الجمهورية الجزائرية الدمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ DJILLALI EL LIABES DE SIDI-BEL-ABBÈS
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

THÈSE

Pour
L'obtention du diplôme de

Doctorat 3ème cycle LMD

Présentée par :

ADDA HANIFI Mohamed Amine

Spécialité : Génie Mécanique
Spécialité : Fabrication mécanique et productique

Influence de mode de finition sur le comportement mécanique des joints soudés par FSW

Directeur de thèse : Pr. ZEMRI Mokhtar

Soutenue le :
Devant le jury :

M.	**BOUCHOUICHA Benattou**	Professeur	U. Sidi Bel Abbes	Président
M.	**MAZARI Mohamed**	Professeur	U. Sidi Bel Abbes	Examinateur
M.	**GHAZI Abdelkader**	Professeur	U. Mascara	Examinateur
M.	**BAHRAM Kaddour**	MCA	U. Ain Témouchent	Examinateur
M.	**ZEMRI Mokhtar**	Professeur	U. Sidi Bel Abbes	Directeur de thèse
M.	**MERZOUG Mohamed**	Professeur	U. Sidi Bel Abbes	Invité

Année universitaire 2025/2026

Résumé :

L'objectif du développement du soudage par friction malaxage (FSW) était d'obtenir des joints de haute qualité, que ce soit en termes d'état de surface, de propriétés mécaniques ou de micro-dureté, spécifiquement dans les systèmes basés sur l'aluminium et d'autres alliages.

Cette thèse présente une recherche expérimentale centrée sur l'alliage 5083-H111, dans le but d'analyser l'impact des paramètres de soudure sur le comportement mécanique en flexion et la qualité des soudures.

Afin d'optimiser la procédure tout en minimisant le nombre de tests expérimentaux, un modèle mathématique fondé sur la régression linéaire multiple (MLR) a été élaboré. Ce modèle est associé à un schéma d'expérimentation de type ANOVA, qui permet de repérer les éléments les plus pertinents et de souligner leur importance cruciale dans le contrôle de la qualité des surfaces soudées.

Les résultats démontrent que les paramètres opérationnels analysés ont une grande influence et nécessitent un ajustement précis pour assurer la performance et la fiabilité des assemblages FSW.

Mots clés : soudage par friction malaxage, qualité de surface, aluminium 5083H111, testes de flexion.

Abstract :

The development of Friction Stir Welding (FSW) aimed to produce high-quality joints in terms of surface finish, mechanical properties, and microhardness, particularly within aluminum-based systems and other alloys.

This thesis presents an experimental investigation focused on the 5083-H111 aluminum alloy, with the objective of analyzing the influence of welding parameters on bending behavior and weld quality. To optimize the process while minimizing the number of experimental trials, a mathematical model based on Multiple Linear Regression (MLR) was established. This model is integrated with an ANOVA-based experimental design, enabling the identification of the most significant factors and highlighting their critical role in controlling the quality of welded surfaces.

The results demonstrate that the operational parameters examined exert a substantial influence and require precise adjustment to ensure the performance and reliability of FSW joints.

Keywords : friction stir welding • surface quality• aluminum 5083H111 • parameters • bending test

الملخص:

تم تطوير تقنية اللحام بالاحتكاك والدوران fsw بهدف الحصول على وصلات عالية الجودة من حيث الخصائص الميكانيكية، نعومة السطح والصلابة خصوصا في الأنظمة القائمة على الألومينيوم وغيرها من السبائك.

تعرض هذه الاطروحة بحثا تجريبيا تم فيه استخدام الألومينيوم 5083 H111من أجل إظهار سلوك الإنحناء الميكانيكي وجودة الوصلات الملحومة، ومن أجل تحسين العملية وتقليل عدد التجارب تم تطوير نموذج رياضي يعتمد على الانحدار الخطي المتعدد MLR بالتداخل مع نموذج ANOVA مما سمح بتحديد العوامل الأكثر تأثيرا وإبراز أهميتها الحاسمة في التحكم بجودة اللحام.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن عوامل ضبط اللحام لها تأثير كبير في جودة وتلاحم الوصلة.

الكلمات المفتاحية: اللحام بالاحتكاك و الدوران، الألومينيوم5083H111،جودة السطح، العوامل ،اختبار الإنحناء.

Tout d'abord, je rends grâce à DIEU, Le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'achèvement de ce travail de recherche.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mon respect à mon directeur de thèse, le **Pr Mokhtar Zemri**, pour ses précieux conseils, son encadrement rigoureux et son soutien constant tout au long de mes travaux. Mes remerciements s'adressent également au **Pr Mohamed Merzoug**, pour ses suggestions constructives et son accompagnement scientifique, qui ont été d'une grande valeur tout au long de ce travail. Son implication et son soutien ont joué un rôle comparable à celui d'un co-directeur, et je lui exprime toute ma gratitude

Je remercie sincèrement les membres de mon jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail, ainsi que le temps et l'attention qu'ils ont consacré à l'examen de mon manuscrit.

Mes remerciements vont aussi à mes collègues et amis du **Laboratoire des Matériaux et Systèmes Réactifs (Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbès)**, pour leur aide, leurs échanges scientifiques et leur soutien moral. J'adresse également mes remerciements aux enseignants et chercheurs des universités partenaires (**Oran et Mascara**) pour leurs encouragements et leurs contributions.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à ma famille — mon père, ma mère, mes frères et sœurs — pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements tout au long de mon parcours académique. Sans leur présence et leur confiance, ce travail n'aurait pu être mené à terme.

ADDA HANIFI Mohamed Amine.

À la mémoire de ma mère.

À mon Père.

À mon Épouse.

À ma Famille.

À mes Amis.

Résumés……
Remerciements……..
Dédicaces……..
Sommaire.....
Liste des figures……
Notations ……;……

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Présentation du FSW 5
I.1.1 Introduction 5
I.1.2 Principe général 5
I.1.3 Les différentes phases opératoires de soudage FSW 7
I.2 Les matériaux soudables par le FSW 9
I.2.1 Aluminium et ses alliages 9
I.2.1.1 Nomination des alliages d'aluminium 10
I.2.1.2 Classification 10
I.3 Les domaines d'applications du FSW 11
I.3.1 Domaine Spatial 11
I.3.2 Domaine ferroviaire 12
I.3.3 Domaine Automobile 12
I.3.4 Domaine Aéronautique 13
I.3.5 Domaine Navales 13
I.3.6 Domaine du Nucléaire 14
I.3.7 Autres Domaine 14
I.4 Limite et Avantage du FSW 15
I.4.1 Avantages du FSW 15
I.4.2 Limites du FSW 16
I.5 Facteurs associé au soudage par friction-malaxage 17
I.5.1 L'outil de soudage 18
I.5.1.1 Différents types de l'outil de soudage 18
I.5.1.2 Rôle des composants géométriques de l'outil FSW 20
I.5.1.3 Matériaux d'outil 23
I.5.2 Paramètres opératoire majeurs 24
I.5.2.1 Vitesse de rotation 24
I.5.2.2 Vitesse d'avance 26
I.5.2.3 L'effort de l'outil 27
I.5.2.4 Angle d'inclinaison de l'outil 28
I.6 I-6 Les configurations possibles par le FSW 29
I.6.1 Le soudage bout à bout 31
I.7 Propriétés et caractéristiques du joint FSW 31
I.7.1 Microstructure des joints soudés FSW 31
I.7.1.1 Les différentes zones du cordon 32
I.7.1.2 Propriétés mécaniques 34
I.7.1.3 Dureté 35
I.7.1.4 Rugosité 36
I.7.1.5 Flux de chaleur lors du soudage par fsw 37
I.7.1.6 Le coefficient d'efficacité du joint 39
I.8 Défauts courants dans le soudage par friction malaxage 40

I.8.1 Défauts de surface 40
I.8.1.1 Rainures de surface 40
I.8.1.2 Bavures (Ribbon flash) 41
I.8.1.3 Décapage de surface dans le FSW 41
I.8.1.4 Cicatrice au dos dans le FSW 41
I.8.1.5 Défaut à la racine du cordon (root flow) 41
I.8.2 Défauts interne 42
I.8.2.1 Défaut tunnel 42
I.8.2.2 Défaut d'adhésion partielle (Kissing bond) 43
I.8.2.3 Vestige de ligne de joint 43
I.8.2.4 Défaut de pénétration incomplète 44
I.8.3 Relation entre défauts et paramètres opératoires en FSW 45
I.9 contraintes résiduelles 46
I.9.1 Origine des contraintes résiduelles 46
I.9.2 Influence des paramètres sur les contraintes résiduelles 49
I.10 Comportement en fatigue des joints fsw 50
I.10.1 Généralités sur la fatigue 50
I.10.1.1 Modes élémentaires de fissuration 50
I.10.1.2 Propagation de fissures par fatigue 51
I.10.2 Effet des paramètres sur la fatigue des joints soudés par FSW 53
I.11 Conclusion 54

CHAPITRE II : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

II.1 introduction 56
II.2 Méthode et matériels 56
II.2.1 Alliage d'aluminium 5083H111 56
II.2.1.1 Essai de traction 57
II.2.2 Équipement utilisé pour le soudage FSW 58
II.2.2.1 Machine de soudage 58
II.2.2.2 Système de bridage 59
II.2.3 Paramètres opératoires 59
II.2.4 Procédures de caractérisation 60
II.2.4.1 Effet de la vitesse de soudage sur la rugosité de la surface des joints soudés 61
II.2.4.2 Mesures de la micro-dureté 61
II.2.4.3 Les essais de flexion 63
II.2.4.4 Microstructure et propriétés des joints FSW 66
II.2.5 Optimisation 68
II.2.5.1 Mesure de température 68
II.2.5.2 Mesure de rugosité 69
II.2.5.3 Micro-dureté 71
II.2.5.4 Test de flexion 72
II.2.5.5 Test de traction 74
II.2.5.6 Test de fatigue 75
II.3 Conclusion 77

CHAPITRE III : MODÉLISATION & SIMULATION NUMÉRIQUE

III.1 Introduction 78
III.2 Méthodologie des plans d'expériences (DOE) 78
III.2.1 Définition 78
III.2.2 Définition Interaction entre facteurs et réponse 79
III.2.3 Domaine d'applications des plans d'expériences 79
III.3 Méthodologie des surfaces de réponse (RSM) 80
III.3.1 Modélisation et développement du modèle mathématique 80
III.3.1.1 Modèle mathématique 83
III.3.2 Influence des paramètres FSW sur les résultats 83
III.3.2.1 Charge maximale 83
III.3.2.2 Déplacements 85
III.3.2.3 Micro-dureté 86
III.3.2.4 Température 87
III.3.3 Effets des interactions sur les résultats 89
III.4 Conclusion 90

CONCLUSION GÉNÉRALE 91

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQES 91

Figure I.1 : Principe général du FSW
Figure I.2 : Procédé de soudage FSW
Figure I.3 : (a) Fin de phase de pénétration, (b) Phase de chauffage
Figure I.4 : Phase de translation
Figure I.5 : Flux de matière drainée autour du pion (vu de dessus)
Figure I.6 : Utilisation du procédé FSW pour souder les réservoirs de carburant
Figure I.7 : Soudage des profilés du train Hitachi
Figure I.8 : Utilisation du procédé FSW par honda
Figure I.9 : Voilure d'avion soudée par FSW
Figure I.10 : a) Bateau en aluminium construit en utilisant FSW
b) Panneaux préfabriqués destine au pont du bateau de croisière
Figure I.11 : a) Des supports de lumières
b) Des tôles en CU-OF,
c) Des éléments de générations
Figure I.12 : Présentation des éléments d'outil FSW
Figure I.13 : Les différents types d'outil FSW
Figure I.14 : Outil conventionnel
Figure I.15 : Outil a pion rétractable
Figure I.16 : Outil a doubles épaulements
Figure I.17 : Différentes formes d'épaulement de l'outil FSW
Figure I.18 : Différentes formes de pion de l'outil FSW
Figure I.19 : Effets de la géométrie du pion sur la résistance mécanique
Figure I.20 : Contrainte et déformation des enchantions soudées
Figure I.21 : Effet de la vitesse de rotation sur la température
Figure I.22 : Effet de la vitesse de rotation sur la dureté
Figure I.23 : Effet de la vitesse de soudage sur la température
Figure I.24 : Schéma de la méthode de préchauffage par résistance
Figure I.25 : État du joint SFM en force mesurée
Figure I.26 : Effet de l'inclinaison de l'outil par rapport à la surface du joint
Figure I.27 : Effet de l'inclinaison de l'outil sur la température
Figure I.28 : Schématisation d'un bridage dans le soudage
Figure I.29 : Configurations offertes par le fsw
Figure I.30 : Soudage bout a bout
Figure I.31 : Microstructure de la zone soudée
Figure I.32 : Formes du noyau : a) cuvette, b) ellipsoïde
Figure I.33 : Macrographie d'une coupe transverse d'un joint FSW d'alliage 2024-T351
Figure I.34 : Microstructure du A356 après soudage par friction malaxage
Figure I.35 : Résistance à la traction
Figure I.36 : Résistance à la traction
Figure I.37 : Courbes schématiques montrant le profil de dureté générique d'un joint FSW
Figure I.38 : Effet de la vitesse de rotation sur la rugosité Ra
Figure I.39 : Profil de la température avec une vitesse de rotation de 500 rpm
Figure I.40 : Mesure de la température pendant le FSW de l'alliage 6082
Figure I.41 : Schéma montrant la position des défauts en soudage FSW
Figure I.42 : Stries ou sillons visibles sur la soudure
Figure I.43 : Défaut de bavures lors du fsw
Figure I.44 : Défaut à la racine du cordon, sur la surface des pièces en contact avec l'enclume
Figure I.45 : Défaut de tunnelisation des joints soudés
Figure I.46 : Images MEB : un défaut d'adhésion partielle

Figure I.47 : Macrostructure du défaut JLR
Figure I.48 : Morphologie de zigzag du JLR
Figure I.49 : Microstructurale des défauts incomplets en soudage par friction-malaxage
Figure I.50 : Origine des contraintes résiduelles
Figure I.51 : Effets des paramètres de soudage sur les contraintes résiduelles
Figure I.52 : Contraintes résiduelles dans la direction longitudinale dans un joint SFM
Figure I.53 : Contraintes résiduelles dans la direction transversale d'un joint SFM
Figure I.54 : Contraintes résiduelles mesurées dans une plaque de 6,3 mm d'épaisseur
Figure I.55 : Distribution expérimentale des contraintes résiduelles transversales
Figure I.56 : Différentes phases de la durée de vie en fatigue
Figure I.57 : Modes élémentaires de fissuration (mode de sollicitations)
Figure I.58 : Comportement à la fatigue des échantillons AA 6082-T6

Figure II.1 : Géométrie de l'éprouvette de traction
Figure II.2 : Courbe de traction
Figure II.3 : Découpage des plaques pour la réalisation des éprouvettes
Figure II.4 : Fraiseuse verticale adaptée pour le soudage FSW
Figure II.5 : Système de fixation des tôles
Figure II.6 : Outils de soudage
Figure II.7 : Exemple de joints soudés obtenus avec différentes vitesses de soudage
Figure II.8 : Géométrie de l'éprouvette de flexion trois points
Figure II.9 : Effet de la vitesse de soudage sur la rugosité de la surface des joints soudés
Figure II.10 : Appareil de rugosité
Figure II.11 : Micro duromètre
Figure II.12 : Polisseuse mécanique du type P 260 MECAPOL.
Figure II.13 : Variation de la micro-dureté
Figure II.14 : Machine de flexion CONTROLAB
Figure II.15 : Les tests de flexion trois points
Figure II.16 : Essai de flexion trois points-déplacement
Figure II.17 : Image SEM DES enchantions soudées
Figure II.18 : Thermocouple utilisé pour la mesure des températures.
Figure II.19 : Variation de la température pour la vitesse 1000 tr/min
Figure II.20 : Variation de la température pour la vitesse 1400 tr/min.
Figure II.21 : Variation de la température pour la vitesse 2000 tr/min.
Figure II.22 : Mesure de rugosité pour différentes configurations.
Figure II.23 : Mesure de la micro-dureté pour la vitesse 1000 tr/min
Figure II.24 : Mesure de la micro-dureté pour la vitesse 1400 tr/min
Figure II.25 : Mesure de la micro-dureté pour la vitesse 2000 tr/min
Figure II.26 : Essai de flexion pour la vitesse de rotation 2000 tr/min
Figure II.27 : Essai de flexion pour la vitesse de rotation 1000 tr/min
Figure II.28 : Courbe de traction comparative entre métal de base et métal soudé
Figure II.29 : Machine d'essai servo - hydraulique (Instron 8516)
Figure II.30 : Montage de la lunette binoculaire et du stroboscope
Figure II.31 : A) Préparation de l'éprouvette, B) géométrie de l'éprouvette e CT75.

