REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique

Effet des conditions aux limites sur la distribution de la température et les propriétés mécaniques dans le procédé de Soudage par Friction Malaxage

---

Présenté par :

YAHI AHMED

MAKHLOUF BILAL

Proposé et Dirigé par

Promoteur : MCB : BOUKAA MOUSTAFA

Co-promoteur : MCA : ZIRARI MOUNIR

Promotion 2020

REMERCIÉMENT

*Je remercie tout d'abord **ALLAH** de m'avoir donné la foi, le courage et la confiance en soi, pour pouvoir continuer mes études.*

Au terme de ce travail, c'est avec émotion que je tiens à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet.

*Je conserve un très grand Merci à mon directeur de thèse, **Dr BOUKRAA Moustafa** en lui exprimant ma gratitude et mes profonds dédommagements pour avoir accepté de diriger cette thèse, pour ces aides tout au long de la préparation de ce travail, ses encouragements, et sa modestie pour ses conseils avisés.*

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance au professeur **MOUNIR ZIRARI** qui, en lui exprimant ma gratitude et mes profonds dédommagements pour avoir accepté de diriger cette thèse, pour ces aides tout au long de la préparation de ce travail, ses encouragements, et sa modestie pour ses conseils avisés*

*J'adresse ma reconnaissance à **Dr. TAHER MADANI, Dr MOULOUD ISSANI.***

Qui m'ont aidé dans mon travail expérimental, au laboratoire.

A Mes parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements. A mes chers frères, et soeurs, pour leur appui et leur encouragement.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude."

Dédicaces

Avant tout, je me prosterne devant le tout puissant Allah de m'avoir guidé en si

Bonne voie vers le savoir et la lumière, de m'avoir donné la santé, la force et la

Volonté pour réaliser ce travail, que je dédie :

A la mémoire de mon très cher papa

A ma très chère maman qui me guide et m'encourage à être ce que je suis, avec

Tant d'amour et d'affection.

A mes chers frères : Merzak et Ismail

A mes chères sœurs

A mes amis de toujours : les dés Youssef, Zizou, hacen, Bilal et hamza

A MONSIEUR ZIRARI MOUNIR POUR SON AIDE ET SES ORIENTATION DANS MON DOMAINE

AHMED

Dédicaces

Dédicaces

Avant tout, je me prosterne devant le tout puissant Allah de m'avoir guidé en si

Bonne voie vers le savoir et la lumière, de m'avoir donné la santé, la force et la

Volonté pour réaliser ce travail, que je dédie :

A la mémoire de mon très cher papa

A ma très chère maman qui me guide et m'encourage à être ce que je suis, avec

Tant d'amour et d'affection.

A mes chers frères : Sid Ali ; moussa

A mes chères sœurs

A mes amis de toujours : Moh dob Ahmed ; hacen, Hamza, Ilyas, Rachid

A MONSIEUR ZIRARI MOUNIR POUR SON AIDE ET SES ORIENTATION DANS MON DOMAINE

BILAL

Résume

Le soudage par friction malaxage (FSW) est un procédé de soudage récent, son principe basé sur la transformation de l'énergie mécanique produite par la pression et la rotation d'un outil non consommable, en énergie thermique par le frottement de ce dernier avec les pièces à souder. Par la suite l'assemblage est réalisé sans métal d'apport et sans atteindre la température de fusion du matériau. Bien que plusieurs avantages du procédé FSW par rapport aux procédés traditionnel (soudage par fusion). Tandis que, l'évolution de température durant le procédé FSW a un impact direct sur le changement de la microstructure de matériau (augmentation des grains) ce qui influence directement sur les propriétés mécaniques. Dans ce travail, une étude expérimentale a été réalisée au niveau de l'atelier mécanique du Hall de Technologie de l'université Dr YAHIA FARES Médéa en collaboration avec le centre de recherche en technologies industrielles CRTI d'Alger. Cette étude expérimentale a mis en évidence l'influence des fluides de refroidissement (FSW, UFSW) sur l'histoire thermique et la valeur maximale de température durant le procédé d'FSW de l'alliage d'aluminium AL 2017-T4 d'épaisseur 5mm, en utilisant les même paramètres opératoires tel que la vitesse de soudage, vitesse de rotation, force axiale appliqué et la géométrie de l'outil de soudage. Les résultats obtenus montrant que, les fluides de refroidissement modifient la forme des cycles thermiques et notamment le refroidissement à 'arrière de l'outil ainsi qu'une diminution de 62% dans la valeur maximale de température. Par conséquence Le soudage par friction malaxage sous l'eau (UFSW) est un processus modifié pour surmonter les inconvénients du procédé FSW.

Mots clés : Soudage, FSW /UFSW, cycles thermiques, techniques expérimentale, transfert de chaleur.

ملخص :

لحام الدمج الاحتكاكي (FSW) هو عملية لحام حديثة، يعتمد مبدأه على تحويل الطاقة الميكانيكية الناتجة عن الضغط ودوران أداة غير قابلة للاستهلاك، إلى طاقة حرارية عن طريق احتكاك الأخير مع الأجزاء المراد لحامها .بعد ذلك، يتم إجراء التجميع بدون حشو المعدن ودون الوصول إلى درجة حرارة انصهار المادة.على الرغم من العديد من المزايا لعملية FSWعلى العمليات التقليدية (لحام الانصهار). حيث أن تطور درجة الحرارة أثناء عملية لحام الدمج الاحتكاكي له تأثير مباشر على التغيير في البنية المجهرية للمادة (زيادة الحبوب) التي تؤثر بشكل مباشر على الخواص الميكانيكية .في هذا العمل، تم إجراء دراسة تجريبية على مستوى الورشة الميكانيكية لقاعة التكنولوجيا التابعة لجامعة الدكتور يحيى فارس بل المدية بالتعاون مع مركز أبحاث التكنولوجيا الصناعية CRTI في الجزائر العاصمة .أظهرت هذه الدراسة التجريبية تأثير

سوائل التبريد التلحيم في الماء، والتلحيم في الهواء على الانتقال الحراري وقيمة درجة الحرارة القصوى أثناء عملية FSWلسبيكة الألومنيوم AL 2017-T4 من السماكة 5 مم، باستخدام نفس معلمات التشغيل مثل سرعة اللحام وسرعة الدوران والقوة المحورية المطبقة وهندسة أداة اللحام .أظهرت النتائج المتحصل عليها أن سوائل التبريد تعدل شكل الدورات الحرارية وعلى وجه الخصوص التبريد في الجزء الخلفي من الأداة وكذلك انخفاض بنسبة62 ٪ في قيمة درجة الحرارة القصوى .لذلك فإن اللحام بالتحريك الاحتكاكي تحت الماء (UFSW) هو عملية تم تعديلها للتغلب على عيوب عملية .FSWبالإضافة إلى انخفاض بنسبة62 ٪ في قيمة درجة الحرارة القصوى. نتيجة لذلك، يعد اللحام بالتحريك الاحتكاكي تحت الماء (UFSW) عملية معدلة للتغلب على عيوب عملية FSW.

الكلمات المفتاحية :اللحام، FSW / UFSW ، الدورات الحرارية، التقنيات التجريبية، نقل الحرارة.

Abstract

Friction stir welding (FSW) is a recent welding process, its principle based on the transformation of the mechanical energy produced by the pressure and the rotation of a non-consumable tool, into thermal energy by the friction of the latter with the parts to be welded. Subsequently, the assembly is carried out without filler metal and without reaching the material's melting temperature. Although several advantages of the FSW process over traditional processes (fusion welding). Whereas, the temperature change during the FSW process has a direct impact on the change in the material microstructure (grain increase) which directly influences the mechanical properties. In this work, an experimental study was carried out at the level of the mechanical workshop of the Hall of Technology of the University Dr YAHIA FARES Médéa in collaboration with the industrial technology research center CRTI of Algiers. This experimental study has demonstrated the influence of cooling fluids (FSW, UFSW) on the thermal history and the maximum temperature value during the FSW process of the aluminum alloy AL 2017-T4 of thickness 5 mm, using the same operating parameters such as welding speed, rotational speed, applied axial force and welding tool geometry. The results obtained show that the cooling fluids modify the shape of the thermal cycles and in particular the cooling at the rear of the tool as well as a 62% decrease in the maximum temperature value. As a result, Underwater Friction Stir Welding (UFSW) is a process modified to overcome the disadvantages of the FSW process.

Keywords: Welding, FSW / UFSW, thermal cycles, experimental techniques, heat transfer.

Sommaire

A	**Remerciements**	
B	**Dédicaces**	
C	**Résumé**	
D	**Sommaire**	**1**
E	**Liste des figures**	**3**
F	**Liste des tableaux**	**5**
G	**Introduction générale**	**6**
I	**Chapitre I: soudage par friction et malaxage/ Présentation des Alliages d'Aluminium**	
I.1	**Introduction**	**8**
I.2	**Le procédé de soudage par friction et malaxage**	**8**
I.2.1	**Procédé de soudage par friction malaxage**	**8**
I.2.2	**Principe du procédé de soudage FSW**	**9**
I.2.3	**Différents types de soudage FSW**	**12**
I.2.4	**Principaux paramètres caractéristiques du procédé FSW**	**14**
I.2.5	**Présentation d'un cordon de soudure**	**14**
I.2.6	**Avantages et limitations du procédé FSW**	**16**
I.2.7	**Principaux domaines d'application**	**18**
I.3	**Généralités sur le soudage des alliages d'aluminium**	**21**
I.3.1	**Présentation des alliages d'aluminium**	**21**
I.3.2	**Le soudage des alliages d'aluminium**	**23**
I.3.3	**Soudabilité des alliages d'aluminium**	**24**
II	**Chapitre II : Etude bibliographique**	**25**
II.1	**Introduction**	**25**
II .2.1	**Historique du procédé FSW**	**25**
II .2.2	**Phénomènes physiques**	**26**
II .2.3	**Paramètres du procédé FSW**	**28**
II .2.4	**Transfert de chaleur et écoulement de matière**	**31**
II .3	**Soudages par friction malaxage sous l'eau**	**38**
II .3.1	**Les avantages d'UFSW sur FSW**	**41**

Sommaire

III Chapitre III PROTOCOLE EXPERIMENTAL ET RESULTATS

III PROTOCOLE EXPERIMENTAL

III 1. Introduction 42

III .2.1 Matériau et équipements utilisés 42

III.2.2 Étude thermique 48

III.2.3 Protocoles opératoires du procédé FSW et UWFSW 48

III.3 Résultat 52

III.3.1 Résultat. Analyse des résultats 52

III.3 .2 Cycles thermiques du procédé FSW 52

III.3 .3 Cycles thermiques du procédé UFSW 54

Conclusion générale 58

RÉFÉRENCES 60

Liste des figures

Figure I.1	Machines de soudage FSW de l'Institut de Soudure de Metz (a) Machine ESAB 2D, (b) Machine MTS 3D	**9**
Figure I .2	Procédé de soudage FSW d'un joint bout à bout.	**10**
Figure I .3	Outil de soudage conçu par l'institut de soudage de Metz (IS)	**10**
Figure I .4	Les différentes phases du procédé de soudage FSW	**11**
Figure I .5	Étapes du procédé de soudage FSW par point	**13**
Figure I .6	Aspect d'une soudure réalisé par FSW (soudure bout à bout)	**14**
Figure I .7	Coupe macrographique d'un cordon de soudure de l'AA7020 montrant quatre zones distinctes	**15**
Figure I. 8	Géométrie de joint réalisable par FSW	**17**
Figure I .9	Aspect de réservoir de propergol pour fusée	**18**
Figure I. 10	Mazda Rx-8 (image Mazda)	**19**
Figure I. 11	Voilure d'avion soudée par FSW	**19**
Figure I .12	Soudage de profilé du train Hitachi	**20**
Figure I. 13	Panneaux préfabriqués (Hydro Marine Aluminium) destiné au pondu bateau de croisière "The World"	**21**
Figure II.1	Transferts thermiques induits par le procédé FSW	**27**
Figure II .2	coupe d'une soudure sur un alliage d'aluminium	**28**
Figure II. 3	Diagramme schématique d'UFSW	**39**
Figure III.1	: L'alliage AA 2017-T4 sous forme de tôle.	**42**
Figure III.2	Fraiseuse adaptée à une machine de soudage FSW	**44**
Figure III.3	Schéma montrant les différents éléments de l'outil FSW	**45**
Figure III.4	éléments de l'outil utilisé pour le soudage FSW	**46**
Figure III.5	Ressort à section rectangulaire	**46**
Figure III.6	Thermocouple de type K	**47**
Figure III.7	trou percé des deux tôles	**48**
Figure III.8	protocole expérimentale de FSW	**49**
Figure III.9	protocole expérimentale d'UFSW	**49**

Figure III.10	Schéma illustrant le positionnement des thermocouples pour la prise de températures	**50**
Figure III.11	Représentation schématique de FSW	**51**
Figure III.12	Représentation schématique du procédé UFSW	**51**
Figure III.13	Cycles thermiques dans le procédé FSW à différentes positions le long de la ligne de soudage.	**54**
Figure III.14	Cycles thermiques dans le procédé UFSW à différentes positions le long de la ligne de soudage.	**55**
Figure III.15	Cycles thermiques du procédé FSW et UFSW dans les trois positions des thermocouples a) TC1, b) TC2, c)TC3.	**57**

Liste des tableaux

Tableau I. 1	Classification des alliages d'aluminium	**22**
tableau II .1	présente une comparaison d'UFSW	**39**
Tableau III. 1	Composition de l'aluminium 2017-T4 utilisé pour les soudures	**43**
Tableau III.2	Propriétés mécaniques de (2017)	**43**
Tableau III.3	Propriétés physiques de (2017)	**43**
Tableau III.4	présente les principaux éléments et leur rôle	**44**
Tableau III.5	Position des thermocouples (mm) pour les essais sur tôles de 5 mm d'épaisseur	**50**
tableau III.6	représente les différentes valeurs utilisées pour chaque essai	**52**

Introduction générale

Le soudage par friction malaxage, appelé aussi friction stir welding (FSW) est une technique de soudure inventée au début des années 90 qui permet d'assembler des alliages (tels que les alliages d'aluminium, de cuivre et de titane..) réputés difficilement soudables par les techniques de soudage conventionnels (TIG, MIG-MAG ...). Il convient particulièrement bien aux alliages à bas point de fusion et malléables à chaud. Ces types d'alliages sont principalement utilisés dans le cadre de l'allègement des structures dans les domaines des transports aéronautique, spatiale, terrestre et navale. La modélisation numérique du procédé de soudage par friction malaxage permet de traiter uniquement l'aspect thermique ou thermomécanique. Alors que des études théoriques et expérimentales permettent de comprendre les phénomènes de transfert thermique et l'écoulement de la matière pendant le processus FSW.

Le principe du procédé est simple, un outil possédant un épaulement appelé shoulder et une tige appelée pin pénètre dans les plaques à souder et se déplace longitudinalement en créant un joint de soudure en malaxant le matériau toute en gardant le matériau à une température inférieure à son point de fusion. Les avantages de ce procédé sont nombreux par rapport à la soudure conventionnelle à l'arc. La chaleur requise est moindre lors du FSW, les problèmes liés à la fusion du matériau ne se produisent plus, il y a moins de distorsion des matériaux et la microstructure demeure plus uniforme que celles des procédés conventionnels. De plus, la zone affectée thermiquement souvent source de contrainte résiduelles, est beaucoup plus petite ce qui engendre des propriétés mécaniques s'approchant de celles du matériau de base. Cette technique mérite donc d'être connue, expérimentée et développée surtout pour les alliages d'aluminium reconnus pour être difficilement soudables. Elle est notamment introduite dans divers domaines où les alliages d'aluminium sont largement utilisés tels que l'aviation, l'automobile, la navigation, le nucléaire.

Récemment, le soudage par friction-malaxage sous-marin (UFSW) est un nouveau domaine d'application du FSW tel qu'il est intéressant de réaliser de nouvelles recherches afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques et structurelles des soudures et de réduire les coûts de maintenance navale. L'UFSW est également un processus de soudage à l'état solide, où l'outil passe sur les plaques sous l'eau. Cette technique d'assemblage est toujours en phase de développement et progresse par une évolution en douceur dans l'application navale, notamment dans le secteur de la maintenance des bateaux.

Nous verrons dans un premier temps, qu'il est nécessaire d'établir un 1er chapitre pour la présentation des Alliages d'Aluminium et leur soudabilité par le Procédé FSW. Nous donnons une description du procédé de soudage par friction malaxage, ses paramètres, ses avantages et inconvénients, ainsi que ses applications (I).

Nous devrons également, tenter dans un 2ème chapitre, de présenter un état de l'art, de ce qui a été fait dans le sujet. De même, nous énumérons dans ce chapitre, les travaux des chercheurs dans les domaines de l'influence des paramètres de soudage, la modélisation numérique de FSW, la caractérisation mécanique, et nous avons défini l'amélioration UFSW et mentionné ses avantages par rapport à FSW (II).

Le troisième chapitre est divisé en deux parties : La première partie est le protocole expérimental, nous avons étudié le transfert thermique dans l'air et l'eau pendant le processus de soudage et ceci en installant des thermocouples.

Et la deuxième partie traite des résultats obtenus grâce au protocole expérimental. Nous avons comparé le transfert de chaleur dans l'air et l'eau pendant le processus de soudage dans les deux méthodes (FSW et UFSW).

Chapitre I

Présentation générale

I.1. Introduction

Ce chapitre a été rédigé dans la perspective de répondre à plusieurs interrogations inhérentes à tout travail de thèse : introduction du sujet d'étude et définition du cadre de l'étude.

I.2 Le procédé de soudage par friction et malaxage

I. 2.1 Procédé de soudage par friction malaxage :

Le procédé de soudage par friction malaxage FSW « Friction StirWelding» fût inventé par TWI (The Welding Institut) en Grande-Bretagne pour répondre aux besoins technologiques du transport aérien, naval et ferroviaire. Il est classé parmi les procédés d'assemblage les plus récents et il est considéré comme une nouvelle technique du 21^{ième} siècle. Ce procédé induit des modifications microstructurales, des contraintes résiduelles au niveau du joint et des distorsions difficiles à maîtriser. Néanmoins, il est considéré comme un procédé prometteur des techniques de l'assemblage. Son évolution lui a permis d'être bien placé pour remplacer le soudage à l'arc pour les alliages d'aluminium 5000 et 6000 et le rivetage pour les alliages à durcissement structural tels que lasseries 2000 et 7000 Les équipements du procédé FSW permettent de souder en deux ou trois dimensions et peuvent appliquer des efforts axiaux atteignant jusqu'à 90KN. La rigidité globale de ces machines assure une bonne précision du suivi de joint. De plus, les actionneurs et systèmes de guidage sont conçus pour accuser des efforts importants. Ceci permet de souder une large gamme de matériaux et d'épaisseurs. Les figures I,1a et 1breprésentent les deux machines de soudage par FSW de l'Institut de Soudure de Metz. La machine ESAB (figure I.1a) permet de réaliser des soudures en 2Det la machine MTS (figure I.1b) de type portique à cinq axes permet d'effectuer des soudures en 3D. Les valeurs maximales des caractéristiques des deux machines sont : 89KN pour l'effort de plongée, 2000tr/min pour la vitesse de rotation, 2000mm/min pour la vitesse d'avance et 2 m pour la longueur de soudure.



(a) (b)

Figure I.1: Machines de soudage FSW de l'Institut de Soudure de Metz

(a) Machine ESAB 2D, (b) Machine MTS 3D [1]

I.2.2 Principe du procédé de soudage FSW

Le soudage par friction malaxage utilise le principe de la conversion de l'énergie mécanique produite par la pression et la rotation de l'outil, en énergie thermique par frottement de ce dernier avec les pièces à souder. La chaleur générée engendre des transformations localisées où la matière passe d'un comportement élasto-viscoplastique à haute résistance mécanique à un comportement viscoplastique à faible résistance favorisant la formation de la jonction. L'assemblage est par la suite réalisé en l'absence de métal d'apport et sans atteindre la température de fusion du matériau. Dans ce procédé, la chaleur est générée, d'une part, par le frottement entre un outil métallique entraîné par une vitesse de rotation et une vitesse de translation et les deux plaques à souder, et d'autre part, par la dissipation plastique (FigureI.2).

