



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. : .....

---

Présenté et soutenu par :  
**LABED Mohammed Mouhieddine**

Le : mercredi 26 juin 2019

## Réalisation d'un montage de soudage des métaux dissimilaires

---

### Jury :

<b>Pr.</b>	<b>Chebbah Mohamed Said</b>	<b>Pr</b>	Université de Biskra	Président
<b>M.</b>	<b>Athmani Moussa</b>	<b>MAA</b>	Université de Biskra	Examineur
<b>Pr.</b>	<b>Boumerzoug Zakaria</b>	<b>Pr</b>	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2018 - 2019

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail de recherche à ma mère et à mon père*

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

*Et toute ma famille*

*Et mes amis*

## Remerciement

*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 Chebbah Mohamed Said et Monsieur Athmani Moussa ) qui ont accepté d'expertiser mon travail de recherche.*

*Je remercie le personnel du Hall de technologie, son responsable Guettala Ismaïne et aussi Monsieur Sedrati Sadok et Baissi Lazhar pour toutes les facilités et même leurs aides techniques.*

*Je remercie mes enseignants de la filière métallurgie qui ont contribué à ma formation.*

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

# Table des matières

Introduction Générale.....	1
<b>Chapitre I :Soudage des métaux par friction</b>	
1. Introduction :.....	4
2. Types de soudage:.....	4
2.1 Le soudage par fusion .....	4
2.2 Soudage à l'état solide .....	4
3. Type de soudage par friction : .....	5
3.1 Définition de soudage par friction : .....	5
3.2 Type de soudage par friction :.....	5
3.2.1 Soudage par friction malaxage : .....	5
3.2.2 Soudage par friction linéaire.....	8
3.2.3 Soudage par friction rotative.....	9
4. Aspect métallurgique de soudage par friction : .....	10
5. Application industrielle du soudage par friction : .....	11
5.1 L'application du procédé FSW : .....	11
5.1.1 Automobile .....	11
5.1.2 Domaine ferroviaire.....	12
5.1.3 Domaine aérospatiale et aéronautique .....	12
5.1.4 Domaine naval .....	13
5.1.5 Domaine de l'automobile.....	14
5.1.6 Domaine de l'agriculture .....	15
5.1.7 Industrie pétrolière.....	15
5.1.8 L'industrie aéronautique.....	16
6. Conclusion partielle .....	16
7. Bibliographie .....	17

## **Chapitre II: Soudage par friction rotative et malaxage**

1. Introduction.....	20
2. Soudage par friction rotative (RFW) .....	20
2.1 Principe de RFW .....	20
2.2 La machine utilisée .....	21
2.3 Les paramètres de RFW .....	22
3. Soudage par friction malaxage FSW .....	24
3.1 Principe de FSW .....	24
3.1.1 La machine utilisée .....	24
3.1.2 Les paramètres de FSW .....	25
4. Domaine d'application de soudage des métaux dissimilaire .....	28
5. Conclusion partielle .....	28
6. Bibliographie .....	29

## **Chapitre III: Description des deux machines de soudage réalisées**

1. Introduction.....	32
2. Description des machines réalisées.....	32
2.1 Machine de soudage par friction rotative.....	32
2.1.1 Partie fixe.....	32
2.1.2 Partie mobile.....	33
2.2 Mode de fonctionnement.....	35
3. Caractérisation métallographique du joint soudé.....	37
3. Machine de soudage par friction malaxage .....	39
3.1. Parties fixes.....	40
3.2. Mode de fonctionnement .....	40
Conclusion générale .....	41

## Liste des figures

Figure I. 1 Principe du soudage par friction-malaxage.....	5
Figure I. 2: Quelques exemples de designs de pions.....	6
Figure I. 3: Formation de la soudure.....	7
Figure I. 4: Configurations des joints pour le soudage par friction .....	8
Figure I. 5: Soudage par friction linéaire .....	8
Figure I. 6: Schéma du procédé de soudage par friction rotative .....	9
Figure I. 7: Microstructure d'un échantillon soudé par FSW , et schématisation des zones caractéristiques : .....	10
Figure I. 8: Microstructure du joint soudé par RFW .....	11
Figure I. 9: Soudage « friction-malaxage » par point utilisé pour l'automobile. ....	12
Figure I. 10: Soudage par FSW trains : (a) Hitachi train Série 700, (b) Technique de soudage des carrosseries des trains Hitachi .....	12
Figure I. 11: Panneau de fuselage soudé par FSW sur Eclipse.....	13
Figure I. 12: a ) Bateau en aluminium construit en utilisant FSW, (b)-Panneaux L'application du procédé RFW .....	14
Figure I. 13: 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 .....	14
Figure I. 14: a) Piston d'un moteur diesel. b) Remplacement de pièces forgées ou coulées par des profilés standards .....	15
Figure I. 15: Fixation d'une bride à une valve hydraulique .....	15
Figure II. 1: Principe de soudage par friction RFW .....	20
Figure II. 2: (a) Schéma d'une machine de soudage par friction, (b) exemple de soudage pour la fabrication des vérins hydrauliques .....	22
Figure II. 3: Evolution des différents paramétré de RFW .....	23
Figure II. 4: a) Exemple de système de bridage . b) Illustration du procédé de soudage par friction et malaxage .....	24
Figure II. 5: a) machine réel de FSW. b) Schéma de machine FSW .....	25
Figure II. 6: Angle d'inclinaison de l'outil .....	27
Figure II. 7: Cosses aluminium-cuivre soudées par friction .....	28

Figure III. 1:Vue globale de la machine de soudage par friction rotative. ....	32
Figure III. 2: Partie fixe de machine de soudage. ....	33
Figure III. 3: Moteurs électrique (perceuse) .....	34
Figure III. 4: Support moteur. ....	34
Figure III. 5: Table mobile.....	35
Figure III. 6:Fixation des métaux à souder. a) fixation de la pièce de cuivre ; b) fixation de la pièce d' aluminium.....	35
Figure III. 7: Déplacement du premier métal (Cuivre).....	36
Figure III. 8: Mise en rotation du moteur électrique.....	36
Figure III. 9: Déplacement du premier métal. (Cuivre).....	37
Figure III. 10 : Enlèvement de deux métaux soudés.....	37
Figure III. 11: Polisseuse de type Forcipol.....	38
Figure III. 12: Microscope métallographique.....	38
Figure III. 13: Microstructure du joint soudé des deux métaux.....	39
Figure III. 14: Vue globale de la machine de soudage par friction malaxage. ....	39

## Liste des Tableaux

Tableau II. 1 Les valeurs des paramètres de soudage par le procédé RFW. ....	23
Tableau II. 2: Tableau II-2 Valeur des paramètres de soudage de l'acier avec l'aluminium par FSW .....	27
Tableau III. 1: Les caractéristiques du moteur électrique.....	33
Tableau III. 2: Les caractéristiques du moteur électrique.....	40



## Introduction Générale

Les procédés d'assemblages permanents entrent dans la fabrication de 80 % des produits manufacturés. Le soudage par friction est l'un des procédés utilisés intensivement dans le secteur industriel. Ce type de soudage s'effectue à des températures inférieures aux températures de fusion des deux métaux à souder.

Il est basé sur le frottement soit entre les deux métaux à souder ou en utilisant un outil très dur pour provoquer le frottement entre les deux pièces à souder. Donc l'avantage de ce type d'assemblage est l'absence d'un métal d'apport et aussi pas de dégagement de gaz toxique comme le cas du soudage à l'arc électrique. De plus, ce procédé peut être utilisé pour assembler des métaux similaires ou dissimilaires et parfois il est utilisé dans l'assemblage même des matériaux dissimilaires comme le soudage par friction des matériaux céramique avec des matériaux métalliques.

Les plus importants procédés de soudage par friction; a soudage par friction rotation et le soudage par friction malaxage. Le premier ne nécessite pas un outil pour réaliser le soudage, mais il suffit de mettre en contact la première pièce en rotation avec la deuxième pièce. Par contre le deuxième procédé les deux pièces sous forme de plaques sont mis en position de recouvrement ( lune superposée sur l'autre ) ou sont places lune à coté de l'autre ( bout à bout ) et l'outil en rotation est appliqué entre les deux plaques ce qui provoquera la formation du joint soudé.

L'objectif de ce mémoire de master est de réaliser deux machines de soudage. La première est pour réaliser le soudage par friction rotative et la deuxième est pour réaliser le soudage par friction malaxage.

Le mémoire est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre présente le principe de soudage par friction des métaux et aussi les différents types de ce procédé.

Le deuxième chapitre est réservé particulièrement à la présentation des deux procédés de soudage par friction et qui feront l'objet de ce mémoire et qui sont le soudage par friction rotative et malaxage. Le principe et les paramètres de ces deux types de soudage sont bien détaillés.

Le troisième chapitre est consacré à la description des deux machines de soudage réalisées dans le cadre de ce mémoire de master.

# **Chapitre I :**

## **Soudage des métaux par friction**

## 1. Introduction :

Les procédés d'assemblages permanents entrent dans la fabrication de 80 % des produits manufacturés. Le soudage représente une grande majorité de ces procédés, car il permet l'obtention d'une liaison complète entre deux pièces.

Les différents procédés de soudages employés pour assembler deux matériaux différents ils sont classés en deux catégories : les procédés de soudage par fusion et ceux à l'état solide, comme le soudage par friction. Le soudage par friction est un procédé utilisé pour assembler les métaux dissimilaires et dans certains cas particuliers, en mode de soudage hétérogène pour assembler deux matériaux différents.

Dans ce chapitre on présente le principe de soudage par friction des métaux et aussi les différents types de ce procédé.

## 2. Types de soudage:

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

### 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 [1]. 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

### 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. Le nettoyage des surfaces s'effectue alors par un frottement et/ou une déformation intense localisée conduisant à chasser les impuretés et créer un contact intime entre les matériaux à assembler permettant à la diffusion et aux forces interatomiques de prendre le relais [2]. Les principaux types de soudage à l'état solide sont :

- Soudage par diffusion
- Soudage par friction
- Soudage par friction-malaxage
- Soudage par ultrason
- Soudage par impulsion magnétique explosion.

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

### 3. Type de soudage par friction :

#### 3.1 Définition de soudage par friction :

Le soudage par friction est obtenu grâce à l'échauffement des deux matériaux à assembler, souvent des pièces de section circulaire. Un flux de chaleur est généré par conversion de l'énergie mécanique en énergie thermique. Généralement, l'une des pièces est en mouvement (rotation) alors que la deuxième reste statique [1].

#### 3.2 Type de soudage par friction :

Il existe trois types de soudage par friction :

##### 3.2.1 Soudage par friction malaxage (en anglais **Friction Stir Welding "FSW"**) :

Le soudage par friction malaxage est un avatar intéressant du soudage par friction. Il consiste à souder des tôles en recouvrement ou bout à bout (figure I.1) au moyen d'un outil de soudage par friction malaxage [3].