Figure III.1 : Relation entre paramètres du FSW (entrées) et les réponses mesurées
Figure III.2 : Intervalle de confiance du modèle, (Charge).
Figure III.3 : Intervalle de confiance du modèle, (Déplacement).
Figure III.4 : Intervalle de confiance du modèle, (Dureté).
Figure III.5 : Intervalle de confiance du modèle, (Température).
Figure III.6 : Relation entre paramètres du FSW et la charge maximale.
Figure III.7 : : Variation de la charge en fonction des paramètres FSW.
Figure III.8 : Variation tridimensionnelle (3D) de la charge en fonction de la vitesse de rotation et de la vitesse de soudage.
Figure III.9 : Relation entre paramètres du FSW et le déplacement.
Figure III.10 : Variation de la flèche (déplacement) en fonction des paramètres FSW.
Figure III.11 : Variation tridimensionnelle (3D) de la flèche (déplacement) en fonction de la vitesse de rotation et de la vitesse de soudage.
Figure III.12 : Relation entre paramètres du FSW et la dureté.
Figure III.13 : Variation de la dureté en fonction des paramètres FSW.
Figure III.14 : Variation tridimensionnelle (3D) de la dureté en fonction de la vitesse de rotation et de la vitesse de soudage.
Figure III.15 : Relation entre paramètres du FSW et la température.
Figure III.16 : Variation tridimensionnelle (3D) de la température en fonction de la vitesse de rotation et de la vitesse de soudage.
Figure III.17 : Variation de la température en fonction des paramètres FSW.
Figure III.18 : Effets des facteurs sur les résultats et leur interaction

Symbole	Désignation	Unité
FSW	Friction Stir Welding	
TWI	The Welding Institute	
V_a	Vitesse de soudage	mm/min
V_r	Vitesse de rotation	mm/min
e	Épaisseur à souder	*mm*
MB	Métal de base	
AS	Advancing Side	
RS	Retreating Side	
SZ	Stirred Zone	
ZAT	Zone affectée thermiquement	
ZATM	Zone affectée thermo mécaniquement	
CND	Contrôle non destructif	
F	Efforts axiaux de soudage	N
C_J	Coefficient de joint	
R_e	Résistance élastique a la rupture	
Tf	Température de fusion	
E	Module de Young	GPa
σ_e	Limite élastique	MPa
σ_m	Contrainte a la rupture	
Ra	Rugosité arithmétique	
R	Rapport de charge	
MLR	Multiple linéaire régression,	
Hv	Hardness Vickers	
DRX	Diffraction des rayons X	
MEB	Microscopie électronique à balayage	
ANOVA	Analyse des variances	

Introduction générale

L'industrie moderne accorde une importance capitale aux alliages d'aluminium, grâce à leur densité réduite, leur capacité élevée à résister à la corrosion et leurs excellentes propriétés mécaniques. Ces matériaux, grâce à leur légèreté et leurs performances, sont indispensables dans des domaines clés comme l'aéronautique, l'automobile et le spatial, où la diminution de poids et la fiabilité structurelle représentent des critères primordiaux.

Toutefois, face aux limitations mécaniques de l'aluminium pur, les métallurgistes ont rapidement été amenés dès la fin du XIXe siècle à concevoir des alliages améliorés en intégrant des éléments d'alliage. Dans cette catégorie, les alliages de la série 5000, qui sont majoritairement basés sur le magnésium, se démarquent grâce à leur remarquable résistance à la corrosion, leur facilité de soudage et leur capacité à l'écrouissage. Ces propriétés les rendent idéaux pour les applications maritimes, automobiles et de structures légères. Néanmoins, leur application exige une vigilance spécifique lors des processus d'assemblage, car même si leur réaction au soudage est généralement positive, il est nécessaire de prendre certaines mesures pour prévenir l'apparition de défauts tels que la fissuration à chaud ou la dégradation locale des propriétés mécaniques.

Dans ce contexte, le soudage par friction malaxage (Friction Stir Welding, FSW) s'est imposé comme une solution innovante. Développé dans les années 90, ce procédé solide repose sur le frottement et le malaxage d'un outil rotatif qui plastifie la matière sans atteindre la fusion. Il offre des avantages considérables : joints de haute qualité, réduction des déformations, consommation énergétique moindre et amélioration des propriétés mécaniques locales. Ces atouts en font une technique privilégiée pour l'assemblage des alliages d'aluminium, en particulier dans les applications où la fiabilité et la performance sont essentielles.

Par conséquent, l'analyse du comportement des soudures FSW, notamment en termes de distribution thermique, micro-dureté et résistance mécanique, constitue un enjeu scientifique et industriel majeur. Elle permet non seulement de mieux comprendre l'influence des paramètres de soudage, mais aussi d'optimiser les procédés afin de garantir la qualité et la durabilité des assemblages.

Le but de ce travail était d'étudier le comportement en fatigue des joints soudés par le procédé FSW en fonction de l'état de finition de la zone soudée après surfaçage.

Après juste un essai de fatigue sur une éprouvette CT75, la machine universelle INSTRON, présente au niveau de notre laboratoire (LMSR), est tombé en panne et n'a jamais pu être réparée. Nous avons continué l'étude mais en s'intéressant aux comportements mécaniques des joints soudés en fonction des paramètres de soudage après avoir remarqué que l'état de la surface usinée n'influé nullement mais c'est l'état de surface du cordon qui était prépondérant.

Cette thèse est structurée en trois chapitres complémentaires, permettant de couvrir à la fois les aspects théoriques, expérimentaux et numériques du soudage par friction malaxage (FSW) appliqué à l'alliage AA5083-H111.

Le premier chapitre présente une revue générale sur les alliages d'aluminium et leurs propriétés, ainsi qu'une introduction détaillée au procédé de soudage par friction malaxage (FSW). Un état de l'art des travaux antérieurs est proposé, mettant en évidence les avancées réalisées et les limites rencontrées. Une attention particulière est accordée aux paramètres essentiels du procédé, tels que la vitesse de rotation et la vitesse d'avance, qui influencent directement la qualité des joints soudées.

Le deuxième chapitre se focalise sur l'analyse expérimentale des soudures bout à bout effectuées sur des plaques d'alliage AA5083-H111 grâce au procédé FSW. L'influence des facteurs de soudage sur la qualité des joints est étudiée en observant l'état de surface, la microstructure et le comportement mécanique en flexion. Une analyse approfondie des modes de rupture est également menée afin d'identifier les zones sensibles du joint et de définir les conditions optimales pour garantir une soudure fiable et performante.

Le troisième chapitre s'articule sur le développement d'un modèle mathématique basé la régression linéaire multiple (MLR) et sur l'analyse de la variance (ANOVA), afin de réduire le nombre d'expérimentations nécessaires pour optimiser le procédé. Une campagne expérimentale a été réalisée pour mesurer l'impact des paramètres de soudage sur des réponses clés telles que la température générée, la charge appliquée et la micro-dureté au niveau de la ZAT. Les résultats confirment que la vitesse de rotation et la vitesse d'avance sont les facteurs les plus significatifs, exerçant un rôle crucial dans le contrôle de la qualité des soudures.

Nous finalisons notre travail par une conclusion générale.

Étude bibliographique

I.1 PRÉSENTATION DU FSW

I.1.1 Introduction

Le soudage est une technique de fabrication incontournable dans l'industrie moderne, utilisée pour assembler durablement des pièces métalliques grâce à la formation d'une liaison homogène. Parmi les procédés émergents qui ont profondément transformé les pratiques d'assemblage, le soudage par friction-malaxage (Friction Stir Welding – FSW) occupe une place de choix. Développé et breveté en 1991 par Wayne Thomas au sein du Welding Institute (TWI), ce procédé se distingue par son fonctionnement à l'état solide, contrairement aux techniques conventionnelles basées sur la fusion [1].

Le principe du FSW repose sur la chaleur générée par le frottement d'un outil rotatif non consommable appliqué sur les pièces à souder, combinée aux déformations plastiques dues au malaxage, ce qui ramollit le matériau sans le faire fondre [1]. Cette approche élimine les défauts classiques de solidification, diminue les contraintes résiduelles, et permet d'obtenir une soudure de grande qualité, y compris pour des matériaux réputés difficiles à souder tels que les alliages d'aluminium [2], [3].

L'un des principaux atouts du procédé FSW réside dans sa polyvalence : il est adapté à l'assemblage de matériaux similaires ou dissimilaires, tels que les alliages d'aluminium, de cuivre, de titane, de magnésium, ainsi que certains polymères techniques comme le PEHD [10]. De plus, le procédé est reconnu pour ses caractéristiques écologiques. Il ne génère ni rayons ultraviolets, ni fumées toxiques, ne nécessite aucun gaz de protection, et consomme moins d'énergie, ce qui justifie son qualificatif de technologie verte [4][5].

Au-delà de l'assemblage, le FSW a démontré son efficacité dans d'autres applications industrielles, telles que la modification de la microstructure des matériaux [6][7] ou la réparation de fissures [8][9]. Il est aujourd'hui largement utilisé dans les secteurs aéronautique, automobile, ferroviaire ou encore électronique, où la fiabilité des joints et les exigences environnementales sont primordiales.

Cependant, malgré ses nombreux avantages, ce procédé soulève encore certains défis technologiques, notamment le paramétrage complexe des variables de soudage, le contrôle des distorsions et le coût élevé des équipements spécialisés nécessaires à sa mise en œuvre [3]

I.1.2 Principe général

Le processus de soudage par friction-malaxage (FSW) consiste à assembler deux pièces ou tôles métalliques à l'état solide, sans fusion, à l'aide d'un outil rotatif non consommable. Cet outil

est constitué de deux éléments principaux : un épaulement qui frotte sur la surface des pièces à souder, et un pion qui pénètre dans le joint et assure le malaxage du matériau. Sous l'effet de la rotation et de l'avance de l'outil le long de la ligne de soudure, la chaleur générée par le frottement ramollit le matériau, permettant son brassage et sa consolidation.

Le procédé débute par une phase dite de pénétration, durant laquelle l'outil s'enfonce progressivement dans le plan de joint, jusqu'à établir un contact entre l'épaulement et les pièces à assembler. Cette interaction génère une élévation locale de la température, suffisante pour plastifier les matériaux sans provoquer leur fusion. Un effort axial est simultanément appliqué pour forger la matière ramollie sous l'épaulement.

La combinaison du mouvement de rotation et de l'avance de l'outil entraîne une dynamique particulière du matériau autour du pion, créant deux zones distinctes : le côté d'avance et le côté de recul, dépendants du sens de rotation et de la progression de l'outil. Ce brassage intense forme le cordon de soudure, caractérisé par une microstructure fine et homogène.

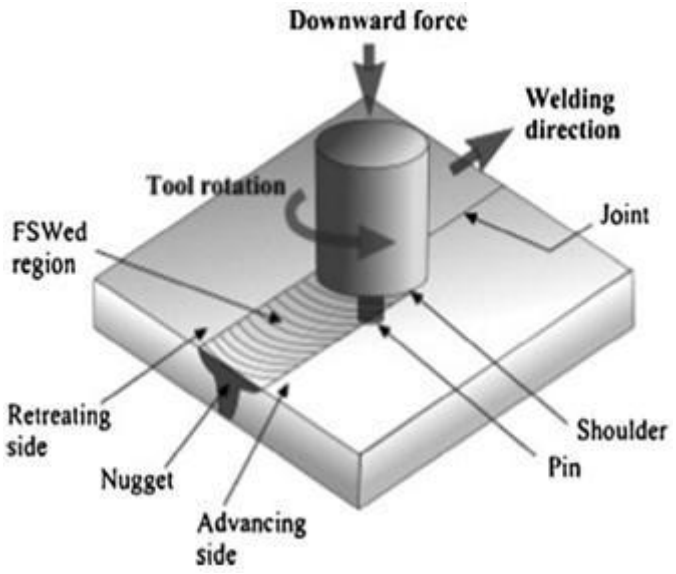


Figure I.1 : Principe général du FSW [10]

En fin d'opération, l'outil se retire verticalement, ce qui peut provoquer un défaut de type **"trou de serrure",** figure I.2 dans la zone terminale du joint soudé. De plus, les pièces doivent être fortement bridées pendant le soudage pour éviter tout déplacement, mais ce maintien rigide peut induire des contraintes résiduelles lors du refroidissement.

Les conditions thermiques et mécaniques spécifiques au FSW génèrent des transformations métallurgiques significatives dans la zone soudée, qui se divise en plusieurs régions distinctes selon leur degré d'exposition à la chaleur et à la déformation plastique.

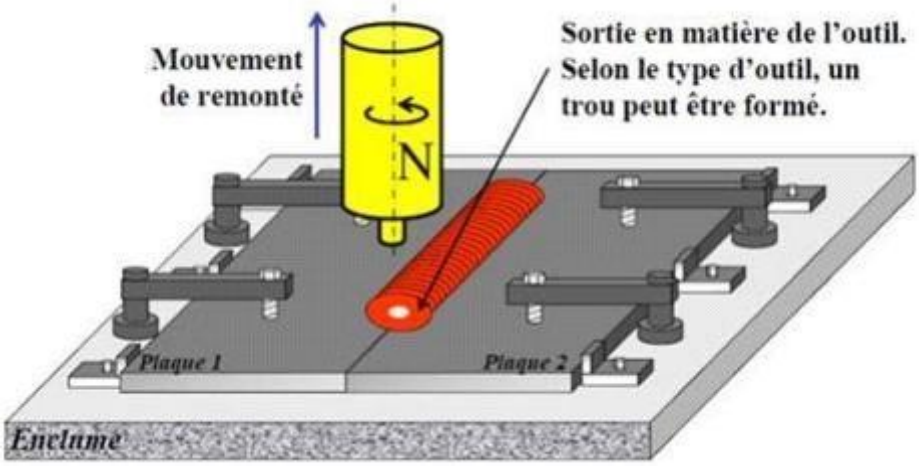


Figure I.2 : Procédé de soudage FSW [11]

I.1.3 Les différentes phases opératoires de soudage FSW

L'opération de soudage par friction-malaxage (FSW) s'articule autour de trois étapes fondamentales, qui peuvent être entièrement automatisées afin de garantir une excellente répétabilité du processus et une qualité constante des soudures.[12]

Phase de pénétration : Lors de cette première étape du procédé FSW, le pion de l'outil rotatif s'engage progressivement dans le plan de joint reliant les deux pièces à assembler. Une force axiale est appliquée afin d'enfoncer le pion jusqu'à ce que l'épaulement entre en contact direct avec la surface des pièces. L'outil est ensuite maintenu dans cette position pendant une durée appelée (**dwell time)** ou temps de préchauffage, permettant la génération d'une quantité de chaleur suffisante par frottement pour ramollir localement le matériau sans provoquer sa fusion [1].



Figure I.3 : (a) Fin de phase de pénétration, (b) Phase de chauffage [13]

Phase de soudage (ou phase de translation) : Après l'étape de préchauffage, une fois que la température nécessaire au ramollissement du matériau est atteinte, l'outil rotatif amorce son déplacement le long du joint à souder. Ce mouvement peut être assuré soit par l'outil lui-même, soit par la translation de la table supportant les pièces. Pendant cette phase, un effort axial constant — appelé **effort de forgeage** — est exercé sur l'outil afin d'assurer le maintien du contact et la consolidation du matériau plastifié.

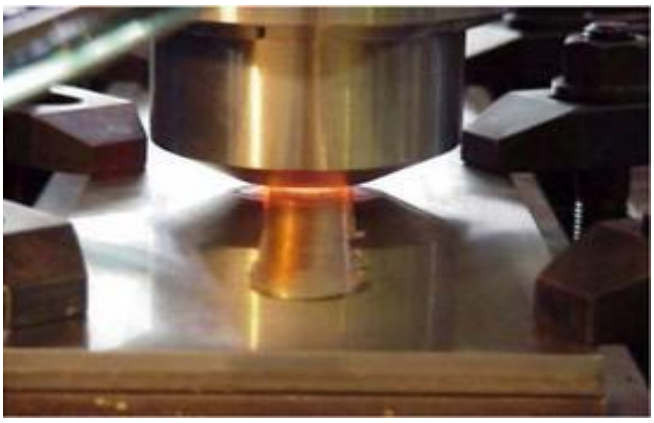


Figure I.4 : Phase de translation [13]

Le pion, en rotation, malaxe la matière ramollie entre les deux pièces, provoquant sa déformation plastique. Cette matière brassée forme progressivement un **cordon de soudure** solide, mais généralement **asymétrique**. Cette asymétrie résulte du mouvement combiné de rotation et de translation de l'outil, qui crée deux zones distinctes :

- **Côté d'avance (advancing side) : où le sens de rotation de l'outil coïncide avec sa direction d'avance, favorisant une circulation plus intense de la matière.**
- **Côté de recul (retreating side) : où la rotation s'oppose au déplacement, induisant une dynamique différente du flux de matière.[10]**

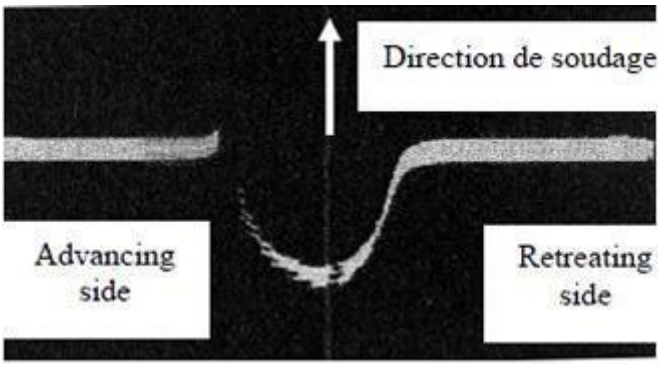


Figure I.5 : Flux de matière drainée autour du pion (vu de dessus) [14]

Phase de retrait : Lorsque le cordon de soudure est complètement formé, l'outil amorce son retrait du joint soudé. Dans le cas d'un pion fixe, cette extraction verticale laisse généralement

un défaut terminal sous forme de trou à l'extrémité du cordon, connu sous le nom de trou de serrure ou keyhole defect, comme le montre la figure I.2.

