



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 :

**Belabbas Khadidja**

Le : [Click here to enter a date.](#)

## SOUDAGE PAR FRICTION ROTATION DE DEUX METAUX NON SEMBLABLES

Jury :

Dr.	<b>Salim Messaoudi</b>	MCB	Université de Biskra	Président
Dr.	<b>Athmani Moussa</b>	MAA	Université de Biskra	Examineur
Pr.	<b>Boumerzoug Zakaria</b>	Pr	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2020 - 2021

## 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 (Monsieur Messaoudi Salim et Monsieur Athmani Moussa) qui ont expertisé mon travail de recherche.

Je remercie le Dr Helal Yazid pour son aide pour la réalisation de soudage par friction rotation.

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

Je remercie le responsable du Hall de technologie ( Monsieur Guettala Ismail ) et son staff.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui m'ont aidé dans mon travail de recherche

## Dédicaces

*Je dédie ce travail de recherche à ma mère*

*Je dédie aussi ce travail de recherche à mon père*

*et*

*à mes frères et sœurs*

## **Sommaire**

<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Introduction Générale</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : Soudage par Friction</b>	<b>2</b>
<b>1. Généralités</b>	<b>2</b>
<b>2. Type de soudage</b>	<b>2</b>
<b>3. Soudage par friction</b>	<b>4</b>
<b>4. Cycle de soudage</b>	<b>10</b>
<b>5. Matériaux soudables par friction</b>	<b>10</b>
<b>6. Les différentes phases opératoires de soudage par friction rotative</b>	<b>12</b>
<b>7. Soudage des matériaux dissemblables</b>	<b>13</b>
<b>8. Applications industriels de soudage par friction des métaux non semblables</b>	<b>13</b>
<b>Conclusion partielle</b>	<b>15</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>16</b>
<b>CHAPITRE II : Aspects métallurgiques du soudage par friction rotation des aciers non semblables</b>	<b>17</b>
<b>1.Soudage des aciers ordinaires non semblables</b>	<b>17</b>
<b>2. Soudage des aciers inoxydables non semblables</b>	<b>23</b>
<b>3. Soudage des aciers ordinaires avec des aciers inoxydables</b>	<b>28</b>
<b>Conclusion partielle</b>	<b>32</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>33</b>
<b>CHAPITRE II : Matériaux et Méthodes</b>	<b>34</b>

<b>Expérimentales</b>	
<b>1. Matériaux étudiés</b>	<b>34</b>
<b>2. Technique de soudage.</b>	<b>35</b>
<b>3. Techniques de caractérisation</b>	<b>36</b>
<b>CHAPITRE IV : Résultats et interprétation</b>	<b>41</b>
<b>1. Métaux de base</b>	<b>41</b>
<b>2. Soudage des aciers dissimilaires</b>	<b>42</b>
<b>Conclusion Générale</b>	<b>46</b>

## Introduction générale

Ces dernières années l'assemblage de métaux dissemblables est devenu très important pour de nombreuses applications industrielles; surtout pour industries aérospatiales, industries automobiles, maritimes, l'aérospatiale, chaudière et applications médicales où la jonction des matériaux dissemblables est une stratégie pour la mise en œuvre des structures robustes et légères, et aussi la combinaison de la force et la réduction de poids est nécessaire pour améliorer les performances et réduire les coûts.

Le soudage de deux aciers non semblables comme le soudage de l'acier X70 avec un acier inoxydable duplex est un exemple de soudage des métaux dissimilaires. Ces deux métaux dissimilaires peuvent être utilisés dans certaines applications pratiques telles que transport des hydrocarbures. Ces deux aciers peuvent être aussi soudés par d'autres procédés comme le soudage par laser, le soudage à l'arc et le soudage par diffusion à l'état solide.

Notre objectif est de souder par friction rotation l'acier X70 avec un acier inoxydable duplex.

Les techniques de caractérisation utilisées sont les suivantes :

- Microscopie optique.
- Microdureté.

Le mémoire est composé de quatre chapitres :

- Chapitre. I Soudage par friction.
- Chapitre. II Aspect métallurgique de soudage par friction rotation des aciers non semblables
- Chapitre III Matériaux et méthodes expérimentales.
- Chapitre IV : Résultats et interprétation

# CHAPITRE I : Soudage par Friction

## Introduction

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie au mieux les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service[1], car il permet d'adapter au mieux, les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service.

Dans ce chapitre on présente des généralités sur le soudage et aussi le type de soudage (le soudage par fusion et le soudage à l'état solide ) et le soudage des matériaux dissemblables. Le soudage par friction sera présenté avec plus de détails.

### I.1. Généralités

Le soudage est l'opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage de façon permanente, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler avec ou sans emploi d'un produit d'apport. On considère qu'un matériau métallique est soudable par un procédé et pour un type d'application, lorsqu'il est possible d'assurer une continuité métallique par la constitution d'un joint soudé qui, par sa présence, satisfait au mieux les propriétés requises pour l'application souhaitée [2].

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 caractéristiques locales et les conséquences globales de sa et de la pression. Le soudage peut être effectué avec ou sans métal d'apport[1].

### I.2.Types de soudage

Il existe deux types de soudage : soudage par fusion et soudage à l'état solide.

#### I.2.1.Le soudage par fusion

Dans l'industrie, le procédé le plus utilisé pour construire des assemblages de matériaux de même pépérite est le soudage en phase liquide[3] (figure I.1).



Figure I .1. La soudage en phase liquide [3].

Les principaux types de soudage par fusion sont :

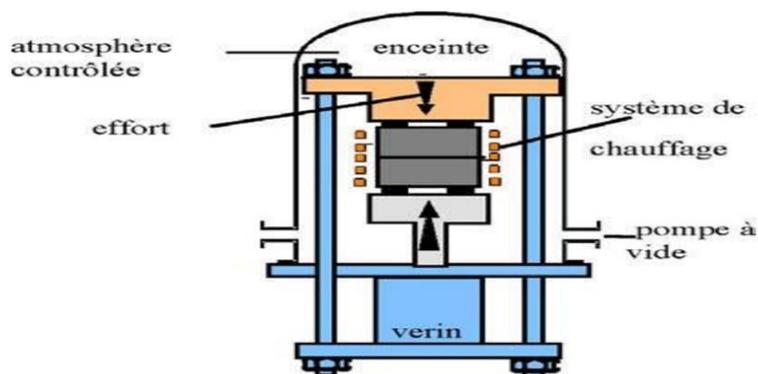
- Le soudage à l'arc électrique.
- Le soudage par faisceaux d'électrons
- Le soudage par faisceaux laser
- Soudage par résistance

### I.2.2.Soudage à l'état solide

Les procédés de soudage à l'état solide regroupent tous les procédés où il y a création d'une liaison métallique sans que les matériaux (métaux de base et éventuellement le métal d'apport) n'atteignent pas leur température de fusion respective[4].

Les principaux types de soudage à l'état solide sont :

- soudage par diffusion (figure I .2)



Activer Wi

Figure .I.2. Schéma de principe de soudage par diffusion [4] .

- Soudage par friction
- Soudage par friction-malaxage
- Soudage par ultrason (figure I .3)

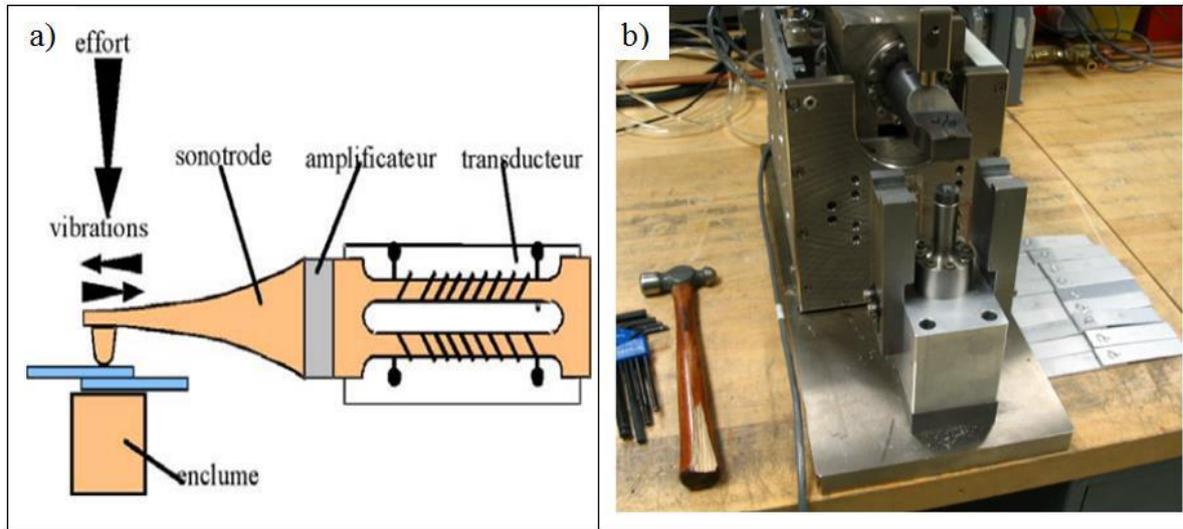


Figure .I.3.Soudage par ultrasons :a) schéma du procédé b) machine de soudage [4].

- Soudage par impulsion magnétique explosion.

Pour rester dans l'objectif de notre étude, le soudage par friction sera largement détaillé dans ce chapitre.

## I.3.Soudage par friction

### I.3.1. Introduction

Connu dès la fin du siècle dernier, mais rarement employé, le soudage par friction a été développé sous sa forme industrielle en Union soviétique vers 1956 puis en Grande-Bretagne et aux États-Unis quelques années plus tard. Le soudage par friction permet de réaliser des assemblages en bout de deux pièces dont l'une au moins a une symétrie de révolution. Il met en œuvre l'effet thermique engendré dans leur plan de joint par la rotation rapide sous pression des pièces l'une sur l'autre ou encore par friction. La puissance de chauffe résulte du couple résistant et de la vitesse de rotation maintenue en principe constante. C'est un procédé d'assemblage global qui se classe parmi les

procédés de forgeage. Du fait du fluage du matériau pendant la friction et lors du forgeage, la température de fusion n'est jamais atteinte [5].

Dans une application donnée, il peut entrer en compétition favorable avec les autres procédés utilisables, à savoir et essentiellement : le soudage en bout par résistance ou par étincelage, le soudage par bossage annulaire, le soudage par faisceau d'électrons et le brasage. Le soudage par friction est un procédé de soudage multiple et novateur qui trouve de nombreuses applications dans différentes branches de l'industrie. Les avantages du soudage par friction sont des assemblages de haute qualité, la rapidité du procédé par rapport aux procédés de soudage conventionnels et la possibilité d'une automatisation complète du processus de telle sorte qu'une qualité constante est garantie. De plus, le procédé de soudage par friction offre, dans le cadre de l'environnement, d'importants avantages : pas de fumées de soudage, pas de rayonnement UV ou électromagnétiques. Autre avantage: pas de métal d'apport ou de gaz de protection [6].

De plus, l'utilisation du procédé de soudage par friction peut mener à une économie en coût significative (matériaux et salaires) en remplaçant, par exemple des pièces forgées ou coulées onéreuses par des produits standards soudés par friction.

Dans les machines de soudage par friction, l'utilisation du mouvement relatif entre les pièces à souder sous l'effet de la pression de contact sert à la conversion de l'énergie mécanique en une quantité de chaleur au niveau du joint de soudure à l'aide du frottement produit à l'interface de contact. La génération du frottement est effectuée selon le type et les directions de ce mouvement. On distingue trois types de mouvements : mouvement de rotation, mouvement alternatif et mouvement linéaire [7] .

### **I.3.2. Définition de soudage par friction**

Le soudage par friction est obtenu par l'échauffement de deux pièces pressées et en mouvement l'une par rapport à l'autre. Le mouvement relatif entraîne un échauffement de l'interface jusqu'à plastification locale du matériau, puis soudage par diffusion atomique. Un flux de chaleur est généré par conversion de l'énergie mécanique en énergie

thermique. La qualité de la liaison ainsi obtenue est supérieure à celle des matériaux utilisés. présenté une machine de soudage par friction dans les ateliers de confection mécanique [5].

