

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes
Master Ingénierie des matériaux et des
surfaces

Influence des paramètres du procédé de soudage FSW sur les caractéristiques microstructurales et géométrique du joint soudé

Proposé et encadré par :
Mme Tahar Chaouch Karima

Co Promoteur:
Haif Mohamed Abdelchafie

Réalisé par :
-Ramoul Hamza
-Rahmoune Imad Sidali

Année universitaire 2022/2023

Remerciements

Je tiens a remercié d'abord ALLAH le tout puissant qui m'a guidé et donné la force et la volonté de réaliser ce mémoire. Ma pensée va vers mes parents, qui ont toujours cru en moi. C'est grâce à leurs soutient et prières que j'ai accomplis ce travail. Je remercié ma promotrice M. TAHAR CHAOUCH Karima et a monsieur HAIF mouhamed abdchafie de m'avoir pris en charge et aidé tout au long du projet. Et de m'avoir orienté avec leurs précieux conseils et soutiens moraux. Sans oublier mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui ont de près ou de loin contribué à l'évaluation de ce mémoire spécialement Mr. temmar mustapha et Omar KETFI Chef de Département, et Mr hamza bahlouli (ingénieur en métallurgie) Distributeur Pro qui nous a donné les barres d'outil, et aussi ingénieur de atelier de usinage Mr. Hamza qui nous a appris beaucoup de choses sur usinage c'est une grande expérience mrc bcq . Enfin, Je tiens aussi à remercier les jurys pour avoir accepté et de juger mon travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes parents qui m'ont soutenu durant toute ma vie, aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler, qu'ALLAH leur procure bonheur, santé et longue vie. À ma promotrice M. TAHAR CHAOUCH Karima qui ma a suivi durant le 3ème semestre M2 avec ces précieux conseils et directives. À nos frères et nos amis proches qui m'ont encouragé. rami. Abdsalam . haythem .redouane. ramzi.sidou.abdelkader tougher.abdou pnl .mohamed b .samir t .abesse .amine boualeg.latif .ahmed .mahdi .otchi . lounes.brahim.siko siko .anes roz . smati . nasro . zaki.oussama . ghafour .mahdi R.younesR. yasser R. ayoub .abdou R.amineR.abdellah .ghiles .pitcho .les frères mohri .zaki .baco.chaima. sa7ar.loubna . bendali . sochaux .walid.

Bigii / hachicha

Résumé

Depuis 15 ans, le Soudage par Friction Malaxage (FSW) a suscité un intérêt grandissant tant dans le secteur industriel que dans celui de la recherche. Le procédé résulte d'un apport de chaleur par frottement entre l'outil et la pièce et d'une forte déformation plastique dans le matériau. Cela dit la géométrie de l'outil est un paramètre important dans ce procédé de soudage en plus des autres paramètres le qui caractérise à savoir la vitesse de rotation de l'outil et la vitesse d'avance. L'objectif générale visé par cette étude est de mettre en évidence Influence des paramètres du procédé de soudage FSW sur les caractéristiques microstructurales et géométrique du joint soudé. À cet effet nous avons usiné deux différents outils pour assembler deux tôles en aluminium 2017A.

Les résultats obtenus montrent que les paramètres de vitesse de rotation de l'outil a une importance, d'une part sur les étendues des différentes zones de la soudure et d'autre part sur les caractéristiques mécaniques(exemple la microdureté relevé dans cette étude).

Abstract

Over the past 15 years, Friction Stir Welding (FSW) has attracted increasing interest in both the industrial and research sectors. The process results from a friction heat supply between the tool and the workpiece and a strong plastic deformation in the material. That said, the geometry of the tool is an important parameter in this welding process in addition to the other parameters which characterize it, namely the speed of rotation of the tool and the speed of advance. The general aim of this study is to show the influence of the geometry of the tool on the characteristics of the FSW weld. For this purpose, we have machined two different tools to assemble two 2024 aluminum plates.

The results obtained show that the geometry of the tool has an importance, in one hand on the extent of the different zones of the weld and on the other hand on the mechanical characteristics(example the microhardness recorded in this study).

ملخص

منذ 15 عامًا، أثارت تقنية اللحام بالاحتكاك والتجميع اهتمامًا متزايدًا في قطاع الصناعة وكذلك في مجال البحث. ينتج هذا العملية عن تطبيق حرارة عن طريق الاحتكاك بين الأداة والقطعة وتشوه قوي في المادة البلاستيكية. ومع ذلك، فإن هندسة الأداة تعتبر معلمة هامة في هذه العملية لحام، بالإضافة إلى المعلمات الأخرى المحددة التي تتمثل في سرعة دوران الأداة وسرعة التقدم. الهدف العام المستهدف من هذه الدراسة هو تسليط الضوء على تأثير معلمات عملية اللحام بالاحتكاك والتجميع على الخصائص A.المجهرية والهندسية للوصلة الملحومة. لهذا الغرض، قمنا بتصنيع أداتين مختلفتين لربط ورقتين من الألمنيوم 2017

تشير النتائج المحصل عليها إلى أن معلمات سرعة دوران الأداة لها أهمية، من جهة، على نطاق المناطق المختلفة للحام و، من (جهة أخرى، على الخصائص الميكانيكية) مثال على ذلك، صلابة الميكرو التي تم رصدها في هذه الدراسة

Table des matières

Introduction générale	4
Chapitre.1 Etude bibliographique sur le soudage par FSW	6
1.1 Généralités sur le procédé de soudage par friction et malaxage.....	6
1.1.1 Description du procédé de soudage par FSW.....	6
1.1.2 Les différentes phases	7
1. Phase de plongée (1)	7
2. Phase d'attente ou temps de maintien (2):	7
3. Phase d'avance ou de soudage proprement dit (3):	7
4. Phase de retrait de l'outil (4):	7
1.1.3 Les paramètres du procédé FSW	8
1.1.4 La morphologie du cordon de soudure FSW.....	12
La Zone Affectée Thermiquement (ZAT ou HAZ),.....	12
La Zone Affectée Thermo-Mécaniquement (ZATM),	12
1.1.5 Les défauts rencontrés lors du soudage par FSW	13
Défaut de porosité interne et porosité en surface :	14
Lorsque l'opération de soudage est trop froide	14
Lorsque l'opération de soudage est trop chaude	14
1. Défaut FSW de largeur irrégulière	14
2. Défauts de bavures excessives (« ribbon flash ») Bien.....	15
3. Défaut FSW de réduction de section	15
4. Défaut en surface	15
5. Défaut de manque de pénétration	16
6. Rainure (ou tunnel) à la surface du cordon de soudure	16
1.1.6 Les avantages et les limitations du procédé FSW.....	16
1.1.7 Mise en œuvre du procédé.....	18
a- Préparation des pièces à souder	18
b- Matériaux	18
c- Epaisseurs.....	18
d- Les configurations d'assemblages.....	18
1.2 Généralités sur les alliages d'aluminium :	19
1.2.1 Les différentes familles d'alliages d'aluminium	19
1.2.2 Compositions et désignation des nuances	20
La signification des chiffres :	20
b) Influence des conditions de fabrication - Etats métallurgiques	21
1.2.3 Utilisation de l'aluminium et de ses alliages	24

1.2.4	Microstructure des alliages d'aluminium :	24
a)	Les précipitations intermétalliques dites grossières	24
b)	Les dispersoïdes	25
c)	Les précipités durcissant	26
1.2.4	Conséquence des précipitations sur propriétés mécanique des alliages 2XXX	27
1.2.5.	Influence des cycles thermiques de soudage FSW	29
a)	du point de vue métallurgique :	29
b)	Evolution de la dureté du joint	29
Chapitre 2 Matériels et Méthodes		32
2.1	La composition chimique et les propriétés mécaniques de l'alliage étudié	32
2.2	Elaboration des soudures 2017A par friction malaxage	33
Les assemblages réalisés :		37
2.3	Méthodes de caractérisation	38
2.3.1	Préparation des échantillons	38
2.3.2	Enrobage :	38
2.3.3	Polissage	39
Polissage grossier :		39
Polissage de finition :		40
2.3.5	Révélation de la microstructure	41
2.3.6	Caractérisation microstructurale	41
2.3.6.1	Observation microscopique	41
2.3.6.2	Méthode de caractérisation par l'essai micro-dureté	42
Chapitre 3 Résultats et discussion		43
3.1	Etude de la soudabilité de l'alliage 2017A par FSW	43
3.1.1	Conditions de réalisation des soudures	43
3.1.2	Effet des paramètres de soudage sur l'aspect géométrique des soudures	45
3.1.3	Analyse des macrostructurale et microstructurale des soudures	45
-	Le noyau	46
-	La Zone Affectée Thermo-Mécaniquement (ZATM),	46
-	La Zone Affectée Thermiquement (ZAT)	47
Défaut de type vide		47
Défaut manque de pénétration :		47
Arrachement des fragments de particules de l'outil		48
3.2	Profils de microdureté	50
Conclusion :		52
Références		54

Liste des figures

Figure 1.1 Schéma montrant les principales composantes du procédé de soudage par friction malaxage	6
Figure 1.2 : Illustration des phases de soudage.....	8
Figure 1.3 Quelques différentes géométries de l'outil	9
Figure 5 Inclinaison de l'outil FSW	11
Figure 1.4. Structure macrographique d'un joint soudé par FSW [4]	13
Figure.1.4 les différents défaut rencontrés dans une soudure FSW [6,8].....	15
Figure 1.5 Configurations d'assemblage montrant le positionnement de l'outil et les forces de [1]	19
Figure 1.6 Alliages d'aluminium pour corroyage : Comparaison des caractéristiques mécaniques des alliages d'aluminium [9].....	23
Figure 1.7 Une partie du diagramme d'équilibre de phase Al-Cu [9].....	27
Figure 1.8 Evolution de la dureté en fonction du vieillissement	28
Figure 1.9 : Évolution de la dureté d'un alliage 2024 en fonction du type de vieillissement [11].	28
6061-T6, (d) 7075-T6 [20].....	30
Figure 1.11 les profils de dureté des joints 2024 T351 et T6 [21]	31
Figure 2.1 Fraiseuse verticale Heckert S33	33
Figure 2.3 Les outils de soudage	36
Figure 2.4 Cycle de traitement thermique pour K100 et 42CD4.....	36
Figure 2.5 Les différentes étapes d'élaboration des cordons de soudure FSW	37
Figure 2.6 Les différentes soudure	38
Figure 2.7 Processus d'enrobage à froid	39
Figure 2.8 Polisseuse de marque Presi-Minitech 233	39
Figure 2.9 Moyens de polissage de finition	40
Figure 2.10 Microscope optique Zeiss	41
Figure 2.11 schématisation de la filiation des mesures de microdureté	42
Figure 2.11 Microduromètre INOVATEST FALCON	42
Figure 3.1 micrographies optiques de l'alliage 2017A.....	43
Figure 3.2 Photographies des cordons de soudures FSW obtenus	45
Figure 3.3 Les macrographies des joints soudés	50
Figure 3.4 profil de microdureté	51

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Les familles d'alliages d'aluminium de corroyage	20
Tableau 1.2 Classement par type de transformation	21
Tableau 1.3 Désignation de l'état métallurgique de livraison [9]	21
Tableau 1.4 Désignation de l'état écroui de livraison [9]	22
Tableau 1.5 utilisation des différentes familles dans l'industrie.....	25
Tableau 2.1 Composition chimique 2017A [22].....	32
Tableau 2.2 les caractéristiques mécanique	32
Tableau 2.3 Les paramètres de soudage	33
Tableau 2.4 Composition chimique 42CD4 et ses caractéristiques mécaniques moyennes /(trempé/revenu)	34
Tableau 2.5 Composition chimique K100 et ses caractéristiques mécaniques moyennes	34
Tableau 2.6 Les assemblages et paramètres	37

Introduction générale

Avant l'invention du FSW, il y avait eu quelques développements technologiques importants des procédés de soudage sans fusion, qui ont trouvé des utilisations industrielles limitées. Un de ces procédés est le soudage par friction rotative développé à l'époque juste avant l'invention du laser. Le soudage par friction permet de réaliser des **assemblages en bout de deux pièces dont l'une au moins a une symétrie de révolution**. Il met en œuvre l'effet thermique engendré dans leur plan de joint par la rotation rapide sous pression des pièces l'une sur l'autre ou encore par friction. La puissance de chauffe résulte du couple résistant et de la vitesse de rotation maintenue en principe constante. Bien que l'opération de soudage par friction soit simple, la géométrie de soudage est assez restreinte et donc son utilisation est également limitée. Puis un jour, en 1991 Wayne Thomas de l'institut de soudage (TWI)[1] s'est rendu compte qu'avec l'utilisation d'un outil rotative en matériau plus dur que les pièces à assembler pouvait plastifier la matière et créer une liaison entre les deux pièces accostées bout-à-bout. Ainsi le procédé FSW a été né et breveté dans la même année. Ce procédé se distingue des autres procédés de soudage par sa capacité de souder la matière à l'état visqueux, sans passer par le point de fusion. L'industrie aéronautique s'est tout de suite intéressée à ce procédé car il rend possible le soudage des alliages d'aluminium de la famille des 2XXX et des 7XXX, alliages d'aluminium réputés non-soudables par d'autres procédés.

Le soudage par friction-malaxage étant un procédé récent, il demeure encore un sujet de recherches actif, pour mieux appréhender certains points comme, l'influence des précipitations sur le comportement mécanique de la soudure, le soudage hétérogène, l'influence de la forme de l'outil...etc. particulièrement lorsqu'il s'agit de souder les alliages d'aluminium à durcissement structurale. En effet, la géométrie de l'outil FSW a un impact direct sur la qualité du cordon de soudure particulièrement sur la dureté et la microstructure de la zone soudée.

Dans le cadre de cette étude, il s'agit de mettre en évidence l'influence de certains paramètres du procédé sur le comportement microstructurale et mécanique de la soudure FSW d'un alliage série 2XXX.

Afin de répondre à cet objectif, ce manuscrit s'articule autour de trois chapitres.

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique qui comporte deux volets. Dans

Un premier temps, on présente des généralités sur le procédé de soudage par friction malaxage. Dans le second volet, l'intérêt est porté sur l'état de l'art des alliages d'aluminium. On présente d'abord des généralités sur les alliages d'aluminium et on se concentre ensuite sur les alliages de la série 2000. On discutera particulièrement les caractéristiques et l'évolution microstructurale après un traitement thermique essentiellement après un cycle thermique de soudage.

A la suite de ce chapitre, les différentes méthodes et techniques utilisées pour ce travail sont décrites au sein du Chapitre 2. Les techniques de préparation, d'observation et de caractérisation sont abordées. Dans le chapitre 3 on présente les résultats principaux avec discussion.

Chapitre.1 Etude bibliographique sur le soudage par FSW

1.1 Généralités sur le procédé de soudage par friction et malaxage

1.1.1 Description du procédé de soudage par FSW

Le soudage par friction malaxage (Friction StirWelding, FSW) est un procédé de soudage à l'état solide inventé en 1991 par Wayne Thomas du TWI (The Welding Institute) à Cambridge, Royaume-Uni [1].

Lors du soudage par friction-malaxage, un outil rotatif constitué d'un pion profilé et d'un épaulement est enfoncé dans la matière jusqu'à ce que l'épaulement touche la surface du matériau à souder (Figure 1.1). La matière est ainsi chauffée par friction à des températures où elle est facilement malléable sans entrer en fusion. Lorsque l'outil avance entre les tôles, la matière s'écoule de l'avant vers l'arrière du pion pour former le joint soudé. Ce procédé permet de souder des alliages d'aluminium non soudables avec les procédés TIG et MIG, ainsi que les alliages sensibles à la fissuration à chaud (alliages AlCu ou AlZnMgCu), mais il peut également être utilisé pour souder d'autres matériaux tels que le cuivre, le titane et l'acier.