I.2 LES MATÉRIAUX SOUDABLES PAR LE FSW

Le FSW convient particulièrement aux matériaux ductiles, dont la faculté à se déformer plastiquement sans se briser facilite le malaxage et la consolidation lors du processus de soudage. Il est donc principalement utilisé pour l'assemblage des alliages d'aluminium, mais son utilisation s'étend aussi à d'autres matériaux comme le cuivre, le magnésium, le titane, certains types d'acier et même des assemblages de matériaux différents.

I.2.1 Aluminium et ses alliages

L'aluminium et ses alliages jouent un rôle clé dans l'évolution des technologies contemporaines, grâce à leur assemblage singulier de caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques. L'association de leur légèreté à une robustesse mécanique remarquable offre un rapport résistance/poids particulièrement attrayant pour divers domaines industriels, y compris l'automobile, la construction navale et aéronautique, sans oublier le transport d'hydrocarbures.

La composition chimique des alliages d'aluminium a une influence directe sur leurs propriétés. Bien que l'aluminium pur ait une excellente résistance à la corrosion, sa faible rigidité et ses propriétés mécaniques ne le rendent pas adéquat pour les usages structurels exigeants. C'est la raison pour laquelle l'intégration d'éléments d'alliage comme le cuivre, le magnésium ou le zinc contribue à l'amélioration de ses propriétés fonctionnelles.

Il existe deux méthodes fréquemment employées pour améliorer ces caractéristiques :

- **Le traitement thermique**, qui offre la possibilité de changer la microstructure interne tout en renforçant la dureté et la résistance mécanique.
- **L'écrouissage**, qui renforce la résistance en utilisant la déformation plastique sans changer la composition chimique.

Les progrès dans le domaine de la métallurgie ont aussi facilité la création d'alliages dédiés, qui répondent à des critères spécifiques tels que la résistance aux températures élevées, la capacité de soudure ou encore la stabilité dimensionnelle.

L'une des révolutions dans l'assemblage des alliages d'aluminium réside dans la technique de soudage par friction malaxage (FSW), un procédé sans fusion qui préserve les caractéristiques métallurgiques du matériau.

I.2.1.1 Nomination des alliages d'aluminium

Conformément aux standards définis par l'Aluminium Association (Washington D.C., USA), les alliages d'aluminium sont classifiés à l'aide d'un code numérique de quatre chiffres, facilitant ainsi l'identification de leur composition chimique et de leur groupe métallurgique [16]. Le premier numéro (de 1 à 8) représente la famille d'alliage, définie par l'élément principal incorporé à l'aluminium.

Tableau I.1 : Nomination des séries principale des alliages d'aluminium [15]

Série	Désignations	Élément d'alliage principal	Phase principale Présente dans l'alliage
Série 1000	1XXX	99% d'aluminium au minimum	-
Série 2000	2XXX	Cuivre (Cu)	A12Cu-A12CuMg
Série 3000	3 XXX	Manganèse (Mn)	A16Mn
Série 4000	4 XXX	Silicium (Si)	-
Série 5000	5 XXX	Magnésium (Mg)	A13Mg2
Série 6000	6 XXX	Magnésium (Mg) et Silicium (Si)	Mg2Si
Série 7000	7 XXX	Zinc (Zn)	MgZn2
Série 8000	8 XXX	Autres éléments	-
Série 9000	9 XXX	Non utilisé	-

I.2.1.2 Classification

Selon leur utilisation, les alliages d'aluminium se répartissent en deux catégories principales : les alliages corroyés et les alliages de fonderie.

• **Alliages travaillés** : Ces alliages sont conçus pour des techniques de déformation plastique comme le forgeage, le laminage, le pressage et l'estampage. On les utilise pour fabriquer des semi-produits (tôles, plaques, barres, profilés, tubes) ainsi que des composants mécaniques forgés ou estampillés.

• **Alliages de fonderie** : Idéaux pour le moulage, ils permettent la fabrication de pièces aux géométries compliquées [16].

Le tableau I.2 présente les alliages de fonderie les plus fréquemment utilisés ainsi que leurs caractéristiques.

Tableau I.2 : Les propriétés de quelques alliages de coulé [17]

Alliage	Propriétés
AlSi10Mg	Durcit par vieillissement, résistant aux vibrations et à la corrosion
AlSi5Cu1	Durcit par vieillissement, bonne coulabilité, pour les soudures, pour couler de lames minces
AlMg3	Résistant à l'eau de mer
AlSi25+Cu Ni	Durcit par vieillissement, alliage spécial, pour les pistons, résistance à l'usure grâce à son contenu élevé en Si
AlMgSiPb	Adéquat pour l'usinage
AlSi9Cu3	Alliage universel adéquat pour le coulage, l'alliage le plus important pour la coulée sous pression

I.3 LES DOMAINES D'APPLICATIONS DU FSW

L'application du procédé de soudage FSW est examinée pour son utilisation appropriée dans les domaines de l'automobile, de l'aéronautique, de l'aéronef, des véhicules militaires, du matériel roulant ferroviaire et de la construction navale.[18]

Au-delà de ces domaines solidement ancrés, des usages innovants apparaissent régulièrement dans des secteurs tels que l'électronique, les énergies vertes ou la production additive. Cette tendance indique que le FSW est prévu pour occuper une place prépondérante dans le développement des procédés industriels contemporains.

I.3.1 Domaine Spatial

Les réservoirs d'oxygène liquide utilisés par les fusées Boeing DELTA subissent des soudures longitudinales et circonférentielles afin de garantir leur étanchéité et leur solidité structurelle. Ainsi, la soudure des panneaux courbes placés sur le sommet des réservoirs d'hydrogène liquide est effectuée dans le contexte du programme spatial Ares I élaboré par la NASA [19]



Figure I.6 : Utilisation du procédé FSW pour souder les réservoirs de carburant de ses fusées Delta par la compagnie Boeing [20]

I.3.2 Domaine ferroviaire

Le soudage par friction malaxage (FSW) joue un rôle de plus en plus stratégique dans l'industrie ferroviaire, en réponse aux exigences croissantes de sécurité, durabilité, légèreté et efficacité énergétique. La figure I.7 illustre le train conçu et produit par HITACHI, qui est constitué de profilés d'aluminium soudés par FSW sur toute sa longueur.

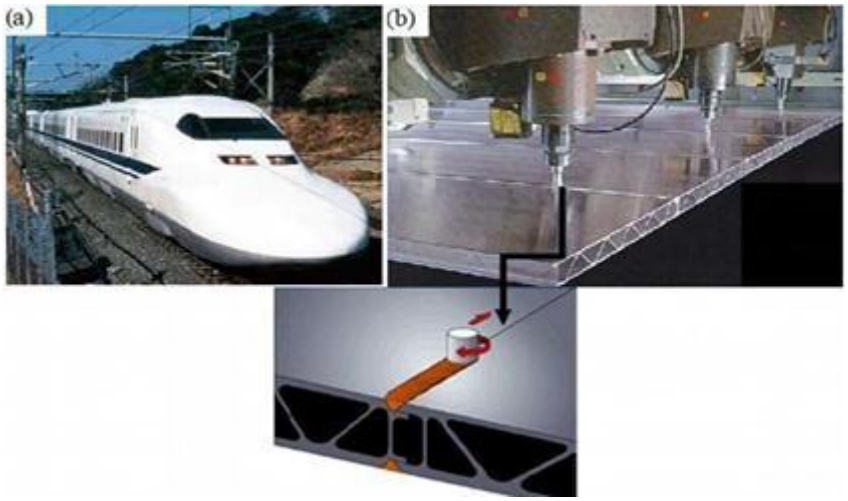


Figure I.7 : Soudage des profilés du train Hitachi

I.3.3 Domaine Automobile

De nombreux grands fabricants de voitures ont opté pour la technique de soudage par friction malaxage (FSW) afin d'optimiser l'union des pièces en aluminium dans leurs automobiles. BMW l'emploie spécifiquement pour l'assemblage de structures dans ses véhicules électriques et hybrides, alors que Ford l'a intégré dans la soudure de châssis et carrosseries légères, dans le but de diminuer le poids et d'accroître la solidité. Quant à Toyota, elle met en œuvre le FSW pour produire des réservoirs et des structures de sécurité, démontrant ainsi sa capacité à satisfaire les standards de robustesse et de fiabilité, Mazda favorise cette méthode pour l'assemblage des panneaux de carrosserie en aluminium, assurant des soudures esthétiques et robustes. Tesla, leader en matière de voitures électriques, fait appel au FSW pour souder les boîtiers de batteries et les structures internes, un procédé où la gestion thermique est cruciale. Honda utilise cette méthode pour fabriquer des éléments de suspension et des renforts de portes, favorisant la performance et la sécurité des automobiles. Finalement, Audi a adopté le FSW pour l'assemblage de longerons et traverses en aluminium, surtout dans ses modèles premium, en soulignant l'élégance, la légèreté et la précision.

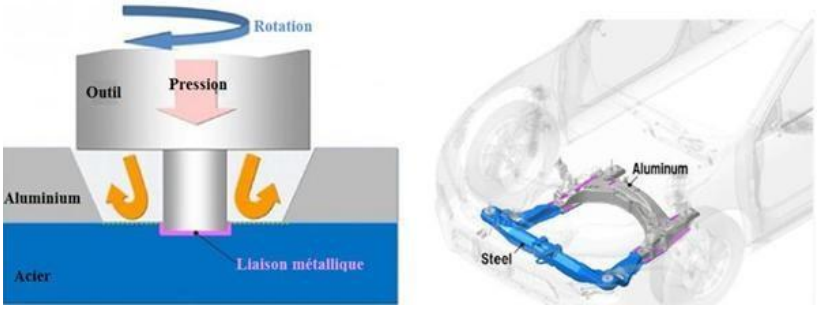


Figure I.8 : Utilisation du procédé FSW par honda[23]

I.3.4 Domaine Aéronautique

Dans le domaine aéronautique, le procédé de soudage par friction malaxage (FSW) est utilisé par des entreprises comme Airbus pour des applications industrielles majeures. Par exemple, Airbus a mis en œuvre cette technologie dans la production du plancher de l'avion militaire A400M et pour l'assemblage des panneaux longitudinaux des modèles A340 et A350, démontrant son efficacité dans la construction de structures complexes en aluminium. Quant à Eclipse Aviation, elle a tiré parti des bénéfices du FSW pour le modèle Eclipse 500, substituant plus de 7000 rivets par des soudures par friction malaxage. Cette méthode a facilité la simplification de la structure tout en garantissant une supériorité mécanique et une diminution des points de fragilité habituellement reliés au rivetage.

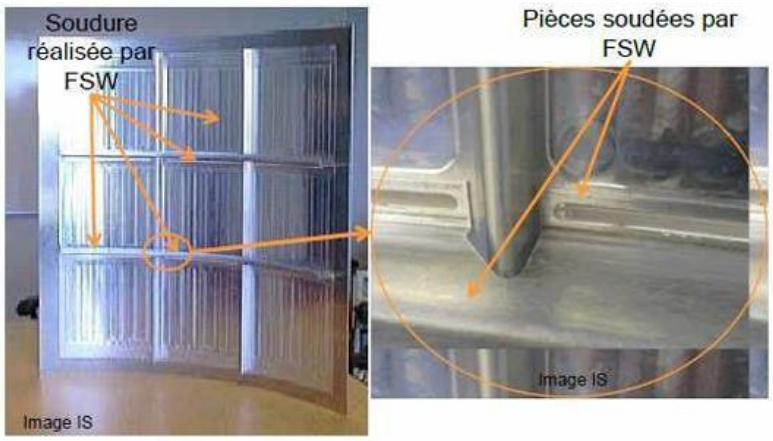


Figure I.9 : Voilure d'avion soudée par FSW [2]

I.3.5 Domaine Navales

Le FSW contribue aussi à la diminution du poids total des structures, ce qui améliore l'efficacité énergétique des navires contemporains. On l'utilise principalement pour l'assemblage de coques de navires, de ponts, de cloisons et de réservoirs cryogéniques destinés au transport de gaz liquéfiés. Des sociétés expertes comme TRA-C Industrie et Stirweld assistent les chantiers navals

dans l'implémentation de cette technologie, en fournissant des équipements sur mesure et des formations techniques.



Figure I.10 : **a)** Bateau en aluminium construit en utilisant FSW
b) Panneaux préfabriqués destine au pont du bateau de croisière [9]

I.3.6 Domaine du Nucléaire

Des recherches approfondies étudient le soudage par FSW d'un couvercle pour conteneurs en cuivre destiné à l'enfouissement des déchets nucléaires. Le projet de la Société Suédoise du Combustible Nucléaire et de la Gestion des Déchets (SKB), lancé dès 1978, a évolué pour inclure une collaboration avec TWI en 1997 axée sur le FSW du cuivre [24] dans le cadre du développement des conteneurs pour les déchets de combustible nucléaire. Ce contenant métallique est créé par le soudage d'un couvercle, et potentiellement d'un fond, à un cylindre. Cette technique d'assemblage est réalisée grâce à une opération d'extrusion qui met en action l'outil rotatif lorsqu'il est poussé vers l'avant par deux parties destinées à être jointes ensemble.

I.3.7 Autres Domaines

Il y a plusieurs autres domaines d'application de FSW tel que : le soudage des supports de lumières, l'assemblage de tôles en CU-OF en génie électrique, ainsi que des éléments de générations comme illustré en, figure I-11 [5].



Figure I.11 : a) Des supports de lumières,
b) : Des tôles en CU-OF,
c) : Des éléments de générations [19]

I.4 LIMITE ET AVANTAGE DU FSW

Une étude approfondie des avantages et des limitations de la technique FSW permet une évaluation précise de ses potentialités techniques et des environnements industriels les plus adaptés à son application.

I.4.1 Avantages du FSW

- **Bénéfices techniques**

Soudage en phase solide : supprime les imperfections associées à la solidification comme la fissuration lors du refroidissement et la porosité.

Minime déformation : même sur de grandes longueurs, grâce à une température maximale abaissée et un temps de soudage limité.

Zone thermiquement affectée (ZAT) étroite : meilleure conservation des caractéristiques des matériaux.

Capacité de soudabilité des alliages complexes : autorise le soudage efficace d'alliages qui sont habituellement difficiles à souder par fusion, tels que les séries 2xxx et 7xxx.

Assemblages hétérogènes : capacité à unir des matériaux différents tels que l'aluminium et le cuivre ou l'aluminium et l'acier.

Uniformité chimique du joint : le cordon de soudure est uniquement constitué du matériau de base, ce qui renforce la résistance à la corrosion.

Haute reproductibilité : méthode automatisée assurant une qualité constante.

Compatibilité avec des pièces de sections variables : faisable à condition de prendre certaines précautions.

- **Mise en œuvre simple et efficace**

Méthode propre : sans émissions de fumées, radions, éclaboussures ni décapage chimique. **Sans consommables** : aucun métal additionnel, aucun gaz de protection, outil non périssable. **Formation minimale** : aucune préparation spécifique des pièces n'est requise. **Nul besoin de main-d'œuvre hautement spécialisée** : cela facilite son insertion dans divers contextes de production.

- **Avantages financiers**

Rapidité de soudage importante : pouvant atteindre jusqu'à 2 mètres par minute en fonction des matériaux et des épaisseurs.

Diminution des dépenses : gain de temps, d'éléments et de travail. Aucun usinage post-soudure nécessaire (dans certains cas, selon les spécifications du cahier des charges).

Durabilité et entretien minimal : des joints robustes et fiables.

- **Avantages environnementaux**

Protection de l'environnement : absence de gaz nuisibles, de radiations ou de résidus métallurgiques.

Méthode silencieuse et sans émissions polluantes : conforme à des normes écologiques rigoureuses.

I.4.2 Limites du FSW

Bien que le procédé FSW offre de nombreux bénéfices, il comporte des contraintes techniques et économiques qu'il faut considérer lors de son intégration dans l'industrie.

- **Contraintes techniques**

Cette technique est principalement conçue pour les matériaux à faible point de fusion tels que l'aluminium, le cuivre et le magnésium, du fait de la longévité restreinte des outils sur des matières plus robustes.

Une défaillance de pénétration peut se produire à l'emplacement de la racine du joint, ce qui est difficile à repérer avec les méthodes traditionnelles de contrôle non destructif (CND), et pourrait engendrer des fissures dues à la fatigue.

Le FSW ne permet pas l'insertion de métal d'apport, ce qui restreint le contrôle de la composition chimique dans la zone de jointure.