On note que la qualité de la soudure dépend de plusieurs paramètres : la vitesse de rotation, le temps de friction, et la pression exercée. L'avantage d'un tel procédé est qu'il n'y a pas de métal d'apport et qu'il permet de souder des matériaux hétérogènes, de plus, sa mise en œuvre est assez facile [8].

### **I.3.3.Types de soudage par friction**

Selon la manière de produire le frottement, il existe différentes variantes du procédé de soudage par friction, à savoir le procédé de soudage par friction rotative (Figure I .5), le soudage par friction linéaire (Figure I .6) et le procédé de soudage par friction malaxage (Figure I .7).

#### **I.3.3.1.Soudage par friction rotative(en anglais Rotary Friction Welding `` RFW``)**

Ce type de soudage est utilisé pour les pièces de révolution. Dans ce processus, une pièce est animée d'un mouvement de rotation autour de son axe tandis que l'autre est maintenue immobile sous un effort axial de compression. Lors du soudage par friction rotative, l'énergie de rotation pendant la phase de friction peut être générée et transférée à la pièce tournante selon deux manières. Par l'utilisation d'un moteur tournant à vitesse constante (soudage par friction pilotée) ou par l'utilisation de l'énergie cinétique stockée dans un volant rotatif (soudage par friction inertielle).

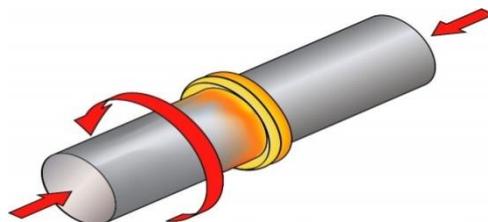


Figure I.5. Soudage par friction rotation [8].

### **I.3.3.2. Soudage par friction linéaire (en anglais Linear Friction Welding "LFW")**

Le soudage par friction linéaire est un processus dans lequel une pièce est fixée et l'autre est animée d'un mouvement linéaire oscillatoire sous une pression normale. Le soudage par friction linéaire peut souder des pièces prismatiques (non circulaires) et la génération de chaleur est presque uniforme sur toute la section du joint.

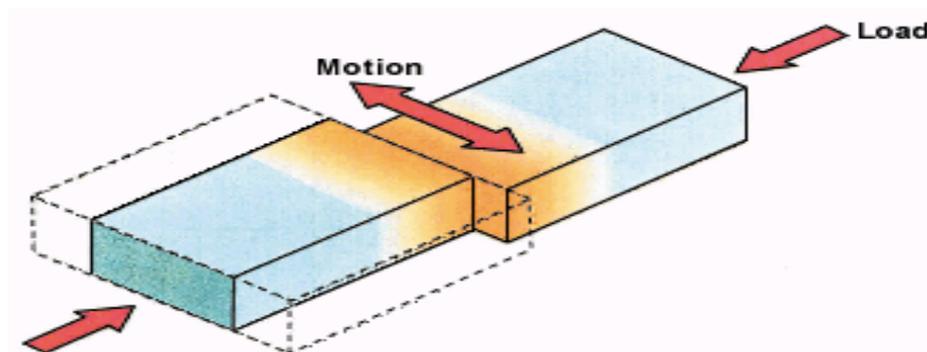


Figure I.6. Soudage par friction linéaire [8].

### **I.3.3.3. Soudage par friction malaxage (en anglais Friction Stir Welding "FSW")**

Lors du soudage par friction-malaxage (FSW), un outil rotatif à épaulement qui se termine par un pion fileté se déplace le long des surfaces de contact de deux plaques serrées de manière rigide (Figure I. 7). L'épaulement est en contact avec la surface supérieure des pièces à souder. La chaleur générée par le frottement entre le pion de l'outil rotatif et les deux pièces ramollit le matériau à souder. Une déformation plastique sévère et un écoulement de ce métal plastifié se produisent lorsque l'outil est déplacé dans le sens de la soudure[9].

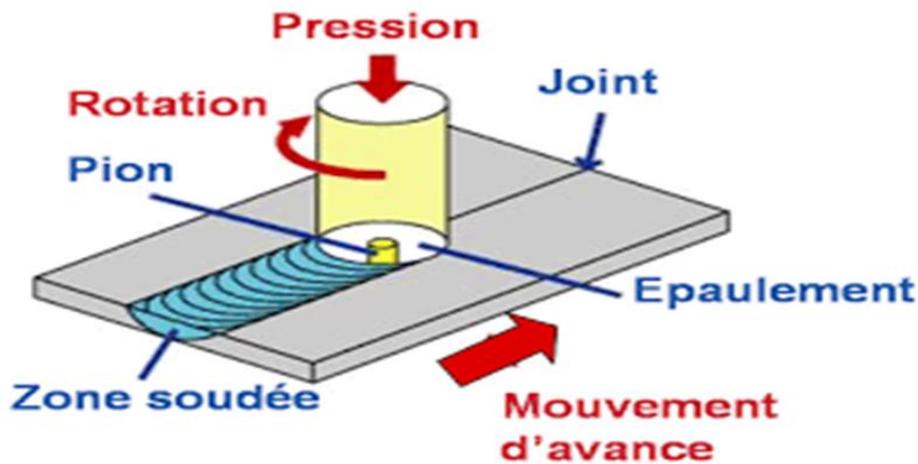


Figure I. 7. Soudage par friction malaxage [8].

### I.3.4. Les avantages et les limites de soudage par friction

#### I.3.4.1. Les avantages du soudage par friction

- Assemblages de haute qualité, avec une bonne structure métallurgique, car le matériau n'est pas porté à fusion.
- Procédé de soudage 'one-shoot'.
- Pas de préparation spéciale des pièces.
- Procédé de soudage beaucoup plus rapide que les procédés de soudage conventionnels.
- Peu de déformations après soudage en raison du bref temps de soudage et de la faible température maximale.
- Possibilité de souder des pièces de sections très différentes à condition de prendre certaines mesures de précaution.
- Économique: le soudage par friction permet de réaliser des économies sur le coût des pièces soudées (économie en temps, en matériau et en salaire).

#### I.3.4.2. Les limites

- L'alignement des pièces à souder est critique pour la réalisation d'une friction et d'un chauffage uniformes.
- Les ébarbures doivent être éliminées mécaniquement.

- Coût d'investissement de l'appareillage.
- Les techniques de contrôle non destructif ne sont pas encore appliquées sur les soudures par friction.
- Le risque existe donc que ces techniques ne puissent pas les défauts de soudage.
- La surveillance des paramètres du processus est probablement la meilleure méthode pour le contrôle de qualité.
- Le soudage par friction ne peut pas être appliqué sur des matériaux ayant un très faible coefficient de friction comme la fonte grise, le bronze et le laiton à forte teneur en plomb (les particules de graphite agissent comme des lubrifiants et contrecarrent l'échauffement).

### **I.3.5.Facteurs influençant la qualité d'une soudure par friction**

Lors d'une opération de soudage par friction, trois phénomènes sont impliqués : la génération de chaleur par friction, la dissipation de chaleur et la déformation plastique du matériau de base.

Le couplage entre ces phénomènes au cours de l'opération de soudage par friction, rend très difficile le développement d'un modèle prédictif pour le procédé de soudage par friction.

Cependant, d'un point de vue qualitatif, le processus est bien compris grâce à des études expérimentales sur le soudage par friction effectuées sur une grande variété de matériaux.

Cinq facteurs qualitatifs influencent sur la qualité d'une soudure par friction :

- Vitesse relative des surfaces de contact
- Pression appliquée
- Propriétés du matériau
- Etat de surface et présence de films de surface
- Température de surface

## I.4. Cycle de soudage

Les paramètres influant sur la qualité de ce type d'assemblage sont (Figure I. 8) :

- Le temps de soudage.
- La pression exercée entre les pièces.
- La vitesse de rotation relative
- La consommation de matière

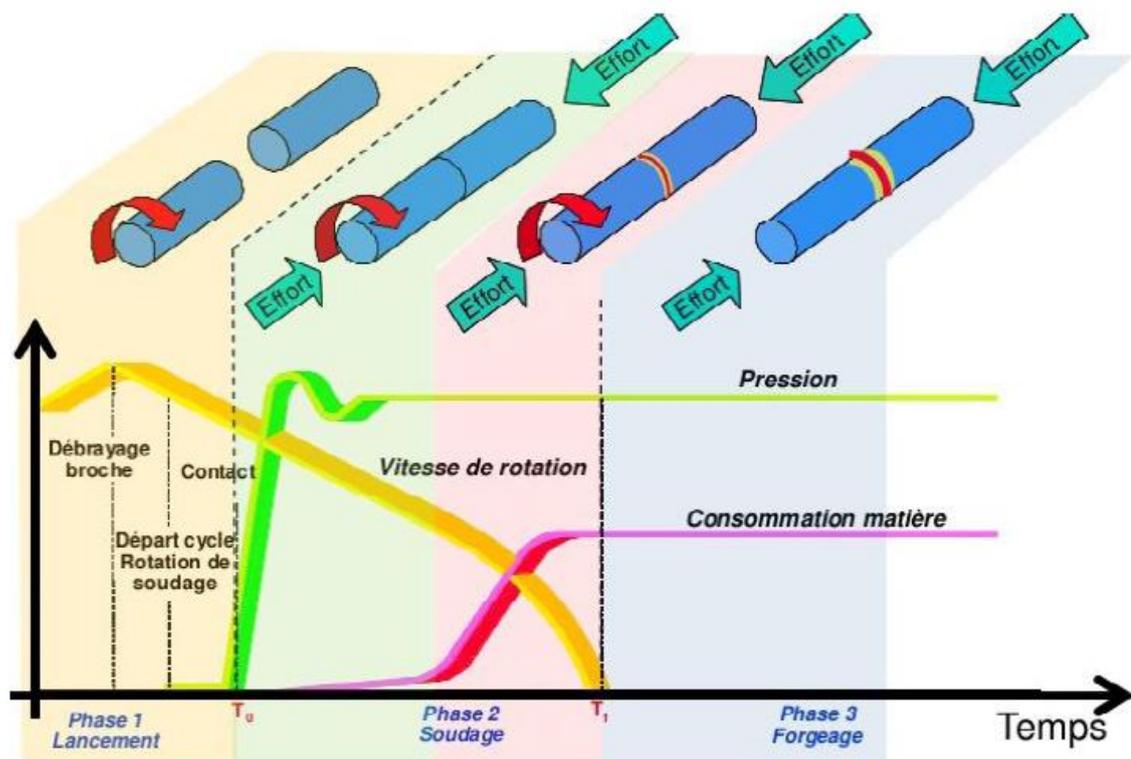


Figure. I.8. Le cycle de soudage par friction [16].

## I.5. Matériaux soudables par friction

Le soudage par friction atteint un niveau de progrès considérable dans plusieurs applications industrielles à cause de sa capacité de produire des joints de haute qualité avec une résistance excellente. Il peut être utilisé pour assembler une large gamme de matériaux semblables et dissemblables (Figure I.9) tels que les métaux, les céramiques, les composites à matrice métallique et les polymères. De nombreuses combinaisons de métaux dissemblables qui ne peuvent pas être assemblées par les techniques de soudage classique par fusion ont été soudées par

friction. La figure I.10 montre quelques applications du soudage par friction rotative.

**Tableau 5 – Soudabilité des métaux et alliages les plus couramment utilisés en soudage par friction**

Métaux et alliages	Aluminium	Alliages d'Al	Bronze	Cuivre	Magnésium	Monel	Nickel	Nimonic	Acier	Acier coulé	Aciers spéciaux	Aciers inoxydables	Titane
Aluminium .....	■	■	□	■	▲	□	■	□	■	□	□	■	■
Alliages d'Al.....	■	■	□	□	▲	□	□	□	●	□	□	▲	□
Bronze .....	□	□	▲	□	□	□	□	□	▲	▲	□	□	□
Cuivre .....	■	□	□	▲	□	□	□	□	■	□	□	■	□
Magnésium .....	▲	▲	□	□	▲	□	□	□	□	□	□	□	▲
Monel .....	□	□	□	□	□	■	□	□	□	■	□	■	□
Nickel.....	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■
Nimonic.....	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	□	■	□
Aciers.....	■	●	▲	■	□	□	□	■	■	■	■	■	▲
Aciers coulés.....	□	□	▲	□	□	■	□	■	■	■	■	■	□
Aciers spéciaux.....	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	□
Aciers inoxydables	■	▲	□	■	□	■	□	■	■	■	■	■	▲
Titane.....	■	□	□	□	▲	□	■	□	▲	□	□	▲	■

■ bonne soudabilité    ▲ soudable    ● soudure délicate    □ impossible ou non essayé

Figure. I.9. Combinaisons soudables par friction[14]



Figure. I.10. Exemples de pièces soudées par friction rotative[15].