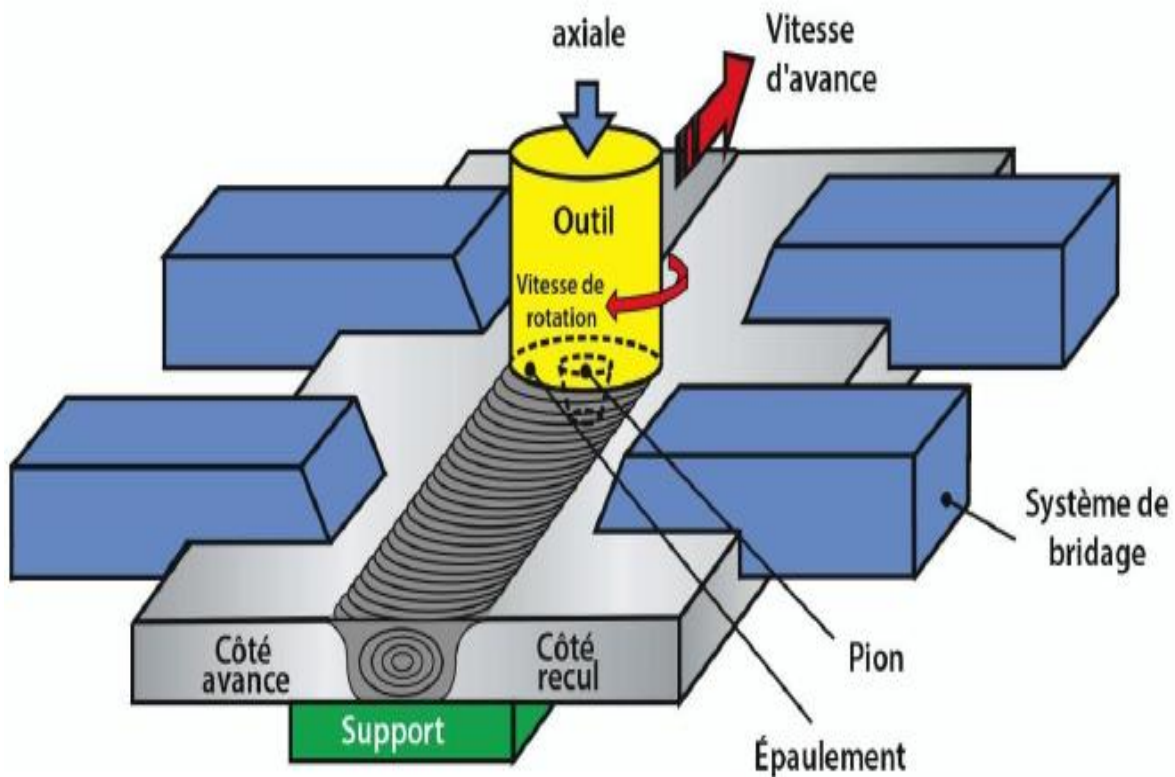


Figure 1.1 Schéma montrant les principales composantes du procédé de soudage par friction malaxage[1]

1.1.2 Les différentes phases

La figure 1.2 montre un joint bout à bout à réaliser entre 2 plaques d'aluminium. Les deux parties de l'assemblage doivent être accostées et bien retenues (système de bridage) sur un support afin de contrer les forces générées par l'outil rotatif. Cet outil de forme cylindrique en acier à haute résistance possède un épaulement (shoulder) qui par frottement sur les plaques génère la chaleur le long de la zone à souder. Cet épaulement est prolongé par un pion (pin) dont la longueur est adaptée à l'épaisseur des plaques afin de plonger dans métal jusqu'au plus près du support pour une soudure « pleine pénétration ». La géométrie du pion, en général de forme cylindrique ou tronconique et comportant en surface diverses sortes de reliefs. Son rôle est de malaxer efficacement le métal dans le joint en générant un minimum d'effort à l'avance de l'outil. On démarre le soudage à la vitesse d'avance lorsque l'épaulement en rotation contre la surface a permis, en quelques secondes, d'atteindre la température optimale de soudage. Elle se situe normalement entre 80% et 90% de la température de fusion du métal à souder [1]. À cette température le métal reste solide, mais se déforme facilement. On comprend donc qu'un outil en acier rapide (high speed steel) qui conserve sa dureté jusque vers 900°C offre une excellente résistance en soudage par friction malaxage des alliages d'aluminium dont la température de fusion ne dépasse pas 660°C. La vitesse d'avance optimale, influencée par plusieurs paramètres dont la vitesse de rotation et la géométrie de l'outil, est obtenue par des essais de qualification sur les composantes à assembler. Cette vitesse peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres par minutes dépendamment des paramètres d'opération optimaux pour le joint à souder.

La soudure obtenue par friction malaxage est réalisée, avec l'outil en rotation (entre 400 et 1400 rpm), en quatre phases distinctes dont chacune a un rôle précis. La figure 1.2 illustre ces quatre phases, soit :

- 1. Phase de plongée (1) :** le pion de l'outil en rotation pénètre dans le joint jusqu'à ce que l'épaulement exerce la force de compression requise pour générer la chaleur.
- 2. Phase d'attente ou temps de maintien (2):** Cette période permet à l'outil de réchauffer le joint à la température requise avant de commencer à avancer
- 3. Phase d'avance ou de soudage proprement dit (3):** l'outil en rotation se déplace à une vitesse constante le long du joint en exerçant une pression constante sur la surface.
- 4. Phase de retrait de l'outil (4):** l'outil arrête d'avancer et se retire de la surface.

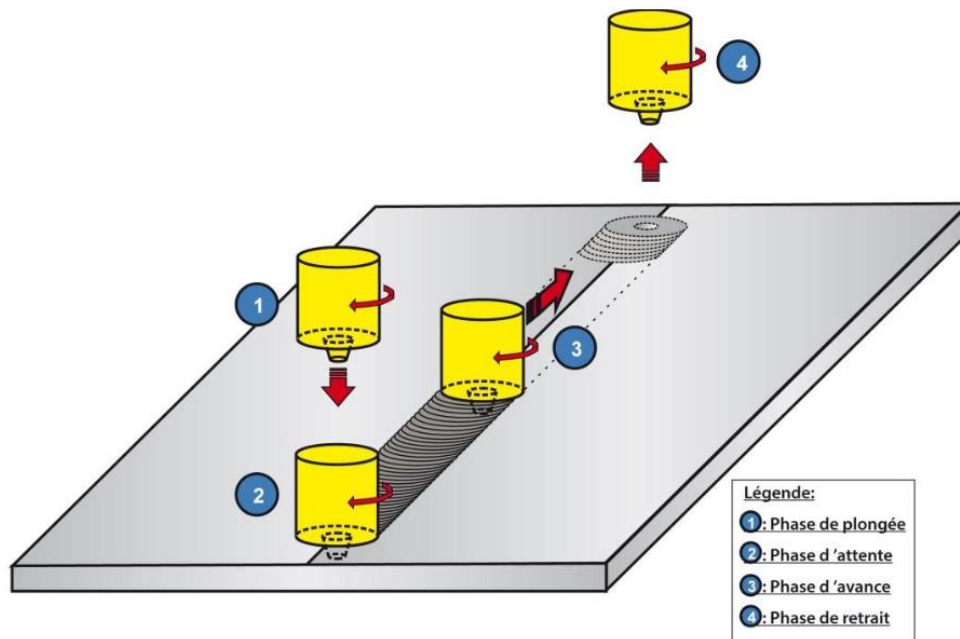


Figure1.2 : Illustration des phases de soudage[1]

1.1.3 Les paramètres du procédé FSW

Les paramètres du procédé qu'ont le plus d'influence sur le flux de matière et la quantité de chaleur générée, donc, qui ont le plus d'influence sur l'état final du joint soudé, sont essentiellement : la géométrie de l'outil, les réglages du procédé.

i) La géométrie de l'outil :

La géométrie de l'outil a une influence particulière sur la circulation de la matière dans la zone malaxée. L'outil est constitué de deux parties actives (le pion et l'épaulement) importantes dans le développement de la soudure, qui sont (figure 1.3(a)) :

- **Le pion** : La forme du pion est généralement cylindrique, tronconique et/ou prismatique ou hélicoïdale et peut contenir des reliefs variés dans le but d'augmenter l'effet du malaxage du métal. La figure 1.3(c) montre quelques formes géométriques du pion. Le choix des dimensions et du profile du pion dépend de la nature des matériaux constituant les tôles à souder et de leur épaisseur.
- **L'épaulement** : le rôle de l'épaulement est essentiellement de chauffer la matière sur la surface et les couches superficielles et peut lui aussi avoir des variations géométriques comme, par exemple, plane, convexe ou concave. Elle peut avoir d'autres particularités permettant d'accélérer la déformation plastique des pièces et/ou de mieux contrôler le déplacement de matière. On trouve ainsi des épaulements avec des arêtes, des rainures ou encore des cercles

concentriques, des spirales gravées (figure 1.3(b)) , avec le même objectif d'augmenter le flux de matière et le frottement créé.

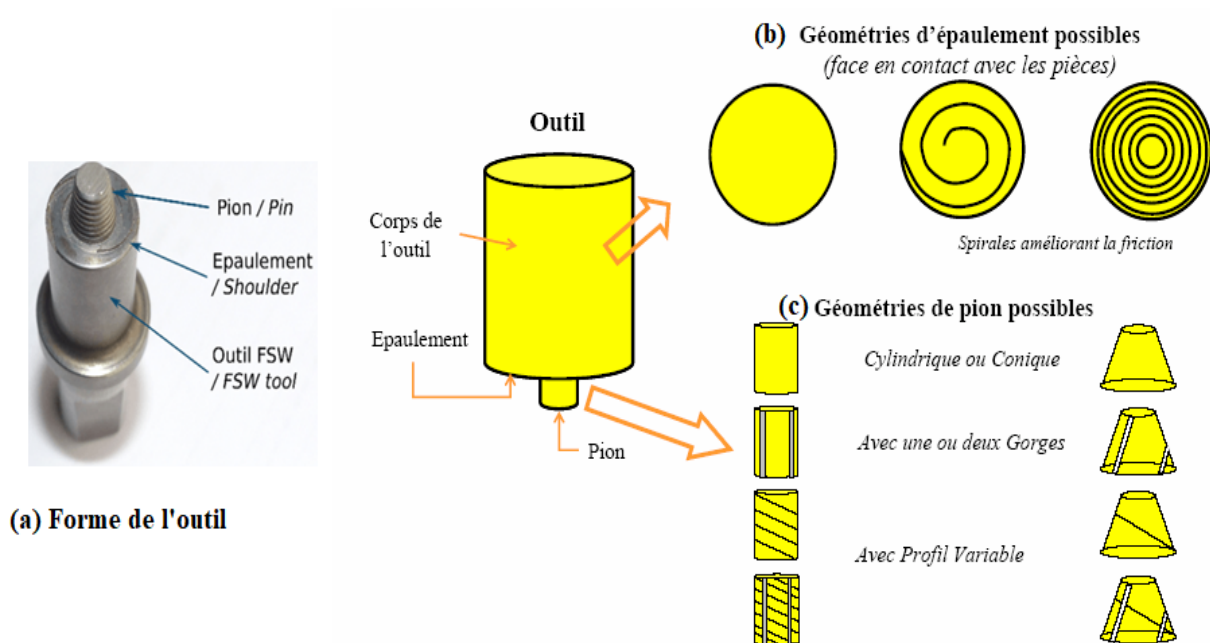


Figure 1.3 Quelques différentes géométries de l'outil[36, 37]

ii) Matériau de l'outil et sa dureté : Le matériau dont est constitué l'outil de soudage et choisi selon les matériaux à assembler ; doit donc répondre aux caractéristiques suivantes :

- Résistance à température élevée
- Une dureté adéquate est nécessaire pour résister à l'usure due aux forces mécaniques et thermiques appliquées pendant le processus de soudage.
- la durabilité et la conductivité thermique de l'outil.

Différents matériaux ont été testés pour l'élaboration des outils de soudage par FSW [3]:

- **Les aciers à outils alliés au chrome manganèse et molybdène pour travail à froid:** ces aciers présentent une bonne trempabilité, bonne résistance aux chocs et aptes à tout type de nitruration X40CrMoV5-1 trempé jusqu'à 50HRC). Ces aciers sont généralement utilisés pour le soudage des matériaux à bas point de fusion.
- **L'acier à outils pour travail à chaud** tel que H13, celui-ci est un acier allié au chrome-molybdène qui est largement utilisé dans les applications d'outillage de travail à chaud et à froid. En raison de son excellente combinaison de ténacité élevée et de résistance à la

fissuration par fatigue thermique, le H13 est utilisé pour plus d'applications d'outillage de travail à chaud que tout autre acier à outils.

- **Les aciers rapide** (HSS : high speed steel) : sont des aciers destinés à la réalisation d'outils à coupe à grande vitesse, d'où leur nom. Après un traitement de trempe ils conservent leurs caractéristiques de dureté même à haute température. Ils sont chargés en éléments d'alliage comme le tungstène, le molybdène, le chrome, le cobalt et vanadium qui favorisent la création, dans la solution solide, de carbures très durs, qui améliore la résistance à la chaleur, la tenue de la dureté (env. 62-65 HRC), la résistance à l'usure.
- **Les cermets** : matériaux frittés, résistants à haute température, préparés suivant les techniques de la métallurgie des poudres. Ils sont composés d'une ou plusieurs phases non métalliques, dures et très réfractaires, mais fragiles, et d'une phase métallique ductile, résistant à la corrosion à chaud et servant de liant. Cette association de phases a pour but de rassembler dans un même matériau la résistance à l'oxydation à chaud, la ductilité et la résistance aux chocs thermiques :
- **Les superalliages** (alliages à base de chrome, de nickel et de cobalt, qui présentent une excellente résistance au fluage et une très bonne stabilité structurelle à température élevée (800 à 1100°C), ainsi qu'un très bon niveau de résistance à l'oxydation et à la corrosion en milieu agressif),

iii) Paramètres cinématiques : Les paramètres les plus importants sont la vitesse de rotation ω et la vitesse d'avance v_a .

La vitesse de rotation ω est mesurée en tour par minute – RPM. Plus l'outil tourne vite, plus le matériau sera chaud. Il est donc important de contrôler et de maîtriser cette vitesse de rotation pour obtenir une soudure FSW parfaite.

La vitesse d'avance v_a est mesurée en *mm/min*. Plus l'outil avance vite, plus le matériau sera froid. Tout comme la vitesse de rotation, la vitesse d'avance doit donc être contrôlée et maîtrisée. Elle influence directement la forme et les caractéristiques géométriques de la soudure. Une vitesse d'avance élevée peut produire une soudure plus étroite, tandis qu'une vitesse plus faible peut conduire à une soudure plus large. Le choix de la vitesse d'avance dépend de plusieurs facteurs tels que la taille de la pièce, le matériau à souder, la géométrie de l'outil, etc. Une vitesse d'avance inappropriée peut entraîner des défauts de soudure tels que des discontinuités ou une

mauvaise pénétration.[3]

La stabilité du procédé FSW peut être quantifiée par le *feed ratio* (k) qui se calcul comme suite :

$$k = \frac{v_a}{\omega}$$

Plus k sera petit plus le matériau sera chaud et inversement. Il faut donc trouver la bonne plage de k pour trouver la bonne température de soudage.

En plus de ces paramètres cinématiques, d'autres sont aussi importants lors de la phase de soudage, il s'agit de :

L'angle d'inclinaison entre l'axe de l'outil et l'axe perpendiculaire au plan des plaques « *tilt* » en anglais. L'utilité de cette inclinaison de l'outil consiste à empêcher que la matière malaxée par le pion sorte en forme de copeau par l'arrière de l'outil.

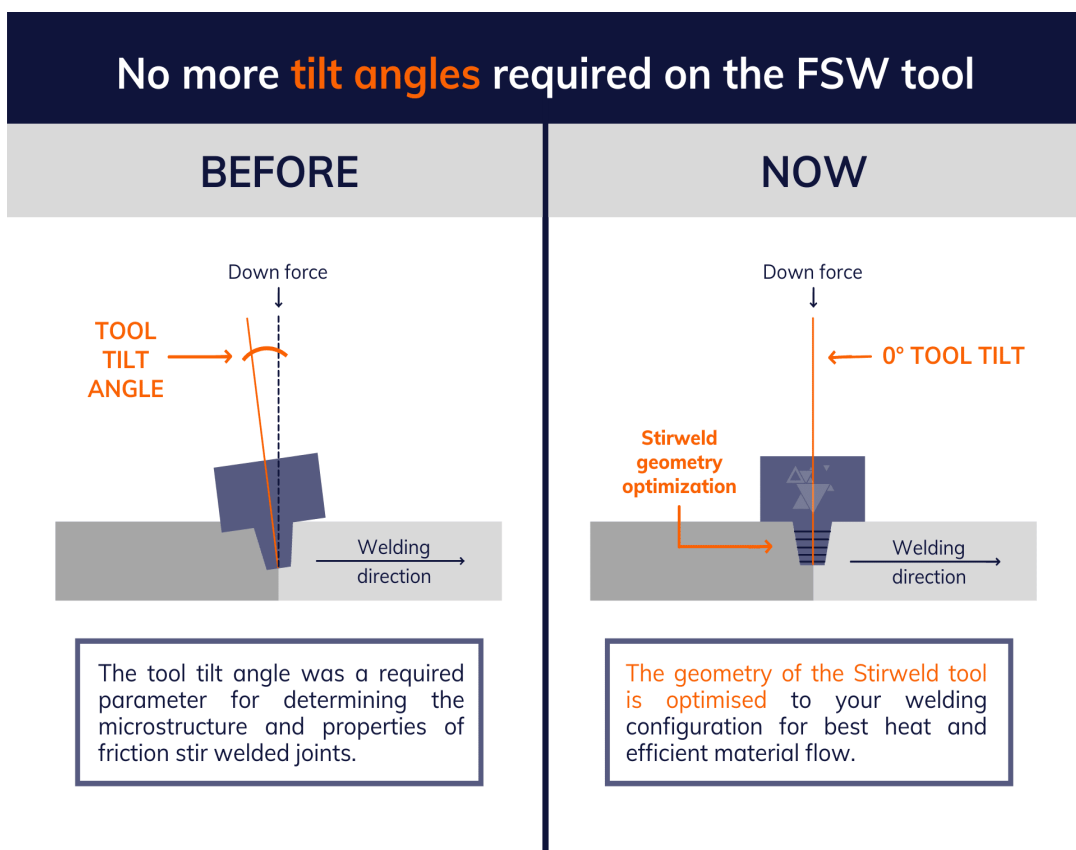


Figure 2 Inclinaison de l'outil FSW[36]

Laforce exercée est mesurée en kilo Newton – kN. Si cette force est trop faible, il aura un risque de manque de pénétration de l'outil et donc un risque de défauts de compacité de la soudure. A

l'inverse, si elle est trop forte cela engendre un enfoncement excessif de l'outil dans la matière et donc une réduction de la section soudée.

Ces différents paramètres sont à régler selon les matériaux, l'épaisseur soudée et la géométrie de l'outil. L'ensemble conditionne l'apport d'énergie, le flux de matière, la formation du cordon, les propriétés mécaniques de l'assemblage et les efforts générés [3]. Le choix de ces paramètres est donc primordial

1.1.4 La morphologie du cordon de soudure FSW

La microstructure d'une soudure FSW se divise en 4 zones. Le noyau (Nugget Zone (NZ) ou Stirred Zone en anglais), la zone affectée thermomécaniquement (Thermomechanically Affected Zone ou TMAZ en anglais), la zone affectée thermiquement (Heat Affected Zone ou HAZ en anglais) et le métal de base non affecté (Unaffected zone ou Base Métal (BM) en anglais). La Figure 1.4(a) illustre schématiquement ces différentes zones. La Figure 1.4(b) montre aussi un exemple réel de microstructure d'un joint soudé dans un alliage d'aluminium A7075.

Le Métal de Base (MB) situé loin du joint, ne subit aucune déformation mécanique lors de l'opération de soudage et les températures atteintes n'engendrent pas de modifications microstructurales. Il conserve ses propriétés mécaniques initiales.