- **Conditions géométriques et mécaniques**

Pour assurer un chauffage et une friction uniformes, il est crucial que les pièces à souder soient alignées avec précision.

Il est primordial de préparer minutieusement les surfaces, notamment en retirant les bavures mécaniques.

Il faut maintenir fermement les pièces durant le soudage, ce qui exige un outillage à la fois sophistiqué et solide.

Parfois, les configurations géométriques peuvent être restreintes à cause de l'espace occupé par la tête de soudage et le système de fixation.

Pour faire face aux efforts verticaux provoqués par l'outil, il est indispensable de fixer un support solide à l'arrière des pièces (plaque ou enclume).

Selon la géométrie de l'outil et la méthode employée, il est possible qu'un trou résiduel se forme à l'extrémité de la soudure.

- **Limitations économiques et réglementaires**

Le coût d'investissement est relativement élevé, incluant l'achat de machines spécialisées, l'outillage de bridage, ainsi que les licences et royalties liées aux brevets du procédé.

Le procédé nécessite des conditions de mise en œuvre strictes, ce qui peut limiter son application dans des environnements contraints ou à géométrie complexe.

I.5 FACTEURS ASSOCIÉ AU SOUDAGE PAR FRICTION-MALAXAGE

La qualité d'un joint formé par le soudage par friction malaxage (FSW) est fortement liée à l'apport de chaleur et au niveau de déformation généré dans la zone de liaison. Divers éléments impactent directement ces facteurs thermomécaniques, y compris la fréquence de rotation de l'outil, sa vitesse de progression le long du joint, l'angle d'inclinaison, et aussi la force appliquée lors de l'immersion dans le matériau à unir. [27]

Un contrôle strict de ces paramètres offre la possibilité de réguler la microstructure et la dureté du joint soudé, ce qui a un impact significatif sur ses caractéristiques mécaniques, comme la résistance à l'étirement et le comportement face à la fatigue. Ces caractéristiques découlent directement du cycle thermomécanique appliqué au matériau durant le processus de soudage.

De plus, la mise en place idéale du processus est conditionnée par divers éléments : la forme de l'outil, le type de matériaux à souder, l'épaisseur des pièces, ainsi que la disposition de l'assemblage (soudage bout à bout, par superposition, etc.) [28]. Un mélange approprié de ces paramètres est essentiel pour produire un flux adéquat de chaleur et de matière, assurant ainsi la performance structurelle du joint.

Plusieurs recherches ont été effectuées pour déterminer les meilleures combinaisons de paramètres, selon les conditions de soudage et les besoins particuliers de chaque application industrielle [29,30].

I.5.1 L'outil de soudage

Le dispositif de soudage par friction malaxage (FSW) est constitué de trois éléments principaux qui contribuent ensemble à produire la chaleur, à malaxer le matériau et à créer le joint soudé. De plus, sa configuration a un impact direct sur les propriétés dimensionnelles et l'efficacité des joints.

Le corps : Fournit un soutien structurel à l'outil dans son ensemble et facilite sa fixation sur la broche de l'appareil, Il assure la transmission des efforts et des mouvements de rotation. le corps de l'outil peut contenir des formes géométriques très variées, telles que les gorges [31].

Le pion : Cœur de l'instrument, il s'immerge dans la matière à souder et engendre sa déformation plastique par effet de cisaillement. Le flux de matière et la qualité du malaxage sont fortement influencés par sa géométrie (cylindrique, conique, filetée, etc.).

L'épaulement. : Partie supérieure en contact avec la surface des pièces, elle produit de la chaleur par frottement et aide à l'encerclement du matériau autour du pion. Sa forme (lisse, rainurée, spiralée) joue un rôle dans la régularité du cordon et l'état de surface final.

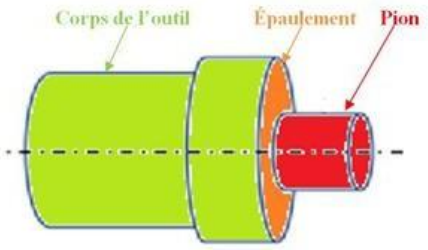


Figure I.12 : Présentation des éléments d'outil FSW

I.5.1.1 Différents types de l'outil de soudage

Les divers outils se caractérisent par la forme du pion (fileté, cylindrique, conique, carré...) et le modèle de l'épaulement (lisse, rainuré, spiralé, concave). Chacun de ces éléments a un impact sur la performance du malaxage, le dégagement thermique, le mouvement des matériaux et l'aspect final du cordon de soudure. Il existe principalement **trois configurations d'outil** qui répondent à des besoins spécifiques selon les matériaux, les géométries de pièces et les exigences de soudage :

- **L'outil conventionnel,**
- **L'outil à pion rétractables,**
- **L'outil double épaulement.**

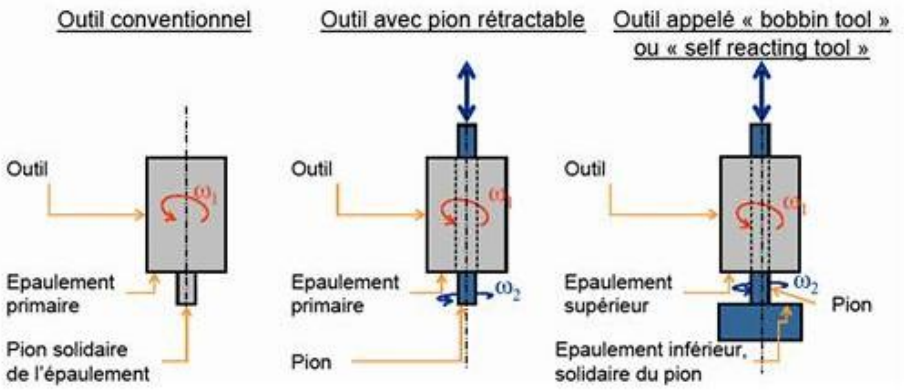


Figure I.13 : Les différents types d'outil FSW [32].

I.5.1.1.1 ***L'outil conventionnel***

La figure I.14 illustre un instrument de soudage par friction malaxage (FSW) monobloc, où le pion et l'épaulement sont unis et ne montrent aucun déplacement relatif pendant le processus. Cet appareil opère grâce à une pression et un frottement appliqué par l'épaulement uniquement sur un seul côté de la pièce à souder. En raison de sa simplicité, cette configuration est la plus fréquemment employée dans les applications classiques, en particulier pour les soudures linéaires ou ouvertes, où les critères de qualité du cordon et de complexité géométrique restent modérés.



Figure I.14 : Outil conventionnel [33].

I.5.1.1.2 ***L'outil a pion rétractable***

L'outil à pion rétractable constitue une évolution technologique du FSW, conçu pour éliminer le trou de sortie laissé par les outils classiques à pion fixe. Dans cette configuration, le pion est mobile et peut se rétracter progressivement à la fin du soudage, permettant ainsi de refermer la soudure sans laisser de vide, ce qui est particulièrement crucial pour les applications nécessitant une étanchéité parfaite ou une résistance élevée à la fatigue, comme les réservoirs cryogéniques ou les structures aéronautiques circulaires [34].

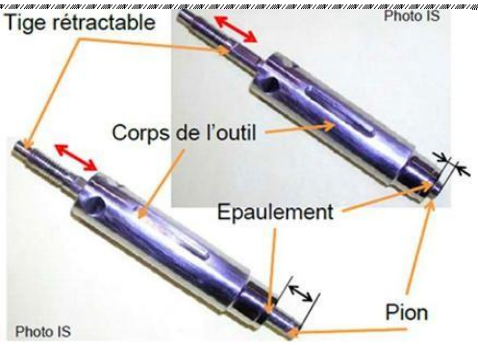


Figure I.15 : Outil a pion rétractable [18].

I.5.1.1.3 L'outil à double épaulement

L'outil à double épaulement, utilisé dans le processus de soudage par friction malaxage (FSW), se caractérise par une conception spécifique qui comprend deux épaulements symétriques placés de chaque côté du joint à souder. À la différence de l'outil traditionnel qui agit uniquement sur une face du matériau par le biais de mécanismes thermiques et mécaniques, cette disposition offre un réchauffement bilatéral et un malaxage simultané des deux faces opposées. Cette double implication encourage une répartition thermique plus homogène sur la zone de soudure, diminuant les gradients de température susceptibles d'affecter la microstructure du joint.

Les épaulements symétriques retiennent efficacement le matériau durant l'opération de soudage, réduisant ainsi les projections et garantissant un profil de soudure uniforme [35].

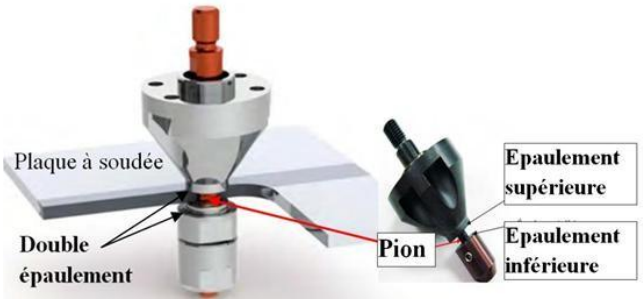


Figure I.16 : Outil a doubles épaulements [36].

I.5.1.2 Rôle des composants géométriques de l'outil FSW

La géométrie de l'outil de soudage par friction malaxage (FSW) constitue un paramètre déterminant dans la maîtrise du procédé et la qualité du joint obtenu. En effet, les formes de l'épaulement et du pion influencent directement le flux de matière [10].

I.5.1.2.1 L'épaulement

L'épaulement de l'outil joue un rôle essentiel dans le déroulement et la qualité du soudage. En contact direct avec la surface des pièces à assembler, l'épaulement exerce une pression

constante qui permet, d'une part, de générer de la chaleur par frottement [37], et d'autre part, de confiner efficacement la matière plastifiée en dessous de l'outil. Cette action de forgeage assure la formation du joint soudé par déformation plastique contrôlée.

La fin de la phase de pénétration est généralement définie par le contact de l'épaulement avec la surface supérieure des pièces. Ce point marque le début de la phase de soudage active, où le matériau est malaxé sous l'effet combiné du pion rotatif et de la pression exercée par l'épaulement.

La taille relative de l'épaulement par rapport au pion est un paramètre critique : il est recommandé que le diamètre de l'épaulement soit cinq fois supérieur à celui du pion afin d'optimiser l'efficacité du frottement. Cette dimension influence directement la quantité de chaleur générée, qui à son tour affecte la microstructure du joint. En particulier, la zone affectée thermiquement (ZAT) est souvent le siège d'un adoucissement qui se traduit par une réduction de dureté. Cet effet thermique, produit principalement par le frottement entre l'épaulement et la pièce [38]

Pour améliorer les fonctions thermiques et mécaniques de l'épaulement, plusieurs formes géométriques ont été développées, selon la configuration du soudage et les propriétés recherchées. Mishra et Ma [39] ont souligné que les épaulements concaves, combinés à des pions cylindriques filetés, permettent un meilleur malaxage du matériau tout en réduisant les bavures et débordements. De même, Scialpi et al. [40], dans leur étude sur le soudage de l'alliage AA6082-T6, ont comparé différentes géométries d'épaulement, montrant que les modèles spiraux filetés et à cavité filetée présentent les meilleures performances mécaniques. Enfin, une étude comparative sur l'alliage AA6061-T6 [41] a révélé que le profil cylindrique simple du pion offre une solidité supérieure par rapport à des profils plus complexes (conique, carré, fileté).

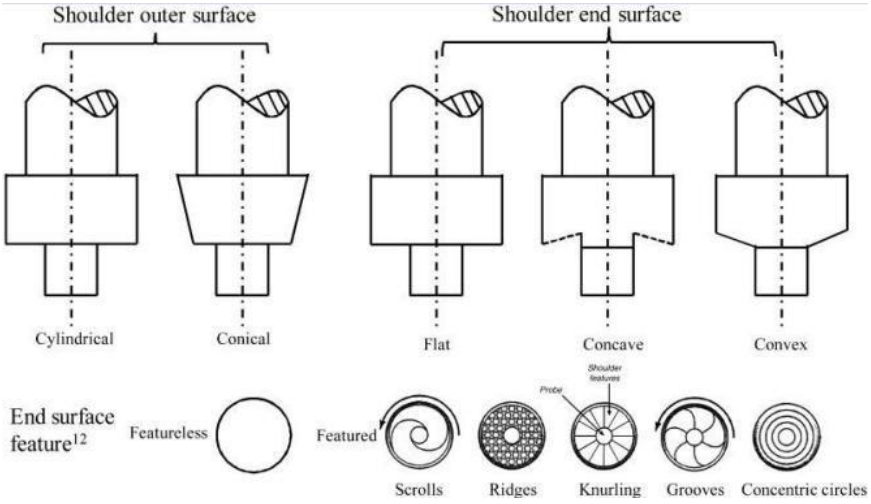


Figure I.17 : Différentes formes d'épaulement de l'outil FSW [42]

I.5.1.2.2 ***Le pion***

Dans la méthode de soudage par friction malaxage (FSW), le pion joue un rôle central en étant l'élément responsable de la déformation plastique du matériau, garantissant ainsi un malaxage efficace des pièces à joindre. Son design géométrique a pour but d'optimiser le flux de matière tout en minimisant les contraintes mécaniques imposées à l'instrument. Il est impératif que la longueur du pion soit en adéquation avec l'épaisseur des pièces à souder : un réglage précis prévient tout défaut d'insuffisance de pénétration, assurant ainsi une soudure sur toute la largeur du joint [31].

Le pion exerce simultanément deux fonctions principales : il génère de la chaleur par frottement et cisaillement, et il malaxe le matériau pour créer une liaison métallurgique homogène [43]. Sa forme et sa taille ont une influence directe sur le flux de matière, la formation de la microstructure, et les propriétés mécaniques du joint soudé. À ce titre, Ahmed et al. ont démontré que l'utilisation d'une goupille filetée à section carrée permet d'atteindre une efficacité mécanique de 94 %, soulignant la performance remarquable du joint FSW.[44]

Par ailleurs, une étude comparative menée par Jafar et al. sur différentes géométries — conique, cylindrique, et conique filetée — a révélé que la goupille conique filetée offre la résistance en traction la plus élevée, notamment dans le cas des alliages d'aluminium. Cette supériorité est attribuée à un brassage plus intense et plus homogène du matériau, favorisé par le profil hélicoïdal du pion. [45]

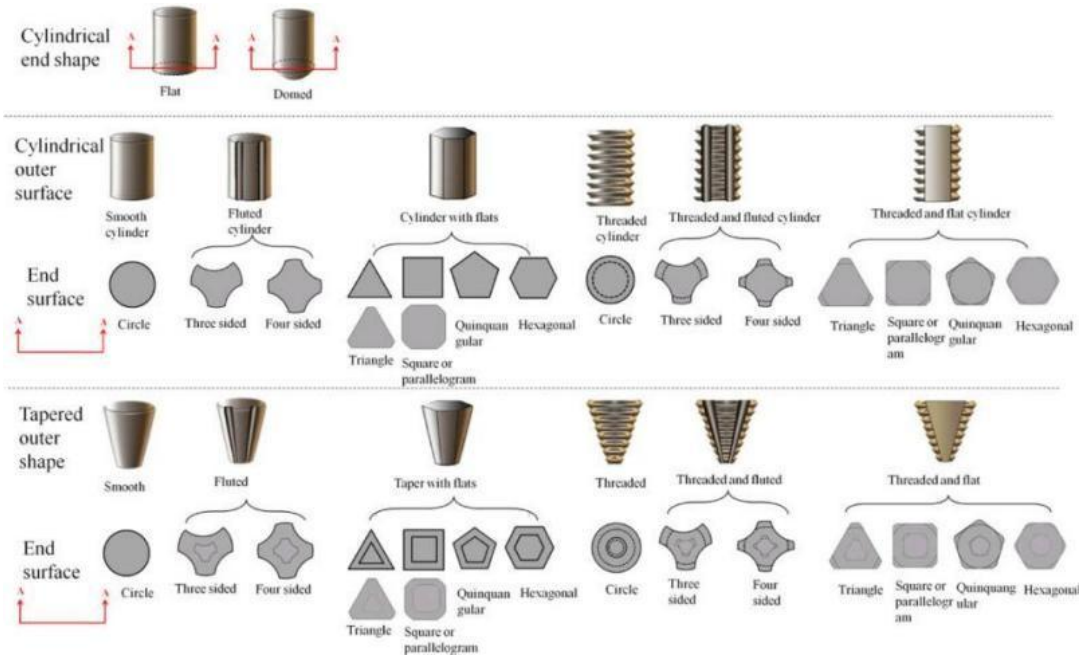


Figure I.18 : Différentes formes de pion de l'outil FSW. [31]

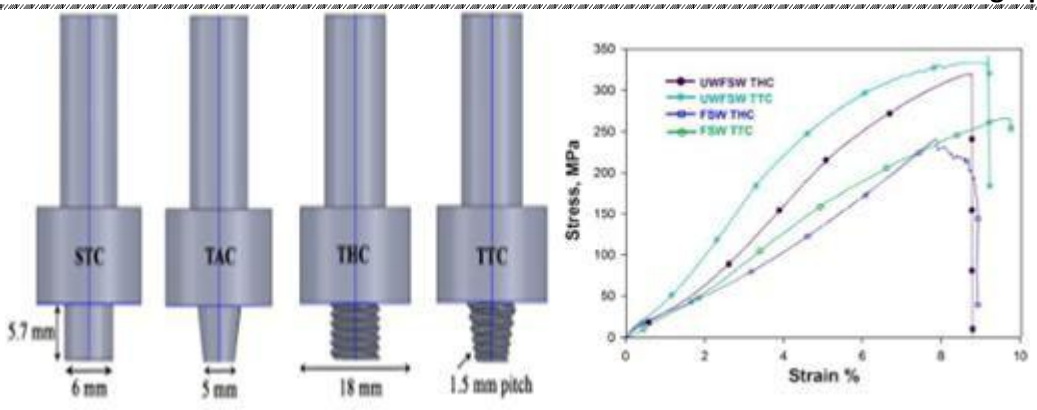


Figure I.19 : Effets de la géométrie du pion sur la résistance mécanique. [46]

I.5.1.3 Matériaux d'outil

La sélection du matériau de l'outil FSW est critique pour le succès du processus, étant donné que l'outil est exposé à des contraintes thermomécaniques importantes durant toute la procédure. En cours d'utilisation, la température de l'instrument peut grimper à 300 à 400 °C, voire plus en fonction des matériaux à souder et des paramètres opérationnels [47] . Il est donc essentiel que le matériau employé ait une forte résistance thermique, une excellente durabilité à l'abrasion, et qu'il conserve ses dimensions pour prévenir toute déformation ou modification géométrique pouvant nuire à la qualité de la soudure [48].