## I.6. Les différentes phases opératoires de soudage par friction rotative

La Figure II-11. présente de façon schématique les quatre phases opératoires du procédé de soudage par friction rotation.

L'opération de soudage peut-être décomposée en 3 phases successives : 1) phase de lancement, 2) phase de soudage (friction), 3) phase de forgeage.

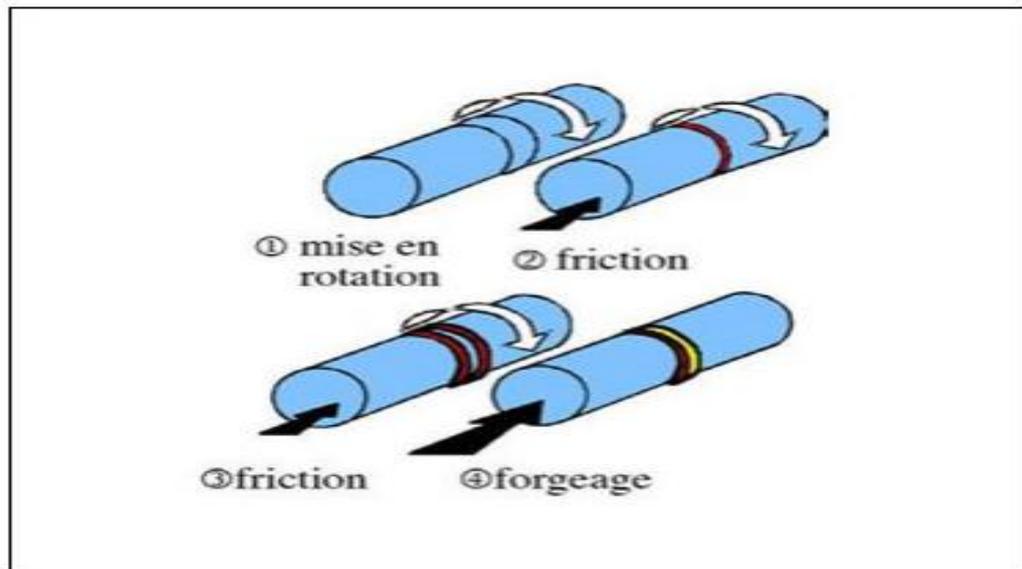


Figure .I.11 .chronologie d'une opération de soudage par friction [17].

- Phase 1 :

Une des pièces est mise en rotation puis débrayée, elle continue de tourner par inertie

- Phase 2-a :

Les deux pièces sont mises en contact sous l'effet d'un effort de pression constant. La rotation diminue librement (freinage), les pièces s'échauffent localement (frottement)

- Phase 2-b :

Sous l'effet de la chaleur et de l'effort, les pièces se déforment (l'ensemble se raccourci). La vitesse de rotation continue de diminuer.

- Phase 3 :

Lorsque la pièce a entièrement décéléré, les pièces refroidissent pendant que l'effort en maintenu constant.

## **I.7.Soudage des matériaux dissemblables**

Bien que de nombreux joints de soudure par friction en métaux similaire soient produits pour des raisons économiques, de nombreux joints en métaux différents sont produits parce qu'il n'est pas possible de les réaliser par d'autres méthodes de soudage. Des exemples de ce type de joints incluent des combinaisons de métaux dissemblables avec des points de fusion très différents et des combinaisons de métaux dissemblables qui forment des phases incompatibles lors du soudage par fusion.

La caractéristique la plus importante du soudage par friction est qu'il est possible de souder une vaste gamme de combinaisons de métaux dissemblables. Le soudage par friction peut atteindre un bon rendement de joint même lorsque la combinaison de matériaux à souder présente de grandes différences de propriétés mécaniques et métallurgiques, comme le point de fusion (tungstène et cuivre), les matériaux métalliques à bas point de fusion (cuivre et aluminium) et la résistance des matériaux. (acier inoxydable et aluminium pur).

## **I.8.Applications industriels de soudage par friction des métaux non semblables**

Le procédé FSW ou RFW est utilisé principalement dans l'industrie de la construction et du transport, telle que l'industrie spatiale, aéronautique, ferroviaire automobile, maritime, etc.

### **I.8.1.L'application du procédé RFW**

#### **I.8.1.1.Domaine de l'automobile**

Le soudage par friction RFW est utilisé pour la production de pièces dans l'industrie automobile comme des stabilisateurs, des soupapes, des tiges de piston, des pompes à eau [11], c'est à dire des pièces de forme cylindrique (Figure I.16).



Figure I. 16. a) Pièce d'un turbo. b) Partie d'une boîte de vitesse. c) Partie d'un amortisseur tube soudé à une pièce compressée. d) Partie d'un cric hydraulique : le tube à double paroi est soudé en une fois [3].

### I.8.1.2. Domaine de l'agriculture

Le soudage par friction est également très utilisé lors de la production d'éléments pour trucks, véhicules agricoles, camions et engins agricoles, par exemple, les tiges à des yeux de tige. Une économie notable en coût peut être réalisée par le remplacement de pièces complètement forgées par de petites pièces forgées soudées à des barres ou des tubes (Figure I.17) [12].



Figure I. 17. a) Piston d'un moteur diesel. b) Remplacement de pièces forgées ou coulées par des profilés standards [3].

### **I.8.1.3. Industrie pétrolière**

Le soudage par friction RFW est également utilisé dans la pétrochimie, par exemple, pour le soudage de brides à des valves hydrauliques (Figure I.18) [11], ou pour le soudage des tubes de forage [13].



Figure I. 18. Fixation d'une bride à une valve hydraulique [3].

### **I.8.1.4. L'industrie aéronautique**

Généralement le procédé de RFW utilisé pour la production d'axes de turbines [12].

## **I.9. Conclusion partielle**

Le soudage par friction par rotation et malaxage présentent beaucoup d'avantages par rapport aux différents procédés évoqués précédemment, tels que la facilité de mise en œuvre et la basse relative de la température de soudage (inférieure à la température de fusion), tout en restant compétitif du point de vue de la vitesse du soudage et des géométries des pièces à souder vis à vis aux procédés de soudage par fusion.

## Bibliographie

- [1]. Bensaada. S. Fonderie et Soudage. Omniscryptum.(2010). P49
- [2] .Merry, G., Soudage et soudabilité métallurgique des métaux. Technique de l'ingénieur, 10 janvier 1994 (M715).
- [3]. Faes, K. Belgisch Instituut voor Lastechniek. Récupéré sur <http://www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-friction> le : 2018, 12 08
- [4]. Gerard, M. (s.d.). Soudage-diffusion hétérogène assiste par friction malaxage cas du couple Al/Fe. Ecole Centrale de Nantes.
- [5] . Cazes, R., soudage par friction (10/02/1996). Techniques de l'ingénieur. <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/soudage-par-friction>.
- [6]. Kuka Industries Friction Welding, Germany 2016. (24 avril 2018). <http://www.kuka.com/fr/technologies/2016/07/soudage-par-friction>.
- [7] . Robert W. Messler,jr “Principles of welding Processes, Physics, Chemistry,and Metallurgy, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2004.
- [8]. Helal, Y., thèse de doctorat « L'effet de soudage par friction malaxage sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint soudé composé d'un alliage d'aluminium industriel et un acier » .Université Mohamed Khider Biskra (2017).
- [9]. Nandan, T. DebRoy T., Bhadeshia, H.K.D.H. “Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties”, Progress in Materials Science 53 (2008) 980–1023
- [10]. Movahedi, M., et al., Mechanical and microstructural characterization ofAl- 5083/St-12 lap joints made by friction stir welding. Procedia Engineering, 10;p. 3297-3303. 2011.
- [11]. Cazes.R , (). Soudage par friction-malaxage. Techniques de l'ingénieur. BM7746. Avril.2003.
- [12]. B. Guerin. Soudage d'aluminium,. Saint-Etienne: l'École Nationale Supérieuredes Mines de Saint-Étienne. 2010
- [13]. Kaufman, J.G., Properties of aluminum alloys: tensile, creep, and fatigue data athigh and low temperatures: ASM international. 1999
- [14]. Roland CAZES, « Soudage par friction », Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, B 7 745
- [15]. Estevez I. « Développement d'une technique d'imagerie d'impédance électrique locale a partir d'un microscope a force atomique», Thèse Doctorat, 2010, université paris-sud 11.
- [16]. Rombaut, p. Joining of dissimilar materials through rotary friction welding, Faculty of Engineering GHENT University. 2011
- [17]. « Soudage-Coupage » (Sympo). <http://www.irs.fr>. (24 avril 2018)

# CHAPITRE II : Aspects métallurgiques du soudage par friction rotation des aciers non semblables

## Introduction

Dans ce chapitre, on présente quelques travaux de recherche liés au soudage par friction rotation des aciers non semblables. Ce chapitre est divisé en sections et chaque section traitera une catégorie d'aciers non semblables.

### 1-Soudage des aciers ordinaires non semblables

Le soudage par friction rotation a été appliqué pour souder des aciers ordinaires non semblables. Par exemple, Alza [1] étudia par friction rotation le soudage de deux aciers ordinaires (acier à faible et moyenne teneur en carbone). La composition chimique de ces deux aciers est montré dans le tableau II.1.

*Tableau II.1. Composition chimique des aciers utilisés [1].*

Steel	Chemical composition (% w)			
	C	Mn	P	S
<b>AISI 1020</b>	0.23	0.40	0.03	0.04
<b>AISI 1045</b>	0.43	0.80	0.03	0.04

Avant qu'appliquaient la méthode FRW, les faces des éprouvettes ont été soigneusement usinées, pour obtenir une soudure uniforme sur toute la zone d'interface. La méthode FRW était par «impulsion directe». L'une des pièces (côté gauche) était serrée sur le mandrin de tour, tournant au régime respectif, tandis que l'autre (côté droit) restait statique attachée au mandrin fixe. Ensuite, les joints ont été couplés et mis en rotation en utilisant les vitesses, les pressions de frottement, le forgeage et les temps, selon les paramètres indiqués dans le tableau II.2 [1].

Tableau II.2 Paramètres de soudage par friction rotation [1].

Item	FRW 1045/1045	FRW1020/1045
<b>n(rpm)</b>	1400	1000-1400
<b>PF(MPa)</b>	0,8-1,0	0,7-0,8-1,0
<b>TF(s)</b>	8	8
<b>Pr (MPa)</b>	55	5
<b>Tr (MPa)</b>		5

*La vitesse(n), pression de friction(PF), temps de friction(TF), la pression en hausse, temps bouleversé [1]*

Au cours du processus, les surfaces ont d'abord été rassemblées et alignées pour initier le collage en utilisant une pression  $P_f$ , pendant un temps  $T_f$ . Après l'apparition de l'anneau soudé à l'état plastique (Figure II.1), la pression  $P_r$  a été appliquée pendant un temps  $T_r$ , puis les joints soudés ont été refroidis à l'air.

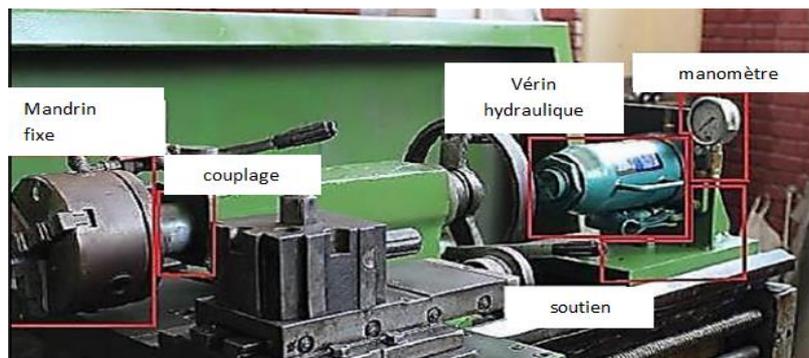


Figure II.1. Tour conventionnel montrant les détails du mandrin fixe accouplement de poussée pour effectuer les essais (FRW). Couplage selon [9].

