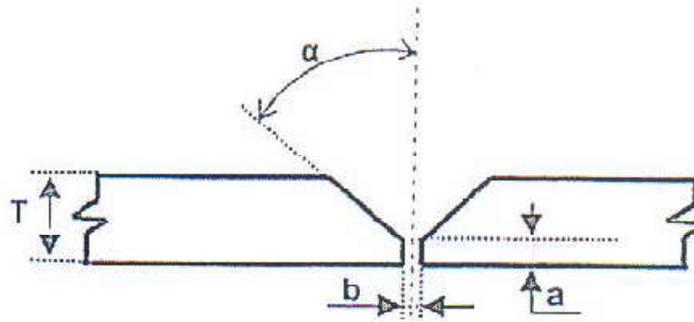
(Réf : <https://fr.cnxysteels.com/stainless-steel-pipe/astm-a790-super-duplex-2507-uns-s32750-stainless.html> )

### III.2. Technique de soudage.

Les conditions de soudage sont les suivantes :

- 1- Eprouvette (1):** Nuance: **A 790 GR UNS 31803**  
 $\varnothing=4"$ , Epaisseur=13.49mm  
 Electrodes utilisées: ER 2209 (1ère passe Procédé GTAW)  
 E 2209-15 ( BF Procédé SMAW)
- 2- Eprouvette (2):** **Utilisé pour les installations pétrolières.**  
 Nuance: A312 TP **316/316L**  
 $\varnothing=4"$ , Epaisseur=6.02 mm  
 Electrode utilisée: ER 316L (Toutes passes GTAW)

La configuration du joint préparé pour le soudage et la méthode de déposition des passes sont présentées dans la figure III.1.

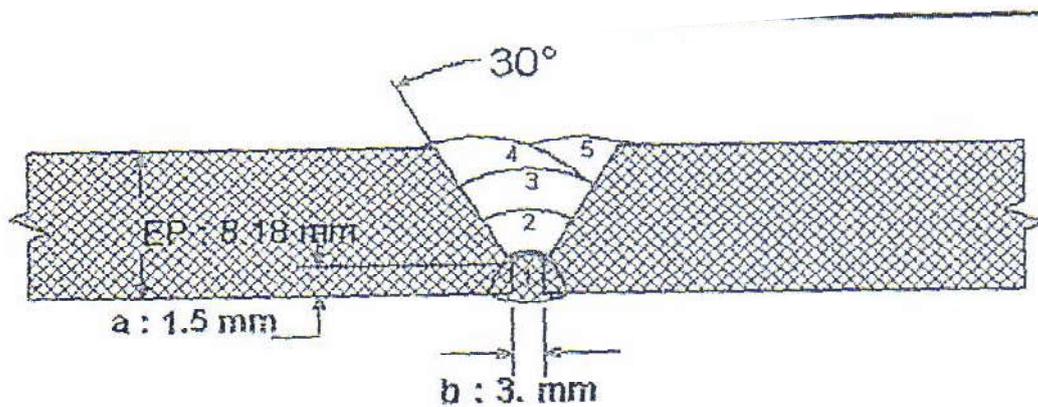


Joint design: V Angle:  $\alpha = 30^\circ \pm 2,5^\circ$   
 Type de chanfrein: V Angle:  $\alpha = 30^\circ \pm 2,5^\circ$

Strink: a =  $1,6 \pm 0,8$  mm Gap: b =  $3,2 \pm 0,8$  mm  
 Talon: a =  $1,6 \pm 0,8$  mm Ecartement b =  $3,2 \pm 0,8$  mm

Backing material: Nature N/A  
 supp. Envers

Form: Dimensions  
 Forme: Dimensions:

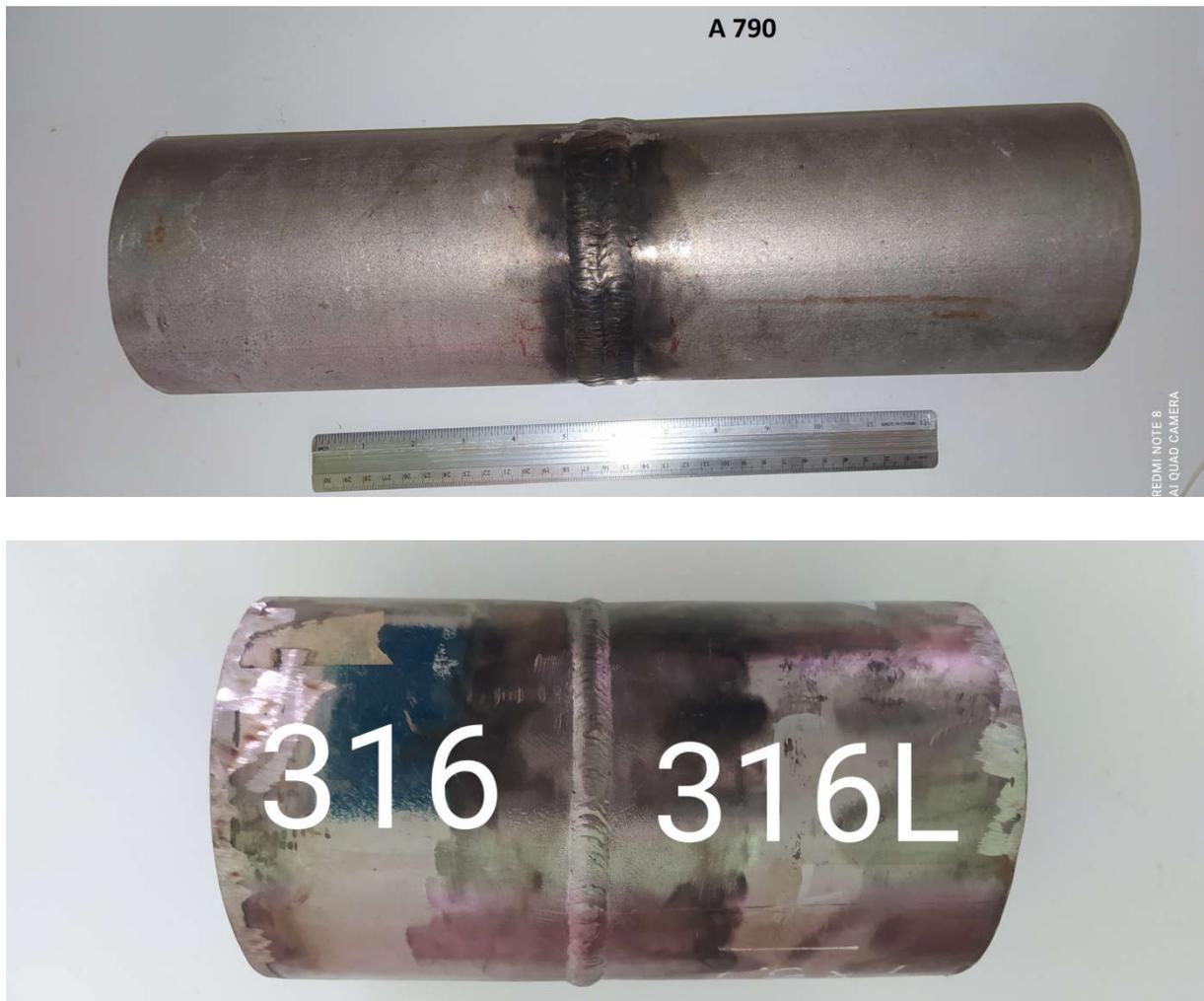


**Figure III.1** Joint préparé pour le soudage et la méthode de déposition des passes.

**Tableau III.4.** Les paramètres de soudage sont rassemblés dans le tableau III.2

Intensité	100 A
Tension	20 V
Vitesse de soudage	5cm/min
Gaz	Argon

La figure III.2. Présente les deux tubes soudés.



**Figure III.2.** Soudage de deux tubes d'aciers similaires A790 et dissimilaires 316 avec 316.

### **III.3. Techniques de caractérisation.**

#### **III.3. 1. Microscopie optique**

Le microscope optique sert à déterminer ou à observer la microstructure de l'échantillon (taille des grains, forme des grains.....etc.). On a utilisé un microscope métallographique de type Olympus relié à un appareil photo numérique (Fig.III.3). C'est un appareil optique qui permet l'agrandissement de l'image et par conséquent, l'observation des petits détails.