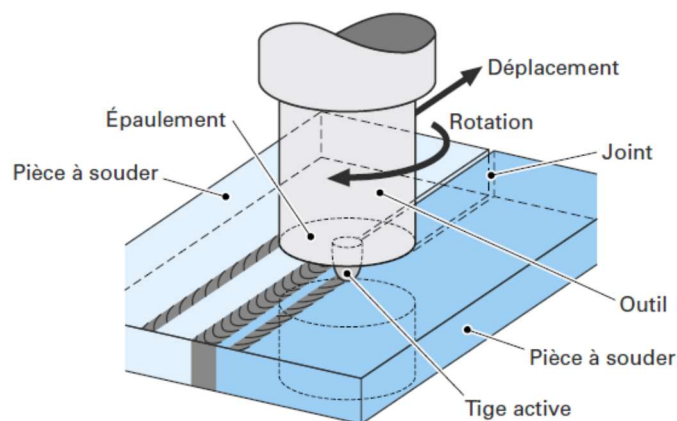


Figure I. 1 Principe du soudage par friction-malaxage [4].

Le procédé de soudage par friction et malaxage utilise un outil à haute résistance mécanique et thermique qui est constitué d'un épaulement (shoulder) prolongé par un pion (pin) coaxial qui réalise le malaxage (figure I.2). Les tôles à souder sont fixées soigneusement sur un montage d'appui. La chaleur, générée par le frottement de l'épaulement et celle du pion, transforme la matière à l'état pâteux au voisinage de l'outil (figure I.3) et facilite la pénétration et le déplacement de l'outil le long du joint à souder pour former la soudure après refroidissement. Par exemple, les matériaux, utilisés pour les outils de soudage des tôles à base d'aluminium, sont principalement des aciers résistants aux hautes températures.

La géométrie de l'outil est très importante dans le développement du procédé. Elle joue un rôle essentiel dans le malaxage de la matière et la génération de la chaleur. Le choix des dimensions et du profile du pion dépend de la nature des matériaux constituant les tôles à souder et de leur épaisseur.

La forme du pion est généralement tronconique et/ou prismatique ou hélicoïdale et peut contenir des reliefs variés dans le but d'augmenter l'effet du malaxage du métal (figure I.2) et, par suite, de rendre plus facile la formation de la soudure (figure I.3).

Dans certaines applications, le pion est excentré par rapport à son axe de rotation dans le but d'amplifier le malaxage. Plusieurs recherches sont orientées vers l'optimisation de la géométrie du pion. [5]

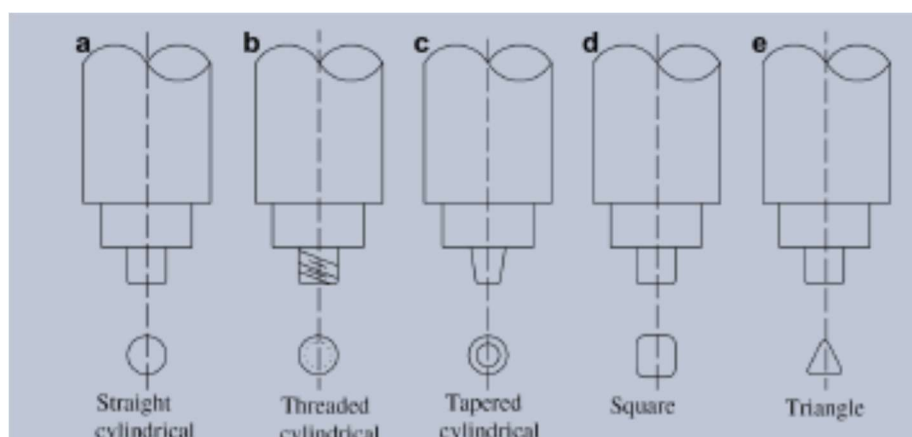


Figure I. 2: Quelques exemples de designs de pions [6].

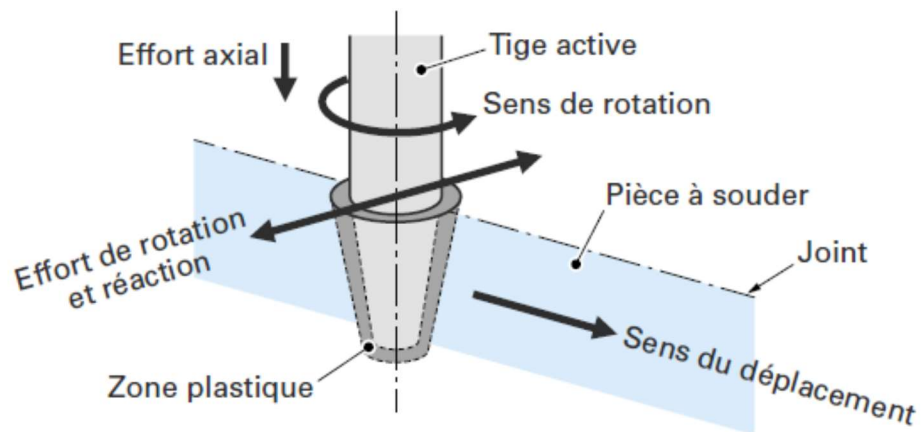


Figure I. 3: Formation de la soudure [4].

Il existe plusieurs types de soudage par friction malaxage :

- ❖ Soudage bout à bout (1)
- ❖ Soudage bout à bout avec deux plaques l'une sur l'autre (2)
- ❖ Soudage par recouvrement (3)
- ❖ Soudage par recouvrement multicouches (4)
- ❖ Soudure en T (5) et (6)
- ❖ Soudure en L (7) et (8)
- ❖ Soudage à clin (9)

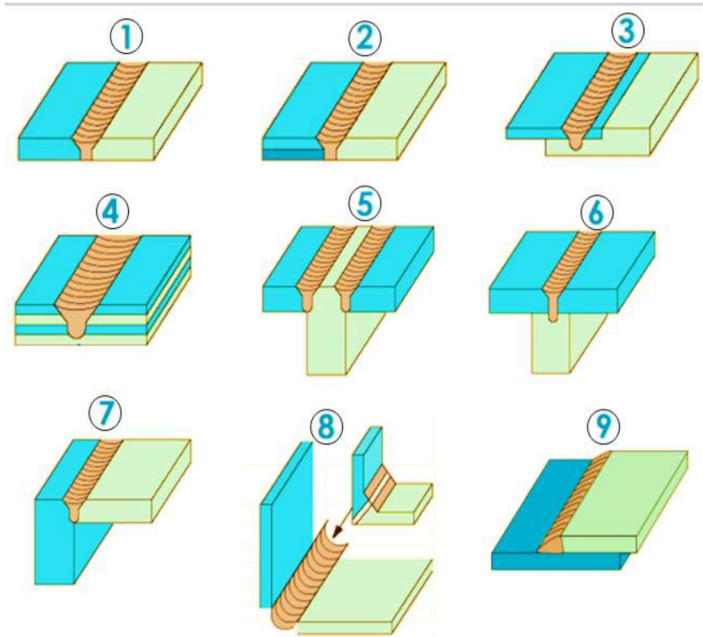


Figure I. 4: Configurations des joints pour le soudage par friction [7].

### 3.2.2 Soudage par friction linéaire (en anglais Linear Friction Welding "LFW")

Le soudage par friction linéaire (ou soudage par vibration) est l'une des nombreuses techniques dans laquelle la chaleur est générée par le mouvement mécanique des pièces à souder. Les deux pièces à joindre sont mises en contact sous une certaine pression. Une pièce est bloquée tandis que l'autre effectue un mouvement linéaire réciproque dans le plan du joint (Figure I.5). La chaleur générée par la friction au niveau des deux surfaces crée une zone de fusion locale. Ensuite la vibration est stoppée, les pièces sont alignées et le joint refroidi sous pression pour consolider la soudure. [8]

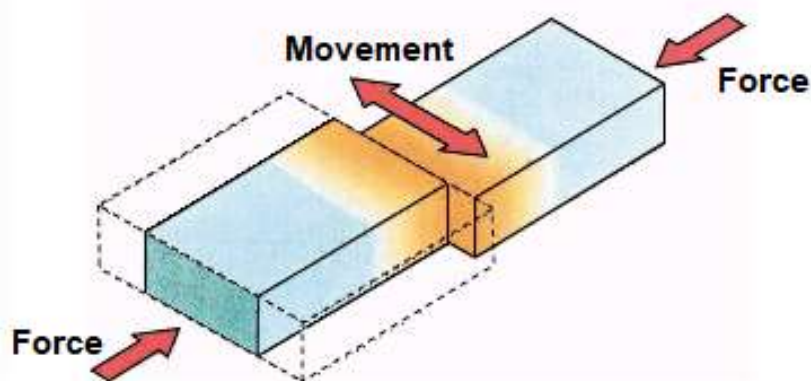


Figure I. 5: Soudage par friction linéaire [9].



Le procédé LFW est généralement utilisé pour l'assemblage des métaux. Cependant, il a été utilisé pour l'assemblage des plastiques et du bois. LFW est particulièrement efficace pour l'assemblage de métaux ayant de bonnes propriétés à haute température (rendement de compression et résistance au cisaillement) et une faible conductivité thermique. Cela permet à la chaleur générée de rester à l'interface, ce qui permet à l'interface de chauffer et de plastifier rapidement. Cela rend les alliages de titane particulièrement adaptés au procédé. Cependant, de nombreuses combinaisons de matériaux similaires et dissemblables ont été étudiées avec plus ou moins de succès. [10]

### 3.2.3 Soudage par friction rotative ( en anglais Rotary Friction Welding `` RFW``)

Le soudage par friction rotative est obtenu grâce à l'échauffement des deux matériaux à assembler, souvent des pièces de section circulaire. Un flux de chaleur est généré par conversion de l'énergie mécanique en énergie thermique. Généralement, l'une des pièces est en rotation alors que la deuxième reste statique. La figure I.6 présente les trois principales phases de ce procédé de soudage par friction rotative :

- a) phase d'accostage des pièces.
- b) phase de frottement.
- c) phase de pression élevée. Joint forgé [11].

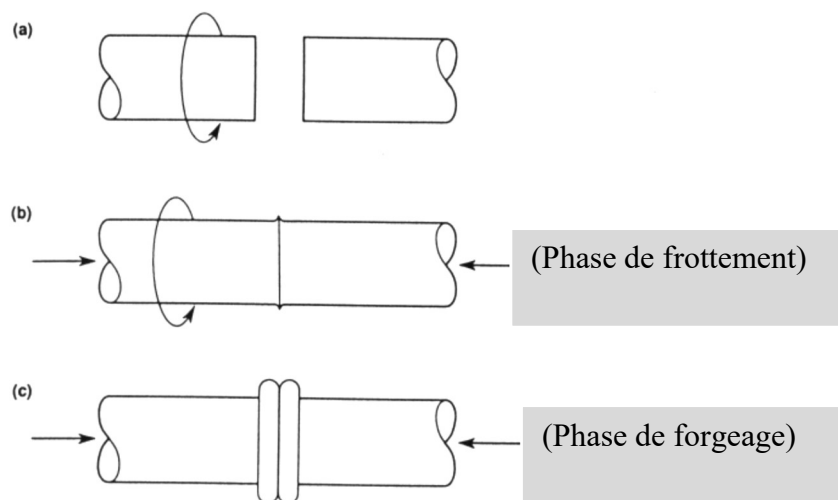


Figure I. 6: Schéma du procédé de soudage par friction rotative [9].