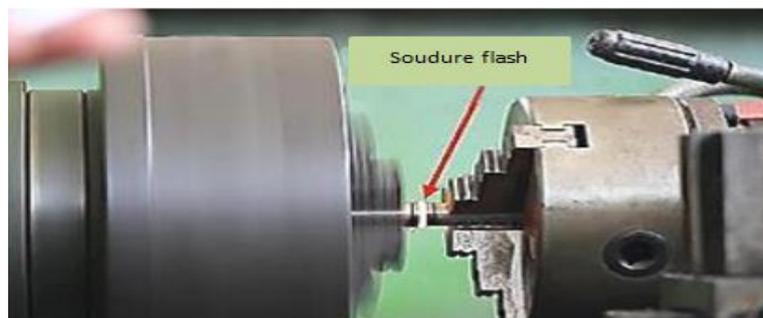


Figure II.2. Test de procédé FRW, où la couche plastifiée de la soudure apparaît à l'interface du joint (soudure flash), après application d'une pression de friction ( $P_f$ ) et forgeage ( $P_r$ ) [1].

La figure II.3 montre les microstructure des aciers avant le procédé de soudage.

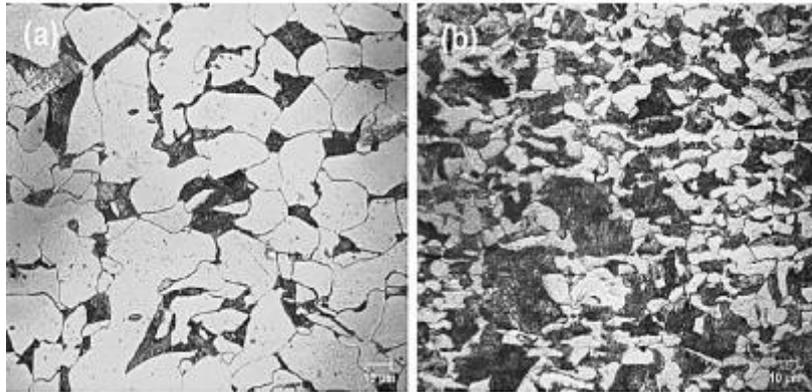


Figure. II.3. Microstructure des aciers fournis: a) AISI 1020 et b) AISI 1045. Colonies de perlite (zone sombre) et de ferrite (zone blanche) sont observés[1].

On note que l'auteur a appliqué plusieurs tests de traction comme il est montré dans le tableau II.3 et dans la figure II.4.

Tableau.II.3. Propriétés mécaniques de traction des assemblages soudés dissemblables [1] . FRW: AISI 1020/1045

RPM	Pression de friction PF								
	Pf= 0.7 MPa			Pf = 0.8 MPa			Pf = 1.0 MPa		
	$\sigma_Y$ (MPa)	$\sigma_{rm}$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	$\sigma_Y$ (MPa)	$\sigma_{rm}$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	$\sigma_Y$ (MPa)	$\sigma_{rm}$ (MPa)	$\epsilon$ (%)
<b>1400</b>	585	630	12,5	510	550	7,7	480	520	7,5
<b>1000</b>	573	625	10,3	450	540	7,8	500	510	7,5
<b>AISI 1020 supplied</b>	617	646	23,5	-	-	-	-	-	-
<b>AISI 1045 supplied</b>	750	850	17,0	-	-	-	-	-	-

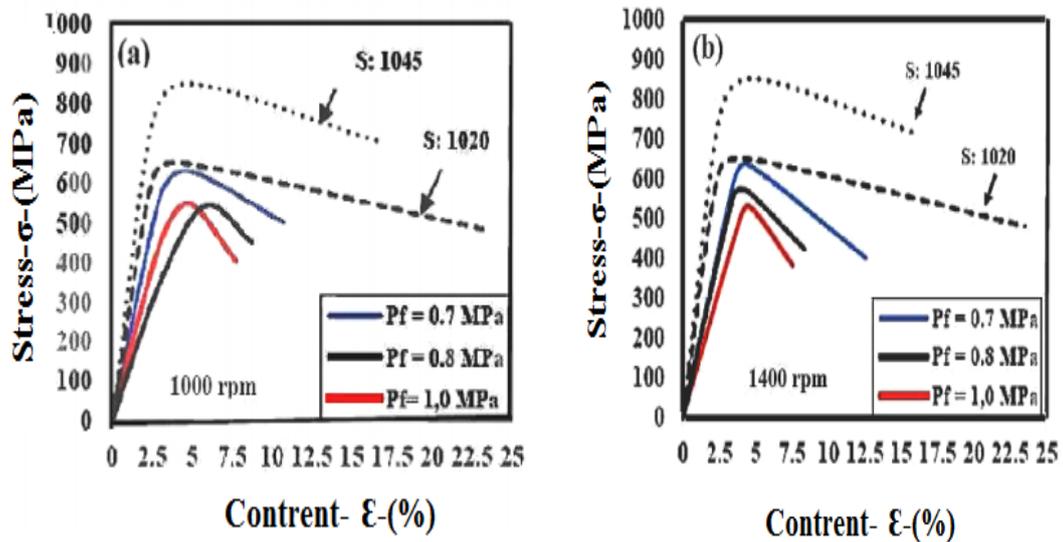


Figure.II.4. Schémas ( $\sigma$ - $\epsilon$ ), des assemblages soudés FRW: AISI 1020-1045, avec différents "Pf" et "n"; (a) 1000 tr / min, (b) 1400 tr / min. Les courbes avec des lignes pointillées correspondent aux matériaux de base[1].

Afin de réaliser le test de dureté, des échantillons demi-cylindriques ont été réalisés à l'aide de l'appareil de mesure micro-fine VICKERS CV4, et ils ont été réalisés à une échelle de 0,5 HV, ce qui a conduit à la création d'un profil de balayage longitudinal et transversal selon diagramme de la Figure II.5.

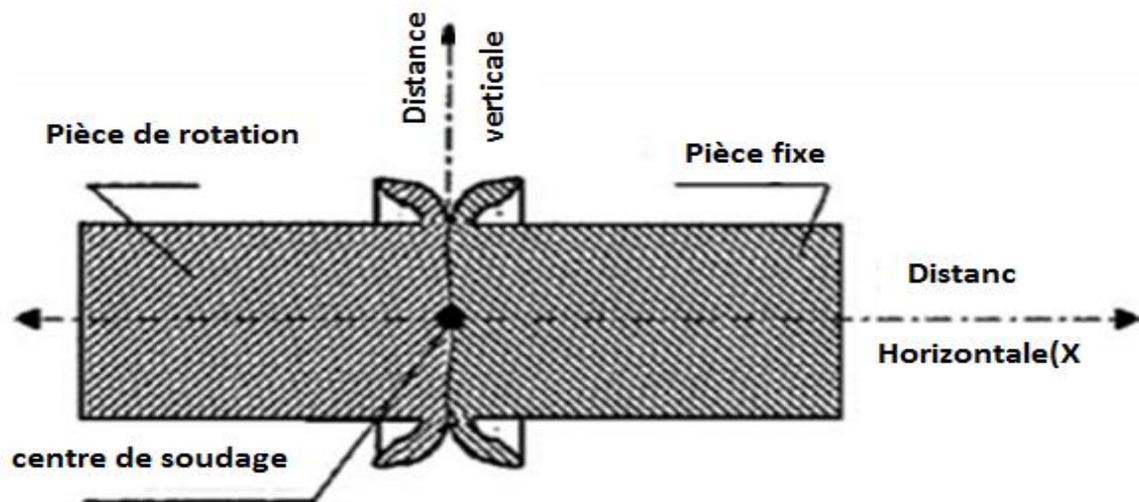


Figure. II. 5. Diagramme précisant les directions de la micro-duretéprofilés en joints soudés FRW[1].

La figure II.6 montre les profils de dureté longitudinale sur les joints soudés.

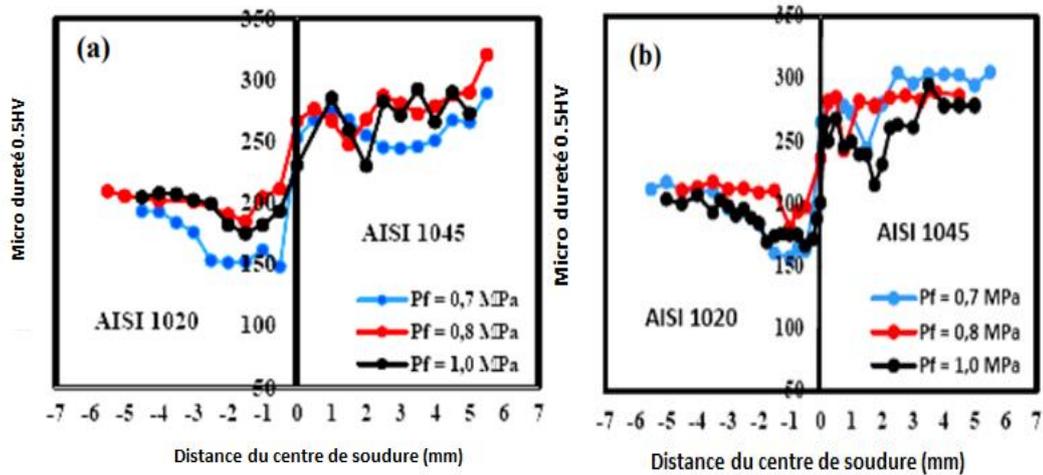
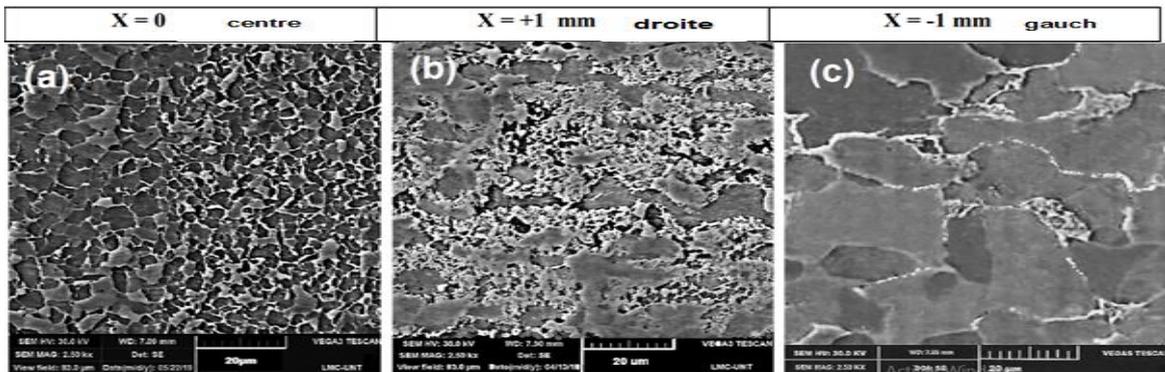


Figure .II. 6. Profils de micro-dureté Longitudinal du joint FRW: AISI 1020/1045 pour différentes pressions de frottement (Pf) et deux vitesses; (a) 1000 tr / min; (b) 1400 tr / min[1].

L'analyse microscopique a été effectuée à l'aide d'un microscope électronique à balayage, avec un analyseur à rayons X intégré EDS et pour révéler la microstructure, les échantillons ont été attaqués chimiquement avec 3% de Nital pendant 60 secondes. La figure II. 7 montre les structures exactes des joints soudés[1].