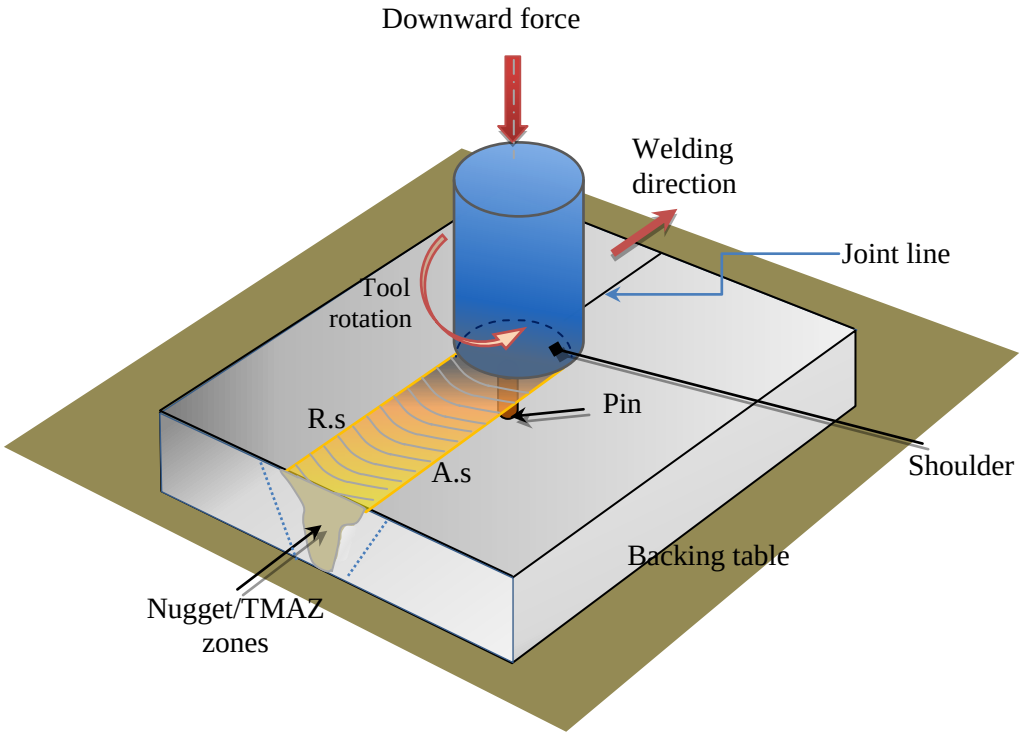


Figure I.2: Procédé de soudage FSW d'un joint bout à bout.

Le procédé de soudage par friction et malaxage utilise un outil à haute résistance mécanique et thermique qui est composé d'une épaule.

Ment (Shoulder) prolongé par un pion (Pin) qui opère le malaxage (Figure I.3).



Figure I.3 : Outil de soudage conçu par l'institut de soudage de Metz (IS)[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, ce qui facilite la pénétration et le déplacement de l'outil le long du joint à souder pour former la soudure après refroidissement. Les matériaux constituants les outils utilisés pour le 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 et elle joue un rôle primordial dans le malaxage de la matière et la génération de la chaleur. Le choix des dimensions et du profil du pion dépend de la nature des matériaux constituant les tôles à souder et de l'épaisseur de ces dernières.

Dans certaines applications, le pion est excentré par rapport à son axe de rotation et cela dans le but d'amplifier le malaxage. Plusieurs recherches sont orientées vers l'optimisation de la géométrie du pion. L'épaulement est globalement plan, ses dimensions transversales restent suffisamment grandes soit environ cinq fois le diamètre du pion afin de couvrir totalement la zone affectée par le soudage. Il joue ainsi deux rôles importants: d'une part, il empêche le métal malaxé d'éclabousser vers le haut et, d'autre part, il chauffe la matière par frottement. Le soudage s'effectue selon les étapes suivantes (voir figure I.4) :

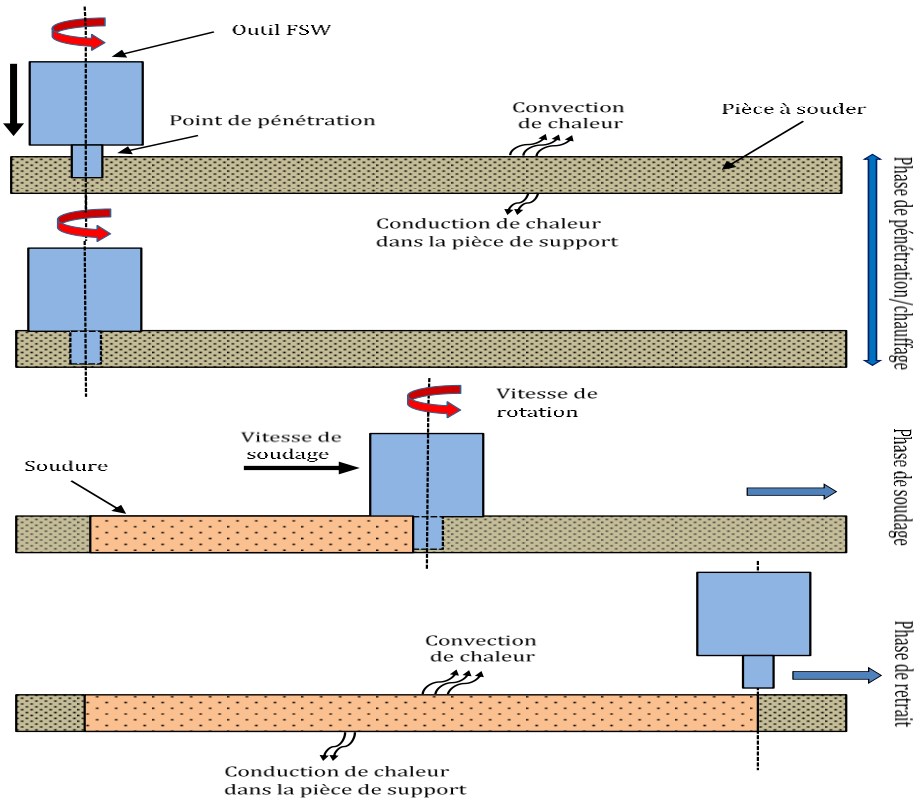


Figure I.4: Les différentes phases du procédé de soudage FSW.

• **Phase de pénétration :** Lors du soudage, l'outil tournant à grande vitesse pénètre lentement dans le plan de joint des pièces jusqu'à ce qu'il y'ait contact entre la surface de l'épaulement et la matière, produisant ainsi un flux de chaleur par frottement. Un effort de maintien est nécessaire pour forger la matière.

• **Phase de chauffage:** Le frottement et le malaxage sont assurés de manière conjointe grâce au pion et à l'épaulement : l'adoucissement de la matière et la géométrie du pion entraînent la formation de la matière extrudée qui remonte le long du pion. La matière extraitepar ce dernier se trouve comprimée et confinée par l'épaulement. La durée de cette séquence est conditionnée par la température moyenne de la zone de contact quiatteint environ 70% de la température de fusion. Généralement cette phase est appelée «Dwell time» ou « temps de maintien» ; elle est indispensable pour permettre à la matière située autour de l'outil d'obtenirl'état viscoplastique adapté pour démarrer l'opération de soudage. La durée de cette phase a été étudiée dans plusieurs travaux expérimentaux antérieurs.

• **Phase de soudage :** Lorsque l'épaulement entre en contact avec le matériau extrudé, l'outil commence à se déplacer le long de la surface de séparation pour achever la jonction. Le pion plongé au niveau de la surface de séparation continue à creuser alors que l'épaulement frotte, malaxe et remet la matière dans le creuxcréé. La matière est ainsi forgée et déformée plastiquement durant toute la phase pour assurer la jonction. Pendant cette phase, la température atteint 0,75 à 0,8 de la température de fusion T_f selon le matériau étudié ainsi que les paramètres opératoires choisis.

• **Phase de retrait de l'outil :** À la fin du soudage, l'outil est retiré des deux plaques à souder. Ce retrait laisse un creux difficile à remplir de façon simple. Ce problème peut être résolu dans le cas des soudures linéaires ouvertes par l'élimination des défauts au début et à la fin du joint soudé. Dans le cas des soudures circulaires fermées, la fin du joint soudé au niveau du recouvrement peut être résolue de façon particulière, par exemple par fusion. De plus, le trou peut être contourné par l'utilisation d'un outil à pion rétractable.

I.2.3 Différents types de soudage FSW

Depuis son invention, le procédé FSW ne cesse d'évoluer dans le domaine de la soudure pour répondre à la productivité industrielle. Trois types de soudures peuvent être réalisés grâce au procédé FSW.

A.Soudage bout à bout :

Le soudage bout à bout consiste à assembler deux pièces mises en contact et généralement immobilisées par bridage pour éviter leurs écartements. Il permet de réaliser des cordons de soudures linéaires (Figure I.4).

B. **Soudage par recouvrement** :

La procédure du soudage par recouvrement est semblable à celle d'une soudure bout à bout qui diffère sur la disposition des pièces à souder. Par conséquent, il y a une complexité additionnelle liée au transfert thermique réel entre les deux pièces. L'outil utilisé pour les joints de recouvrement est différent de celui utilisé pour le soudage bout à bout afin qu'il puisse malaxer les deux matériaux. Les paramètres de processus tels que la pression de l'outil et sa géométrie ainsi que l'iso statisme des tôles jouent un rôle très important dans la qualité de la soudure. Plusieurs recherches sont effectuées pour désigner ce type de soudage, dans le but de remplacer le rivetage principalement dans le domaine aéronautique.

C. Soudage par points

Le procédé de soudage par friction malaxage permet non seulement de réaliser des cordons de soudures longitudinaux, mais également d'effectuer des soudures par points. La figure I.5décrit les différentes étapes du soudage par points. Le principe physique de l'opération reste le même que celui décrit précédemment. Il est notamment utilisé pour le soudage des tôles par recouvrement. L'outil composé d'un pion et d'un épaulement entre progressivement dans la matière. Une fois l'épaulement en contact avec la surface de la pièce supérieure, l'outil en rotation reste sur place pendant un instant appelé « temps de maintien » ou « Dwell time ». Cette phase permet à l'outil de malaxer et de forger la matière, formant une liaison mécanique à l'interface des deux tôles. L'opération de soudage s'achève par la sortie de l'outil. Le pion laisse alors son empreinte dans les pièces. Il est également possible de souder par pointsdes matériaux dissemblables tels que l'aluminium et le cuivre ou l'acier.

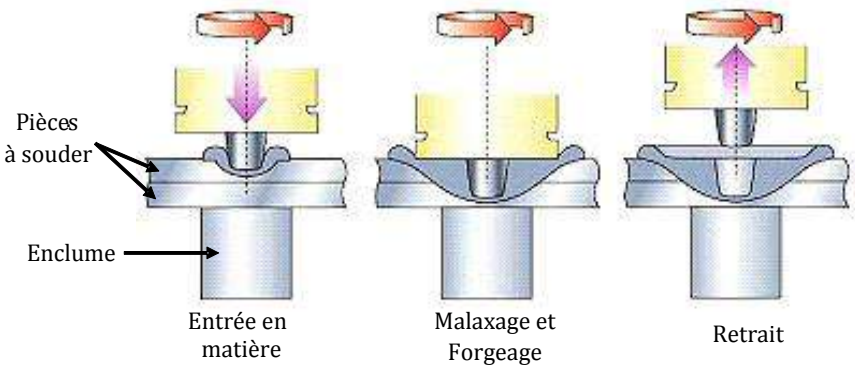


Figure I.5 : Étapes du procédé de soudage FSW par point [3]

I.2.4 Principaux paramètres caractéristiques du procédé FSW

Les paramètres qui gouvernent le procédé de soudage FSW sont notamment :

- La géométrie des plaques et leurs caractéristiques thermomécaniques,
- Le matériau et la géométrie de l'outil,
- La vitesse de rotation de l'outil $\omega = \frac{\pi N}{30}$en (rad/s) avec$N$en (tr/mn), la vitesse d'avance V_a(mm/mn), la pression de contact P(N/m^2) et la force axiale F_z(N).
- Le mode de bridage des plaques.

  Il faut noter par ailleurs que les premières études entreprisessur le procédé FSW introduisent l'inclinaison de l'outil (de 2° à 3°) par rapport à la normale de la surface de contact en tant que paramètre déterminant dans la consolidation de la soudure.

I.2.5 Présentation d'un cordon de soudure :

A. Aspect d'un cordon de soudure réalise par FSW :

La figure I.6 illustre l'aspect extérieur et une coupe transversale d'une soudure réalisée par FSW. Le cordon de soudure se forme entre les deux plaques à assembler sans former de surépaisseur. Il n'est pas nécessaire d'araser les cordons. De plus, il n'y a pas de formation de couche d'oxyde au cours de l'opération de soudage. Ceci permet d'avoir une soudure propre d'un point de vue esthétique, ne nécessitant pas systématiquement d'opération post-soudage ou de traitement spécifique. Dans certains cas, suivant la nature du matériau soudé ou selon son épaisseur, il peut néanmoins se former un excès de matière (bourrelet ou bavure appelé « Flash ») du côté avance (Advancingside), qui nécessites 'être arasé pour des raisons esthétiques ou pour améliorer la tenue en fatigue.

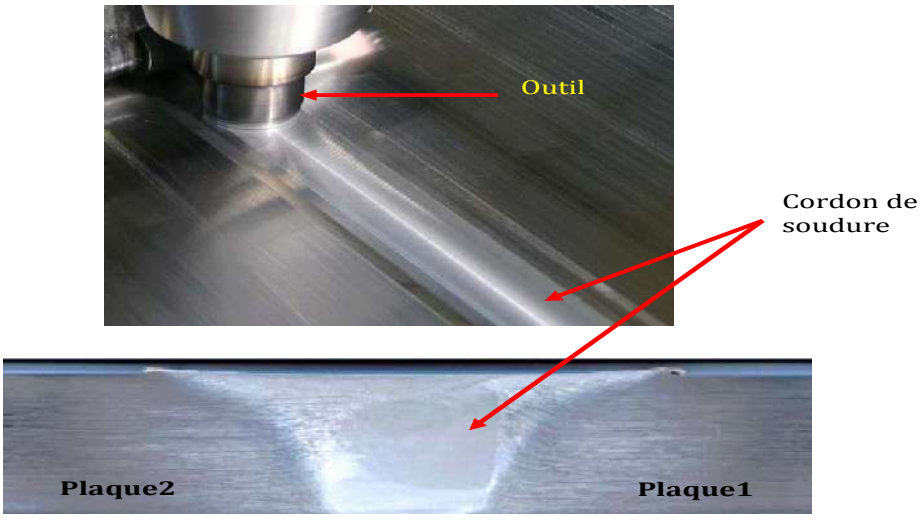


Figure I.6 : Aspect d'une soudure réalisé par FSW (soudure bout à bout)[3].

B. Microstructure des assemblages obtenus par FSW

Lors des opérations de soudages traditionnelles, les températures atteintes dépassent localement les températures de fusion des matériaux. Dans le cas d'un assemblage par FSW, les températures atteintes sont plus faibles mais néanmoins suffisantes pour modifier la microstructure des matériaux de base au voisinage du cordon de soudure. Également dus aux déformations plastiques, ces changements de microstructure modifient les propriétés mécaniques (Dureté, charge de rupture, limite d'élasticité et allongement à la rupture) dans les zones affectées par le soudage.

La Figure I.7 présente les quatre zones caractéristiques d'une soudure FSW observées sur une coupe transversale.

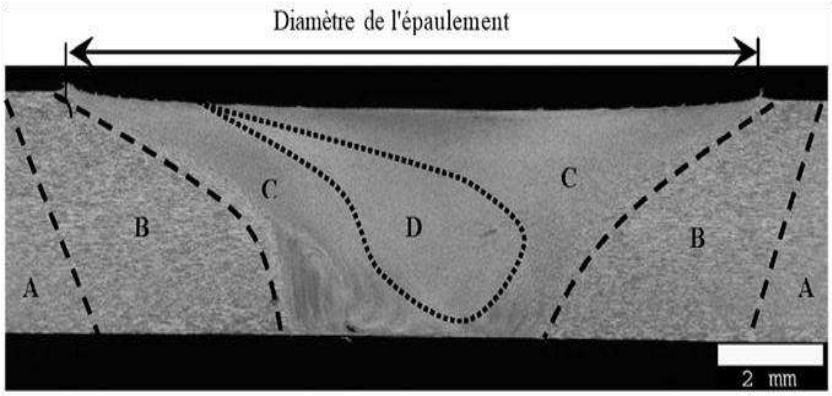


Figure I.7: Coupe macrographique d'un cordon de soudure de l'AA7020 montrant quatre zones distinctes [2].

Métal de Base **MB** (*Zone A*) : les caractéristiques mécanique et métallurgique de cette zone restent invariantes après le soudage.

Zone Affectée Thermiquement **ZAT** (ou **HAZ** : Heat Affected Zone) (*Zone B*): siège des modifications métallurgiques du métal de base. Dans cette zone, le matériau n'a pas subi de déformation plastique mais un changement microstructural dû à l'élévation de la température. Les changements subis dans cette zone sont très semblables à ceux observés dans les zones affectées thermiquement obtenues par les procédés de soudage classiques. La ZAT est généralement une zone critique au niveau des propriétés mécaniques. Elle marque la zone de rupture pour la plupart des essais de traction d'un cordon réalisé par FSW pour un alliage d'aluminium.

Zone Affectée Thermo-Mécaniquement **ZATM** (ou **TMAZ** : Thermo-Mechanically Affected Zone) (*Zone C*): Cette zone est à la fois affectée par la température et la déformation plastique provoquée par le pion. Elle est caractérisée par les déformations plastiques générées par le

mouvement de l'outil. La combinaison du mouvement d'avance et de rotation de l'outil provoque une asymétrie de cette zone par rapport à son axe. Les grains subissent un allongement dans des directions marquant ainsi les directions d'écoulement de la matière autour de l'outil.

Le noyau de la soudure (Zone D) (ou **Nugget**) : subit la plus grande déformation plastique et la température atteint les valeurs maximales. À cette température les précipités présents peuvent se dissoudre et les intermétalliques sont broyés et répartis par la grande déformation plastique. Le noyau subit une recristallisation dynamique. La structure cristalline du métal de base est complètement régénérée pour obtenir une structure plus fine (diamètre des grains de quelques micromètres). Elle se caractérise également par la présence d'ellipses concentriques dites« oignon rings ». Cette zone occupe le centre de la soudure ainsi que la partie supérieure de la zone d'attaque.

I.2.6 Avantages et limitations du procédé FSW :

Par rapport aux procédés de soudage classiques, le procédé FSW possède des avantages qui peuvent être classés comme suit :

A. Avantages liés au procédé :

- Large gamme d'épaisseurs soudables.
- Préparation des surfaces des pièces à assembler par usinage mécanique.
- Pas de décapage chimique avant soudure pour alliages légers.
- Possibilité de souder des matériaux différents.
- Soudure en une seule passe sur toute l'épaisseur, ou en deux passes opposées sur épaisseurs fortes.
- Pas de finition après soudage.
- Procédé sans apport de matière pour la réalisation de la soudure.
- Ce procédé est lui-même la source d'énergie.
- Possibilité de soudure dans toutes les orientations.

B. Avantages liés à la soudure :

- Gamme de matériaux très étendue.
- Possibilité de soudage des alliages qui sont difficiles à souder par les procédés classiques.
- Soudage à l'état solide : pas de solidification du bain de fusion (pas de défaut de porosité et pas de fissuration à chaud).
- Propriétés mécaniques bonnes.

- Effets limités des contraintes résiduelles.

C. Avantages économiques et environnementaux :

- Procédé non polluant ; pas de projections de gaz nuisibles ni d'émanations de fumées.
- Procédé économique en énergie.
- Pas de circulation d'eau de refroidissement.
- Pas de finition après soudage (sauf pour les soudures circulaires).
- Bon rendement énergétique.

D. Avantages liés à l'équipement

- Automatisation facile du procédé ; contrôle par commande numérique.
- Equipement électromécanique de conception simple de type machine-outil.
- Pas de protection thermique.
- Consommables limités à l'outil et à l'énergie électrique.
- Possibilité d'un contrôle en ligne des paramètres.