#### 4. Aspect métallurgique de soudage par friction :

Il est connu que les joints soudés par un procédé de soudage conventionnel se caractérisent par la présence de trois zones différentes, soit la zone de fusion (zone malaxée), la zone thermiquement affectée (ZAT) et le métal de base. Cependant, pour les joints obtenus par friction malaxage comporte une zone en plus qui est la zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM) et une zone de malaxage, comme il est montré dans la figure I.7. Chacune de ces zones possède des caractéristiques spécifiques qui seront exposées brièvement ci-dessous et explicitées dans les sous-sections suivantes.

La première zone, qui se trouve au centre du joint soudé, appelée le noyau de soudure, est la partie qui a subi la déformation la plus sévère. Sous l'effet combiné de l'écoulement du métal et du cycle thermique, cette zone a subi une recristallisation complète. La taille moyenne de grains dans cette zone est plus petite que dans le reste du joint. Dans cette zone, la température est assez élevée pour causer une mise en solution des précipités. [12].

La ZATM est la zone adjacente au noyau. Dans cette zone, le métal subit une déformation plastique importante. La combinaison déformation-température n'est cependant pas assez élevée pour déclencher les mécanismes de recristallisation dynamique. Cependant, la partie proche du noyau subit une recristallisation partielle.

La ZAT est la zone comprise entre le ZATM et le métal de base. La structure des grains reste pratiquement la même que celle du métal de base, mais il y a une augmentation de la taille des précipités métastables [13].

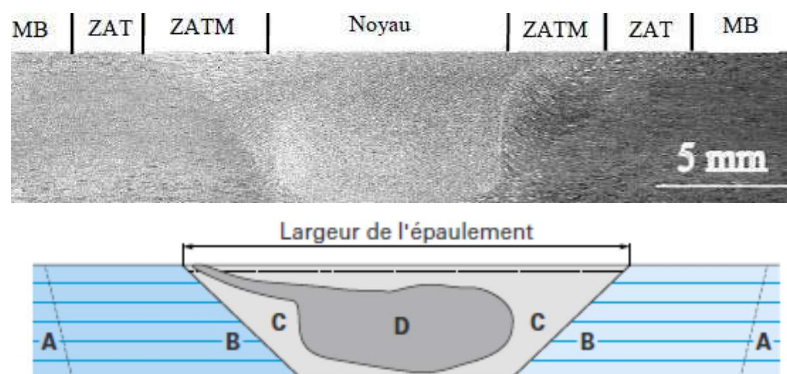


Figure I. 7: Microstructure d'un échantillon soudé par FSW [14], et schématisation des zones caractéristiques :

- *A* : métal de base non affecté par la soudure ;
- *B* : zone affectée thermiquement (ZAT). Dans cette zone, le métal a subi une élévation de température pouvant avoir affecté la microstructure et (ou) les propriétés mécaniques. Il n'y a pas, par contre, de déformation ;
- *C* : zone affectée thermo mécaniquement (ZATM). Le métal a subi une déformation plastique et est également affecté thermiquement
- *D* : noyau de soudure proprement dit. Cette partie est relative au métal ayant subi la friction et le brassage. Dans certains cas, on distingue en outre la partie supérieure du cordon affectée par le frottement de la face active de l'épaulement..[4] .

La figure I.8 montre un exemple de microstructure du joint soudé par RFW.

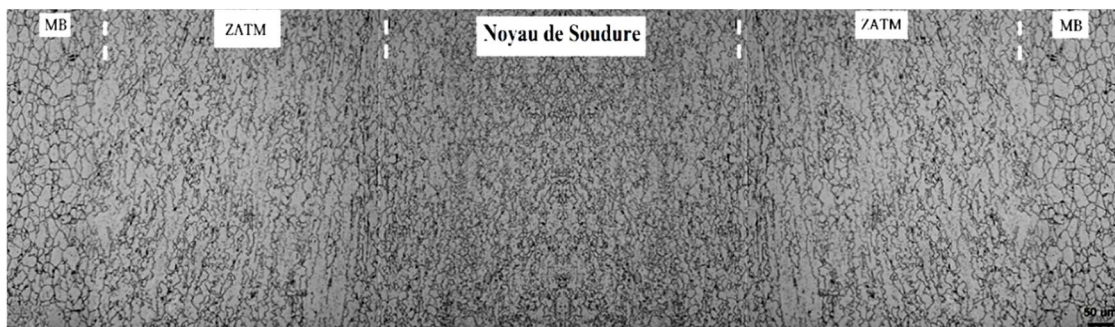


Figure I. 8: Microstructure du joint soudé par RFW [15].

## 5. Application industrielle du soudage par friction :

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.

### 5.1 L'application du procédé FSW :

#### 5.1.1 Automobile

Dans l'industrie automobile, Mazda fut la première société à appliquer le procédé FSW en remplacement du soudage par résistance pour la fabrication des portières arrière et capots de ses véhicules de sport RX-8 en 2004 (figure I.9). Ce qui lui permet de réduire les coûts de l'équipement de 40 %. Plus tard, Ford appliqua le procédé FSW pour la fabrication du châssis en aluminium de ses voitures de sport FORD-GT. La société Tower

aux États-Unis a également adopté le procédé FSW dans la fabrication des composants de l'automobile.

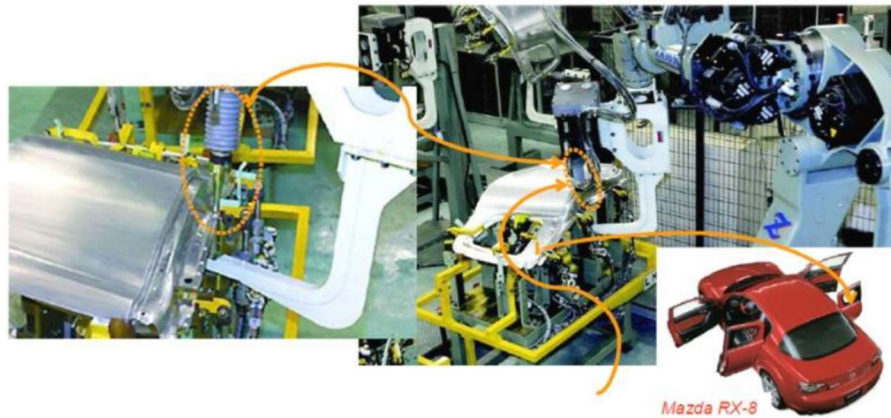


Figure I. 9: Soudage « friction-malaxage » par point utilisé pour l'automobile [17].

### 5.1.2 Domaine ferroviaire

La figure II.8. présente le train développé et fabriqué par HITACHI, qui est composé de profilés d'aluminium soudés par FSW sur toute la longueur.[1]

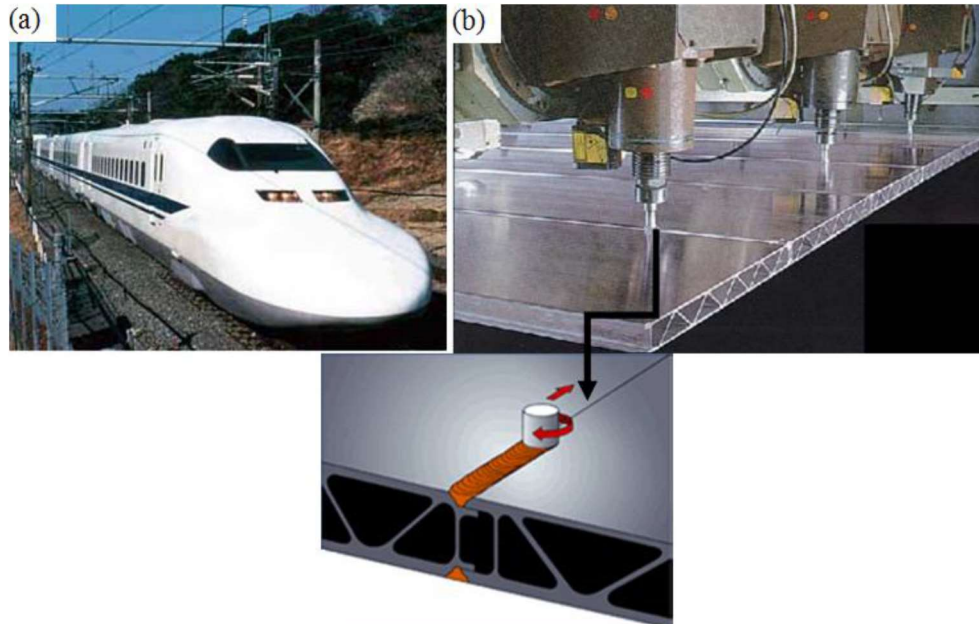


Figure I. 10: Soudage par FSW trains : (a) Hitachi train Série 700, (b) Technique de soudage des carrosseries des trains Hitachi [1].

### 5.1.3 Domaine aérospatiale et aéronautique

Dans l'industrie aérospatiale, les technologies de soudage par friction-malaxage ont été largement adoptées par de nombreuses entreprises, telles que Boeing, Lockheed

Martin, Marshall Space Flight Center. Depuis 1999, la compagnie Boeing Space lance les fusées Delta dont les réservoirs de carburant et qui ont été soudés par le procédé FSW en remplacement du procédé TIG jugé très coûteux. Le cycle de fabrication des réservoirs a donc été réduit de 71 %, et les économies en ressources humaines de 80 % pour l'adoption de la technologie de soudage par friction-malaxage.

Dans l'industrie aéronautique, la société Eclipse Aviation a ouvert les 10.000 m<sup>2</sup> de centre de soudage par friction-malaxage en Mars 2004. 70 % de rivetage et de processus traditionnels de liaison ont été remplacés par le procédé FSW. Ce qui a permis de fabriquer plus rapidement les deux turbo-réacteurs du jet Eclipse N500. La Figure 1.9 montre le fuselage du modèle Eclipse N500, qui est aussi soudé par FSW. Pendant ce temps, la société Airbus est le premier fabricant d'avion à adopter la technologie FSW dans la fabrication de ses grands avions civils. La technologie de soudage par friction malaxage est la solution idéale d'assemblage en remplacement du rivetage traditionnel pour ses potentialités d'application élevées [16].



*Figure I. 11: Panneau de fuselage soudé par FSW sur Eclipse [18].*

#### **5.1.4 Domaine naval**

La première application de FSW dans l'industrie navale a été réalisée par une société scandinave en 1995 pour l'aluminium extrudé. Actuellement, dans le secteur de la construction navale, trois entreprises scandinaves et plusieurs entreprises japonaises

utilisent le procédé de fabrication de grands panneaux en aluminium, fabriqués à partir d'extrusions d'aluminium. Des machines FSW de recherche et commerciales sont maintenant disponibles et comprennent des installations complètes pour souder jusqu'à 16 m de longueur. Cette technique est appliquée notamment pour la structure de pont de bateaux (Figure II.12) [19].



Figure I. 12: a ) Bateau en aluminium construit en utilisant FSW, (b)-Panneaux L'application du procédé RFW [1].

## 5.2 L'application du procédé RFW

### 5.2.1 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 [9], c'est à dire des pièces de forme cylindrique (Figure I.13)..