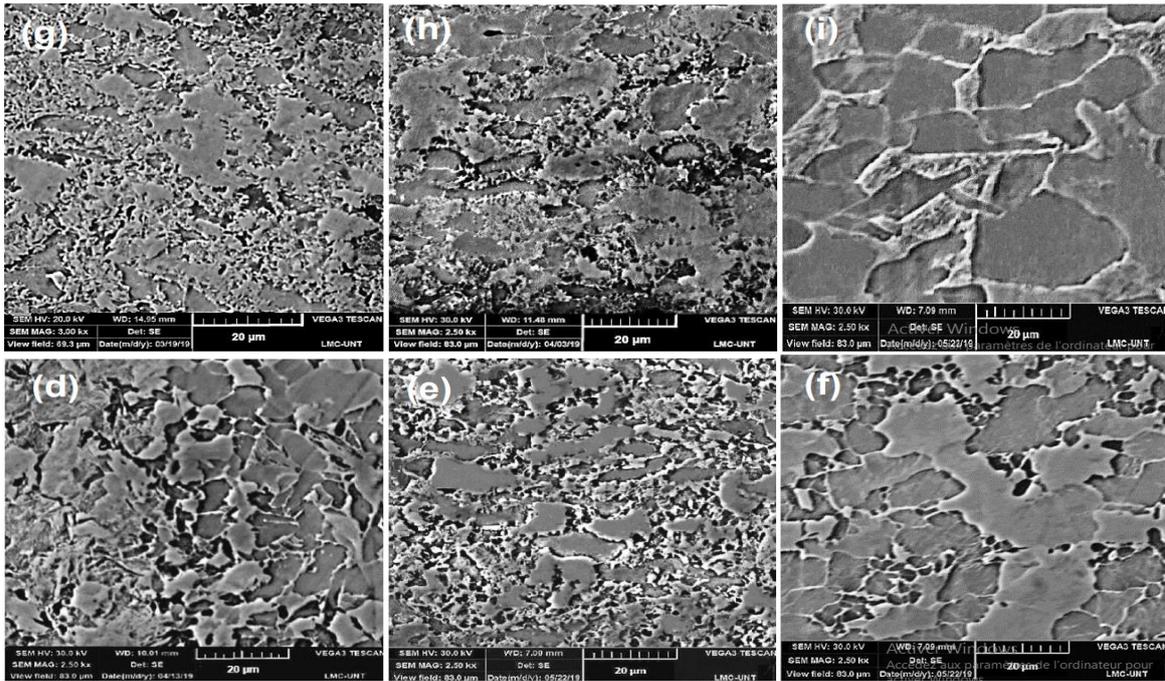


Figure. II. 7. Photomicrographie SEM de joint dissemblable obtenu par FRW 1020/1045; (a), (b), (c): [ $n = 1000$  tr / min;  $P_f = 0,7$  MPa] (d), (e), (f): [ $n = 1400$  tr / min;  $P_f = 0,7$  MPa]; g) h) i): [ $n = 1400$  tr / min;  $P_f = 0,8$  MPa]. Les microstructures sont situées dans l'ordre suivant: à gauche, elles correspondent à la zone de liaison, au centre à l'acier AISI 1045 et à l'extrême droite à l'acier AISI 1020 [1].

L'auteur a rassemblé les résultats de son étude dans les points suivants:

- ✓ une vitesse de rotation plus élevée augmente la contrainte maximale.
- ✓ En ce qui concerne la microstructure. Dans la région FDRZ, pour les types de joints, des épaisseurs variables ont été observées
- ✓ Une structure à grains fins et entièrement recristallisée dans la région FDRZ. Dans TMAZ, une structure à grains légèrement allongés et des phases équiaxiales très sombres sont observées. L'analyse EDS montre que les structures sombres sont des composés du Fe- $\alpha$  sursaturé de carbone qui a migré vers ces régions en raison de l'effet de diffusion, laissant les régions claires comme l'épuisement du carbone.
- ✓ Pour chacun des joints similaires et différents dans les zones d'étude: FDRZ et TMAZ, aucun composé intermétallique n'a été produit et il n'y a pas de colonies

de perlite et / ou de cémentite. La configuration montrée dans l'analyse EDS ne correspond pas à ces phases.

## 2-Soudage des aciers inoxydables non semblables

Pour les études faites sur le soudage par friction rotation des aciers inoxydables non semblables, on peut citer les travaux de Bati et al. [2] . Dans leurs études, des tiges d'acier AISI 304 et AISI 8640, d'un diamètre de 12 mm et d'une longueur de 70 mm, ont été utilisées dans l'expérience. Les échantillons ont été usinés dans les dimensions souhaitées, puis soudés sans aucun processus de préchauffage. Les paramètres de soudage sont énumérés dans le tableau II. 4. Les compositions chimiques des échantillons sont énumérées dans le tableau II. 5. Les échantillons soudés sont montrés dans la figure II.7.

Tableau II. 4. Paramètres de soudage par friction [2].

Spécimen Non	Rotation Vitesse (tr / min)	Friction Pression (Mpa)	Forgeage Pression (Mpa)	Friction Heure (s)	Forgeage Heure (s)
1	1800	50	100	2	10
2	1800	50	100	4	10
3	1800	50	100	6	10
4	1800	50	100	8	10
5	1800	50	100	10	10

Tableau. II. 5. Composition chimique des matériaux de base[2]

	Éléments d'alliage (% en poids)											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	V	W
<b>AISI 304</b>	0.036	0.334	1.54	0.038	0.030	18.26	0.390	8.41	0.023	0.681	-	0.094
<b>AISI 8640</b>	0.407	0.244	0.721	0.024	0.017	0.52	0.162	0.455	-	0.327	0.004	0.030



Figure II. 7. Éprouvettes soudées [2].

Les échantillons ont été polis puis attaqués chimiquement avec une solution à 5%  $\text{HNO}_3$  du côté AISI 8640 et attaqués électrolytiquement à  $\sim 0,1 \text{ A} / \text{cm}^2$  pendant 1-2 min dans une solution à 50 % d'acide nitrique dans l'eau du côté AISI 304. La microstructure des pièces soudées a été observée par microscopie optique. Les propriétés mécaniques des éprouvettes soudées ont été mesurées à l'aide d'une machine de traction Shimadzu d'une capacité de 100 kN. L'illustration schématique de l'éprouvette d'essai de traction est représentée sur la figure II. 8. Les éprouvettes pour l'essai de dureté ont été polies avec des papiers émeri de qualité 240, 400, 600, 800, 1000 et 1200, puis attaqués chimiquement. Les éprouvettes polies sont représentées sur la figure II.8. Le test de dureté Vickers a été effectué pour mesurer la dureté des zones soudées. Les valeurs de dureté ont été prises comme un intervalle de 1 mm sur les surfaces

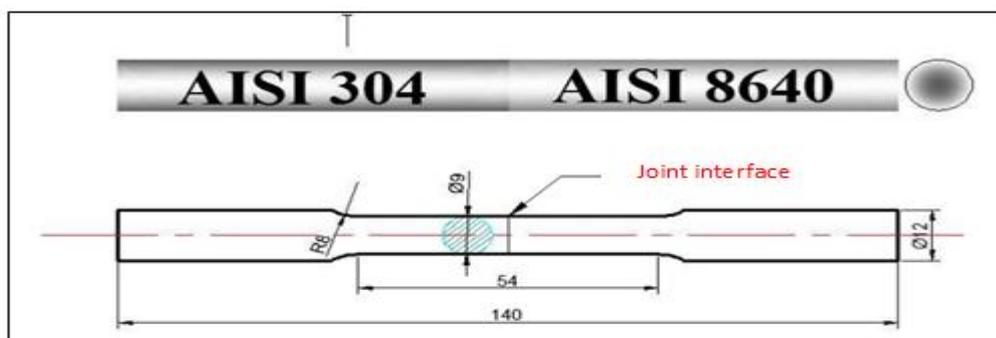


Figure. II. 8. Illustration schématique de l'éprouvette d'essai de traction [2].



Figure. II. 9. Macrophotographie d'échantillons soudés et polis[2].

La figure II.10 montre les résultats du test de dureté de la région soudée de trois échantillons S1, S2 et S3

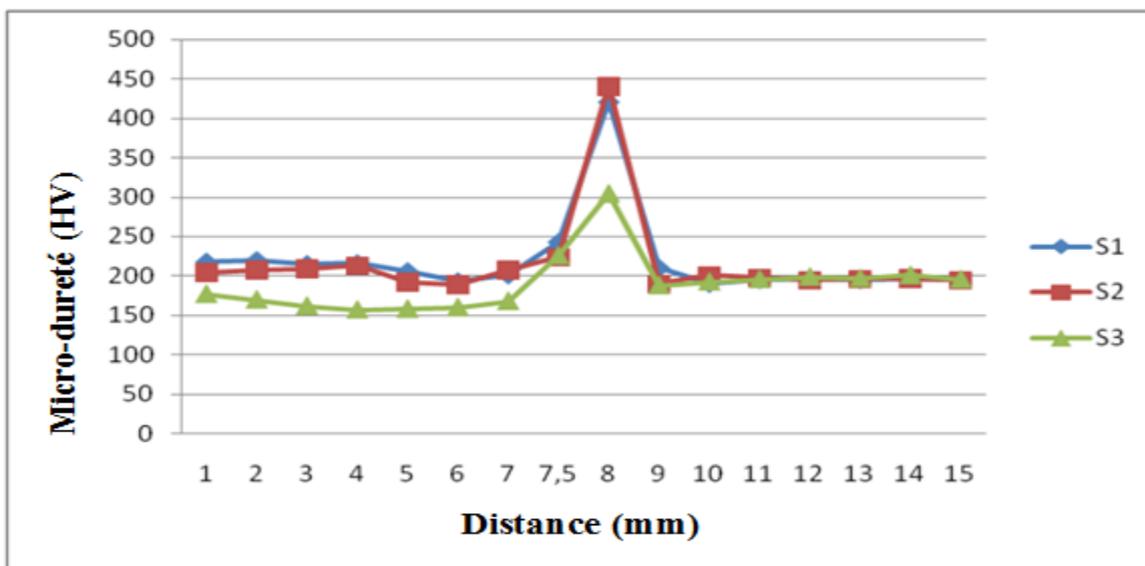


Figure. II .10. Valeurs de dureté des échantillons soudés [2].

Un test de traction a été effectué pour tous les échantillons et toutes les fractures étaient allongées et se sont produites au niveau de AISI8640 (Figure II.11)

Toutes les forces de traction et tous les allongements ont donné à peu près les mêmes résultats (Figure II.12).

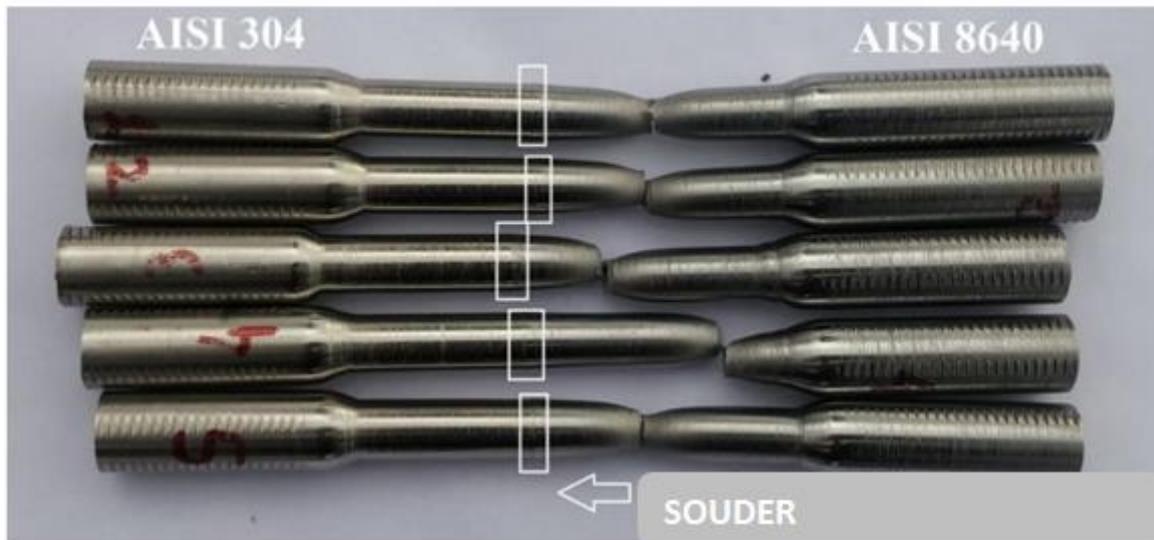


Figure. II.11. Éprouvettes de traction fracturées [2].