Le maintien de la stabilité géométrique de l'outil sur des durées prolongées de soudage est essentiel pour limiter les défauts de qualité, tels que les bavures, les cavités ou les défauts de pénétration. Le tableau I.2 présente une synthèse des matériaux d'outils en fonction des matériaux à souder et des épaisseurs correspondantes.

Tableau I.3 : Synthèse des différents matériaux d'outil couramment utilisés [48].

Alliage	Épaisseur	Matériau de l'outil
Alliages d'aluminium	< 12 mm	Acier à outil, WC-Co
	< 26 mm	MP 159
Alliage de Magnésium	< 6 mm	Acier à outil, WC
Cuivre et ses alliages	< 50 mm	Alliage de nickel, PCBN* Alliage de tungstène
	< 11 mm	Acier à outil
Alliage de titane	< 6 mm	Alliage de tungstène
Acier Inoxydable	< 6 mm	PCBN*, alliage de tungstène
Acier faiblement allié	< 10 mm	WC, PCBN*
Alliage de Nickel	< 6 mm	PCBN*, alliage de tungstène

I.5.2 Paramètres opératoire majeurs

Bien que la géométrie de l'outil (épaulement et pion) soit un paramètre fondamental dans le procédé de soudage par friction malaxage (FSW), la qualité du joint soudé dépend également d'un ensemble de paramètres opératoires qui influencent directement la microstructure, la compacité et les propriétés mécaniques du cordon. Parmi ces paramètres, on distingue :

I.5.2.1 Vitesse de rotation

En soudage par friction-malaxage (FSW), le malaxage du matériau ainsi que la génération de la chaleur nécessaire au procédé sont assurés par la combinaison du mouvement de rotation de l'outil et de sa vitesse d'avance. Il est donc essentiel de bien choisir la vitesse de rotation de l'outil, car celle-ci joue un rôle clé dans la qualité du joint soudé.

La vitesse de rotation peut varier sur une large plage, selon la nuance des matériaux à souder. Cependant, elle est également limitée par les caractéristiques techniques de la machine utilisée. À paramètres de soudage constants, une augmentation de la vitesse de rotation entraîne généralement une élévation de la température dans la zone de soudure [49]. Tang et al. [50] expliquent ce phénomène par une relation proportionnelle entre la vitesse de rotation et la température générée, mais uniquement jusqu'à un seuil critique. Au-delà de ce seuil, l'augmentation de la température provoque un adoucissement du matériau, ce qui réduit le couple de soudage et la contrainte d'écoulement, empêchant toute augmentation supplémentaire de la puissance.

La vitesse de rotation correspond à la vitesse angulaire de l'outil, tandis que la vitesse d'avance désigne sa vitesse de déplacement le long du joint à souder. Leur combinaison assure non seulement le malaxage du matériau mais également la génération de chaleur. Ces paramètres dépendent à la fois de la nature de l'alliage à assembler et des dimensions des pièces à souder.

Mishra et al. [39] soulignent que la vitesse de rotation et la vitesse d'avance de l'outil sont des paramètres cruciaux influençant la qualité des joints FSW. Une rotation plus rapide de l'outil accroît le coefficient de frottement entre celui-ci et le matériau, ce qui augmente la quantité de chaleur générée. Inversement, une diminution de la vitesse de rotation réduit le frottement, ce qui diminue à la fois la chaleur produite et la quantité de métal malaxé [51].

Di Bella et al, [52] ont révélé que des vitesses de rotation plus faibles (500 tr/min) lors du soudage par friction-malaxage produisaient des propriétés mécaniques supérieures dans les joints en T, tandis que des vitesses plus élevées (700 et 900 tr/min) entraînaient des défauts tels que des trous de ver, compromettant ainsi la qualité et les performances des joints.

Enfin, selon Watanabe et al. [53], une vitesse de rotation optimale permet d'obtenir une microstructure plus fine et une dureté accrue du joint, ce qui améliore les propriétés mécaniques de la soudure.

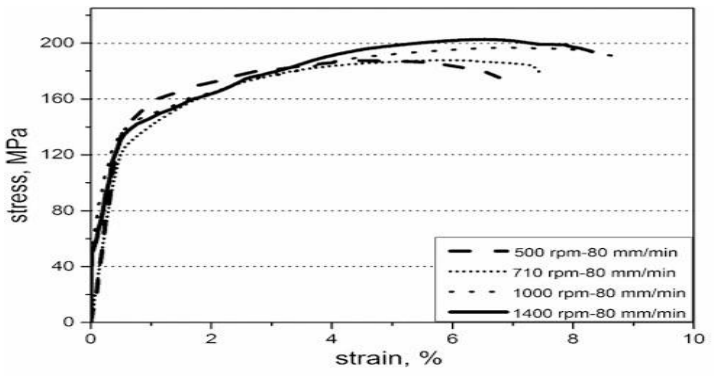


Figure I.20 : Contrainte et déformation des enchantions soudées par différent vitesses de rotation [54].

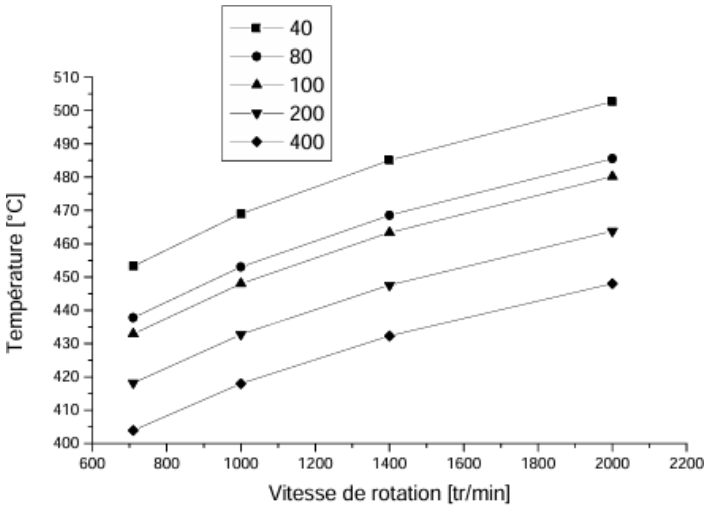


Figure I.21 : Effet de la vitesse de rotation sur la température [55],

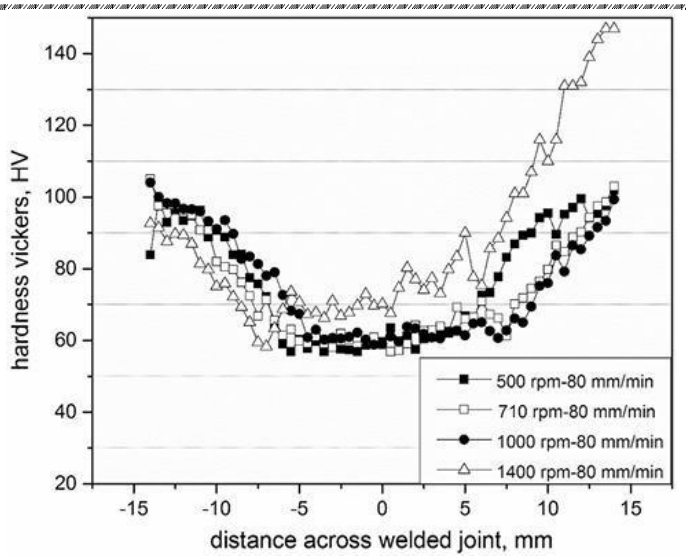


Figure I.22 : Effet de la vitesse de rotation sur la dureté [54].

I.5.2.2 Vitesse d'avance

La vitesse d'avance de l'outil détermine le temps d'exposition thermique du matériau à souder. Une vitesse trop élevée peut entraîner un malaxage insuffisant, compromettant la qualité de la liaison, tandis qu'une vitesse trop faible peut générer une zone affectée thermiquement (ZAT) excessivement large, susceptible d'altérer les propriétés mécaniques du joint. En effet, le champ de température, généré par une source de chaleur mobile, affecte profondément les cycles thermiques de soudage et les phénomènes métallurgiques tels que la restauration, la recristallisation et la précipitation [56].

L'ajustement de la vitesse de soudage doit donc être réalisé en fonction des caractéristiques thermomécaniques du matériau principal, afin d'éviter une surchauffe locale ou une usure prématurée de l'outil. Des études récentes ont mis en évidence l'impact significatif de ce paramètre sur la performance du joint. Liu et al. [57] ont montré qu'une augmentation de la vitesse d'avance améliore la résistance mécanique et la déformation à la rupture, traduisant une meilleure compaction du matériau.

Par ailleurs, plusieurs travaux expérimentaux et numériques ont souligné que la vitesse d'avance influence plus fortement la microstructure du joint que la vitesse de rotation de l'outil [58, 59]. Cette observation s'explique par le fait que la vitesse d'avance conditionne le temps de séjour thermique et le degré de plastification du matériau, deux facteurs clés dans la formation d'une microstructure fine et homogène.

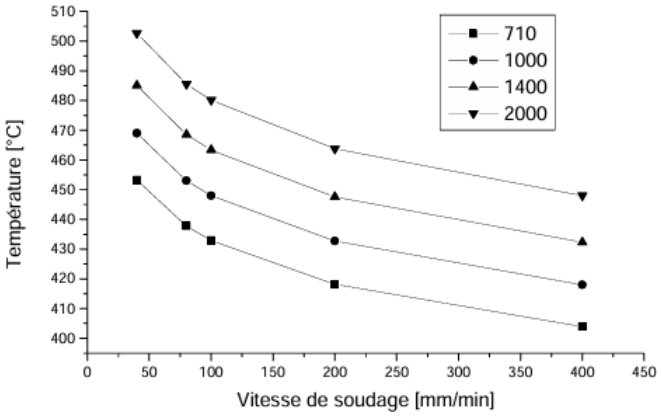


Figure I.23 : Effet de la vitesse de soudage sur la température [55]

I.5.2.3 L'effort de l'outil

L'effort axial, qui est défini comme la force appliquée de manière perpendiculaire à la surface des pièces à joindre, influe sur plusieurs éléments du processus :

Pénétration et malaxage du matériau : Une pression axiale appropriée permet au poinçon de l'outil d'entrer efficacement dans le matériau, garantissant un mélange uniforme et une consolidation idéale de la matière plastifiée.

Stabilité du procédé : Il est crucial de préserver une pression axiale constante pour prévenir les variations du processus, notamment les erreurs de trajectoire ou les altérations de profondeur de pénétration, susceptibles d'affecter la solidité du joint.

Transformations métallurgiques : L'action axiale a une incidence indirecte sur les cycles thermiques du soudage, ce qui influence les processus de recristallisation, de restauration et de précipitation dans la zone touchée thermiquement (ZAT). En revanche, un mauvais réglage peut entraîner des défauts typiques tels que des cavités internes, des fissures, ou un effondrement du noyau.

Certains chercheurs ont établi que le préchauffage de la pièce à souder diminue l'effet axial lors du soudage par friction. Par exemple, lors d'un processus FSW traditionnel, une force de 20 kN est nécessaire pour souder un échantillon d'alliage AA 5052 de 5 mm d'épaisseur à 400 tours/minute et 600 mm/minute. Toutefois, si l'on utilise le chauffage par résistance, cette force descend à 5 kN. Le schéma opérationnel de cette technique est représenté dans la figure 24 [60].

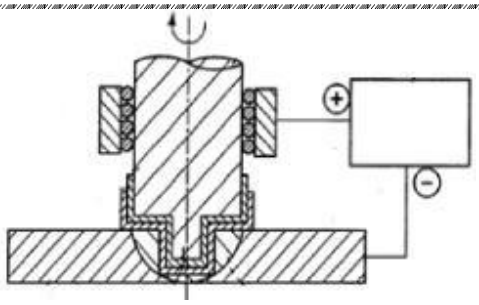


Figure I.24 : Schéma de la méthode de préchauffage par résistance [60].

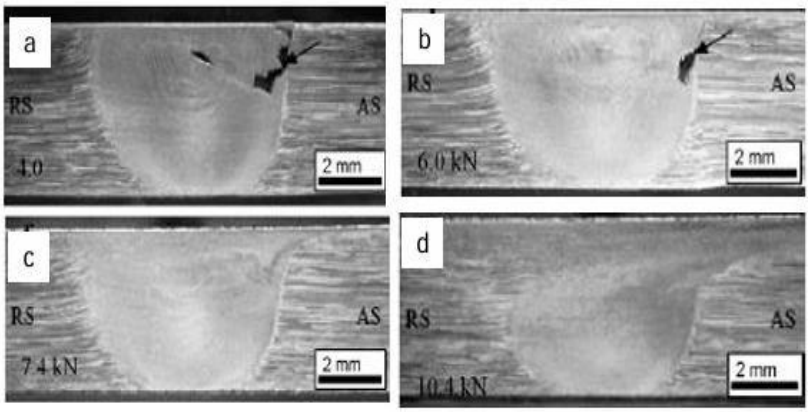


Figure I.25 : État du joint SFM en force mesurée (a) 4 kN, (b) 6 kN, (c) 7,4 kN et (d) 10,4 kN [61].

I.5.2.4 Angle d'inclinaison de l'outil

L'angle d'inclinaison de l'outil constitue un paramètre critique, généralement sélectionné dans une plage de 0° à 4°, orienté dans le sens de la direction de soudage. Ce réglage influence directement le flux de matière, la compaction du joint, ainsi que la formation des défauts internes.

Les travaux de Chen et al. [62] ont permis d'analyser systématiquement les mécanismes de formation des défauts en fonction de cet angle :

À 1°, une anomalie de type tunnel est observée en surface du côté avance, traduisant un malaxage insuffisant, figure I.25 a.

À 1,5°, le défaut tunnel persiste mais devient visible en coupe transversale, toujours du côté avance, figure I.26 b.

Lorsque l'angle atteint 3,5°, la microstructure devient dense et homogène, avec apparition des anneaux concentriques caractéristiques du FSW, appelés onion rings, figure I.26c.

En revanche, un angle trop élevé, tel que 4,5°, induit une cavité interne dans le noyau de la soudure, cette fois du côté recul, figure I.26 d.

Ces observations montrent que l'optimisation de l'angle d'inclinaison est essentielle pour éviter les défauts de type tunnel, favoriser le brassage du matériau, et garantir la qualité structurale du joint soudé.

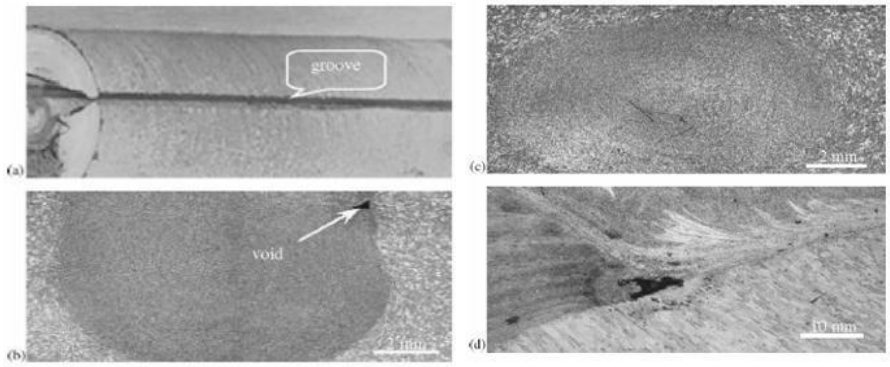


Figure I.26 : Effet de l'inclinaison de l'outil par rapport à la surface du joint. AA5456 de 4 mm d'épaisseur. (a) La surface du joint soudé à une inclinaison de l'outil de 1°, (b), (c) et (d) sont des coupes transversales des joints soudés lorsque l'inclinaison de l'outil est de 1,5°, 3,5° et 4,5° respectivement [62].

