

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT PHYSIQUE
N° : PH/MAT/03/2022



DOMAINE : Sciences de la matière
FILIERE : Physique
OPTION : Physique des Matériaux

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: MAHDI Laid

Intitulé

**Etude des propriétés des joints Acier
inoxydable/Al soudés par friction**

Soutenu le : 20/09/2022 devant le jury composé de:

Dr. BENDERRADJI Razik	Université de M'sila	Président
Dr. KHALFALLAH Fares	Université de M'sila	Rapporteur
Dr. ALLALI Djamel	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2021/2022

Table des matières

	Page
Table des matières.....	i
Liste des figures.....	iii
Liste des tableaux	v
Introduction générale.....	1
Chapitre I Procédé de soudage par friction rotative	
I.1 Introduction	3
I.2 Le soudage	3
I.2-1 Définition.....	3
I.2-2 Procédés de soudage	3
I.3 Soudage par friction (en anglais, Friction Welding FW)	7
I.3-1 Définition et principe de soudage par friction.....	7
I.3-2 Procédés de soudage par friction	7
I.4 Soudage par friction rotative (en anglais, Rotary Friction Welding RFW)	7
I.4-1 Principe de soudage par friction rotative	7
I.4-2 Paramètres de soudage par friction rotative	8
I.4-3 Processus de soudage par friction rotative	10
I.4-4 Modes de soudage par friction rotative	11
I.4-5 Avantages et inconvénients de soudage par friction rotative	14
I.5 Références	16
Chapitre II Soudage par friction rotative acier inoxydable - aluminium	
II.1 Introduction	18
II.2 Les aciers.....	18
II.2-1 Classification des aciers	18
II.2.2- Aciers inoxydables	19
II.3 Aluminium et ses alliages	22
II.3. 1- Classification des alliages d'aluminium	22
II.3. 2- Alliage d'aluminium 2017A	23
II. 4 Soudage des alliages d'aluminium et des aciers	24

II. 5 Analyse de la littérature	24
II. 6 Références	30
Chapitre III Matériaux et procédure expérimentale	
III.1 Introduction	32
III.2 Matériaux utilisés	32
III.3 Processus de soudage par friction rotative à entraînement direct	32
III.4 Techniques de caractérisation	35
III.4.1- Préparation des échantillons pour la caractérisation	35
III.4.2- Caractérisation mécanique	36
III.5 Références	37
Chapitre IV Résultats & Discussions	
IV.1 Introduction	38
IV.2 Comportement thermique des joints AISI 316L/Al 2017A	38
IV.3 Raccourcissement axial des joints AISI 316L/Al 2017A	40
IV.4 Distributions de la microdureté des joints AISI 316L/Al 2017A	42
IV.5 Résistance à la traction des joints AISI 316L/Al 2017A	43
IV.6 Références	44
Conclusion générale.....	46

Liste des figures

	Page
Figure I.1 Assemblage de deux pièces par soudage	4
Figure I.2 Classification des procédés de soudage.....	4
Figure I.3 Quelques procédés de soudage avec fusion	5
Figure I.4 Procédés de soudage par pression et fusion	6
Figure I.5 Classification des procédés de soudage par friction	8
Figure I.6 a) Principe du soudage par friction rotative, b) Schéma d'une machine de soudage par friction rotative	9
Figure I.7 Vue globale et en coupe d'un joint soudé par friction	9
Figure I.8 Effet des paramètres de soudage sur la forme des joints soudés par RF.....	10
Figure I.9 Variations du couple de frottement pendant le processus du RFW.....	12
Figure I.10 Séquences de soudage par friction : a) à entraînement direct, b) inertielle ...	13
Figure I.11 Variation des paramètres de soudage par friction a) à entraînement direct, b) inertielle	14
Figure II.1 Désignations des alliages d'aluminium de fonderie	23
Figure II.2 Diagramme de phase binaire Fe-Al	25
Figure II.3 Joint AISI 304/Aluminium soudé par friction rotative : a) Photo du joint, b) Photo de l'interface du joint	21
Figure II.4 Répartition de la dureté sur la distance horizontale des joints AISI 304/Aluminium	26
Figure II.5 Relation entre la résistance à la traction horizontale des joints AISI 304/Aluminium et le temps de friction (a), la pression de friction (b).	26
Figure II.6 Images MEB de l'interface des joints AISI 316L/AA6061 soudé par friction rotative	26
Figure II.7 Résistance à la traction et allongement des joints AISI 316L/AA6061 soudés par friction rotative	27
Figure II.8 Influence des paramètres de procédé CDFW sur le raccourcissement axial des joints AA6061/ SS 304	27
Figure II.9 Influence des paramètres de procédé CDFW sur la résistance à la traction des joints AA6061/ SS 304	28
Figure II.10 IFW d'alliage d'aluminium 2A14 (T6) avec l'AISI 304 : a) Morphologie macroscopique du joint , b) Courbes des mesures de température	28

Figure III.1	Pièces d'aluminium 2017A et d'acier inoxydable AISI 316L à assemblée par soudage par friction rotative.....	33
Figure III.2	Vue du processus de soudage par friction rotative acier inoxydable AISI 316L – Alliage d'aluminium 2017A.....	33
Figure III.3	Mesure de température des joints par une caméra thermique infrarouge.....	34
Figure III.4	Polisseuse MP-2B Grinder Polisher utilisée en préparation des échantillons	35
Figure III.5	Équipement utilisé pour réaliser les essais de traction.....	36
Figure III.6	Machine de mesure de la microdureté Vickers.....	37
Figure IV.1	Cycles thermiques enregistrés dans la pièce d'Al 2017A.....	38
Figure IV.2	Cycles thermiques enregistrés dans la pièce d'AISI 316L.....	39
Figure IV.3	Joints dissimilaires acier inoxydable AISI 316L/alliage d'aluminium 2017A soudés par friction rotative.....	40
Figure IV.4	Variations du raccourcissement des joints AISI 316L/Al 2017A en fonction de la vitesse de rotation.....	41
Figure IV.5	Distributions de la microdureté des joints AISI 316L/Al 2017A.....	42
Figure IV.6	Courbes contrainte-déformation obtenues à partir des essais de traction des joints AISI 316L/Al 2017A	43
Figure IV.7	Résistances à la traction des joints AISI 316L/Al 2017A soudés à différentes vitesses de rotation.	44

Liste des tableaux

	Page
Tableau I.1 Phases du processus de soudage par friction rotative	11
Tableau II.1 Classification des aciers inoxydables	20
Tableau II.2 Composition chimique de l'acier inoxydable 316L	21
Tableau II.3 Caractéristiques mécaniques de l'acier inoxydable 316L	21
Tableau II.4 Composition chimique de 2017A	23
Tableau II.5 Caractéristiques mécaniques de 2017 A	24
Tableau III.1. Composition chimique de l'acier inoxydable AISI 316L (déterminée par Spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF))	32
Tableau III.2. Composition chimique d'alliage d'aluminium Al 2017A	32
Tableau III.3. Paramètres utilisés dans le soudage par friction rotative AISI 316L/Al 2017A	35

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction

L'assemblage dissemblable (ou dissimilaire) est le processus de combinaison des matériaux de base ayant des propriétés physiques, mécaniques et chimiques différentes. Si une méthode d'assemblage traditionnelle telle que le soudage par fusion est appliquée pour assembler des matériaux dissimilaires, par exemple alliage d'aluminium et acier, les propriétés mécaniques des soudures (ou joints) réalisées seront très médiocres en raison des facteurs suivants :

- La formation des couches intermétalliques (CI) Al-Fe fragiles et très épaisses au niveau de la ligne du joint.
- La possibilité de la rupture des joints à cause des contraintes thermiques élevées générées lors du refroidissement qui suit le processus de soudage, car les alliages d'aluminium ont des coefficients de dilatation thermique plus élevés que ceux de l'acier.

De plus, les températures de fusion d'aluminium et d'acier sont très différentes, ce qui rend le processus de soudage par fusion difficile car il y aura une forte tendance à la fusion préférentielle du matériau de base à faible point de fusion. Ainsi, dans ce cas, le soudage à l'état solide est le meilleur alternatif, car l'assemblage se fait entièrement à l'état solide, c'est-à-dire à des températures inférieures à la température de fusion des matériaux de base.

Le soudage par friction est une technique de soudage à l'état solide dans laquelle les matériaux à assembler sont frottés à grande vitesse sous l'action d'une pression (ou force) externe. Dans le cas du soudage par friction rotative (SFR), la chaleur générée par le frottement bout à bout et rotatif entre les matériaux à assembler ramollit leurs surfaces et l'application simultanée d'une pression provoque leur assemblage. La technique de SFR peut être utilisée pour assembler divers métaux tels que l'acier inoxydable, le cuivre, l'aluminium et le titane, et les joints similaires ou dissimilaires qu'elle développe ont une bonne résistance.

Dans ce travail expérimental, des joints dissimilaires entre l'alliage d'aluminium 2017A et l'acier inoxydable AISI 316L ont été développées en utilisant la technique de soudage par friction rotative. Une gamme des vitesses de rotation (710, 1000, 1400 et 2000 t/min) a été sélectionnée afin d'étudier la corrélation entre ce paramètre de soudage, le comportement thermique et les propriétés mécaniques des joints.

La présentation générale de ce mémoire est divisée en quatre chapitres avec une introduction et une conclusion générales.

Le mémoire commence par une introduction générale qui présente la motivation et les objectifs de cette étude.

Le premier chapitre donne une idée générale sur les caractéristiques et l'importance du procédé de soudage par friction.

Le deuxième chapitre, vise à résumer certains des travaux antérieurs de la littérature qui étudier l'assemblage dissimilaire entre l'aluminium et l'acier inoxydable, et se concentre principalement sur le soudage par friction rotative.

Le chapitre 3 fournit des informations sur les matériaux utilisés et présente une description détaillée de la procédure expérimentale appliquée. Il présente également les techniques de caractérisation utilisées dans ce travail.

Le chapitre 4 analyse et discute les résultats du travail réalisé

A la fin de ce mémoire, une conclusion générale est présentée afin de résumer les principaux résultats obtenus.

CHAPITRE I

PROCEDE DE SOUDAGE PAR FRICTION ROTATIVE

I.1 Introduction

Ces dernières années, la plupart des industries utilisent des nouveaux matériaux avec des propriétés spécifiques afin d'économiser de l'énergie et de réduire les coûts de production. Et avec le développement technologique actuel, il est devenu possible d'obtenir ces matériaux en assemblant des matériaux simples (ou de base) tels que l'acier, l'aluminium, le cuivre....etc.

Dans ce contexte, la méthode de soudage par friction, qui est l'une des méthodes d'assemblage des matériaux, attire de plus en plus l'attention en raison de ses caractéristiques uniques telles que la précision élevée, la faible énergie et le temps court, par rapport aux autres méthodes de soudage.

I.2 Le soudage

Le soudage d'un matériau avec un autre matériau est l'une des méthodes d'assemblage les plus utilisées dans les applications techniques.

I.2-1 Définition

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 [1].

Il existe trois techniques du soudage (figure I.1)

1. Le soudage homogène : les métaux de base ou éventuellement le métal d'apport sont de même nature [2].
2. Le soudage hétérogène de type A : association de métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature [2].
3. Le soudage hétérogène de type B : les métaux de base et le métal d'apport sont de nature différentes [3].

I.2-2 Procédés de soudage

Il existe plusieurs procédés de soudage dont les principes sont différents.

La figure I.2 montre une classification des procédés de soudage selon le mode d'apport de l'énergie nécessaire pour réaliser la soudure.

1- Soudage avec fusion (en phase liquide)

Dans ces procédés, l'assemblage des pièces est obtenu par une fusion locale en utilisant une source de chaleur telle qu'une flamme ou un arc électrique. Ils sont les plus utilisés pour

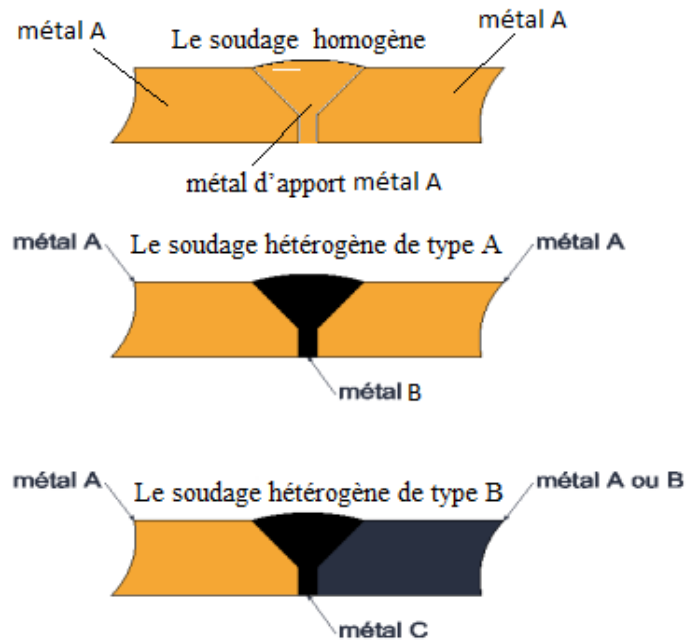


Figure I.1 Assemblage de deux pièces par soudage [4].

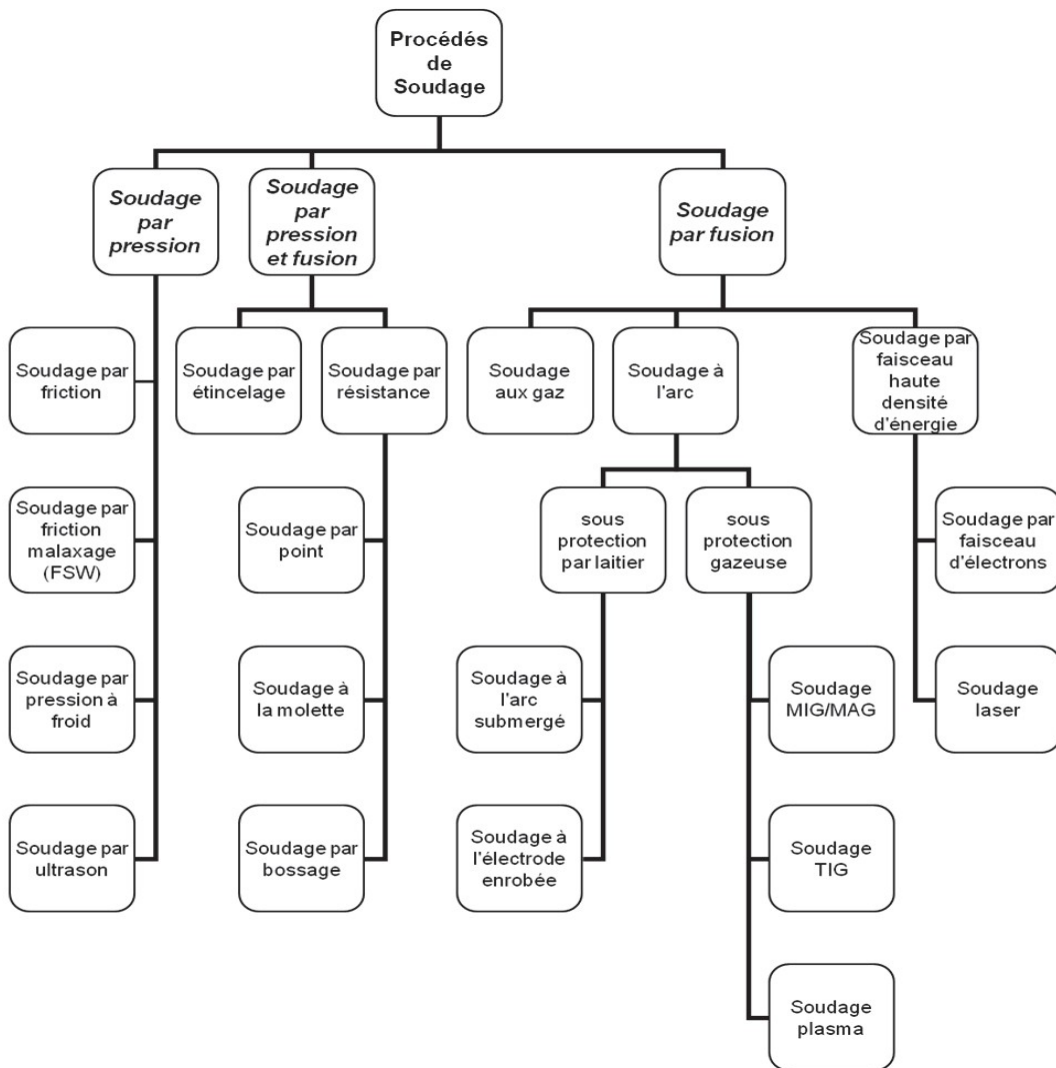
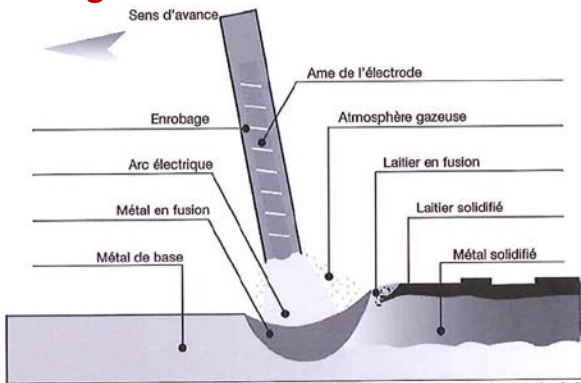


Figure I.2 Classification des procédés de soudage [5].