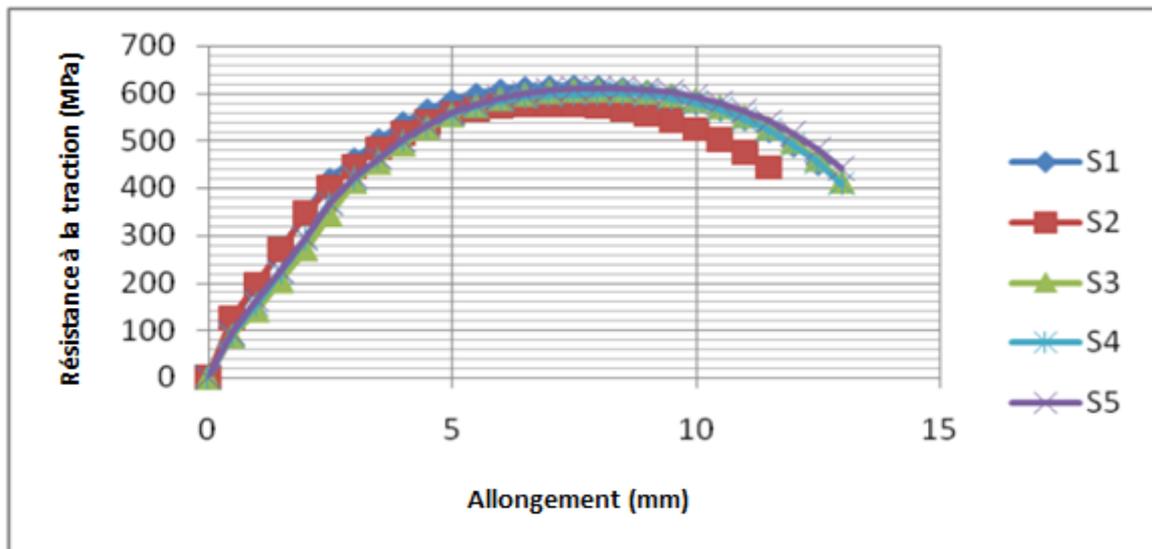


Figure II. 12. Graphique des résultats des essais de traction [2].

Les méthodes de microscopie optique sont illustrées dans la figure II.13. La zone déformée et les directions de distorsion sont clairement visibles. Les affichages détaillés du minéral de base sont illustrés dans la Figure II.14. La largeur de la zone de déformation de l'acier AISI 8640 était supérieure à celle de l'acier AISI 304, car la capacité thermique de l'acier AISI 8640 est inférieure à celle de l'acier AISI 304.

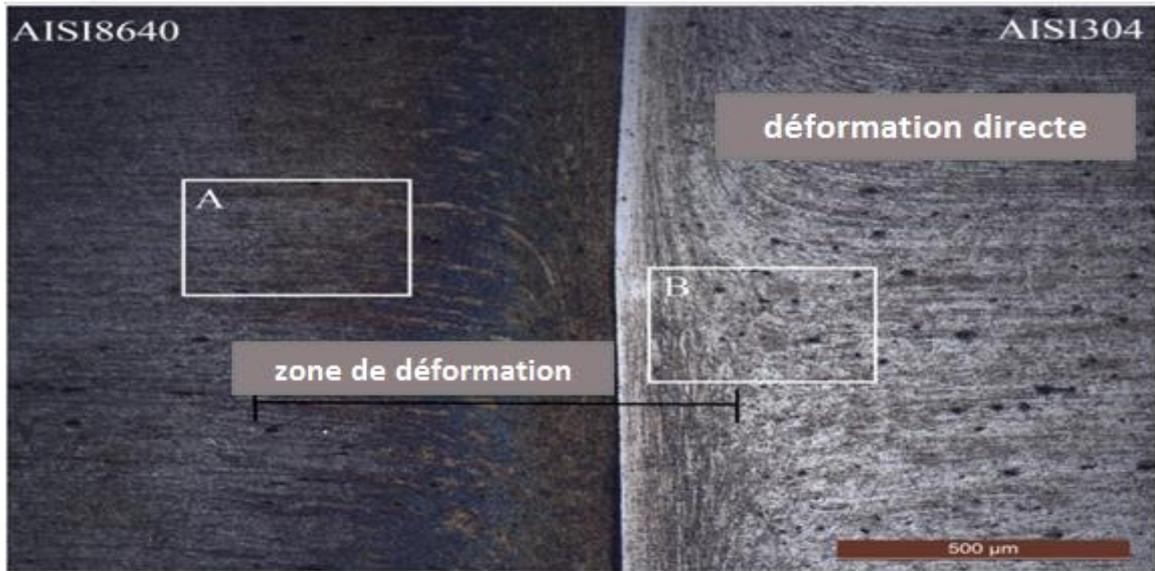


Figure. II. 13. Vue au microscope optique de la zone soudée [2].

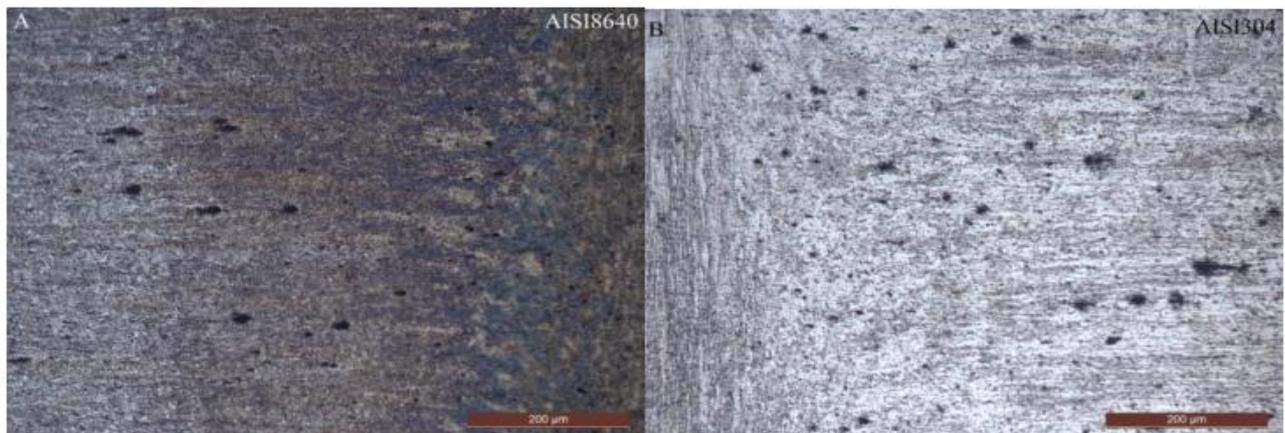


Fig. 14. Vues détaillées des matériaux de base [2].

Les analyses EDS ont été effectuées en sept points, illustrés dans la figure II.15 Les résultats des analyses chimiques sont énumérés dans le tableau II.6.

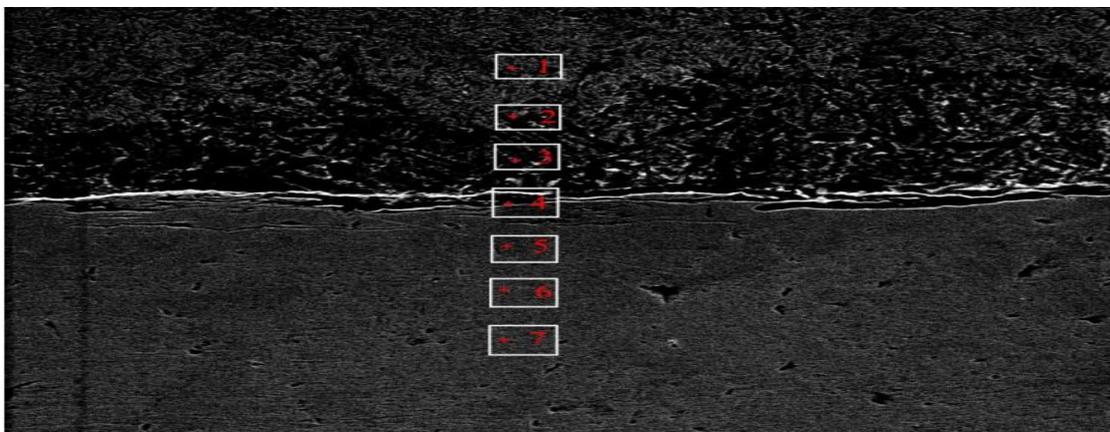


Figure. II. 15. Photo SEM d'éprouvettes soudées [2].

Points	1	2	3	4	5	6	7	
Éléments %Wt	Ti	0.085	0.181	0.253	0.195	0.270	0.177	0.144
	Cr	0.651	0.590	0.959	8.882	19.945	20.113	20.081
	Mn	0.914	0.746	0.732	1.393	1.431	1.345	1.542
	Fe	97.130	97.297	96.947	85.335	70.560	70.274	70.373
	Ni	0.760	0.854	0.723	3.257	7.257	7.316	6.965
	Cu	0.459	0.332	0.385	0.939	0.536	0.776	0.896

Tableau.II. 6. Données EDS des points 1 à 7 [2].

Les auteurs sont parvenus aux conclusions suivantes :

Les aciers AISI 304 et AISI 8640 ont été collés sans soudure par friction et également :

- Aucune fissure n'est apparue dans la zone de soudure
- Le matériau est étalé dans la zone de soudure
- La résistance de soudage est suffisante
- La configuration Flash a augmenté au fil du temps.

### 3-Soudage des aciers inoxydables avec des aciers ordinaires

Pour le soudage d'un acier inoxydable avec un acier ordinaire, on peut citer les travaux de James et Sudhish [3], qui ont étudié par friction rotation le soudage de deux aciers inoxydables (acier inoxydable austénitique 304 et un acier à moyen carbone AISI 1040).

La figure II.16 montre la machine de soudage utilisée et aussi les échantillons soudés par cette machine.



Figure. II. 16. Machine de soudage utilisée et les échantillons soudés parAlphabet grec[3].

Les conditions de soudages sont indiquées dans le tableau II.7.

Tableau II.7. Le conditions de soudages [3].

Courses	Vitesse (tr / min)	Pression de forgeage (tonne)	Brûlure de longueur
S1NS1	2500	1.884	8
S2NS2	2500	1.570	6
S3NS2	2500	1.256	4
S4NS3	2300	1.884	6
S5NS4	2300	1.570	4
S6NS5	2300	1.256	8
S7NS6	2100	1.884	4
S8NS7	2100	1.570	8
S9NS8	2100	1.256	6

La figure.II.17 montre la microstructure du joint soudé.



Figure. II. 17. Microstructure du joint soudé[3].

Les auteurs ont effectué aussi des tests de traction sur les éprouvettes soudées comme le montre la figure II.18.



Figure. II. 18. Eprouvettes soudées après essais de traction[3].

Pour étudier la dureté des échantillons, les auteurs ont effectué les mesures de dureté selon la norme ASTM E 384-01. Pour cette raison, l'échantillon a été préparé comme le montre la figure II.19. Ces auteurs ont trouvé que la diminution de la rigidité dans la zone d'interface du joint est due au fait que l'acier AISI 304 ne se prête pas au durcissement par traitement thermique [4]. L'acier rapide et l'acier au carbone moyen ont montré l'apparence d'une zone près de la façade, presque retirée du carbone. Ici, des grains de ferrite recristallisés ont été observés. Le carbone de cette région a traversé l'interface vers l'acier à haute vitesse (HSS) en raison de la présence d'éléments de formation de carbure forts dans le HSS [ 5,6,7]. Certains autres chercheurs ont revendiqué la formation d'une couche d'oxyde à l'interface de soudure entraînant une augmentation de la dureté pendant la fusion soudage des superalliages MA956 [8]

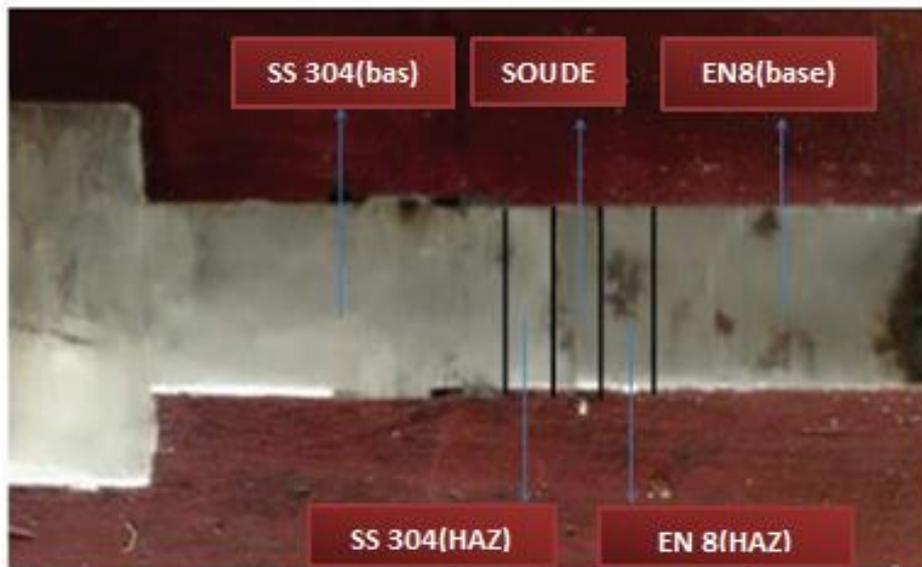


Figure .II.19. Spécimen pour le test de micro dureté[3].