Ces avantages justifient l'adaptation de ce procédé aux alliages d'aluminium. Le soudage se réalise essentiellement sur des pièces minces bout à bout, mais accepte d'autres configurations de joints tels que le soudage d'angle ou en "T" ou le soudage par superposition. Les différentes configurations possibles pour le soudage FSW sont présentées sur la figure I.8

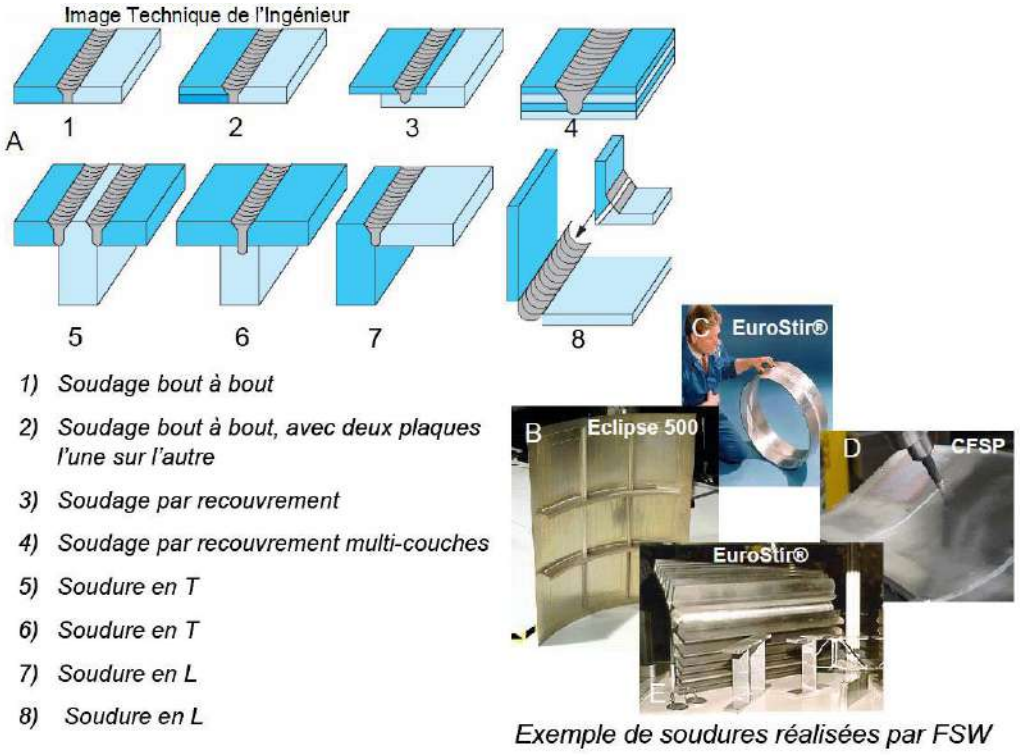


Figure I. 8 : Géométrie de joint réalisable par FSW. [4]

I.2.7 Principaux domaines d'application :

Le procédé FSW est principalement utilisé dans l'industrie de la construction et du transport, telle que l'industrie spatiale, aéronautique, ferroviaire, automobile, maritime… Une liste non exhaustive d'applications du procédé dans différentes industries est présentée ci-dessous. De nouvelles applications voient constamment le jour. Le procédé de soudage par friction malaxage est appelé à connaître un développement important dans les prochaines années [5].

A. Dans le domaine spatial :

Les soudures longitudinales et circulaires des réservoirs à oxygène liquide de la fusée Boeing Delta II et IV sont réalisées avec le procédé de soudage par FSW. En août 1999, la fusée Delta II, possédant des réservoirs soudés par FSW, mettait en orbite 4 satellites de télécommunication [5].

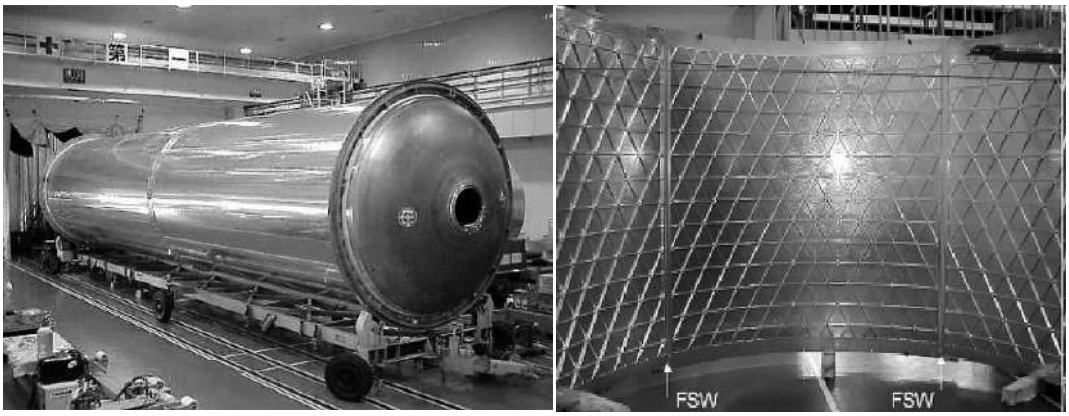


Figure I .9 - Aspect de réservoir de propergol pour fusée,
Section axiale de soudure de FSW

B. Dans le domaine automobile :

Les portes arrière du modèle Mazda Rx-8 (Figure I .10), composées de panneaux
Figure I. 10 - Mazda Rx-8 (image Mazda) d'aluminium, sont soudées par points par
le procédé FSW robotisé

D'autres constructeurs automobiles comme Ford utilisent ce procédé pour l'assemblage d'éléments au niveau de la suspension ou d'ouvrants comme les capots, portières en substitution des techniques plus classiques comme le clichage ou le rivetage.



Figure I. 10 : Mazda Rx-8 (image Mazda)

C. Dans l'industrie aéronautique :

Dans ce secteur industriel, le facteur poids est capital. Le procédé de soudage FSW a un avantage considérable en matière de diminution du poids des structures, facteur influençant directement la consommation en carburant des appareils. Le procédé de soudage FSW offre une alternative au rivetage systématique des différents ensembles. De plus, il permet une réduction du temps au rivetage automatique Airbus a également prévu de mettre en œuvre ce procédé pour le soudage de certaines parties de l'A340 dès 2007 et sur le futur A350 dont la commercialisation est prévue pour 2010.

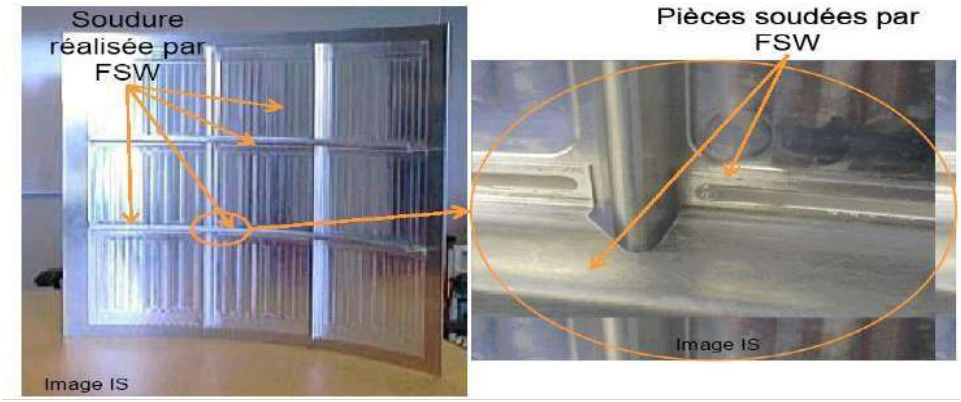


Figure I. 11 : Voilure d'avion soudée par FSW [6]

D. Dans le domaine du nucléaire :

Des études sont en cours en Suède pour le soudage par FSW d'un couvercle de containers en cuivre, destinés à l'enfouissement des déchets hautement radioactifs.

E. Dans le domaine ferroviaire :

Les fabricants européens (ALSTOM, SAPS, …) et japonais (Hitachi) de tramways et de trams utilisent le FSW pour le soudage des profilés d'aluminium extrudés. Il a été montré lors de crash tests que la tenue des rames soudées par FSW est améliorée. Les fabricants ont trouvé

F. Dans le domaine ferroviaire :

Les fabricants européens (ALSTOM, SAPS, …) et japonais (Hitachi) de tramways et de trams utilisent le FSW pour le soudage des profilés d'aluminium extrudés. Il a été montré lors de crash tests que la tenue des rames soudées par FSW est améliorée. Les fabricants ont trouvé avec le procédé FSW un moyen de souder des profilés en aluminium longs en limitant les déformations. Le train, développé et fabriqué par Hitachi représenté sur la Figure (I.12), est composé de profilés d'aluminium soudés par FSW sur toute la longueur.



Figure I .12 : Soudage de profilé du train Hitachi [7]

G. Dans le domaine naval :

Parmi d'autres applications, on notera qu'en 1995 Tend setters, une société scandinave d'aluminium extrudé a été la première à appliquer le soudage par malaxage commercialement pour la fabrication de panneaux creux d'aluminium trempé. Ces panneaux ont notamment été utilisés pour la structure de ponts de bateau [X].De nos jours, les structures légères fabriquées par soudage par friction malaxage ont révolutionné la construction des ferries à grande vitesse, des bateaux de croisières et des hovercrafts.



Figure I.13 : Panneaux préfabriqués (Hydro Marine Aluminium)
Destiné au pondu bateau de croisière "The World" [8]

I.3. Généralités sur le soudage des alliages d'aluminium

I.3.1. Présentation des alliages d'aluminium [9]

L'aluminium non allié présente des propriétés mécaniques très faibles : par exemple, la limite d'élasticité de l'aluminium pur à 99.996% est insignifiante. Ceci limite donc énormément son utilisation et amène à considérer différents alliages d'aluminium. Ces alliages sont obtenus par ajout de certains éléments entrant en solution solide (par substitution ou par insertion) ou formant des précipités avec l'aluminium présent. Ces différents ajouts ont pour but d'améliorer les caractéristiques mécaniques de l'aluminium pur.

Une classification de ces alliages a été élaborée suivant la nature de l'élément majoritaire ajouté : ou distingue les séries lxxx, 2 xxx, 3 xxx, 4 xxx, 5 xxx, 6 xxx et 7 xxx. Il existe d'autres types d'alliages mais ils ne seront pas détaillés dans la suite.

Le tableau 1.1 répertorie le ou les élément(s) majoritaire(s), en plus de l'aluminium, pour chacune de ces sept séries. D'autres éléments entrent aussi dans la composition de ces alliages mais dans des proportions moindres.

Cependant, la classification des alliages d'aluminium peut être effectuée à partir d'autres critères établis en fonction des traitements appliqués lors de l'élaboration de chacun de ces alliages.

Tableau. I. 1 - Classification des alliages d'aluminium.

Classe	**élément(s) majoritaire (s) (autres que l'aluminium)**		
1 xxx	aluminium pur à au moins 99.00% (en composition chimique)	4 xxx	silicium
2 xxx	cuivre	5 xxx	magnésium
3 xxx	manganèse	6 xxx	silicium magnésium
7xxx	zinc magnésium		

Ces différents traitements, ainsi que la composition de l'alliage, permettent d'obtenir les propriétés mécaniques désirées. On retiendra en particulier les distinctions suivantes :

Alliages corroyés ou alliages de fonderie. Les alliages corroyés :

Sont les métaux ayant été travaillés à froid ou à chaud tandis que les **alliages de fonderie** servent à la production de pièces moulées. La série 4xxx est un alliage de fonderie alors que les six autres classes sont des alliages corroyés.

Au sein des alliages corroyés, on distingue :

- **Les alliages à durcissement par écrouissage**, aussi appelés alliages non trempant. Ils regroupent les séries 1xxx, 3xxx (manganèse) et 5xxx (magnésium) dont le durcissement est obtenu par des traitements d'écrouissage et d'adoucissement.
- **Les alliages à durcissement structural**. (alliages trempant). Ils englobent les séries 2xxx (cuivre), 6xxx (silicium-magnésium) et 7xxx (zinc magnésium) dont le durcissement provient de traitements de trempe structurale.

L'ensemble des alliages d'aluminium présente les propriétés générales suivantes :

- La résistance mécanique à chaud (dès 100°C) de ces alliages est très faible. Cette propriété ne permet pas d'utiliser ces alliages pour la conception de mécanismes travaillant à chaud.
- La température de fusion des alliages d'aluminium varie entre 600°C' et 700°C.
- Les alliages d'aluminium sont adaptés aux procédés de mise en forme tels que le laminage, l'emboutissage, le filage.

- Tous les alliages d'aluminium présentent naturellement une couche d'alumine AI2O3 qui les protège des attaques chimiques extérieures.

I.3.2 Le soudage des alliages d'aluminium :

Les techniques de soudage conventionnelles :

Dans cette partie, les différentes techniques de soudage d'alliages d'aluminium conventionnelles sont décrites très brièvement. On ne mentionnera pas la soudabilité en fonction de la technique ; ce point sera abordé dans la partie suivante.

Les différents procédés de soudage des alliages d'aluminium dérivent de l'assemblage des aciers mais ils doivent être adaptés aux spécificités des alliages d'aluminium : présence de la couche protectrice d'alumine, propriétés thermiques et électriques. **[**10**]**

On cite tout d'abord l'ensemble des procédés de soudage à l'arc : le TIG (Tungsten inert Gas) et le MIG (Métal Inert Gas). Ces techniques utilisent un plasma (gaz totalement ionisé, en général de l'argon ou de l'hélium) créé par le passage d'un courant électrique entre les pièces à souder et une électrode. La chaleur dégagée par cette ionisation va amener le métal à la fusion. Le plasma sert aussi à protéger ce métal en fusion de l'oxydation. Ces deux procédés de soudage se distinguent par la nature de l'électrode :

- En soudage MIG, l'électrode est fusible. Le métal en fusion de l'électrode coule dans le bain afin de réaliser la jonction des deux pièces.
- En soudage TIG. l'électrode en tungstène est réfractaire (non fusible). Elle ne participe pas à la formation du cordon de soudure.

Le soudage par point (soudage électrique par résistance) est aussi utilisé pour l'assemblage d'alliages d'aluminium. Son principe consiste à maintenir fortement les deux plaques l'une sur l'autre à l'aide de deux électrodes. Ensuite, un courant de forte intensité traverse les pièces pour créer un noyau fondu à l'interface des deux plaques. Son refroidissement fixera définitivement les deux plaques entre elles.

Le soudage par faisceau d'électrons est un procédé utilisant un faisceau d'électrons pour fondre la matière. Aucun métal d'apport n'est utilisé.

Enfin, mentionnons aussi le soudage laser pour lequel la fusion de la matière est obtenue par un rayonnement monochromatique cohérent et focalisé sur l'interface afin d'obtenir une forte densité d'énergie. On distingue deux techniques particulières : le laser gaz CO2 qui utilisent des puissances très importantes et le laser solide YAG qui utilisent des puissances beaucoup plus réduites.

I.3.3. Soudabilité des alliages d'aluminium

La notion de soudabilité d'un métal décrit sa capacité à supporter le fort apport de chaleur et les changements physico-chimiques générés lors du procédé de soudage. Certains assemblages soudés présentent des défauts localisés engendrant des propriétés mécaniques trop réduites en vue d'une utilisation ultérieure. Parmi ces défauts, on peut citer la fissuration à froid et l'arrachement lamellaire. Ces deux types de défauts apparaissent majoritairement avec des aciers.

La fissuration à froid se produit généralement à basse température (inférieure à 200°C) dans la zone affectée thermiquement ou dans la zone du métal fondu. Ce phénomène se produit lorsque de l'hydrogène se dissout dans le cordon et se retrouve piégé après solidification ; ces poches d'hydrogène seront à l'origine de fissures.

La soudabilité des alliages d'aluminium se confond en général avec la sensibilité de l'alliage à la fissuration à chaud. Ce phénomène se produit lors de la solidification du métal ; il est provoqué par les déformations de la matrice solide en cours de solidification au cours de laquelle des poches de métal liquide se forment au milieu d'une matrice de métal déjà solidifiée. Ces déformations sont causées par deux phénomènes principaux. La contraction de solidification intervient lors du passage de l'état fluide à l'état solide ; ce passage s'accompagne d'une contraction de volume.

De plus, la diminution de température engendre aussi une contraction thermique du solide. En outre, les déformations engendrées par les contraintes extérieures peuvent aussi jouer un rôle non- négligeable. Les fissures sont toujours localisées dans les espaces inter-dendritiques car il s'agit des zones qui se solidifient en dernier. Ces fissures se développent longitudinalement au cordon. Enfin, elles peuvent être internes ou déboucher en surface.

Pour certains alliages d'aluminium, il est possible de l'éviter en ajustant correctement les paramètres de soudage (vitesse et intensité de la source de chaleur, nature du métal d'apport,...). Cependant, ce phénomène est inévitable pour une majorité d'alliages des séries 2xxx et 7xxx soudés à l'arc (MIG-TIG). De plus, certains alliages des séries 2xxx, 6xxx et 7xxx présentent aussi ce problème pour les soudages laser et à faisceau d'électrons |Blondeau, 2001a|. C'est pourquoi, la friction stir welding propose une alternative intéressante dont le but est de pallier ces problèmes de soudabilité pour certaines séries d'alliages d'aluminium.

Chapitre II

Étude bibliographique

Chapitre II : Etude bibliographique

II.1. Introduction

Depuis son invention, le procédé FSW et UFSW est considéré comme un axe de recherche très actif dans le domaine de l'assemblage des métaux. Au début de sa découverte, les FSW et UFSW a été essentiellement appliqués à l'assemblage les alliages d'aluminium, mais avec l'évolution des performances de l'outillage, l'assemblage des alliages d'acier avec d'autres alliages non ferreux a pu être effectué. Au cours de la dernière décennie, de nombreux chercheurs ont contribué au développement de la technique FSW et UFSW afin d'améliorer ses performances et minimiser ses limites d'utilisation. De nombreuses études théoriques, numériques et expérimentales ont été réalisées pour étudier les phénomènes thermiques, les mécanismes de production de chaleur, les flux de matière, les évolutions thermomécaniques, les conditions de contact et les relations mutuelles entre tous ces phénomènes; au cours du procédé de soudage FSW et UFSW. Ce chapitre est consacré à la présentation des différents travaux existant dans la littérature sur le procédé d'assemblage par FSW et UFSW des alliages d'aluminium similaires et distincts, sur la microstructure et les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium soudés, sur l'effet des paramètres du procédé, sur les aspects du transfert de chaleur .

II.1 Etat de l'art du procédé FSW

II.2.1 Historique du procédé FSW :

Le procédé FSW a été inventé, développé et breveté par W. Thomas au Royaume-Uni en 1991 [11] Cette nouvelle technologie de soudage est en pleine phase de développement, bien que déjà appliquée industriellement pour certaines fabrications, notamment en aéronautique, en construction navale et dans le domaine ferroviaire [12,13]. C'est un processus innovant [11,14] qui permet l'assemblage d'alliages d'aluminium de haute résistance (série 2xxx et 7xxx) ainsi que d'autres considérés comme difficiles à souder par les techniques de fusion classiques [14,15]. Dans l'industrie aéronautique il commence à remplacer le procédé conventionnel de rivetage utilisé dans les composants de structure. Plus récemment, ce procédé a même été appliqué au plomb, au cuivre, au magnésium et à l'acier doux. En Algérie, le procédé n'est pas encore exploité, d'où l'idée de la conception et de la réalisation de l'outil de soudage FSW. En 2007, un outil conçu et réalisé a été breveté à l'Institut National Algérien de la Propriété Industrielle (INAPI) [16].

II.2.2 Phénomènes physiques

Les divers phénomènes physiques, mis en jeu pendant le soudage par FSW, sont de trois types

A. Mécanique

En général, les phénomènes mécaniques sont dus au frottement à l'interface entre l'outil et les pièces soudées et à la déformation plastique du matériau. La source de frottement est le contact de l'outil en rotation avec le matériau. Le frottement est caractérisé par une contrainte de cisaillement à l'interface. La déformation plastique trouve sa source dans le mouvement du matériau en rotation sous l'effet du frottement à l'interface outil plaques et dans le malaxage dû au pion. La déformation plastique est importante dans la région située sous l'outil.