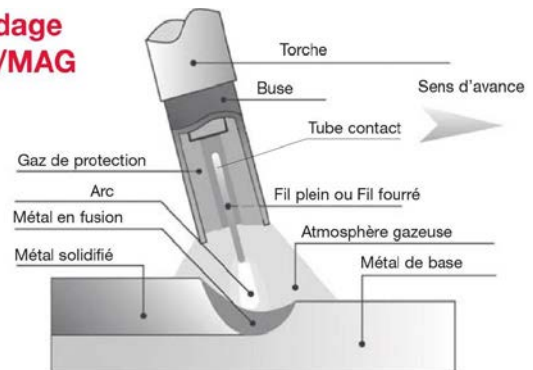
assembler des matériaux semblables. On cite les procédés suivants [6]:

- Soudage à l'arc électrique
 - Soudage à arc à l'électrode enrobée (SMAW)
 - Soudages MIG et MAG (Metal Inert Gas et Metal Activ Gas)
 - Soudage TIG (Tungsten Inert Gas)
 - Soudage plasma

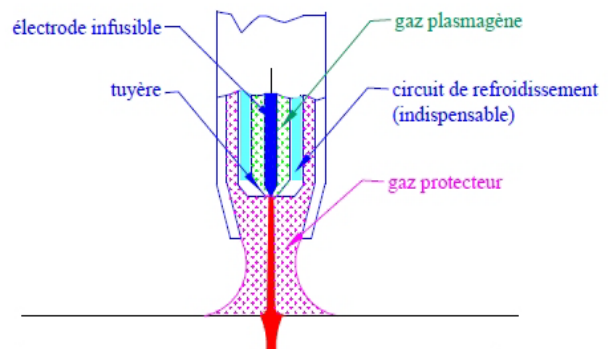
Soudage à arc à l'électrode enrobée



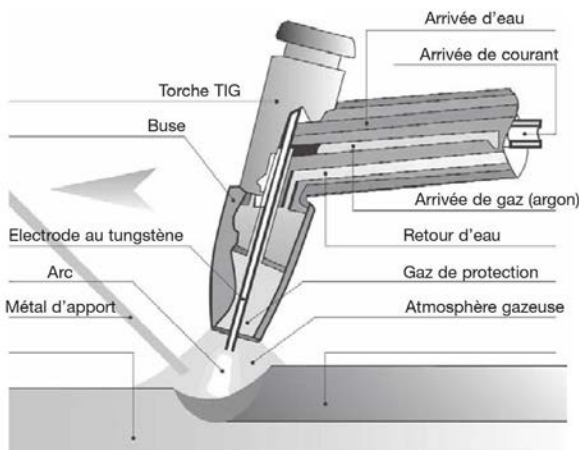
Soudage MIG/MAG



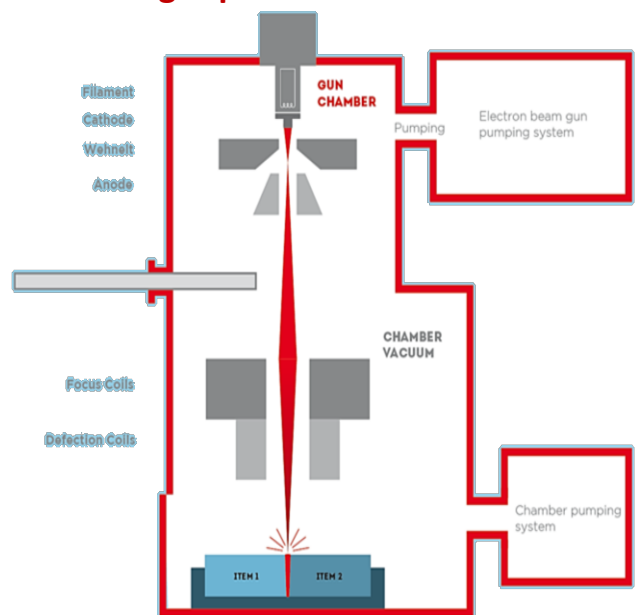
Soudage plasma



Soudage TIG



Soudages par faisceau d'électrons



Soudages par faisceau laser

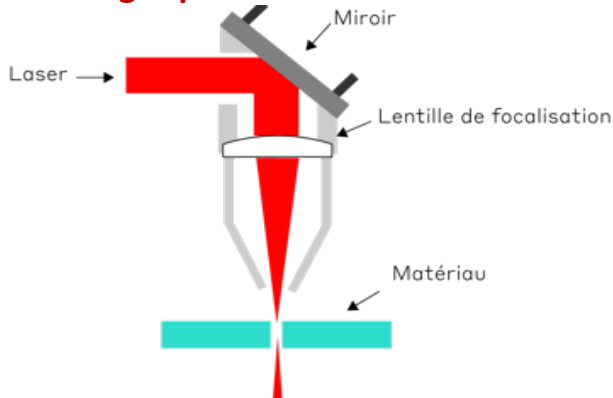


Figure I.3 Quelques procédés de soudage avec fusion [7].

- Soudage à la flamme
- Soudages par faisceau d'électrons et par faisceau laser
-

2- Soudage par pression (en phase solide)

Le soudage à l'état solide (ou par pression) est un groupe de processus de soudage, dans lesquels la coalescence des surfaces à assembler est obtenue sans fusion en appliquant une pression (avec ou sans application de chaleur) [8].

Les procédés typiques de soudage à l'état solide sont :

- Soudage par friction
- Soudage par friction-malaxage
- Soudage par diffusion
- Soudage par ultrasons

3- Soudage par pression et fusion

Ces procédés de soudage présentent des points communs entre les procédés de soudage par fusion (fusion des surfaces à assembler), et ceux de soudage par pression (application d'une pression de contact). Les principaux procédés de soudage par sont [5] :

- Soudage par résistance
 - Soudage par points
 - Soudage à la molette
- Soudage par étincelage

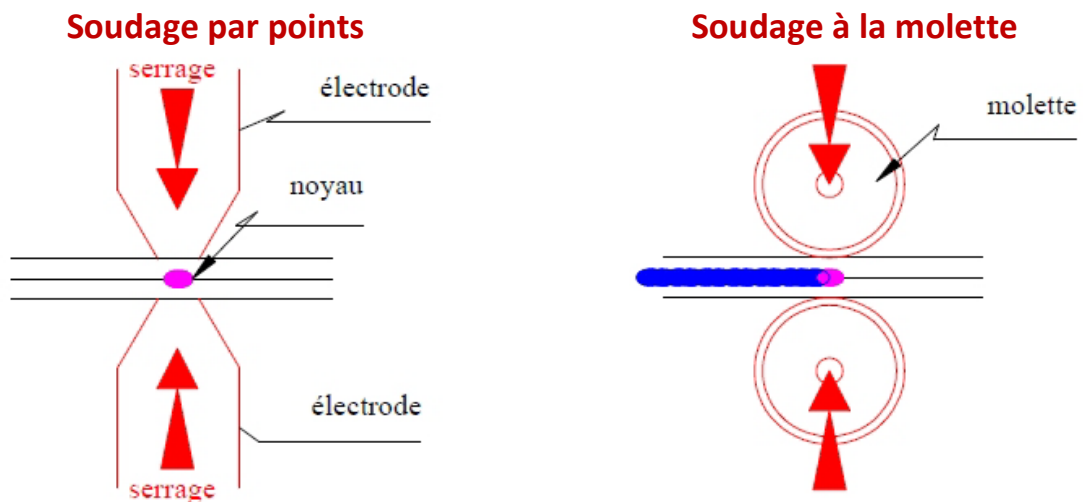


Figure I.4 Procèdes de soudage pression et fusion [9].

I.3 Soudage par friction (en anglais, Friction Welding FW)

Les humains ont commencé à développer une technologie en faisant tourner des bâtons de bois en contact les uns avec les autres pour générer de la chaleur par friction et déclencher des incendies. Le soudage par friction est une méthode d'assemblage des matériaux en utilisant efficacement la chaleur de friction générée par le contact entre les matériaux.

En 1954, un ancien opérateur de tour soviétique AICHudikov a réussi des expériences de soudage par friction et, à partir de 1956 environ, la recherche et le développement se sont poursuivis au VNIIESO (ancien institut de recherche sur le soudage électrique de l'Union soviétique) et en 1961 au BWRA (British Welding Research Institute Association).

I.3-1 Définition et principe de soudage par friction

Le soudage par friction est un procédé de soudage à l'état solide dans lequel les surfaces butées des pièces à souder sont déplacées les unes aux autres. Dans ce cas, sous l'effet de la force appliquée, le frottement et la déformation thermique générée conduisent à l'assemblage des pièces sans nécessiter d'un métal soudure d'apport [10].

En comparaison avec le soudage à l'arc conventionnel, le FW ne nécessite pas de source de chaleur, le chauffage des surfaces s'effectue par un frottement et (/ou) une déformation intense localisée, ce qui conduit à chasser les impuretés et à créer un contact intime entre les pièces à assembler (similaires ou dissimilaires) [11].

I.3-2 Procédés de soudage par friction

La distinction entre les différentes procédures de soudage par friction est définie par le mouvement des deux pièces à assembler en rotation ou sans rotation.

La figure I.5 présente une classification des procédés de soudage par friction.

I.4 Soudage par friction rotative (en anglais, Rotary Friction Welding RFW)

I.4-1 Principe de soudage par friction rotative

En tant que soudage à l'état solide, le RFW est conçu pour assembler des pièces cylindriques telles que des barres et des tuyaux, où la chaleur est générée par la rotation relative de deux composants à souder [13].

Dans le processus du RFW, la machine de soudage applique une force axiale tout en faisant tourner une des pièces à souder (pièce rotative) contre la deuxième pièce qui reste immobile (pièce fixe) (figure I.6-a). Les faces en contact s'échauffent et deviennent la source de chaleur qui, par diffusion, élève la température des extrémités des pièces. Celles-ci deviennent

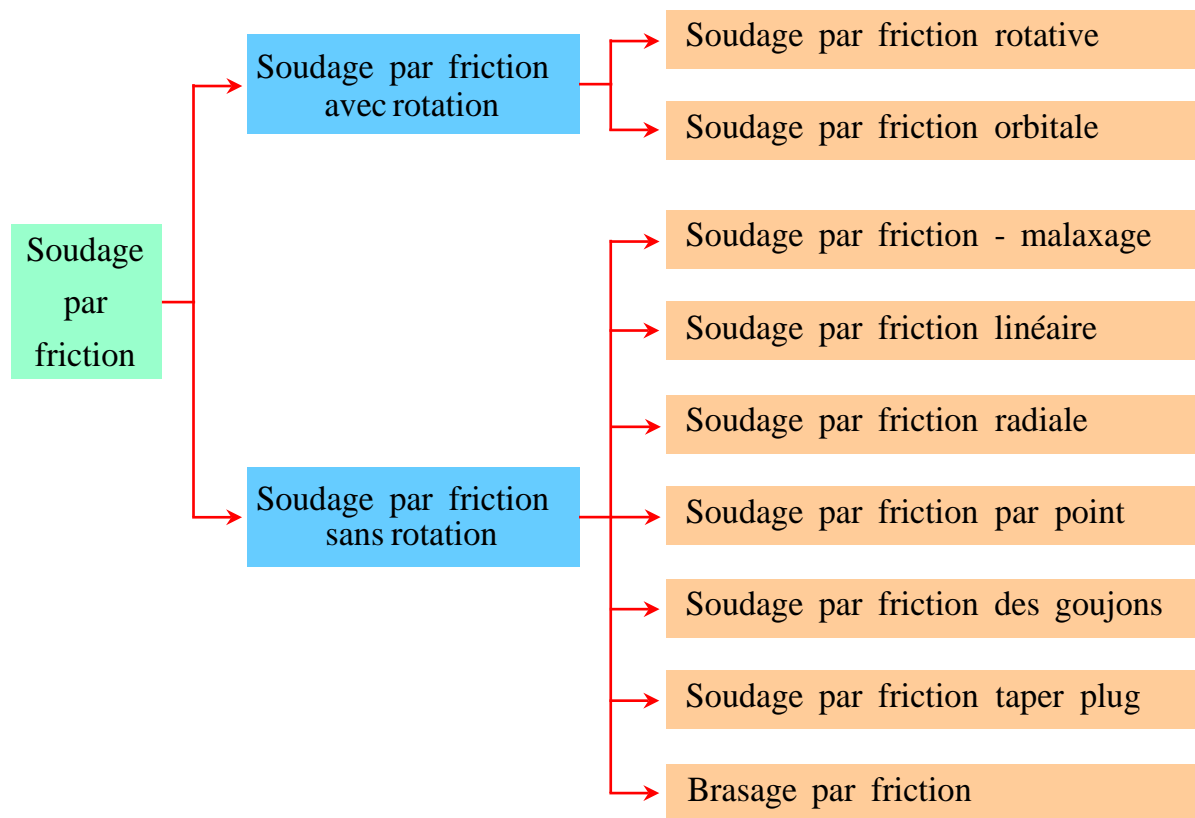


Figure I.5 Classification des procédés de soudage par friction [12]

plastiques et un fluage se produit vers la périphérie en formant un bourrelet caractéristique, tandis que la chaleur continue de se diffuser. Lorsque la température de soudage est atteinte, la rotation est arrêtée et un effort de forgeage est appliqué pour former la soudure [14].

En générale, lors du processus de soudage par friction rotative, les trois phénomènes suivants sont impliqués :

- La génération de chaleur par friction,
- La dissipation de chaleur
- La déformation plastique du matériau de base.

La figure I.7 montre une vue globale et en coupe d'un joint soudé par friction rotative.

I.4-2 Paramètres de soudage par friction rotative

Les paramètres qui affectent la qualité des soudures obtenues par friction rotative sont :

1- Vitesse de rotation

La vitesse de rotation est liée à la nature du matériau à souder et au diamètre de la surface à souder à l'interface. Ce paramètre a des effets différents sur les propriétés mécaniques des

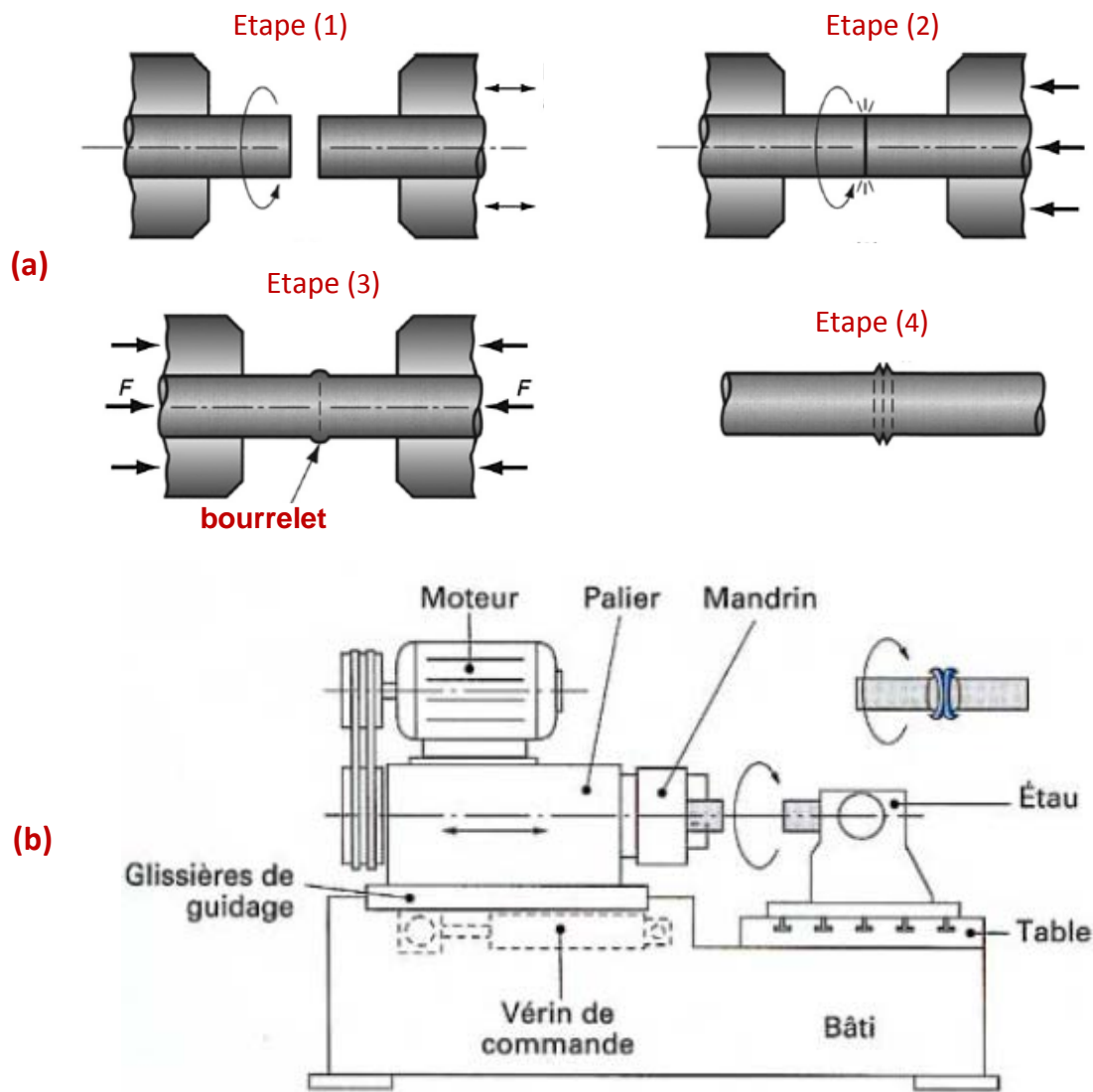


Figure I.6 a) Principe du soudage par friction rotative [10], b) Schéma d'une machine de soudage par friction rotative [14]

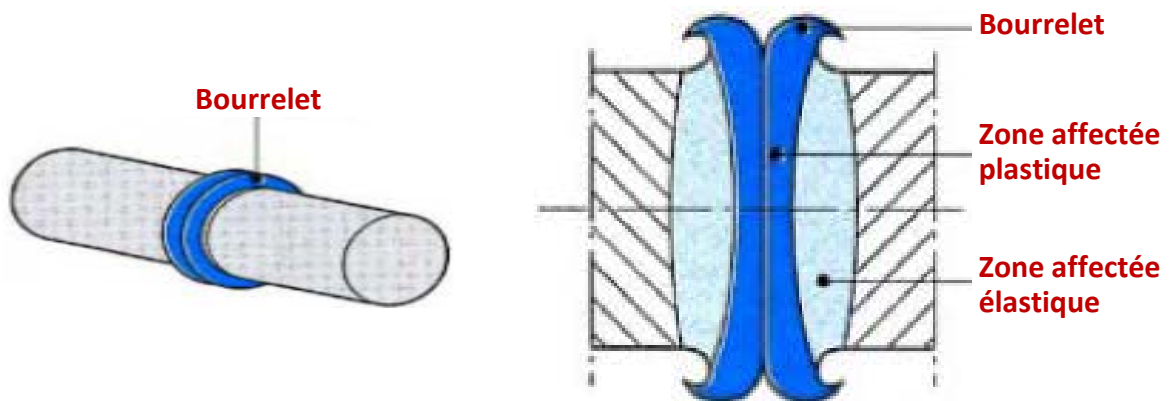


Figure I.7 Vue globale et en coupe d'un joint soudé par friction [14]

joints soudés par friction.

Une grande vitesse de rotation entraîne la génération d'une quantité importante de chaleur à l'interface, ce qui entraîne par conséquence, un ramollissement du matériau et une augmentation de la formation intermétallique [15].