Les auteurs ont également analysé FESEM et EDS sur des échantillons soudés comme le montre la figure II.20 [3].

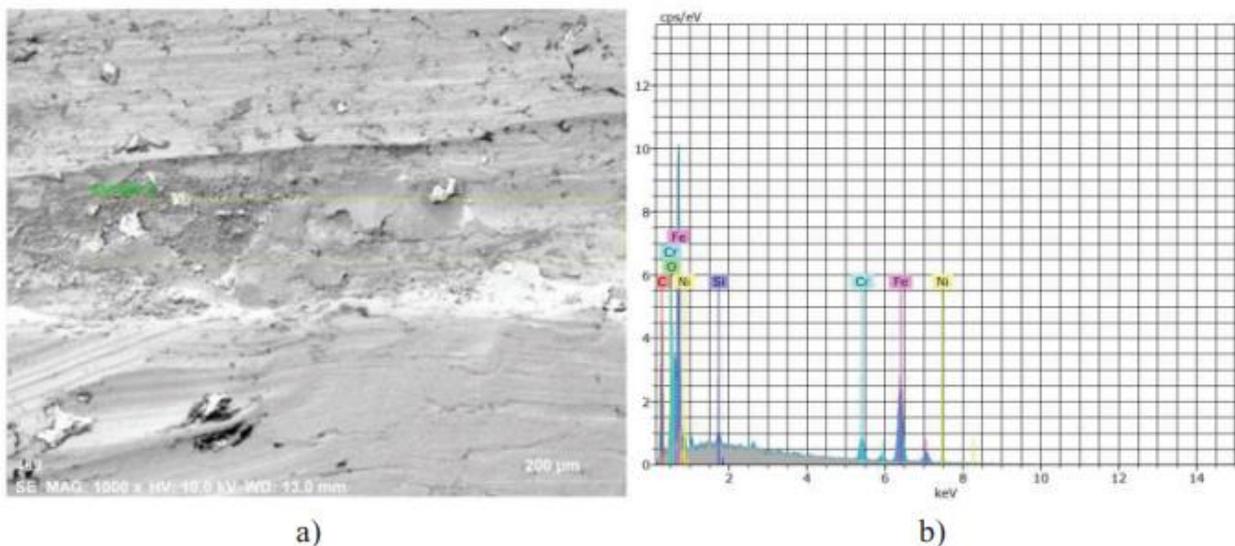


Figure.II.20 a) Image SEM montrant la zone de numérisation b) Analyse EDS (S).

Les principales conclusions des auteurs sont les suivantes.:

1) La résistance à la traction maximale des soudures sans l'utilisation de l'intercalaire dépendait directement de la pression de forgeage, et la résistance maximale de 636 MPa obtenue à la pression de forgeage la plus élevée de 1,884 tonnes. Mais

Lorsque la couche intermédiaire de nickel a été introduite, la résistance la plus élevée de 661 MPa a été obtenue à la longueur de combustion la plus élevée de 8 mm

2) Les résultats de rigidité fine ont montré une diminution de la rigidité maximale à l'interface (391 Hv) qui était de 454 Hv

Lors du soudage sans l'utilisation de l'intercalaire qui est dû à la faible précipitation du carbure de chrome à l'interface due à la présence de nickel.

3) Les images FESEM ont montré la microstructure de la soudure et le spectre EDS indiquant la formation de la partie de soudure dans la région de balayage.

Ces mêmes auteurs des actions similaires peuvent être entreprises à l'avenir comme :

- Etudier l'effet de l'épaisseur de l'intercalaire sur les propriétés de soudage. Il s'agit de réaliser des expériences pour différentes épaisseurs d'intercalaires.
- Sélection d'autres matériaux compatibles avec l'intercalaire tels que l'aluminium, le cuivre, etc. et étude de leur effet.
- Choisissez une méthode autre que la galvanoplastie pour déposer le matériau intercalaire et comparer les effets.
- Envisagez des combinaisons d'autres matériaux différents.

## **Conclusion partielle**

D'après cette revue bibliographique, les travaux de recherche précédents ont montré que des aciers différents peuvent être facilement soudés en utilisant le soudage par friction. De plus, le préchauffage des aciers pouvant être traités thermiquement n'est pas nécessaire et que la dureté de la zone de soudure est généralement supérieure à celle du matériau d'origine. Les paramètres de soudage sont aussi importants pour réussir une soudure de qualité.

## Bibliographie

- [1] Alza, V.A. “Mechanical Properties and Microstructure, inwelded joints of Low and Medium CarbonSteels, applying Rotary Friction“,International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) 2277-3878, 8, 6, March 2020.
- [2] Bati, S. Kilic M., Kirik İ., “Friction Welding of Dissimilar AISI 304 and AISI 8640 steels, “ 6, 2, 2016 European Journal of Technic EJT
- [3] James J. A., Sudhish. R. “Study on Effect of Interlayer in Friction Welding for Dissimilar Steels“: SS 304 and AISI 1040, Procedia Technology 25 ( 2016 ) 1191 – 1198.
- [4] Mumim. S. “Evaluation of the joint interface properties of austenitic stainless steel joined by friction welding”. Mater Des 2007;28:2244– 50.
- [5] Murti K GK, Sundaresan S. “Structure and properties of friction weld between high speed steel and medium carbon steel for bimetal tools”. Mater Science Technology 1986; 2:865–70, National powder metallurgy conference, Ankara, Turkey, 1999. p. 549–56
- [6] Otmanboluk AN, Ay I, Celik I.”Investigation of friction and diffusion welding properties of Al and Cu bars” In: II international welding technology symposium, Istanbul, 1998. p. 177–89.
- [7] Yilmaz M., Karagoz S. “Joining of ceramics – metal parts by friction welding”: I. National welding technology congress, Ankara, Turkey, 1997. p. 207–19.
- [8] Turker M., Yildiz S. “Fusion welding technique application of iron-based welding technique application of iron-based super alloys.” In:National powder metallurgy conference, Ankara, Turkey, 1999. p. 549–56
- [9] Handa A. and Chawla V., “Experimental evaluation of mechanical prophéties of friction welded AISI steels“, Handa & Chawla, Cogent Engineering (2014), 1: 936996

## 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 métaux dissimilaires (non semblables) : Acier X70 et Acier inoxydable Duplex sous forme de barre cylindrique de diamètre  $\varnothing = 12$  mm (Fig. III.1).



Figure III. 1 : Métaux de base (Acier X70 et Acier inoxydable Duplex).

Plusieurs échantillons ont été préparés sous forme cylindrique afin de les souder.

La composition chimique de chaque acier est présentée dans le tableau III.1 et III.2.

Tableau III. 1. Composition chimique de l'acier X70 (Mass. %).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	N	Mo
0.064 0	0.204 7	1.517 3	0.015 4	0.001 5	0.055 3	0.192 2	0.029 1	0.031 9	0.005 7	0.135 3

Tableau III.2. Composition chimique de l'acier inoxydable duplex (Mass. %).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu	N
0.03	0.50	1.88	0.024	0.004	23.19	7.08	3.02	0.02	0.06	0.09

### III.2. Technique de soudage.

La technique principale de soudage choisie dans cette étude est le soudage par friction rotation.

Le soudage par friction a été réalisé dans une machine d'usinage ( Tour) au niveau du Hall de technologie de l'université de Biskra ( Figure III.2). Elle consiste à fixer le premier métal et le second est mis en rotation. On note que sous l'effet de frottement, les deux métaux seront soudés.



Figure III.2. Procédé de soudage par friction rotation dans un tour d'usinage.

On note que plusieurs tests de soudage ont été effectués en changeant surtout la vitesse de rotation. Les vitesses appliquées étaient 700 tr /min; 1400 tr/min et 2000 tr/min.

La figure III. 3 montre un exemple de soudage d'un échantillon parmi plusieurs échantillons assemblés par ce procédé.



Figure III. 3. Soudage par friction rotation de deux échantillons dissimilaires (Acier X70 et Acier inoxydable Duplex).

### **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 (Fig.III.4). C'est un appareil optique qui permet l'agrandissement de l'image et par conséquent, l'observation des petits détails.



Figure III.4 : Microscope optique de type Olumpus

Les échantillons sont polies en utilisant une polisseuse de type Mecapol P310 (Fig.III.5). Les procédures métallographiques classiques sont suivies avec l'utilisation des différents papiers abrasifs : grades successivement utilisés : 240, 400, 600, 800 et finition 1000, 1200, et 2000, puis brillantage à l'aide d'une pâte diamantée de 1  $\mu\text{m}$  jusqu'à l'obtention d'une surface bien polie (miroir).



Figure III.5 : Polisseuse de type Mecapol P310

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 le Nital pour l'acier X70 et de 50 % vol. HCl, 25 % vol. HNO<sub>3</sub> et 25 % vol. H<sub>2</sub>O. pour l'acier inoxydable duplex.

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

### **III.3. Micro dureté Vickers :**

La micro 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 :

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

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

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

La dureté Vickers s'écrit :

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

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

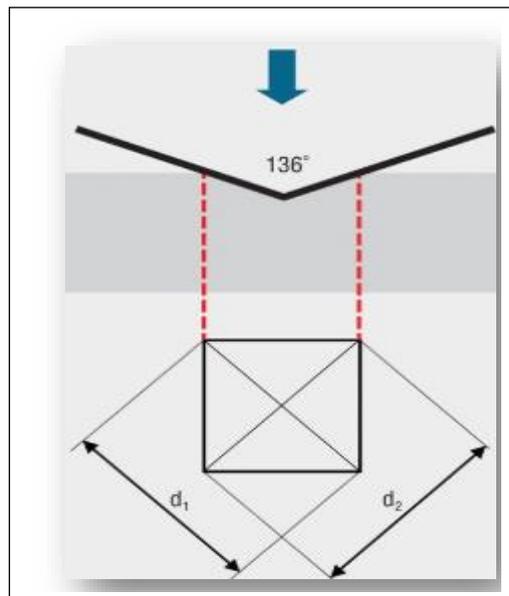


Figure III .6 . Essai de dureté Vickers.

Le pénétrateur de type Vickers est utilisé pour les essais de dureté et les essais de micro dureté. Nous avons utilisé la charge de 300 g force. L'appareil utilisé de marque ZWICK (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.

On note que des profils de dureté ont été réalisés le long du joint soudé.



Figure III .7. Microduromètre de type ZWICK.

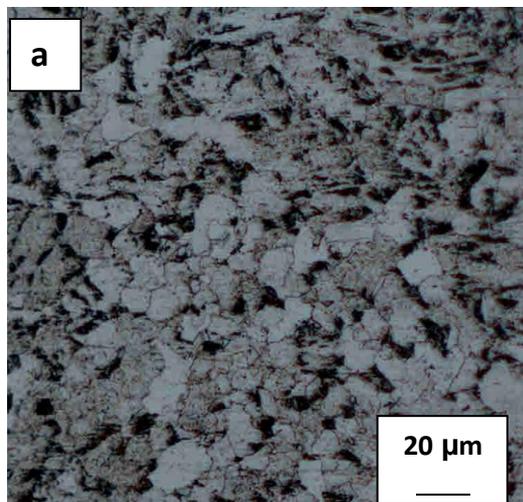
## CHAPITRE IV : Résultats et interprétation

### Introduction

L'assemblage des métaux dissimilaires par friction permet d'éviter la formation d'une couche fragilisant dans la zone de contact. Pour cette raison, on a opté surtout pour le soudage à l'état solide pour souder l'Acier X70 avec Acier inoxydable Duplex sous forme cylindrique. Dans ce chapitre, on présente les résultats de soudage par friction après l'utilisation des différentes techniques de caractérisation (microscopie optique, par microdureté). Les deux métaux ont été soudés sous différentes vitesses de rotation (700 tr/min, 1400 tr/min, et 2000 tr/min).