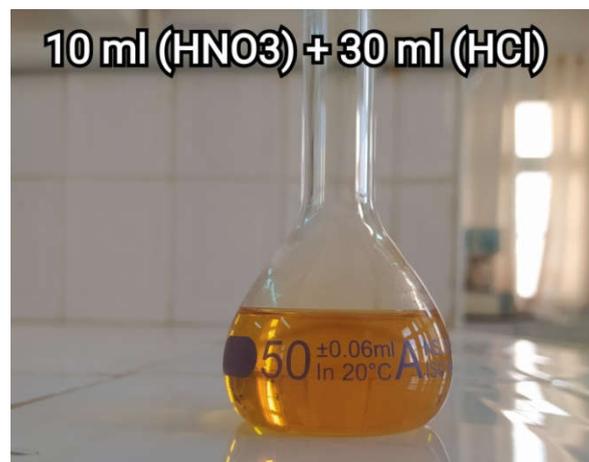
**Figure III.3 :** Microscope optique de type Olumpus.

Les échantillons sont polies en utilisant une polisseuse de type Forcipol (Fig.III.4). Les procédures métallographiques classiques sont suivies avec l'utilisation des différents papiers abrasifs : grades successivement utilisés : 240, 400, 600, 800 et finition 1000, 1200, 2400, 4000 puis brillantage à l'aide d'une pâte diamantée de 6  $\mu\text{m}$  jusqu'à l'obtention d'une surface bien polie (miroir).



**Figure III.4 :** Polisseuse de type Forcipol.

Après polissage, les échantillons sont attaqués chimiquement pour révéler la morphologie des différentes phases présentes ainsi que les joints de grains. L'attaque métallographique est réalisée par la solution chimique suivante 30 ml Acide chlorhydrique (HCl) et 10 ml Acid nitrique(HNO<sub>3</sub>) (Fig.III.5) pendant 1 min et 30s.



**Figure III.5.** Réactif d'attaque chimique.

Les échantillons sont tous nettoyés par immersion dans l'eau distillée, puis séchées à l'air. Les échantillons sont examinés au MO au différent grossissement.

### III.3.2.Dureté Vickers :

La dureté est une partie complémentaire de l'examen métallographique qui donne un aperçu sur les caractéristiques mécaniques, en mesurant la dureté des matériaux. Les essais de Micro dureté Vickers consistent à mesurer les longueurs des diagonales de l'empreinte laissée à la surface de l'échantillon après application d'une charge constante d'un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée en diamant (Fig.III.6). Le temps de mise en charge est de 15 secondes, tout comme le temps de maintien de la charge.

L'empreinte est d'autant plus grande que le matériau est mou.

La dureté Vickers est donnée par formule :

$$H \text{ (H=F/S)}$$

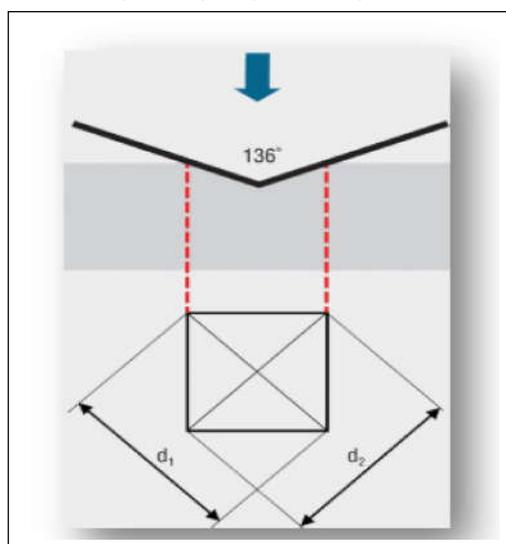
$$S = \frac{d^2}{2 \cdot \sin 68^\circ}$$

$$Hv = 1.8544 \frac{F}{D^2}$$

La dureté Vickers s'écrit :

Avec F : charge d'essai en kilogramme force à  $\pm 1\%$ , S : la surface indentée en  $\text{mm}^2$ .

$$D = (d_1 + d_2) / 2 \text{ (en mm)}$$



**Figure III .6 .** Essai de dureté Vickers.

Le pénétrateur de type Vickers est utilisé pour les essais de dureté et les essais de micro dureté. Les essais de dureté correspondent à des charges comprises entre 5 et 100 Kilogrammes forces et les essais de micro dureté correspondent à des charges inférieurs à 1000 g et relatent la dureté sur des domaines microscopique. Nous avons utilisé la charge 1kg force. L'appareil utilisé de marque INNOVATEST (Fig.III.7) et qui équipe d'un microscope optique pour permettre de positionner l'empreinte sur la face désiré, il permet l'acquisition automatique des valeurs de micro dureté Hv.



**Figure III .7.** Microduromètre de type INNOVATEST.

La figure III.8 montre une empreinte de dureté qui a été affichée sur l'écran du duromètre Vickers. De plus; la courbe du profil de dureté est aussi tracé par l'appareil elle-même.

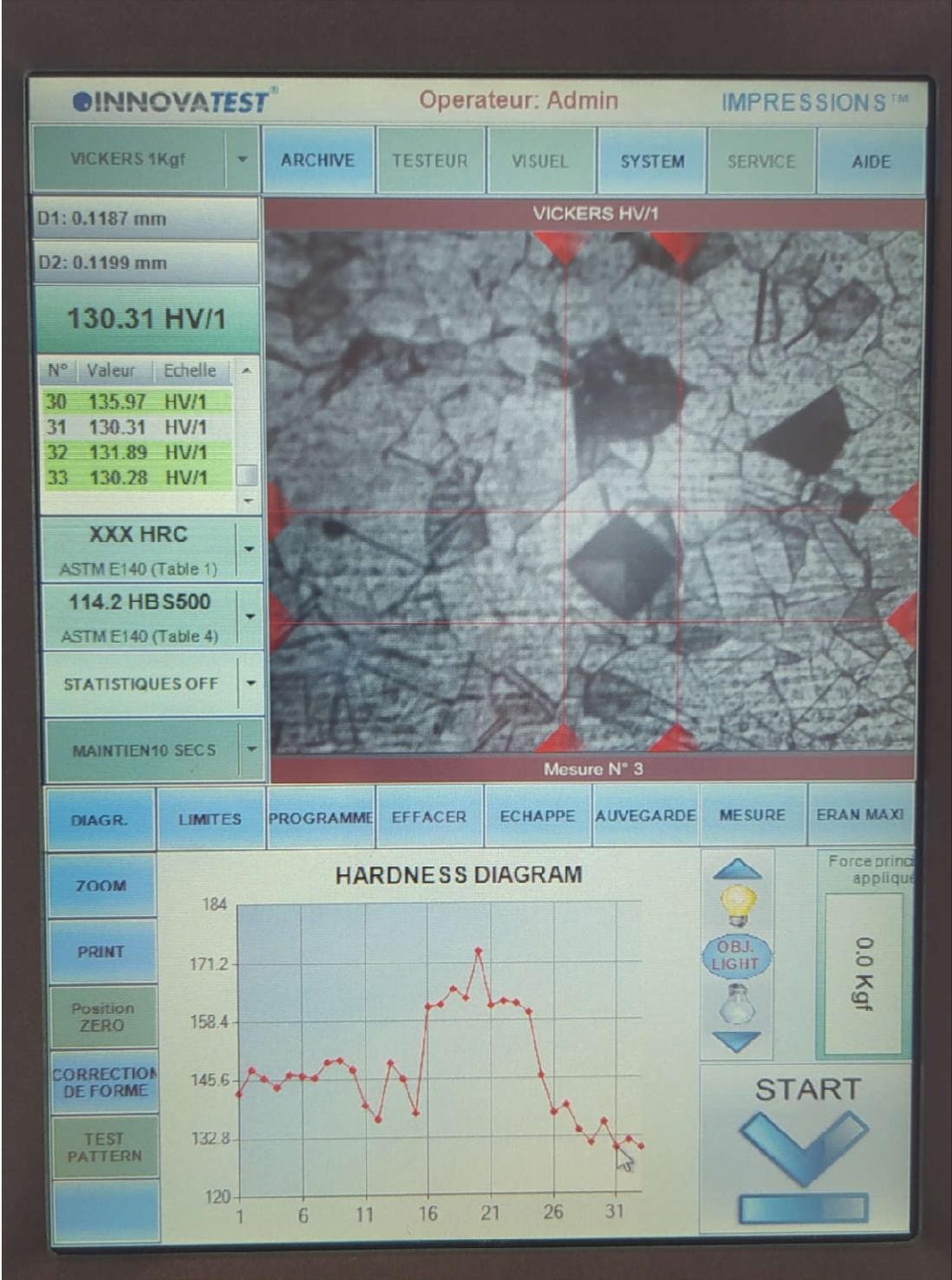


Figure III .8.Ecran de l'appareil de dureté Vickers.