2- Pression axiale

La pression axiale choisie dépend des métaux assemblés et de la géométrie du joint. Cette pression a un effet sur la température dans la zone de soudure, la puissance d'entraînement requise et le taux de raccourcissement axial (volume du bourrelet écoulé) [15].

3- Temps

Le temps caractérise la rapidité et la productivité du processus de soudage. Un temps d'échauffement très court peut entraîner un chauffage inadéquat et peut créer des zones non soudées à l'interface, ce qui produit des soudures faibles. Par contre, un temps de chauffage très long entraîne un gaspillage de la matière (taux de raccourcissement important) [15].

L'effet combiné des paramètres de soudage sur la forme de la soudure est montré sur la figure I.8.

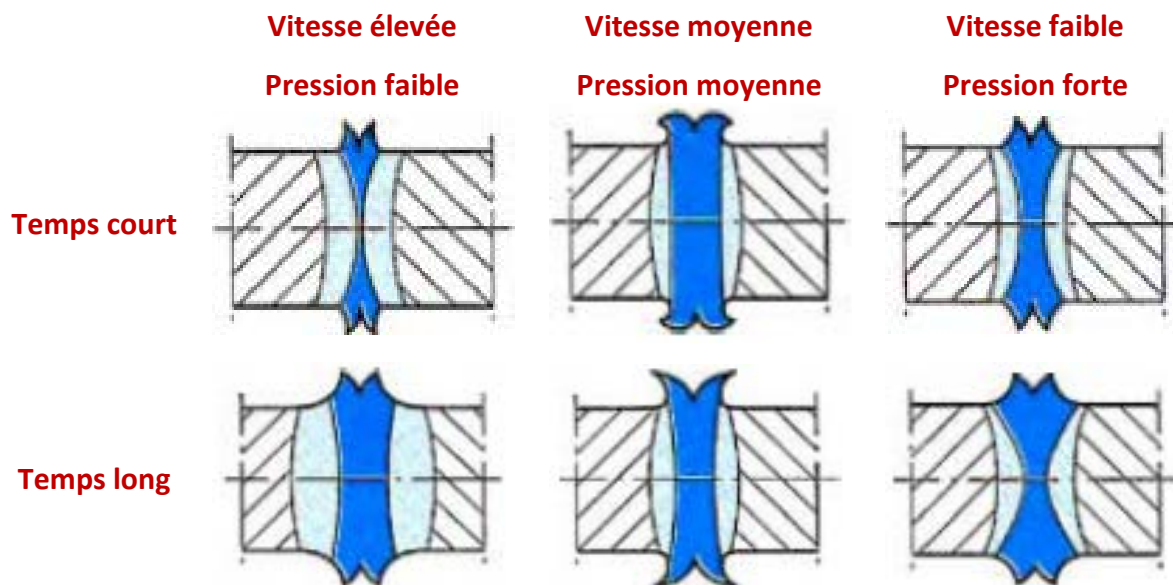


Figure I.8 Effet des paramètres de soudage sur la forme des joints soudés par RFW [14]

I.4-3 Processus de soudage par friction rotative

La figure I.9 représente les variations dans le temps du couple de frottement avec des illustrations montrant le développement de la soudure pendant l'opération du soudage par RFW.

Le processus se compose principalement de deux étapes principales, selon les détails indiqués dans le tableau suivant :

Tableau I.1 Phases du processus de soudage par friction rotative [16]

Cycle du soudage RFW		Détails	
Phase de friction	<u>Paramètres :</u> <ul style="list-style-type: none"> • Vitesse de rotation • Temps de friction • Pression de friction 	<u>Phase 1 :</u> <i>Accostage</i>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Conditionnement des faces de la soudure afin de produire un certain prétraitement. ➤ Chauffer et réduire le coefficient de friction avant de commencer la phase 2
		<u>Phase 2 :</u> <i>Chauffe</i>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Libérer de la chaleur par des processus de friction afin de plastifier les matériaux à assembler. <p><i>Cette phase s'accompagne de l'expulsion de la matière chauffée pour former un " flash " (ou " bourrelet ") caractéristique. Ce déplacement de matière assure la purge des contaminants de l'interface de la soudure.</i></p>
		<u>Phase 3 :</u> <i>Freinage</i>	<p><i>Cette phase garantit que le mouvement relatif entre les pièces a cessé avant l'application complète de la phase de forgeage.</i></p>
Phase de forgeage	<u>Paramètres :</u> <ul style="list-style-type: none"> • Temps de forgeage • Pression de forgeage 	<u>Phase 4</u>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Application complète de la pression de forgeage est réalisée après l'arrêt du mouvement relatif. <p><i>Cette phase permet un travail mécanique supplémentaire du joint sans apport de chaleur, ce qui favorise l'affinement de la microstructure.</i></p>

I.4-4 Modes de soudage par friction rotative

Sur la base des sources de rotation, on peut distinguer deux modes de RFW :

- Soudage par friction pilotée ou par entraînement direct ou conventionnel
- Soudage par friction inertielle ou par accumulation d'énergie

1- Soudage par friction à entraînement direct (en anglais, Continuous Drive Friction Welding CDFW)

La réalisation de la soudure dans ce procédé se fait sur une machine à entraînement

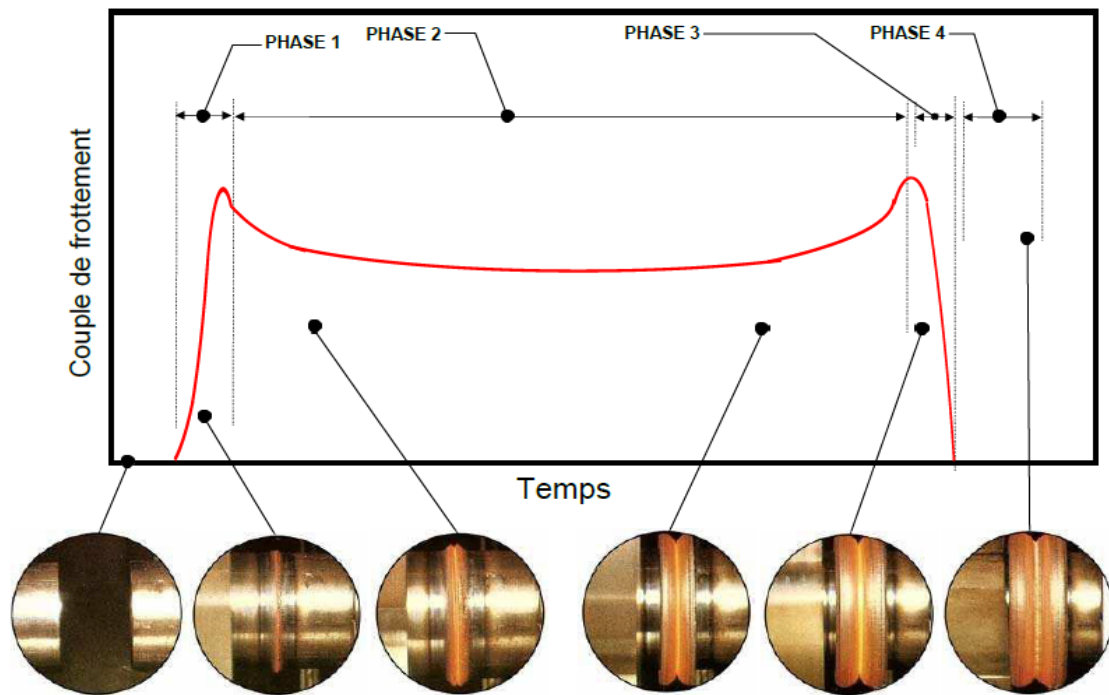


Figure I.9 Variations du couple de frottement pendant le processus du RFW [12 , 16].

direct, c'est-à-dire que le moteur fournit directement le couple de frottement pendant la phase d'échauffement [12].

Les différentes phases d'une opération de soudage à entraînement direct sont illustrées sur la figure I.10-a.

2- Soudage par friction inertielle (en anglais, Inertia Friction Welding IFW).

Dans ce procédé, la pièce rotative est reliée à un volant d'inertie entraîné par un moteur. Le volant d'inertie est accéléré jusqu'à une vitesse donnée pour stocker l'énergie requise, puis le moteur d'entraînement est désengagé et les deux pièces sont assemblées par friction sous une pression axiale [12].

Le processus de soudage par friction inertielle se déroule suivant les phases illustrées sur la figure I.10-b.

Les relations entre les paramètres du procédé sont illustrées à la figure I.11 qui représente la vitesse de rotation, la pression axiale et le raccourcissement en fonction du temps.

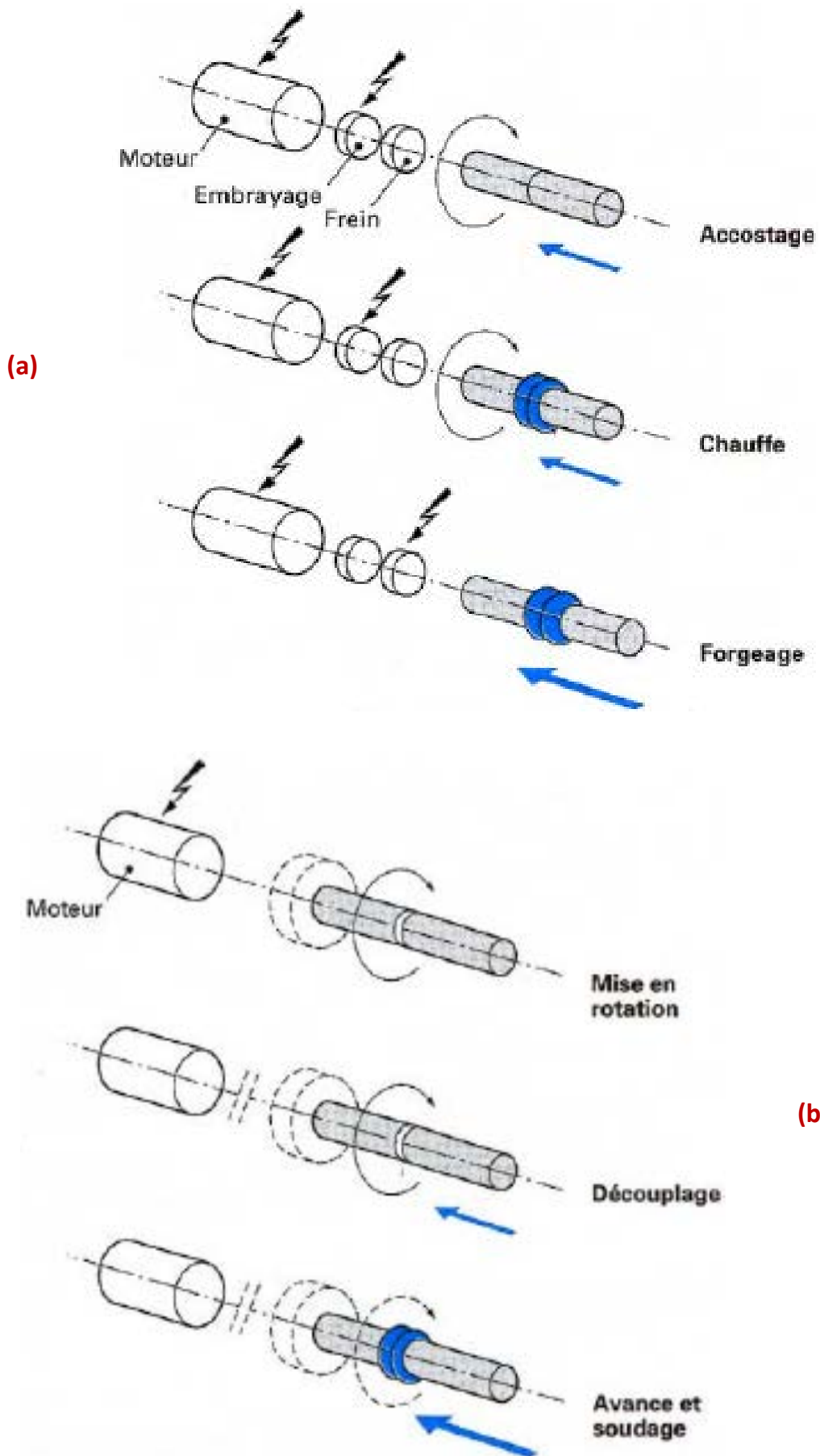


Figure I.10 Séquences de soudage par friction : a) à entraînement direct, b) inertielle [14]

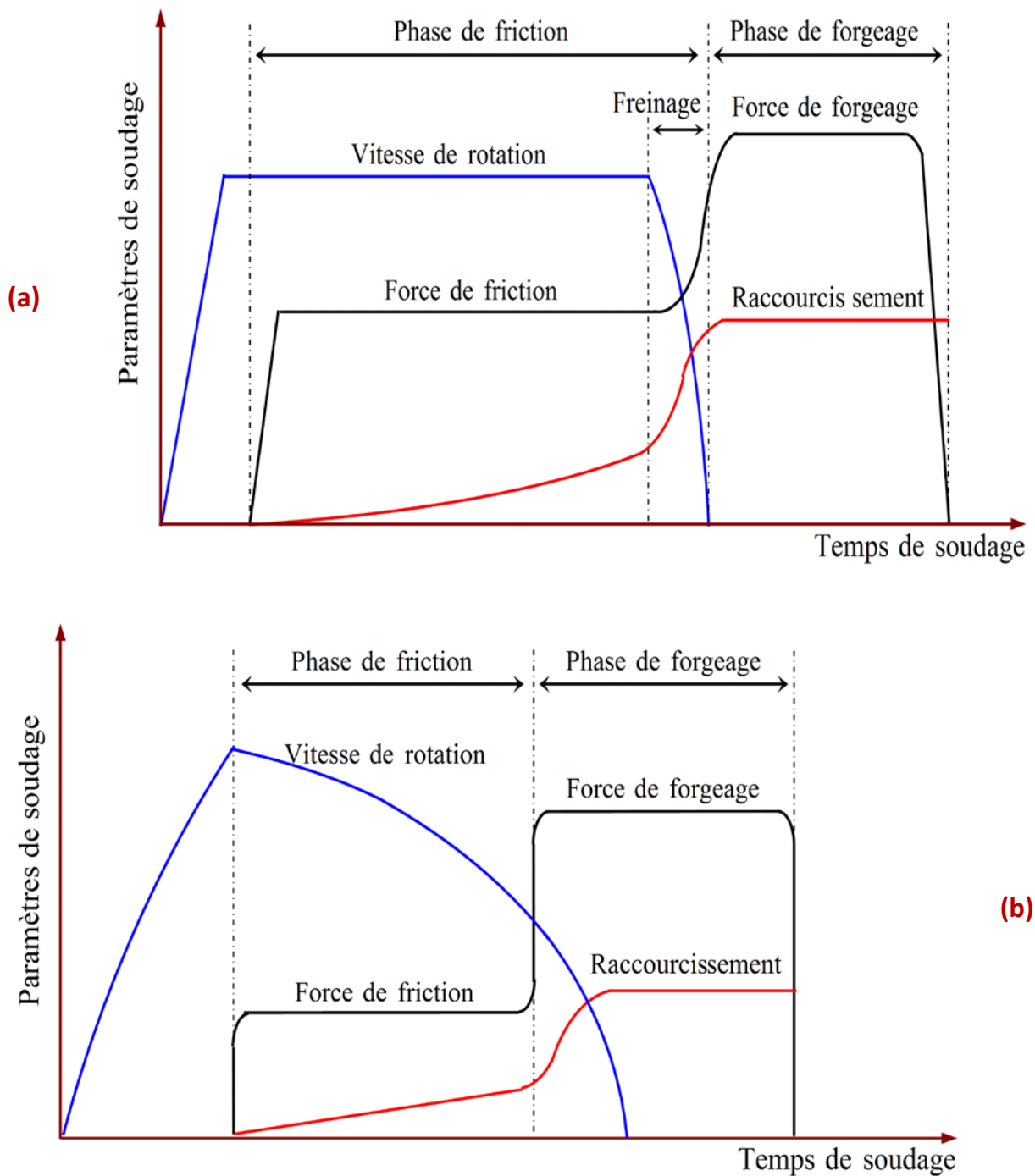


Figure I.11 Variation des paramètres de soudage par friction a) à entraînement direct, b) inertielle [14]

I.4-5 Avantages et inconvénients de soudage par friction rotative

Le soudage par friction rotative est un soudage à l'état solide qui chauffe en dessous du point de fusion, il est donc possible d'assembler différents matériaux avec de grandes différences de points de fusion entre les matériaux de base.

De plus, il s'agit d'un soudage par chaleur de friction (énergie interne) due à la rotation, et non par apport d'énergie thermique de l'extérieur.

Par conséquent, il présente les avantages et les inconvénients suivants :

<p>Avantages</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Étant donné que divers matériaux dissemblables (acier inoxydable et acier doux, acier inoxydable et cuivre, etc.) peuvent être combinés et assemblés en fonction de l'application, des produits aux performances excellentes peuvent être obtenus. ➤ Les résultats de soudage sont hautement reproductibles de Bonne qualité et structure métallurgique. ➤ En raison de la chaleur de friction, la chaleur est générée uniformément sur une plage étroite et la déformation de soudage est faible. ➤ Economique, moins couteux et rapide ➤ Ecologique et respectueux à l'environnement, puisqu'aucune énergie thermique n'est ajoutée de l'extérieur, aucun consommable tel que le flux et le gaz de protection n'est nécessaire.
<p>Inconvénients et limites</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Étant donné que le matériau de base est tourné, la forme du matériau de base est limitée. Il doit avoir une section circulaire tubulaire ou en forme de tige et résister à une rotation à grande vitesse. ➤ Les éléments à assembler doivent pouvoir supporter une rotation à grande vitesse. ➤ Il est difficile d'assembler des tuyaux ultra-minces, des matériaux de base de petit diamètre ou des matériaux de base de très grand diamètre. ➤ La résistance aux chocs peut être inférieure. ➤ L'alignement des pièces à souder est critique pour la réalisation d'une friction et d'un chauffage uniformes. ➤ Les ébarbures (bourelets) doivent être éliminées mécaniquement.