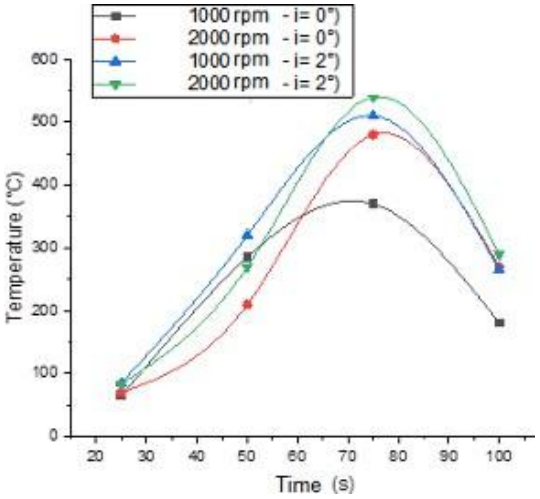


Figure I.27 : Effet de l'inclinaison de l'outil sur la température [63].

I.6 I-6 LES CONFIGURATIONS POSSIBLES PAR LE FSW

Le procédé du fsw présente une diversité de configurations d'assemblage, sélectionnées en fonction de la géométrie des pièces, des exigences mécaniques et des conditions opératoires.

Parmi les exigences fondamentales, on distingue :

Le bridage rigide des pièces à souder : Il est impératif d'empêcher tout mouvement relatif entre les éléments assemblés, sous l'effet des efforts axiaux et latéraux générés par l'outil rotatif. Un système de fixation robuste, figure I.28 est donc requis pour maintenir les pièces en position tout au long du cycle de soudage.

L'accessibilité au plan de joint : La configuration doit permettre à l'outil FSW d'atteindre directement la ligne d'assemblage, tout en offrant un espace suffisant pour que l'épaulement entre en contact avec la surface supérieure des pièces. Ce contact est essentiel pour assurer la génération de chaleur par friction et le confinement du matériau plastifié.

La présence d'une enclume ou support inférieur : Dans certaines configurations, notamment pour les pièces de faible rigidité ou les soudures en recouvrement, il est nécessaire de placer une enclume sous les pièces. Celle-ci permet de récupérer l'effort axial appliqué par l'outil, tout en limitant l'expulsion de matière vers le bas et en stabilisant la zone de soudage.

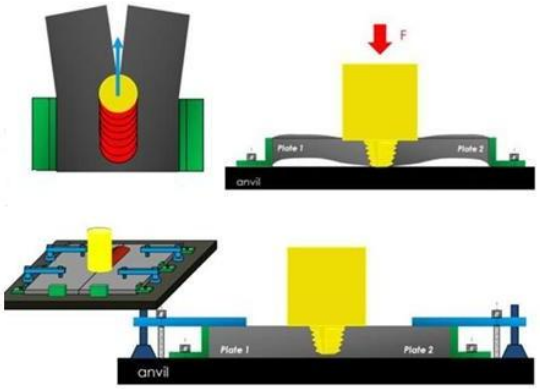


Figure I.28 : Schématisation d'un bridage dans le soudage **[**11].

La figure **I.29** présente les configurations offertes par le fsw :

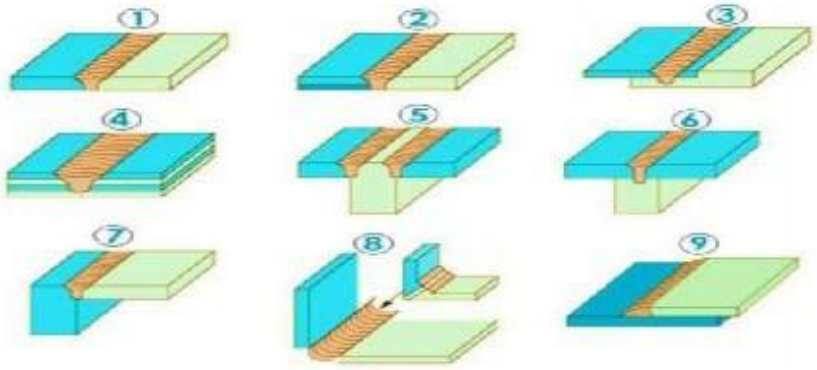


Figure I.29 : Configurations offertes par le fsw [22].

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

I.6.1 Le soudage bout à bout

Le procédé de friction malaxage (FSW) permet le soudage bout à bout, qui consiste à unir deux pièces métalliques en les disposant l'une contre l'autre, sur un même niveau, afin d'établir une ligne de joint homogène. Pour éviter tout déplacement relatif dû aux forces exercées par l'outil rotatif, les composants sont généralement fixés par un système de serrage mécanique. Ce dispositif autorise la soudure en ligne, spécialement conçue pour les tôles, profilés extrudés ou pièces planes.

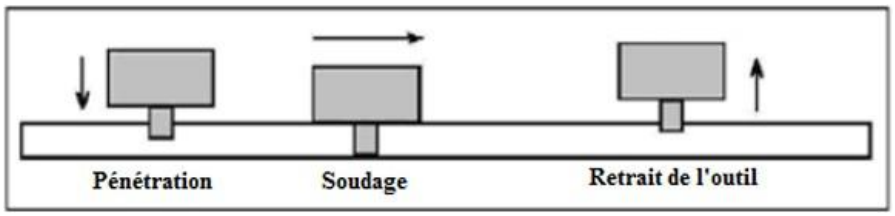


Figure I.30 : Soudage bout a bout [64]

I.7 PROPRIÉTÉS ET CARACTÉRISTIQUES DU JOINT FSW

Pendant le FSW, le matériau subit une intense déformation plastique et des températures élevées, entraînant une modification de la microstructure. Les caractéristiques du joint de soudure (telles que la résistance, la dureté, la texture cristalline...) sont fortement influencées par les paramètres de procédé.

I.7.1 Microstructure des joints soudés FSW

Durant le processus de soudage par friction malaxage (FSW), le matériau subit un gradient thermique et mécanique intense, ce qui entraîne une hétérogénéité microstructurale dans et autour de la zone de soudure [65]. Ce gradient engendre une progression graduelle des caractéristiques métallurgiques, particulièrement concernant la dimension des grains, la structure cristalline et le statut de précipitation. La communauté scientifique s'accorde sur la définition de quatre zones macroscopiques dans le joint FSW : la zone de malaxage (le noyau), la zone thermomécaniquement affectée (ZATM), la zone thermiquement affectée (ZAT) et le métal de base (MB).

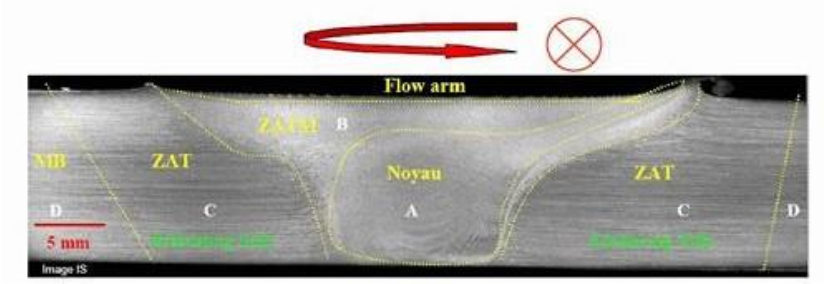


Figure I.31 : Microstructure de la zone soudée [18].

I.7.1.1 Les différentes zones du cordon

Noyau : La zone de mélange, également appelée SZ (Stir Zone), est le centre du joint qui a été soudé par friction malaxage. Elle se distingue par une recristallisation dynamique intégrale, due à une déformation plastique considérable et à des températures élevées, habituellement situées entre 400 et 500 °C pour les alliages d'aluminium [66]. Le diamètre de cette région dépasse légèrement celui du pion (ou broche) de l'instrument, tout en restant inférieur à celui de l'épaulement, ce qui témoigne de son placement central dans la procédure. L'aspect morphologique de cette zone est directement modifié par la configuration de l'outil et les paramètres de soudage [39]. Selon le type de matériau employé et les conditions de fonctionnement, la forme du noyau peut être modifiée : elle peut prendre une forme en cuvette ou en ellipsoïde, comme le montre la figure I.32. La microstructure qui en résulte est composée de grains fins et équiaxes, généralement compris entre 1 et 10 µm. Cette granulation homogène, associée à une texture cristallographique faible, confère à la zone une bonne isotropie mécanique.

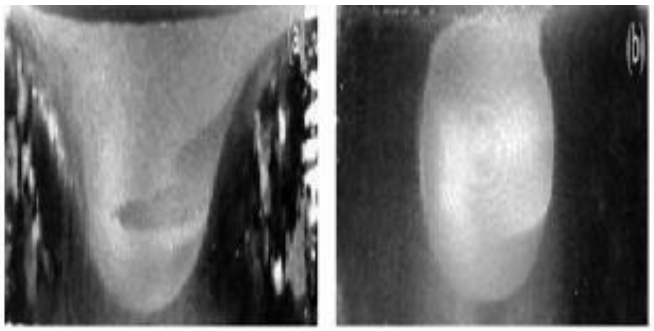


Figure I.32 : Formes du noyau : a) cuvette, b) ellipsoïde [39].

Zone Affectée thermo-mécaniquement : L'outil de la zone thermo-mécaniquement affectée (TMAZ) provoque une déformation plastique du matériau, tandis que la chaleur générée durant le processus influence également ses caractéristiques. Concernant l'aluminium, cette région peut subir des déformations plastiques importantes sans recristallisation. On observe

généralement une limite nette entre la zone recristallisée (noyau de soudure) et les zones déformées de la TMAZ [51].

Zone Affectée thermiquement : Dans la zone affectée thermiquement (ZAT), le matériau a été soumis à un cycle thermique entraînant une modification de sa microstructure et de ses propriétés mécaniques, sans toutefois présenter de déformation plastique. La zone affectée thermiquement (HAZ) est définie comme la région où la température dépasse 250°C dans les alliages d'aluminium traitables thermiquement [39]. La granulation y reste **proche de celle du métal de base**, avec des grains allongés ou polygonaux selon l'état initial du matériau. Bien que la taille des grains soit peu modifiée, des transformations dans les précipités durcissants peuvent survenir, affectant localement la dureté et la résistance mécanique. L'orientation cristallographique demeure globalement inchangée.

Matériau de Base : Le matériau de base n'a subi aucune déformation due au soudage, bien qu'il ait pu être exposé à un cycle thermique induit par ce procédé. Toutefois, ni sa microstructure ni ses caractéristiques mécaniques n'en sont altérées [67].

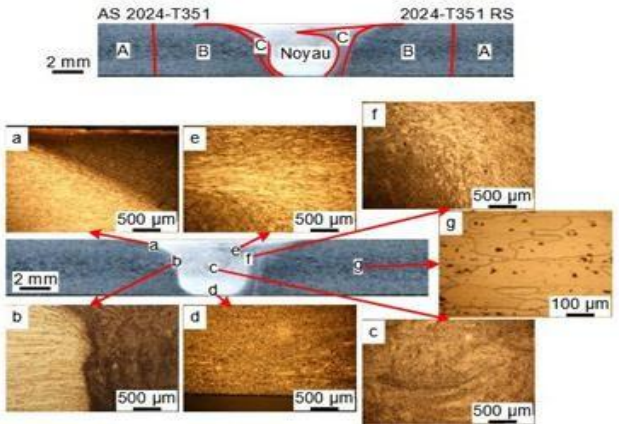


Figure I.33 : Macrographie d'une coupe transverse d'un joint FSW d'alliage 2024-T351 [68].

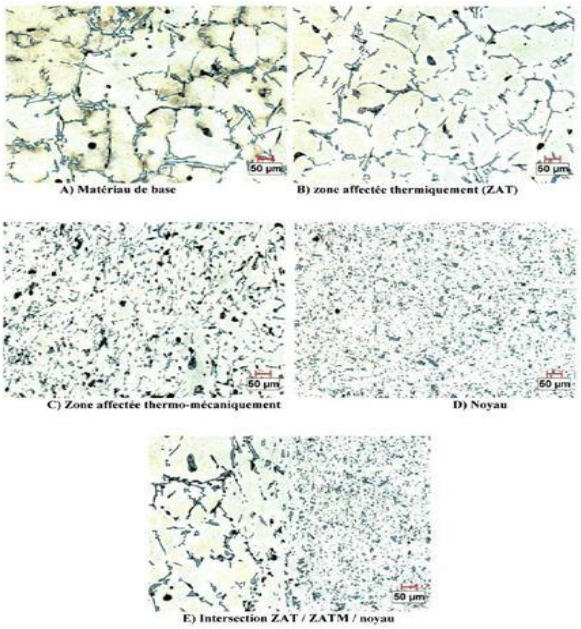


Figure I.34 : Microstructure du A356 après soudage par friction malaxage [69].

I.7.1.2 Propriétés mécaniques

Les joints soudés par FSW présentent des propriétés mécaniques intéressantes, mais peuvent être affectés par des défauts de cavité si les paramètres ne sont pas bien maîtrisés. Les essais de traction montrent que la résistance et la limite d'écoulement varient selon la vitesse de rotation et la vitesse d'avance. Par exemple, Elangovan et al. ont obtenu une efficacité de joint de 65 % avec un outil carré à 1200 rpm et 70 mm/min [70].

Comparé au soudage par fusion, le FSW conserve mieux les propriétés du métal de base. Une augmentation de la vitesse de soudage améliore la dureté du noyau et la résistance mécanique. Ces propriétés dépendent du matériau initial, du cycle thermomécanique et de sa réponse au traitement.

Des essais de traction et de fatigue sont nécessaires pour évaluer la durabilité du joint, accompagnés d'analyses fractographiques. Les études récentes montrent que les joints FSW peuvent atteindre jusqu'à 82 % de la résistance du métal de base, avec une excellente résistance à la fatigue et à la corrosion, à condition d'optimiser les paramètres de soudage.[71] [72]

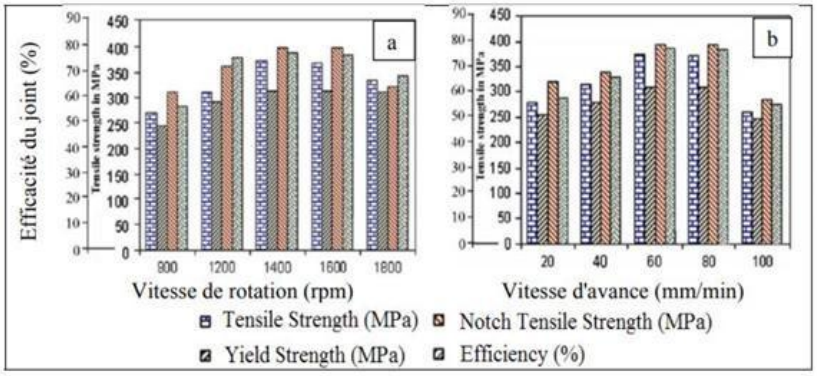


Figure I.35 : Résistance à la traction, limite d'écoulement et l'efficacité du joint correspondante pour l'alliage 7075-T6 en variant en (a) la vitesse de rotation et en (b) la vitesse d'avance. [70].

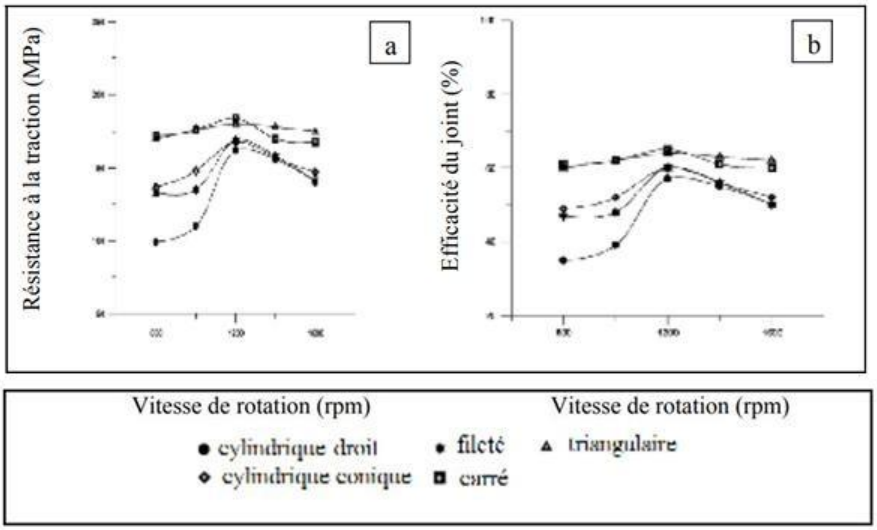


Figure I.36 : Résistance à la traction (a) et efficacité du joint (b) pour des soudures réalisées en alliage 6061-T6 avec des outils de différentes géométries en variant la vitesse de rotation. [70]

I.7.1.3 Dureté

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, série 5XXX, et ceux à durcissement structural, séries 2XXX, 6XXX et 7XXX (notation commercial). La microstructure est principalement influencée par le flux de chaleur apporté par frottement entre l'épaulement et la tôle, plutôt que par l'ensemble chaleur et déformation fournies par le pion. Pour les alliages à durcissement structural, série 2XXX, 6XXX et 7XXX, la dureté est minimale dans la zone soudée. Elle chute de façon significative dans le noyau et dans la ZATM [73]. La ZATM est marquée par la croissance ou la coalescence de la phase durcissante et cela, quel que soit l'alliage, dans la littérature on explique que c'est la compétition entre les processus de précipitation et de coalescence qui implique un minimum de dureté à la frontière ZATM – ZAT [39]. Pour le joint 2124 T3, la dureté chute dans la zone soudée et atteint un minimum à la limite ZAT – ZATM. Puis, près du noyau, l'écrouissage induit

par le soudage entraîne une remontée de la dureté. Le noyau présente une structure fine recristallisée ainsi qu'une diminution de la densité de dislocations.