# **Chapitre IV**

## **Résultats et interprétation**

## Introduction

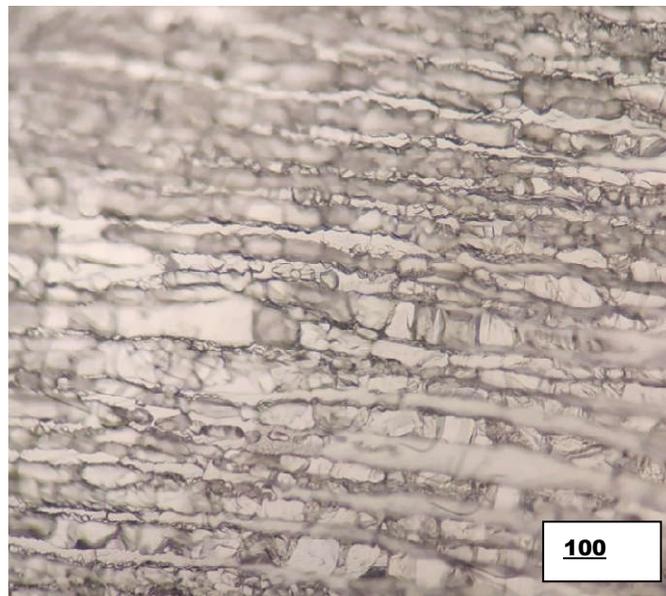
Dans ce chapitre, on présente le résultat de l'étude microstructurale et mécanique des joints soudés à partir des aciers inoxydables semblables et non semblables. On a choisi trois aciers inoxydables très utilisés dans le transport des hydrocarbures. Ces aciers sont A 790, 316 et 316L.

### IV.1.Observations microstructurales

#### IV.1.1.Métaux de base :

##### IV.1.1.1. Acier inoxydable A 790

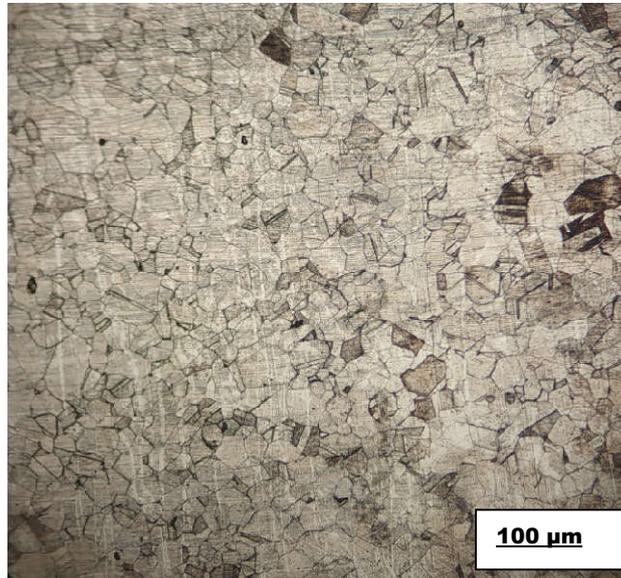
La figure IV.1 montre la microstructure de l'acier inoxydable A 790. On remarque l'existence de deux phases: la phase austénitique et de la phase ferritique. C'est pourquoi on l'appelle un acier inoxydable duplex.



**Figure IV.1.** Microstructure de l'acier inoxydable A 790

##### IV.1.1.2. Acier inoxydable 316

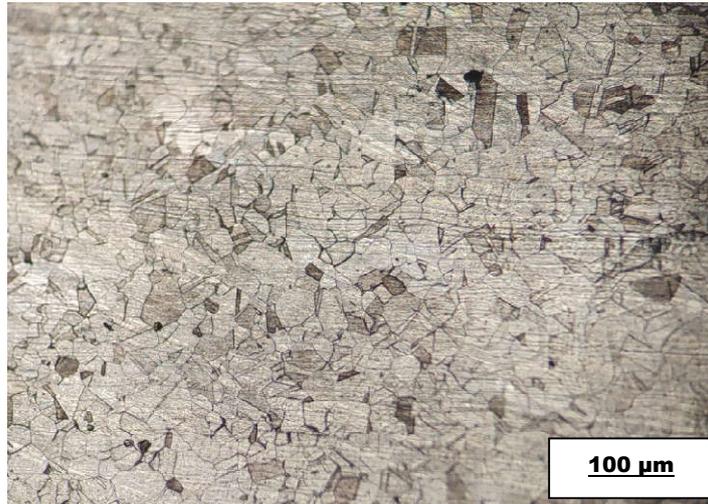
La figure IV.2 montre la microstructure de l'acier inoxydable 316. On remarque l'existence de la phase austénite car c'est la seule phase qui peut exister dans ce type d'acier.



**Figure IV.2.** Microstructure de l'acier inoxydable 316.

#### **IV.1.1.3. Acier inoxydable 316L**

La figure IV.3 montre la microstructure de l'acier inoxydable 316L. On remarque la même phase austénitique que dans l'acier 316.

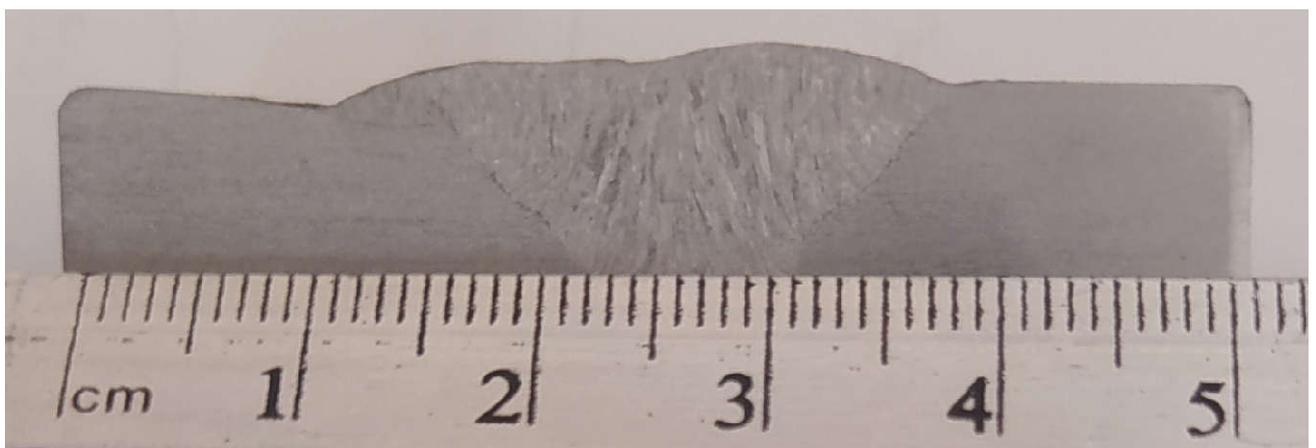


**Figure IV.3.** Microstructure de l'acier inoxydable 316L.

## **IV.1.2. Joints soudés**

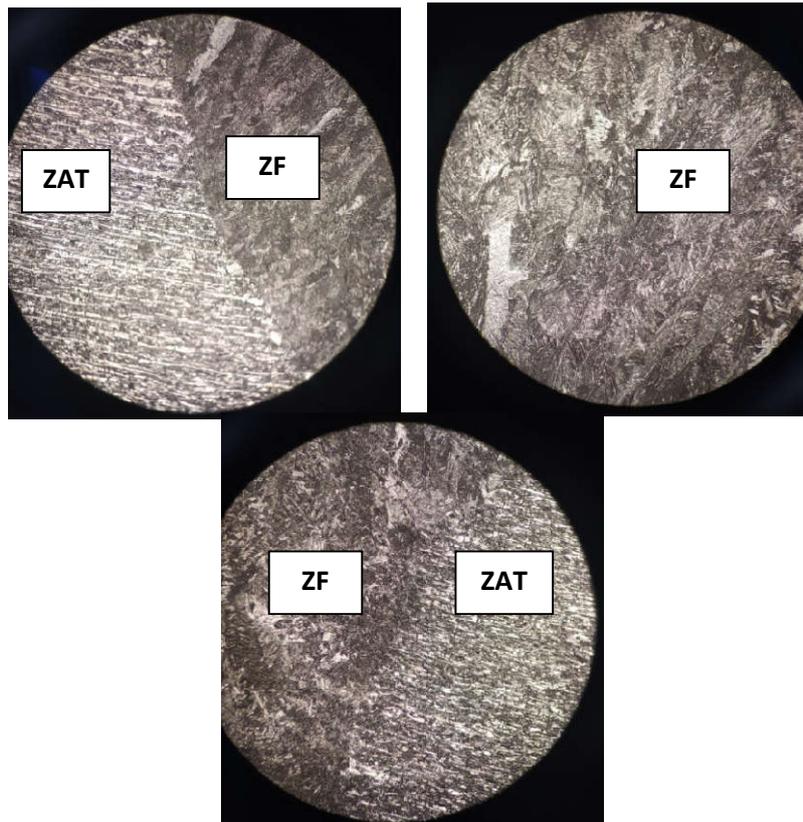
### **IV.1.2.1. Joint soudé des deux aciers inoxydables semblables A 790**

La figure IV.4 montre la macrostructure de l'acier inoxydable A790 soudé. On remarque bien la zone de fusion qui est différente du reste.