I.5 Références

1. Merry, G. *Soudage et soudabilité métallurgique des métaux*. Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique, 1994. (M715).
2. Djaidja, L., *Caractérisation des joints Acier inoxydable/Cuivre soudés par friction*, 2020. Mémoire de Master – Physique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila - Algérie
3. Amouche, S., *Caractérisation d'une soudure hétérogène réalisée par le procédé MAG*, 2012. Mémoire de Master – Génie mécanique, Université Mouloud Mammeri - Tizi Ouzou - Algérie.
4. Silem, M. et Saidani, H., *Etude de soudage par friction*, 2016. Mémoire de Master – Génie mécanique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila - Algérie.
5. Mezrag, B., *Etude de l'influence des paramètres de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique des assemblages acier-aluminium obtenus par soudage à l'arc MIG-CMT*, 2015. Thèse de Doctorat – Génie mécanique [Physics.class-ph], Université Montpellier - France; Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen – Algérie.
6. Baari, A., *Etude de soudage à l'état solide « soudage par friction », étude de cas : Soudage d'une tige de forage*, 2018. Mémoire de Master – Forage et Mécanique des chantiers pétroliers, Université Kasdi Merbah – Ouargla - Algérie.
7. Site internet : <https://weldx.com/procedes-metiaux-apport-soudage-produit-de-soudure.html>, consulté le : 29/09/2022.
8. Dixit, U. S., Yadav, V., Pandey, P. M., Roy, A., et Silberschmidt, V. V., *Modeling of friction in manufacturing processes*, Mechanics of Materials in Modern Manufacturing Methods and Processing Techniques, 2020 : p. 415–444.
9. Site internet : <https://thomas-racing.blog4ever.com/blog/les-procedes-de-soudage-premiere-partie-presentation-des-procedes-1>, consulté le : 01/10/2022.
10. Vural, M., *Welding Processes and Technologies*, Comprehensive Materials Processing, 2014. 6 : p. 3–48.
11. Faes, K., Vermeersch, W., De Baets, P., Denys, R., & Van Der Donckt, E., *Influence of forge pressure on properties of friction welded pipelines using intermediate ring*, Science and Technology of Welding and Joining, 2008. 13(5) : p. 445–451.
12. Khalfallah, F., *Soudage par friction de l'acier avec du céramique*, 2020. Thèse de Doctorat en Sciences – Métallurgie, Université Mohamed Khider - Biskra - Algérie.

13. Li, W., Vairis, A., Preuss, M., et Ma, T., *Linear and rotary friction welding review*, International Materials Reviews, 2016. 61(2) : p. 71–100.
14. Cazes, R., *Soudage par friction*. Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique, 1996. (B7745) : p. 1– 8.
15. Demouche, M., *Etude de l'influence des paramètres de soudage par friction sur la qualité des joints soudés*, 2020. Thèse de doctorat – Optique et Mécanique de Précision, Université Farhat Abbas - Sétif - Algérie.
16. Humphreys, B.A., *A practical guide to friction welding*, 2004. Thompson Friction Welding, West Midlands – England – U.K.. p. 21.

CHAPITRE II

SOUUDAGE PAR FRICTION ROTATIVE

ACIER INOXYDABLE

-

ALUMINIUM

II.1 Introduction

Les assemblages dissimilaires aluminium (Al)/acier ont reçu une attention croissante ces dernières années en raison de l'avantage de réduire le poids tout en maintenant les propriétés mécaniques de la structure résultante.

Les joints en alliage d'aluminium/acier inoxydable peuvent bénéficier des deux métaux car ils peuvent combiner les excellentes propriétés mécaniques de l'acier avec la légèreté des alliages d'aluminium en même temps.

II.2 Les aciers

Un acier est un alliage métallique dont le constituant principal est le fer (Fe) et le carbone (C). La composition massique d'un acier est dans les proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone.

II.2-1 Classification des aciers

La normalisation (NF EN 10020) retient trois familles principales d'aciers [1]:

- Aciers non alliés (aucun élément d'alliage ne dépasse 0,6% ; sauf 1,65% pour le manganèse (Mn)),
- Aciers faiblement alliés
- Aciers fortement alliés

1- Aciers non alliés (Acier au carbone)

Ils sont caractérisés par un ajustement précis de leur composition, une plus grande pureté et des éléments d'addition en très faible quantité ($Mn < 1\%$; $Cr + Ni + Mo < 0,63\%$) [2].

Désignation normalisée (en fonction de la composition chimique)

Lettre C suivie du pourcentage de carbone multiplié par 100 plus au besoin des indications complémentaires :

E et R = teneur en soufre, G=moulé, C = formage à froid, S = ressort, D = Tréfilage.....

Exemple : GC35E : Acier au carbone, moulé, de 0.35% en carbone, de teneur maximale en soufre

2- Aciers faiblement alliés

Pour cette famille des aciers, aucun élément d'addition ne dépasse 5% en masse (Mn \geq 1%).

Désignation normalisée (en fonction de la composition chimique)

Le pourcentage de carbone multiplié par 100, suivi des symboles chimiques des principaux éléments d'addition classés en ordre décroissant. Puis, dans le même ordre, les pourcentages de ces mêmes éléments multipliés par 4, 10, 100 ou 1000.

Exemple : *G35NiCrMo16 : Acier faiblement allié, moulé contenant 0,35% de carbone, 4% de nickel et des traces (< 1%) de chrome et de molybdène*

3- Aciers fortement alliés

Pour cette famille la teneur moyenne d'au moins un élément d'alliage est >5 % (en masse) [1].

Désignation normalisée

Lettre X, symbolisant la famille, suivie des mêmes indications que pour les aciers faiblement alliés, sauf que pas de coefficient multiplicateur pour le pourcentage des éléments d'addition (ni 10, ni 4...)

Exemples: *GX6CrNiTi18-11 : Acier fortement allié, moulé, contenant 0,06 % de carbone, 18% de chrome, 11% de Nickel et des traces de titane (< 1%)*

II.2.2- Aciers inoxydables

Ils sont des aciers fortement alliés, contenant au moins 10,5 % de chrome (Cr) et 1,2 % maximum de carbone.

1- Classification des aciers inoxydables

Les fortes additions d'éléments d'alliage comme le Cr, Mo, Ni, Mn,..., modifient profondément l'état structural d'emploi de aciers inoxydables, et on distingue cinq catégories [3] :

a. Aciers inoxydables ferritiques (au Cr) (C < 0,08%) (Ni < 1%) : Ils sont peu

résilients et ont une faible résistance à la traction (R_m) sous températures élevées.

- b. Aciers inoxydables austénitiques (Cr+Ni) :** Leurs teneur en nickel est $> 7\%$.
- c. Aciers inoxydables martensitiques (C : 0,08 – 1%) (Ni : 7%),**
- d. Aciers inoxydables à durcissement par précipitation**
- e. Aciers inoxydables austéno-ferritique**

Le tableau II.1 donne quelques nuances des cinq catégories des aciers inoxydables.

Tableau II.1 Classification des aciers inoxydables [1].

Aciers inoxydables	Désignation symbolique	Désignation numérique	Ancienne norme NF	Nuance USA approachante
ferritiques	X2CrMoTi 29-4	1.4592	Z2CDT29-04	S44735
	X3CrTi17	1.4510	Z4CT17	430 Ti
	X6Cr13	1.4000	Z6C13	403
	X6Cr17	1.4016	Z8C17	430
	X6CrMo17-1	1.4113	Z8CD17-1	430F
martensitiques	X12Cr13	1.4006	Z12C13	410
	X17CrNi16-2	1.4057	Z15CND16-2	431
	X105CrMo17	1.4125	Z100CD17	440C
austénitiques	X2CrNi18-09	1.4307	Z2CN18-10	304L
	X5CrNi18-10	1.4301	Z6CN18-09	304
	X2CrNiMo17-12-2	1.4404	Z2CND17-12	316L
	X5CrNiMo17-12-2	1.4401	Z6CND17-11	316
	X6CrNiTi18-10	1.4541	Z6CNT18-10	321
	X6CrNiNb18-10	1.4550	Z6CNNb18-10	347
à durcissement par précipitation	X7CrNiAl17-7	1.4568	Z8CNA17-7	631 (17-7PH)
	X8CrNiMoAl15-7-2	1.4532	Z8CNDA15-7	632 (15-7PH)
	X5CrNiCuNb16-4	1.4542	Z6CNU17-4	630 (17-4PH)
austéno-ferritiques	X2CrNiN23-4	1.4362	Z2CN23-4	—
	X3CrNiMoN22-5-3	1.4462	Z3CND27-5-3	S 31803
	X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	Z2CNDUW25-7-4	—
	X3CrNiMoN27-5-2	1.4460	Z5CND 27-05	—

2- Acier Inoxydable 316L (AISI 316L ou acier inoxydable 1.4403)

L'acier inoxydable austénitique 316L à teneur faible en carbone qui ne dépasse pas 0,03% (lettre 'L' est l'abréviation de 'Low carbon').

Les caractéristiques de soudage sont meilleures que celles des autres aciers inoxydables [4].

a- Composition chimique de AISI 316L

Le tableau II.2 donne la composition chimique de l'acier inoxydable 316L selon deux désignations:

Tableau II.2. Composition chimique de l'acier inoxydable 316L [1].

Nuance d'acier		Composition chimique (% mass)								
ASTM	UNS	C ≤	Si ≤	Mn ≤	P ≤	S ≤	Cr	Ni	Mo	N ≤
A240/A240M	AISI 316L	0.03	0.75	2.0	0.045	0.03	16 – 18	10 – 14	2 – 3	0.10
A276/A276M	(UNS S31603)	0.03	1.00	2.0	0.045	0.03	16 – 18	10 – 14	2 – 3	–

b- Caractéristiques mécaniques de AISI 316L

Les caractéristiques mécaniques de l'AISI 316L sont données dans le tableau II.3, y compris la résistance à la traction, la limite d'élasticité, l'allongement, la réduction de surface, la dureté Brinell et Rockwell [4].

Tableau II.3. Caractéristiques mécaniques de l'acier inoxydable 316L [4].

Nuance d'acier		Caractéristiques mécaniques					
ASTM	AISI	Résistance à la traction (MPa)	Limite d'élasticité (MPa)	Allongement à la rupture en 50 mm (%)	Réduction de la surface (%)	Dureté Brinell (HB)	Dureté Rockwell (HRW)
A276/A276M A240/A240M A580/A580M A473/A473M	316L (UNS S31603)	620	310	30	40	–	–
		485	170	30	40	–	–
		485	170	40	–	217	95
		485	170	35	50	–	–
		620	310	30	40	–	–
		450	170	40	50	–	–

II.3. Aluminium et ses alliages

L'aluminium (Al) est un métal non-ferreux. Il est souvent utilisé sous forme d'alliages, ce qui augmente sa résistance mécanique, mais souvent au détriment d'autres propriétés telle que la ductilité [5].

II.3.1- Classification des alliages d'aluminium

Pour le meilleur compromis entre les propriétés pour un usage donné, les métallurgistes agissent sur la composition de l'alliage, mais aussi sur les traitements thermiques ou thermomécaniques. On peut distinguer deux grandes classes des alliages d'aluminium [5] :

1- Alliages d'aluminium de déformation (corroyés)

Ces alliages sont obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou à froid tels que le filage, le laminage, ...[5].

Désignation numérique

Un nombre à quatre chiffres, avec EN AW- comme préfixe (A pour l'aluminium, W pour corroyé), éventuellement suivi par le symbole chimique de l'alliage.

Désignation symbolique

Le symbole chimique du métal (Al) suivi d'un espace et du pourcentage de pureté exprimé avec une ou deux décimales.

Exemples : EN AW-2017A [AlCu4MgSi] : de cuivre (4 %), silicium et magnésium (% Mg > % Si).

2- Alliages de fonderie (moulage)

Ils sont obtenus par fonderie seulement sans écrous [6].

Désignation numérique

Un nombre à quatre chiffres, avec EN A(B, C ou M) comme préfixe, éventuellement suivi par le symbole chimique de l'alliage placé entre crochets

Exemple : EN AC-45400 [AlSi5Cu3] : Alliage d'aluminium moulé avec 5% de silicium et 3% de cuivre.

La figure II.1 montre la désignation des alliages d'aluminium produit corroyés (un exemple l'alliage EN AB-45400 [AlSi5Cu3]) [6].

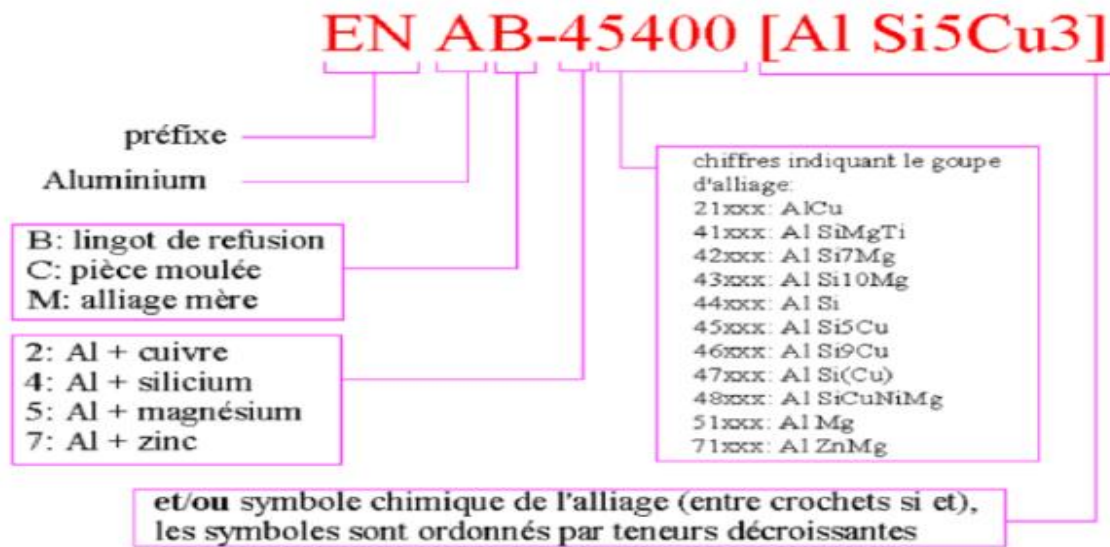


Figure II.1 Désignations des alliages d'aluminium de fonderie [5]

II.3.2- Alliage d'aluminium 2017A

Le 2017A est un alliage d'aluminium non alimentaire de symbole chimique AlCuMgSi. Il présente une bonne caractéristique mécanique, et c'est le plus utilisé en mécanique générale [7].

1- Composition chimique de 2017A

La composition chimique de l'alliage aluminium 2017A est donnée par le tableau II.4.

Tableau II.4 Composition chimique de 2017A [7].

Alliage	Composition chimique (% mass)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
2017 A	0.2 – 0.8	Max 0.7	3.5 – 4.5	0.4 – 1	0.4 – 1	0.1	0.25	–	solde

2- Caractéristiques mécaniques de 2017A

Le tableau II.5 représente les caractéristiques mécaniques de l'alliage d'aluminium 2017A, selon ses trois états [8]:

- Normale (lettre O)
- Recuit T 4 (trempe + maturation au four)
- Recuit T 6 (trempe + revenu traitement au four)

Tableau II.5 Caractéristiques mécaniques de 2017 A [9]

Alliage	Etat	Caractéristiques mécaniques			
		Résistance à la traction (MPa)	Limite d'élasticité (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Dureté Vickers (HV)
2017 A	T4	380 – 425	230 – 275	10 – 21	115
	T6	400	250	–	130
	0	180	70	13 – 20	50

II.4 Soudage des alliages d'aluminium et des aciers

Sur la base des excellentes propriétés mécaniques de l'acier et des alliages d'aluminium, les joints soudés en alliage d'aluminium et acier inoxydable présentent un grand potentiel en tant que composant structurel dans les industries aérospatiale, pétrochimique et automobile [10].

Cependant, les alliages d'aluminium et les aciers présentent une grande différence de coefficients de dilatation thermique et de conductivité thermique, ce qui provoque des contraintes résiduelles pendant le processus de soudage, en particulier lorsque un soudage par fusion est utilisée. Plus important encore, les composites intermétalliques fragiles (IMC à base Fe-Al) peuvent être facilement formés à l'interface en raison de la très faible solubilité entre l'aluminium et l'acier à température ambiante (figure II.2) [11]. La formation des IMC massif détériorerait sérieusement les propriétés mécaniques du joint [12].

En effet, le soudage à l'état solide (comme le soudage par friction rotative RFW) des alliages d'Al et d'acier a un grand potentiel pour éliminer (ou réduire) la formation d'IMC en raison de son faible apport de chaleur [12].

II.5 Analyse de la littérature

À l'heure actuelle, la soudabilité d'un alliage d'aluminium avec un acier inoxydable par friction rotative (RFW) a été étudiée en utilisant différentes séries d'alliages Al telles que les séries 1xxx, 2xxx, 5xxx et 6xxx avec de des aciers inoxydables comme le AISI 304, AISI 316L et AISI 1045.

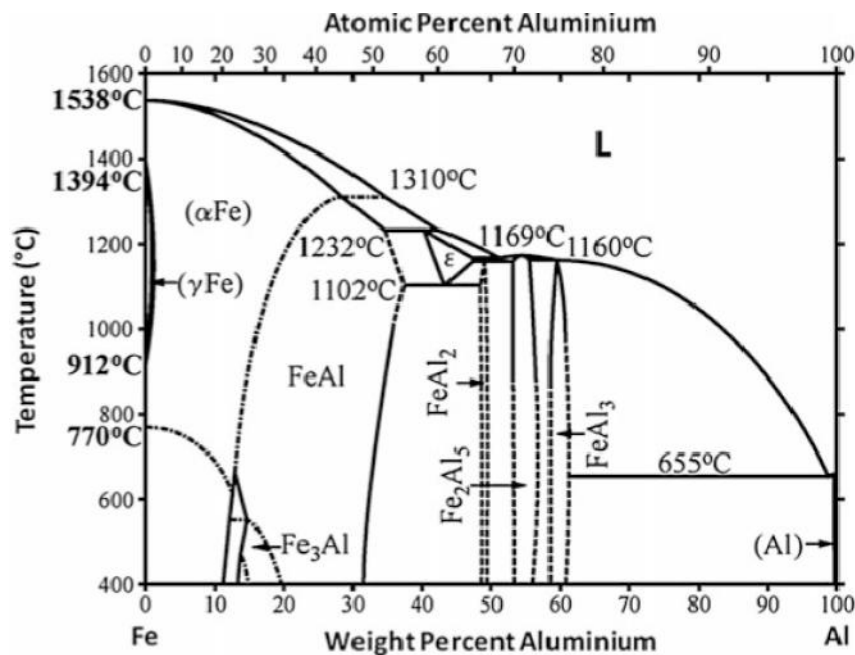


Figure II.2 Diagramme de phase binaire Fe-Al [13].

Dans le but d'évaluer l'effet de la pression et de temps de friction, Sahin [14] a étudié les propriétés mécaniques et métallurgiques des joints en acier inoxydable austénitique 304 – alliage d'aluminium soudés par friction rotative (figure II.3-a). Il a rapporté que les différences en propriétés thermiques et physiques des matériaux de base entraînent une forme asymétrique du joint (figure II.3-b). Ainsi, il a noté que le raccourcissement axial du côté aluminium des joints est supérieur au raccourcissement axial du côté acier inoxydable.