B. Thermique :

Les deux phénomènes thermiques principaux au cours du procédé, FSW sont la génération et la conduction de la chaleur. La génération de la chaleur vient d'une source de chaleur surfacique due au frottement à l'interface et une source volumique due à la déformation plastique du matériau. La répartition de la génération de la chaleur entre ces deux sources dépend de la condition de contact entre l'outil et le matériau. En effet, pour un contact presque collant, la chaleur est principalement générée par la déformation plastique du matériau. Par contre, pour un contact glissant, la plus grande partie de la chaleur est créée par le frottement. La chaleur générée est transférée principalement par conduction. Le transfert par conduction dans les pièces soudées dépend de deux choses. Premièrement, il dépend de la conductivité thermique du matériau soudé, par exemple, l'aluminium est caractérisé par une grande conductivité thermique, ce qui contribue à évacuer rapidement la chaleur créée. En second, il dépend de la chaleur évacuée dans la plaque support et dans l'outil c'est-à-dire la résistance des interfaces de contact aux transferts thermiques (voir figure 10).Finalement, la chaleur est évacuée aussi par convection entre l'outil, les deux plaques à souder, la plaque support avec le milieu extérieur (ambiant)

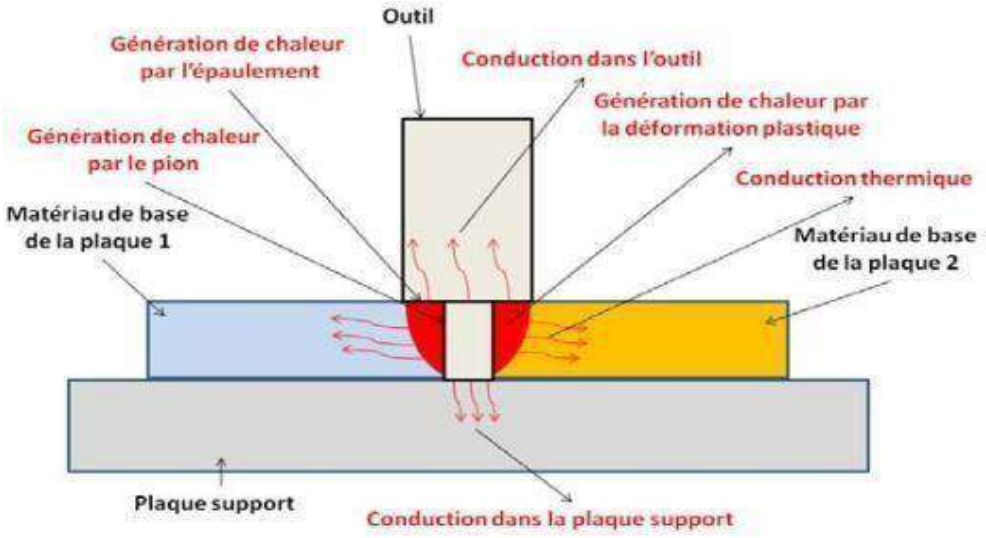


Figure II.1. Transferts thermiques induits par le procédé FSW [9]

C. Métallurgie :

Les phénomènes mécaniques et thermiques, dans l'ensemble des procédés de soudage par fusion, entraînent une modification de la microstructure du matériau de base et ses propriétés mécaniques. Cet inconvénient provient des phénomènes métallurgiques qui apparaissent lors du soudage et qui représentent le lieu de concentration des contraintes dans le cas des sollicitations externes. Le premier phénomène métallurgique est la modification de l'état de précipitation du matériau. Le second est la recristallisation du matériau. Le procédé de soudage FSW permet au contraire d'obtenir des modifications métallurgiques moins importantes, par rapport aux autres procédés, causées par les différents changements de phase au cours de soudage. Une coupe transversale du joint soudé permet d'obtenir les différentes zones dans lesquelles la matière est affectée thermiquement (Heat Affected Zone HAZ) ou thermo-mécaniquement (Thermo-Mechanical Affected Zone TMAZ) (Voir figure 11). Chaque zone dépend de la température atteinte, des modifications métallurgiques et des déformations subies au cours du procédé de soudage.

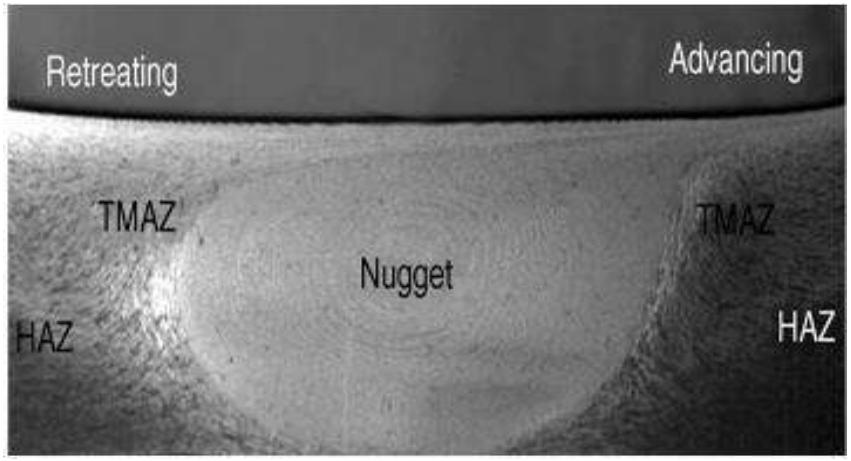


Figure II .2 : coupe d'une soudure sur un alliage d'aluminium

II .2.3 Paramètres du procédé FSW :

Le procédé FSW permet de contrôler les paramètres, en fonction de l'apport d'énergie du système. La vitesse de soudage, la vitesse de rotation de l'outil et la force verticale (force de forgeage) appliquée à l'interface outil/pièce à souder sont les paramètres qui influent le plus sur l'histoire thermique, les écoulements de matière, l'évolution microstructurale et les propriétés mécanique des joints soudés. Il y'a d'autres facteurs qui ont un effet sur les caractéristiques des soudures pendant le procédé FSW, qui tiennent compte du traitement thermique initial de la pièce, du type de matériau et la dureté de l'outil, du matériau et de l'épaisseur de la plaque, du type de refroidissement et du dispositif de serrage. Donc le choix des paramètres qui engendrent des propriétés mécaniques acceptables est une nécessité indispensable si on veut obtenir des joints de bonne qualité soudés par FSW. Les paramètres du procédé ainsi que la géométrie de l'outil (dimension et forme) influencent la production de la chaleur, les écoulements de la matière, l'évolution de la microstructure et les propriétés du joint. L'effet des paramètres du processus FSW et de la conception de l'outil sur l'historique thermique, la distribution de la température, le flux de matière, l'évolution de la microstructure et les propriétés ont été largement étudiées antérieurement. **Mishra et Ma [17]** ont étudié en détail le procédé de soudage par friction malaxage, où les mécanismes responsables de la soudure et de l'amélioration microstructural ont été approfondis. Ils ont examiné l'influence des paramètres du procédé sur la microstructure résultante et sur les propriétés mécaniques finales des joints soudés. **Lee et al [18]** ont étudié les caractéristiques de la soudure des alliages A356 par le procédé FSW. Ils ont mis en évidence une amélioration dans les propriétés mécaniques de la zone soudée pour différentes vitesses de soudage. Ils ont obtenus aussi une amélioration des propriétés mécaniques et de la dureté de la zone soudée par rapport à celle du métal de base (BM). Une réduction notable a été observée sur les

défauts des joints soudés et une résistance à la traction très élevée de la zone soudée. **Liu et al [19]** ont étudié le rapport entre les paramètres de soudage et les propriétés de traction des alliages d'aluminium 2017-T351. Ils ont trouvé une résistance à la traction de 82% de celle du métal de base pour une vitesse de rotation 1500 tr/min, en plus une présence de fracture à la zone qui se trouve entre WN et TMAZ. **Peel et al [20]** ont soudé l'alliage AA5083 par le procédé FSW pour plusieurs conditions et ont rapporté les résultats de l'analyse microstructurale, les essais mécaniques ainsi que l'analyse des contraintes résiduelles. Ils ont constaté que la chaleur d'entrée est plus influente sur les propriétés de la soudure que la déformation mécanique due à l'outil de soudage. **Boz et Kurt [21]** ont étudié l'effet de la géométrie du pion de l'outil sur le soudage de l'aluminium AA1080 par FSW. Ils ont utilisé cinq pions différents, dont l'un a une forme carrée et les autres sont cylindriques avec un pas de vis différent. Ils ont montré que, le meilleur soudage est obtenu avec le pion carré, mais avec des propriétés mécaniques et métallographiques moyenne, à cause de la quantité importante du transfert de matière au cours du procédé. **Lim et al [22]** ont examiné l'effet de la vitesse de rotation et la vitesse de soudage pendant le procédé FSW sur le comportement à la traction de l'alliage AA6061-T651 de 4 mm d'épaisseur. Les plaques ont été soudées à des vitesses de rotation de l'outil de 1000, 1400, 1600, 2000 et 2500 tr/min et des vitesses de soudage de 0,1, 0,2, 0,3 et 0,4 m/min. Ils ont montré que la limite d'élasticité, la résistance à la rupture et l'allongement à la traction sont affectés par ces paramètres, et que l'allongement est réduit avec la diminution de la vitesse de soudage et l'augmentation de la vitesse de rotation. D'autre part, ils ont remarqué que la valeur minimale de la vitesse de soudage et la valeur maximale de la vitesse de rotation donne un bon écoulement plastique de la matière dans la zone de soudage. **Zhao et al [23]** ont étudié l'effet de la géométrie du pion de l'outil de soudage sur la structure et les propriétés mécaniques des joints soudés de l'alliage d'aluminium AA2014. Ils ont montré que l'écoulement plastique de la matière se distingue par la géométrie du pion de l'outil. L'examen microscopique de la zone de soudure et les essais de propriétés mécaniques ont montré que le pion conique en filet produit une meilleure liaison. La face de la soudure ne présente aucun défaut apparent. Les grains du noyau de soudure sont très fins avec une distribution homogène des précipités. **Cavaliere et al [24]** ont analysé l'effet des paramètres du procédé FSW sur les propriétés mécaniques et microstructurales des joints soudés de l'alliage AA6056 produits pour différentes valeurs de la vitesse de rotation (500, 800 et 1000 tr/min) et les valeurs de vitesses de soudage (40, 56 et 80 mm/min). Ils ont effectué des analyses sur la microstructure optique avec des essais de traction à la température de milieu ambiant. Ils ont effectué des tests de micro dureté et des essais de fatigue pour

toutes les valeurs de vitesse de soudage et vitesse de rotation. Ils ont trouvé que les échantillons soudés à la vitesse de soudage de 56 mm/min génèrent un meilleur comportement. **Okuyucu et al [25]** ont développé un modèle artificiel du réseau neuronal pour trouver la corrélation entre les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium soudés par le procédé FSW et ces paramètres. Ils ont utilisé les valeurs de la vitesse de soudage et les valeurs de la vitesse de rotation de l'outil de soudage comme des paramètres d'entrée pour le modèle, tandis que la résistance à la traction, la limite d'élasticité, l'allongement, la dureté du métal du joint et la dureté à la zone affectée thermiquement (HAZ) comme des paramètres de sortie. L'influence des paramètres du procédé sur les propriétés mécaniques obtenues par la simulation montre un bon accord entre les données prédites et mesurées.

Renet al [26] ont étudié l'effet des paramètres de soudage sur les propriétés de la traction et le comportement à la rupture des alliages AA6061-T651 soudés par friction malaxage. Ils ont trouvé que, la vitesse de soudage est un facteur dominant pour la détermination des propriétés à la traction et les modes de rupture des soudures et pour les chemins de la fracture correspondant aux profils de distribution de faible dureté dans les joints. Lorsque la valeur de la vitesse de soudage est élevé (400 mm/min), les soudures présentaient des résistances à la traction plus grandes avec une fracture de cisaillement à 45°. D'autre part, ils ont démontré que lorsque la vitesse de soudage est petite (100 mm/min), la résistance à la traction est faible et les trajectoires de rupture sont verticales. **Scialpi et al [27]** ont étudié l'effet de la géométrie de l'épaulement sur les propriétés mécaniques et microstructurales des joints soudés par friction-malaxage de l'alliage d'aluminium 6082-T6 de 5 mm d'épaisseur. Ils ont considéré trois géométries pour l'épaulement: cylindre filet, cavité et filet. Seulement le cas du filet a été utilisé pour cette étude. Ils ont obtenu pour les plaques minces que l'épaulement avec filet et cavité produisait les meilleurs joints. **Tozaki et al [28]** ont étudié l'influence de l'outil de soudage sur le ramollissement microstructural pendant le FSW et le comportement de vieillissement naturel subséquent pour un alliage d'aluminium 6061-T6. L'échauffement par frottement de l'épaulement de l'outil est la raison principale du ramollissement microstructural et aussi du vieillissement naturel observé dans la zone recristallisée dynamique et la zone affectée thermo-mécaniquement (TMAZ). **Elangovan et Balasubramanian [29]** ont examiné l'effet de la géométrie du pion de l'outil et celui du diamètre de l'épaulement sur la formation de la zone de traitement dans les joints d'aluminium AA6061 soudés par FSW. Ils ont montré que, l'outil avec un pion carré et un l'épaulement de 18mm de diamètre produisait des soudures exemptes de défauts mécaniques et métallurgiques. **Liu et Ma [30]** ont soudé par FSW des plaques d'aluminium 6061Al-T651 de 6 mm d'épaisseur pour plusieurs valeurs des

paramètres que ce soit les paramètres de soudage ou la géométrie de l'outil. Ils ont montré que les valeurs de la dureté pour les zones de faible dureté (ZAT) dépendent principalement de la vitesse de soudage. D'autre part la densité de la précipitation diminue avec l'augmentation de la vitesse de soudage. La rupture des soudures se produit le long de la zone affectée thermiquement ZAT et la résistance à la traction des soudures augmente avec l'augmentation de la vitesse de soudage et elle est indépendante de la dimension de l'outil et de la vitesse de rotation. **Lombard et al [31]** ont confirmé que la vitesse de rotation de l'outil est le paramètre principal régissant le couple de l'outil, la température, la puissance de frottement et donc la résistance à la traction et la performance en fatigue d'AA5083-H321. La résistance à la traction et la durée de vie en fatigue de l'alliage 5083-H321 sont régies par l'effet de la force de frottement sur les processus d'écoulement plastique dans le TMAZ. Les résultats obtenus montrent que les soudures avec une valeur maximale de la vitesse de rotation de l'outil et une valeur minimale de la vitesse de déplacement produisent des propriétés mécaniques améliorées par rapport au métal de base. L'apparition de certains défauts est liée à l'écoulement de la matière. Les contraintes résiduelles de soudure sont gérées par la chaleur dissipée par la pièce à souder. **Rajamanickam et al [32]** ont examiné l'effet de la vitesse de rotation de l'outil et de la vitesse de soudage sur le champ thermique et les propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium AA2014 soudé par friction malaxage. Ils ont montré que la valeur de la température de l'outil dépend fortement de la vitesse de rotation, tandis que la vitesse de soudage est le principal paramètre d'entrée qui a la plus grande influence statistique sur les propriétés mécaniques. **Rodrigues et al [33]** ont analysé et comparé la microstructure et les propriétés mécaniques des soudures par friction-malaxage réalisées sur des plaques de 1 mm d'épaisseur en alliage d'aluminium AA 6016-T4, avec deux outils différents.

II .2.4 Transfert de chaleur et écoulement de matière :

Au cours de la dernière décennie, de nombreux chercheurs ont développé la technique FSW afin d'améliorer ses avantages et minimiser ses inconvénients. Plusieurs études théoriques, numériques et expérimentales ont été consacrées au procédé FSW et plus particulièrement aux phénomènes de transfert de chaleur.

A. Études expérimentales

Les premières études sur les FSW ont été réalisées expérimentalement, en utilisant des thermocouples pour mesurer la température en plusieurs points des plaques à souder. Concernant les écoulements de la matière, des études expérimentales ont été effectuées en injectant des marqueurs à différents endroits des plaques à souder et en dessinant leur position et leur chemin après le soudage.

Tang et al [34] ont montré expérimentalement l'évolution de la température pendant le procédé FSW de l'aluminium AA6061-T6. Ils ont trouvé que la chaleur générée pendant le procédé FSW est principalement due à l'effet du frottement à l'interface outil /plaque à souder. **Hwanget al [35]** ont déterminé les cycles thermiques et la distribution de la température dans les plaques d'aluminium AA6061-T6 pendant le procédé FSW bout à bout. Ils ont mesuré les cycles thermiques en différents points de la pièce en utilisant différents types de thermocouples. Une courbe polynomiale de second ordre a été trouvée pour adapter les valeurs expérimentales de la température le long de la largeur des pièces à souder. D'autre part ils ont effectué des essais de la dureté Vickers et de la traction ; les résultats obtenus sont comparés avec ceux trouvés pour le métal de base. **Li et al [36]** ont présenté les modes des écoulements observés sur des coupes métallographiques pour des plaques d'aluminium hétérogènes 2024/6061 pour des soudures par le procédé FSW, en utilisant une gravure différentielle. Ils ont observé la présence des caractéristiques complexes de tourbillon et un mélange chaotique-dynamique. **Terry Dickerson et al [37]** ont étudié le comportement des écoulements de matière pendant le procédé FSW à l'aide de traceurs. Ils ont analysé l'effet du traceur sur l'écoulement de la matière. Pour définir explicitement l'écoulement de la matière, ils ont choisi les meilleures caractéristiques de définition (X Ray) pour la matière du traceur. Ils ont constaté qu'on peut analyser l'écoulement de la matière suivant l'épaisseur des pièces à souder, lorsque les traceurs de cuivre sont placés le long de la surface de contact au tiers supérieur de la ligne de soudage. **Schmidt et al [38]** ont étudié expérimentalement l'écoulement de la matière. Ils ont évalué la vitesse moyenne de l'écoulement à travers les couches de cisaillement pendant le procédé FSW de l'alliage d'aluminium. Ils ont trouvé que la vitesse moyenne estimée est une fraction de la vitesse de rotation de l'épaulement alors que la technique du traceur a déterminé la position finale des particules fluides mais n'a pas fourni les informations sur la trajectoire réelle de l'écoulement du matériau. **Zhao et al [39]** ont étudié l'écoulement de la matière.

Pendant le procédé FSW de l'alliage d'aluminium AA2014 en utilisant la technique d'insertion du marqueur (MIT). La visualisation a mis en évidence une asymétrie dans

l'écoulement de matière au cours du procédé FSW avec différents modes d'écoulements observés sur le côté amont et aval. Ils ont observé aussi un mouvement vertical et circulaire autour de l'axe longitudinal de la soudure, alors que l'écoulement vertical de la matière est plus visible et sans anomalie« trou » avec le pion fileté. **Kumar et Kailas [40]** ont classé l'écoulement de la matière dans le procédé FSW en deux catégories. Un écoulement entraîné par le pion et le deuxième par l'épaulement de l'outil de soudage. Le premier provoque un transfert de matière sous forme de couches et le second produit un transfert complet de matière et avec des actions engendrant des anneaux en forme d'oignon classique. **Colligan et Mishra[41]** ont étudié l'écoulement de la matière au cours du procédé FSW des alliages d'aluminium 6061 et 7075 en utilisant plusieurs configurations initiales de billes d'acier. Ils ont utilisé la radiographie pour déterminer les positions des billes après le soudage. De plus ils ont utilisé la technique « d'arrêt-action» dans laquelle le déplacement du pion vers l'avant est instantanément bloqué puis dévissé de la pièce, laissant intact le filetage du trou de la serrure. L'examen métallographique du bord de fuite du trou de la serrure présente des bandes microstructurales. Les traces verticales à la surface inférieure indiquent que l'écoulement de la matière vers le haut est dû aux fils du pion, tandis que les traces horizontales près de l'épaulement indiquent l'écoulement rotatif de la matière

B. Etude numérique et analytique :

Plusieurs méthodes numériques ont été mises en œuvre pour simuler les phénomènes engendres pendant le procédé FSW tels que la méthode des différences finies (FDM), la méthode des éléments finis (FEM) et la méthode des volumes finis (FVM), ainsi que d'autres méthodes comme la méthode des particules. Les résultats de ces modèles ont été validés par les résultats expérimentaux disponibles. Le transfert de chaleur et la répartition de la température dans la pièce se sont révélés asymétriques en raison de l'asymétrie de la vitesse de déformation et de la dissipation visqueuse. L'écoulement de la matière est considéré comme dépendant du contact du matériau avec l'outil.