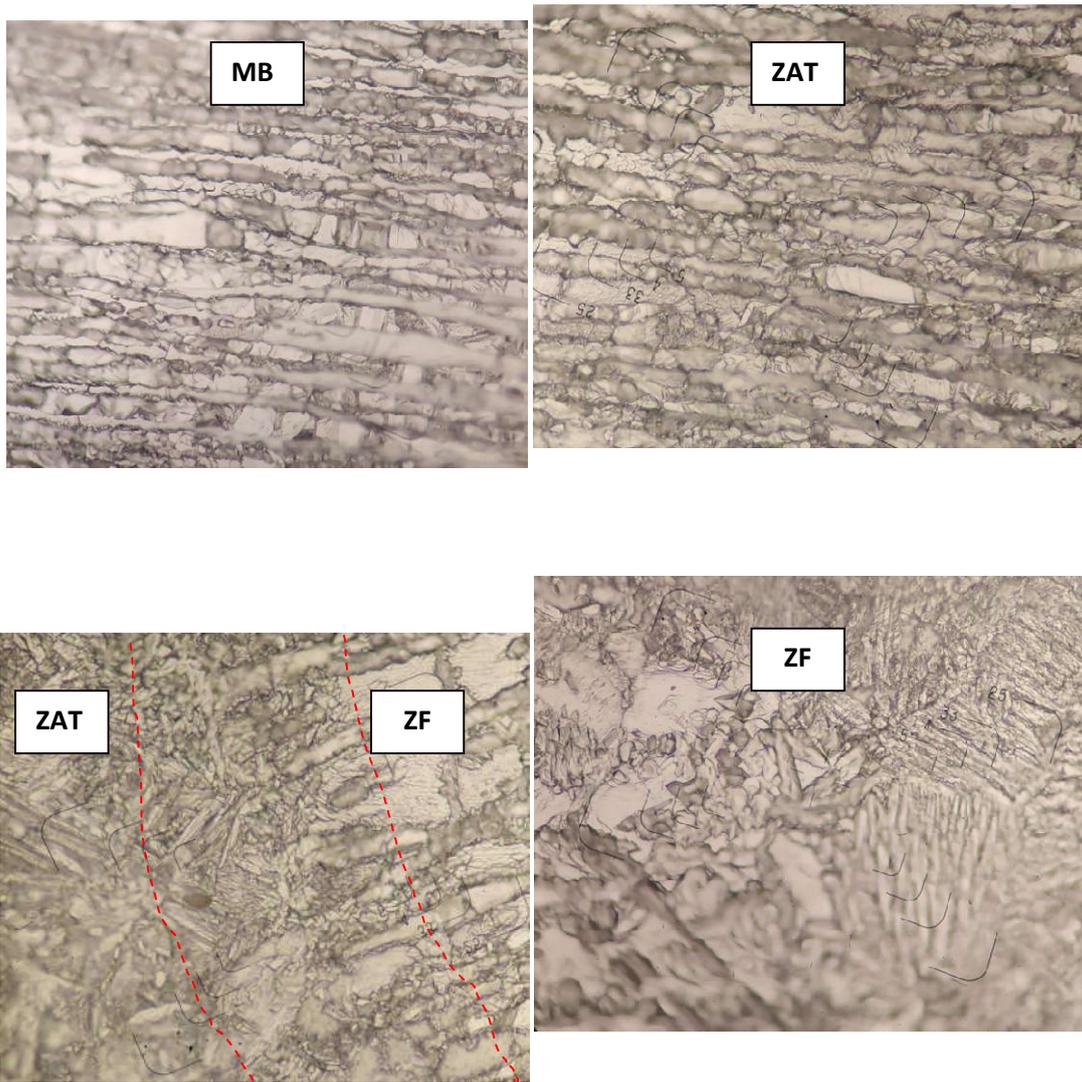
**Figure IV.4.** Macrographie du joint soudé des deux aciers inoxydables semblables A 790.

La figure IV.5 montre la microstructure du joint soudé des deux aciers inoxydables semblables A 790. On remarque la différence entre la microstructure de la zone fondue par rapport à la zone affectée thermiquement. On note que la ZF est le résultat d'une solidification rapide après le soudage.



**Figure IV.5.** Microstructure du joint soudé des deux aciers inoxydables semblables A 790.

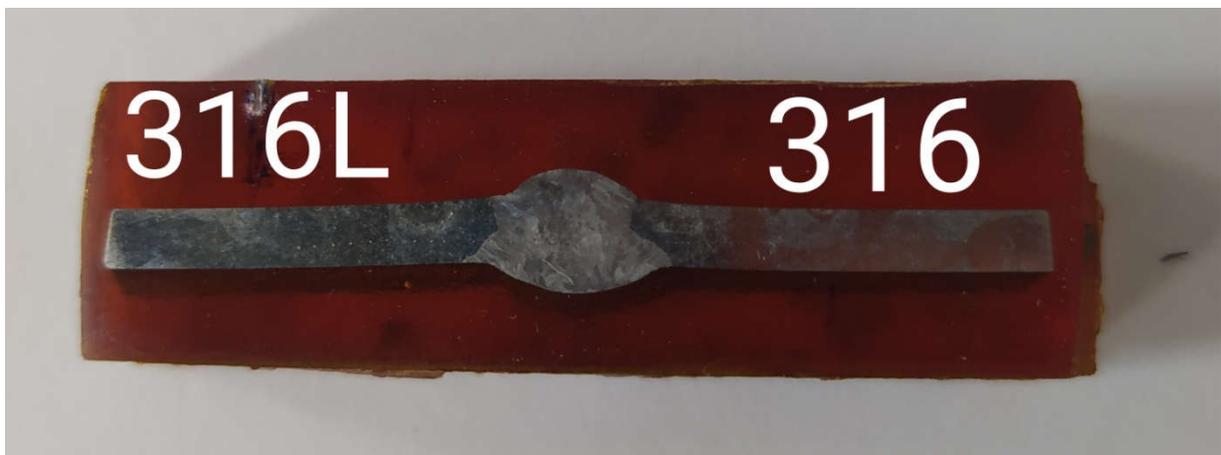
La figure IV.6 montre la microstructure agrandie de chaque zone (MB, ZAT et ZF). Cette figure confirme la grande différence entre la ZF et le reste des zones (ZF et ZAT).



**Figure IV.6.** Microstructure du joint soudé des deux aciers inoxydables semblables A 790.(Microstructures agrandies des trois zones : MB, ZAT et ZF)

#### IV.1.2.2. Joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L

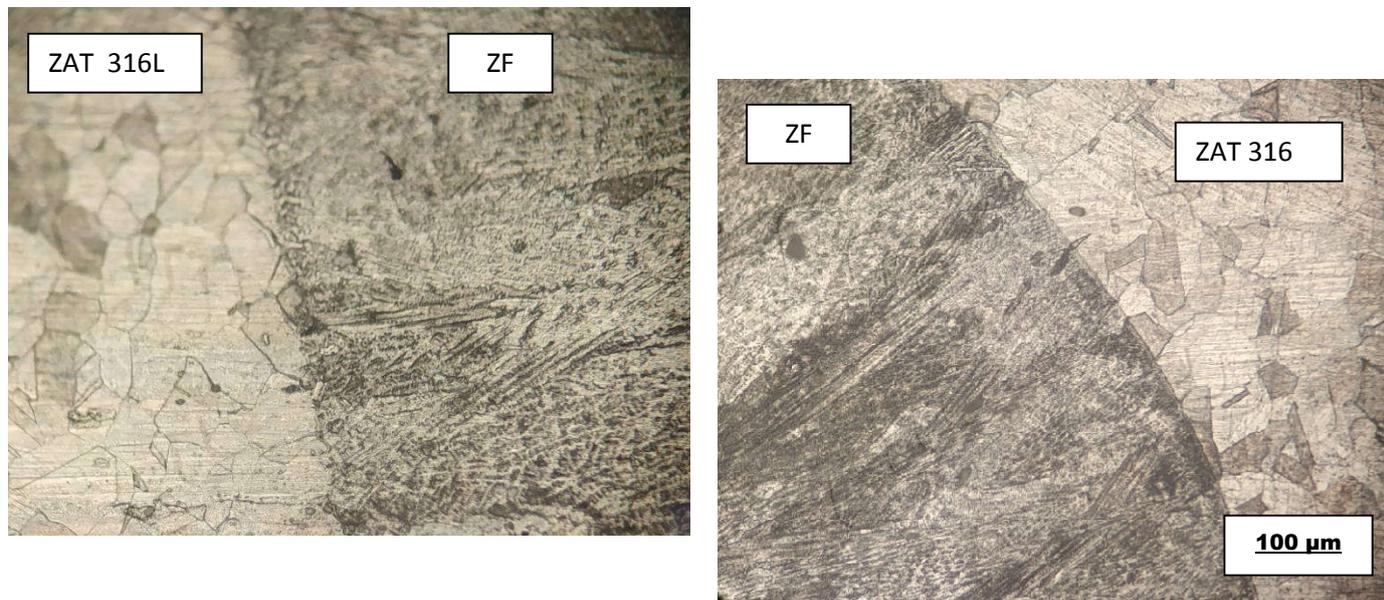
La figure IV.7. Montre la macrographie du joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L.