Les résultats des tests microdureté effectués par Sahin dans le sens vertical à l'interface du joint (figure II.4) ont également montré que la dureté des deux matériaux au voisinage de l'interface était supérieure à celle des métaux de base [14]. Sahin a également constaté que la résistance à la traction des joints augmente avec le temps de friction et la pression de friction jusqu'à un certain point, puis diminue (figure II.5.), et a noté qu'une chaleur suffisante pour obtenir un joint solide ne peut pas être générée avec un temps de friction court. D'autre part, un long temps de friction provoque une formation excessive de couche des composés intermétallique (IMC), telle que FeAl₃, à l'interface [14].

Dans un autre travail, Wan et al. [15] ont étudié le soudage RFW de l'acier inoxydable AISI 316L et l'alliage d'aluminium AA6061, avec l'utilisation d'un collier en acier spécifique fixé sur le côté aluminium pour contrôler son la morphologie du bourrelet et la formation de la couche IMC. Ils ont évalué les effets du temps de friction et de la rainure de soudage (en anglais, welding groove) sur les la microstructure et les propriétés mécaniques des joints AISI 316L/AA6061.

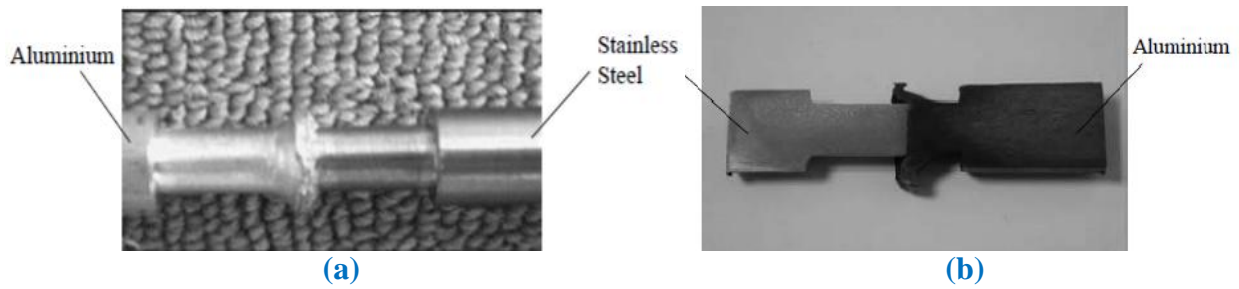


Figure II.3 Joint AISI 304/Aluminium soudé par friction rotative : a) Photo du joint, b) Photo de l'interface du joint [14].

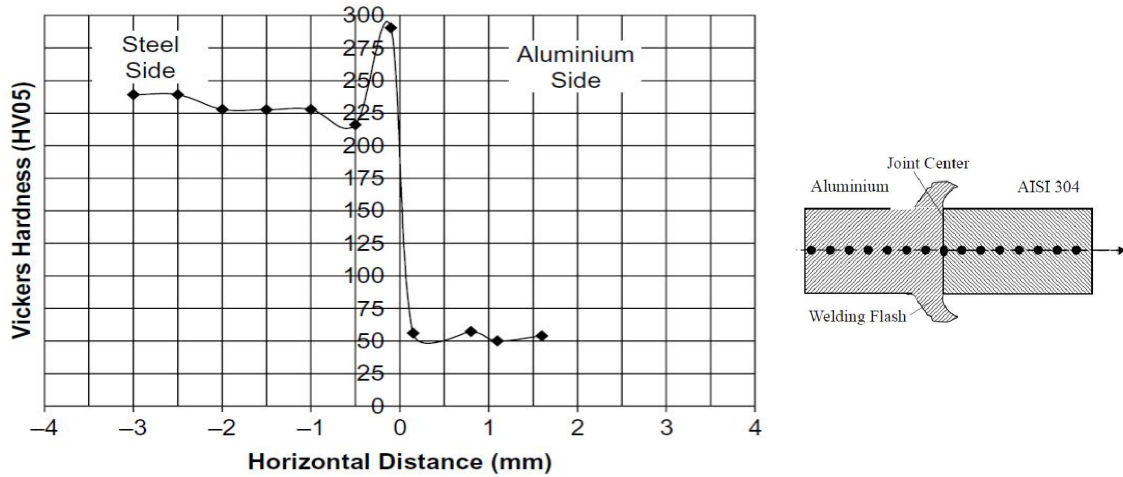


Figure II.4 Répartition de la dureté sur la distance horizontale des joints AISI 304/Aluminium [14].

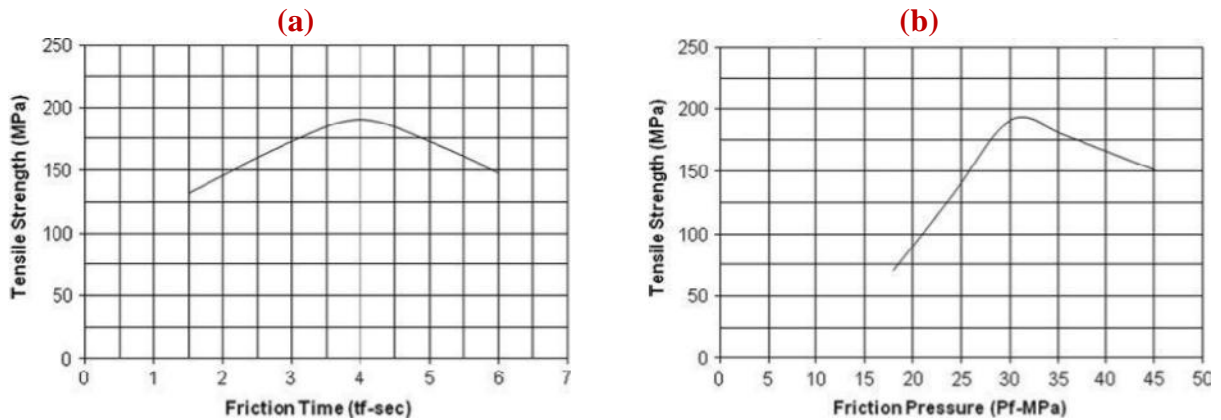


Figure II.5 Relation entre la résistance à la traction horizontale des joints AISI 304/Aluminium et le temps de friction (a), la pression de friction (b) [14]

Les résultats de Wan et al. ont montré que l'épaisseur des couches IMC a augmenté avec l'augmentation du temps de friction, mais la rainure de soudage de 15° usinée sur le côté acier a contribué à l'amincissement de la couche IMC (figure II.6). Ils ont également constaté que le temps de friction et la rainure de soudage ont un effet important sur les propriétés mécaniques des joints, comme le montre la figure II.7 [15]. La résistance à la traction des joints diminue à mesure que le temps de friction augmente, en raison de l'augmentation d'apport de chaleur et

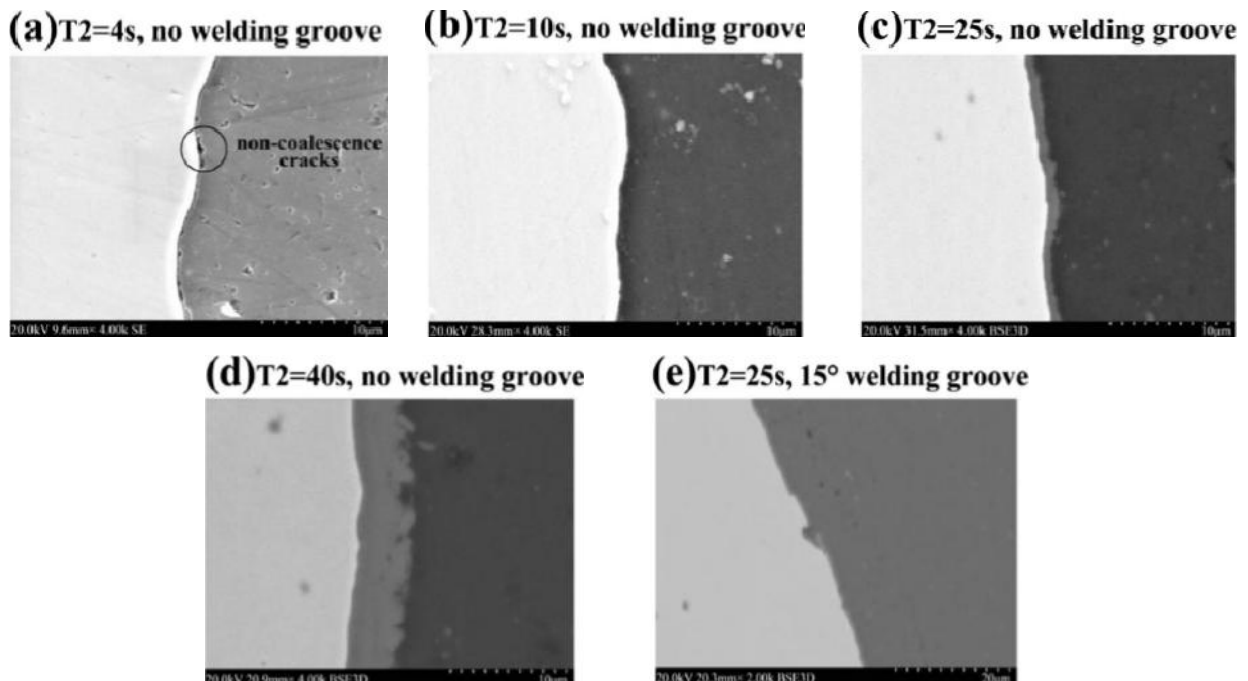


Figure II.6 Images MEB de l'interface des joints AISI 316L/AA6061 soudé par friction rotative [15]

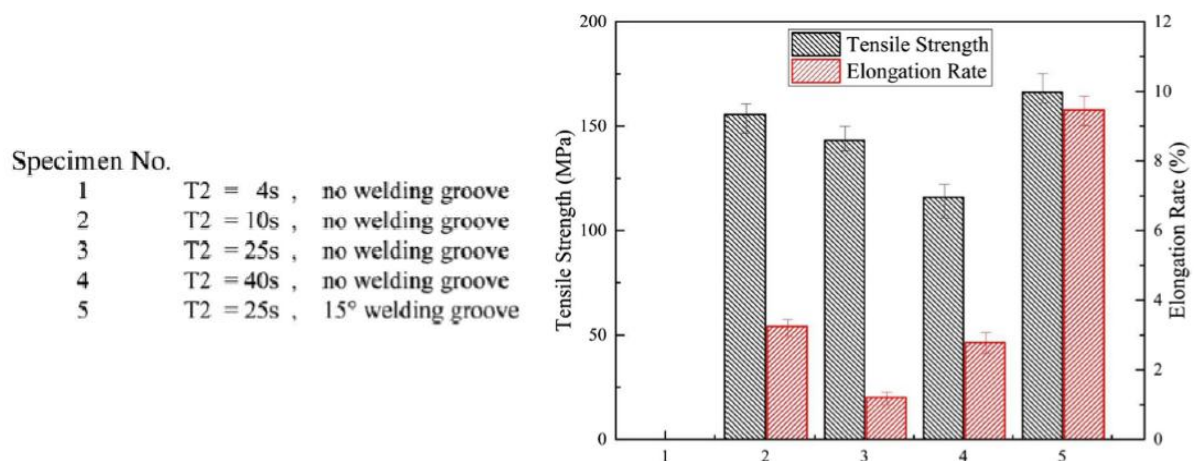


Figure II.7 Résistance à la traction et allongement des joints AISI 316L/AA6061 soudés par friction rotative [15]

l'élargissement de la couche IMC. Cependant, la résistance du joint développé avec une rainure de soudage est supérieure à celui des joints sans rainure de soudage.

Liu et al. [16,17] ont étudié la soudabilité de l'acier inoxydable SS 304 et l'alliage d'aluminium AA6061 par friction à entraînement direct (CDFW), et ils évaluent l'effet des paramètres du soudage sur le raccourcissement axial et la résistance des joints soudés (figures II.8 et II.9). Les résultats ont montré que le raccourcissement axial des joints augmentait avec la

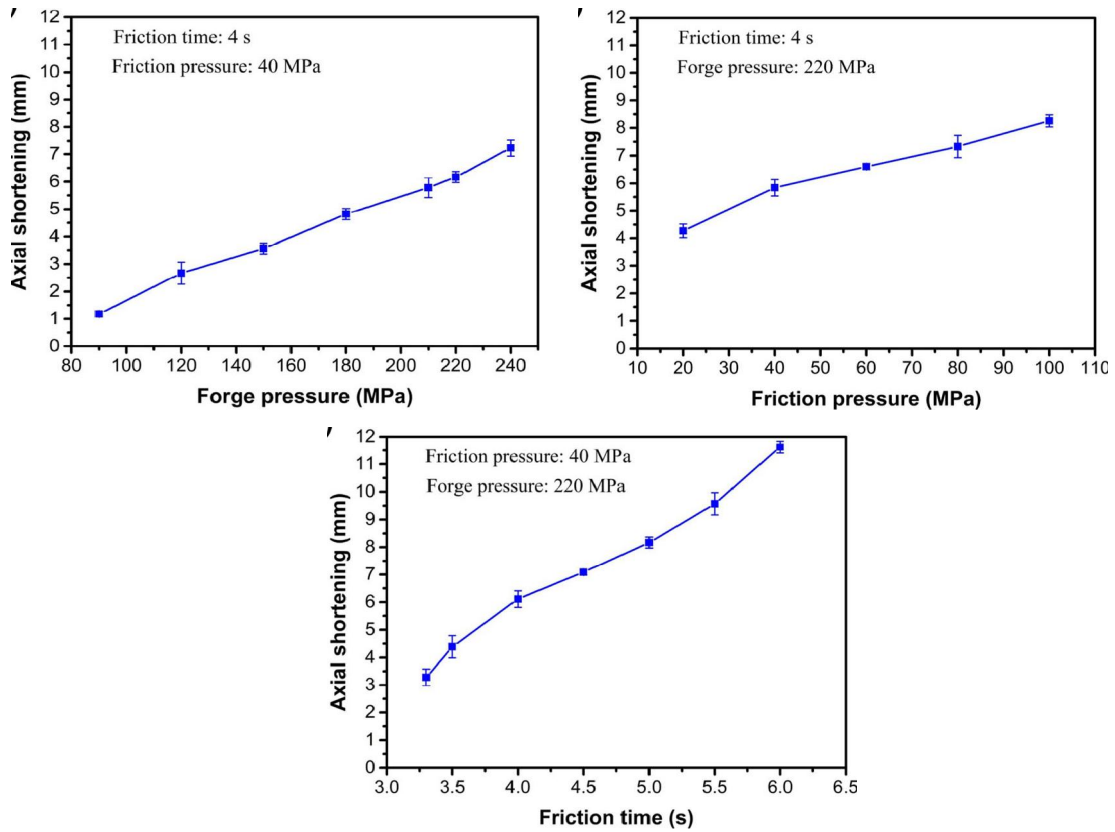


Figure II.8 Influence des paramètres de procédé CDFW sur le raccourcissement axial des joints AA6061/ SS 304 [16]

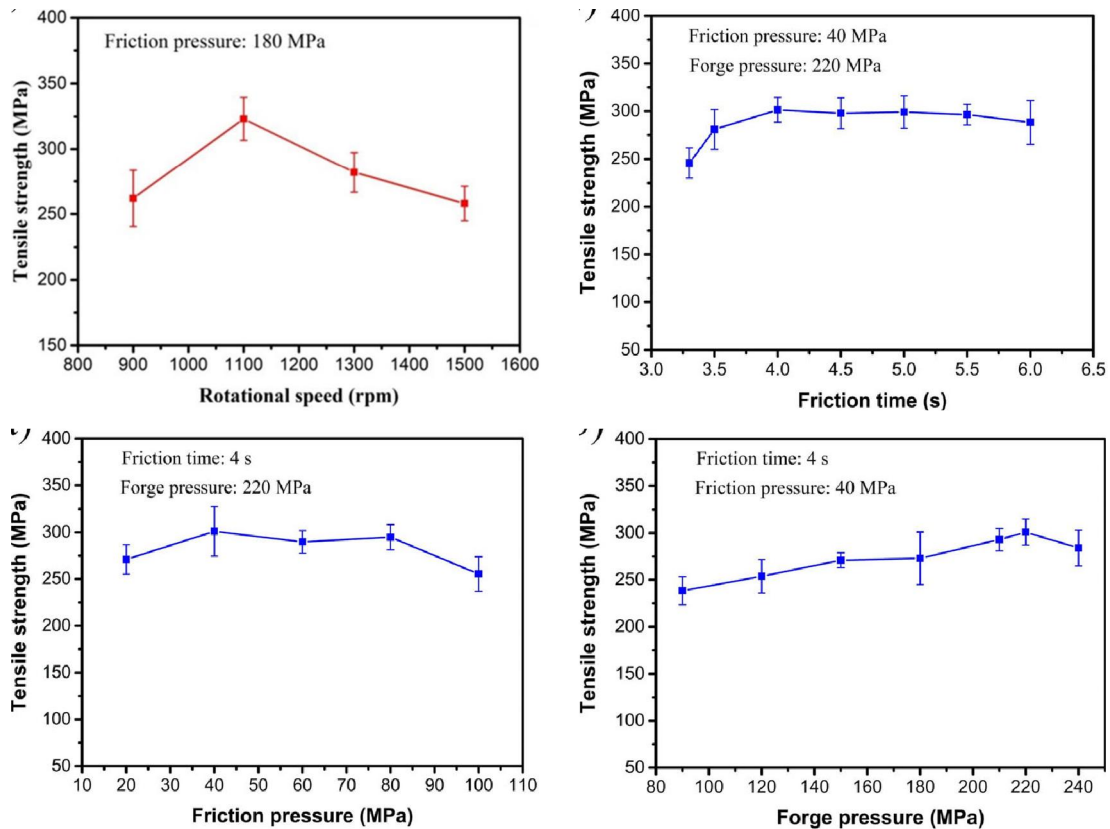


Figure II.9 Influence des paramètres de procédé CDFW sur la résistance à la traction des joints AA6061/ SS 304 [16,17]

pression de forgeage, le temps de friction et la pression de friction, et que le temps de friction a eu le plus grand impact sur le raccourcissement axial.

En plus, ils ont constaté que la résistance à la traction des joints a d'abord augmenté puis diminué avec l'augmentation de la vitesse de rotation, le temps de friction, la pression de forgeage et la pression de friction. La raison doit être liée à l'épaisseur accrue de la couche IMC formée à l'interface des joints, ainsi qu'à l'important apport de chaleur qui provoque un ramollissement important de la zone affectée thermiquement (ZAT) du côté de l'alliage d'aluminium [16,17].