Heurtier et al [42] ont utilisé un modèle analytique pour prédire le champ de température dans la pièce à souder. **Schmidt et Hattel [43]** ont développé un modèle analytique pour calculer la chaleur générée pendant le procédé FSW. Ce modèle a pris en compte à la fois les surfaces de contact et les conditions de contact. En plus, ils ont étudié les mécanismes de la génération de chaleur pour différents modes de contact glissant, collant et glissant/collant. Les conditions de contact ont été déterminées expérimentalement pour chaque valeur de la force de plongée et couple. Ils ont montré que la condition de glissement est proportionnelle à la force de forgeage et à la génération de chaleur, cependant cela n'a pas été bien démontré par la

validation expérimentale. **Roy et al [44]** ont proposé une corrélation sans dimension pour déduire la valeur maximale de la température pendant le procédé FSW. La corrélation présente les lignes entre les propriétés thermiques de la pièce et de l'outil (la surface de l'épaulement, la vitesse de rotation et la vitesse de déplacement). **Heurtier et al [45]** ont proposé un modèle thermomécanique semi-analytique en utilisant les champs de vitesse pour déduire les déformations, les vitesses de déformation, les valeurs des températures et la micro-dureté des différentes zones de la soudure. Le profil de la micro-dureté a été déterminé à partir de l'histoire thermique, alors que la non-homogénéité de la soudure peut être minimisée par la réduction de la valeur moyenne de la température en augmentant la vitesse de l'outil. Le modèle proposé a également détecté la faible zone de la soudure en raison de la distribution d'oxyde après l'opération de soudage. **Vijay Shivaji Gadakh et al [46]** ont établi un modèle analytique pour calculer la chaleur générée pendant le procédé FSW en utilisant un pion cylindrique conique. Les résultats du modèle proposé ont été validés avec les données disponibles dans la littérature. À partir des résultats obtenus, ils ont confirmé que la valeur de la température calculée pour un pion cylindrique conique est faible par rapport à celle du pion cylindrique. En outre, le résultat de la simulation numérique montre que l'augmentation de l'angle du pion conique entraîne une diminution de la valeur maximale de la température. **Haghpanahi et al [47]** ont présenté un modèle analytique 3D transitoire basé sur la méthode de « Green's function » pour déterminer le champ de température au cours du procédé FSW en considérant l'outil de soudage comme une source thermique circulaire qui se déplace le long de la ligne de soudage. Ils ont trouvé que la solution analytique est une méthode adéquate qui permet de déterminer la distribution de la température autour de l'outil FSW, d'autre part les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux obtenus numériquement par le code « ABAQUS ».

Gould et Feng [48] ont développé un modèle simple de flux de chaleur pour corréler la variation du champ thermique avec les paramètres du procédé de soudage. Ce modèle a utilisé une source de chaleur ponctuelle dérivée du modèle de **Rosenthal (1938)** et de **Rosenthal (1941)** qui a considéré seulement le flux de chaleur engendré par l'effet du frottement à l'interface épaulement/pièce à souder. Ils ont proposé plusieurs hypothèses simplificatrices pour obtenir une solution de forme fermée pour le résultat. **Chao et Qi [49]** ont étudié expérimentalement et numériquement le transfert de chaleur dans les pièces à souder et l'outil de soudage pendant le procédé FSW. Ils ont constaté que la plus grande partie de la chaleur est généré par le frottement, est environ 95% de la chaleur engendrée qui est transférée dans les pièces à souder et que seulement 5% se dissipent dans l'outil. D'autre part ce modèle

utilise des conditions de la convection thermique et les propriétés physiques de la matière dépendant de la température. Aussi le modèle comprend une plaque de support et une contrainte de la limite d'élasticité réduite utilisée dans le noyau. L'apport total de chaleur à la soudure et le transfert de chaleur à la surface inférieure ont été modifiés de manière empirique, jusqu'à ce que les valeurs de la température prédite correspondent aux données expérimentales. Ils ont imposé un champ de température calculé pour prédire les contraintes résiduelle et la distorsion. **Frigaard et al [50]** ont développé un modèle thermique 3D pour le procédé FSW basé sur la méthode des différences finies FDM. Ils ont supposé une surface de contact idéale et imposé une valeur de pression à l'interface outil/pièce à souder. Le modèle comprend une période transitoire de chauffage et de refroidissement dans FSW avec plusieurs simplifications. Cependant, la dureté dans le noyau de soudure a été déterminée en utilisant les cycles et les valeurs maximales de la température obtenue. **Khandkar et Khan [51]** ont développé un modèle thermique 3D par éléments finis pour le FSW à chevauchement. Le transfert de chaleur par convection dû au flux plastique a été pris en compte dans le modèle, en plus de la génération de chaleur due à la rotation et à la translation de l'outil de soudage. La conductance de contact entre la plaque de support et la pièce à souder a été exprimée en fonction de la pression de contact à travers l'interface. Ils ont rétabli l'analyse jusqu'à ce qu'ils obtiennent un accord entre les valeurs de températures calculées et les mesures expérimentales. **Dong et al [52]** ont présenté la distribution de la température et l'écoulement de la matière par le procédé FSW, en utilisant plusieurs hypothèses pour simplifier le modèle. Ils ont considéré d'une part que, la chaleur d'entrée est engendrée par les effets de frottements et la déformation plastique du matériau dans la zone de soudage, et d'autre part le coefficient de frottement est supposé constant dans le modèle. Ils ont remarqué un écart pour les valeurs maximales de températures calculées par le modèle proposé dans la partie inférieure du pion de l'outil de soudage, avec les résultats expérimentaux. Cependant, ils ont trouvé une concordance raisonnable à la surface supérieure du pion. Et les résultats obtenus montrent que le chauffage par frottement domine dans la zone supérieure des pièces à souder, tandis que pour la surface inférieure de la soudure, le chauffage est dominé par les déformations plastiques. **Ulysse [53]** a utilisé un modèle tridimensionnel pour déterminer la température et pour analyser les forces exercées sur l'outil pendant le procédé FSW des plaques AA 7050. Il a supposé que le matériau est un fluide rigide viscoplastique ayant une vitesse de déformation, des contraintes de l'écoulement et des propriétés thermiques dépendantes de la température. La chaleur engendrée a été exprimée en fonction de la contrainte effective et par la vitesse de déformation efficace. Il a effectué des mesures par des thermocouples au cours des essais de

soudage. Il a déterminé les valeurs maximales de la température par ce moyen de mesure. D'autre part il a constaté que lorsque la force exercée sur l'outil augmente la vitesse de déplacement augment et diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation. **Song et Kovacevic [54]** ont développé un modèle de transfert de chaleur 3D dans un système de coordonnées mobiles. Ils ont supposé que la chaleur est générée par les forces de frottement à l'interface épaulement/pièce à souder d'une part et d'un autre part à l'interface pion/pièce à souder. La méthode des différences finies(FDM) a été appliquée pour résoudre les équations gouvernantes. Les contours de la température dans la pièce à souder pendant la période de pénétration et de soudage FSW ont été illustrés. Par contre, lorsqu'ils négligent l'effet d'agitation du pion, le profil de température devient symétrique à la ligne de soudage. Il est à noter qu'ils ont utilisé dans le modèle des propriétés thermiques constantes. Dans un autre travail, **Chen et Kovacevic [55]** ont développé un modèle thermomécanique basé sur la méthode des éléments finis pour le procédé FSW. La source de chaleur dans le modèle est due au frottement entre l'épaulement de l'outil, le pion et la pièce à souder avec un coefficient de frottement constant. Ils ont déterminé la répartition des contraintes dans la pièce à souder en utilisant la distribution de température estimée. Des études similaires sur l'analyse de la force générée au cours du procédé FSW et l'effet des paramètres sur ces forces ont été présentées par **Chen et Kovacevic [56]. Terry Dickerson et al [57]** ont calculé le flux de chaleur dans l'outil pendant le processus FSW en utilisant la FEM et ont montré que les rainures introduites dans l'outil réduisent considérablement la chaleur transférée dans les outils avec l'augmentation dans l'efficacité de la soudure. **Buffa et al [58]** ont proposé une simulation numérique par la méthode des éléments finis FEM lagrangien, tridimensionnelle, rigide et viscoplastique pour le procédé FSW. Ils ont examiné l'évolution de la distribution de la température et de la déformation dans la ZAT et le noyau de la soudure. Les résultats obtenus ont été validés avec la distribution de température obtenue expérimentalement. Ils ont constaté que la distribution de déformation effective est non symétrique, tandis que le profil de température et le flux de matière sont symétriques dans la zone de soudure. Cependant, ils ont constaté qu'en augmentant la vitesse de rotation et en diminuant la vitesse de soudage, la largeur de la HAZ est augmentée. Le profil de température est affecté par la vitesse de rotation de l'outil, tandis que l'écoulement du matériau est affecté à la fois par les deux paramètres vitesse de rotation et vitesse de soudage. **Buffa et al [59]** ont examiné l'effet de la forme géométrique de l'outil (cylindrique et conique) et celui de la vitesse de soudage sur le procédé FSW de AA 7075, en utilisant un modèle d'éléments finis couplé rigide-viscoplastique tridimensionnel. Le modèle a prédit différentes quantités physiques (variables)

par cette procédure, le type d'écoulement de matière et la taille des grains des joints soudés. Les résultats obtenus ont été utilisés pour trouver la géométrie parfaite de l'outil et les valeurs de la vitesse de soudage. **Fratini et al [60]** ont mené des études numériques et expérimentales pour examiner l'écoulement de la matière dans le procédé FSW de AA 7075, en variant les valeurs de la vitesse de rotation, vitesse de soudage et la géométrie du pion de l'outil de soudage. Ils ont utilisé une fine feuille de cuivre comme marqueur pour investiguer l'écoulement de la matière. Les résultats obtenus indiquent que la liaison de la matière se situe avant les joints soudés. D'autre part ils ont montré que les outils coniques produisent un écoulement de matière plus uniforme en induisant un mouvement de matière vertical et en empêchant ainsi l'apparition de défauts. **Rajamanickam et al [61]** ont présenté un modèle thermique transitoire tridimensionnel, basé sur la méthode des éléments finis FEM pour déterminer l'histoire thermique au cours du procédé FSW de l'alliage d'aluminium. L'effet de la rotation de l'outil et de la vitesse du soudage sur la répartition de la température et les propriétés mécaniques des joints a été également étudié. Ensuite une expérience a été menée. L'analyse des résultats obtenus indiquent que la vitesse de rotation de l'outil est le paramètre qui influence la température, tandis que la vitesse de soudage est affectée par les propriétés mécaniques des joints.

Pour bien comprendre les phénomènes transitoires du transfert de chaleur à travers différentes géométries d'outil de soudage, **Biswaset et Mandal [62]** ont effectué une étude numérique tridimensionnelle où la chaleur est engendrée par le frottement entre les pièces à souder et l'outil de soudage. Ils ont trouvé que les cycles thermiques obtenus expérimentalement sont en bon accord avec ceux obtenus numériquement par la méthode des éléments finis. D'autre part, ils ont remarqué que la valeur maximale de la température des pièces à souder pour un pion d'outil conique est inférieure à celle d'un pion d'outil cylindrique, cette valeur a été estimée à environ 80% de la température de fusion du matériau (AA1100).Ils ont constaté aussi que la valeur maximale de la température augmente de 13% pour 100% d'augmentation de la vitesse de rotation d'outil. **Muhsin et al [63]** par une simulation numérique tridimensionnelle, ont étudié le phénomène thermique dans le procédé FSW de AA 7020-T53. Ils ont examiné l'effet de la vitesse de rotation, la vitesse de déplacement sur la variation transitoire de la température dans une pièce à souder de 5mm d'épaisseur. Les résultats obtenus numériquement ont mis en évidence une distribution symétrique du champ de température par rapport à la ligne de soudage au cours du procédé. D'autre part, la diffusion de la température augmente avec l'augmentation de la vitesse de rotation et diminue lorsque la vitesse de déplacement augmente. La comparaison avec la température mesurée par les

enregistrements par thermocouples montre que les résultats obtenus numériquement sont en bon accord avec les mesures expérimentales. L'histoire thermique et la vitesse de refroidissement pendant le procédé de soudage FSW sont des facteurs importants pour les caractéristiques thermomécaniques du cordon de soudage. **Colegrove et al [64]** ont présenté un modèle pour prédire la chaleur engendrée pendant le procédé FSW à partir des propriétés thermiques du matériau, de la déformation à chaud, des paramètres du procédé et des dimensions de l'outil et de la plaque. Ce modèle a été utilisé pour optimiser les paramètres du procédé tel que la vitesse de rotation pour un alliage donné, et pour démontrer la sensibilité des paramètres clés tels que le rayon de contact sous l'épaulement, aussi pour le choix des conditions de contact (collage ou glissement). Cependant, le but de ce modèle est de calculer les champs de température directement à partir des propriétés du matériau et des conditions de soudage FSW, sans recours à un logiciel CFD. À partir d'une intégration simple, ces modèles de calcul sont mis au point. **Atharifar et al [65]** ont présenté un modèle CFD pour simuler les écoulements de la matière et le transfert de chaleur dans le procédé FSW de l'alliage d'aluminium AA6061-T6.Ils ont varié les paramètres de soudage pour analyser les charges visqueuses et d'inertie appliquée à l'outil FSW. La puissance totale nécessaire est principalement affectée par la vitesse angulaire, alors que l'effet de la vitesse linéaire sur la puissance ne pouvait être réalisé qu'avec des valeurs importantes de la vitesse angulaire. **Kim et al [66]** ont simulé la vitesse de déformation et l'histoire thermique pour calculer la nucléation, la croissance et le grossissement des précipités, en utilisant une modélisation microstructurale. Ils ont calculé la limite d'élasticité de l'articulation à partir de la distribution des précipités obtenue. **Shi et al [67]** ont développé un nouveau modèle 3D basé sur la mécanique des fluides pour analyser l'effet des paramètres de soudage sur le transfert de chaleur, le couple de l'outil et les écoulements de la matière dans le procédé RDR- FSW à double rotatif inversé. Ils ont constaté que lorsque la distance radiale augmente, les positions et la valeur maximale du taux de la production de chaleur aux interfaces de contact épaulement-pièce changent respectivement de côté recule (RS) au côté avançant (AS) et de AS à RS. Bien que le mouvement contrarotatif pour les éléments (pion, épaulement) de l'outil ait un effet mineur sur la génération totale de chaleur, alors que le schéma des écoulements de matière correspondant et la distribution du débit de chauffage conduisent à une distribution de température plus homogène et un couple beaucoup plus faible.

II .3.1 Soudages par friction malaxage sous l'eau :

UFSW est une modification du FSW dans laquelle l'eau en tant que liquide de refroidissement est utilisée pour normaliser les profils de température existant dans le joint de

soudure [68-69]. Fondamentalement, le soudage est effectué sous l'eau, soit dans un réservoir d'eau, soit dans un état où l'eau coule continuellement à travers la surface de l'échantillon, comme le montre la figure 3.

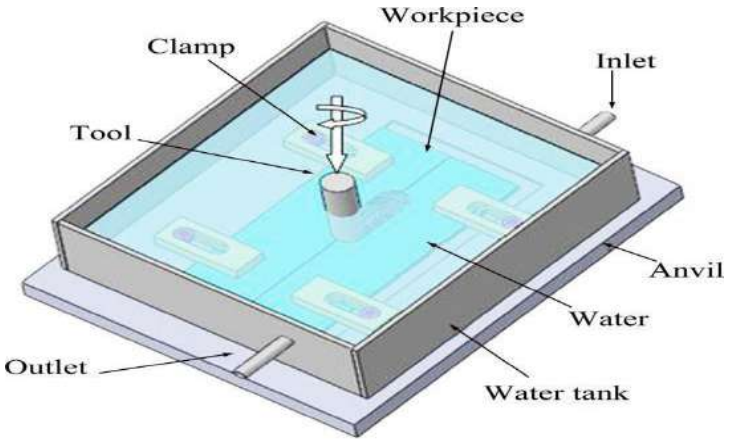


Figure II. 3 : Diagramme schématique d'UFSW [70]

Pendant l'UFSW, la capacité d'absorption thermique élevée de l'eau gère la transmission de la chaleur vers la zone thermo mécaniquement affectée (TMAZ) et la zone affectée thermiquement (HAZ). Ainsi, la faible chaleur existante dans la TMAZ et la HAZ due au refroidissement n'est pas suffisante pour le grossissement des précipités [71]. En outre, la largeur TMAZ et HAZ est rétrécie en limitant l'apport de chaleur et la déformation plastique par UFSW [71, 72]. UFSW donne des propriétés mécaniques

Fissuration. Il fournit également une variation bien établie de la taille des grains dans différentes zones le long du joint et, par conséquent, un joint de soudure de haute qualité est

Produit. Ce procédé convient aux alliages sensibles à la surchauffe pendant le processus de soudage et il est élargi utilisé pour les AA [73]. UFSW adverses applications marines et offshores.

Sous-marins, réservoirs de pétrole et de carburant et diverses structures offshores mis la fabrication et la réparation. L'UFSW gagne en importance en tant que procédé de soudage très précieux en raison de sa capacité à fournir des propriétés mécaniques supérieures à FSW et FW [71,68].

Le tableau II.1 présente une comparaison d'UFSW

Fonctionnalité	FW	FSW	UFSW
Assemblage de différents	Difficile	Facile	Facile

matériaux			
Exécution du processus	Difficile	Facile	Facile
Répétabilité et cohérence	Pauvres	Bien	Bien
Assemblage dans différentes positions de soudage	Pas possible	Possible	Possible
Développement de défauts de soudage, c.-à-d. Inclusion et piégeage de gaz	Important	Ne se produit pas	Ne se produit pas
Défaut de retrait	Haute	Faible	Faible
Exigence de fil d'apport et de gaz de protection	Obligatoire	Ne nécessite pas	Ne nécessite pas
Pré-traitement du matériau de la pièce, c'est-à-dire nettoyage et finition	Nécessaire	Pas nécessaire	Pas nécessaire
Développement des propriétés mécaniques, c'est-à-dire résistance à la traction, dureté et fatigue	Juste	Bien	Excellent dans les AA traitables thermiquement
Exigence pour le serrage de la pièce	Modérer	Rigide	Rigide
Exigences relatives à la plaque d'appui	Dépend du processus	Obligatoire	Obligatoire
Développement de trou de serrure	Ne se produit pas	Développe	Développe
Coût d'investissement pour l'installation	Moins en comparaison	Plus élevé en comparaison	Plus élevé en comparaison
Automatisation de la configuration	Possible	Possible	Possible
Flexibilité du processus	Flexible en comparaison	Moins flexible en comparaison	Moins flexible en comparaison
Technologie verte	Non	Oui	Oui

II .3.2 Les avantages d'UFSW sur FSW sont les suivants :

- L'USFW convient aux matériaux et alliages sensibles à la surchauffe.
- Le développement de la température maximale est plus faible dans UFSW que dans FSW, ce qui limite le grossissement et la dissolution du précipité.
- UFSW fournit les meilleures propriétés mécaniques des matériaux de la pièce que FSW.
- UFSW empêche l'oxydation et offre une meilleure texture de surface que FSW.
- UFSW offre une structure de grain raffinée par rapport à FSW
- L'UFSW est plus adapté aux alliages d'aluminium traités thermiquement car il réduit l'effet de ramollissement.
- Moins de défauts de soudage sont observés en UFSW qu'en FSW.
- Le développement de composés intermétalliques est moins important en UFSW qu'en FSW.
- UFSW réduit les contraintes résiduelles et crée moins de distorsion que FSW.
- L'UFSW est une variante relativement nouvelle de FSW en raison de laquelle très peu d'enquêtes relatives à l'UFSW

Chapitre III

Protocole expérimental
Et
Résultats

III.1 Introduction

Les principaux paramètres de control du procédé de soudage par friction malaxage FSW sont la vitesse de rotation et d'avance de l'outil, la force axiale appliquée sur l'outil, la géométrie de l'outil, le matériau à souder, son épaisseur et la configuration de soudage. Dans certains cas, selon l'équipement utilisé, il est aussi possible de contrôler le coefficient d'échange thermique ente la surface latérale et le fluide de refroidissement. Comme ce paramètre a un effet direct sur les cycles thermiques et la distribution de température et par conséquence sur la qualité des soudures, des essais expérimentaux sont réalisés pour comprendre et analyser leurs effets. Ainsi pour étudier l'effet de coefficient d'échange thermique nous avons effectuée deux expériences dans lequel les plaques d'aluminium d'alliage 2017 sont assemblées par le procédé FSW avec deux fluides différents de refroidissements (l'aire de milieu ambiant et l'eau de la mer).