La Zone Affectée Thermiquement (ZAT ou HAZ), comme le métal de base, ne subit aucune déformation mécanique lors de l'opération de soudage. Toutefois, les températures atteintes sont plus élevées, et engendrent des modifications microstructurales, tels que la modification de la taille des grains, la formation de phases secondaires qui vont modifier localement les propriétés mécaniques initiales. La dureté de cette ZAT dépendra donc de la composition chimique du matériau de base et des conditions de refroidissement.

La Zone Affectée Thermo-Mécaniquement (ZATM), située sous l'épaulement de l'outil, est soumise à des températures élevées et à une déformation mécanique non négligeable, due aux flux de matière entraînés par le passage du pion de l'outil. Cela conduit à des changements microstructuraux tels que la recristallisation partielle des grains, la formation de structures

dendritiques, des variations de la taille des grains et des changements de texture. Les propriétés mécaniques de la TAMZ peuvent être différentes de celles du matériau d'origine en raison de ces changements microstructuraux. La dureté dans la ZTMA peut être plus élevée que dans la zone de base d'origine, mais elle est généralement inférieure à celle de la zone de soudure.

Enfin, **le Noyau Soudé (NS ou zone malaxée)** : Il s'agit de la zone centrale de la soudure où le matériau a été soumis à des températures élevées et à une déformation plastique intense due à l'action de l'outil de soudage. Dans cette zone, on observe généralement une microstructure recristallisée fine et homogène, avec des grains fortement malaxés et orientés de manière complexe. Le nugget est généralement la zone la plus solide et la plus dense de la soudure, et elle est responsable de la résistance mécanique du joint.

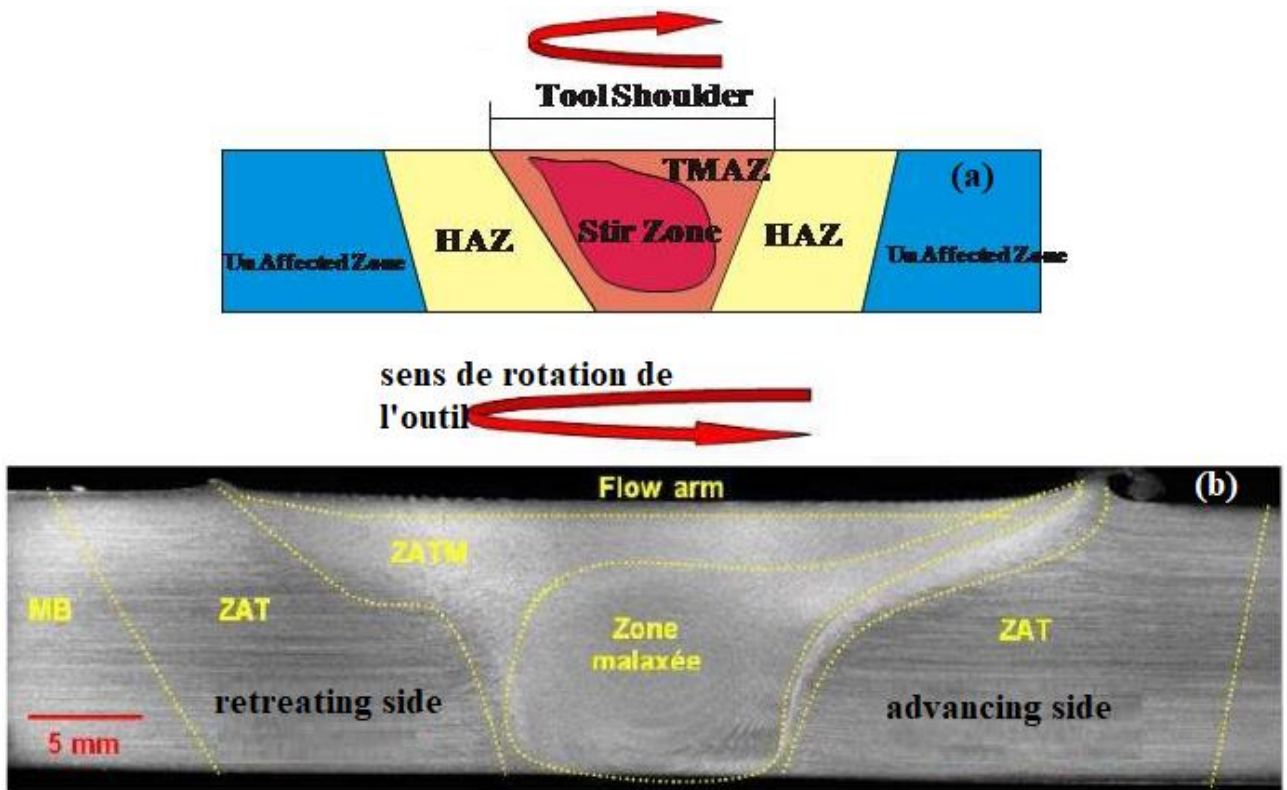


Figure 1.4. Structure macrographique d'un joint soudé par FSW [4]

1.1.5 Les défauts rencontrés lors du soudage par FSW

Il n'est pas rare de voir apparaître des défauts de soudage en surface (type rainure) ou encore en tunnel lors du processus de soudage par friction malaxage, qu'il soit de type bout à bout ou par recouvrement. En revanche, nous ne retrouvons pas toujours les mêmes défauts en fonction de la configuration de soudage FSW effectuée.

Défaut de porosité interne et porosité en surface : On relève parfois lors d'un contrôle qualité FSW des porosités interne ou en surface. Ce type de défaut est le résultat d'un soudage trop chaud ou bien trop froid.

Lorsque l'opération de soudage est trop chaude : c'est que le ratio entre la vitesse d'avancement et la vitesse de rotation est trop élevé. Avec ce ratio trop important, la soudure laisse apparaître des porosités internes, signe que les matières ne sont pas assez malaxées lors du soudage. Cette porosité est continue le long de la soudure et est plus communément appelé en FSW, *trou de ver* (Figure 1.4(b)).

Lorsque l'opération de soudage est trop froid : c'est au contraire que ce ratio vitesse d'avancement sur vitesse de rotation est trop faible. Cet excès de chaleur peut donc provoquer une fusion superficielle du matériau, l'éjection de la matière et la création de porosité en surface (Figure 1.4(a)).

1. Défaut FSW de largeur irrégulière : Le défaut de largeur irrégulière se traduit très simplement par un manque de force et donc un manque d'appui entre l'outil FSW et les pièces à souder. Le contact entre les éléments n'étant pas assez fort, la friction n'est pas faite de manière régulière et porte atteinte à la bonne soudure des éléments. Pour corriger une largeur irrégulière lors d'une opération FSW on corrige le paramètre de force en appliquant une plus grande pression sur l'outil FSW.

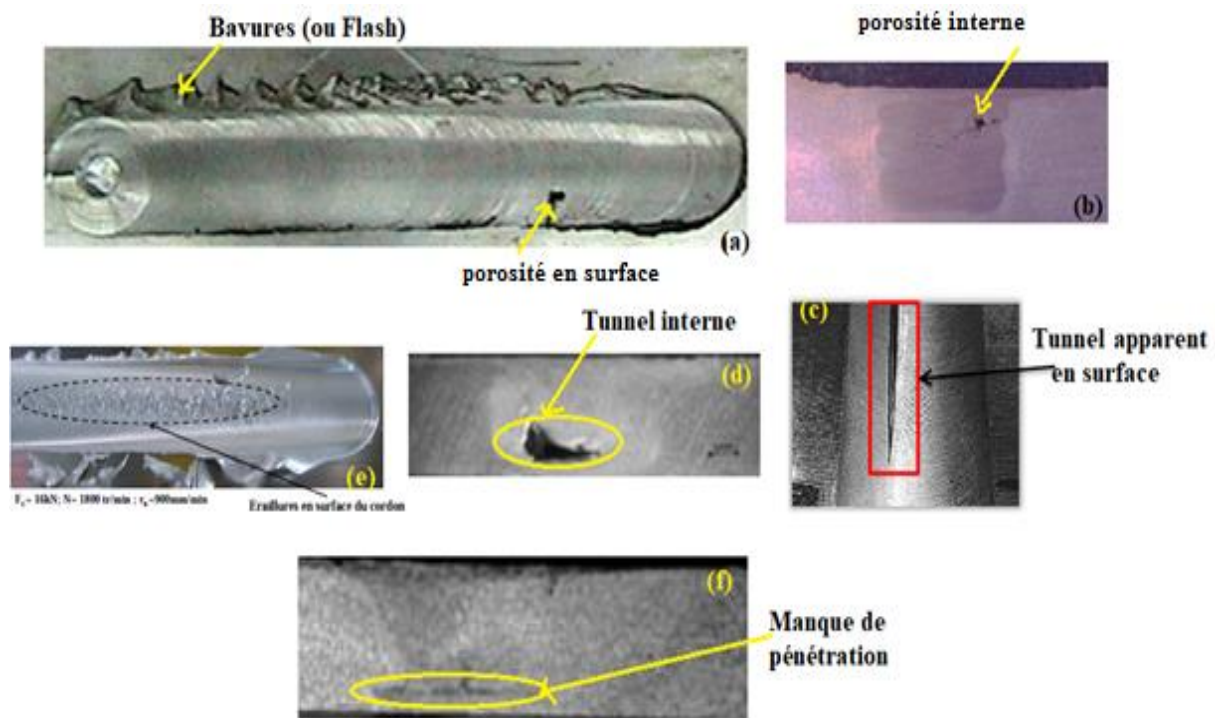


Figure.1.4 les différents défaut rencontrés dans une soudure FSW [6,8]

2. Défauts de bavures excessives (« ribbon flash ») Bien que considérées comme défaut visuel, les bavures (flash) en FSW sont signe d'une bonne soudure. Les bavures sont tout simplement un rejet de la matière soudée sur les bords de la soudure (*Figure.1.4(a)*). Lorsque la température générée sous l'épaule est trop élevée, l'outil s'enfonce dans le matériau et entraîne l'expulsion du métal en excès et par conséquent l'amincissement de la tôle.

Un flash de 2 mm est acceptable. Au-dessus de cette valeur, une réduction de la force verticale de soudage est à appliquer [1,3].

3. Défaut FSW de réduction de section : A l'inverse d'un défaut de largeur irrégulière rencontré lors d'un manque d'appui en soudage par friction malaxage, des défauts de réduction de section peuvent apparaître en cas d'excès de force. En effet si la force exercée lors du processus de soudage par friction malaxage est trop forte, cela engendre un enfoncement excessif de l'outil dans la matière et provoquera donc une réduction de la section soudée. Dans ce cas aussi, la solution est de modifier le paramètre de force de l'outil.

4. Défaut en surface tel que la formation d'**éraillures ou écailles** présentées à la *Figure.1.4(e)*.

5. Défaut de manque de pénétration : Facilement évitable, le défaut LOP (Lack of pénétration ou aussi appelé manque de pénétration à la racine) est cependant problématique en soudage FSW bout à bout. Il s'agit en effet tout simplement d'un manque de brassage des pièces. L'outil ne passe pas complètement à travers les deux pièces, il ne fait que coller les pièces entre elles mais ne les soude pas. Ce défaut est difficilement visible à l'œil nu, il s'agit d'un défaut interne. Afin d'éviter ce défaut de manque de pénétration, il faut choisir une force de plongée ainsi que l'utilisation d'un outil adapté à l'application ; un outil plus long pour une meilleure pénétration.

6. Rainure (ou tunnel) à la surface du cordon de soudure : Elle est due au manque de consolidation de la matière, (Figure 1.4(c)). Ce défaut est généré du côté avance lorsque la profondeur de pénétration est trop faible. Il peut être résorbé en appliquant un effort de forgeage plus élevé [5].

1.1.6 Les avantages et les limitations du procédé FSW

Sans fusion ni apport de matière, la technique de soudage par FSW réduit sensiblement les pertes de résistance, ainsi que les phénomènes de retrait et de distorsion : le matériau se déforme peu, même pour les grandes longueurs. Puisque les soudures s'effectuent à l'état solide et donc à faible niveau de température, il n'y a pas de phase de solidification donc pas de fissuration possible. Contrairement aux soudures par fusion qui peuvent éventuellement requérir un traitement thermique après le soudage pour augmenter la résistance des pièces, ce traitement est optionnel en soudage FSW pour les séries 2000, 6000 et 7000.

La technique FSW est une technologie innovante qui permet d'assembler non seulement les alliages d'aluminium mais également tout autres types de matériaux ; Ainsi, si beaucoup d'industries ont choisi d'investir dans cette nouvelle technologie d'assemblage c'est qu'il présente non seulement un excellent potentiel d'automatisation et de gains en productivité, mais également de nombreux avantages :

- Fiabilité et répétabilité améliorées, une fois que les paramètres de soudage ont été définis
- Procédé rapide en une passe
- Hautes résistance et étanchéité de la soudure, absence de porosités, inclusions, retassures ou soufflures

- Possibilité d'assembler des pièces de sections fortement différentes à condition de prendre certaines mesures de précaution.
- Des matériaux dissemblables peuvent être assemblés, comme l'aluminium ou le cuivre à de l'acier.
- Résultat esthétique du fait de la régularité du mouvement et de la planéité de la soudure qui ne nécessite pas d'usinage ni de nettoyage. Finalement, la finition de l'arrière du joint est tout à fait acceptable et son retraitement est facultatif.
- Soucieux de l'environnement : pas de gaz de protection, pas de fumées de soudage ou rayonnement.
- Au final, les propriétés mécaniques des assemblages s'en trouvent améliorées : traction, fatigue, tension, flexion.
- Economique: le soudage par friction permet de réaliser d'intéressantes économies sur le coût des pièces soudées (économie en temps, en matériau).
- Pas de nécessité de soudeurs agréés

Comme pour les autres procédés de soudage, il existe également certaines limitations du FSW qui sont énumérées ci-dessous :

- Bridage très important dû aux grands efforts mis en jeu
- Limitations à des géométries plutôt simples, avec une surface relativement plane dans la zone soudée
- Présence nécessaire d'un support sous les pièces à souder (sauf si on utilise un outil à Double épaulement)
- Faible vitesse de soudage par rapport à certains procédés de soudage par fusion automatique.
- La présence d'un trou après retrait du pion à la fin de la soudure qui peut être contournée par l'utilisation d'un outil à pion rétractable
- Exigence d'une conception d'outil séparée pour les matériaux de soudage d'épaisseur variable.
- Encombrement de la tête de soudage qui peut limiter l'accès à certains endroits
- En outre, les limites du FSW résident essentiellement dans la taille et le prix des machines. Un équipement à forte intensité de capital est nécessaire.

1.1.7 Mise en œuvre du procédé

a- Préparation des pièces à souder

Dans ce procédé, il n'y a ni perturbation ni incidence éventuelle sur la qualité géométrique et mécanique de l'assemblage. En particulier, pour des alliages d'aluminium, il n'est pas nécessaires de décaper les pièces avant de les souder et, de plus, les oxydes sont broyés mécaniquement et se diluent dans le joint soudé. En principe, l'outil entre en contact avec la matière des deux pièces à souder et sa vitesse de rotation et l'effort appliqué conduisent naturellement à sa plongée. Cependant, dans le cas des matériaux durs ou de tôles de forte épaisseur, on peut faciliter sa plongée en pratiquant un perçage préalable qui se comble ensuite par la soudure.

b- Matériaux

Le procédé de soudage FSW est bien adapté, particulièrement, aux alliages d'aluminium d'épaisseurs moyennes (6 à 10mm). Pour développer les conditions d'application du procédé à ces matériaux industriels, de nombreuses recherches sont menées. Les autres procédés de soudage par fusion rencontrent des limites technologiques et impliquent des mesures de mise en œuvre plus contraignantes, ce qui permet de distinguer le procédé FSW par sa simplicité. L'application du procédé de soudage FSW aux autres matériaux réputés soudables comme le cuivre et ses alliages, le plomb, le titane et ses alliages, les alliages de magnésium, le zinc, les aciers doux et les matières plastiques, fait actuellement l'objet des études de recherche [3]. Pour les aciers, la difficulté principale réside dans le choix du matériau de l'outil et sa géométrie.

c- Epaisseurs

Le procédé FSW a été développé dans le cadre d'épaisseurs moyennes. Aujourd'hui, il est envisagé dans le cadre de tôles minces, soit bout à bout, soit par superposition, telles sont les configurations les plus utilisées dans la construction automobile.

d- Les configurations d'assemblages

Au cours du procédé de soudage par friction et malaxage, il y a la possibilité de déplacer soit la pièce soit l'outil. On peut donc envisager différentes configurations d'assemblage sous différentes positions (voir Figure 1.5).