Dans une étude récente, Zhang et al. [18] ont réalisé un soudage par friction inertielle (IFW) de l'alliage d'aluminium 2A14 (T6) avec l'acier inoxydable austénitique 304 (figure II. 10-a). Ils ont constaté que la température des joints soudés augmentait rapidement au tout début du processus de soudage (figure II. 10-b). Elle est passée de la température ambiante à un maximum, puis la phase de refroidissement l'a ramené à l'ambiante.

Il y avait des différences évidentes dans la température maximale à différentes positions du rayon de l'interface du joint, de sorte que la position avec la température la plus élevée était située aux 2/3 du rayon [18].

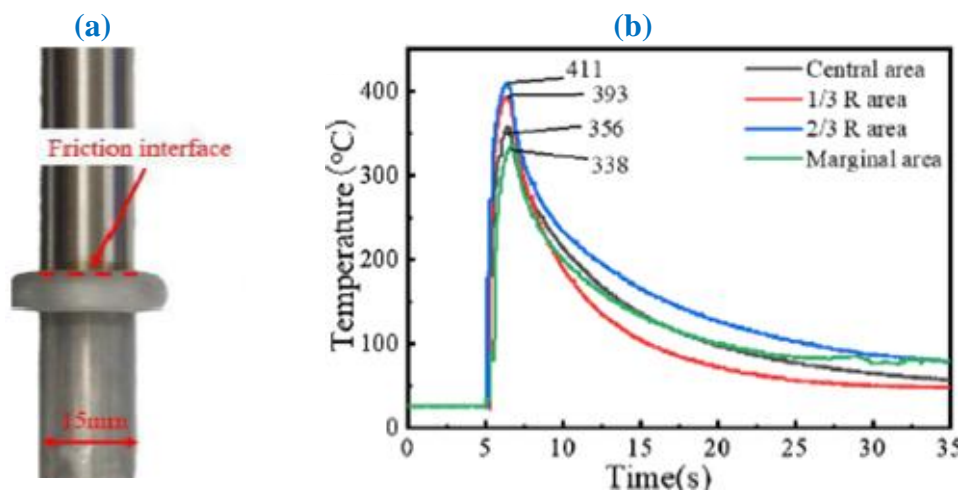


Figure II.10 IFW d'alliage d'aluminium 2A14 (T6) avec l'acier inoxydable 304 : a) Morphologie macroscopique du joint, b) Courbes des mesures de température [18]

II.6 Références

1. Dupeux, M., *Aide-Mémoire : Science des matériaux*, 2008. Dunod, Paris. p. 193, 194.
2. Kozłowski, A., *Données sur les aciers inoxydables - Données numériques*, Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique, 2009. (M323) : p. 1- 47
3. Murry, G., *Aciers. Généralités*. Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique, 1993. (M300) : p. 1- 30
4. Chniouel, A., *Etude de l'élaboration de l'acier inoxydable 316L par fusion laser sélective sur lit de poudre : influence des paramètres du procédé, des caractéristiques de la poudre, et des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques*, 2019. Thèse de Doctorat – Science des matériaux, Université Paris-Saclay - Paris - France.
5. Idrac, J., *Comportement électrochimique d'alliages modèles binaires aluminium-cuivre*, 2005. Thèse de Doctorat – Science et Génie des matériaux, Institut National Polytechnique de Toulouse - Toulouse - France.
6. Eudier, M., *Les alliages métalliques*, 1976. Presses universitaires de France, France
7. Mostfaoui, H., et Laayoun, C., *Anodisation de l'alliage d'aluminium 2017A (AU4G)*, 2020. Mémoire de Master – Génie Mécanique, Université de Blida - Blida - Algérie.
8. Hadji, H., et Mabrouki, D., *Effet du traitement thermique sur les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium*, 2020. Mémoire de Master – Génie Mécanique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila - Algérie.
9. Mroczka, K., Wójcicka, A., et Kurtyka, P., *2017A Aluminum alloy in different heat treatment conditions*,. Acta Metallurgica Slovaca, 2012. 18(2) : p. 82–91
10. Zhang, Y., Li, R., Chen, P., Yang, Y., Li, X., et Jiang, R., *Tuning the microstructure morphology and genetic mechanical properties of 2219 Al alloy with ultrasonic treatment*, Journal of Alloys and Compounds, 2020. 846 : p. 156251.
11. Cao, X., Zhou, X., Wang, H., Luo, Z., et Duan, J., *Microstructures and mechanical properties of laser offset welded 5052 aluminum to press-hardened steel*, Journal of Materials Research and Technology. 2020. 9(3) : p. 5378 –5390
12. Yang, J., Li, Y. L., Zhang, H., Guo, W., et Zhou, Y., *Control of interfacial intermetallic compounds in Fe–Al joining by Zn addition*. Materials Science and Engineering: A, 2015. 645 : p. 323–327
13. Davis, J. R., *ASM Specialty Handbook, Heat-resistant materials*, ed: 1997. ASM

International, Materials Park -USA, p. 389–414

14. Sahin, M., *Characterization of properties in friction-welded austenitic-stainless steel and aluminium joint*, Industrial Lubrication and Tribology, 2014. 66(2) : p. 260–271
15. Wan, L., et Huang, Y., *Friction welding of AA6061 to AISI 316L steel: characteristic analysis and novel design equipment*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. 95(9-12) : p. 4117 – 4128.
16. Liu, Y., Zhao, H., Peng, Y., et Ma, X., *Microstructure characterization and mechanical properties of the continuous-drive axial friction welded aluminum/stainless steel joint*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. 104 : p. 4399–4408
17. Liu, Y., Zhao, H., Peng, Y., & Ma, X., *Microstructure and tensile strength of aluminum/stainless steel joint welded by inertia friction and continuous drive friction*. Welding in the Worl, 2020. 64 : p. 1799–1809
18. Zhang, D., Qin, G., Geng, P., et Ma, H., *Study of plastic flow on intermetallic compounds formation in friction welding of aluminum alloy to stainless steel*, Journal of Manufacturing Processes, 2021. 64 ; p. 20–29

CHAPITRE III

MATERIAUX

&

PROCEDURE

EXPERIMENTALE

III.1 Introduction

Dans cette étude, le soudage des tiges en Aluminium Al2017 A et des tiges en Acier inoxydable AISI 316L a été réalisé par la méthode de soudage par friction rotative à différentes vitesses.

Ce chapitre présente la procédure expérimentale qui a été réalisée, d'abord en montrant les matériaux à souder, puis en décrivant les étapes du processus de soudage, et enfin en présentant les techniques de caractérisation utilisées.

III.2 Matériaux utilisés

Le soudage par friction rotative a été réalisé sur des pièces d'alliage d'aluminium Al 2017A et d'acier inoxydable AISI 316L.

Les compositions chimiques des matériaux de base sont indiquées dans les tableaux III.1 et III.2

Tableau III.1. Composition chimique de l'acier inoxydable AISI 316L (déterminée par Spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF)).

Eléments	C	Cr	Mn	Mo	Ni	P	N	Si	Cu	Fe
(% mass)	0.04	16.4	1,94	2.6	11.65	0.07	0.09	0.68	—	66.53

Tableau III.2. Composition chimique d'alliage d'aluminium Al 2017A [1].

Eléments	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr+Ti	Al
(% mass)	0.2-0.8	≤ 0.7	0.4-1.0	0.4-1.0	0.4-1.0	≤ 1.0	≤ 0.25	< 0.25	Reste

III.3 Processus de soudage par friction rotative à entraînement direct

Cette section présente les étapes du processus de soudage.

Etape 1 : Préparation des pièces à souder

Les joints dissimilaires AISI 316L/Al 2017A ont été développés à partir des pièces cylindriques de dimensions 12 mm de diamètre et 80 mm de longueur (figure III.1).

Avant de commencer les expériences de soudage, les pièces ont été usinées à la longueur sélectionnée et leurs surfaces de contact ont été nettoyées mécaniquement.

Etape 2 : Configuration des expériences de soudage

a- Dispositif expérimental de soudage

Les expériences de soudage par friction rotative ont été réalisées sur une fraiseuse verticale (figure II.2).



Figure III.1. Pièces d'aluminium 2017A et d'acier inoxydable AISI 316L à assemblée par soudage par friction rotative

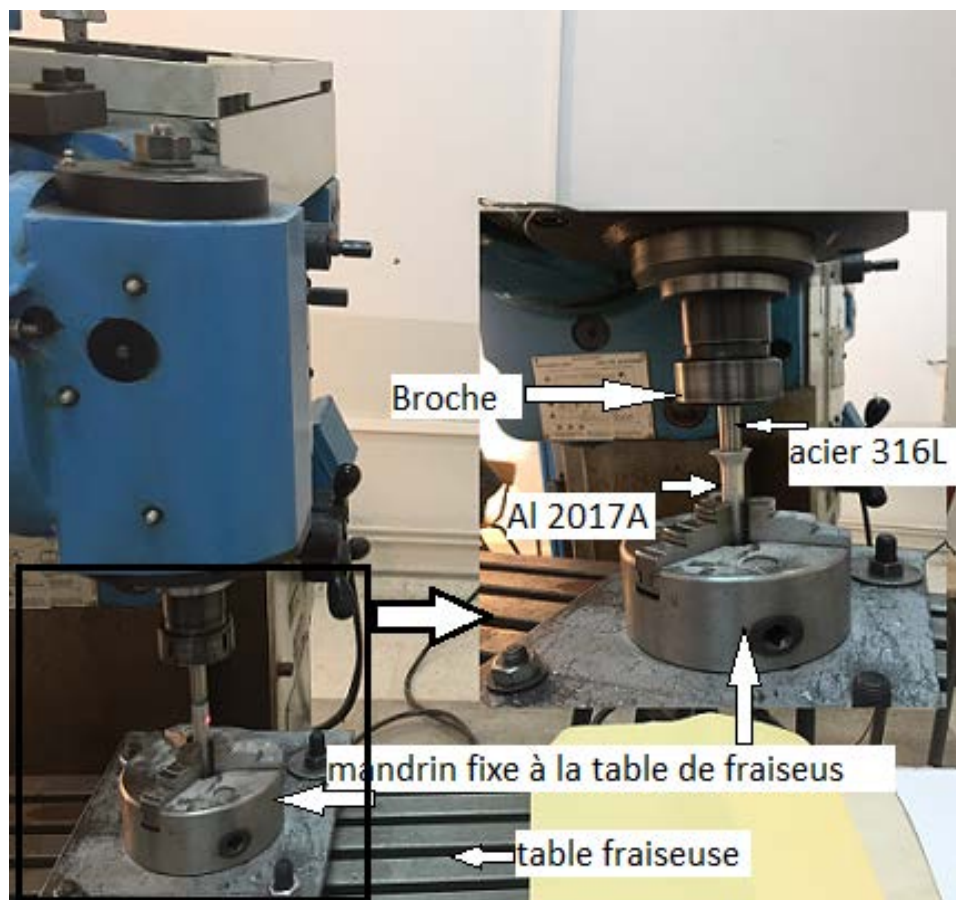


Figure III.3 Vue du processus de soudage par friction rotative acier inoxydable AISI 316L – Alliage d'aluminium 2017A

Pendant le processus de soudage, la pièce fixe (dans notre travail l'alliage d'aluminium Al 2017A) est serrée par un mandrin supplémentaire (figure II.2) installé sur la table de la fraiseuse, tandis que la pièce rotative (l'acier inoxydable) est serrée par la broche.

Les variations de la température dans les pièces à souder (près de l'interface du joint) pendant le processus de soudage sont enregistrées à l'aide d'une caméra thermique infrarouge (Modèle : FI 638TI) (figure III.3).



Figure III.3. Mesure de température des joints par une caméra thermique infrarouge

b- Processus de soudage

Pour générer la chaleur de soudage, une pression axiale est appliquée sur la pièce fixe en forme de glissement vertical de la console. Un glissement vertical automatique à vitesse constante est choisi afin de garantir une pression axiale constante et identique pour toutes les expériences de soudage.

c- Paramètres de soudage

A l'aide d'une fraiseuse verticale, des joints AISI 316L/Al 2017A ont été réalisés en utilisant les paramètres détaillés en tableau III.3.

La vitesse de glissement vertical de la console et le temps de soudage ont été maintenus constants, tandis que la vitesse de rotation est variée afin d'examiner son effet sur les propriétés des joints. Pour chaque vitesse de rotation sélectionnée, trois (03) échantillons identiques ont été préparés et ainsi un total de 12 opérations de soudage a été réalisé.

Tableau III.3. Paramètres utilisés dans le soudage par friction rotative AISI 316L/Al 2017A

		Paramètres de soudage			
		Vitesse de rotation	Vitesse de glissement vertical de la console	Temps de soudage	
		Unité:	tr/min	mm/min	sec
Séries des échantillons soudés	01	710	63	40	
	02	1000	63	40	
	03	1400	63	40	
	04	2000	63	40	

III.4 Techniques de caractérisation

III.4.1- Préparation des échantillons pour la caractérisation

Après avoir été soudé par friction, un échantillon de chaque série a été choisi au hasard et a été coupé perpendiculairement au joint soudé. Après ça, les sections longitudinales ont été meulés puis polis à l'aide d'une polisseuse mécanique MP-2B Grinder Polisher (figure III.4) en utilisant différents types des papiers abrasifs (tailles 100, 200, 600, 1000, 1500, 2000 et 2500).

Pour préparer les éprouvettes d'essai de traction, les bourrelets de deux échantillons de chaque série des joints sont retirés par l'usinage sur un tour. Les éprouvettes sont préparées sous forme des tiges de diamètre 12 mm et de longueur de calibre 80 mm.



Figure III.4. Polisseuse MP-2B Grinder Polisher utilisée en préparation des échantillons

III.4.2- Caractérisation mécanique

Après les processus de soudage par friction, une évaluation mécanique a été réalisée sur les joints soudés afin de déterminer les propriétés mécaniques et de les corrélérer avec la vitesse de rotation appliquée au cours du processus de soudage. Deux méthodes d'essai ont été utilisées pour étudier les caractéristiques mécaniques des joints, telles que la traction et la microdureté et sont présentées en détail ci-dessous.

a- Essai de traction

L'équipement utilisé pour les essais de traction était une machine hydraulique d'essais universelle, de type WP 310 (figure III.5). La machine est d'une charge maximale de 50 KN, et la vitesse de traction appliquée pendant les essais est de 0,5 mm/min.

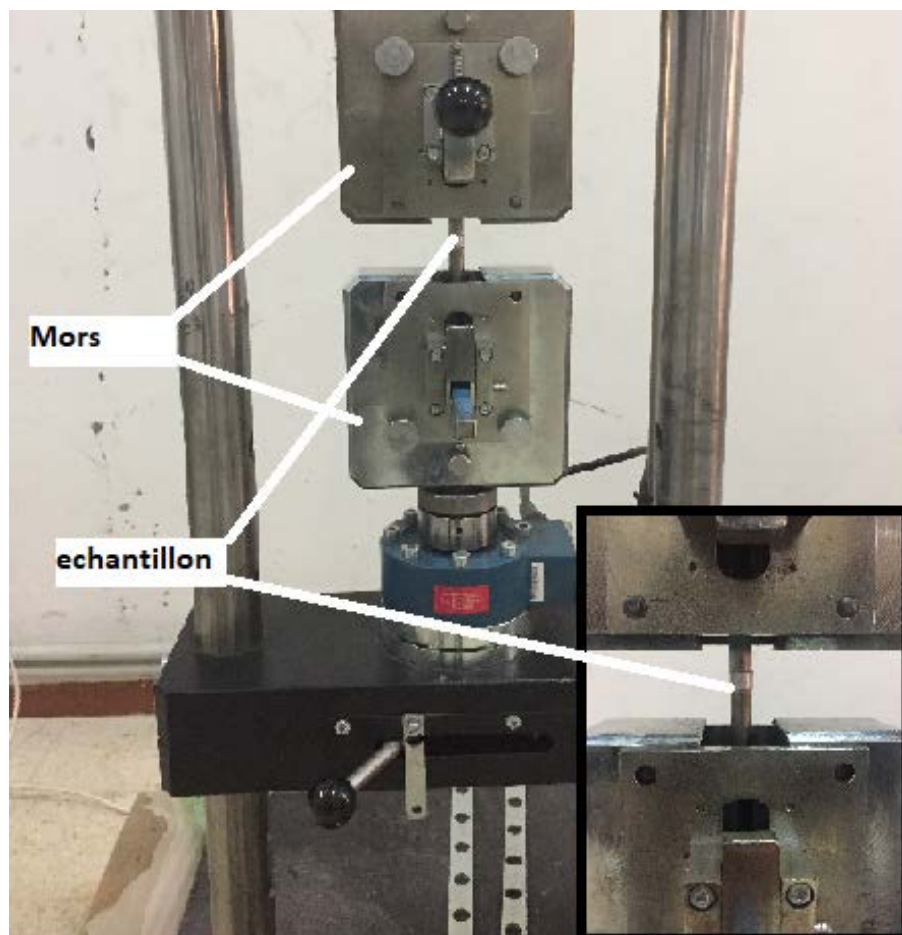


Figure III.5 Équipement utilisé pour réaliser les essais de traction

b- Microdureté

Des essais de microdureté utilisant des mesures de dureté Vickers ont été effectués sur les joints. Pour ça, une ligne d'indentation a été suivie le long des sections longitudinales avec un espacement entre les indentations de 0,25 mm en commençant par l'interface.

La machine d'essai de dureté utilisée dans cette étude était de type ZWICK ROELL INDENTEC (figure III.6). La charge utilisée était de 300 g qui correspondait à $HV_{0,3}$.