**Figure IV.7.** Macrographie du joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L

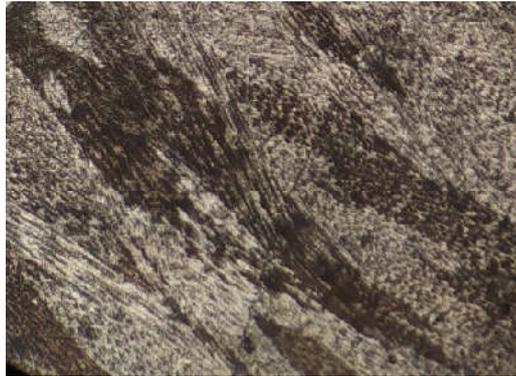
La figure IV.8 montre la microstructure du joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables. On remarque la différence entre la microstructure

de la zone fondue par rapport à la zone affectée thermiquement. On note que la ZF est le résultat d'une solidification rapide après le soudage.



**Figure IV.8.** Microstructure du joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L.

La figure IV.9 montre la microstructure agrandie de la zone fondue. Cette figure confirme la grande différence entre la ZF et le reste des zones (ZF et ZAT). De plus, cette zone est caractérisée par des grains collinaires et qui est due au processus de solidification de cette zone.

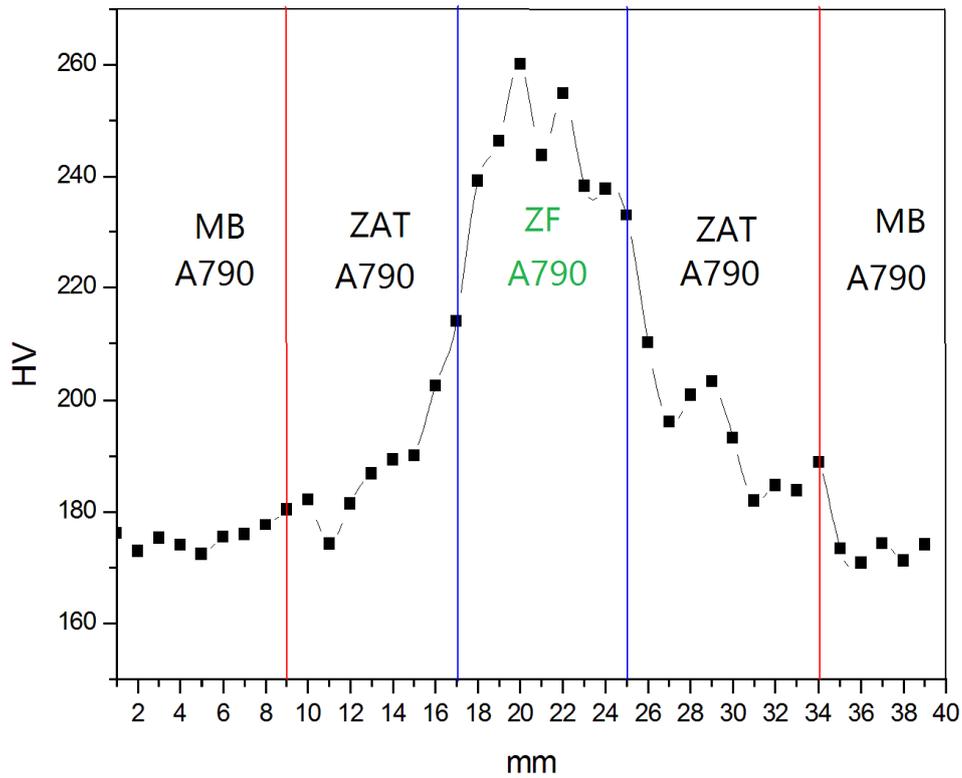


**Figure IV.9.** Microstructure de la zone fondue du joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L.

## **IV.2. Mesure de dureté Vickers**

### **IV.2. 1. Joint soudé des deux aciers inoxydables semblables A 790**

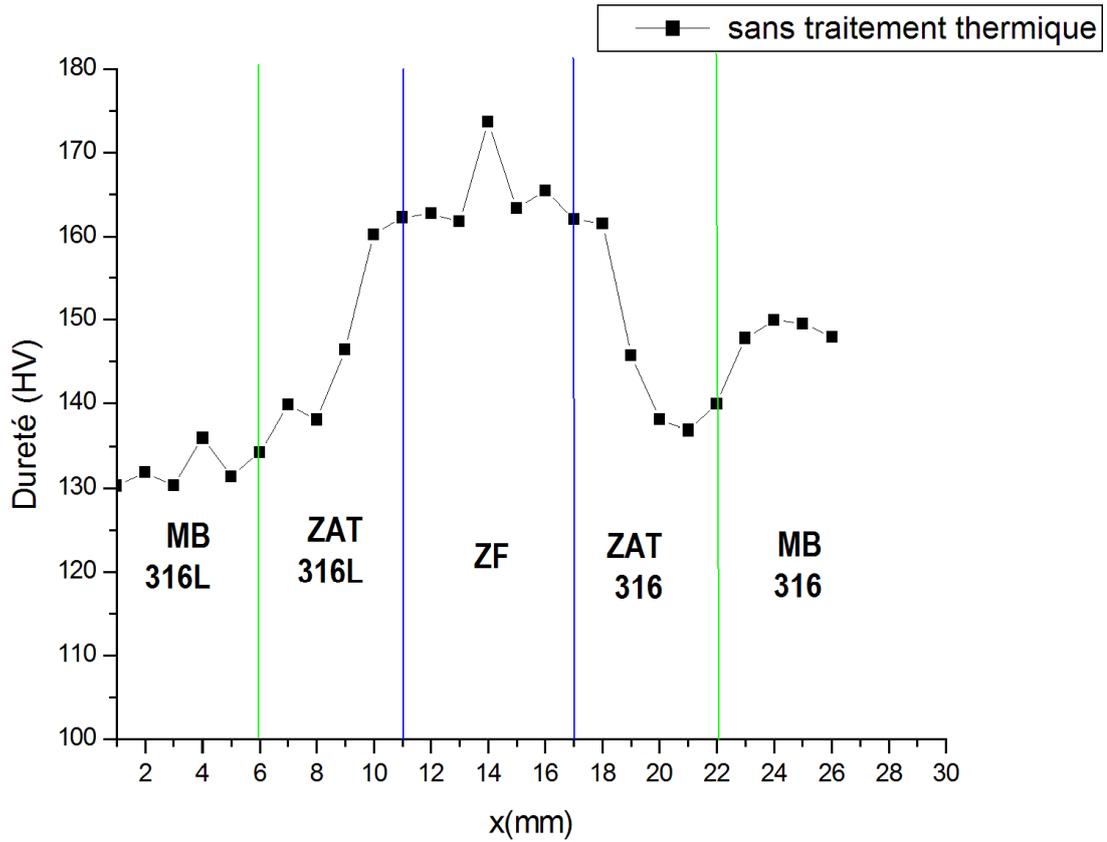
La figure IV.10 montre les valeurs de microdureté Vickers à travers le joint soudé des deux aciers inoxydables semblables A 790. On remarque que la plus grande dureté est enregistrée sur la zone fondue. Cette grande valeur de dureté est due à la microstructure particulière de la ZF.



**Figure IV.10.** Profil de micro dureté Vickers sur le joint soudé des deux aciers inoxydables semblables A 790.

#### IV.2.2. Joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L

La figure IV.11 montre les valeurs de microdureté Vickers à travers les joints soudés des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L. On remarque que la plus grande dureté est enregistrée aussi sur la ZF.