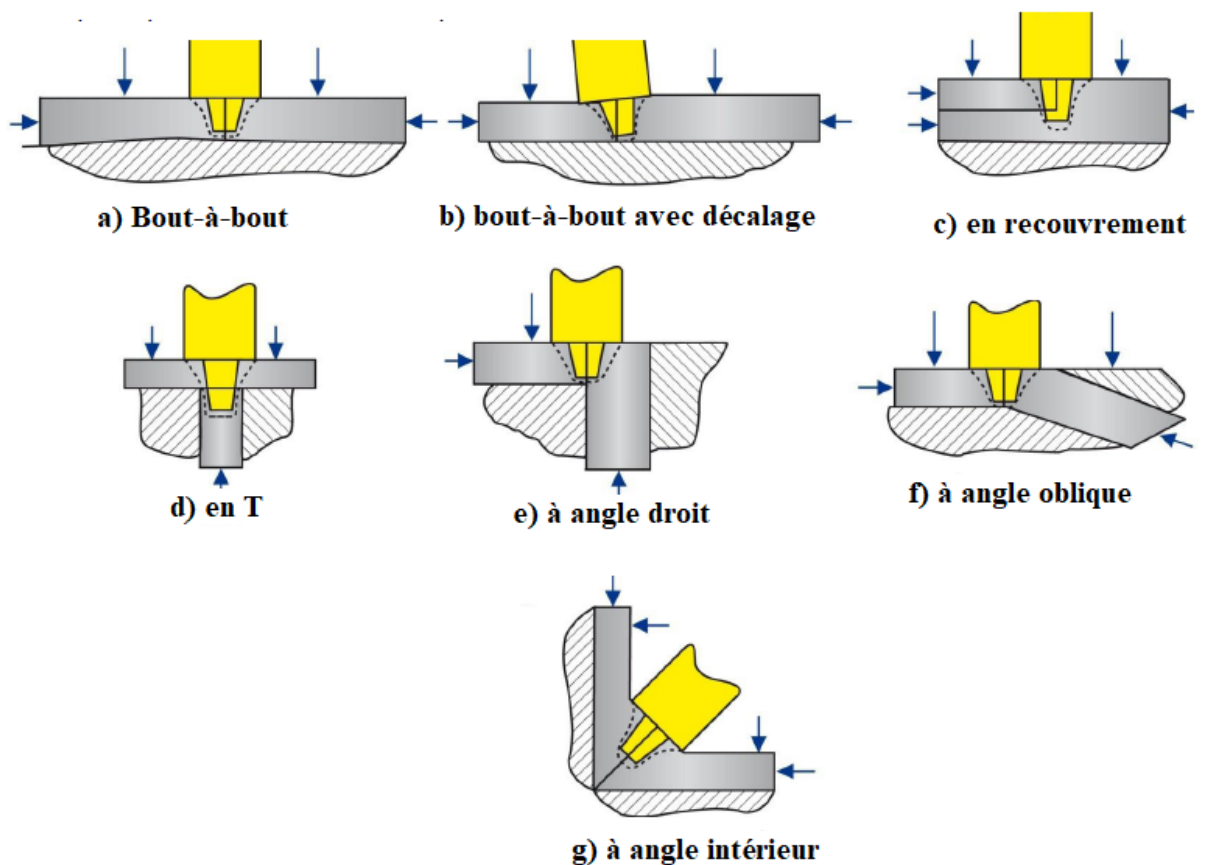


Figure 1.5 Configurations d'assemblage montrant le positionnement de l'outil et les forces de [1]

1.2 Généralités sur les alliages d'aluminium :

1.2.1 Les différentes familles d'alliages d'aluminium

La résistance mécanique de l'aluminium pur est relativement faible et interdit son emploi pour certaines applications. Cette résistance mécanique peut être notablement augmentée par l'addition d'autres métaux, formant ainsi des alliages. Ces éléments comprennent, cuivre, le manganèse, le magnésium, le silicium, et le zinc à des concentrations combinées pouvant représenter jusqu'à 15% de l'alliage en poids [1].

En fonction de l'application, les alliages d'aluminium sont produits à la fois sous forme coulée et forgée :

- les alliages d'aluminium forgés : dits aussi de corroyage. Ils sont obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou à froid tels que le filage, le laminage,
- Les alliages de fonderie (moulage) : obtenus par fonderie seulement écouli.

Ainsi, on distingue deux méthodes de référencement des alliages selon qu'ils appartiennent à la famille des produits corroyés (xxxx) ou de fonderie (xxx.x). Seuls les alliages corroyés sont étudiés dans le cadre de ce travail. De par leurs propriétés mécaniques globalement supérieures, ces derniers sont privilégiés pour la majorité des cas d'applications industrielles.

1.2.2 Compositions et désignation des nuances

Le Tableau 1.1 donne la désignation standard à quatre chiffres, développée par l'Aluminium Association pour les alliages d'aluminium corroyés [7]. Cette désignation est suivie par la majorité des pays du monde et est appelée Système international de désignation des alliages (IADS).

Les séries sont définies en fonction de l'élément d'alliage principal.

Tableau 1.1 Les familles d'alliages d'aluminium de corroyage

série	Désignation	Élément d'alliage principal	Phase principale présente dans l'alliage
Série 1000	1XXX	99 % d'aluminium au minimum	-
Série 2000	2XXX	Cuivre (Cu)	Al ₂ Cu - Al ₂ CuMg
Série 3000	3XXX	Manganèse (Mn)	Al ₆ Mn
Série 4000	4XXX	Silicium (Si)	-
Série 5000	5XXX	Magnésium (Mg)	Al ₃ Mg ₂
Série 6000	6XXX	Magnésium (Mg) et Silicium (Si)	Mg ₂ Si
Série 7000	7XXX	Zinc (Zn)	MgZn ₂
Série 8000	8XXX	Autres éléments	-
Série 9000	/	Non utilisé	-

La signification des chiffres :

Le premier chiffre indique l'élément d'alliage le plus important (Xxxx). Il est également utilisé pour désigner les différentes séries d'alliages d'aluminium telles que séries 1000, 2000 jusque 8000 (voir tableau 1.1).

Le deuxième chiffre (xXxx), s'il n'est pas nul, indique s'il y a eu modification de l'alliage spécifique.

Les troisième et quatrième chiffres identifient un alliage spécifique dans la série. Par exemple : pour l'alliage 5183, le chiffre 5 indique qu'il s'agit d'un alliage de magnésium, le chiffre 1 indique qu'il s'agit de la première modification par rapport à l'alliage originel 5083 et le nombre 83 identifie l'alliage dans la série 5xxx.

La seule exception dans ce système est la série 1xxx (aluminium pur) où les deux derniers chiffres donnent la teneur en aluminium minimal au-dessus de 99 %.

L'alliage 1350 contient donc au moins 99,50 % d'aluminium

b) Influence des conditions de fabrication - Etats métallurgiques

Les alliages d'aluminium destinés à être corroyés peuvent être classés en deux familles en fonction du type de transformation ou de traitement qui permettront d'obtenir les caractéristiques mécaniques et de résistance à la corrosion (Tableau 1.2) :

- les alliages à durcissement par écrouissage qui obtiendront leurs caractéristiques mécaniques par écrouissage, donc par déformation à froid.
- les alliages trempant qui seront durcis par traitement thermiquement ;

Tableau 1.2 Classement par type de transformation

	Alliages trempant ou à durcissement structural par à traitement thermique	Alliage à durcissement par écrouissage ou non trempant ou sans traitement thermique
Série	2000 6000 7000	1000 3000 4000 5000 8000

Il est possible de distinguer différentes étapes de transformations qui sont décrites par des lettres suivies par un ou plusieurs chiffres comme le montrent les Tableaux 1.3. Le premier chiffre indique un cycle de traitements thermiques ou mécaniques (écrouissage...), les chiffres suivants précisent les variantes possibles du cycle.

Tableau 1.3 Désignation de l'état métallurgique de livraison [9]

Lettre	Signification
F	<i>État brut de fabrication</i> : Cette désignation s'applique pour les produits n'ayant pas subi de transformations ou traitements thermiques
O	<i>État recuit</i> : Cette désignation s'applique pour les produits ayant subi un traitement thermique, ce qui donne les propriétés de résistance les plus

	faibles afin d'améliorer la ductilité et la stabilité dimensionnelle en diminuant les contraintes internes du matériau
H	État durci par écrouissage (spécifique aux familles 1000, 3000, 5000 et 8000) : Cette désignation s'applique pour les produits écrouis par déformation à froid qui peut être suivie d'un traitement thermique, ce qui diminue la résistance en partie. La lettre H est toujours suivie de deux chiffres (Tableau1.4).
W	État trempé après mise en solution : État instable qui n'est appliqué que sur des alliages qui vieillissent spontanément à température ambiante
T	État traité thermiquement (spécifique aux familles 2000, 6000 et 7000) : Afin d'avoir un état stable après mise en solution (autre que F, O et H). La lettre T est toujours suivie d'un ou plusieurs chiffres (Tableau1.5).

Tableau 1.4 Désignation de l'état écroui de livraison [9]

Le premier chiffre après H désigne le traitement de base	
H1 – Uniquement écroui	H3 – Écroui et stabilisé
H2 – Écroui et partiellement recuit	H4 – Écroui et verni ou laqué
Le deuxième chiffre après H désigne le degré d'écrouissage	
HX2 – 1/4 dur	HX8 – 4/4 dur (pleine ment écroui)
HX4 – 1/2 dur	HX9 – Extra dur
HX6 – 3/4 dur	

Différents états métallurgiques peuvent être atteints pour les alliages d'aluminium à durcissement structural (séries 2XXX, 6XXX et 7XXX) en fonction du traitement thermique qu'on leur impose. Ces traitements thermiques ont pour but de donner aux alliages des propriétés physiques propres et adaptées à leur utilisation. Ils sont définis par la combinaison de différentes étapes qui sont [9] :

- **Le refroidissement** : après avoir subi une transformation à chaud, l'alliage est refroidi lentement, par exemple à l'air libre.
- **La mise en solution** : l'alliage est maintenu à une température supérieure à celle de sa température de solvus pendant un temps donné. Le but consiste à dissoudre les précipités dans la matrice d'aluminium et ainsi former une solution solide sursaturée (SSS). Cette

étape est suivie *d'une trempe* qui a pour but de figer la microstructure. C'est à la suite de cette trempe que les zones GP (de Guinier Preston) se forment.

- **L'écrouissage** : un travail à froid engendrant des déformations plastiques est effectué sur l'alliage afin de modifier ses caractéristiques mécaniques.
- **Le vieillissement** :
 - Le revenu (ou vieillissement artificiel), ou le sur-revenu : l'alliage est porté à une température moyennement élevée, plus basse que la température de solvus, pendant une certaine durée. Cette étape a lieu après la trempe et rend l'alliage quasiment stable métallurgiquement. Le but est de croître les différents précipités
 - La maturation (ou vieillissement naturel) : il s'agit d'une alternative au revenu. Toujours après la trempe, l'alliage est laissé à la température ambiante afin d'atteindre un état de quasi-stabilité métallurgique

C'est par ces traitements qu'ils atteignent leurs caractéristiques maximales ; mais aussi cette résistance dépend fortement du type, de la quantité et de l'interaction mutuelle des éléments d'alliage (Figure 1.6). On remarque que les deux familles possédant les meilleures propriétés mécaniques sont les séries 2xxx et 7xxx. C'est pour cette raison que ces alliages se retrouvent souvent utilisés au niveau des structures aéronautiques.

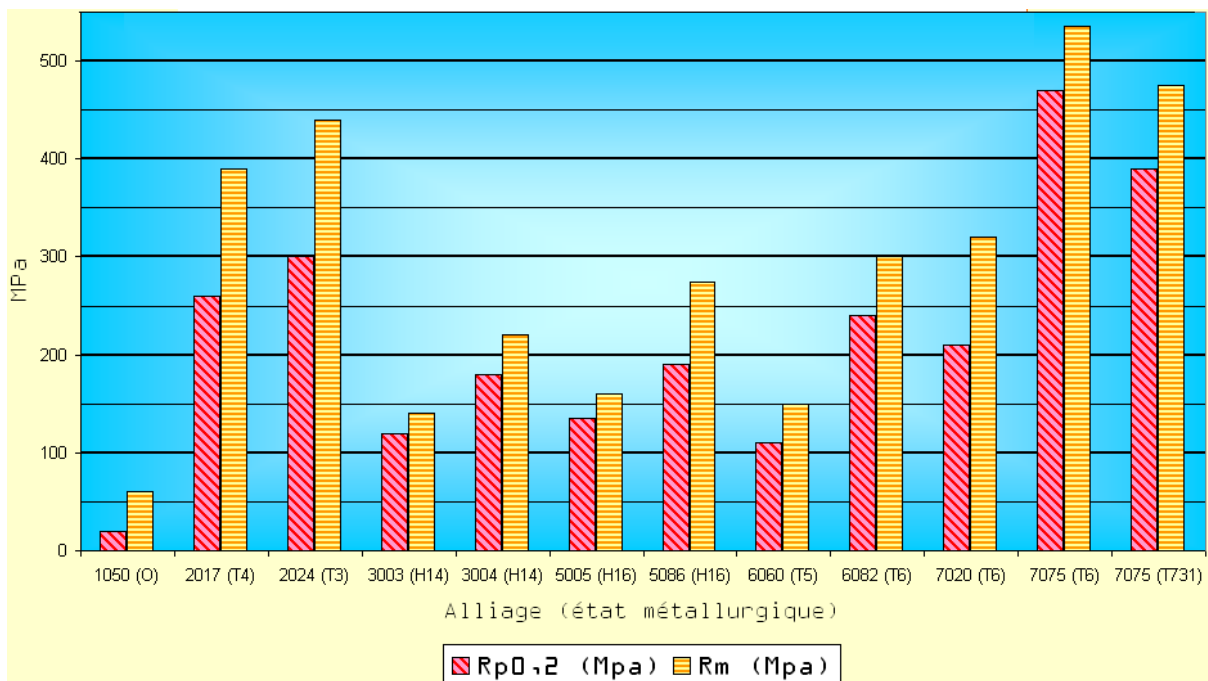


Figure 1.6 Alliages d'aluminium pour corroyage : Comparaison des caractéristiques mécaniques des alliages d'aluminium [9]

1.2.3 Utilisation de l'aluminium et de ses alliages

L'aluminium est un matériau exceptionnel en raison de ses multiples avantages :

- Durabilité
- Résistance mécanique et résistance à la corrosion
- Malléabilité
- Recyclable
- Léger et économique

Pour ceux-ci, il est très apprécié dans de nombreux secteurs industriels. Le tableau 1.5 suivant montre l'utilisation des différentes familles dans les différents secteurs [10].

Tableau 1.5 utilisation des différentes familles dans l'industrie

industrie	Alliages
Ferroviaire	5XXX/6XXX : 5052, 5083, 5086, 5059 5383, 5454, 6061, 6082
Terrestre	5XXX/6XXX : 5052, 6061, 6063, 6082
Maritime	5XXX/6XXX : 5052, 5083, 5086, 6061, 6063, 6071
Aéronautique	2XXX/7XXX : 2024, 2026, 7050, 7075
Ponts et passerelles	1XXX/3XXX/5XXX/6XXX : 6063
Solaire	6XXX : 6061, 6063, 6162
Éolienne	6XXX : 6061, 6063

1.2.4 Microstructure des alliages d'aluminium :

Dans ce chapitre, on se focalise essentiellement sur la microstructure et les phases couramment rencontrées dans l'alliage d'aluminium considéré dans le cadre de ce travail. Il s'agit d'un alliage de la série 2XXX.

Au regard des différents traitements thermiques qu'ils subissent, la microstructure des alliages 2XXX consiste en une solution solide α -Al et en plusieurs phases intermétalliques. Celles-ci sont répertoriées selon leur moment d'apparition au cours de l'élaboration de l'alliage et surtout en fonction de leur taille [11] comme suite:

- les particules intermétalliques,
- les dispersoïdes,
- les précipités durcissant.

a) Les précipitations intermétalliques dites grossières

Dans les alliages de la série 2XXX, les précipités intermétalliques grossiers sont généralement formés lors de la coulée de l'alliage. Elles sont principalement composées d'éléments lourds souvent sous la forme Al (Cu,Fe,Mn). Au refroidissement, ils ont tendance à se placer aux joints de grains. C'est ensuite lors des différents procédés de laminage qu'ils ont tendance à être allongés dans la direction de laminage. Ces particules de forme irrégulière peuvent atteindre une taille de

30 μm et ne peuvent pas être remises en solution [11,12]. La distribution de ces particules dans l'alliage n'est pas homogène puisque dépendante de la présence d'impuretés, elles-mêmes réparties de façon hétérogène dans l'alliage.

Outre ces particules insolubles, la plupart des alliages d'aluminium, notamment la série 2XXX, contiennent aussi des particules intermétalliques grossières partiellement solubles, de même taille que les précédentes. Elles sont généralement composées de zinc, de magnésium ou de cuivre, combinés avec de l'aluminium. Dans le cas des alliages série 2XXX sept types de particules sont distinguées. Il s'agit de Al_2Cu (phase θ), Al_2CuMg (phase S), Mg_2Si , Al_6Mn , Al_3Fe , $\text{Al}((\text{Cu}, \text{Mn}, \text{Fe}) \text{Si})$ et $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$. [11, 12,13].

Solubles ou insolubles, les particules intermétalliques grossières ont un effet néfaste vis à vis de la ténacité. En effet, elles peuvent se briser lors de traitements thermomécaniques, offrant ainsi des chemins préférentiels à la propagation des fissures.

b) Les dispersoïdes

Les dispersoïdes sont généralement formés lors des traitements d'homogénéisation (déformation à chaud) des alliages et résultent de l'interaction entre les additifs tels que le chrome, le manganèse et le zirconium avec l'aluminium. Ces particules de taille variable comprise entre 20 nm et 0.5 μm permettent de contrôler la recristallisation en bloquant l'avancée des joints de grains, jouant ainsi le rôle d'anti-recristallisant ou de freins à la croissance des grains durant le traitement thermomécanique [11]. Les dispersoïdes sont distribués de manière hétérogène dans l'alliage en raison des faibles teneurs en additifs [11] et peuvent aussi jouer le rôle des sites de précipitation hétérogène.