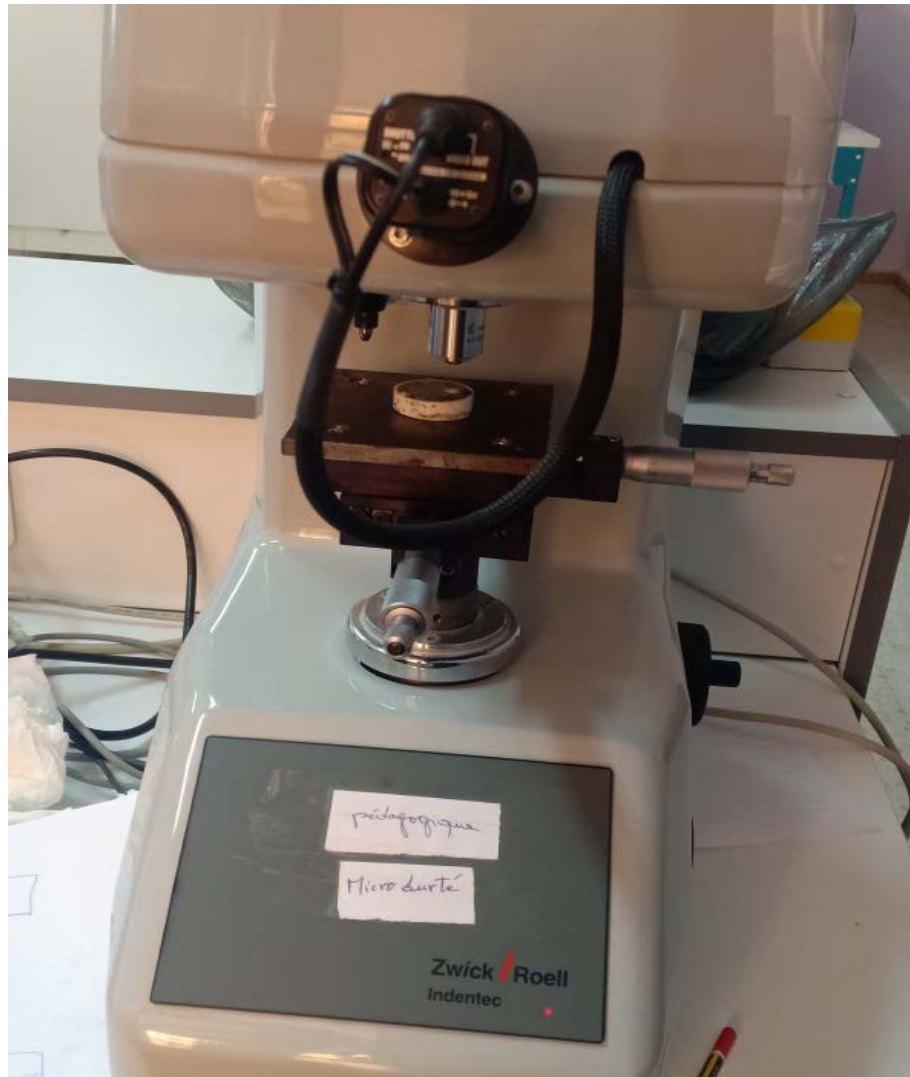


Figure III.6 Machine de mesure de la microdureté Vickers

III.5 Références

1. Barralis, J. et Maeder, G., *Les précis AFNOR/Nathan. Métallurgie, élaboration, structures-propriétés, normalisation*, collection. 2005

CHAPITRE IV

RESULTATS

&

DISCUSSION

IV.1 Introduction

Le but du travail expérimental réalisé est d'étudier l'influence de la vitesse de rotation en tant que paramètre de soudage par friction rotative sur le comportement thermique et les propriétés mécanique des joints acier inoxydable AISI 316L/alliage d'aluminium Al 2017A. Alors que, à partir de mesures de température, de mesures de raccourcissement axial, d'essais de traction et de mesures de microdureté, l'effet de la vitesse de rotation sur ces caractéristiques a été examiné.

L'objectif de ce chapitre est de présenter et de discuter les résultats obtenus dans le présent travail.

IV.2 Comportement thermique des joints AISI 316L/Al 2017A

La compréhension du comportement thermique lors du soudage par friction est importante car il affecte directement les propriétés mécaniques des joints réalisés.

En se référant aux figures IV.1 et IV.2 montrant les cycles thermiques des joints AISI 316L/Al 2017A pris par la caméra thermique à une distance de 20 mm de l'interface.

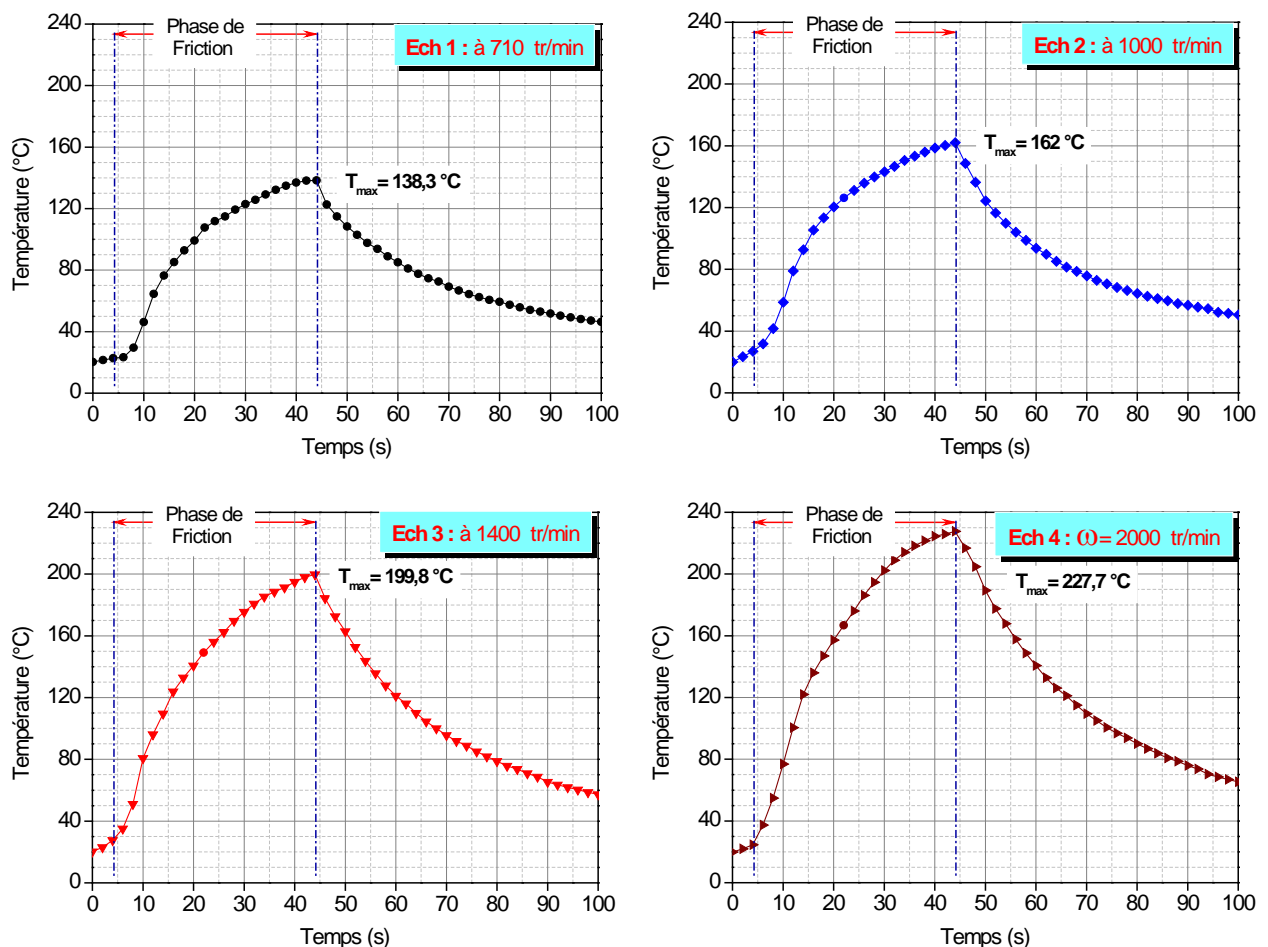


Figure IV.1 Cycles thermiques enregistrés dans la pièce d'Al 2017A

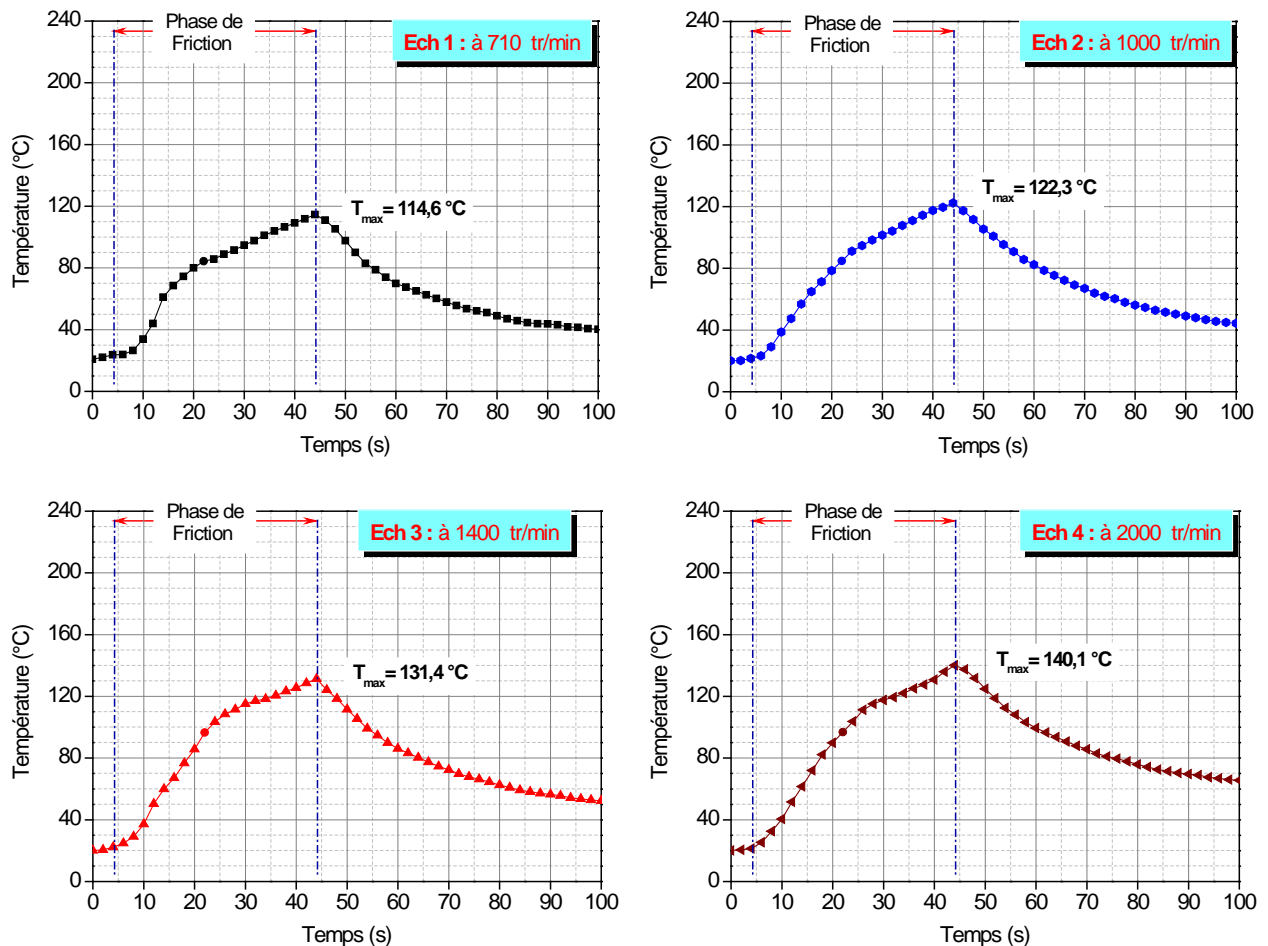


Figure IV.2 Cycles thermiques enregistrés dans la pièce d'AISI 316L

On peut voir qu'ils présentent tous la même allure suivant laquelle la température augmente rapidement pendant la phase de chauffage (ou de friction) pour atteindre une température maximale ou de pointe, suivie d'un refroidissement plus lent jusqu'à la température ambiante. De plus, en regardant les valeurs de pointe enregistrées à chaque cycle thermique, on peut constater que la mesure indique que la vitesse de rotation augmente, la température de pointe augmente également.

Quant à la comparaison entre les valeurs de pointe enregistrées dans les cycles thermiques de la figure IV.1 avec celles enregistrées sur la figure IV.2, on peut noter que la température de pointe dans la pièce en alliage Al 2017A est toujours supérieure à sa contrepartie dans la pièce en acier inoxydable AISI 316L, et cela est dû à la différence des propriétés thermophysiques des deux métaux. La conductivité thermique et la diffusivité thermique de l'alliage Al 2017A ($134 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ et $55 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, respectivement [1]) sont supérieures à celles de l'AISI 316L ($15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ et $3,75 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, respectivement [2]), de sorte que la chaleur de friction s'accumule du côté de l'acier pendant le soudage, alors que dans l'alliage d'aluminium la chaleur est facilement dissipée [3].

IV.3 Raccourcissement axial des joints AISI 316L/AI 2017A

La figure IV.3 montre les joints AISI 316L/AI 2017A soudés par friction rotative en utilisant différentes vitesses de rotation.

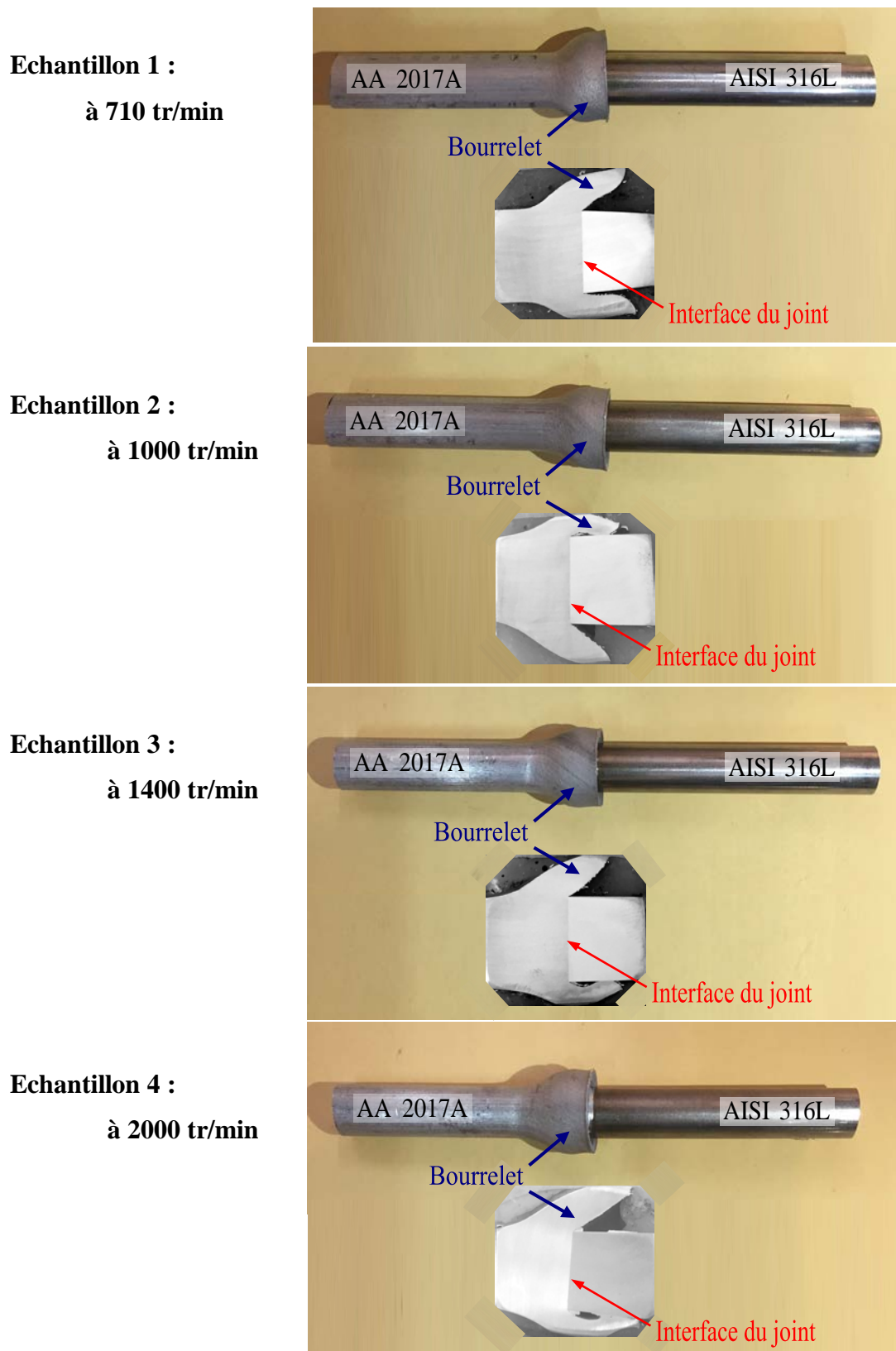


Figure IV.3 Joints dissimilaires acier inoxydable AISI 316L/alliage d'aluminium 2017A soudés

par friction rotative

Il est évident que les bourrelets de soudure ont une forme asymétrique, du fait que l'alliage d'aluminium est plus ductile que l'acier inoxydable. L'inspection visuelle des sections longitudinales des joints soudés (figure IV.3) montre que les bourrelets sont constitués uniquement d'aluminium et que la pièce d'acier n'a pas été consommée (ou raccourcie) pendant le processus de soudage.

La relation entre le raccourcissement axial des joints (en anglais, burn-off) et la vitesse de rotation est illustrée à la figure IV.4.

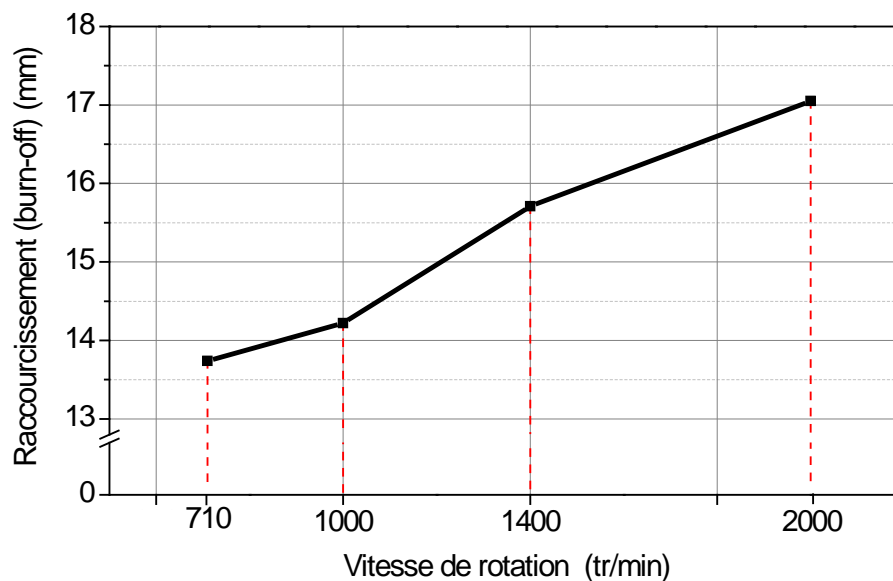


Figure IV.4 Variations du raccourcissement des joints AISI 316L/Al 2017A en fonction de la vitesse de rotation

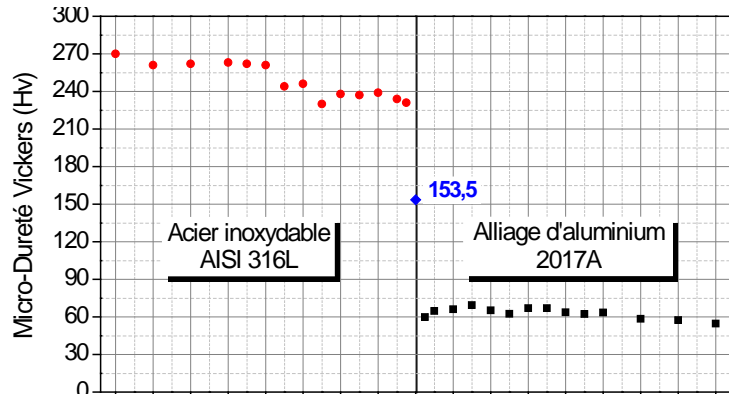
En général, le raccourcissement, qui exprime la quantité de matière consommée pour former le bourrelet de soudage, n'est pas considéré comme un résultat critique pour l'évaluation la qualité du joint soudé, mais il donne une bonne estimation de l'apport de chaleur lors du processus de soudage. Plus la chaleur générée est importante, plus la quantité de matériau consommé, ou le raccourcissement, est élevée.