III.2 Matériau et équipements utilisés

1. Matériau

Les soudures ont été réalisées sur des tôles d'épaisseur 4 mm d'alliage d'aluminium AA2017-T4. Cet alliage est un matériau à durcissement structural très utilisé dans le domaine industriel. La composition chimique, les propriétés mécaniques et les propriétés physiques sont présentée dans le tableau.1, 2 et 3 respectivement. Dans ce travail, les soudures ont été réalisées sur des tôles de 20 mm de longueur, 10mm de largeur et 4 mm d'épaisseur (figure III.1).

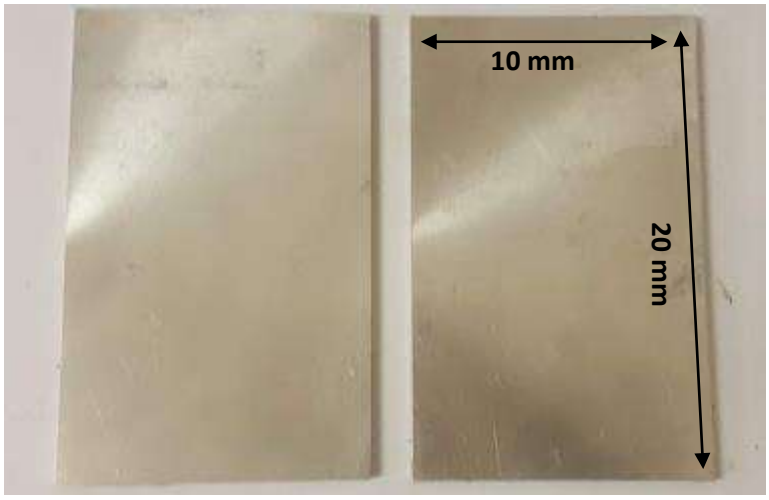


Figure III.1 : L'alliage AA 2017-T4 sous forme de tôle.

Tableau III.1: Composition de l'aluminium 2017-T4 utilisé pour les soudures

2017	**Al**	**Mg**	**Cu**	**O**
(% en poids)	92.73	0.93	3.60	2.75
% on atomic	92.33	01.04	01.97	04.66

Tableau III.2 : Propriétés mécaniques de (2017)

Alliage	État	Dureté [Hv]	Module d'élasticité [GPa]	Résistance de rupture [MPa]
2017	T4	110	70	390

Tableau III.3: Propriétés physiques de (2017).

Alliage	État	Masse volumique [Kg/m³]	Intervalle de fusion * Approximatif en [C°]	Coefficient de dilatation [$^{o}C.10^{-6}$]	Conductivité thermique [W/m.K]	Résistivité [μΩ.cm]
2017	T4	2.79	510 – 640	23.0	134	5.1

2. Machine de soudage FSW

Les essais expérimentaux ont été réalisés au niveau de l'atelier mécanique du Hall de Technologie d'université Dr YAHIA FARES Médéa à l'aide d'une fraiseuse de marque PMO spa, illustrée sur la figure III.2.

La fraiseuse utilisée a les caractéristiques suivantes:

- vitesse d'avance maximale (vitesse de soudage) : $V_{a,max}$=2.5 mm /s.
- vitesse de rotation maximale de l'outil de soudage 2000tr/min.
- Plaque support de longueur maximale ; L_{max} = 1m.

La machine fraiseuse a la possibilité supplémentaire de souder dans les trois directions de l'espace 3D.



Figure. III.2 Fraiseuse adaptée à une machine de soudage FSW.

3. Outil de soudage FSW

Dans cette étude, nous avons conçu un outil permettant de souder des plaques de 4 mm d'épaisseur. Une géométrie simple a été retenue pour mieux comprendre les phénomènes physiques du FSW tels que les cycles thermiques, la distribution de température et l'écoulement de matière. La nuance de la matière de notre outil a été choisie pour répondre au problème de résistance en fatigue et abrasion à des hautes températures présentes dans le cas du FSW. L'outil est composé de deux parties. Un pion filetés et un épaulement cylindrique. L'outil utilisé dans le procédé de soudage a été adapté au niveau du centre de recherche en technologie industrielle par le docteur AISSANI mouloud dans le cadre de sa thèse de doctorat, dans laquelle on peut contrôler la force axiale appliqué sur les plaques à souder durant le procédé FSW.

Le tableau III.4: les principaux éléments de l'outil de soudage et leur rôle.

	Elément	Rôle
1	Porte-outil	a pour rôle de réunir l'ensemble des éléments constituant l'outil et de transmettre l'énergie cinétique de rotation au couple pion/épaulement
2	Arbre	est rendu solidaire de l'épaulement par un filetage
3	ressort	protège l'outil de tout endommagement éventuel et permet aussi de déterminer l'effort exercé sur le cordon par l'outil. La longueur externe du pion (outil amélioré) est fixée à l'aide de vis sans tête

		(latéralement et axialement).
4	clavette	l'ensemble est fixé au porte-outil
5	épaulement	chauffer le matériau par frottement .Ainsi, il frotte sur le matériau et crée la chaleur de friction nécessaire pour "ramollir" les pièces
6	Pion	pénètre dans les pièces à souder. Grâce à sa forme, il va à la fois chauffer le matériau par effet cisaillant et assurer le mélange du matériau .Ainsi, le choix d'un outil s'adapte en fonction des matériaux à souder associé à des paramètres de qualification qualifiés à réaliser au matériau de se refermer derrière le passage de l'outil, d'écraser l'oxyde d'aluminium et d'obtenir une soudure irréprochable.
7	vis sans tête	pour éliminer toute rotation relative tout en permettant le déplacement axial.

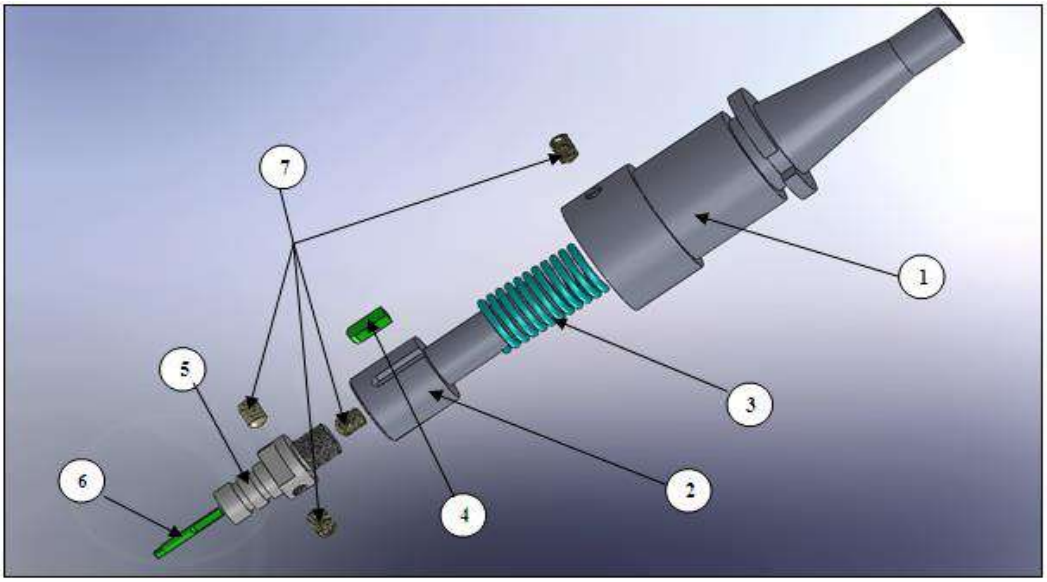


Figure III.3: Schéma montrant les différents éléments de l'outil FSW .

La figure III.4 représente les éléments d'un outil ajustable avec séparation entre l'épaulement et le pion utilisé dans le procédé de soudage par friction malaxage, dans lequel l'outil a un épaulement avec un diamètre de 20 mm et un pion cylindrique fileté avec une rainure de diamètre d =5 mm.

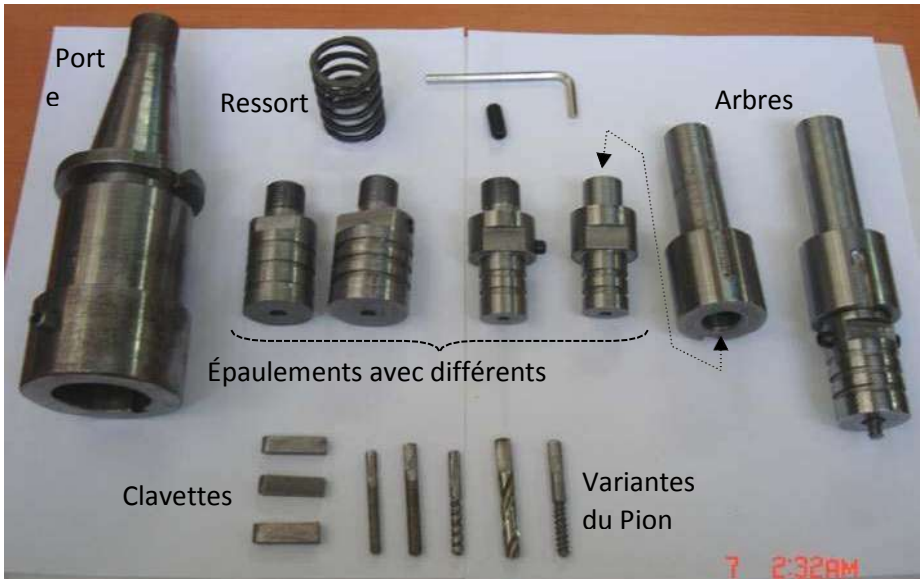


Figure III.4: éléments de l'outil utilisé pour le soudage FSW

Le ressort sert comme un système de protection de l'outil pour éviter tout endommagement dû aux pressions excessives ou les chocs [21], de plus nous a permis de contrôlé la force axiale. Le ressort utilisé (figure .5) produit en fil de section rectangulaire avec une constante de raideur K=109 N/mm (haute rigidité). Sa longueur est L= 50 mm. Le ressort comporte deux régimes de fonctionnement : le premier est à 25% de compression (recommandé pour une longue durée), le 2ème correspond à 35% de charge maximale de travail.



Figure III.5 : Ressort à section rectangulaire

Les éléments essentiels de l'outil sont fabriqués avec des aciers de différentes nuances. La plupart des composants de notre outil sont fabriqués de l'acier doux E24 sauf l'épaulement et le pion qui sont fabriqués en acier de construction 42CD4 traité, et qui présente les meilleures propriétés mécaniques.

L'acier 42CD4 est un acier de construction faiblement allié au Chrome-Molybdène pour trempe et revenu. Il est caractérisé par une bonne trempabilité à l'huile, une bonne résistance à l'usure et aux surcharges à l'état traité. Acier à usinabilité améliorée, il est très employé en mécanique pour des pièces de moyennes et fortes sections. Sa capacité thermique spécifique est *Cp* = 450–560 *J/kg.K* et sa conductivité thermique est *K* = 32–40 *W/m.K* [19]. Les métaux à assembler sont en général des alliages ayant des températures de fusion modérées (T_{fusion}< 1000°*C*). Dans notre cas, l'outil servira au soudage des alliages d'aluminium dont la température de fusion T_{fusion} avoisine 430C – 630*C*.

4. Thermocouples

A. type K (Nickel-Chrome / Nickel-Alumel):

Le type K est le type de thermocouple le plus courant. Il est peu coûteux, précis, fiable et possède une large plage de températures. Le type K se trouve couramment dans les applications nucléaires en raison de sa dureté relative aux radiations. La température continue maximale est d'environ 1 100 ° C.

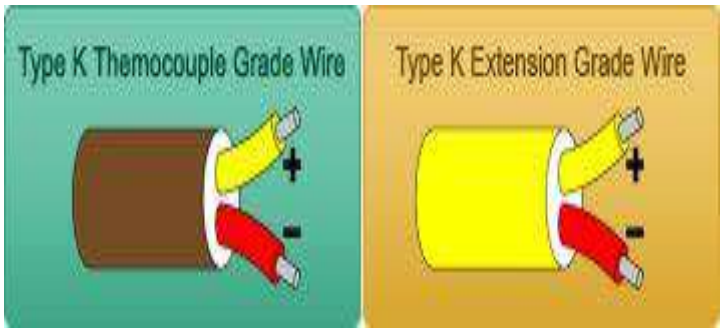


Figure III.6 : Thermocouple de type K

B. Plage de température de type K :

- Fil de qualité thermocouple, –454 à 2300F (–270 à 1260C)
- Câble d'extension, 32 à 392F (0 à 200C)

c. Précision de type K (selon la plus grande des deux):

- Standard : +/- 2,2C ou +/- 0,75%
- Limites spéciales d'erreur : +/- 1,1C ou 0,4%

5. Enregistreur thermique

III.2.2 Étude thermique

La température est un paramètre très important lors du soudage puisque celle-ci influence la microstructure du matériau et par conséquent ses propriétés mécaniques. La mesure de ce paramètre est essentielle pour étudier les mécanismes physiques de FSW. Ainsi, deux méthodes de mesure de la température ont été employées. Des prises de mesure directes ont été effectuées à l'aide de thermocouples insérés dans les plaques d'aluminium alors qu'une caméra thermique a été utilisée pour mesurer les champs de température sur la surface des plaques.

III. 3.2. Protocoles opératoires du procédé FSW et UWFSW

Les surfaces latérales d'assemblage des tôles à souder sont usinées et polies. Après avoir vérifié le bon alignement des deux tôles, un trou est percé sur une profondeur environs 60% de l'épaisseur des deux tôles. Cela permis de réduire la charge et le travail du pion en perçant les tôles Figure III.8.



Figure. III.7: trou percé des deux tôles

Le protocole expérimental pour la fabrication des joints de soudure est présenté par deux parties essentielles. Dans la première étape la fabrication des joints par le procédé de soudage par friction malaxage dans l'état normale (sous l'air) FSW. Figure. III.9

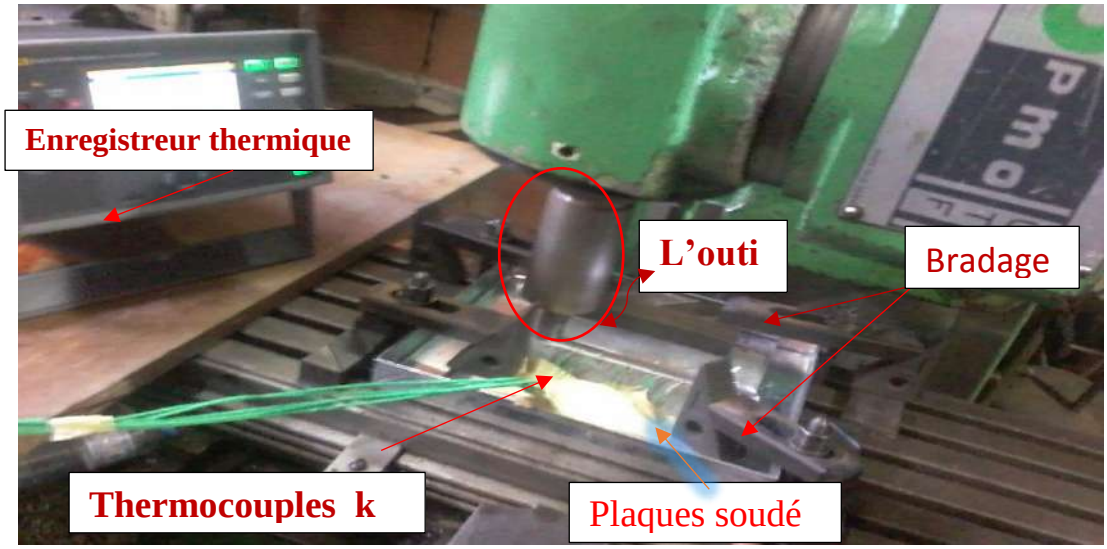


Figure . III.8: protocole expérimentale de FSW

Le deuxième partie de notre travail on présente un protocole expérimentale pour réalise des joints de soudure par le procédé de soudage par friction malaxage sous l'eau UWFSW figure III.10.

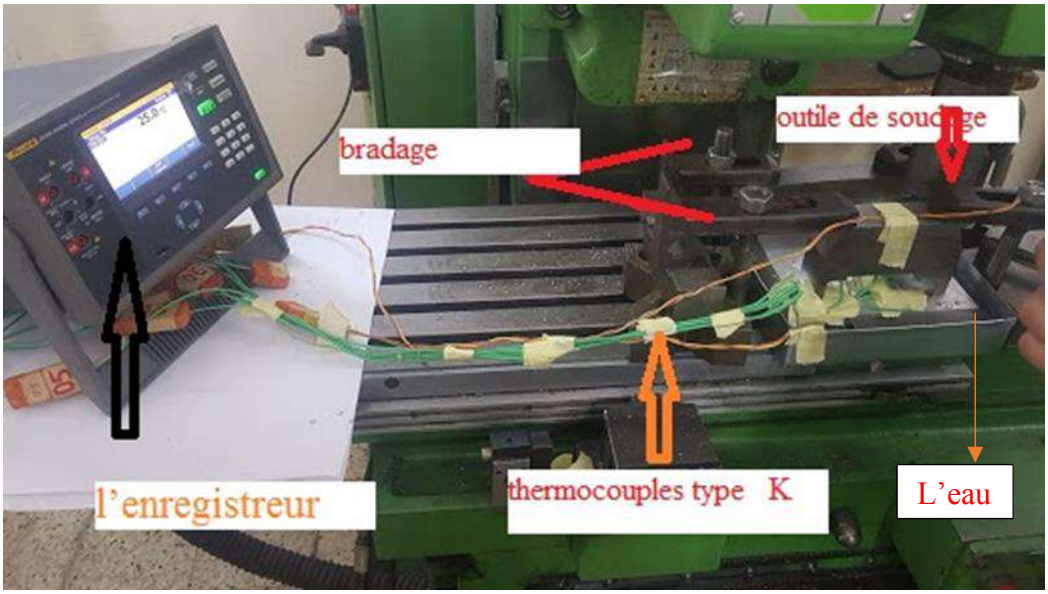


Figure III.9 : protocole expérimentale d'UFSW

Afin de mesurer les cycles thermiques pendant le procédé FSW et UWFSW des thermocouples ont été positionnés dans les plaques à souder tel qu'illustré sur la figure III.10. En tout, 5 thermocouples de type K ont été disposés de façon à mesurer la distribution de la température selon la ligne perpendiculaire au joint soudé selon des coordonnées X et Y précises tableau.III.6. Ainsi, ces outils de mesure (thermocouple type (k) sont reliés au système d'acquisition de données de marque (enregistreur thermique).