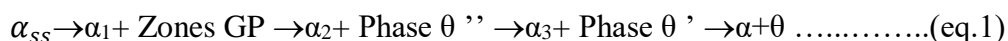
Ces dispersoïdes sont généralement insolubles et une fois formées ne peuvent plus être dissoutes. La plupart d'entre eux sont composés d'Al-Cu-Mn dans des proportions proches de $\text{Al}_{21}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$. Ces particules sous forme de dispersoïdes permettent non seulement d'affiner la taille des grains mais aussi d'augmenter la résistance mécanique et éventuellement la résistance à la corrosion [11].

c) Les précipités durcissant

Les précipités durcissant des alliages 2XXX apparaissent généralement suite à un traitement de vieillissement naturel (à température ambiante) ou artificiel (à température contrôlée) aussi appelé revenu. Ces précipités sont principalement localisés à l'intérieur des grains mais peuvent également se retrouver au niveau des joints de grains. Le traitement thermique permettant le durcissement consiste en 3 étapes [14,15] :

- Première étape est la mise en solution à environ 500°C : Comme présentée sur le diagramme de phase Al-Cu en Figure 1.7 ; les éléments d'alliages qui auraient précipité lors des étapes de mise en forme primaires de l'alliage, dont le % massique en cuivre est entre 3 et 5%, sont remis en solution solide dans la matrice d'aluminium (phase α). La solution solide d'aluminium est donc sursaturée en éléments d'alliage tels cuivre, magnésium mais également en lacunes.
- Deuxième étape : trempe à l'eau ou à l'huile jusqu'à température ambiante.
- Troisième étape : revenu ou vieillissement à des températures comprises entre 100 et 200°C. Le vieillissement à température modérée ou revenu assure la décomposition de la solution solide sursaturée jusqu'à l'apparition de la phase θ -Al₂Cu

Dans le cas des alliages d'aluminium avec le cuivre comme élément d'alliage majoritaire, la séquence de précipitation est la suivante [14,15] :



Avec :

α_{SS} = Solution solide sursaturée d'aluminium

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ et α les différentes compositions de la solution solide en équilibre

Zones de GP = Zones de Guinier Preston, phase très fine composée d'amas d'atomes d'éléments d'alliage mis en évidence en 1938 par Guinier et Preston

θ'' et θ' = Précipités métastables de composition Al₂Cu

θ = Phase stable de composition Al₂Cu

Par ailleurs, la présence de magnésium en proportion non négligeable dans les alliages

D'aluminium 2024, une autre séquence de précipitation proposée par Bagaryatsky est à prendre en compte (eq.2). La séquence est légèrement modifiée avec la précipitation de zones de Guinier-Preston-Bagaryatsky lors de la maturation. Ces zones, aussi appelées zones GPB, diffèrent des

zones GP par la présence supplémentaire de magnésium. Le traitement de revenu permet à la phase d'équilibre S-Al₂CuMg de précipiter.

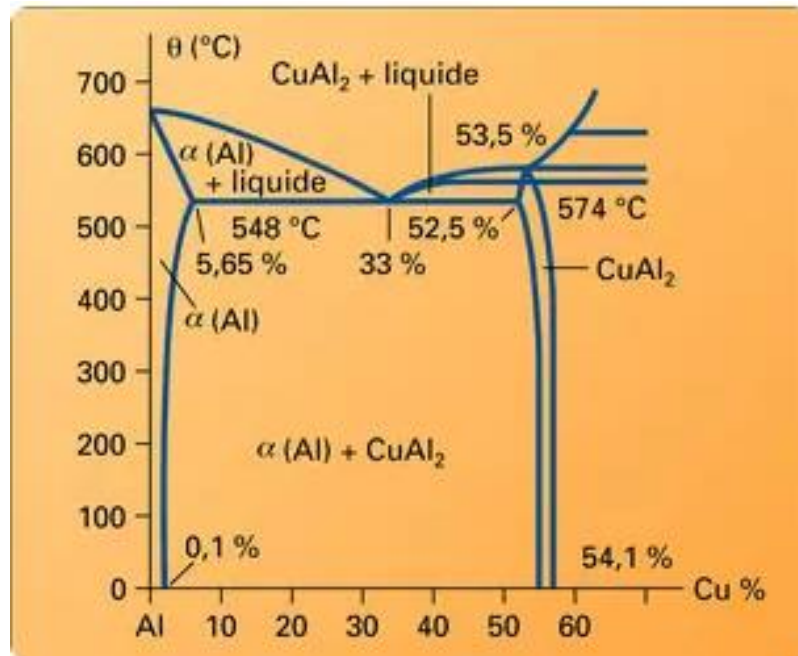


Figure 1.7 Une partie du diagramme d'équilibre de phase Al-Cu [9]

Une fois l'alliage trempé et à température ambiante, la solution solide sursaturée en atomes de Solutés (SSS) se décompose spontanément et progressivement pour donner naissance à de petits amas d'atomes de solutés dont les zones Guinier-Preston (GP). Ces amas cohérents avec la matrice d'aluminium durcissent le métal en ralentissant la progression des dislocations par la déformation locale du réseau cristallin. Un chauffage entre 100°C et 200°C durant un temps déterminé accentue encore cette décomposition jusqu'à atteindre un durcissement maximum. Ce pic de durcissement est dû à la présence de phases métastables semi-cohérentes avec la matrice d'aluminium appelés θ'' et θ' qui se transforment à l'équilibre en phase stable appelée Θ [14,15].

1.2.4 Conséquence des précipitations sur propriétés mécanique des alliages 2XXX

Le résultat de cette précipitation sous l'effet du revenu est une augmentation des propriétés mécaniques telle que la dureté (Figure 1.8). Cette évolution de la dureté en fonction du vieillissement est caractérisée par :

- une augmentation rapide de la dureté (1) : cette première étape très rapide dure environ une minute pour un revenu de 100 à 200°C et conduit à 50-70% du durcissement maximal de l'alliage ceci est conséquence de la précipitation des zones GP.
- un plateau (2) : la dureté n'évolue pas pendant une centaine d'heures de maintien à 150°C.
- une nouvelle augmentation de la dureté, après quelques centaines d'heures à 150°C (3) : deuxième étape du durcissement jusqu'au pic, correspondant à l'état dit de revenu au pic.

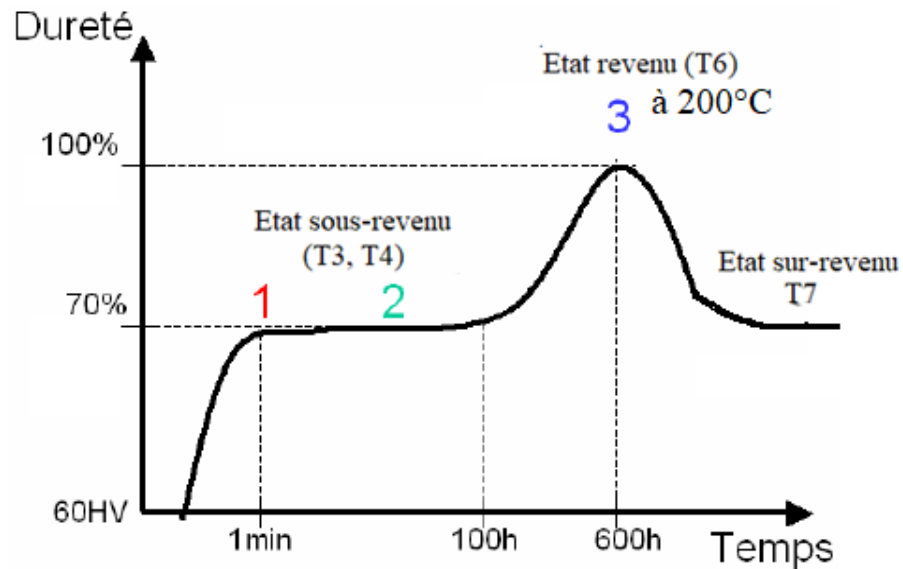


Figure 1.8 Evolution de la dureté en fonction du vieillissement[11]

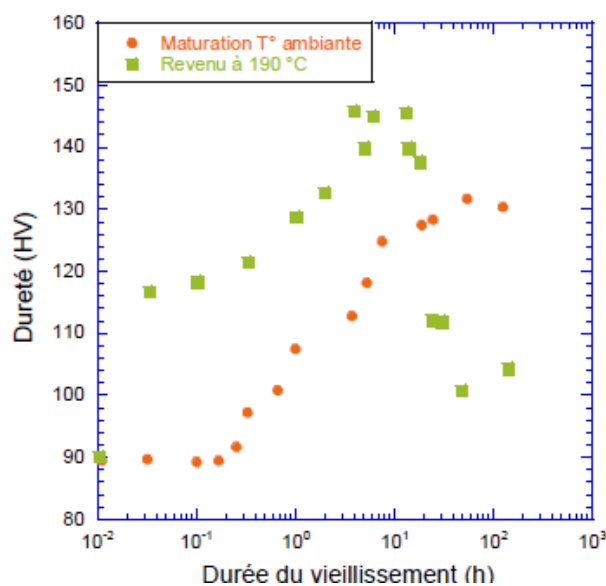


Figure 1.9 : Évolution de la dureté d'un alliage 2024 en fonction du type de vieillissement [11].

L'évolution de la dureté de l'alliage d'aluminium 2024 lors d'un traitement de revenu à 190 °C est représentée par la courbe verte de la *Figure 1.9*. On note une première augmentation de la dureté dès les premières minutes du traitement de revenu. Comme pour la maturation, l'amélioration des propriétés mécaniques à ce stade est due à formation des zones GPB cohérents avec la matrice d'aluminium. On observe ensuite une deuxième augmentation de la dureté pour atteindre un maximum après environ 10 heures de traitement thermique. Ce durcissement rend compte de la précipitation des phases S' et S qui sont respectivement semi-cohérente et cohérente avec la solution solide ce qui correspond à l'état métallurgique de revenu au pic de dureté (T6). A ce maximum de dureté, la fraction volumique des précipités est comprise entre 5 et 7 % [16].

1.2.5. Influence des cycles thermiques de soudage FSW

a) du point de vue métallurgique :

Au cours d'une opération de FSW, les températures atteintes au sein des tôles d'alliages d'aluminium à durcissement structural peuvent aussi engendrer des modifications métallurgiques [14,17]. Le FSW agit en fait comme une sorte de revenu (ou vieillissement artificiel), à la différence que les cycles de température qu'il impose dans la matière ne sont pas les mêmes dans l'ensemble du domaine. En effet, la source de chaleur au cours d'une opération FSW est localisée dans le noyau alors qu'un revenu contrôlé chauffe de manière homogène l'ensemble des tôles. Au sein du noyau, le revenu produit par le FSW se fait à une plus haute température que dans la ZATM et la ZAT, alors que le matériau de base n'est quant à lui pas impacté. Par conséquent, un gradient métallurgique en travers du joint apparaît. Par exemple, des auteurs ont identifié des phases θ'' dans les grains de la ZAT d'une soudure de 2024-T3 qui sont les mêmes que celles initialement présentes dans le matériau de base du fait des températures modérées subies dans cette zone [16, 17, 18,19]. La ZATM et le noyau ont en revanche été victimes d'un sur-revenu provoqué par une hausse de température supérieure à 235 °C, produisant ainsi des phases θ au sein des grains, moins fines que les phases θ'' , et dont les plus grossières se trouvent dans le noyau. Une dissolution de ces phases θ suivi d'une ré-précipitation en phases θ' est possible en effectuant un post-traitement après soudage.

b) Evolution de la dureté du joint

Le profil de dureté à travers la soudure change de forme selon l'alliage et l'état initial, notamment entre les alliages à durcissement par écrouissage et ceux à durcissement structural. La figure 1.10 montre le profil de dureté à travers une soudure en différents alliages.

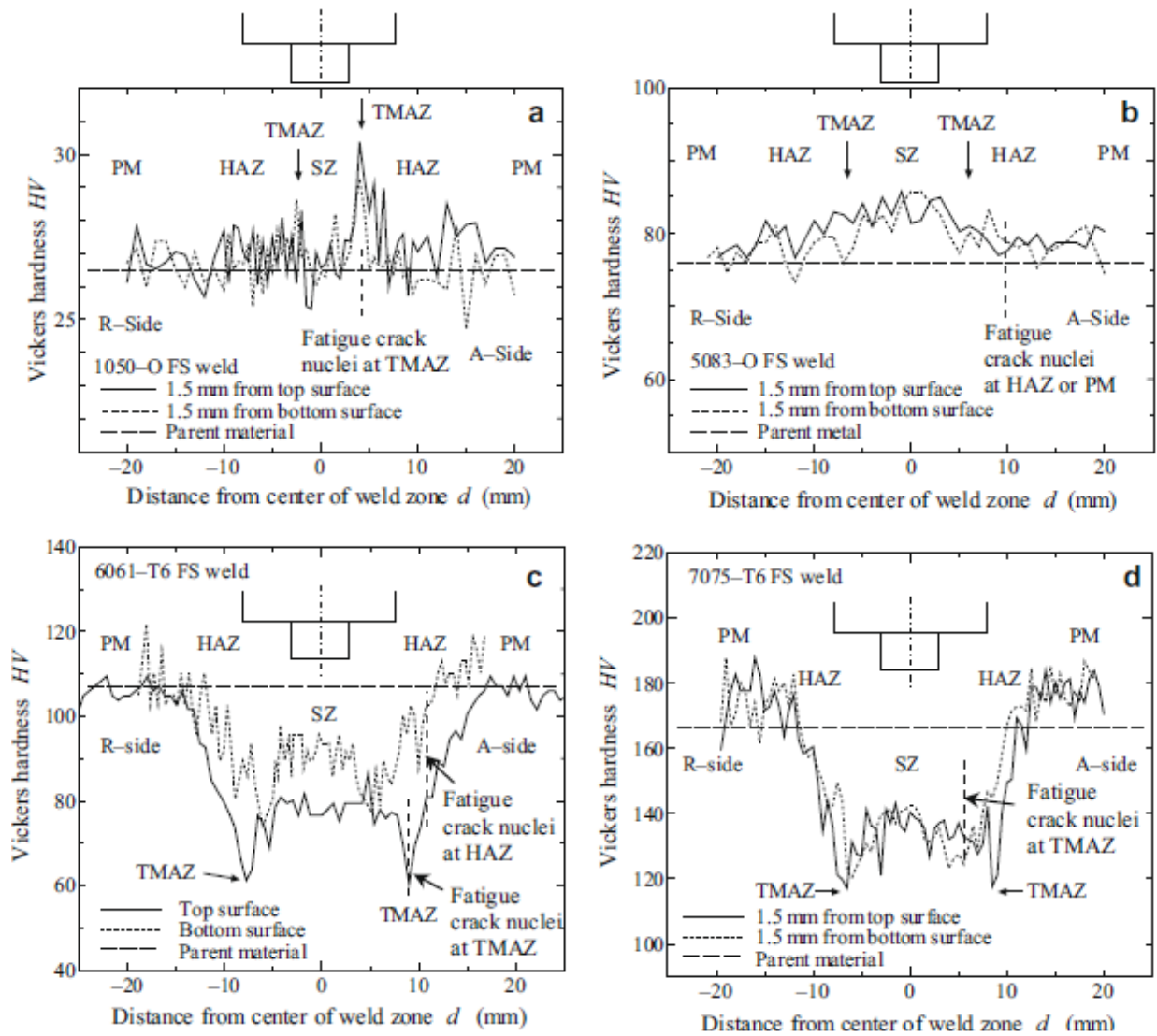


Figure 1.10 Profil de microdureté pour des alliages d'aluminium différents à durcissement par écrouissage (a) 1050-O, (b) 5083-O et par précipitation (c) 6061-T6, (d) 7075-T6 [20].

Pour les alliages à durcissement structural, série 2XXX, la dureté est minimale dans la zone soudée (Figure 1.11). Elle chute de façon significative dans le noyau et dans la ZATM [21]. Dans le noyau ce phénomène est dû à la structure recristallisée dans laquelle les grains possèdent peu de dislocations, et à la dissolution des précipités durcissant [21].

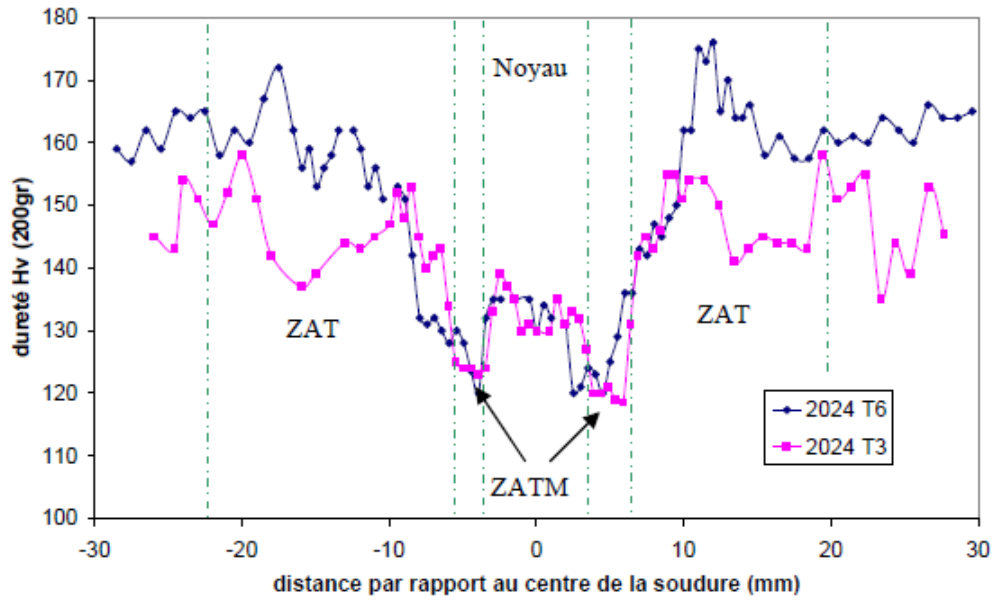


Figure 1.11 les profils de dureté des joints 2024 T351 et T6 [21]

La ZATM est marquée par la croissance ou la coalescence de la phase durcissant et ce quel que soit l'alliage [Cecil], [Baillas 1999]. Ceci s'explique par la compétition entre les processus de précipitation et de coalescence qui implique un minimum de dureté à la frontière ZATM – ZAT.

Chapitre 2 Matériels et Méthodes

Ce chapitre s'intéresse aux différentes techniques utilisées lors de ce travail. Il se divise en deux parties. La première partie s'intéresse à la description des moyens utilisés pour élaborer les différentes soudures FSW de la nuance étudiée. La deuxième partie présente techniques de caractérisation microstructurale et mécanique des soudures.