D'après la figure IV.4, on peut voir que le raccourcissement des joints AISI 316L/Al 2017A, soudés par friction rotative, augmente régulièrement avec l'augmentation de la vitesse de rotation. Une explication plausible est que selon l'analyse du comportement thermique des joints, l'augmentation de la vitesse de rotation entraîne l'augmentation de la quantité de chaleur générée par le frottement et entraîne donc à une augmentation en quantité de métal de base consommé (l'alliage d'aluminium dans notre travail).

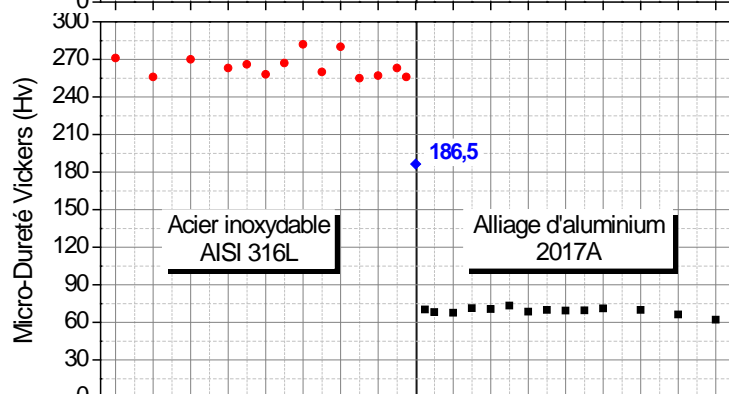
IV.4 Distributions de la microdureté des joints AISI 316L/Al 2017A

Les distributions de microdureté le long des joints AISI 316L/Al 2017A soudés par friction rotative sont présentées sur la figure IV.5.

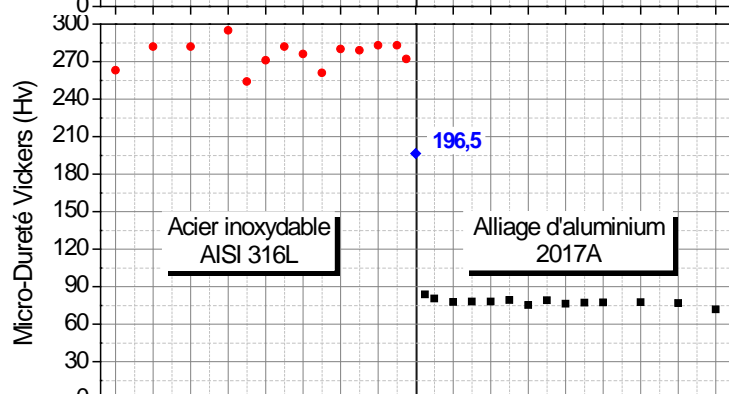
Echantillon 1 :
à 710 tr/min



Echantillon 2 :
à 1000 tr/min



Echantillon 3 :
à 1400 tr/min



Echantillon 4 :
à 2000 tr/min

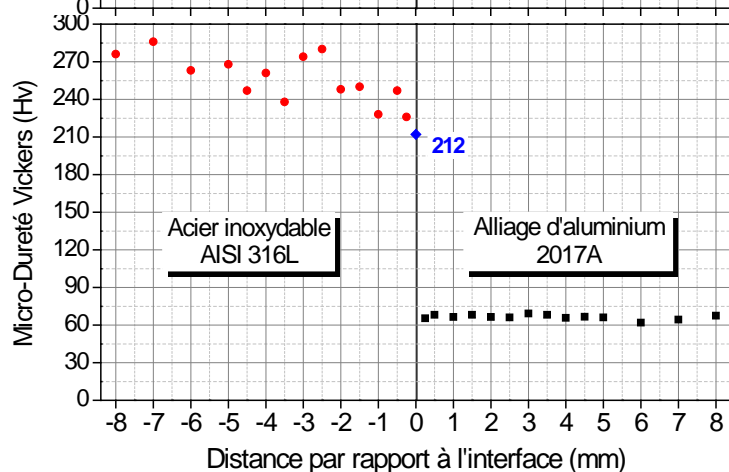


Figure IV.5 Distributions de la microdureté des joints AISI 316L/Al 2017A

On peut voir que les profils de microdureté sont asymétriques par rapport à l'interface, les valeurs de micro dureté de l'alliage Al 2017A étant inférieures à celles de l'acier inoxydable.

D'autre part, on constate qu'avec l'augmentation des vitesses de rotation, la dureté à l'interface des joints augmente de 153.5 Hv à la vitesse 710 tr/min à 212 Hv à la vitesse 2000 tr/min. Ce durcissement peut être lié à la déformation plastique de l'interface de soudure causée par l'augmentation de l'apport de chaleur due à l'augmentation de la vitesse de rotation.

IV.5 Résistance à la traction des joints AISI 316L/Al 2017A

Les résultats des essais de traction des joints AISI 316L/Al 2017A soudés à différentes vitesses sont présentés aux figures IV.6 et IV.7.

Comme pour la température et la microdureté, la résistance à la traction des joints soudés augmente également avec l'augmentation de la vitesse de rotation jusqu'à un maximum, puis elle diminue lorsque la vitesse augmente à nouveau.

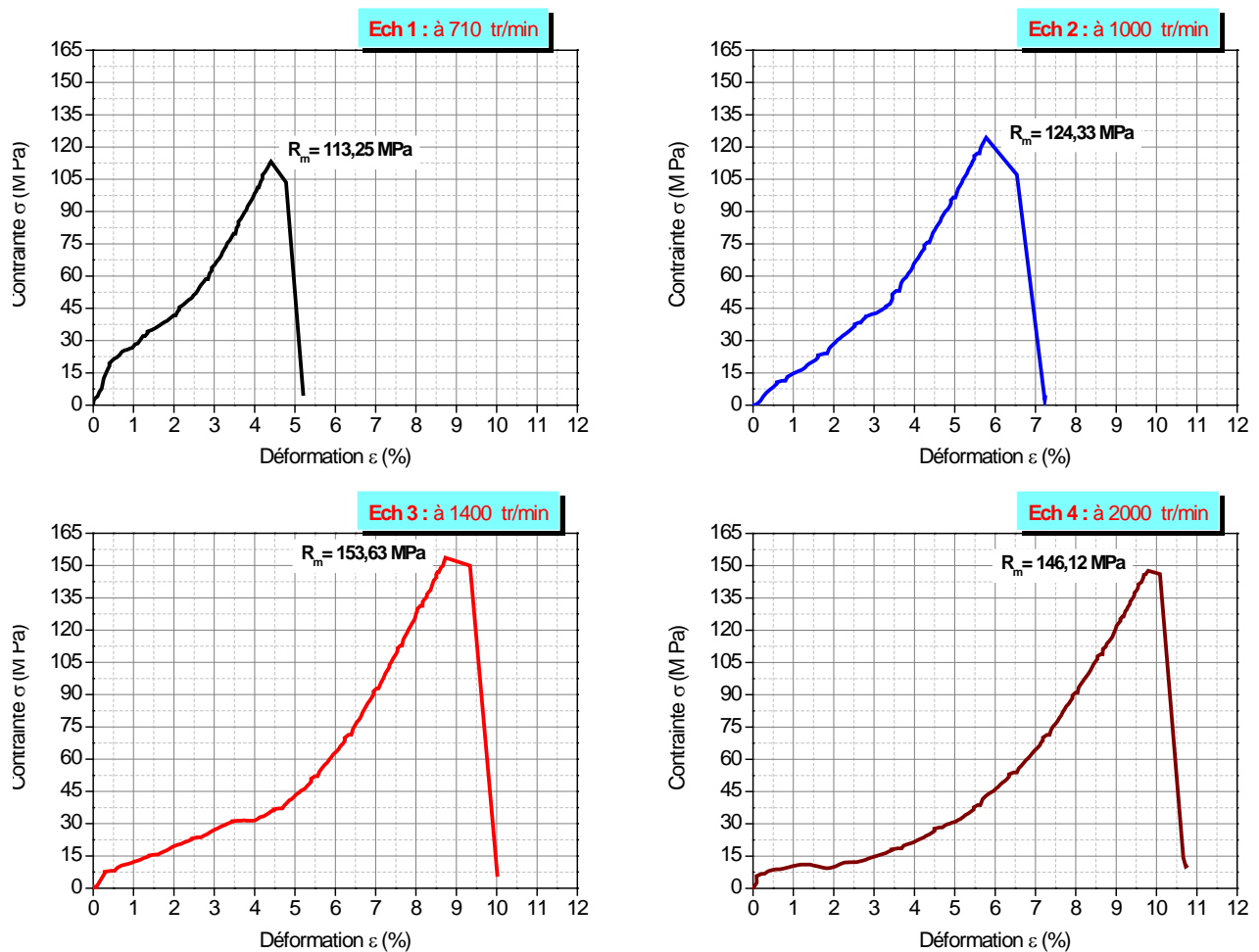


Figure IV.6 Courbes contrainte-déformation obtenues à partir des essais de traction des joints AISI 316L/Al 2017A

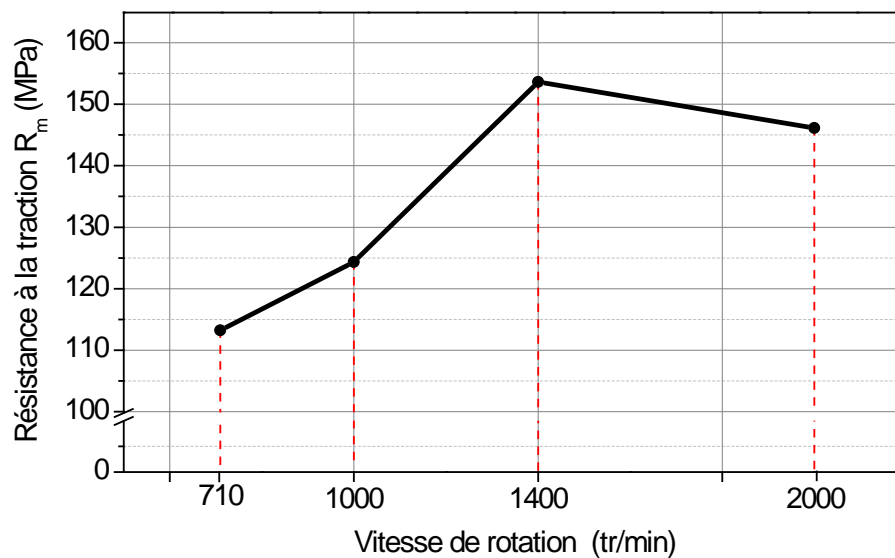


Figure IV.7 Résistances à la traction des joints AISI 316L/Al 2017A soudés à différentes vitesses de rotation.

Il est intéressant de noter que la meilleure performance de soudage AISI 316L/Al 2017A a été obtenue à une vitesse de rotation de 1400 tr/min, avec une résistance à la traction de 153,62 MPa et un allongement de 8,7 %, tandis que les joints soudés à une vitesse plus élevée (2000 tr/min) ont montré une résistance à la traction plus faible (146,12 MPa).

En se référant à certains travaux antérieurs [4, 5, 6], on peut expliquer que la dégradation de la résistance des joints soudés à haute vitesse est sûrement due à la formation d'une couche de composés métalliques (CIM) en raison de la génération excessive de chaleur par frottement à cette vitesse (augmentation de la température de pointe).

IV.6 Références

1. Davis, J. R., *ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys*, 1993. ASM International, illustrated edition, USA.
2. *Stainless Steel: Tables of Technical Properties*, Materials and Applications Series 2 Ed Vol 5, 2007. Euro Inox, Luxembourg,.
3. Karkhin, V.A., *Thermal Processes in Welding*, 2019. Springer Nature 2 Ed., St. Petersburg, Russie.
4. Wan, L., et Huang, Y., *Friction welding of AA6061 to AISI 316L steel: characteristic analysis and novel design equipment*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. 95(9-12) : p. 4117 – 4128.

5. Liu, Y., Zhao, H., Peng, Y., et Ma, X., *Microstructure characterization and mechanical properties of the continuous-drive axial friction welded aluminum/stainless steel joint*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. 104 : p. 4399–4408
6. Liu, Y., Zhao, H., Peng, Y., & Ma, X., *Microstructure and tensile strength of aluminum/stainless steel joint welded by inertia friction and continuous drive friction*. Welding in the Worl, 2020. 64 : p. 1799–1809

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion

Le travail expérimental de ce mémoire a examiné l'effet de la vitesse de rotation sur le comportement thermique et les propriétés mécaniques de soudures dissimilaires développées par friction rotative entre un acier inoxydable 316L et alliage d'aluminium 2017A.

Les principales conclusions sont les suivantes :

- Le soudage par friction rotative a été appliqué avec succès entre les métaux dissimilaires AISI 316L et Al 2017A.
- La formation du bourrelet se fait uniquement du côté de l'alliage Al 2017A mais pas du côté de l'AISI 316L en raison de la haute malléabilité et conductivité thermique de l'aluminium par rapport à l'acier.
- La vitesse de rotation affecte fortement le comportement thermique des joints, car leur température augmente progressivement avec l'augmentation de la vitesse et, par conséquent, l'augmentation de la vitesse entraîne une augmentation de la génération de chaleur pendant la phase de friction.
- Comme la chaleur générée lors de la phase de friction est un facteur majeur dans le processus de soudage par friction rotative et qu'elle affecte directement la quantité de matière consommée ou le raccourcissement axial des joints, ce dernier augmente avec l'augmentation de la vitesse de rotation.
- La vitesse de rotation affecte également le comportement mécanique des joints. Comme la résistance à la traction augmente avec l'augmentation de la vitesse, une valeur maximale de 153,63 MPa a été atteinte à une vitesse de rotation de 1400°/min.
- La vitesse de rotation élevée (2000 tr/min) entraîne une génération excessive de chaleur ce qui peut conduire à la formation d'une couche de composés intermétalliques, ce qui explique la dégradation de la résistance des joints à 146,12 MPa.
- L'augmentation de la vitesse de rotation entraîne également une augmentation progressive de la dureté des joints.
- Il semble qu'en dehors de la vitesse de rotation, d'autres paramètres de soudage tels que le temps et la pression doivent être pris en compte dans les travaux futurs.

Résumé :

Dans ce travail expérimental, des processus de soudage par friction rotative, entre des tiges d'acier inoxydable AISI 316L et d'alliage d'aluminium Al 2017A, ont été réalisés. Le but de notre étude est d'examiner l'effet de la vitesse de rotation sur le comportement thermique et les propriétés mécaniques des joints soudés. À cette fin, une fraiseuse verticale a été utilisée comme machine de soudage par friction rotative avec changement de vitesse de rotation d'un processus de soudage à l'autre. De plus, des mesures de température, des mesures de microdureté Vickers et des essais de traction ont été effectués. Selon les résultats obtenus, les métaux dissimilaires AISI 316L et Al 2017A ont été soudés avec succès par friction rotative, et la relation entre la vitesse de rotation et les caractéristiques des joints développés a été révélée.

Mots clés : Soudage par friction rotative, joints dissimilaires, acier inoxydable AISI 316L, alliage d'aluminium Al 2017A, effet de la vitesse de rotation, comportement thermique, propriétés mécaniques.

Abstract :

In this experimental work, rotary friction welding processes, between AISI 316L stainless steel and Al 2017A aluminum alloy rods, were performed. The aim of our study is to investigate the effect of the rotation speed on the thermal behavior and mechanical properties of the welded joints. For this purpose, a vertical milling machine was used as a rotary friction welding machine with change of rotational speed from one welding process to another. In addition, temperature measurements, Vickers microhardness measurements and tensile tests were performed. According to the results, dissimilar metals AISI 316L and Al 2017A were successfully welded by rotary friction welding, and the relationship between the rotational speed and the characteristics of the developed joints was revealed.

Keywords: rotary friction welding, dissimilar joints, AISI 316L stainless steel, Al 2017A aluminum alloy, effect of rotational speed, thermal behavior, mechanical properties.

ملخص:

في هذا العمل التجريبي، تم القيام بعمليات لحام بالاحتكاك الدوراني بين قضبان من الفولاذ المقاوم للصدأ AISI 316L و أخرى من سبائك الألومنيوم Al 2017A. الهدف من دراستنا هو فحص تأثير سرعة الدوران على السلوك الحراري والخصائص الميكانيكية للوصلات الملحومة. لهذا الغرض، تم استخدام آلة خراطة عمودية كآلة لحام بالاحتكاك الدوراني مع تغيير سرعة الدوران من عملية لحام لأخرى. بالإضافة لذلك، تم إجراء قياسات درجة الحرارة، وقياسات للصلادة الدقيقة فيكرز واختبارات الشد.

وفقاً للنتائج التي تم الحصول عليها، تم لحام المعادن غير المتشابهة AISI 316L و Al 2017A بنجاح عن طريق الاحتكاك الدوراني، كما تم أيضا الكشف عن العلاقة بين سرعة الدوران، وخصائص الوصلات المطورة.

كلمات مفتاحية : لحام الاحتكاك الدوراني، وصلات غير متشابهة، الفولاذ المقاوم للصدأ AISI 316L، سبائك الألومنيوم Al 2017A، تأثير سرعة الدوران، السلوك الحراري، الخصائص الميكانيكية.