Tableau **III.5** : Position des thermocouples (mm) pour les essais sur tôles de 5mm d'épaisseur

Thermocouple	T1	T2	T3	T4	T5
X (mm)	40	65	74	80	94
Y (mm)	12	12	12	14	14

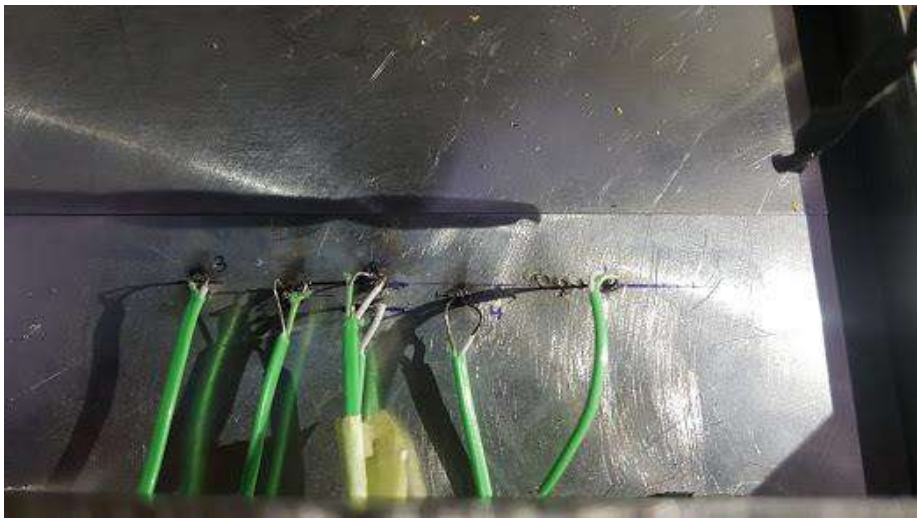


Figure III.10: Schéma illustrant le positionnement des thermocouples pour la prise de températures

Les soudures ont été réalisées en pleine tôle sur des plaques de dimensions : 200mm X 100mm X 5mm. Pour laisser le passage aux fils des thermocouples, des plaques-supports et un système de bridage ont été usinées comme l'exprimer sur Figure. III.12.



Figure. III.11: Représentation schématique de FSW

Pour le procédé UWFSW La figure III.13 montre la représentation schématique dont les plaques à usiner est fortement fixée sur la plaque support dans un réservoir. On remplir le réservoir par l'eau de mer jusqu'au niveau au-dessus de l'épaulement de l'outil de soudage.

À chaque partie de notre travail, nous avons fait fixer les paramètres de soudage sur la machine de soudage tel que la vitesse d'avance, vitesse de rotation de l'outil de soudage, la force axiale appliquée et l'angle d'inclinaison de l'outil.

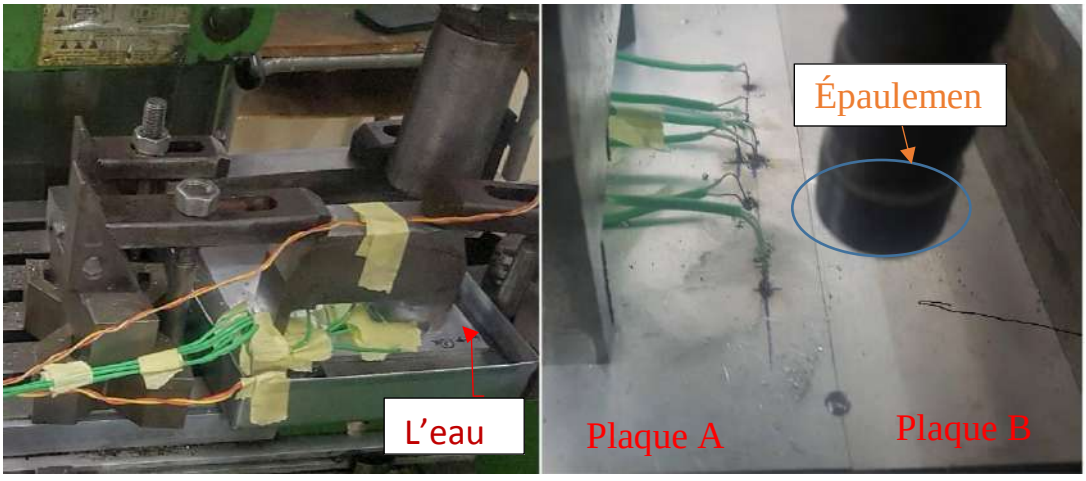


Figure III.12 : Représentation schématique du procédé UFSW

Le tableau III.6. : Les différentes valeurs des paramètres de soudage utilisées pour chaque essai.

Paramètres de soudage	Vitesse d'avance (mm /min)	Vitesse de rotation (tr/min)	Force axiale appliquée (kN)	Angle d'inclinaison
Valeur	15	1400	11	1,2°

Pour tous les essais, avant de démarrer l'opération de soudage et avec l'ensemble bridé, une source de chaleur balaye la surface supérieure de la tôle. La température de chaque thermocouple est observée lors de cette opération et permet de détecter immédiatement les thermocouples qui ne seront pas ables du fait d'une détérioration du thermocouple lors de son montage ou du contact inexistant entre le thermocouple et la tôle. Ceci permet donc de faire une première détection des thermocouples à ne pas considérer dans la suite. L'allure générale du cycle thermique de chaque thermocouple peut également permettre une détection de problèmes : des valeurs très faibles ou encore des temps de montée en température ou de refroidissement très différents des autres thermocouples.

III.3 : Résultat

III.3.1 : Résultat. Analyse des résultats

Des mesures de température dans les plaques soudées ont été prises selon les deux conceptions décrites à la section précédente. Le résultat de ces mesures réalisées à l'aide de thermocouples sont présentées ci-dessous**.**

III.3.2. Cycles thermiques du procédé FSW

Les thermocouples insérés dans les plaques d'aluminium AL2017-T4 tel que décrit précédemment et précisé sur la **figure III.10**, ont permis d'obtenir des données sur les cycles des températures pour le soudage par friction malaxage sous l'air et sous l'eau.

Pendant le procédé de soudage FSW et UFSW, l'outil se déplace le long de la ligne de soudage avec une vitesse de déplacement constante de 15 mm/min, une vitesse de rotation égale à 1400 tr/min et une charge de 11 KN appliqué verticalement sur la plaque à souder. Sur la figure (IV.1) on présente les cycles thermiques enregistrée par les thermocouples dans les positions TC1, TC2, TC3 et TC4. L'historique thermique montre des changements de température très rapides lors du passage de l'outil par les quatre positions.

D'autre part on peut remarquer que, lors le procédé de soudage les courbes de l'histoire thermique présentées sur la figure (III.13**)** sont divisées en quatre parties permettant d'identifier le début du contact entre les plaques à souder et chaque partie de l'outil (bout, surface latérale et épaulement).

- Partie A (phase de plongé) : avant de commence le procédé de soudage nous effectuons un trou sur la profondeur des plaques à souder environs 60% de l'épaisseur, Cela permis de réduire la charge et le travail du pion en perçant les tôles. Au début du procédé de soudage, le pion de l'outil est plongé avec une vitesse constante dans le vide effectué (pas de contact avec la matière), à cause de ça les thermocouples sont enregistrés des valeurs de température constante (T=28C° température du milieu ambiante) durant 40s dans les quatre positions.

- Partie B (phase de *d'attente*) : cette partie commence après le contacte de l'épaulement de l'outil de soudage avec la surface supérieur des plaques à souder. Dans laquelle les thermocouples sont enregistrés une augmentation de température jusqu'à une valeur de température constante (T=130C°) à cause de l'effet de frottement à l'interface épaulement / surface supérieur. d'autre part, dans cette phase, nous observons qu'à partir d'un temps bien déterminé (t=153 s) un régime permanent sera établi. Ce qui laisse penser à un équilibre thermique entre la chaleur entrante et celle évacué. Donc le cordon FSW n'est continu qu'à partir de quelques millimètres parcouru par l'outil.

  Partie C: Dans cette partie l'outil de soudage commencer à déplacer avec une vitesse constante selon la ligne de soudage. Ensuite, on observe une augmentation rapide de température jusqu'à les valeurs maximales 287C°, 263 C°, 280 C° et 273 C° à l' instant de passage de l'outil de soudage par les position des thermocouples TC1, TC2, TC3 et TC4 respectivement. D'autre part on remarque que, le temps nécessaire pour atteindre la valeur maximale augmente lorsqu'on s'éloigne à la zone de soudage. Les pics de température des cycles pour des thermocouples situés à la même distance de la ligne de soudure présentent des valeurs différentes dans l'intervalle d'incertitude estimé à 20C°.

Partie D : après le passage de l'outil de soudage les thermocouples dans les quatre positions sont enregistrés une diminution de la température (refroidissement) jusqu'à une valeur de température uniforme (température de milieu ambient).

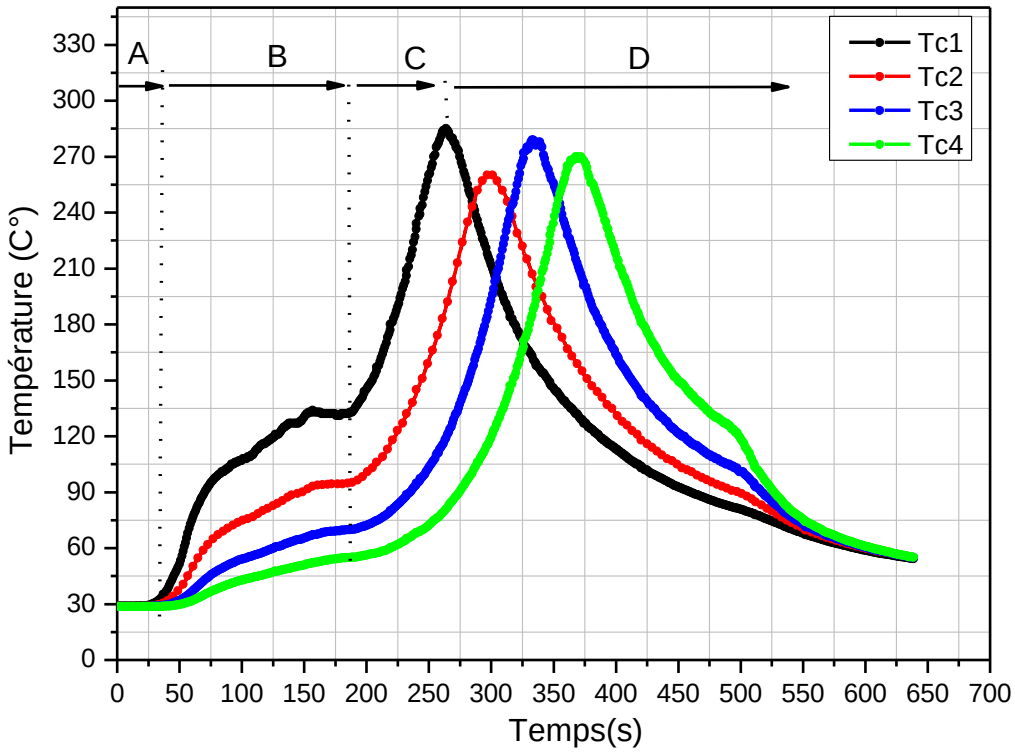


Figure III.13 : Cycles thermiques dans le procédé FSW à différentes positions le long de la ligne de soudage.

III.3.3 Cycles thermiques du procédé UFSW

Sur la figure (III.14) nous donnons les cycles thermiques obtenus expérimentalement durant le procédé UFSW en 03 positions (TC1, TC2, TC3) dans la pièce à souder. On observe que l'aspect global des courbes enregistré par les thermocouples est le même dans les trois positions; telles que la température augmente rapidement jusqu'au une valeur maximal de température, puis diminue en phase de refroidissement à différentes vitesses dans le temps pour atteindre la température ambiante.

D'autre part, on observe que, les valeurs maximales de température sur la position TC1 (T= 121C°) est supérieur à celles obtenues dans les positions TC2 et TC3 (T=114 et 117C°). Ainsi, on remarque un écart dans le temps nécessaire pour atteindre la valeur maximale de

la température aux positions, cela est due à la position des thermocouples par rapport à la position de l'outil de soudage. Alors que, pour TC1 le temps nécessaire pour atteindre la valeur maximale de température est 514s et pout TC2 est 471s.

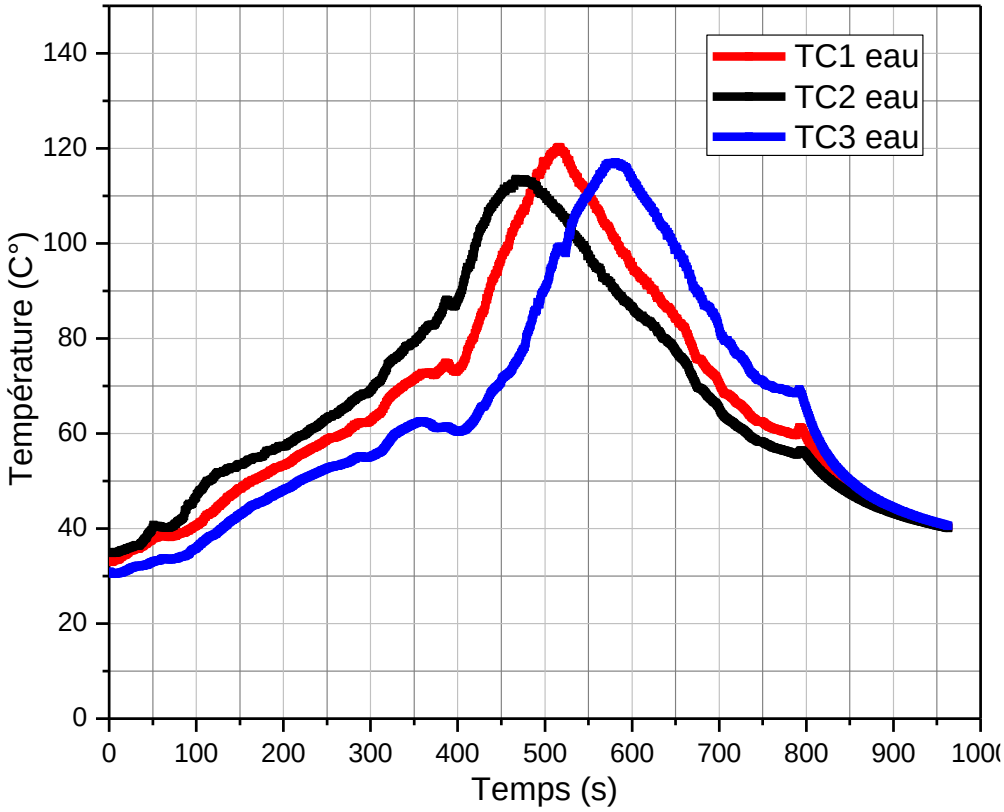


Figure III.14 : Cycles thermiques dans le procédé UFSW à différentes positions le long de la ligne de soudage.

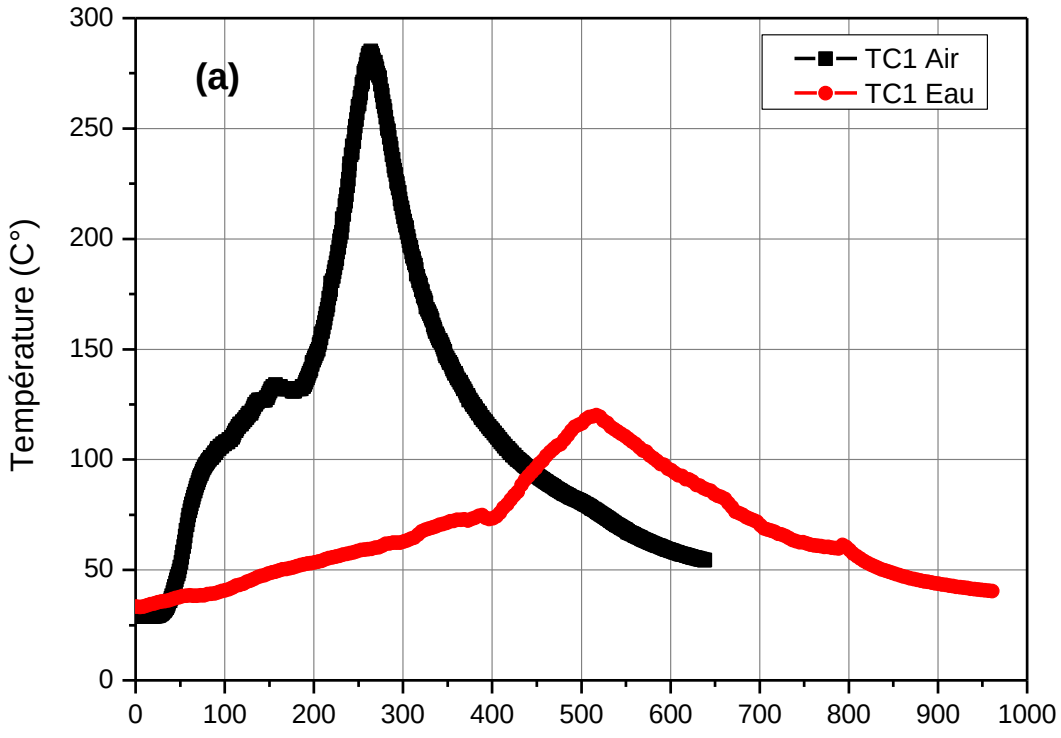
Les cycles thermiques suivants ont été déterminés en trois positions sur la pièce à souder près de la ligne de soudure TC1, TC2 et TC3 comme indiqué sur la Figure III.14

Les Figures 3 a, b et c montrent une comparaison des cycles thermiques pendant le procédé FSW et UFSW en 03 positions sur la pièce à souder près de la ligne de soudage pour les paramètres du procédé.

Il a été observé que les valeurs maximales des températures obtenues aux 03 positions pour le procédé UFSW étaient inférieures à celles obtenues dans le procédé FSW. Ces valeurs dans le procédé FSW (cycles noir) ont été atteintes plus rapidement que dans le procédé UFSW pour les trois positions. Dans le procédé FSW, il a été observé que les valeurs maximales de la température de 288 C°, 283 C° et 294C° K aux positions TC1, TC2 et TC3 respectivement,

étaient atteintes après des temps de 264s, 335s et 408s, avec une vitesse de soudage de 0.6 mm/s. Alors que le temps nécessaire dans le procédé UFSW pour atteindre la valeur maximale de la température 123 C°, 114C° et 118 C° aux mêmes positions TC1, TC2 et TC3 respectivement, étaient atteintes après des temps de 514s, 470s et 580s avec la même vitesse d'avance . D'autre part on observe que, la diminution des températures maximales induite dans le procédé UFSW est bien inférieure à la moitié de sa valeur au procédé FSW et elle est de l'ordre de 62% (de 290 ° C à 110 ° C).

Dans les deux cas du procédé FSW et UFSW on utilise des valeurs constantes des paramètres de soudage tel que, la vitesse de soudage, la vitesse de rotation, la force de forgeage et géométrie de l'outil de soudage. Alor que, dans le procédé UFSW la vitesse de refroidissement en arrière de l'outil de soudage plus supérieur que dans le procédé FSW. Ceci est dû à cause de la différence entre les coefficients de transfert de chaleur, plus le coefficient de transfert de chaleur plus important plus de quantité de chaleur évacuée au milieu ambiant augmente et la température au niveau de la plaque diminué.