2.1 La composition chimique et les propriétés mécaniques de l'alliage étudié

Dans cette étude, nous avons axé nos efforts sur les alliages en aluminium de série 2000 en particulier la nuance 2017A. Nous avons découpé des éprouvettes de 100 mm de longueur de deux plaques d'épaisseurs différentes 2 et 3mm. De même, nous avons également découpé Nous avons choisi ces alliages en raison de leur remarquable résistance à la corrosion.

L'aluminium 2017A (AU4G ou Al-Cu4Mg) est un alliage de corroyage, traitable par durcissement structural, qui offre un bon compromis entre forte résistance et ductilité. Il est typiquement utilisé dans l'aérospatiale pour les composants structurels demandant un haut rapport résistance sur poids. Il peut être traité thermiquement pour le doter d'un large éventail de propriétés, en fonction de l'application voulue. À titre d'exemple, un traitement thermique peut lui être appliqué pour créer un matériau robuste mais ductile, particulièrement adapté pour les applications structurelles.

La composition chimique nominale (w%) de cette nuance est donnée dans le tableau 2.1 suivant :

Tableau 2.1 Composition chimique 2017A [22]

Elément	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
2017A(AlCuMgSi)	0.2 à 0.8	0.7	3.5 à 4.5	0.4	0.4 à 1.0	0.1	0.25	Sold

L'état standard de livraison de cette nuance est en T4 (ou T451), dont les caractéristiques mécaniques sont listées dans le Tableau 2.2. [22]

Tableau 2.2 les caractéristiques mécanique

	Rm (MPa)	Rp0,2 (MPa)	A%	E(GPa)	Dureté HBS
Pour une épaisseur de 1.5 à 3 mm	390	245	15	69 -72	110

2.2 Elaboration des soudures 2017A par friction malaxage

A. Les paramètres :

Des cordons de soudures FSW ont été réalisés en utilisant les paramètres suivants (Tableau 2.3):

Tableau 2.3 Les paramètres de soudage

paramètres	Vitesse d'avance (mm/min)	Vitesse de rotation (rpm)	Force de pénétration	Tilt
Valeur	45	900tr/min à 1400tr/min	6kN	0.5°

B. La machine utilisée :

Une Fraiseuse verticale, de marque Heckert S33 (Figure 2.1) a été utilisée pour réaliser les cordons de soudure FSW.



Figure 2.1 Fraiseuse verticale Heckert S33

C. Les outils de soudage :

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé deux matériaux différents pour la fabrication des outils à savoir : 42cd4 et K100.

- Un acier faiblement allié au chrome-molybdène ayant une bonne résistance aux surcharges à l'état traité : 42CD4.
- Acier K100 (selon la désignation Bohler) est un acier à haute teneur en carbone et chrome avec d'autres additifs supplémentaires de molybdène et de vanadium. . Il appartient à la

famille des aciers à outils pour travail à chaud "à haute teneur en carbures", qui sont conçus pour offrir une résistance accrue à l'usure, à la corrosion et à l'oxydation.

Ces aciers ont été choisis pour les raisons suivantes :

- Haute résistance
- Haute dureté à chaud
- Facile à usiner
- Disponibilité et Faible coût

Les compositions chimiques et caractéristiques mécaniques de ces deux types d'aciers sont données dans le tableau 2.4 et 2.5 suivants :

Tableau 2.4 Composition chimique 42CD4 et ses caractéristiques mécaniques moyennes (trempé/revenu)

42CD4	C	Cr	Mo	Mn	Si	P	S
Composition chimique (w%)	0.38-0.45	0.9-1.2	0.15-0.3	0.6-0.9	0.4	≤0.035	0.4 max
Caractéristiques moyenne (état trempé/revenu)	Rm (N/mm ²)	Re	A	Dureté HRB			
	750/133	500/900	10/14				

Tableau 2.5 Composition chimique K100 et ses caractéristiques mécaniques moyennes

K100 (Z20012)	C	Cr	Mo	Mn	Si		
Composition chimique (w%)	0.2	11.5	0.15-0.3	0.35	0.25		
Caractéristiques moyenne (état trempé/revenu)	Rm (N/mm ²)	Re	A	Dureté HRB			
	750/133	500/900	10/14	217			

D. Préparation des outils :

Le profil du pion de l'outil détermine principalement le flux de matière entre les pièces et les propriétés mécaniques associées du joint soudé FS. Sur la base d'un certain nombre d'essais de soudage et selon la littérature, la forme cylindrique a été retenue dans le cadre de cette étude. Les dimensions des outils sont :

- Outil en acier 42CD4 avait un diamètre de 22 mm et une longueur de 100 mm, avec un diamètre de pion de 1,8 mm

- Outil avec l'acier K100, le diamètre était de 16 mm, la longueur de 100 mm et le diamètre de pion de 1,8 mm



Figure 2.3 Les outils de soudage

Avant d'être utilisés, les deux outils usinés ont subi un traitement thermique de trempe suivi d'un revenu dans le but de les rendre plus dur conformément au cycle thermique suivant (Figure 2.3) :

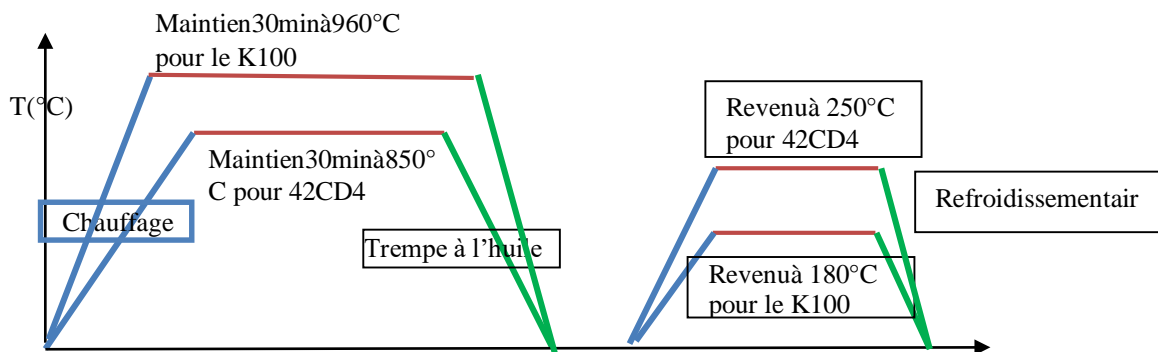


Figure 2.4 Cycle de traitement thermique pour K100 et 42CD4

E. Procédure de soudage par FSW :

Etape.1 : bridage des tôles

Dans un premier temps, nous avons procédé au bridage des deux tôles à souder en les fixant côte à côte dans une configuration bout à bout (figure 2.5) .

Ensuite, nous avons inséré l'outil que nous avons usiné dans la broche de l'outil rotatif. Pour faciliter le contact entre l'épaulement de l'outil et les tôles, ainsi que favoriser l'écoulement du

matériau autour de l'outil, nous avons tourné la tête universelle de 0.5° afin d'incliner notre outil dans la direction de soudage, également appelée "tilt".

Etape 2 : phase de pénétration :

Le pion pénètre progressivement dans le plan de joint des deux pièces à souder, en appliquant une force normale jusqu'à ce que l'épaule de l'outil soit en contact avec les pièces. À ce stade, l'outil est maintenu dans cette position pendant un certain temps, appelé temps de maintien ou "dwell time", afin de générer la quantité de chaleur nécessaire pour ramollir la matière. Dans notre cas le dwell-time est de 5 secondes

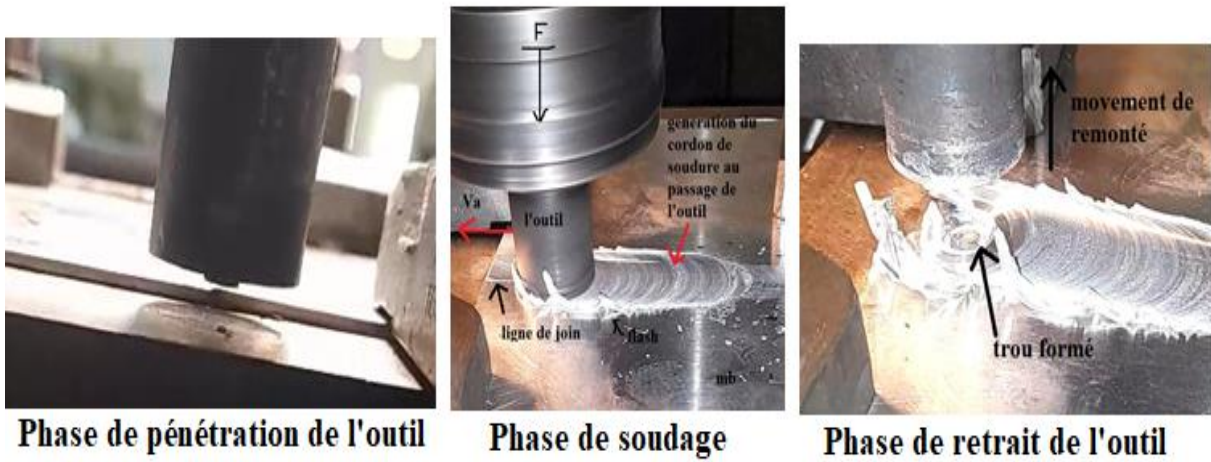
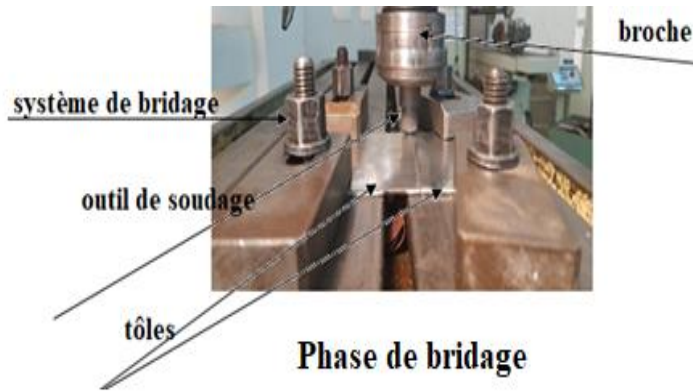
Etape 3 : phase de soudage :

Une fois que la température de soudage, où la matière atteint un état ramolli, est atteinte, le pion en rotation commence à avancer le long de la ligne de joint.

Pendant cette phase, un effort de forgeage (F) est appliqué sur l'outil et maintenu. Cet effort permet de déformer plastiquement la matière malaxée, formant ainsi le cordon de soudure.

Le mouvement combiné de rotation et d'avance de l'outil entraîne la formation de deux côtés distincts dans le cordon de soudure :

- Le côté avance (advancing side) : Il correspond à la partie où le sens de la vitesse de rotation de l'outil coïncide avec sa vitesse d'avance. C'est sur ce côté que l'outil avance dans la direction du déplacement, créant un mélange efficace de la matière.
- Le côté recul (retreating side) : Il correspond à la partie où le sens de la vitesse d'avance de l'outil s'oppose à sa vitesse de rotation. Sur ce côté, l'outil se déplace en sens inverse de la direction de déplacement, ce qui génère également un mélange de la matière, mais dans une configuration différente



Etape 4 : phase de retrait :

Une fois le cordon réalisé, le pion est retiré du joint en laissant un trou à l'extrémité du cordon

Les assemblages réalisés :

Tableau 2.6 Les assemblages et paramètres

Assemblage des tôles de 2 mm			
Soudure 1	Soudure 2	Soudure 3	
Outil k100 1400 tr/min	Outil k100 1120 tr/min	Outil 42cd4 1120 tr/min	
Assemblage des tôles de 3mm			
Echant 1	Echant 2	Echant 3	Echant 4
Outil 42cd4 1120 tr/min	Outil 42cd4 900tr/min	Outil 42cd4 1400tr/min	Outil 42cd4 1120tr/min

2.3 Méthodes de caractérisation

2.3.1 Préparation des échantillons

Une fois la réalisation des soudures, on a procédé à découper des échantillons dans le sens transversal au cordon pour effectuer une étude microstructurale et relever les profils de microdureté à travers les soudures (Figure 2.6).

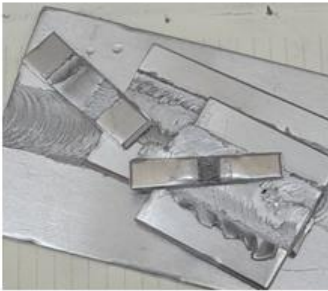


Fig2.20 échantillon de soudure 1



fig. 2.21 échantillon de soudure 2



fig2.22 échantillon de soudure 4



Fig2.23 échant 1



fig2.24 échant 2



Fig. 2.25 échant 3



fig2.26 échant 4

Figure 2.6 Les différentes soudures

2.3.2 Enrobage :

Après le découpage, les échantillons ont été enrobés à froid avec une résine époxy (Figure 2.7). Cette méthode est la plus recommandée pour les échantillons sensibles aux pressions et températures élevées comme il est le cas des alliages d'aluminium. Le processus de cette technique est la suivante :

- Choisir les moules en fonction de la taille des échantillons et y installer les au fond du moule propre et à sec.
- Préparer les quantités précises des constituants de la résine ($2/3$ résine + $1/3$ durcisseur), mélanger soigneusement les constituants,

- Verser la résine mélangée sur l'échantillon et laisser polymériser dans le moule pendant une période (dans notre cas 12 heures).



Figure 2.7 Processus d'enrobage à froid

2.3.3 Polissage

Après enrobage, un polissage mécanique a été effectué pour préparer les surfaces des échantillons. Une polisseuse manuelle de marque Presi-Minitech 233a été utilisée à cet effet (Figure 2.8). Le polissage est effectué en deux étapes : un polissage grossier et un polissage de finition avec pate diamanté.



Figure 2.8 Polisseuse de marque Presi-Minitech 233

Polissage grossier :

Cette étape de polissage a été réalisée en utilisant du papier abrasif en carbure de silicium (SiC). Dans un premier temps, le papier P220 est utilisé pour obtenir la planéité des échantillons. Ensuite, différents niveaux de polissages (de P600 jusqu'à P2000) sur papier à carbure de silicium ont été réalisés.

Ce processus de polissage progressif permet d'éliminer les aspérités, les rayures et autres défauts de surface, aboutissant à une surface très lisse sur les échantillons.

Polissage de finition :

Le polissage de finition est une étape supplémentaire après l'opération de polissage, visant à améliorer davantage l'état de surface d'une pièce ou d'un matériau. Cette opération utilise des feutres spéciaux qui sont imbibés de suspensions d'alumine diluée dans l'eau.

La suspension d'alumine utilisée contient des particules de poudre d'alumine avec une granulométrie de $1\mu\text{m}$ et $0,05\mu\text{m}$. La granulométrie fait référence à la taille moyenne des particules présentes dans la poudre.

L'utilisation de différentes granulométries permet d'obtenir des résultats de polissage plus précis et plus fins. Les particules de poudre plus fines ($0,05\mu\text{m}$) permettent d'éliminer les micro-rayures et d'améliorer considérablement la finition de la surface. Les particules de poudre plus grosses ($1\mu\text{m}$) peuvent être utilisées en premier lieu pour enlever les imperfections plus grossières, puis suivies par l'utilisation de particules plus fines pour obtenir une finition plus lisse et uniforme.

Après avoir réalisé le polissage avec l'alumine, nous avons utilisé la pâte diamantpaste WS de $1\mu\text{m}$ pour éliminer les micro-rayures restantes et pour améliorer la surface de manière plus subtile. Les particules de diamant sont extrêmement dures et abrasives, ce qui leur permet d'enlever les imperfections fines et de créer une surface polie de haute qualité.

A la fin de cette opération les échantillons sont rincés sous l'eau courante pendant quelques secondes pour faciliter le nettoyage sans endommager la microstructure, puis sécher à l'air comprimé.

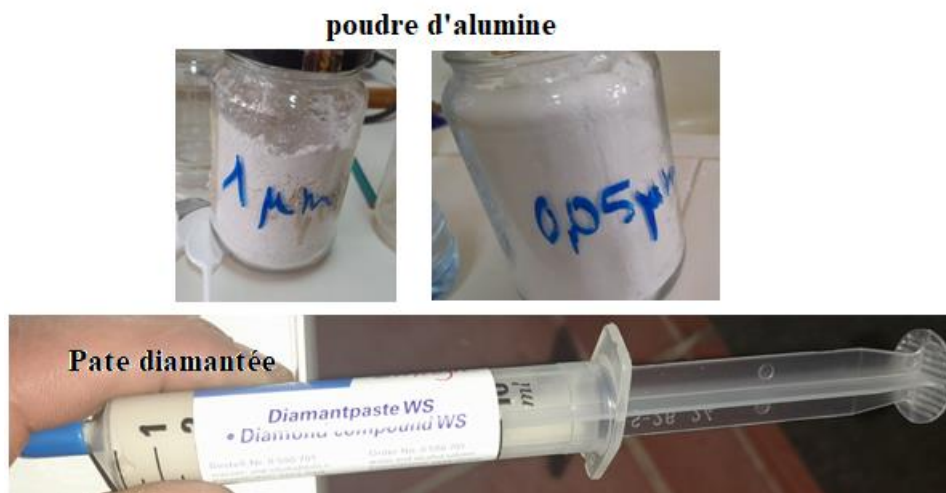


Figure 2.9 Moyens de polissage de finition

Après finition, rinçage et séchage des échantillons, on a passé au nettoyage en profondeur par ultrasons, en plongeant les échantillons dans l'éthanol dans une cuve à ultrasons. Les échantillons

sont nettoyés pendant 5min puis séchés. Les échantillons sont enfin prêts pour l'attaque chimique pour révéler la microstructure.

2.3.5 Révélation de la microstructure

L'observation de la microstructure des soudures FSW par microscope optique nécessite une attaque chimique.

Dans le cas des alliages d'aluminium, le choix du réactif dépendra de l'état métallurgique, de la composition chimique de l'alliage.

Pour la nuance d'aluminium considérée dans le cadre de cette étude, les réactifs suivants sont les plus recommandés.