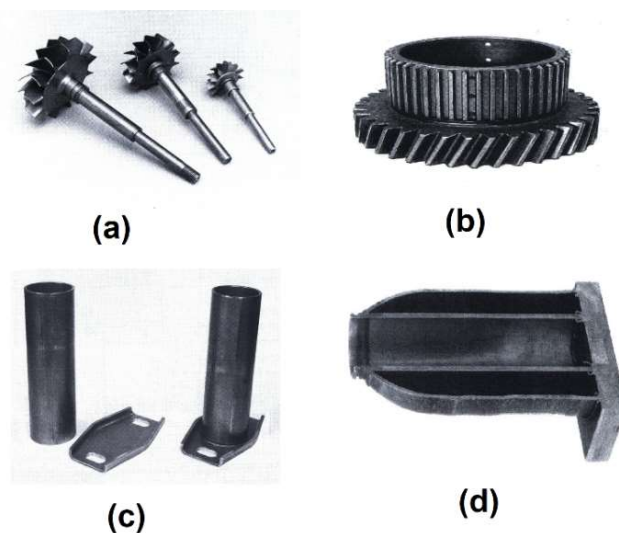


Figure I. 13: a) Pièce d'un turbo. b) Partie d'une boîte de vitesse. c) Partie d'un amortisseur tube soudé à une pièce comprimée. d) Partie d'un cric hydraulique : le tube à double paroi est soudé en une fois [9].

### 5.2.2 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.14) [21].

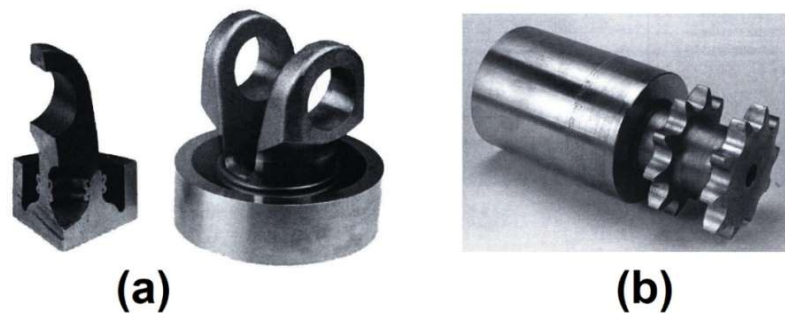


Figure I. 14: a) Piston d'un moteur diesel. b) Remplacement de pièces forgées ou coulées par des profilés standards [9].

### 5.2.3 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.15) [9], ou pour le soudage des tubes de forage [4].



Figure I. 15: Fixation d'une bride à une valve hydraulique [9].

### 5.2.4 L'industrie aéronautique

Généralement le procédé de RFW utilisé pour la production d'axes de turbines [21].

## 6. Conclusion partielle

Le soudage par friction RFW et FSW 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 géométrie des pièces à souder vis à vis aux procédés de soudage par fusion.



## 7. Bibliographie

1. Helal.Y. These de doctorat, *L'effet de soudage par friction sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint soudé composé d'un alliage d'aluminium industriel et un acier*, Université Mohamed Khider de Biskra. 2017.
2. Gerard, M. (s.d.). *Soudage-diffusion hétérogène assisté par friction malaxage cas du couple Al/Fe*. Ecole Centrale de Nantes.
3. Klas.W. *Procédés de soudage*. (p. 160). Paris: Dunod. 2012.
4. Cazes.R , (). *Soudage par friction-malaxage*. Techniques de l'ingénieur. BM7746. Avril.2003.
5. Timesli.A. (s.d.). *Simulation du soudage par friction et malaxage à l'aide de méthodes sans maillage*. 8. Mécanique et Énergétique: Université de Lorraine.
6. K.Elangovan and V. Balasubramanian., *Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in aa2219 aluminium alloy*. Materials Science and Engineering, 459 :7–18, 2007.
7. Chen, Y. and K. Nakata, *Effect of the surface state of steel on the microstructure and mechanical properties of dissimilar metal lap joints of aluminum and steel by friction stir welding*. Metallurgical and materials transactions A, 2008. 39(8): p. 1985-1992.
8. Omrani.P . *Amélioration et nouvelle technologie de soudage*. Nancy: Faculté des Science et Technique Nancy 1. 19 octobre 2009
9. Faes, K.). *Belgisch Instituut voor Lastechniek*. Récupéré sur <http://www.bilbs.be/fr/soudage-par-friction> le: 12/08/2018
10. twi-global. (2018, 12 08). Récupéré sur <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/linear-friction-welding-146>
11. Zheng, Q, *Dissimilar friction stir welding of 6061 Al to 316 stainless steel using Zn as a filler metal*. Journal of Alloys and Compounds, 2016. 686: p. 693-701.
12. Assaf.F. These. *Comportement en fatigue de joints d'aluminium 7075-T6 soudés par friction malaxage parachevés*, Université de Montreal. 2013
13. Chen, Y. C., J. C. Feng, "Precipitate evolution in friction stir welding of 2219-T6 aluminum alloys." Materials Characterization **60**(6): 476-481. 2009.
14. Su, J. Q., T. W. Nelson,"Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium." Acta Materialia, 51(3): 713-729. 2003
15. G.Wang *Study on the Effect of Energy-Input on the Joint Mechanical Properties of Rotary Friction-Welding*. Metals 2018. (al, 6 November 2018)
16. Tongne, A. *Étude expérimentale et numérique du soudage FSW (Friction Stir Welding)*. Saint-Etienne,: Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne 2014
17. Kaufman, J.G., *Properties of aluminum alloys: tensile, creep, and fatigue data at high and low temperatures*: ASM international. 1999
18. B. Guerin. *Soudage d'aluminium*., Saint-Etienne: l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne. 2010
19. Bardel, D, *Residual stresses induced by electron beam welding in a 6061 aluminium alloy*. Journal of Materials Processing Technology, **235**: p. 1-12. 2016.

20. *KUKA Industries Friction Welding Germany 2016. (24 avril 2018).*  
<http://www.kuka.com/fr/technologies/2016/07/soudage-par-friction>.
21. Cazes.R, Soudage par friction. Techniques de l'ingénieur. B 7 745.

# **Chapitre II**

## **Soudage par friction rotative et malaxage**

## 1. Introduction

Ce chapitre est réservé particulièrement aux deux procédés qui ont fait l'objet de ce mémoire et qui sont le soudage par friction rotative et malaxage. Le principe et les paramètres de ces deux types de soudage sont bien détaillés. .

## 2. Soudage par friction rotative (RFW)

### 2.1 Principe de RFW

Le principe du soudage par friction rotation est présenté dans la figure II.1. Supposons que deux axes ou deux tubes doivent être soudés bout à bout. Une des pièces est bloquée, tandis que l'autre est mise en rotation contre l'autre à une vitesse constante à l'aide d'un moteur (soudage par friction en continu). Quand les deux pièces sont mises en contact l'une à l'autre, les forces de friction provoquent un couple de résistance. L'énergie qui en résulte, est transformée en chaleur dans la surface de contact. La chaleur générée augmente la température en un court laps de temps jusqu'à la température de soudage (température de forgeage). La pièce en rotation est ensuite détachée du mandrin, freinée jusqu'à l'arrêt total. Une force de forgeage axiale est exercée afin de réaliser une soudure entre les deux pièces. Durant la phase d'échauffement et la phase de soudage, une quantité de métal plastique est refoulée, sous l'action de la force de pression axiale de telle sorte que l'ébarbure caractéristique du soudage par friction se forme [1].

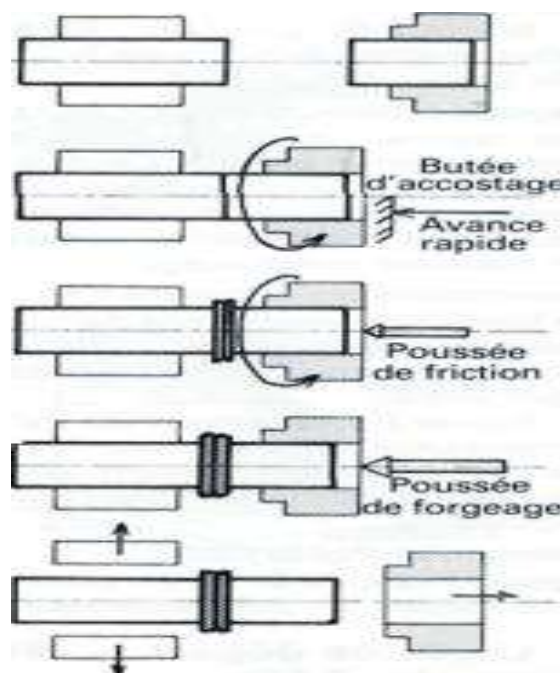


Figure II. 1: Principe de soudage par friction RFW [2].

## 2.2 La machine utilisée

Dans cette partie de ce chapitre on présente La présente une machine de soudage par friction (figure II-2), et qui est composé des éléments suivants :

- **Broche** : son rôle est de recevoir le mandrin tournant auquel elle transmet le couple de friction provenant :
  - du moteur par l'intermédiaire d'un embrayage et d'un frein dans le soudage par friction pilotée ;
  - du volant d'inertie dans le soudage par friction inertielle.

La broche est essentiellement un palier dont l'axe peut être plein ou creux, et dont les roulements sont dimensionnés en conséquence.

À noter la présence éventuelle dans le cas des machines de forte puissance d'un vérin de réaction ou de compensation qui soulage à 80 ou 90 % l'action sur les roulements de la poussée du forgeage.

- **Commande d'avance et bâti de réaction** :

On distingue les deux dispositions classiques :

- les machines à broche fixe et tables mobiles avec séparation des fonctions de rotation et d'avance-effort ;
- les machines à broche mobile en translation.

L'avance est commandée hydrauliquement, car le cycle comporte des phases successives d'approche à vitesse rapide puis lente, ensuite d'appui à divers niveaux d'efforts, difficiles à réaliser autrement.

- **Étaux et mandrins** :

Ils sont sollicités radialement et axialement.

La tenue des pièces est primordiale, et l'expérience montre que la qualité des assemblages dépend en grande partie de la qualité de ces éléments qui reçoivent des sollicitations supérieures à celle des mandrins ou étaux des machines-outils. L'accostage de pièces brutes engendre en effet des efforts erratiques quelconques en direction et en grandeur [3].

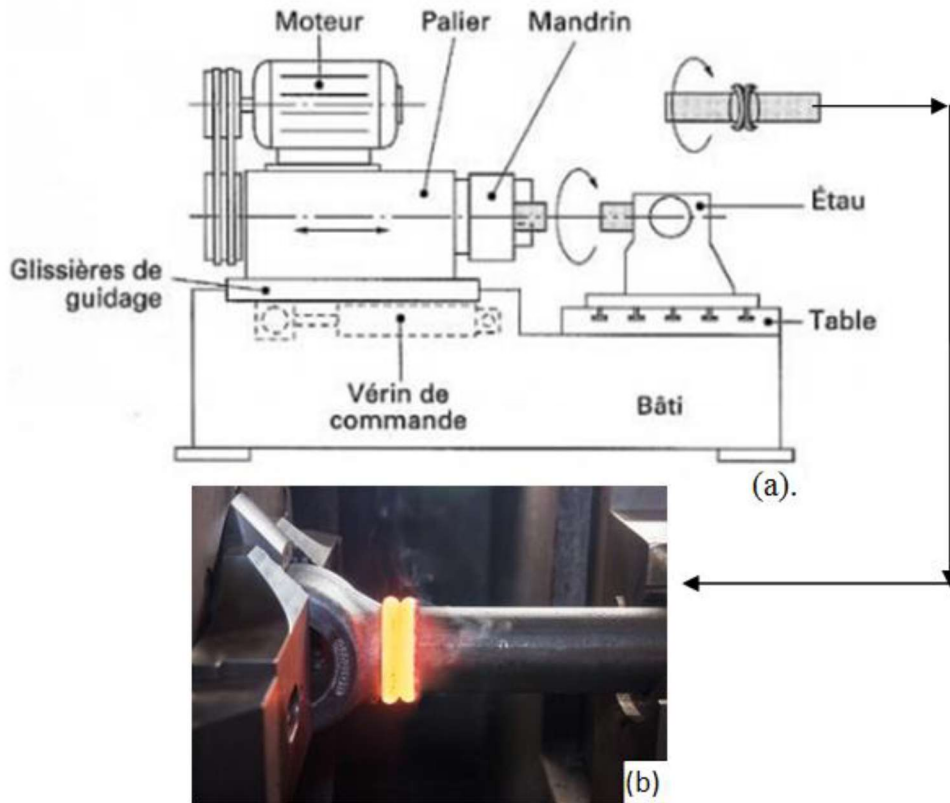


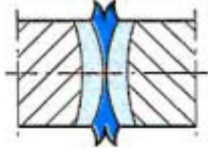
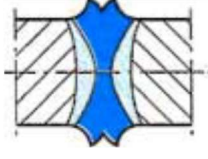
Figure II. 2: (a) Schéma d'une machine de soudage par friction, (b) exemple de soudage pour la fabrication des vérins hydrauliques [4].