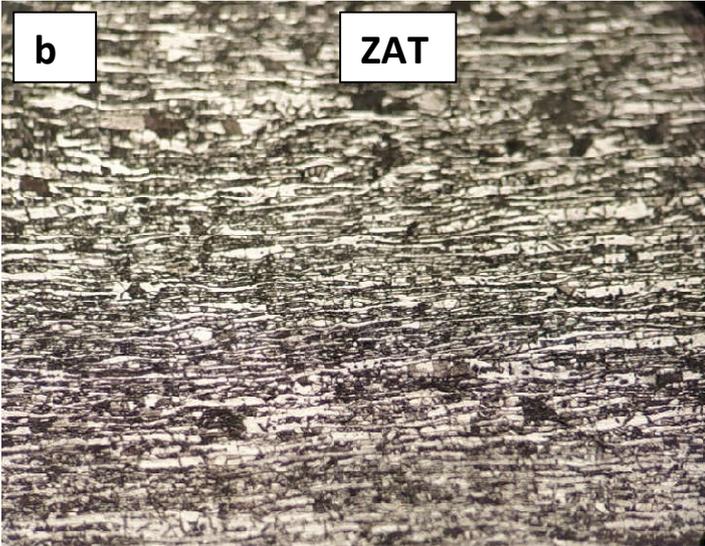
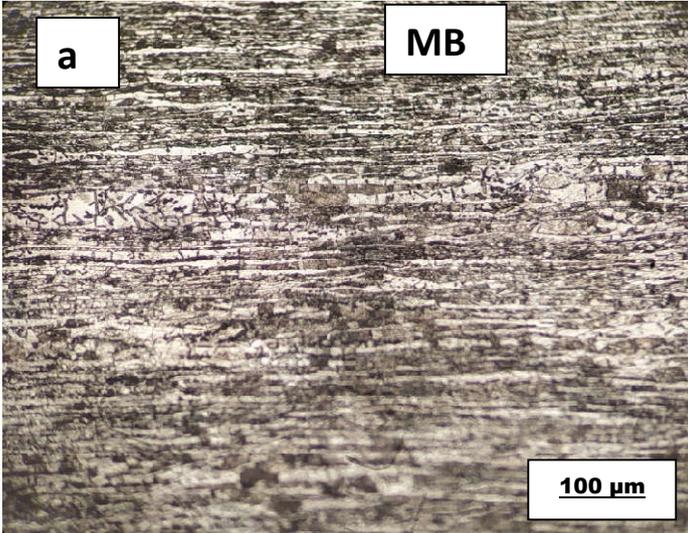
**Figure IV.11.** Profils de micro dureté Vickers sur le joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L.

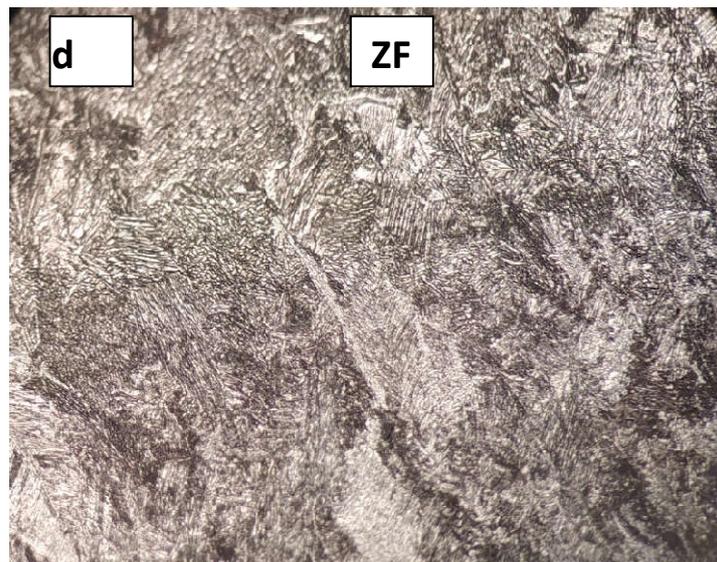
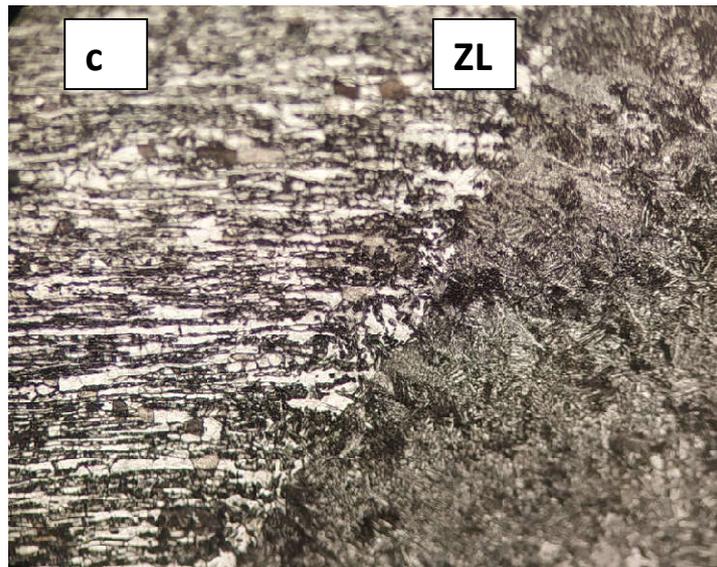
### IV.3. Traitement thermique isothermes à 300 °C

Dans cette partie d'étude on présente l'évolution microstructurale du joint soudé après un traitement thermique isotherme de 9 h à 300 °C.

#### IV.3.1. Joint soudé des deux aciers inoxydables semblables A 790.

La figure IV.12 présente les microstructures du joint soudé des deux aciers inoxydables semblables A 790. On constate que le joint soudé a subi un changement microstructural. Est ce que 300°C suffisante pour daugemaut nuer.

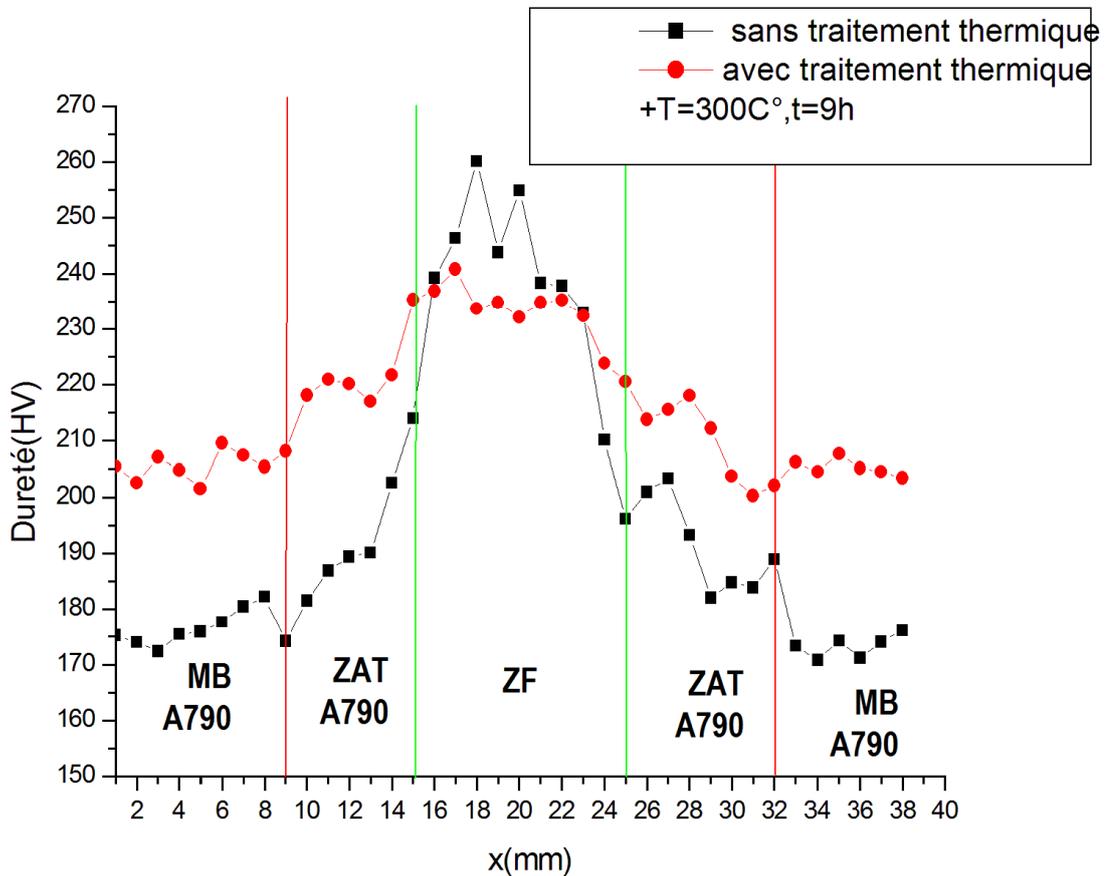




**Figure IV.12.** Microstructure du joint soudé des deux aciers inoxydables semblables A 790 après un traitement thermique isotherme de 9 h à 300 °C.