### I- Métaux de base

Les métaux de base utilisées sont un acier ordinaire X70 et un acier inoxydable duplex ( Fig.1 ). La microstructure de l'acier ordinaire X70 est composée d'une matrice ferritique et des colonies perlitiques. Par contre la microstructure de l'acier inoxydable duplex est composée de deux phases de même quantité ( Ferrite et Austénite ).



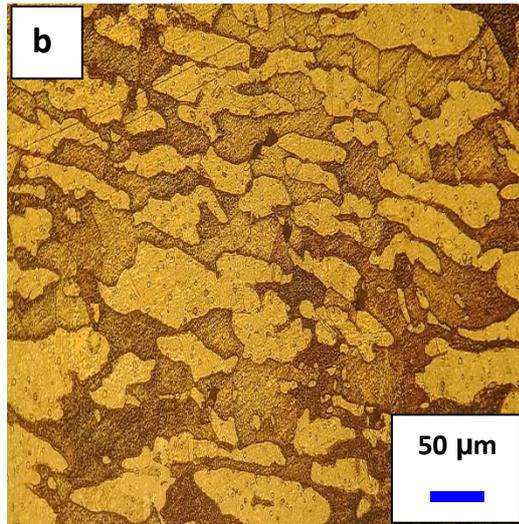


Figure IV. 1. Microstructure de ( a ) : l'acier X70 et de ( b ) : l'acier duplex.

## II. Soudage des aciers dissimilaires

### II.2. Observation macrographique

La figure IV.2 présente la macrographie d'un échantillon qui a été bien soudé.



Figure IV. 2. Macrographie du joint soudé avec une vitesse de rotation de 2000 tr./min.

## II.1. Observation microscopique

Nous signalons que malgré les différentes conditions de soudage des aciers dissimilaires ( surtout le changement de la vitesse de rotation ) , on note qu'un seul échantillon a été bien réussi; car pour les autres joint soudés, on a observé des fissures apparentes sur les joints soudés et un manque de soudage entre les deux aciers non semblables ( Fig. IV.3). Pour cette raison, on présente que le joint soudé qui a été bien soudé avec une vitesse de rotation de 2000 tr./min ( Fig. IV. 4 ).



Figure IV.3. Macrographie du joint soudé avec une vitesse de rotation de 700 tr./min.

D'après la figure IV.4, le joint soudé est constitué de la microstructure des deux métaux de base. Cette interface est obtenue après l'effet du frottement et du forgeage à chaud provoqué durant ce procédé de friction par rotation. On a pas remarqué des défauts de soudure comme la formation des fissures ou autres défauts.

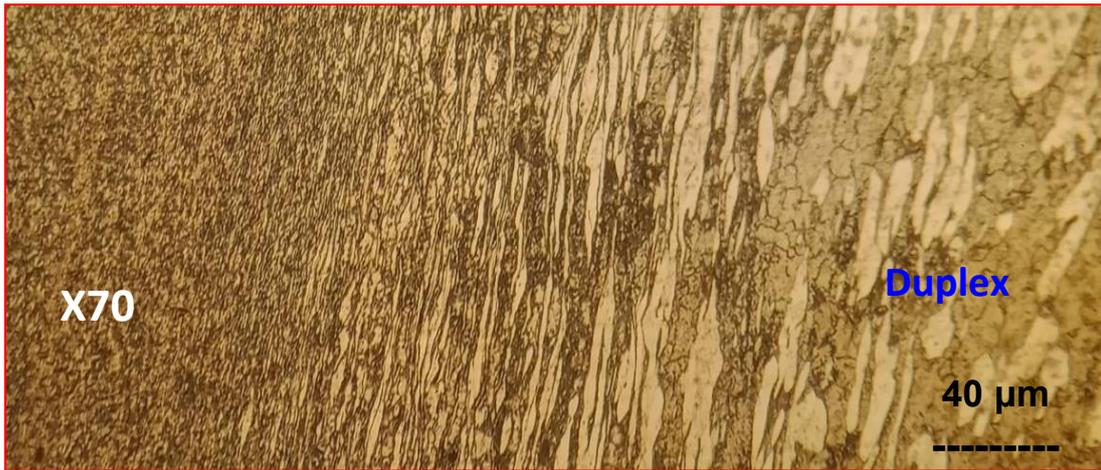


Figure IV. 4. Microstructure du joint (soudé X70/Acier duplex ) avec une vitesse de rotation de 2000 tr./min.

L'effet de la rotation lors du soudage par friction rotation a été observée sur l'acier duplex, ou on constate la déformation des grains ( orientation des grains dans l'une des zones du joint X70/Acier duplex ( Fig.5). Cette réorientation des grains de l'acier duplex est due la grande déformation plastique lors du processus de soudage.

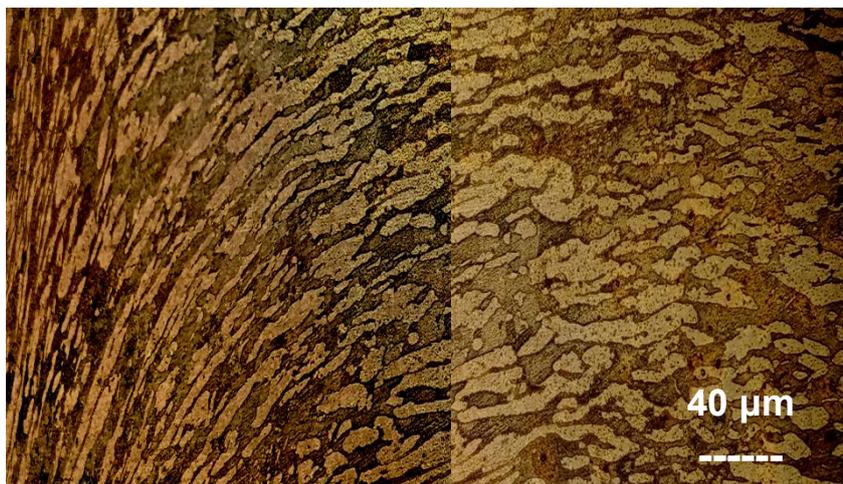


Figure IV. 5. Microstructure du joint (soudé X70/Acier duplex ) avec une vitesse de rotation de 2000 tr./min.

## IV.2. Microdureté.

La figure IV.6 montre les valeurs de microdureté Vickers à travers les joints soudés à différentes vitesses de rotation. On remarque que la plus grande valeur de dureté est enregistrée sur l'acier duplex, mais dans la zone proche de l'interface X70/Duplex, puis elle diminue légèrement dans le joint d'interface. Cette diminution de dureté continue dans la partie de l'acier X70. On peut dire que la dureté de l'interface se situe entre les deux valeurs de dureté des deux métaux dissimilaires.

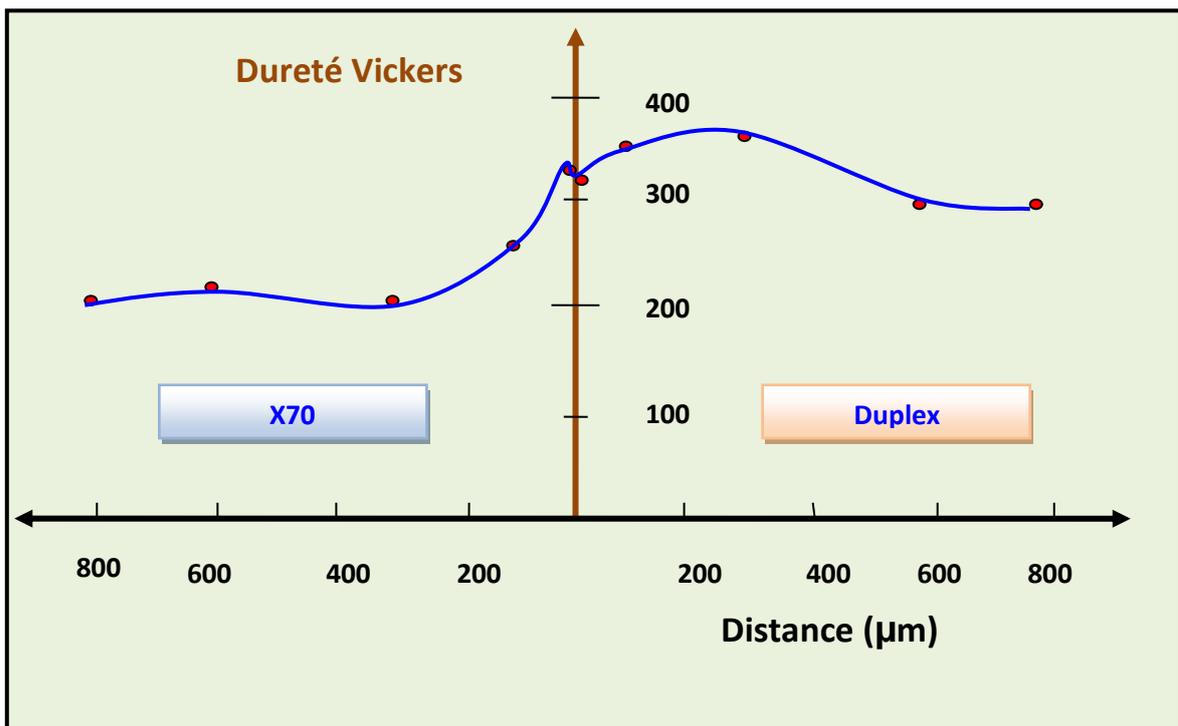


Figure IV.6. Profil de microdureté Vickers dans le joint soudé par friction rotation .

## Conclusion Générale

Le but principal de notre étude était de souder les deux métaux dissimilaires Acier X70 avec un acier inoxydable duplex par friction rotation. Pour cette raison, on a choisi d'appliquer plusieurs vitesses de rotation.

Pour aboutir à nos objectifs, trois techniques de caractérisations ont été appliquées et qui étaient disponibles durant la réalisation de ce travail de recherche :

- La microscopie optique.
- La microdureté Vickers.

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

- Possibilité de souder Acier X70 avec un acier inoxydable duplex par friction rotation
- La microstructure dans la zone du joint soudé est différente des deux métaux de base. Elle contient des grains déformés sous l'effet mécanique du soudage par friction rotation.
- La valeur de microdureté du joint soudé est entre les valeurs de microdureté des deux métaux de base.

## Perspectives

Notre principale perspective est d'approfondir notre technique en utilisant d'autres techniques de caractérisation comme le MEB.

## ملخص

بطريقة بسيطة وفعالة. من أجل ذلك ( X70 , Duplex ) إن الهدف من هذه الدراسة هو لحم فلادين مختلفين وهما لقد طبقنا عدة. وهو اللحام بالاحتكاك الدوراني اخترنا تطبيق اللحم في الحالة الصلبة والتي تعتمد على مبدأ الاحتكاك سرعات دوران. وللوصول إلى أهدافنا، فلقد استعملنا ثلاث طرق لتحليل العينات وهما المجهر الضوئي و قياسات الصلادة. لقد بينا إمكانية لحم معدنين مختلفين باستعمال طريقة اللحام بالاحتكاك الدوراني

## Résumé

Le but principal de notre étude était de souder deux aciers dissimilaires ( X70 et Acier inoxydable duplex ) par un moyen très simple et qui le soudage par friction rotation. Pour cette raison, on a choisi d'appliquer plusieurs vitesses de rotation. Pour aboutir à nos objectifs, trois techniques de caractérisations ont été appliquées et qui sont; la microscopie optique et la microdureté Vickers. On a pu montrer la possibilité de souder deux métaux non semblables par soudage par friction rotation.

## Abstract

The main goal of this research was to weld two dissimilar steels ( X70 et Stainless steel duplex ) by using a simple techniques but efficient which is welding by friction rotation. For this reason, we have chosen to apply different rotational speed. To acquire our objective, three techniques of characterization were used, optical microscopy, and hardness measurement. We have shown the possibility to join two dissimilar metals by friction rotation.