De plus, les hautes températures atteintes durant le soudage entraînent la dissolution des précipités présents, ce qui permet, de retour à température ambiante, la formation de précipités durcissants. La ZATM présente un minimum de dureté. Dans la ZAT on note un pic de dureté dû à la formation de précipités durcissants [74]. Les mesures de dureté ont permis de caractériser les cinétiques de durcissement structural à l'aide d'un microduromètre, et afin de caractériser les propriétés plastiques de la microstructure, en termes notamment de limite d'élasticité et d'écrouissage par des essais de traction est primordial. -13- Les propriétés mécaniques de la zone soudée par FSW sont meilleures que celles des soudures avec fusion car elles gardent des propriétés relativement peu diminuées par rapport au métal de base [75, 76, 77]. L'augmentation des vitesses de soudage permet d'augmenter la dureté du noyau et d'améliorer les propriétés mécaniques [76].

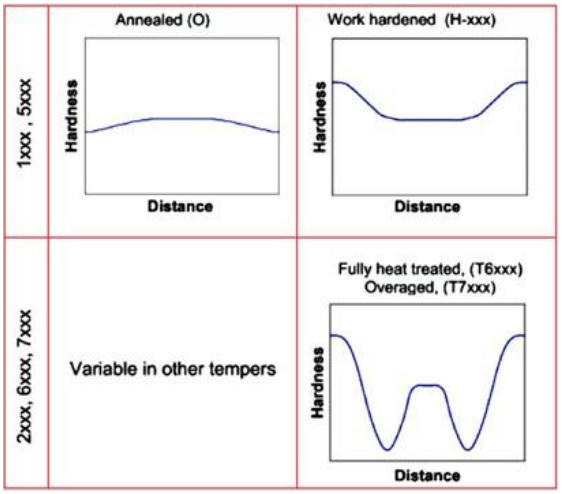


Figure I.37 : Courbes schématiques montrant le profil de dureté générique d'un joint FSW [78].

I.7.1.4 Rugosité

La rugosité de surface est une caractéristique micro-géométrique cruciale qui dénote la qualité du fini d'un joint de soudure. Dans le contexte du soudage par friction malaxage (FSW), la rugosité est directement affectée par les paramètres de procédé, tels que la vitesse de rotation, la vitesse d'avance, le design de l'outil et la force axiale mise en œuvre.

Des recherches récentes ont montré que des vitesses de rotation plus élevées tendent à réduire la rugosité de surface, en améliorant la plasticité du matériau et la fluidité du brassage. Par exemple, une augmentation de la vitesse de rotation de 600 à 1200 tr/min permet de diminuer les valeurs de rugosité moyenne Ra, améliorant ainsi la qualité de la surface obtenue [79] [80].

En revanche, l'effet de la vitesse d'avance est plus complexe. Une augmentation modérée peut initialement améliorer la qualité de surface, mais au-delà d'un certain seuil — comme 160

mm/min — elle peut entraîner une augmentation de la rugosité, en raison d'un temps de contact réduit entre l'outil et le matériau, limitant le malaxage efficace [79]. Ainsi, le choix de vitesses de soudage optimales est crucial pour maintenir des niveaux de rugosité faibles et garantir une finition régulière [81].

La rugosité obtenue par FSW est généralement inférieure à celle des procédés de soudage par fusion, grâce à l'absence de projections, de bavures et de défauts liés à la solidification. Elle se caractérise par des stries concentriques régulières (onion rings), témoins du brassage cyclique du matériau [81]. Ces surfaces lisses favorisent la résistance à la fatigue, la durabilité mécanique, et l'adhérence aux revêtements, ce qui rend le FSW particulièrement adapté aux applications industrielles exigeantes.

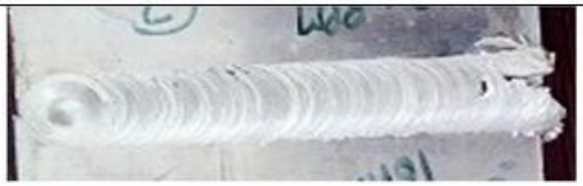
Welding Parameters	FSW using 20 mm Shoulder Diameter	Surface Roughness(in µm)
710 rpm 16 mm/min.		8.41
900 rpm 16 mm/min.		9.07
1120 rpm 16 mm/min.		7.58
1400 rpm 16 mm/min.		6.84

Figure I.38 : Effet de la vitesse de rotation sur la rugosité Ra [82].

I.7.1.5 Flux de chaleur lors du soudage par fsw

Le soudage par friction malaxage (FSW) se fonde sur la production de chaleur due à l'interaction de l'outil tournant — constitué de l'épaulement et du pion — avec les pièces à joindre. Cette température, associée à une déformation plastique considérable, entraîne un écoulement

viscoplastique du matériau, facilitant la création de la jointure sans nécessiter une étape de fusion. La microstructure, la dureté et les propriétés mécaniques du joint soudé évoluent sous l'influence déterminante du flux thermique généré.

D'après Boukraa et al c'est dans la zone de malaxage (noyau) que l'on atteint la température la plus élevée, avec des valeurs qui peuvent excéder 500 °C pour les alliages d'aluminium comme le 6061-T6. Cette température est essentiellement produite par le frottement de l'épaulement, alors que le pion participe davantage à la déformation mécanique du matériau [83].

L'écoulement de la chaleur est fortement influencé par les paramètres de soudage :

Un taux de rotation élevé génère plus de chaleur, ce qui stimule la recristallisation tout en présentant un risque de surchauffe.

Un déplacement trop rapide diminue le temps d'exposition thermique, ce qui pourrait provoquer une solidification partielle de la soudure.

On atteint les températures les plus hautes en utilisant des vitesses de rotation rapides et des vitesses d'avance lentes, ce qui est connu sous le terme de soudures chaudes (« hot weld »). En revanche, des vitesses de rotation inférieures à moyennes associées à des vitesses d'avance hautes génèrent des soudures froides (« cold weld »), reconnaissables par une température plus basse. Par conséquent, la température s'accroît avec la vitesse de rotation et décroît avec la vitesse d'avance, comme le montre la figure I.39 [70].

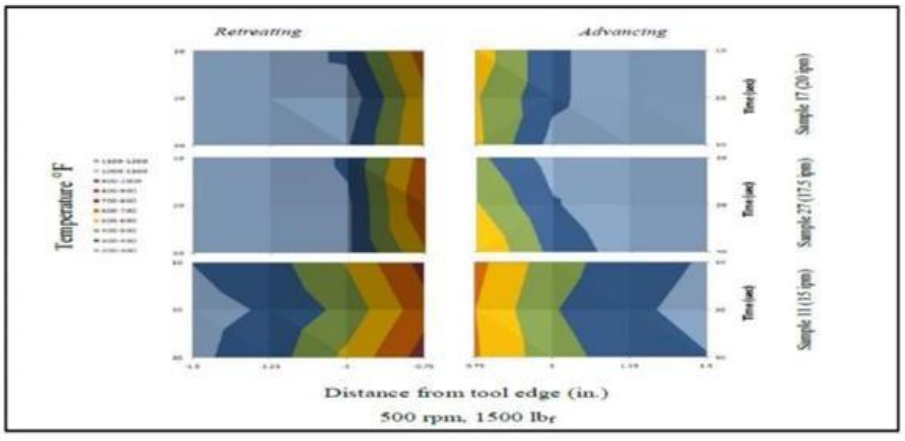


Figure I.39 : Profil de la température avec une vitesse de rotation de 500 rpm et en variant la vitesse d'avance dans une soudure en AA6061-T6 [70]

Dans la littérature, plusieurs auteurs [84][85] proposent des modélisations numériques par éléments finis pour simuler le transfert thermique pendant la phase stationnaire du procédé. En première approximation, aucun échange thermique n'est pris en compte entre l'outil et le matériau, et l'outil n'est donc pas modélisé. La source de chaleur mobile est représentée par une

distribution surfacique générée par le frottement entre l'épaulement et la matière, calculée à partir de la contrainte tangentielle et de la vitesse de glissement entre l'outil et le matériau.

Enfin, le gradient thermique induit par le FSW influence directement la répartition de la dureté dans le joint. Une température excessive peut provoquer la coalescence des précipités durcissants, réduisant la résistance mécanique dans la zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM) [86]. En revanche, un flux thermique bien contrôlé favorise une recristallisation dynamique efficace, améliorant les propriétés mécaniques globales du joint.

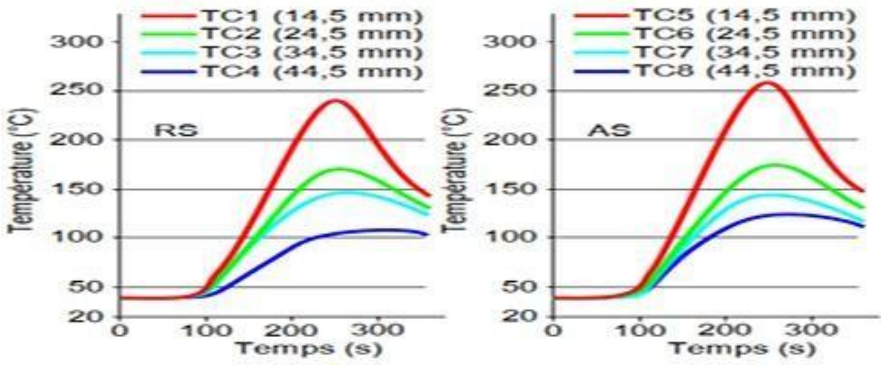


Figure I.40 : Mesure de la température pendant le FSW de l'alliage 6082 à l'aide de thermocouples placés à divers points éloignés du centre de la soudure [87].

I.7.1.6 Le coefficient d'efficacité du joint

Le coefficient d'efficacité d'une soudure est déterminé comme le quotient de la résistance à la traction de la soudure et celle du métal de base (voir équation (1)). C'est un indicateur crucial pour juger de la performance mécanique d'un assemblage soudé, en particulier dans les applications structurelles où le maintien des caractéristiques du matériau est primordial.

$$\text{Coefficient de joint} = \frac{Re\ du\ joint\ soudé}{\text{Re du matériau de base}}\% \qquad \text{(I.1)}$$

Re : la résistance élastique a la traction de l'éprouvette soudée.

Cette efficacité dépend de plusieurs paramètres opératoires, notamment la vitesse de rotation de l'outil, la vitesse d'avance, ainsi que la géométrie de l'outil utilisé.

Des recherches de Kumar et al. Ont démontré que le réglage de ces paramètres peut considérablement améliorer la performance des joints. Par exemple, lors d'une expérience de FSW impliquant les alliages d'aluminium AA2024 et AA7075, une efficacité combinée de 57% a été atteinte à une vitesse de rotation de 1 200 tours par minute et une vitesse d'avance de 60 mm/min [88]. Ce résultat démontre l'influence directe des conditions de soudage sur la qualité de l'assemblage.

Dans certains cas, des rendements proches de 100 % ont été atteints, témoignant de la robustesse du procédé [89].

Une étude récente sur l'alliage AA7068-T6, connu pour sa haute résistance, a révélé une efficacité conjointe de 88 % avec des paramètres optimisés : une vitesse de rotation de 1515 tr/min, une vitesse d'avance de 57,3 mm/min, et une force axiale de 10,4 kN [90]. Ces résultats démontrent l'importance de l'optimisation multiparamétrique pour atteindre des performances mécaniques élevées.

I.8 DÉFAUTS COURANTS DANS LE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE

Si les paramètres de soudage ne sont pas correctement contrôlés, différents défauts peuvent survenir lors du processus d'assemblage. Les raisons les plus courantes comprennent des vitesses d'avance ou de rotation inadéquates, l'utilisation d'un outil mal conçu, un contrôle axial insuffisant, ou un serrage incorrect des pièces à assembler [91].

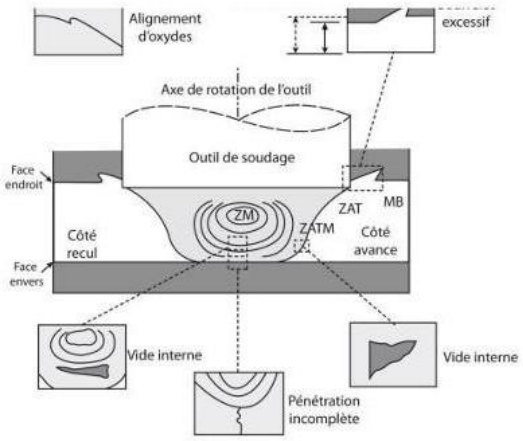


Figure I.41 : Schéma montrant la position des défauts en soudage FSW [92]

I.8.1 Défauts de surface

I.8.1.1 Rainures de surface

Parfois appelées défauts de labour, apparaissent généralement sur la face supérieure de la soudure, souvent du côté avancé du déplacement de l'outil. Elles se présentent sous forme de stries ou sillons qui altèrent l'aspect visuel et peuvent compromettre la qualité mécanique ou l'étanchéité du joint.

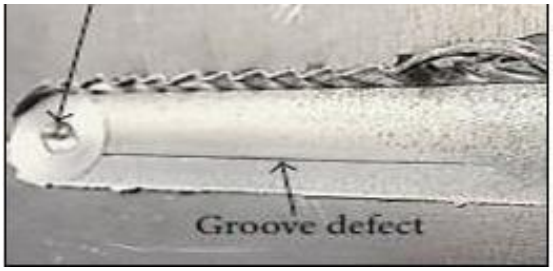


Figure I.42 : Stries ou sillons visibles sur la soudure [93]

I.8.1.2 Bavures (Ribbon flash)

Les bavures, également appelées flashs, constituent un défaut courant dans le soudage par friction-malaxage (FSW). Elles se traduisent par un excès de matière expulsée à la surface du joint, généralement visible le long des bords du cordon de soudure, en particulier du côté reculant de l'outil, là où la direction de rotation s'oppose à l'avance de l'outil. Ce phénomène résulte d'un flux de matière trop abondant sous l'épaulement, qui pousse le métal plastifié hors de la zone de soudage.

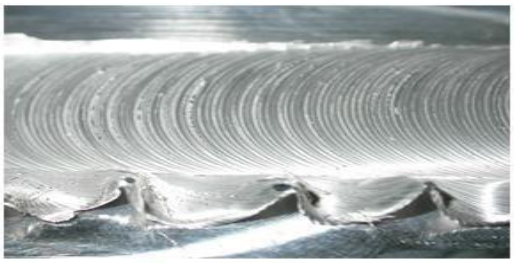


Figure I.43 : Défaut de bavures lors du fsw

I.8.1.3 Décapage de surface dans le FSW

Le décapage de surface se manifeste par l'apparition de stries, pelures ou filets visibles sur la surface supérieure du cordon de soudure. Ces irrégularités donnent à la soudure un aspect déchiré ou effiloché, nuisant à la qualité visuelle et parfois à l'intégrité mécanique du joint. Ce phénomène est généralement lié à une accumulation excessive de chaleur en surface, souvent causée par une vitesse de rotation trop élevée de l'outil. Dans ces conditions, le métal peut atteindre localement un état proche de la fusion, perturbant le malaxage homogène du matériau. De plus, un déséquilibre entre la vitesse de rotation et la vitesse d'avance peut entraîner une agitation superficielle insuffisante, favorisant l'apparition de ce défaut.

I.8.1.4 Cicatrice au dos dans le FSW

La cicatrice au dos se manifeste par un cordon ou une marque visible sur la face inférieure du joint soudé, souvent sous forme de sillon ou de relief irrégulier. Ce défaut est généralement observé lorsque l'outil pénètre trop profondément ou que le contrôle de la pression axiale est mal ajusté.

I.8.1.5 Défaut à la racine du cordon (root flow)

L'absence de liaison complète au fond du joint soudé, généralement visible sous forme de fissure ou de vide, témoigne d'un défaut à la racine. Cela peut affecter la solidité mécanique et la

longévité du joint, notamment dans les utilisations exposées à des charges cycliques ou à la corrosion.

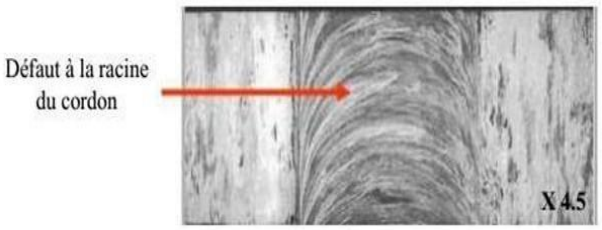


Figure I.44 : Défaut à la racine du cordon, sur la surface des pièces en contact avec l'enclume [64].