La figure IV.13 montre le profil de dureté Vickers à travers le joint soudés des deux aciers inoxydables semblables A 790 après un recuit de 9h a 300

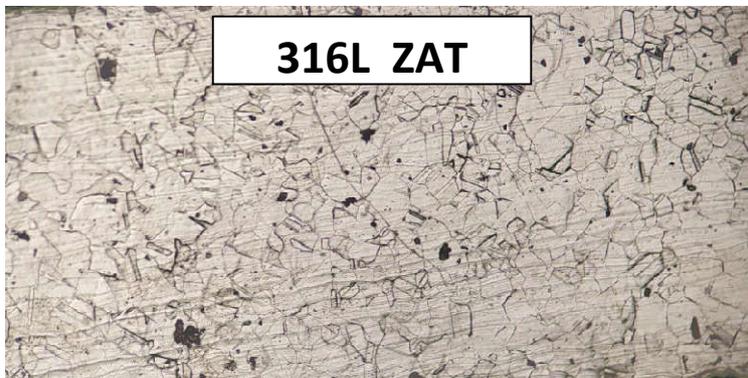
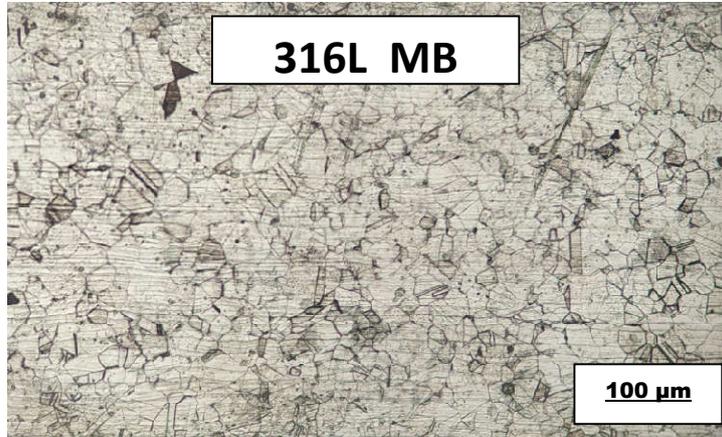
C. On remarque que la dureté dans la zone de fusion a diminuée par rapport au joint soude et non traité. On le considère comme un traitement d'adoucissement.

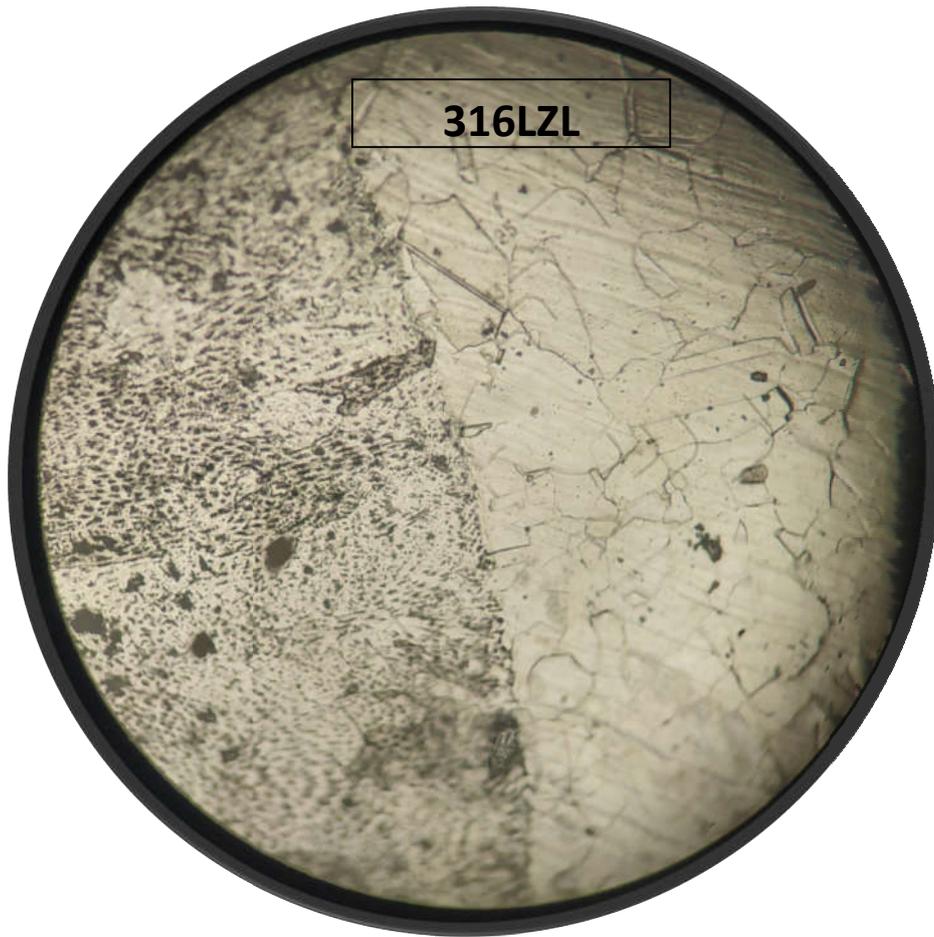
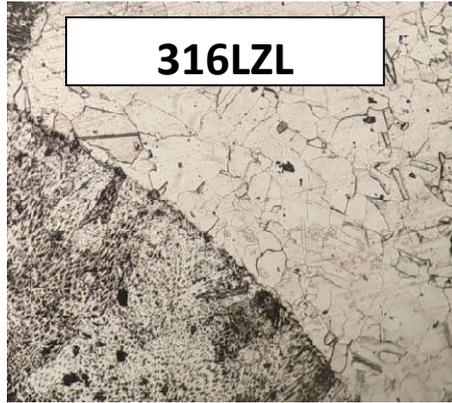


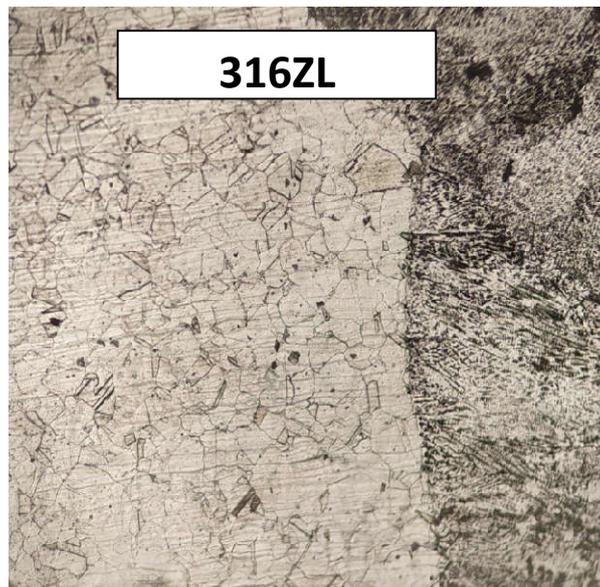
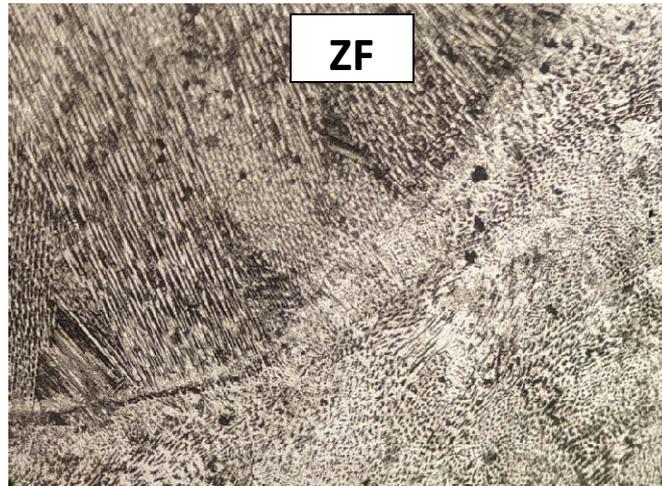
**Figure IV.13.** Profil de micro dureté Vickers sur le joint soudé avant et après traitement thermique à 300 C pendant 9 h, des deux aciers inoxydables semblables A 790.