### 2.3 Les paramètres de RFW

Les principaux paramètres du soudage par friction rotation à entraînement direct sont la vitesse de rotation, les forces axiales et le temps de soudage. Ces variables déterminent la quantité d'énergie introduite dans la zone de soudure et le taux de génération de chaleur à l'interface. Il est à noter que le taux de génération de chaleur n'est pas constant à travers l'interface de soudure et qu'il varie également au cours des différentes étapes du cycle de soudage. Pendant le soudage, le raccourcissement axial (également appelé retournement ou brûlure) et le couple résistant varient. La variation des caractéristiques des paramètres de soudage par friction en fonction du temps est illustrée dans la figure II-3 . Selon la forme de la courbe de couple de friction, le processus peut être divisé en trois phases. Dans la phase initiale, le couple augmente rapidement pour atteindre une valeur maximale après le début du processus. Il diminue ensuite progressivement jusqu'à la valeur d'équilibre. L'augmentation rapide et la diminution progressive du couple sont associées à la création et à la rupture d'aspérités interférentes et au ramollissement ultérieur du matériau au niveau des surfaces de contact en raison du chauffage par friction [5].

Le tableau II-1 montre des exemples de valeurs de vitesse de rotation et des forces axiale et du temps de soudage.

Tableau II. 1 Les valeurs des paramètres de soudage par le procédé RFW [3].

Temps de soudage	Vitesse ( m /s)	Force (daN/mm <sup>2</sup> )	
2 à 3 s	3 m/s	2 daN/mm <sup>2</sup>	
7 à 8 s	1 m/s	10 daN/mm <sup>2</sup>	

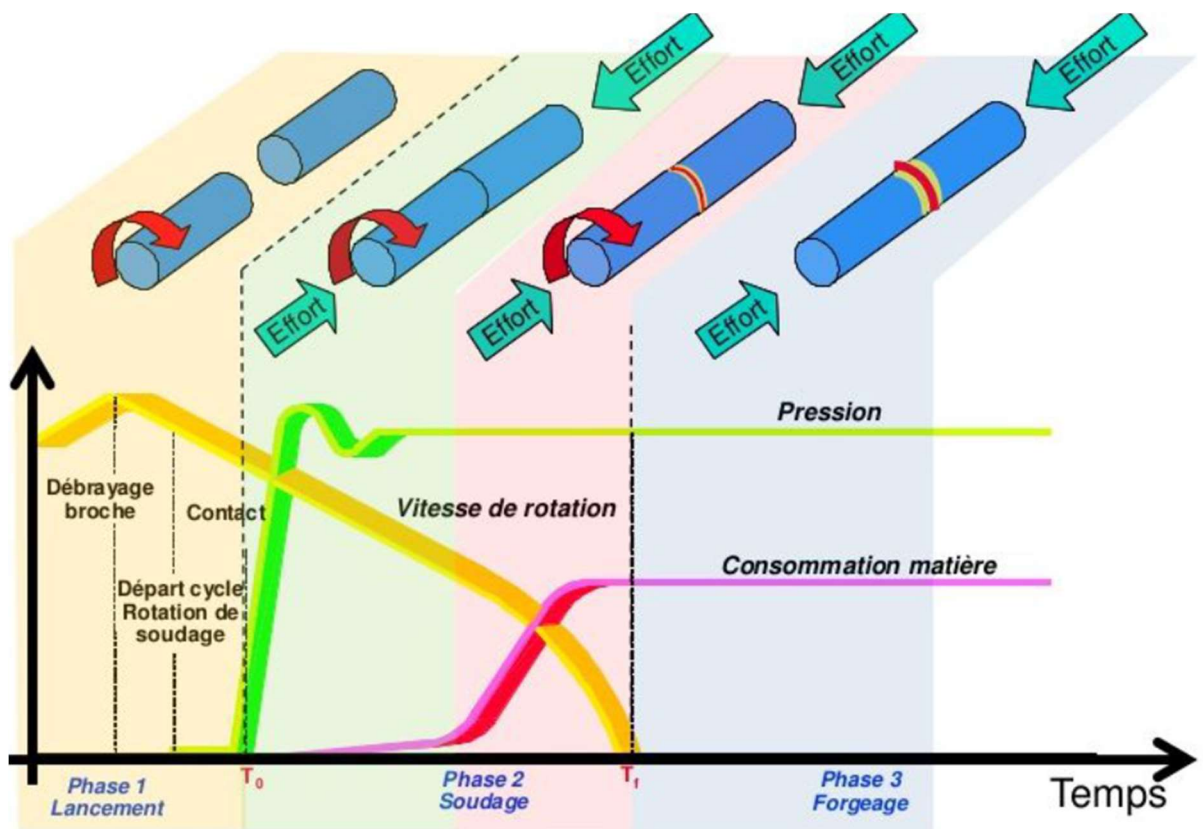


Figure II. 3: Evolution des différents paramétré de RFW [6].

### 3. Soudage par friction malaxage FSW

#### 3.1 Principe de FSW

Le principe général du soudage FSW consiste à assembler des plaques par déformation plastique à chaud ; un flux de chaleur est généré par la friction des matériaux (interface outil / plaque) et également par la déformation plastique dues au malaxage des deux plaques en contact. Les plaques sont fortement bridées afin d'éliminer tout mouvement lors du malaxage (figure II.4 a).

La température des matériaux augmente à cause de ce flux de chaleur, tout en restant en dessous de leur température de fusion, cette chaleur est générée par les grands frottements de l'outil de haute résistance mécanique et thermique avec la surface des pièces à souder. L'outil possédant un épaulement (en anglais "shoulder") réalise une double fonction : malaxage et déformation de la matière, est pion (pin) peut malaxer la matière ramollie et entamant ainsi un mouvement d'avance dans la direction de la ligne de joint à souder pour former la soudure après refroidissement [6].

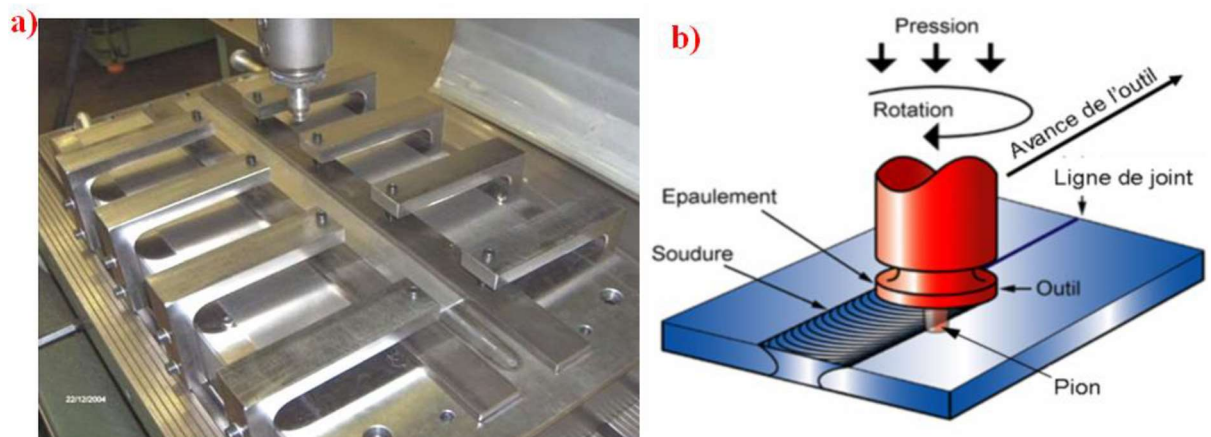


Figure II. 4: a) Exemple de système de bridage [7]. b) Illustration du procédé de soudage par friction et malaxage [8].

#### 3.1.1 La machine utilisée

La Figure II.5 présente le montage FSW. Le montage est constitué d'un dispositif pour le bridage des plaques à souder et d'une table dynamométrique permettant l'enregistrement direct des forces et couples sur les trois axes (x,y,z). La machine de soudage enregistre le courant fourni sur chaque axe ainsi que la puissance fournie à la broche de la machine. Les données de la machine permettent de retrouver les forces



fournies sur chaque axe à partir des données du courant même si on verra par la suite que cette approche n'est pas précise. Le système d'acquisition de la machine et de la table dynamométrique sont programmés à saturer pour des efforts excédant les valeurs critiques afin d'éviter le dommage des composants de ces dernières.

Le pas de temps pour la chaîne d'acquisition de la machine de commande numérique est fixé par le constructeur à 30 ms alors que celui de la table dynamométrique est modifiable et il a été choisi 1ms afin de pouvoir analyser les périodes de variations des efforts dont la fréquence sera le triple de la fréquence de rotation de l'outil "trigone". Par ailleurs, ne disposant pas de système de pilotage en force, mais pour cette machine de la figure II-3, les essais ont été réalisés par pilotage de la machine en déplacement (i.e. la position de l'axe z reste fixe) [9].