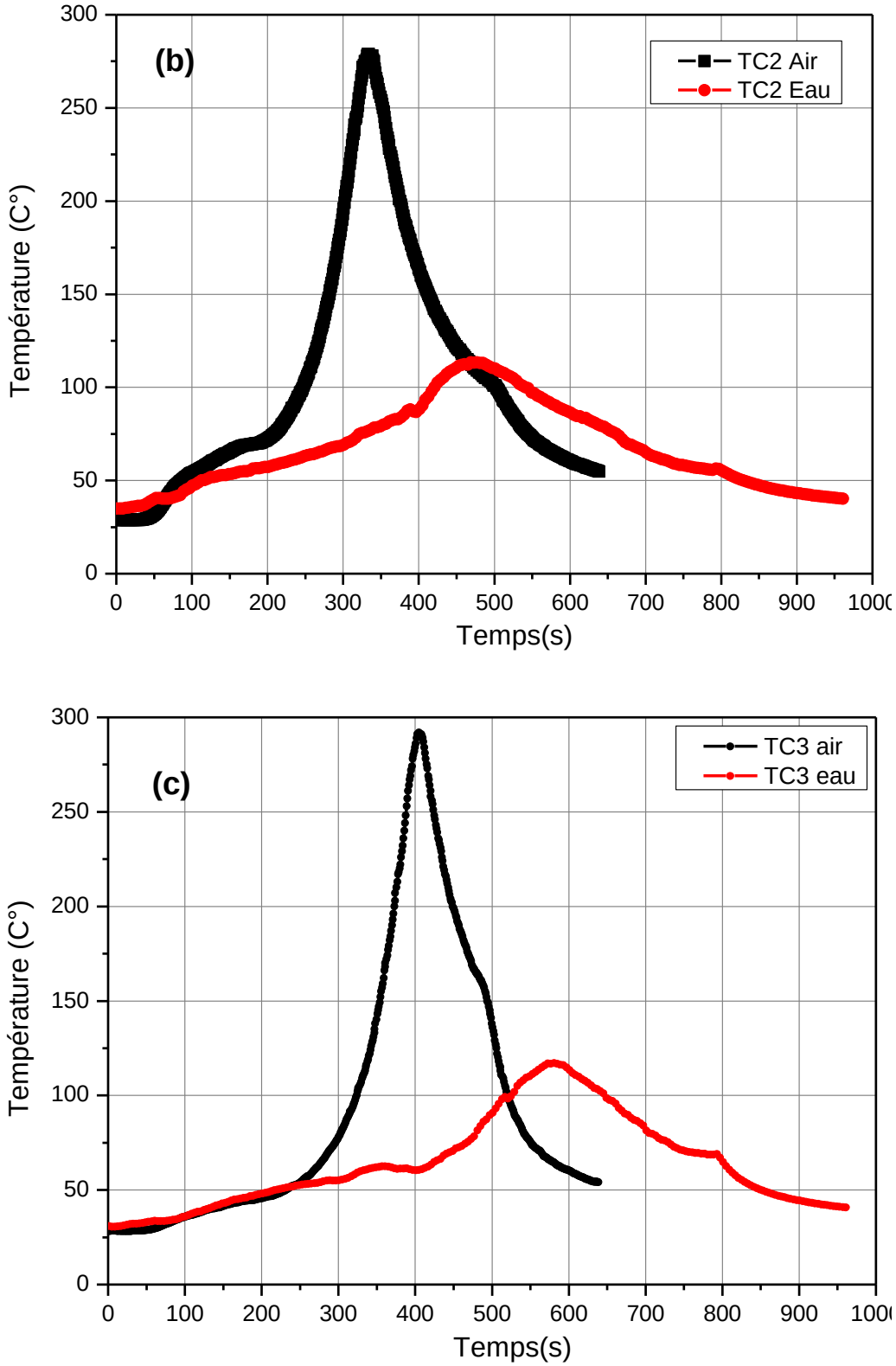


Figure III.15 : Cycles thermiques du procédé FSW et UFSW dans les trois positions des thermocouples a) TC1, b) TC2, c)TC3.

Conclusion générale

Le soudage par friction malaxage FSW (Friction Stir Welding) est un procédé de soudage à l'état solide, sans fusion du matériau et sans ajout de métal. Ce procédé utilise le principe de la conversion de l'énergie mécanique en énergie thermique par le frottement d'un outil non consommable avec les pièces à souder. Depuis sa découverte en 1991, le procédé de soudage par friction malaxage FSW est devenu une technique d'assemblage prometteuse pour la fabrication des structures aéronautiques en aluminium et ses applications se sont répandues dans divers secteurs industriels. À la lumière de ces faits, il est très important d'approfondir les connaissances sur les mécanismes physiques qui régissent le procédé ainsi que sur les propriétés mécaniques et microstructurales des joints soudés obtenus par FSW.

Dans ce travail, une étude expérimentale a été réalisée au niveau de l'atelier mécanique du Hall de Technologie de l'université Dr YAHIA FARES Médéa en collaboration avec le centre de recherche en technologies industrielles CRTI d'Alger. Cette étude expérimentale a mis en évidence l'influence des fluides de refroidissement (FSW, UFSW) sur l'histoire thermique et la valeur maximale de température durant le procédé d'FSW de l'alliage d'aluminium AL 2017-T4 d'épaisseur 5mm, en utilisant les même paramètres opératoires tel que la vitesse de soudage, vitesse de rotation, force axiale appliqué et la géométrie de l'outil de soudage.

Au départ, une synthèse bibliographique nécessaire à l'introduction de l'historique et du principe du procédé d'assemblage par FSW /UFSW. Elle permet aussi de définir les paramètres opératoires les plus influents sur les caractéristiques des assemblages soudés et en particulier sur la génération de la chaleur, la distribution de la température. Ensuite, l'accent est mis sur plusieurs points étudiés dans la littérature et caractérisant le procédé de soudage par friction et malaxage, comme l'effet de la géométrie de l'outil sur le transfert de chaleur et au cours du soudage. La majorité des travaux dans la littérature s'est concentrée sur la modélisation du transfert de chaleur et des écoulements de matière autour de l'outil et pour différents paramètres du procédé FSW /UFSW. Bien que ces approches soient rapides et rentables, les essais expérimentaux sont indispensables afin de valider et justifier les résultats obtenus par les modèles proposés et utilisés.

Dans un deuxième temps, un banc d'essai a été instrumenté à partir d'une fraiseuse, dont lequel il se traduit par l'acquisition de données de la température des plaques. Il offre également la possibilité de souder des plaques, de matériaux et de configurations différentes

(sous l’air et sous l’eau). Deux essais de soudage FSW et UFSW ont été réalisé et caractérisés avec succès pour le soudage de l'alliage d'aluminium 2017A. Tes conclusions principales suivantes ont été tirées :

- L'examen visuel des soudures obtenues montre de bonnes surfaces de joints pour les deux processus
- Les courbes de cycle thermique pendant le soudage montrent le même comportement global de température pour tous les processus (chauffage rapide suivi d'une vitesse de refroidissement modérée). Cependant, dans le processus UFSW, il présente de faibles niveaux de pics de température où il est réduit de plus de 60% dans leurs valeurs, en raison de la capacité de refroidissement de l'eau de mer par rapport à l'air.

RÉFÉRENCES
Et
Bibliographies

RÉFÉRENCES

[1] Zimmer, S. Contribution à l'industrialisation du soudage par Friction malaxage École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Laboratoire de Conception Fabrication Commande. (2009).

[2] Ammar GUEDOIRI. Contribution à la modélisation et à la simulation numérique du soudage par friction et malaxage.'' École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur (2012).

[3] Zimmer, S., Langlois, L., Laye, J. and Bigot, R. "Experimental investigation of the influence of the FSW plunge processing parameters on the maximum generated force and torque", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology", Vol 47, No. 1, pp.201-215-215, (2010).

[4] CAZES, R. (2003). Soudage par friction-malaxage. In techniques d'ingénieur.

[5] S. Sheikhi, Herstellung und Bewertung der Umformbarkeit von reibrührgeschweissten Tailored Blanks aus Aluminiumlegierungen, 2005, Thèse de doctorat de l'université de Duisburg-Essen, Thèse de doctorat de l'Université de Duisburg-Essen.

[6] G. Bjorkman, A. Kooney, C. Russell, 2002, Friction Stir Process Mapping Methodology, (consulté le 28 mai 2009)

[7]. L. Cederqvist, 2003, A weld that lasts for 100 000 years: FSW of copper canister, 4st International Symposium on friction stir welding, USA

[8]. Arya, P. K. (2015). A Review on Friction Stir Welding for Aluminium Alloys. International Journal For, 3(6), 216–221.

[9]. Barralis.J et Maeder.G 5ème édition. Précis de métallurgie. Elaboration, structure-propriétés et normalisation. AFNOR, Nathan.

[10]. Blondeau.R, Métallurgie et mécanique du soudage. Traité mécanique et ingénierie des matériaux,Hermès Sciences Publications. 2001a.

[11]. Mishra , R. S., & Ma, Z. Y. (2005). "Friction stir welding and processing",. Material Science and engineering, R50 ,pp.1-78.

[12].Lee, J. A., Carter, R. W., & J. Ding. (Dec.1999). "Friction Stir Welding for Aluminium Meta Matrix Composites (MMC's)". In M. C. D. s. D. F. F. Report (Ed.), Project N°89-09 (pp. pp.1-20): NASA/TM, MSFC - Alabama 35812.

[13].Posada, M., J. P. Nguyen, D. R. Forrest, J. DeLoach, and R. DeNale (2003), Friction stir welding advances joining technology, The Advanced Materials and Processe Technology Information Analysis Centre (AMPTIAC - Quarterly), Vol.7(3), pp.13-20.

[14] Thomas, W. M. (June 1999). "Friction Stir Welding of Ferrous materials: a feasibility

study". Paper presented at the 1st International Symposium on Friction stir Welding, Rockwell Science Centre Thousand Oaks.

[20] Peel, M., Steuwer, A., Preuss, M. and Withers, P. J. "Microstructure, echanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds", Acta Materialia", Vol. 51, No. 16, pp.4791-4801, 2003.

[21] Boz, M. and Kurt, A. "The influence of stirrer geometry on bonding and mechanical properties in friction stir welding process", Materials & Design", Vol. 25, No. 4, pp.343-347, 2004.

[22] Lim, S., Kim, S., Lee, C.-G. and Kim, S. "Tensile behavior of friction stri-welded Al 6061-T651", Metallurgical and Materials Transactions A", Vol. 35, No. 9, pp.2829-2835, 2004.

[23] Zhao, Y.-H., Lin, S.-B., Wu, L. and Qu, F.-X. "The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy", Materials Letters", Vol. 59, No. 23, pp.2948-2952, 2005.

[24] Cavaliere, P., Campanile, G., Panella, F. and Squillace, A. "Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6056 joints produced by Friction Stir Welding", Journal of Materials Processing Technology", Vol. 180, No. 1-3, pp.263-270, 2006a.

[25] Okuyucu, H., Kurt, A. and Arcaklioglu, E. "Artificial neural network application to the friction stir welding of aluminum plates", Materials & Design", Vol. 28, No. 1, pp.78-84, 2007.

[26] Ren, S. R., Ma, Z. Y. and Chen, L. Q. "Effect of welding parameters on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al-Mg-Si alloy", Scripta Materialia", Vol. 56, No. 1, pp.69-72, 2007.

[27] Scialpi, A., De Filippis, L. a. C. and Cavaliere, P. "Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy", Materials & Design", Vol. 28, No. 4, pp.1124-1129, 2007.

[28] Tozaki, Y., Uematsu, Y. and Tokaji, K. "Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys", International Journal of Machine Tools and Manufacture", Vol. 47, No. 15, pp.2230-2236, 2007.

[29] Elangovan, K. and Balasubramanian, V. "Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy", Materials & Design", Vol. 29, No. 2, pp.362-373, 2008a.

[30] Liu, F. C. and Ma, Z. Y. "Influence of Tool Dimension and Welding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Friction- Stir-Welded 6061-T651 Aluminum

Alloy", Metallurgical and Materials Transactions A", Vol. 39, No. 10, pp.2378-2388-2388, 2008.

[31] Lombard, H., Hattingh, D. G., Steuwer, A. and James, M. N. "Optimising FSW process parameters to minimise defects and maximise fatigue life in 5083-H321 aluminium alloy", Engineering Fracture Mechanics", Vol. 75, No. 3–4, pp.341-354, 2008.

[32] Rajamanickam, N., Balusamy, V., Madhusudhanna Reddy, G. and Natarajan, K. "Effect of process parameters on thermal history and mechanical properties of friction stir welds", Materials & Design", Vol. 30, No. 7, pp.2726-2731, 2009.

[33] Rodrigues, D. M., Loureiro, A., Leitao, C., Leal, R. M., Chaparro, B.M. and Vilaça, P. "Influence of friction stir welding parameters on the microstructural and mechanical properties of AA 6016-T4 thin welds", Materials & Design", Vol. 30, No. 6, pp.1913-1921, 2009.

[34] Tang, W., Guo, X., C, M. and L.E, M. "Heat Input model and temperature distribution in friction stir welding", Journal of Material Processing and Manufacturing Science", Vol. 7, No. pp.163-172, 1998.

[35] Hwang, Y.-M., Kang, Z.-W., Chiou, Y.-C. and Hsu, H.-H. "Experimental study on temperature distributions within the workpiece during friction stir welding of aluminum alloys", International Journal of Machine Tools and Manufacture", Vol. 48, No. 7-8, pp.778-787,2008.

[36] Li, Y., Murr, L. E. and Mcclure, J. C. "Solid-state flow visualization in the friction-stir welding of 2024 Al to 6061 Al", Scripta Materialia", Vol. 40, No. 9, pp.1041-1046, 1999.

[37] Terry Dickerson, Hugh R Shercliff and Henrik Schmidt (2003a) “A weld marker technique for flow visualization in friction stir welding”. 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Park City, Utah, USA.

[38] Schmidt, H. N. B., Dickerson, T. L. and Hattel, J. H. "Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3", Acta Materialia", Vol. 54, No. 4, pp.1199-1209, 2006.

[39] Zhao, Y. H., Lin, S. B., Qu, F. X. and Wu, L. "Influence of pin geometry on material flow in friction stir welding process", Materials Science and Technology", Vol. 22, No. 1, pp.45-50, 2006.

[40] Kumar, K. and Kailas, S. V. "The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation", Materials Science and Engineering: A", Vol. 485, No. 1-2, pp.367-374, 2008.

[41] Colligan, K. J. and Mishra, R. S. "A conceptual model for the process variables related to heat generation in friction stir welding of aluminum", Scripta Materialia", Vol. 58, No. 5, pp.327-331, 2008.

[42] Heurtier, P., Desrayaud, C. and Montheillet, F. "A Thermomechanical Analysis of the Friction Stir Welding Process", Material Science Forum", Vol. Aluminum Alloys 2002 - ICAAS, No. pp.1537-1542, Transtech Publications,Switzerlad, 2002.

[43] Schmidt, H. and Hattel, J. "An analytical model for the heat generation in friction stir welding", Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering", Vol. 12, No. 1, pp.143, 2004.

[44] Roy, G. G., Nandan, R. and Debroy, T. "Dimensionless correlation to estimate peak temperature during friction stir welding", Science and Technology of Welding and Joining", Vol. 11, No. pp.606-608, 2006.

[45] Heurtier, P., Jones, M. J., Desrayaud, C., Driver, J. H., Montheillet, F. and Allehaux, D. "Mechanical and thermal modelling of Friction Stir Welding", Journal of Materials Processing Technology", Vol. 171, No. 3, pp.348-357, 2006.

[46] Vijay Shivaji Gadakha, Kumar Adepu Heat generation model for taper cylindrical pin profile in FSW, j mater res technol. 2013. 2(4).370–375 , (2013).

[47] Mohammad Haghpanahi, Solaleh Salimi, Pouya Bahemmat, Sadaf Sima (2013), 3-D transient analytical solution based on Green's function to temperature field in friction stir welding, Applied Mathematical Modelling (2013).

[48] Gould, F. E. and Feng, Z. "Heat flow model for friction stir welding of Aluminum alloys", Journal of Material Processing and Manufacturing Science", Vol. 7, No. 2, pp.185-194, 1998.

[49] Chao YJ, Qi X, Tang W. Heat transfer in friction stir welding-experimental and numerical studies. transactions-american society of mechanical engineers journal of manufacturing science and engineering 2003;125:138–145.

[50] Frigaard, Ø., Grong, Ø. and Midling, O. T. "A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloys", Metallurgical and Materials Transactions A", Vol. 32, No. 5, pp.1189-1200, 2001.

[51] Khandkar, M. Z. H. and J.A.Khan. "Thermal modeling of overlap Friction Stir Welding fo Al-alloys", Journal of Material Processing and Manufacturing Science", Vol. 10, No. pp.91-105, 2001.

[52] Dong, P., Lu, F., Hong, J. K. and Cao, Z. "Coupled thermomechanical analysis of friction stir welding process using simplified models", Science and Technology of Welding & Joining", Vol. 6, No. 5, pp.281- 287, 2001.

[53] Ulysse, P. "Three-dimensional modeling of the friction stir-welding process", International Journal of Machine Tools and Manufacture",Vol. 42, No. 14, pp.1549-1557, 2002.

[54] Song, M. and Kovacevic, R. "Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation", International Journal of Machine Tools and Manufacture", Vol. 43, No. 6, pp.605-615, 2003.

[55] Chen, C. M. and Kovacevic, R. "Finite element modeling of friction stir welding—thermal and thermomechanical analysis", International Journal of Machine Tools and Manufacture", Vol. 43, No. 13, pp.1319- 1326, 2003.

[56] Chen, C. and Kovacevic, R. "Thermomechanical modelling and force analysis of friction stir welding by the finite element method", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science", Vol. 218, No. 5, pp.509-519, 2004.

[57] Terry Dickerson, Qing-Yu Shi and Hugh R Shercliff "Heat Flow into Friction Stir welding tools". 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Park City, Utah, USA, 2003b.

[58] Buffa, G., Hua, J., Shivpuri, R. and Fratini, L. "A continuum based fem model for friction stir welding-model development", Materials Science and Engineering: A", Vol. 419, No. 1-2, pp.389-396, 2006a.

[59] Buffa, G., Hua, J., Shivpuri, R. and Fratini, L. "Design of the friction stir welding tool using the continuum based FEM model", Materials Science and Engineering: A", Vol. 419, No. 1–2, pp.381-388, 2006b.

[60] Fratini.L, Buffa.G, Palmeri.D, Hua.J and Shivpuri.R "Material flow in FSW of AA7075–T6 butt joints: numerical simulations and experimental verifications", Science and Technology of Welding and Joining", Vol. 11, No. pp.413-421, 2006.

[61] Rajamanickam, N., Balusamy, V., Madhusudhanna Reddy, G. and Natarajan, K. "Effect of process parameters on thermal history and mechanical properties of friction stir welds", Materials & Design", Vol. 30, No. 7, pp.2726-2731, 2009.

[62] P. BISWAS AND N. R. MANDAL (2011).Effect of Tool Geometries on ThermalHistory of FSW of AA1100. supplement to the welding journal, july.

[63] Muhsin J. J., Moneer H. Tolephih and Muhammed A. M.(2012).effect of friction stir welding parameters (rotation and transverse) speed on the transient temperature distribution in friction stir Welding of AA 7020-t53.

[64] Colegrove, P. A., Shercliff, H. R. and Zettler, R. "Model for predicting heat generation and temperature in friction stir welding from the material properties", Science and Technology of Welding & Joining", Vol. 12, No. 4, pp.284-297, 2007.

[65] Atharifar, H., Lin, D. and Kovacevic, R. "Numerical and Experimental Investigations on the Loads Carried by the Tool During Friction Stir Welding", Journal of Materials Engineering and Performance", Vol. 18, No. 4, pp.339-350, 2009.

[66] Kim, D., Badarinarayan, H., Ryu, I., Hoon Kim, J., Kim, C., Okamoto, K., Wagoner, R. and Chung, K. "Numerical simulation of friction stir welding process", International Journal of Material Forming", Vol. 2, No. 0, pp.383-386, 2009.

[67] L. Shi , C.S.Wu , H.J.Liu (2015) The effect of the welding parameters and tool size on the thermal Process and tool torque inreverse dual-rotation friction stir welding. International Journal of Machine Tools& Manufacture 91(2015)1–11.

[68] UPADHYAY P, REYNOLDS A P. Effects of thermal boundary conditions in friction stir welded AA7050-T7 sheets [J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527: 1537−1543.

[69] SABARI S S, MALARVIZHI S, BALASUBRAMANIAN V, REDDY G M. Experimental and numerical investigation on under-water friction stir welding of armor grade AA2519-T87 aluminium alloy [J]. Defense Technology, 2016 12: 324−333.

[70] SAKURADA D, KATOH K, TOKISUE H. Underwater friction welding of 6061 aluminum alloy [J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 2002, 52(1): 2−6.

[71] ZHANG H J, LIU H J, YU L. Microstructure and mechanical properties as a function of rotation speed in underwater friction stir welded aluminum alloy joints [J]. Materials and Design, 2011, 32: 4402−4407.

[72] NELSON T W, STEEL R J, ARBEGAST W J. In situ thermal studies and post-weld mechanical properties of friction stir welds [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2003, 8(4): 283−288.

[73] XUA W F, LIU J H, CHEN D L, LUAN G H, YAO J S. Improvements of strength and ductility in aluminum alloy joints via rapid cooling during friction stir welding [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 548: 89−98.