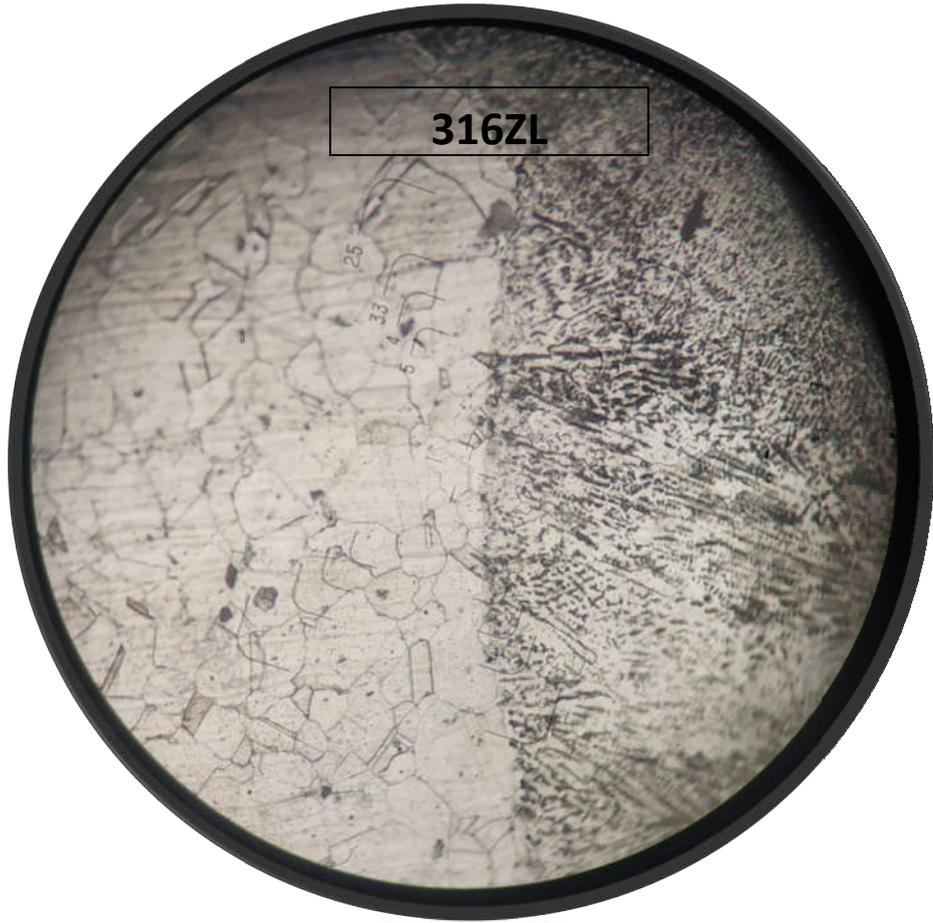
#### IV.3.2. Joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L

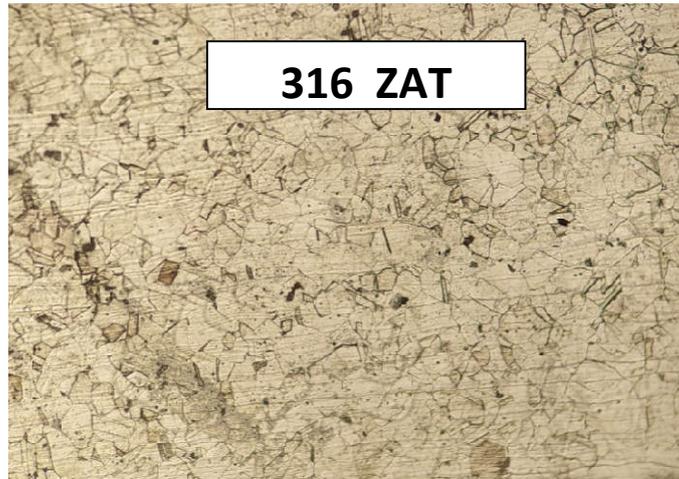
La figure IV.14 présente les microstructures du joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L. On constate que le joint soudé a subi aussi un changement microstructural





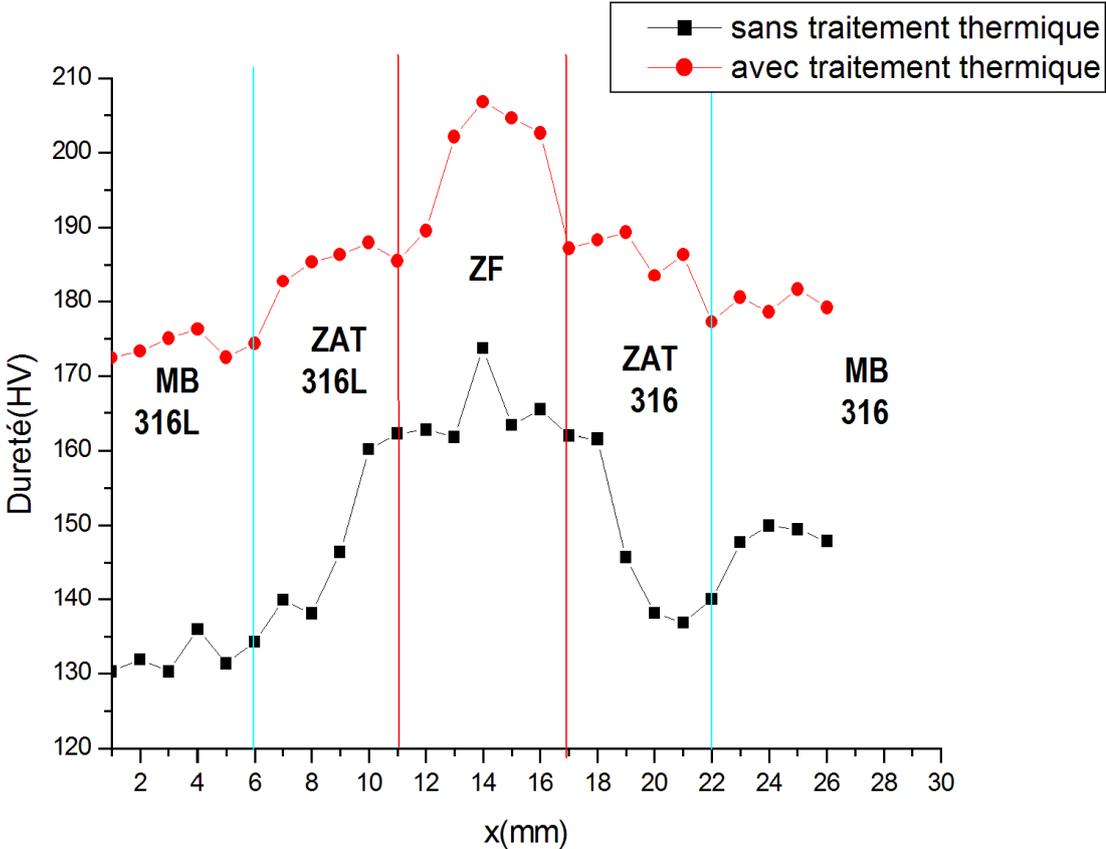






**Figure IV.14.** Microstructure du joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L après un traitement thermique isotherme de 9 h à 300 °C.

La figure IV.15 montre le profil de dureté Vickers à travers le joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L après un recuit de 9h à 300 C. On remarque que la dureté a augmenté par rapport au joint soude et non traité. On le considère comme un traitement de durcissement.



**Figure IV.15.** Profil de micro dureté Vickers sur le joint soudé des deux aciers inoxydables non semblables 316 et 316L avant et après un traitement thermique isotherme de 9 h à 300 °C.

## **Conclusion Générale**

Le but principal de notre étude était d'étudier la soudabilité des aciers inoxydables semblables et non semblables.

Pour aboutir à nos objectifs, deux techniques de caractérisations ont été appliquées et qui sont :

- La microscopie optique.
- La dureté Vickers.

D'après les travaux effectués, on a pu obtenir les résultats suivants:

- Possibilité de souder des aciers non semblables
- La microstructure du joint soudé dépend du type d'acier soudé
- Les trois zones d'un joint soudé ont été observées
- La valeur de dureté du joint soudé est élevée au centre du joint
- Le traitement thermique à 300 C a provoqué un changement de la microstructure et de la dureté.

### **Perspectives**

Notre principale perspective est d'utiliser d'autres techniques de caractérisation comme le MEB et la diffraction des rayons X.

## ملخص

كان الغرض الرئيسي من دراستنا هو لحام الفولاذ المقاوم للصدأ. لهذا السبب ، اخترنا تطبيق اللحام القوسي بشكل أساسي ، ولتحقيق أهدافنا ، تم تطبيق طريقتين للتوصيف وهما؛ الفحص المجهرى البصرى ، وصلابة فيكرز. تمكنا من إظهار إمكانية لحام الفولاذ المقاوم للصدأ المتماثل والمختلف.

## Résumé

Le but principal de notre étude était de souder des aciers inoxydables. Pour cette raison, on a choisi d'appliquer principalement le soudage à l'arc, Pour aboutir à nos objectifs, deux techniques de caractérisations ont été appliquées et qui sont; la microscopie optique, et la dureté Vickers. On a pu montrer la possibilité de souder des aciers inoxydables semblables et non semblables.

## Abstract

The main purpose of our study was to weld stainless steels. For this reason, we chose to mainly apply arc welding. To achieve our objectives, two characterization techniques were applied, which are: optical microscopy, and Vickers hardness. It was able to show the possibility of welding similar and dissimilar stainless steels.