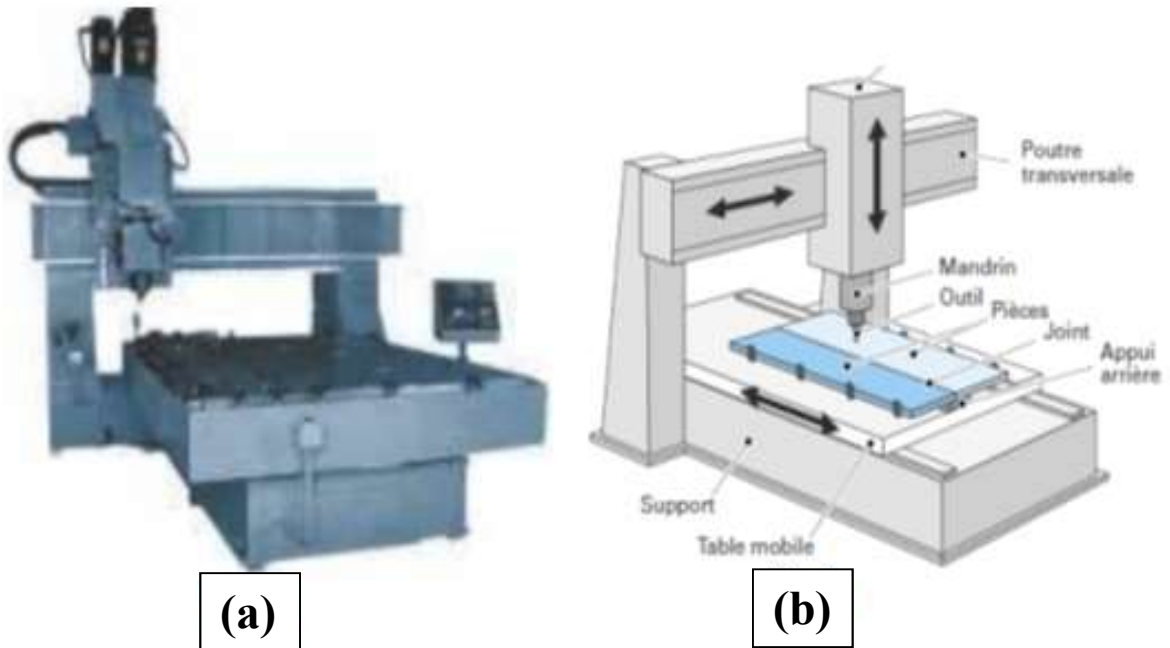


Figure II. 5: a) Machine réel de FSW. b) Schéma de machine FSW [10].

### 3.1.2 Les paramètres de FSW

La qualité du joint de soudage par friction-malaxage est liée à l'apport chaleur et le taux de déformation du joint. Plusieurs paramètres affectent la quantité de la chaleur générée et le taux de déformation dans le joint : la vitesse de rotation de l'outil (tr/min), la vitesse d'avance de l'outil (mm/min) le long de la ligne du joint, l'angle d'inclinaison de l'outil et l'effort de plongée de l'outil dans la matière à souder.[11].

En contrôlant ces paramètres, on peut contrôler la microstructure et la dureté d'un joint FSW.

Les propriétés mécaniques (résistance en traction et en fatigue) sont grandement affectées par la microstructure, la dureté et le fini de surface du joint, et donc les propriétés mécaniques (résistance en traction et en fatigue) du joint soudé par le biais du cycle thermomécanique qu'il engendre. Leurs valeurs optimales varient selon l'outil à utiliser et la nature des matériaux soudés, des épaisseurs soudées, ainsi que de la configuration de soudage (bout à bout, par recouvrement, etc.) [12].

On note que la vitesse d'avance et la vitesse de rotation de l'outil sont des paramètres très importants, qui influencent la qualité des joints FSW [11].

### 3.1.2.1 Vitesses de rotation et d'avance

La vitesse de rotation en soudage par friction malaxage est la vitesse de rotation de l'outil de soudage, par contre la vitesse d'avance est la vitesse de déplacement de l'outil dans la plaque à souder. La combinaison des deux vitesses assure le malaxage de matériaux [5].

Le choix de vitesse d'avance est généralement lié directement à la vitesse de rotation. La vitesse de soudage influe sur les caractéristiques mécaniques des joints obtenus par soudage par friction malaxage. La formation de défauts et des discontinuités sont commandés par la vitesse d'avance.

Plusieurs chercheurs ont étudié l'effet de la vitesse de soudage sur les caractéristiques mécaniques des joints obtenus par soudage par friction malaxage. L'augmentation excessive de vitesse de soudage risque d'induire des défauts internes de type macro-pores et des défauts sous forme de tunnel. [13,14]

### 3.1.2.2 Force exercée par l'outil

Pour effectuer un joint soudé, il est nécessaire d'appliquer une force verticale sur l'outil pour maintenir le contact entre l'outil et les pièces à souder ce qui permet d'assurer l'apport d'énergie par frottement et de contenir le matériau malaxé [15]. Il est suivi soit par le pilotage de la position verticale de l'outil, soit par le contrôle de l'effort vertical appliqué sur l'outil au cours de la phase de soudage. Dans le cas où l'outil est piloté en position, la force est une résultante, elle augmente avec la vitesse d'avance et diminue avec la vitesse de rotation [16].

### 3.1.2.3 Angle d'inclinaison de l'outil

L'angle d'inclinaison de l'outil par rapport à la surface des plaques à souder est un paramètre important à prendre en considération dans l'optimisation du procédé car son choix approprié permet à la matière de passer efficacement de l'avant vers l'arrière du pion. (Figure II.6) [17].

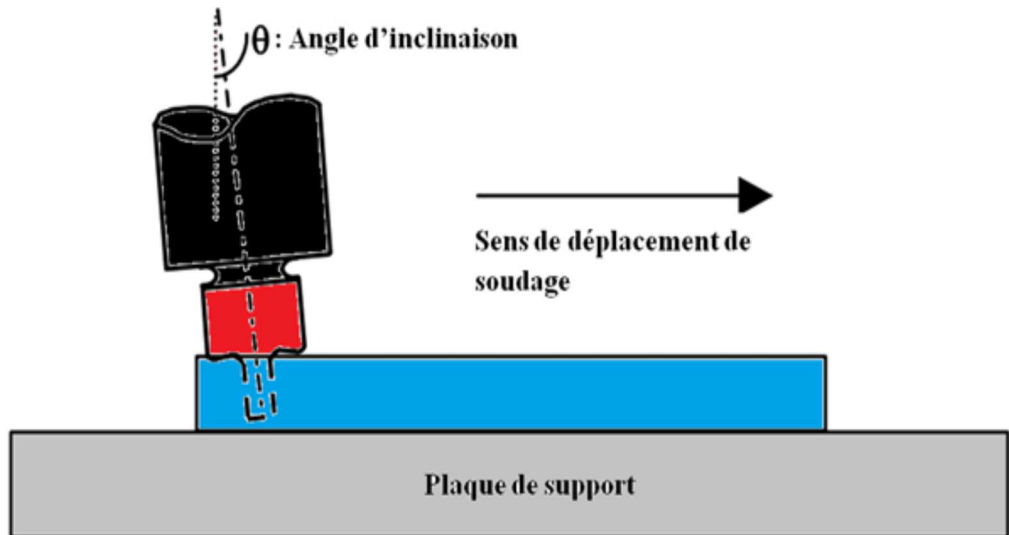


Figure II. 6: Angle d'inclinaison de l'outil [18]

Le tableau II-2 donne un exemple de valeur des paramètres de soudage de l'acier avec l'aluminium par FSW.

Tableau II. 2: Tableau II-2 Valeur des paramètres de soudage de l'acier avec l'aluminium par FSW

Vitesse de rotation	Vitesse d'avance	Angle d'inclinaison de l'outil	Diamètre de l'outil
1200tr/min	200 tr/min	0.5°	20mm.

#### 4. Domaine d'application de soudage des métaux dissimilaires

Souvent utilisé dans l'industrie électrique, pour des liaisons composites de métaux dissemblables :

- cosses électriques (cuivre-aluminium) (figure II.7).
- électrodes de soudage (acier-aluminium). [3]



*Figure II. 7: Cosses aluminium-cuivre soudées par friction [19]*

#### 5. Conclusion partielle

On peut conclure que le contrôle des paramètres de soudage par malaxage ou par rotation donne un joint soudé de bonne qualité mécanique.

## 6. Bibliographie

1. Faes, K. *Belgisch Instituut voor Lastetechniek*. Récupéré sur <http://www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-friction> le : 2018, 12 08
2. Sciences Industrielles pour l'Ingénieur, Téléchargé de [http://gelin.denis.free.fr/Cours/0\\_Soudage\\_cours.htm](http://gelin.denis.free.fr/Cours/0_Soudage_cours.htm) ,le : 14/06/2019
3. Cazes, R. Soudage par friction-malaxage. Techniques de l'ingénieur B7745. avril 2003
4. Pichot, F. ; Corpace, F., *Conception et fabrication des moteurs aéronautiques (27/03/2014)*. Groupe SAFRAN (SNECMA)
5. Helal.Y. (2017). L'effet de soudage par friction sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint soudé composé d'un alliage d'aluminium industriel et un acier. Biskra, Génie Mécanique: Université Mohamed Khider de Biskra
6. Rombaut, p. *Joining of dissimilar materials through rotary friction welding*, Faculty of Engineering GHENT University. 2011
7. Girard, M., et al., *Friction stir diffusion bonding of dissimilar metals*. Science and Technology of Welding and Joining, **15**(8): p. 661-665. 2010.
8. Pauty, E., *Les Carbures cémentés WC-Co*. Matériaux et joints d'étanchéité pour les hautes pressions, **2**: p. 81. 2004.
9. Tongne, A. Étude expérimentale et numérique du soudage FSW (Friction Stir Welding). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne. Saint-Etienne (2014)
10. Cazes.R, Soudage par friction-malaxage. Techniques de l'ingénieur. BM7746. avril 2003
11. Chen, Y. and K. Nakata, *Effect of the surface state of steel on the microstructure and mechanical properties of dissimilar metal lap joints of aluminum and steel by friction stir welding*. Metallurgical and materials transactions A, **39**(8): p. 1985-1992. 2008.
12. Taban, E., J.E. Gould, and J.C. Lippold, *Dissimilar friction welding of 6061-T6 aluminum and AISI 1018 steel: Properties and microstructural characterization*. Materials & Design, **31**(5): p. 2305-2311. 2010.

13. Hussein, S.A., A.S.M. Tahir, and A. Hadzley, *Characteristics of aluminum-to-steel joint made by friction stir welding: a review*. *Materials Today Communications*, **5**: p. 32-49. 2015.
14. Chen, Y., et al., *Interface microstructure study of friction stir lap joint of AC4C cast aluminum alloy and zinc-coated steel*. *Materials Chemistry and Physics*, **111**(2): p. 375-380. 2008.
15. Coelho, R.S., et al., *Microstructure and Mechanical Properties of an AA6181-T4 Aluminium Alloy to HC340LA High Strength Steel Friction Stir Overlap Weld*. *Advanced Engineering Materials*, **10**(10): p. 961-972. 2008.
16. Movahedi, M., et al., *Mechanical and microstructural characterization of Al-5083/St-12 lap joints made by friction stir welding*. *Procedia Engineering*, **10**: p. 3297-3303. 2011.
17. Timesli.A. (s.d.). Simulation du soudage par friction et malaxage à l'aide de méthodes sans maillage. 8. Mécanique et Énergétique: Université de Lorraine. 29 Mar 2018
18. Movahedi, M., et al., Effect of annealing treatment on joint strength of aluminum/steel friction stir lap weld. *Materials & Design*, **44**: p. 487-492. 2013.
19. SOFA, Téléchargé de: <https://sofamaroc.com/produit/cosse-a-sertir-bimetal/>. Le 21/06/2019.

# **Chapitre III**

## **Description des deux machines de soudage réalisées**

## 1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente les deux machines de soudage, c'est à dire par friction rotation et par friction malaxage. De plus, un exemple de soudage réalisé par l'une des machines sera présenté.

## 2. Description des machines réalisées

### 2.1 Machine de soudage par friction rotative.

La figure III.1 montre la vue globale de la machine de soudage par friction rotative.