Réactif	Composition
Weck's (par immersion)	<ul style="list-style-type: none">- 100 ml eau- 4g KMnO₄- 1g NaOH les conditions : 10-20s immersion
Réactif électrolytique à la soude caustique	<ul style="list-style-type: none">- 100ml d'eau distillée- 15 g d'hydroxyde de sodium

2.3.6 Caractérisation microstructurale

2.3.6.1 Observation microscopique

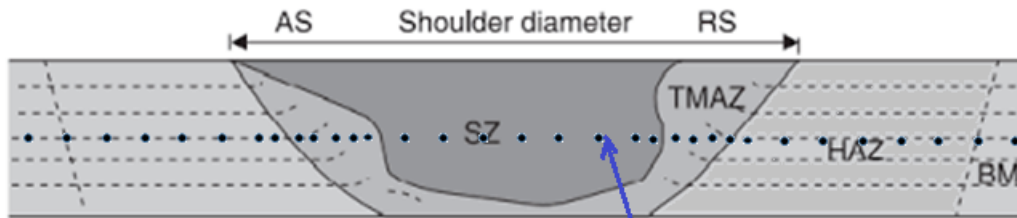
Le but principal de l'observation microscopique est la mise en évidence de la structure des différentes soudures. Les examens métallographiques sont réalisés sous le microscope optique de type Zeiss (figure.2.10).



Figure 2.10 Microscope optique Zeiss

2.3.6.2 Méthode de caractérisation par l'essai micro-dureté

Des mesures de micro-dureté sont réalisées dans le but de caractériser les **propriétés mécaniques locales** des alliages en lien avec les évolutions de microstructure dans la soudure. Par cette technique, nous avons tracé des profils de dureté à travers les soudures. (Figure



ligne de filiation des microdureté

Figure 2.11 schématisation de la filiation des mesures de microdureté

Une machine semi-automatique de microdureté marque INOVATEST FALCON 450 (Figure 2.12), est utilisée. Les mesures consistent en des essais de dureté **Vickers** avec un indentateur endiamant et de forme pyramidale à base carré. Une faible **charge de 10 gf**, appliquée pendant 10 s, est choisie afin de réduire la distance entre deux indentations et ainsi pouvoir détecter les variations locales de microstructure.



Figure 2.11 Microduromètre INOVATEST FALCON

Chapitre 3 Résultats et discussion

3.1 Etude de la soudabilité de l'alliage 2017A par FSW

3.1.1 Conditions de réalisation des soudures

Les conditions de réalisation des soudures FSW sont présentées en termes d'équipement, de mode de pilotage et de géométrie d'assemblage dans le chapitre 2 précédent. L'ensemble des essais est réalisé à partir de tôles **laminées** de 100 mm de longueur sur 50 mm de large et d'épaisseur de 2 et 3 mm. Il peut être noté que leur position est telle que les directions delaminage de l'Al2017 et la direction de soudage soit parallèle. La figure 3.1 représente la microstructure de l'alliage de base. Cette micrographie montre en effet une microstructure à grains très fins allongés. Elle met aussi en évidence la présence de quelques précipités à l'intérieur des grains, ce sont des zones claires formant des gros précipités (Al_2Cu) (d'après la bibliographie) et très distants les uns des autres.

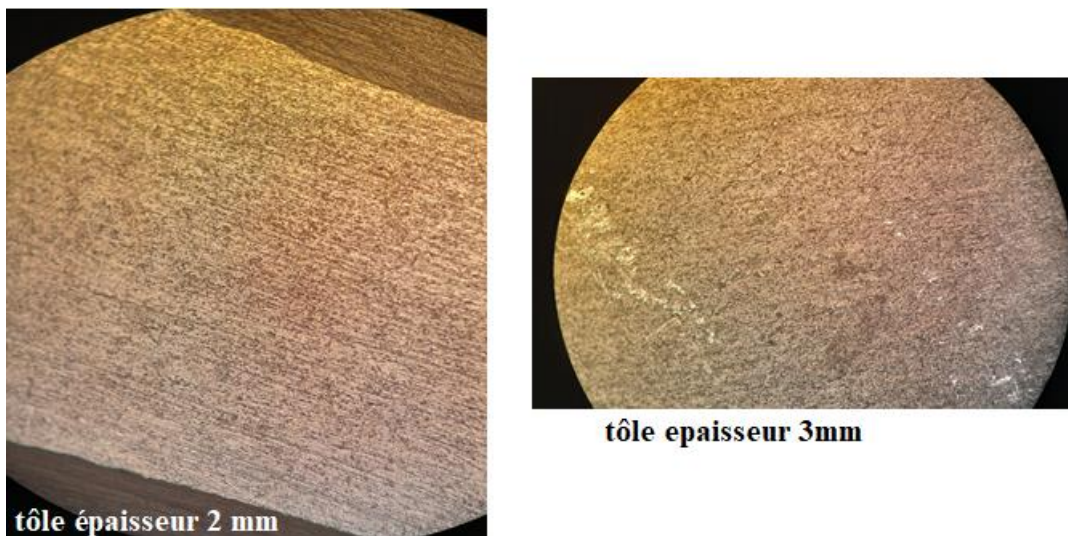


Figure 3.1 micrographies optiques de l'alliage 2017A (métal de base)

Pour les paramètres de soudage, le choix est établi conjointement à partir

- (ii) d'un état de l'art de travaux portant sur plusieurs points spécifiques du soudage FSW
- (iii) et d'essais préliminaires réalisés

La sélection des **vitesse d'avance et de rotation** est réalisé à partir d'un état de l'art des travaux conduits sur le soudage FSW des alliages d'aluminium. Bien que les données de la littérature diffèrent par la nuance des matériaux, l'épaisseur des tôles ou encore par l'outil utilisé, elles

donnent une vue d'ensemble de la plage de paramètres étudiés. Cet état de l'art permet donc de délimiter une gamme de paramètres opératoires présentée dans le chapitre 2 (tableau 2.3).

Des essais préliminaires sont donc réalisés dans cette gamme de paramètres dans l'objectif de définir les paramètres adéquats pour le soudage FSW de notre nuance. Le soudage, les paramètres FSW de la nuance 2017A sont choisis de manière à produire des soudures dites « froides » et « chaudes », ainsi que des niveaux d'échauffement intermédiaires.

De la première campagne d'essais, les vitesses d'avance et de rotation s'étalent donc sur un large domaine opératoire. Trois vitesses de rotation (960, 1120 et 1400 tours/min) sont sélectionnées et une vitesse d'avance constante. Dans la deuxième campagne, l'influence d'un troisième paramètre est évaluée : il s'agit de la nature du matériau de l'outil et ses dimensions de l'outil.

Quant à l'effet de forgeage, malheureusement, il ne nous est pas possible de le contrôler ce qui explique les vitesses de rotation importante choisis. Nous estimons ce paramètres à 6kN

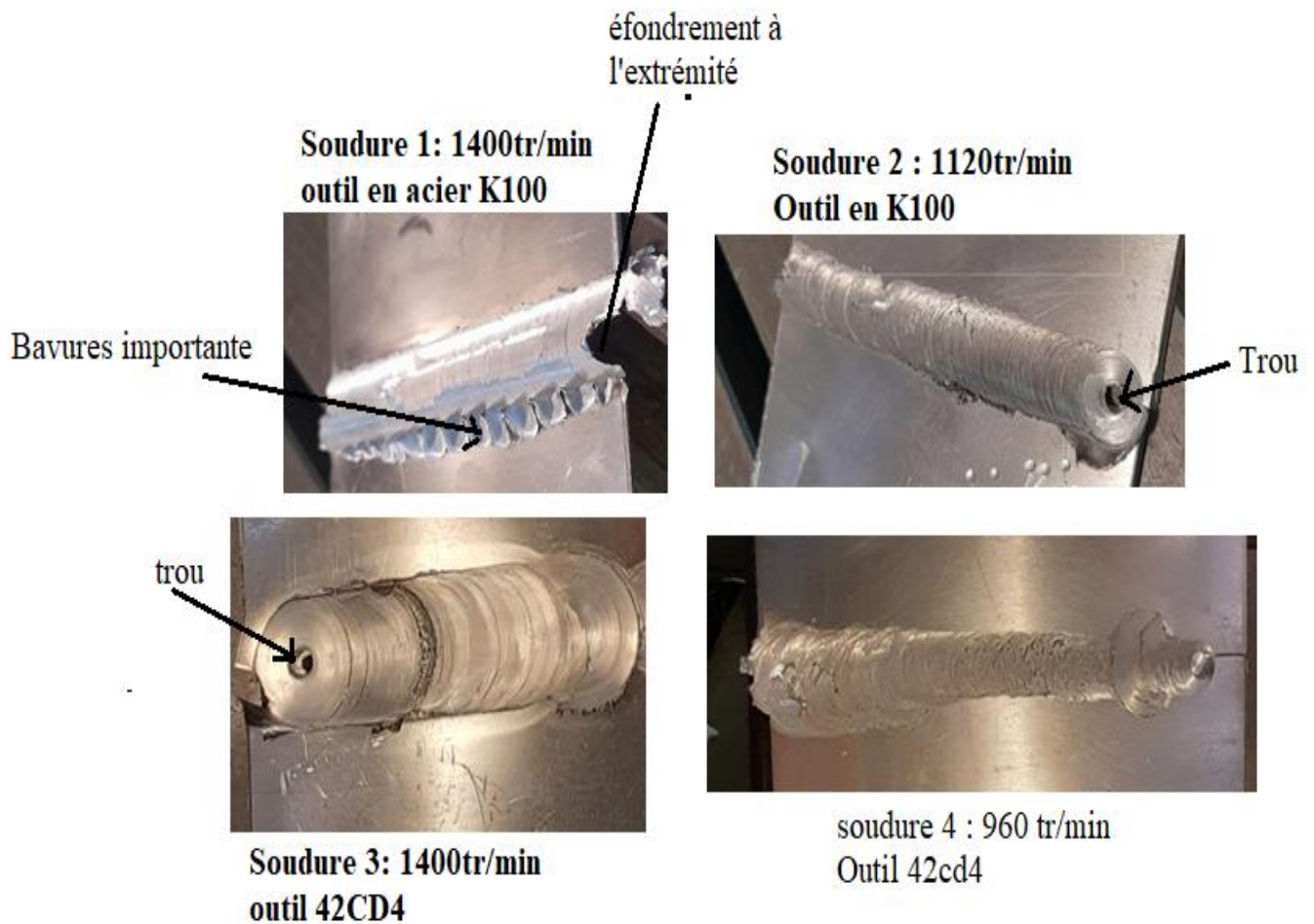


Figure 3.2 Photographies des cordons de soudures FSW obtenus

3.1.2 Effet des paramètres de soudage sur l'aspect géométrique des soudures

La figure 3.2 montre l'apparence visuelle des cordons FSW réalisés avec les paramètres cités précédemment ainsi que les défauts structurels typiques formés au cours de l'opération de soudage. Dans ces photographies, l'apparence de la soudure varie en fonction des vitesses de soudage en occurrence (vitesse de rotation ω) et des caractéristiques de l'outil. Il est clair l'apport de chaleur joue un rôle clé dans la détermination de l'apparence de la soudure, et un apport de chaleur insuffisant peut produire des défauts dans la zone d'agitation.

Les résultats montrent qu'une vitesse de rotation importante (1400tr/min) conduit à un échauffement excessif produisant des bavures importante lié à un enfoncement de l'outil trop élevé. C'est le cas de soudage avec l'outil en acier en K100 où, on observe un effondrement de la matière et la perforation des tôles à l'extrémité (fin de course de soudage) (soudure 1). Pour une vitesse de 1120 tr/min, l'aspect de la soudure est relativement lisse (soudure 2).

Pour la soudure 3, encore une fois, des bavures sont présentes le long du cordon mais de taille moins importante. On observe également une rugosité de surface apparente. Le trou laissé par l'outil est également visible

Par contre, la soudure 4 réalisé par une vitesse de rotation très faible montre un aspect géométrique irrégulier, des porosités de surface et des éraillures. Ceci s'explique par le mauvais malaxage et un apport de chaleur très faible. Dans ce cas la soudure est dite « soudure froide ».

3.1.3 Analyse des macrostructurale et microstructurale des soudures

Sur une coupe transverse d'un joint FSW, on distingue traditionnellement quatre zones typiques (Figure 3.4). Ces zones ont chacune des caractéristiques qui leur sont propres :

- macrostructurales : étendue de la zone, forme et position des interfaces internes dans la zone ou externes entre les zones, les défauts,
- microstructurales : forme et orientation des grains et métallurgiques (état de précipitation).

La Figure 3.3. Montre les coupes transversales des joints 2017A réalisés avec les jeux de paramètres présentés dans le tableau 2.4.

Tout d'abord, la forme du joint soudé est analysée. Les différentes coupes mettent en évidence une zone comprenant le noyau ainsi que la ZATM. Du point de vue macroscopique, la répartition des zones des soudures FSW ne présentent pas une symétrie selon le plan perpendiculaire à la surface

des tôles et passant par la ligne de soudage. En effet, le côté avançant de la soudure (AS) et le côté reculant (RS) sont clairement imprimés sur ces macrographies. Toutefois, le noyau de la « soudure 3 :2mm », présente une forme évasée plus au moins symétrique comme on le trouve communément dans la littérature [33-35].

Apparemment la morphologie du noyau dépend des paramètres de soudage et de la géométrie de l'outil. Ce phénomène a été observé par plusieurs auteurs [3, 23,24]. En effet, souvent le noyau prend une forme d'un « oignon » : suivi d'un bras d'écoulement s'étendant vers la surface supérieure dans le sens avancé de l'outil (AS).

Il convient de souligner que la taille de la zone ZF est régie par le diamètre du pion 'd' tandis que la zone ZATM est générée par la taille de l'épaulement de l'outil 'D'.

Du point de vue microstructurale, même si l'attaque chimique ne révèle pas clairement les grains dans les différentes zones, on observe clairement une différence microstructurale dans les différentes régions :

- **Le noyau** qui correspond à l'endroit où est passé le pion lors du soudage a été le siège de très grandes déformation plastiques, ce qui lui a permis d'atteindre des niveaux de température élevés qui, couplés à de hautes vitesses de déformation, peuvent engendrer une restauration et recristallisation dynamique de la matière engendrant une structure à grains très fins (figure3.3). La taille des nouveaux grains dépend des températures atteintes localement. Pour les alliages à durcissement structural, une dissolution totale des précipités existant initialement dans la l'alliage a généralement lieu, et une précipitation peut également avoir lieu grâce à la chaleur présente dans le noyau

- **La Zone Affectée Thermo-Mécaniquement (ZATM),**: présente de chaque côté du noyau, cette zone subit des déformations modérées et une élévation de température importante. Cependant, les températures atteintes sont moindres que celles obtenues dans le noyau et ne permettent pas une recristallisation dynamique de la matière. Les grains présents dans la ZATM, sont donc les mêmes que ceux présents initialement dans le matériau de base. Cependant un léger grossissement des grains est observé aux frontières de la ZATM. Des petites taches noires réparties irrégulièrement dans les grains sont observées. Celle-ci, sont des précipitations engendrées par l'élévation de la température dans cette zone.

- **La Zone Affectée Thermiquement (ZAT)**, « Z » sur la Figure 3.3 : positionnée après la ZATM, cette zone ne comporte pas de déformations mécaniques, c'est-à-dire que la forme des grains est restée quasiment intacte après le passage de l'outil. Les températures atteintes sont modérées mais suffisantes pour affecter l'état de précipitation du matériau

En outre, les soudures peuvent être victimes de divers défauts macroscopiques et microscopiques intérieurs dont les plus courants sont présentés sur la Figure 3.3. Ces défauts peuvent être présents de manière partielle ou complète le long du cordon (voir le chapitre 3.1).

Les Figures 3.3, révèle trois types de défaut :

Défaut de type vide : ce défaut est observable à l'œil nu et apparaît comme un volume interne du joint où la matière est absente. Parfois, ce vide se prolonge dans toute la longueur du cordon, pour former un tunnel. Plusieurs auteurs ont identifié que ce défaut apparaît lorsque la génération de chaleur est insuffisante. Ce manque de chaleur rend en effet plus difficile l'écoulement plastique de la matière lors du passage de l'outil et le mélange demeure incomplet.

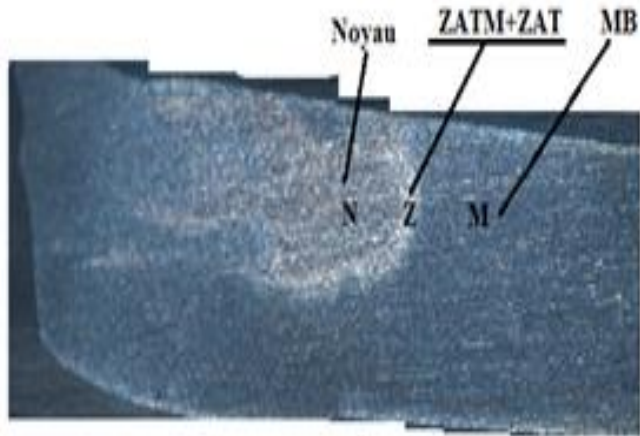
Plusieurs auteurs ont investigué l'effet des paramètres machine sur l'apparition et l'intensité de ces défauts [26-32] et ils ont mis en valeur l'influence des vitesses et de la force axiale de l'outil sur la formation des défauts de type vide et tunnel. Dans notre cas, on soupçonne également l'influence de la force axiale et la vitesse d'avance. Car sur la machine utilisée, on ne possède aucun contrôle sur cette force et était estimée constante et égale à 6KN, ainsi que la vitesse d'avance qui était considérée constante. Sur les figures 3.4, les soudures 1-2-3(2 et 3mm), sont exemptes de ce type défaut car la vitesse de rotation était suffisante pour générer une chaleur suffisante à l'écoulement et au malaxage du métal. Ceci, met en évidence que les vitesses de rotation et d'avance ont une influence prépondérante l'apparition des défauts par rapport à la force axiale de l'outil.