*Figure III. 1:Vue globale de la machine de soudage par friction rotative.*

Cette machine est composée de deux parties, une partie fixe et une autre mobile :

#### 2.1.1 Partie fixe

Elle est composée de mandrin fixe (figureIII.2 (a)) stable sur la table (figureIII.2 (b)).



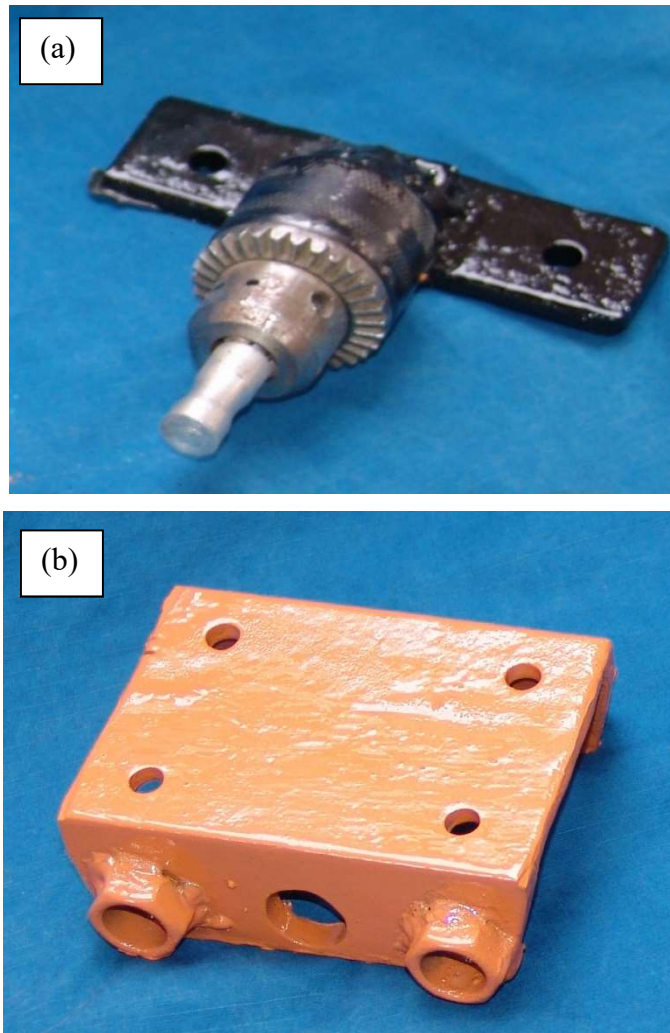


Figure III. 2: Partie fixe de machine de soudage.

### 2.1.2 Partie mobile

Elle est constituée de :

#### a) Moteur électrique (perceuse) :

Les caractéristiques du moteur électrique sont présentées dans le tableau III.1 :

Tableau III. 1: Les caractéristiques du moteur électrique.

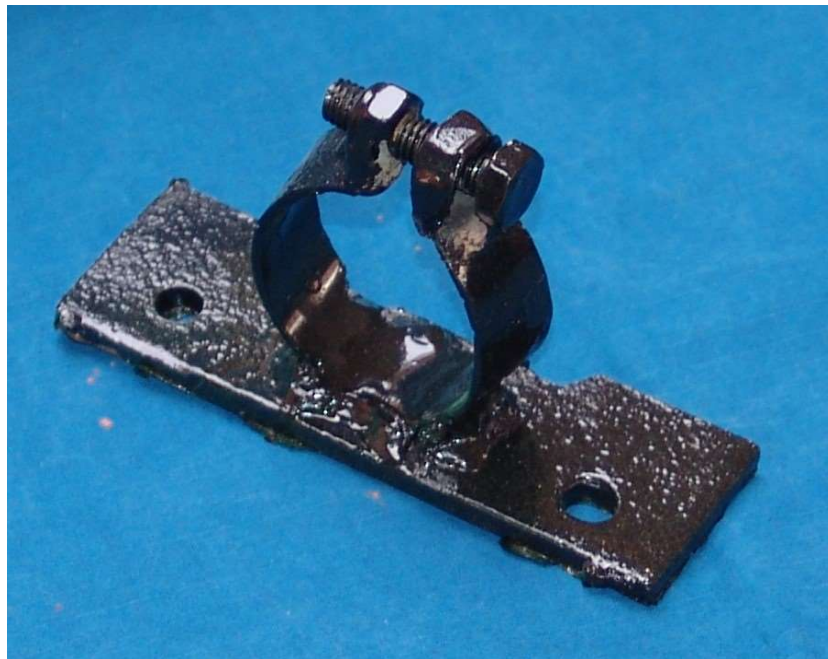
La marque	Voltage	Fréquence	Puissance	Vitesse de rotation
CROWN	220-230 V	50/60 Hz	810 W	2500 Tr/min



*Figure III. 3: Moteurs électrique (perceuse)*

**b) Support moteur**

Ce support permet de fixer le moteur électrique sur la table mobile (figure III.4).



*Figure III. 4: Support moteur.*

**c) Table mobile**

La table est installée sur deux axes, et contient du filetage, cela leur permet de glisser sur les essieux. (Figure III.4)

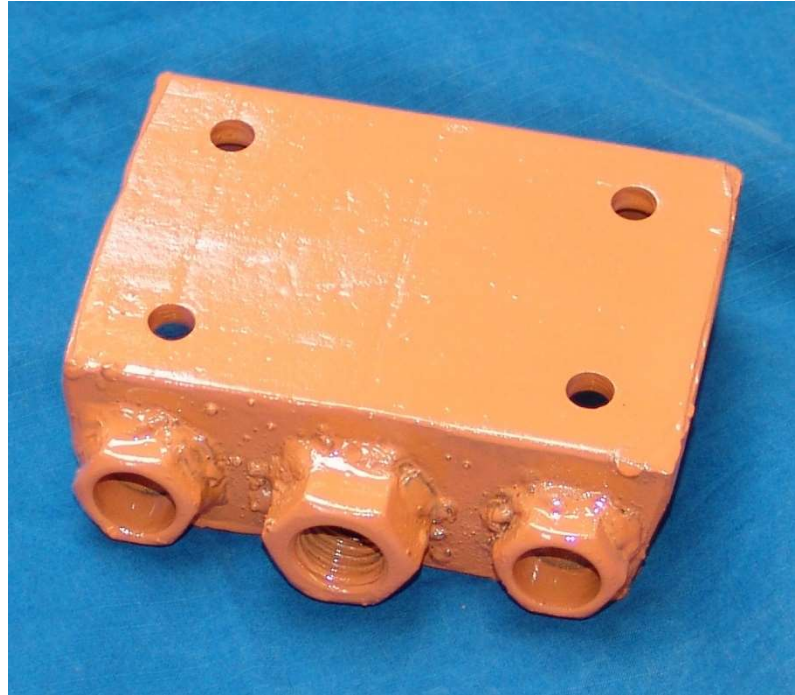


Figure III. 5: Table mobile.

**2.2 Mode de fonctionnement**

Le mode de fonctionnement consiste à suivre les étapes suivantes :

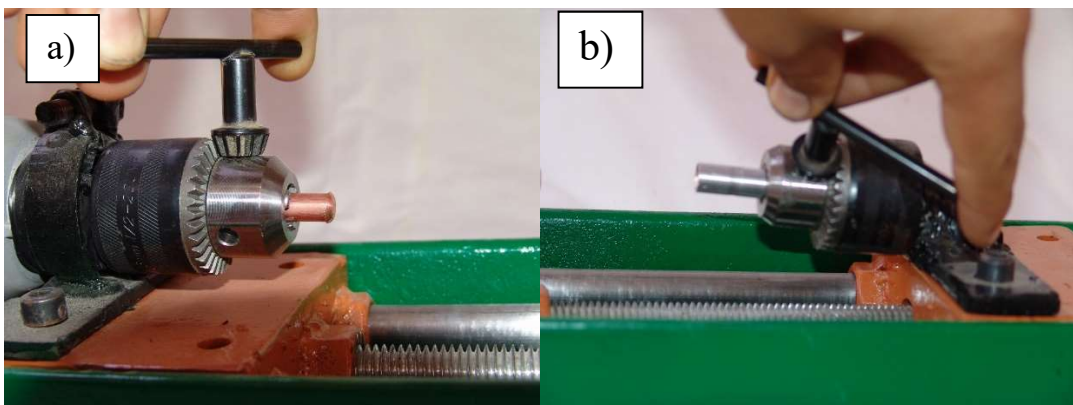
**1- Fixation des métaux à souder (Figure III.6) :**

Figure III. 6: Fixation des métaux à souder. a) fixation de la pièce de cuivre ; b) fixation de la pièce d' aluminium.

- 2- - Déplacement du premier métal vers le deuxième métal à souder (Figure III.7) :

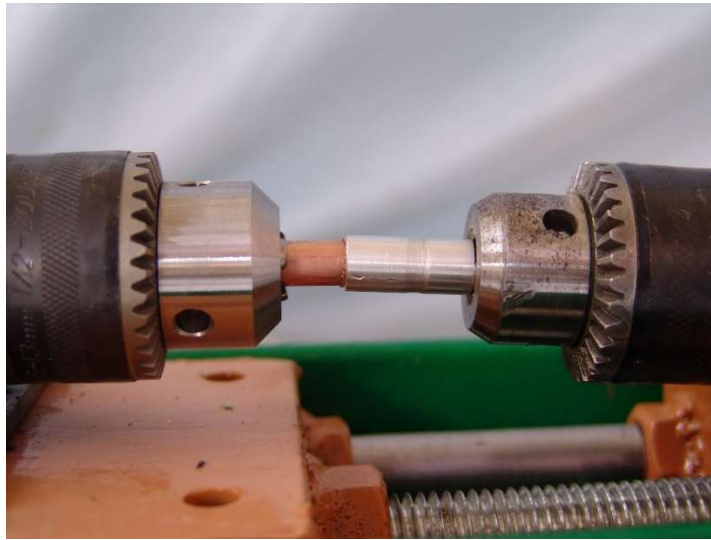


Figure III. 7: Déplacement du premier métal (Cuivre).

- 3- Mise en rotation du moteur électrique ( figure III.7 ) :

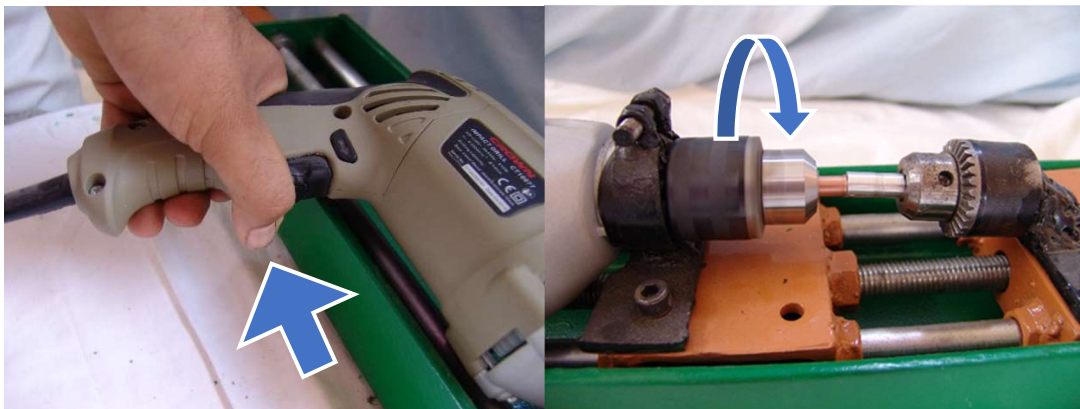


Figure III. 8: Mise en rotation du moteur électrique.

- 4- Arrêt du moteur électrique ( Figure III.9 ) :

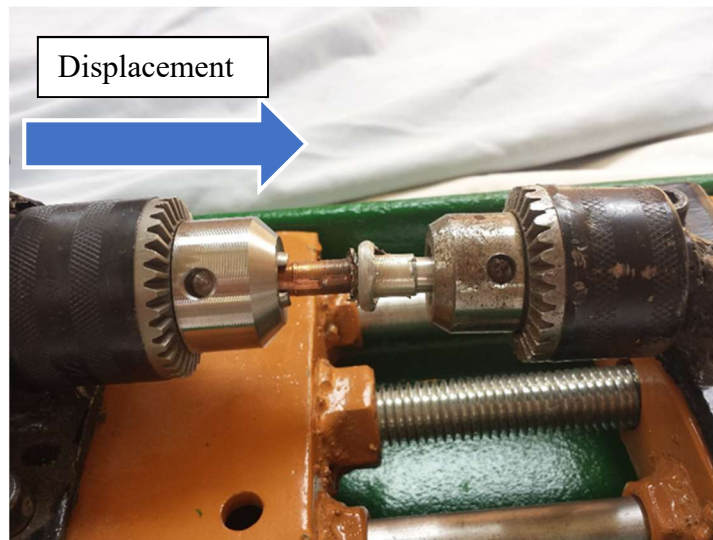


Figure III. 9: Déplacement du premier métal. (Cuivre).

5- Enlèvement des deux métaux soudés ( Fig III.10 ) :



Figure III. 10 : Enlèvement de deux métaux soudés.

### 3. Caractérisation métallographique du joint soudé

Pour l'observation microscopique de l'échantillon soudé, la préparation métallographique est nécessaire et qui consiste à polir cet échantillon en utilisant une polisseuse de type Forcipol (Figure.III.11). Les procédures métallographiques classiques sont suivies avec l'utilisation des différents papiers abrasifs : grades successivement utilisés : 240, 400, 600, 800 et finition 1000, 1200, 2400, 4000 puis brillantage à l'aide d'une pâte diamantée de 1  $\mu\text{m}$  jusqu'à l'obtention d'une surface bien polie (miroir).



*Figure III. 11: Polisseuse de type Forcipol.*

Après polissage, l'échantillon est attaqué chimiquement pour révéler la microstructure du joint soudé. L'attaque chimique est réalisée par l'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) durant 1 s dans la partie cuivre et par le HF dans la partie aluminium. Pour l'observation microscopique, on utilise un microscope métallographique (Fig. III.12).



*Figure III. 12: Microscope métallographique.*

La figure III-13 montre la microstructure du joint soudé des deux métaux. On constate le joint soudé au centre avec la microstructure des deux métaux de base : Cuivre et Aluminium.

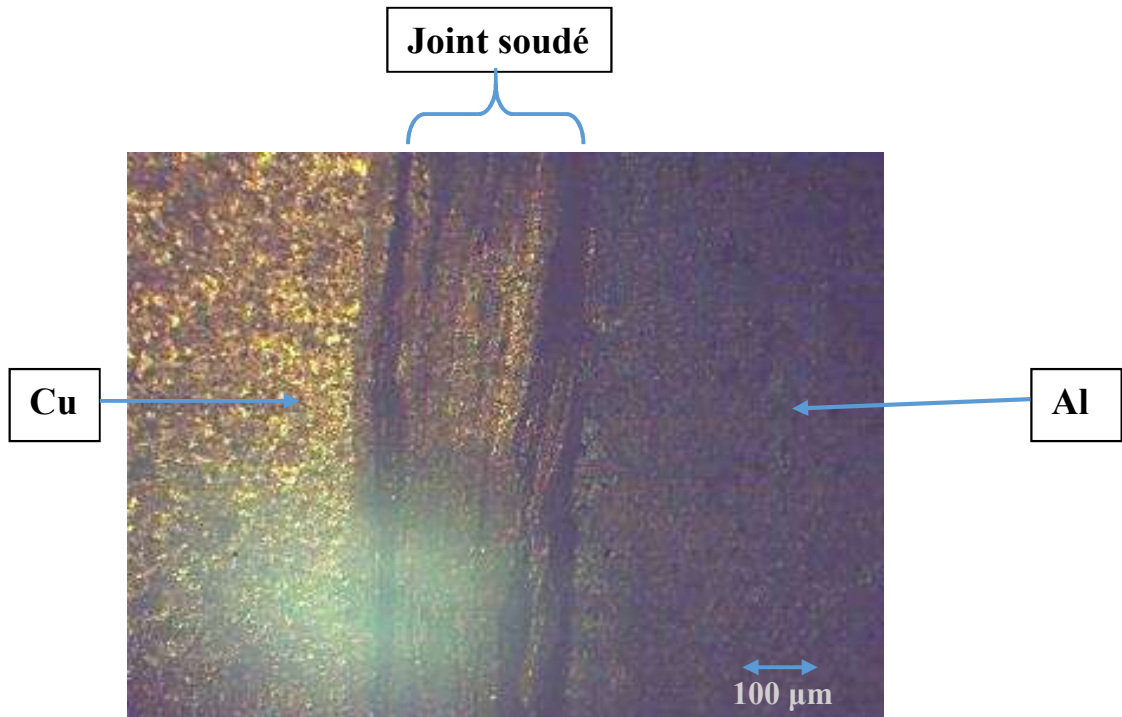


Figure III. 13: Microstructure du joint soudé des deux métaux.

### 3. Machine de soudage par friction malaxage

La figure III.12 montre la vue globale de la machine de soudage par friction malaxage.

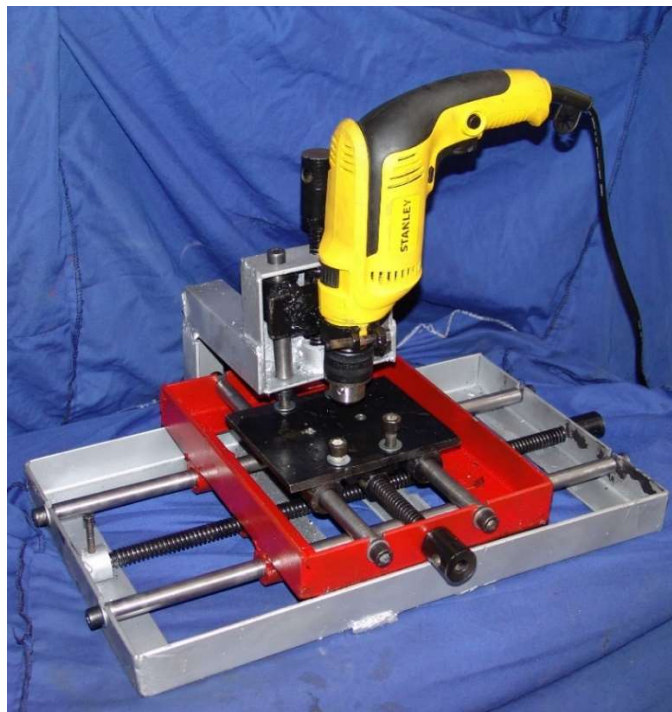


Figure III. 14: Vue globale de la machine de soudage par friction malaxage.

Cette machine est composée de deux parties mobiles, et une partie fixe :

### 3.1. Parties fixes

La première partie mobile est la partie où on fixe le moteur de rotation et qui est lié aussi au mandrin de fixation de l'outil de soudage. Le mouvement de cette partie est vertical, c'est-à-dire de haut vers le bas pour permettre à l'outil de pénétrer dans les deux tôles à souder.

La deuxième partie mobile est la partie de fixation des deux tôles à souder. Le mouvement de cette partie est horizontal pour former un joint de soudure le long des deux tôles.

On note que le moteur utilisé a les caractéristiques suivantes (Tableau III.2)

*Tableau III. 2: Les caractéristiques du moteur électrique.*

La marque	Voltage	Fréquence	Puissance	Vitesse de rotation
STANELY EUROPE	220-240 V	50/60 Hz	700 W	2900 T/m

La partie fixe est le support ou la base de la machine réalisée.

### 3.2. Mode de fonctionnement

Le mode de fonctionnement consiste à suivre les étapes suivantes :

1. Fixation des deux tôles à souder dans la deuxième partie mobile
2. Fixation de l'outil de soudage dans le mandrin.
3. Mise en rotation du moteur électrique.
4. Déplacement de l'outil du haut en bas pour qu'il soit en contact avec les deux tôles (bout à bout).
5. Déplacement horizontal des tôles pour créer le soudage par friction.
6. Déplacement vers le haut de l'outil après avoir terminé l'opération de soudage des deux métaux soudés.



## Conclusion Générale

Le soudage par friction est un procédé utilisé pour assembler les métaux similaires dissimilaires et parfois il est utilisé dans l'assemblage même des matériaux dissimilaires comme le soudage par friction des matériaux céramique avec des matériaux métalliques.

L'objectif de ce mémoire de master était de réaliser deux machines de soudage. La première est pour réaliser le soudage par friction rotation et la deuxième est pour réaliser le soudage par friction malaxage.

Pour aboutir à notre objectif, une recherche bibliographique a été menée pour comprendre ce procédé et aussi avoir une idée sur le principe de fonctionnement de ce type de machine de soudage par friction.

L'effort d'une année de travail nous a permis de réaliser ces deux machines :

- Machine pour le soudage par friction rotation.
- Machine pour le soudage par friction malaxage.

On note que l'une des caractéristiques de ces machines est la possibilité de démonter et de monter à nouveau ces principaux éléments comme le moteur électrique.

Des tests de soudage ont été effectués et qui ont abouti à des soudures des deux métaux similaires et dissimilaires, c'est-à-dire le soudage du cuivre avec de l'aluminium.

En perspective, nous pouvons dire que ces deux machines peuvent être améliorées.

## Résumé

L'objectif de ce mémoire de master est de réaliser deux machines de soudage par friction. La première est pour réaliser le soudage par friction rotation et la deuxième est pour réaliser le soudage par friction malaxage. On note que l'une des caractéristiques de ces machines est la possibilité de démonter et de monter à nouveau ces principaux éléments comme le moteur électrique. Des tests de soudage ont été effectués et qui ont abouti à des soudures des deux métaux similaires et dissimilaires, c'est-à-dire le soudage du cuivre avec de l'aluminium.

## Abstract

The objective of this dissertation of master is to construct two machines for friction welding. The first machine is to perform rotary friction welding and the second machine is to perform friction stir welding. We notice that the main characteristics of these machines are their simplicity to exchange any element like electric motor. Some tests successful of welding have been performed with these machines, by joining similar and dissimilar metals, such as joining copper with aluminum.

## ملخص

إن الهدف من هذه المذكرة هو إنجاز آلتين للتلحيم بالاحتكاك. إن الآلة الأولى تتخصص في التلحيم بالاحتكاك الدوراني، أما الثانية فهي للتلحيم بالاحتكاك والخلط. إن أهم خصوصية للآلتين هي إمكانية تفكيكهما بسهولة. لقد تمكنا من إنجاز تلحيم معدنين مختلفين وهما النحاس مع الألمنيوم.