Défaut manque de pénétration : Le défaut de type manque de pénétration renvoie à un noyau qui n'atteint pas la surface inférieure des tôles soudées (Figure 3.3- soudure 2 : 3mm). Théoriquement, la cause initiale de ce défaut est un pion d'outil pas assez long et ne permettant donc pas de malaxer les tôles dans leur entière épaisseur. Cependant, des études [5, 26-32] ont permis de constater que le flux de matière peut également être chaotique à cause des paramètres machine et plus précisément de

la vitesse de rotation lorsque celle-ci ne permet pas de générer une chaleur suffisante à l'écoulement de la matière et c'est le cas de la (soudure-1 :3mm).

Arrachement des fragments de particules de l'outil, ceci est dû à l'usure de l'outil sous l'effet thermomécanique.

L'apparition de ces défauts est déterminée par les paramètres du procédé. Il est donc possible de supprimer ou réduire la majorité d'entre eux en ajustant correctement les paramètres machine. Cependant, les défauts relatifs au manque de pénétration nécessitent un ajustement de la géométrie de l'outil afin qu'il malaxe la matière jusqu'à la surface inférieure des tôles. Dans le cadre de ce travail, on n'en a considéré que les l'effet des dimensions de l'épaulement.



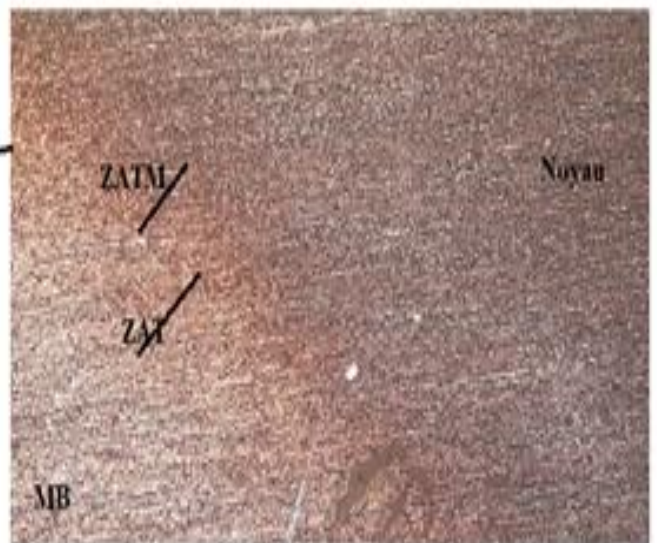
Soudure 1: 2mm



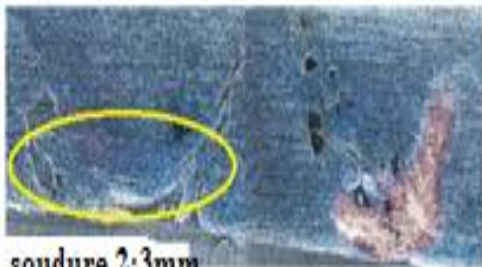
Soudure 2: 2mm



Soudure 3: 2mm



manque de malaxage



soudure 2: 3mm



Soudure 4: 3mm

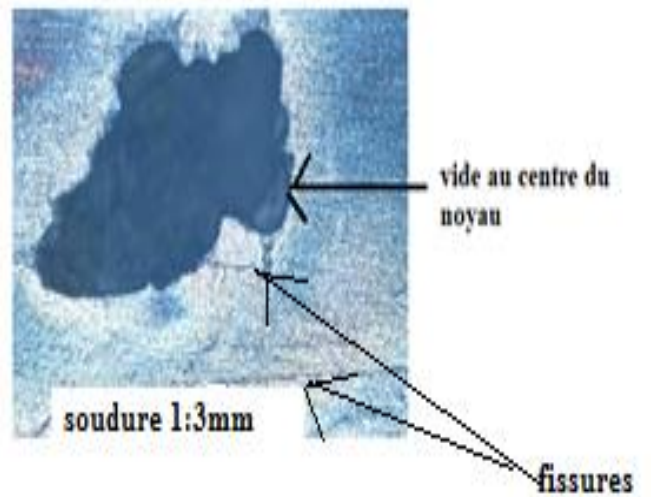


Figure 3.3 Les macrographies des joints soudés

3.2 Profils de microdureté

Les figures 3.4 présentent les profils de microdureté à mi- épaisseur des soudures FSW. De manière générale, les évolutions conservent une forme en « W » typique des alliages d'aluminium à durcissement par traitement thermique. Cependant un profile plus au moins uniforme est obtenu pour les (soudure 4 :3mm, et soudure 2 :2mm).

Dans la zone centrale (noyau), la valeur de microdureté varie en fonction des paramètres opératoire. La dureté du noyau de « la soudure 2-2mm » était considérablement inférieure à celle du matériau de base. Cela pourrait être principalement dû à la dissolution partielle ou totale des précipités durcissant due aux températures élevées que subies cette région.

Dans les autres soudures, le noyau présente des duretés nettement supérieures à celle du métal de base.

Les graphes montrent également une diminution de la dureté dans la ZAT et ZATM qui est due au phénomène de restauration (soudure 1-3 : 2mm). Ce phénomène se qui dépend principalement de la température maximale atteinte. Par contre un durcissement considérable de ces zones est enregistré dans le cas de « la soudure 3 :3mm »

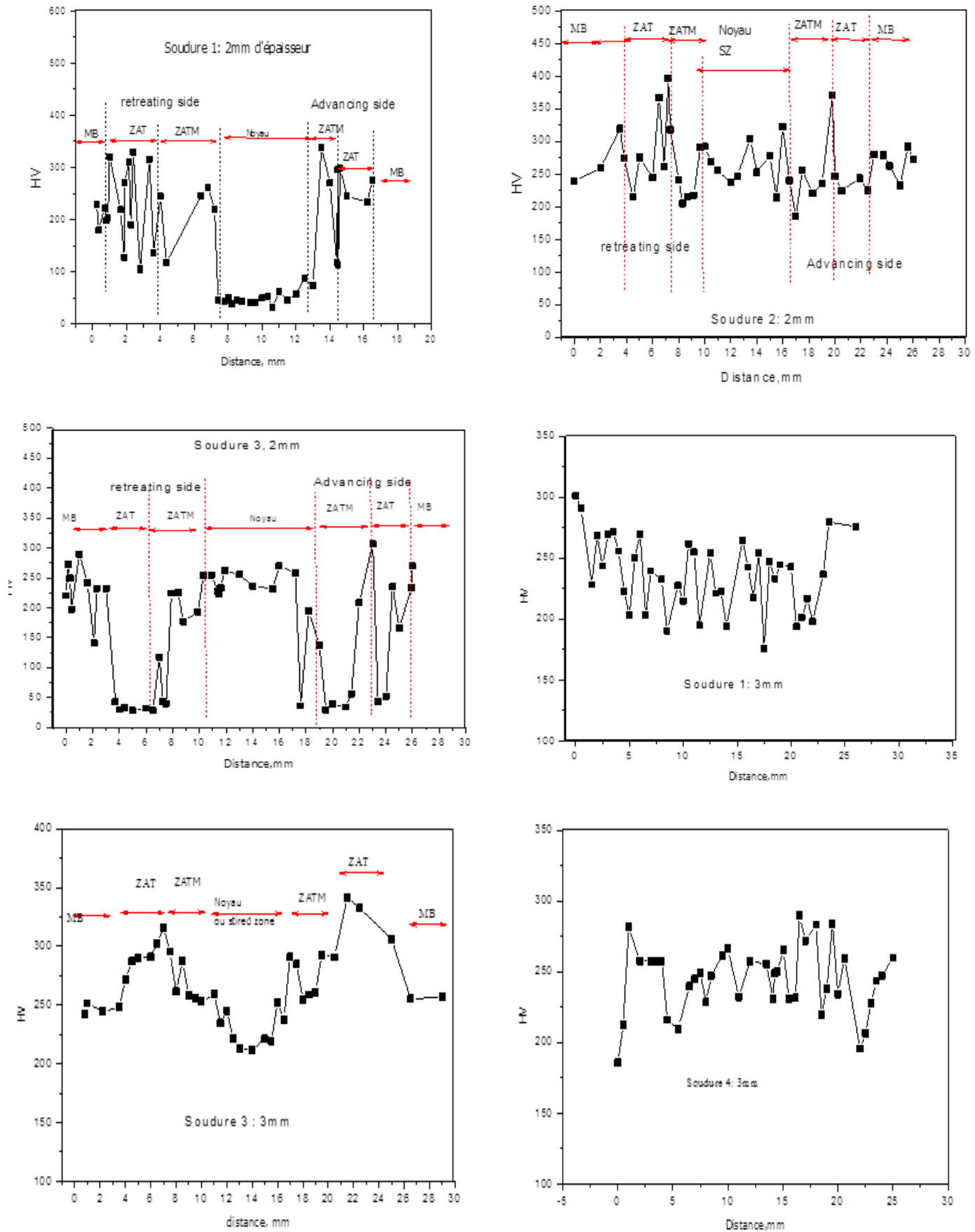


Figure 3.4 profil de microdureté

Conclusion :

Cette étude constitue une contribution à l'étude et à la compréhension globale des différents phénomènes rencontrés lors du soudage par friction malaxage FSW d'un alliage d'aluminium à durcissement structural série 2XXX.

Ce procédé d'assemblage se caractérise par différents paramètres les plus importants sont : les vitesses d'avance et rotation, la force de pression, la géométrie de l'outil. Ces paramètres sont dictent la quantité de chaleur générée dans le joint qui à son tour gouverne la formation de la soudure.

Dans ce travail, nous nous sommes proposé à étudier l'interaction entre la microstructure et les paramètres du procédé essentiellement la vitesse de rotation.

Deux tôles en alliage 2017A d'épaisseur différentes sont considérées. Les soudures sont réalisées bout-bout avec des vitesses de rotation variant de 900 à 1400 tr/min les autres paramètres sont considérés constants. Malgré la complexité des phénomènes, on peut conclure les points :

Les vitesses d'avance et de rotation mais aussi l'outil utilisé conditionnent les cycles de température dépendamment de l'alliage utilisé qui déterminent à leur tour la microstructure et les caractéristiques mécaniques de la soudure (en termes de dureté)

Les paramètres de soudage affectant la génération de chaleur et le flux de matière sont en général en mesure d'affecter également la morphologie des soudures, c'est-à-dire la forme et les caractéristiques des différentes zones composant la soudure. En effet, en fonction des paramètres choisis, le noyau peut prendre deux morphologies différentes : une forme évasée présentant une certaine symétrie par rapport à l'axe perpendiculaire à la soudure ou une forme d'un oignon avec un bras d'écoulement vers le coté avancé (Advancing side) de la soudure.

La microstructure est assez constante pour les différentes conditions de soudage, mais l'apparition de défaut varie d'une condition à une autre.

Concernant la microdureté des joints, dans la plus part des conditions, les évolutions conservent une forme en « W » typique des alliages d'aluminium à durcissement par traitement thermique. Cependant un profile plus au moins uniforme est obtenu pour les (soudure 4 :3mm, et soudure 2 :2mm).

En perspectives et pour compléter ce travail, une étude approfondie de l'influence de chaque paramètre du procédé de soudage FSW (vitesse d'avance, rotation et géométrie de l'outil) sur les

caractéristiques microstructurales et géométriques du joint soudé permettra mieux d'identifier les combinaisons optimales de paramètres pour obtenir des soudures de haute qualité sans défauts. Il serait aussi intéressant de mener en parallèle une étude numérique à fin d'optimiser les paramètres préalablement.

Références

- [1] Le soudage par friction malaxage : principes et applications, Lyne St-Georges, éd. : Les Presses de l'aluminium, Chicoutimi, Québec (2015).
- [2] Cavaliere, P., Nobile, R., Panella, F. W., & Squillace, A. (2006). Mechanical and microstructural behaviour of 2024–7075 aluminium alloys sheets joined by friction stir welding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(6), 588-594
- [3] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, 2005. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering*, 50, 1-78
- [4] P. Dainelli, P. Nennig, A EVALUATION DES POSSIBILITES DE CONTROLE QUALITE EN LIGNE DES SOUDURES FSW.
https://www.ndt.net/article/cofrend2014/papers/ME1D1_P_DAINELLI.pdf
- [5] W. J. Arbogast, A flow-partitioned deformation zone model for defect Formation during friction stir welding. *Scripta Materialia* 58 (2008) p. 372–376
- [6] <https://stirweld.com/defauts-courants-du-soudage-par-friction-malaxage/>
- [7] ASM, I. (1990). *Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials* (Vol. 2). *Asm Intl.*
- [8] H. B. Chen, K. Yan, T. Lin, S. B. Chen, C. Y. Jiang, Y. Zhao, 2006, The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy, friction stir welds, *Materials Science and Engineering A* 433: 64–69
- [9] https://fr.wikipedia.org/wiki/Alliage_d%27aluminium_pour_corroyage
- [10] Bailon, J.-P. et Dorlot, J.-M. (2015). *Des matériaux* (3e éd.) Montréal (Québec) : Presses internationales Polytechnique
- [11] Nicolas Bello, Effets d'un vieillissement longue durée sur deux alliages d'aluminium de la série 2000. HAL Id: tel-02064738 <https://hal.science/tel-02064738v2>
- [12] N.A Belov, A.A Aksenov and D.G Eskin, Iron in Aluminium alloys: impurity and alloying element, Ed. Taylor and Francis 15, (2002)
- [13] Yu CHEN, et al, Effect of welding heat input and post-welded heat treatment on hardness of stir zone for friction stir-welded 2024-T3 aluminum alloy *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 25(2015) 2524–2532
- [14] H. H. Shih, N. N. Ho, and J. C. Huang, Precipitation Behaviors in Al-Cu-Mg and 2024 Aluminum Alloys, *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 27, no. September, pp. 2479–2494, 1996, <http://www.springerlink.com/index/H558812V15546312.pdf>.

- [15] S. C. Wang and M. J. Starink, Two types of S phase precipitates in Al-Cu-Mg alloys, *Acta Mater.*, vol. 55, no. 3, pp. 933–941, 2007
- [16] S. P. Ringer and K. Hono, Microstructural Evolution and Age Hardening in Aluminium Alloys: Atom Probe Field-Ion Microscopy and Transmission Electron Microscopy Studies. *Materials Characterization Volume 44, Issues 1–2, January–February 2000, Pages 101-131*
- [17] V. Dixit, R. S. Mishra, R. J. Lederich, and R. Talwar, Effect of initial temper on mechanical properties of friction stir welded Al-2024 alloy, *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 12, no. 4, pp. 334–340, 2007 Étude des couplages thermomécaniques
- [18] N. Nayan et al., Microstructure and tensile response of friction stir welded Al–Cu–Li (AA2198-T8) alloy, *Mater. Charact.*, vol. 159, no. November 2019, p. 110002, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.110002>
- [19] R. D. Fu, J. F. Zhang, Y. J. Li, J. Kang, H. J. Liu, and F. C. Zhang, Effect of welding heat input and post-welding natural aging on hardness of stir zone for friction stir-welded 2024-T3 aluminum alloy thin-sheet, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 559, pp. 319–324, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.105>
- [20] Uematsu, Y., Tokaji, K., and Shibata, H. (2009). Fatigue behaviour of friction stir welds without either welding flash nor flaw in several aluminium alloys. . . . *Journal of Fatigue*, 31(10) :1443–1453.
- [21] Cécile Genevois, Genèse des microstructures lors du soudage par friction malaxage d’alliages d’aluminium de la série 2000 & 5000 et comportement mécanique résultant, **thèse doctorat**, <https://theses.hal.science/tel-00008244>
- [22] <http://www.metaux-detail.com/pdf/alu/2017A.pdf>
- [23] 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 Materials*, Vol. 56, pp. 69-72, 2007.
- [24]. Rhodes, C.G., Mahoney, M.W., Bingel, W.H., Spurling, R.A. and Bampton, C.C. “Effects of FSW on microstructure of 7075 aluminium”, *Scripta Materialia*, Vol. 36, p.69, 1997.
- [26] Nandan, R., DebRoy, T., Bhadeshia, H.K.D.H. “Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties”, *Progress in Materials Science*, Vol. 53, pp. 980-1023, 2008.
- [27] Y. G. Kim, H. Fujii, T. Tsumura, T. Komazaki, and K. Nakata, Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 415, no. 1–2, pp. 250–254, Jan. 2006, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509305011652>.

- [28] P. Sevel and V. Jaiganesh, Effects of axial force on the mechanical properties of AZ80A Mg alloy during friction stir welding, *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 2, pp. 1312–1320, 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.152>.
- [29] Y.-H. Zhao, S.-B. Lin, F.-X. Qu, and L. Wu, Influence of pin geometry on material flow in friction stir welding process, *Mater. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 1, pp. 45–50, Jan. 2006, <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/174328406X78424>.
- [30] K. Elangovan and V. Balasubramanian, Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 459, no. 1–2, pp. 7–18, 2007.
- [31] P. Podrzaj, B. Jerman, and D. Klobcar, Welding defects at friction stir welding, *Metalurgija*, vol. 54, no. 2, pp. 387–389, 2015.
- [32] J. Rasti, Study of the welding parameters effect on the tunnel void area during friction stir welding of 1060 aluminum alloy, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 97, no.5–8, pp. 2221–2230, Jul. 2018, <http://link.springer.com/10.1007/s00170-018-1857-5>
- [33] Y.-H. Zhao, S.-B. Lin, F.-X. Qu, and L. Wu, Influence of pin geometry on material flow in friction stir welding process, *Mater. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 1, pp. 45–50, Jan. 2006, <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/174328406X78424>.
- [34] K. Elangovan and V. Balasubramanian, Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 459, no. 1–2, pp. 7–18, 2007.
- [35] F. C. Liu and T. W. Nelson, In-situ material flow pattern around probe during friction stir welding of austenitic stainless steel, *Mater. Des.*, vol. 110, pp. 354–364, 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.147>.
- [36] <https://stirweld.com/produits-stirweld/outils-fsw/>
- [37] https://www.researchgate.net/figure/Figure-112-Schema-dun-outil-MegastirR-refroidi-16-19_fig8_330616339