I.8.2 Défauts interne

I.8.2.1 Défaut tunnel

Le défaut de tunnellisation, démontrée à la figure I.4, est une défaillance courante du soudage par friction-malaxage (FSW), habituellement située du côté d'avancée du faisceau de soudure. Ceci est dû à une consolidation insuffisante du matériau malaxé à l'arrière de la soudure, provoquée par un flux de matière inapproprié. Selon Kumar et al. [61], l'effort axial Fz a un effet déterminant sur la création de ce défaut : une hausse de Fz peut diminuer, voire supprimer, la dimension du tunnel dans le cordon. Cette amélioration découle d'une interaction plus performante entre l'instrument et le matériau, favorisant tant le transfert de chaleur par frottement que la pression interne au cœur du processus.

Ce genre de défaut compromet de manière significative les caractéristiques mécaniques des soudures. Les travaux de Raviprakash et al. [94] ont élargi notre compréhension de l'influence des paramètres de soudage sur la création des tunnels, mettant en avant leur importance cruciale. En effet, la formation de tunnels — tout comme d'autres défauts en FSW — est habituellement associée à un ajustement insuffisant des paramètres tels que les vitesses de rotation et d'avance, la pression axiale, l'alignement des pièces ou encore la géométrie de l'outil [95].

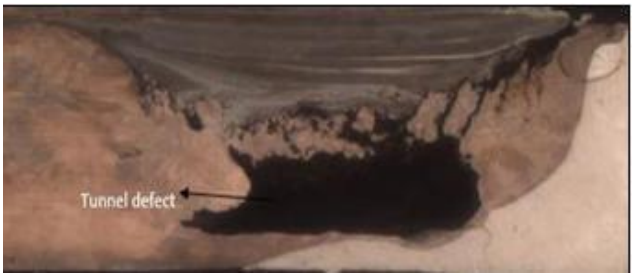


Figure I.45 : Défaut de tunnelisation des joints soudés [96]

I.8.2.2 Défaut d'adhésion partielle (Kissing bond)

L'un des problèmes majeurs rencontrés lors de l'assemblage des alliages d'aluminium est la présence persistante de la couche d'oxyde, qui constitue une source potentielle de défauts, notamment le kissing bond, parfois désigné sous le terme de « miel de liaison » [97]. Ce défaut se manifeste exclusivement sur la face arrière du joint soudé, là où le malaxage est le moins efficace. Ce défaut est difficile à détecter, même par des méthodes classiques de contrôle non destructif, ce qui en fait un enjeu critique pour les applications structurelles sensibles.

Pour prévenir ce type de défaut, il est essentiel d'assurer un mélange homogène du matériau et un écoulement régulier autour de l'outil, permettant une dispersion efficace des oxydes [98] [99]. En effet, des paramètres de soudage mal ajustés et une épaisseur excessive de la couche d'oxyde peuvent empêcher une liaison métallurgique correcte, compromettant ainsi la qualité du joint [100].

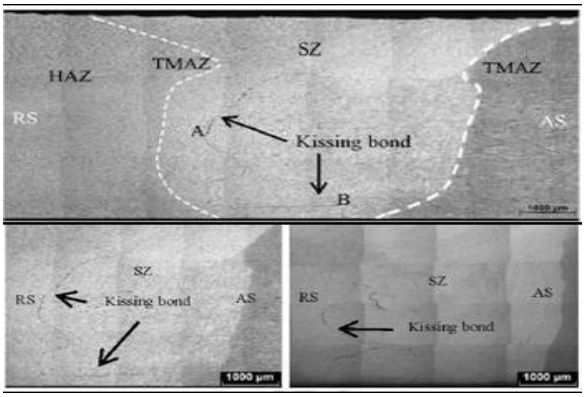


Figure I.46 : Images MEB : un défaut d'adhésion partielle [97].

I.8.2.3 Vestige de ligne de joint

Le vestige de ligne de joint (Joint Line Remnant – JLR) correspond à une trace résiduelle laissée à l'interface initiale entre les deux pièces soudées par friction-malaxage. Bien que le matériau soit plastifié et malaxé durant le procédé, cette ligne peut persister visuellement ou micro structuralement, traduisant un mélange incomplet ou une dispersion insuffisante des oxydes interraciaux. En coupe transversale, elle se manifeste généralement sous forme d'une ligne sombre ou discontinue, parfois accompagnée de microfissures ou de zones de faiblesse.

Les JLR sont considérés comme des défauts majeurs en FSW, car ils peuvent altérer significativement les performances mécaniques des assemblages soudés. Leur apparition est principalement liée à un malaxage insuffisant dans la zone sous-broche, qui empêche l'élimination complète des oxydes et la dispersion homogène du plan de joint initial [39]. Ce phénomène résulte

d'une déformation plastique localement inadéquate, incapable de rompre la cohésion des couches oxydées superficielles.

La présence de vestiges de ligne de joint présentant une morphologie en zigzag, comme illustré en Fig. I.49, est particulièrement préoccupante, car elle dégrade l'intégrité mécanique du joint soudé et peut compromettre sa tenue en service [101].

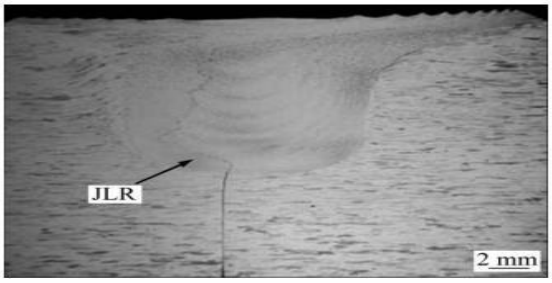


Figure I.47 : Macrostructure du défaut JLR [39]



Figure I.48 : Morphologie de zigzag du JLR [102]

I.8.2.4 Défaut de pénétration incomplète

Le défaut connu sous le nom de manque de pénétration peut survenir,Lorsque les interfaces entre les plaques ne sont pas correctement jointes à la racine du cordon soudé, Ce type d'anomalie engendre un joint mécaniquement fragile, particulièrement vulnérable aux concentrations de contraintes élevées [103, 104]. Les causes principales incluent une sonde d'outil trop courte, une profondeur de plongée insuffisante, un décalage axial inadapté, une géométrie d'outil mal conçue, une variation d'épaisseur entre les plaques, ainsi qu'un apport thermique trop faible [100 ,105].

La prévention de ce défaut repose sur une sélection rigoureuse des paramètres de soudage et une préparation adéquate du joint. À titre d'exemple, l'utilisation d'un matériau de support à faible conductivité thermique peut permettre de conserver une température suffisante dans la zone de soudage, favorisant ainsi une agitation homogène et limitant la dispersion irrégulière des fragments dans la zone de malaxage [96].

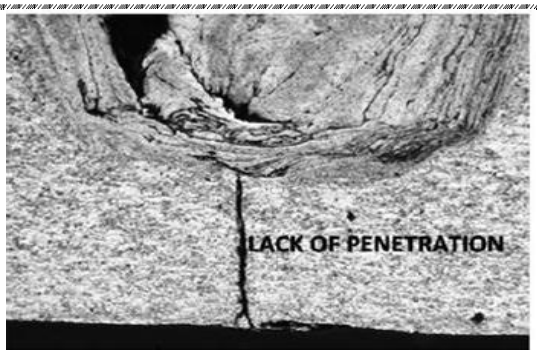


Figure I.49 : Microstructurale des défauts incomplets en soudage par friction-malaxage [100]

I.8.3 Relation entre défauts et paramètres opératoires en FSW

Chaque imperfection indique un déséquilibre thermique, mécanique ou géométrique dans le processus. Une association inadéquate des paramètres de fonctionnement compromet le flux des matériaux, la répartition de la chaleur ou l'adhésion interraciale, entraînant l'émergence de défauts particuliers. Le tableau I.3 résume la relation entre les paramètres du processus et les défauts déterminer.

Tableau I.4 : Relation entre paramètres opératoires et défauts courant au fsw

Paramètre opératoire	Influence sur le procédé	Défauts associés en cas de mauvais réglage
Vitesse de rotation	Contrôle la génération de chaleur et le malaxage du matériau	Surchauffe → décapage de surface, bavures ; Sous-chauffe → kissing bond, manque de pénétration
Vitesse d'avance	Détermine le temps de séjour de l'outil sur la matière	Trop rapide → malaxage insuffisant, hooking ; Trop lente → surchauffe, flash
Profondeur de plongée	Assure le contact entre la sonde et la racine du joint	Trop faible → défaut à la racine, manque de pénétration ; Trop profonde → cicatrice au Dos
Pression axiale	Influence la compaction et la plasticité du matériau	Faible pression → kissing bond, JLR ; Pression excessive → bavures, amincissement
Géométrie de l'outil	Affecte le flux de matière et la distribution thermique	Inadaptée → rainures de surface, défauts internes, hooking
Inclinaison de l'outil	Modifie l'orientation du flux de matière	Mauvais angle → défauts de surface, instabilité du cordon
Épaisseur des plaques	Conditionne la profondeur de malaxage nécessaire	Épaisseurs inégales → défauts à la racine, manque de pénétration

I.9 CONTRAINTES RÉSIDUELLES

I.9.1 Origine des contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont généralement issues des procédés de fabrication, plus spécifiquement de phénomènes mécaniques, thermiques ou métallurgiques, figure I.50. De fait, ces trois éléments s'associent pour créer des tensions intérieures dans les matériaux.

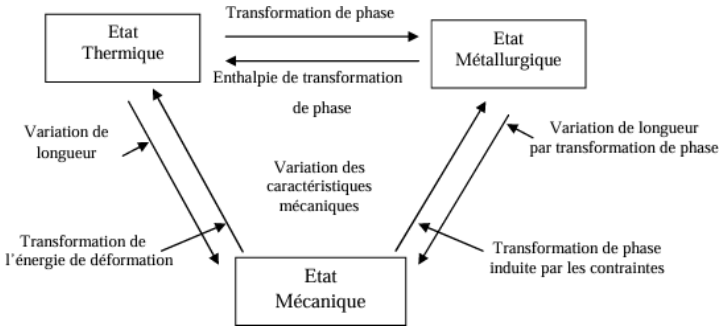


Figure I.50 : Origine des contraintes résiduelles

Les paramètres opératoires ont une influence significative sur le niveau des contraintes résiduelles produites lors du soudage par friction-malaxage (FSW). On a noté que ces contraintes s'intensifient avec l'avance [106], alors que le changement du rapport d'avance influence à la fois la forme de leur répartition et leur valeur maximale, aussi bien en longitudinal qu'en transversal [107].

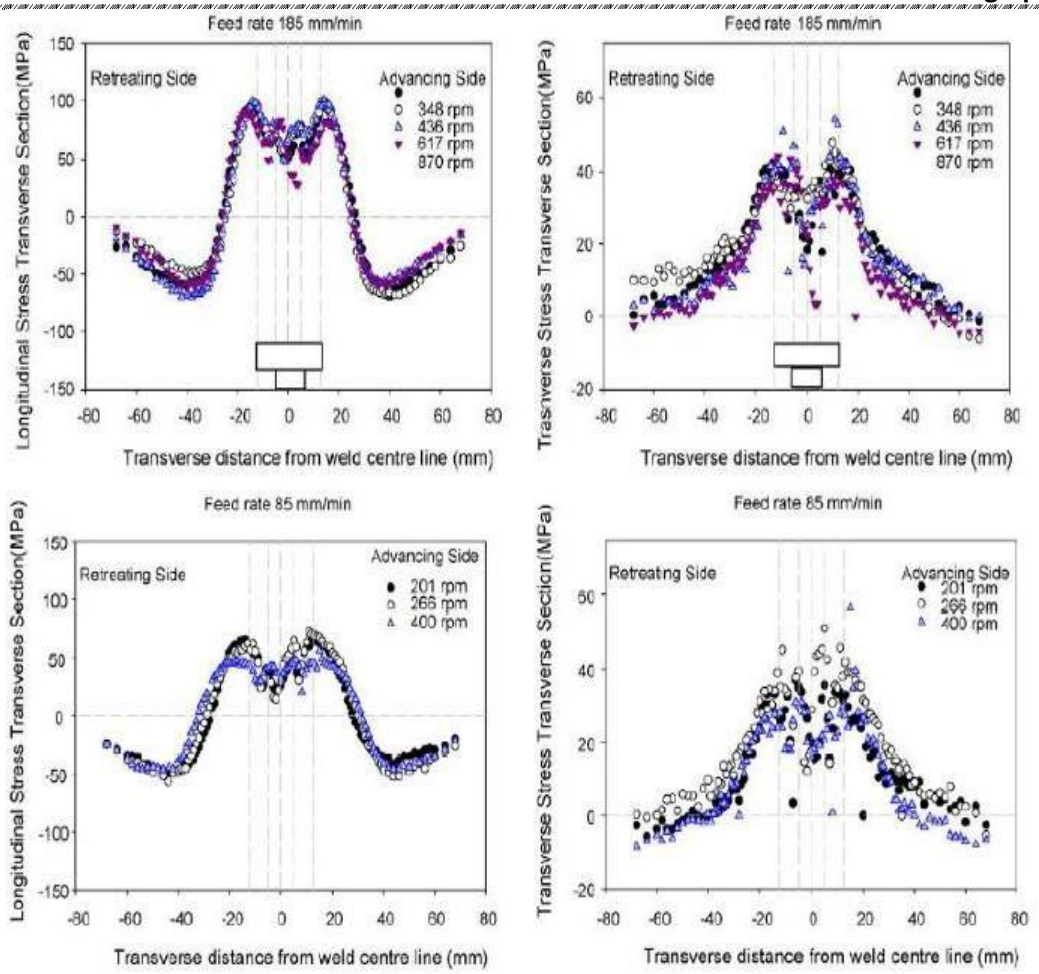


Figure I.51 : Effets des paramètres de soudage sur les contraintes résiduelles ; AA5083-H321 de 6 mm d'épaisseur [107].

Dans la direction longitudinale, parallèle à l'axe de soudage, les contraintes résiduelles sont généralement en tension et adoptent une distribution en forme de "M", où les valeurs maximales se situent aux extrémités de l'épaulement de l'outil, de part et d'autre du joint [108, 109, 110]. Cette largeur diminue avec la profondeur du joint, les contraintes étant plus faibles au centre, ce qui est attribué à la mise en solution des précipités, responsable d'une baisse des propriétés mécaniques dans le noyau du joint [111, 112].

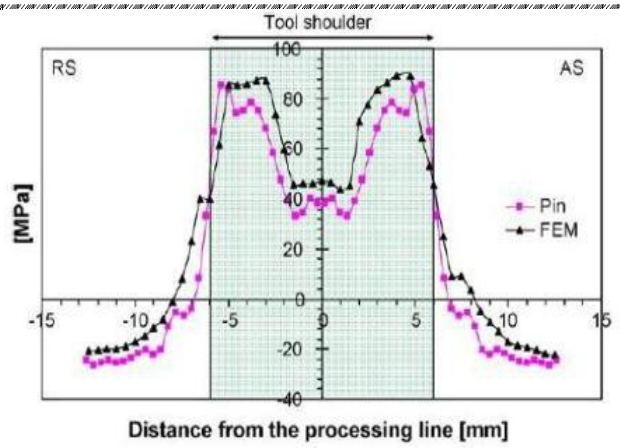


Figure I.52 : Contraintes résiduelles dans la direction longitudinale dans un joint SFM en alliage d'aluminium 7075–T6 de 3 mm d'épaisseur [112].

Dans la direction transversale, les contraintes résiduelles sont généralement plus faibles. Elles sont négligeables en surface, mais à la racine du joint, on observe une compression au centre et une tension dans la zone affectée thermiquement (ZAT), figure I.53.

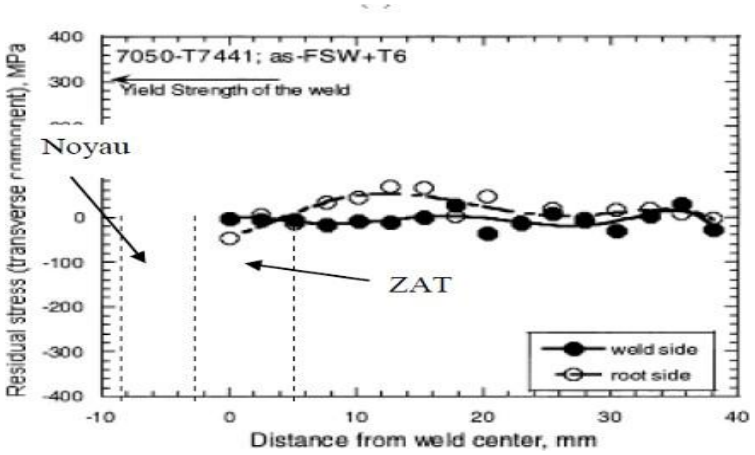


Figure I.53 : Contraintes résiduelles dans la direction transversale d'un joint SFM en AA7050 T7451 [113].

Pour atténuer ces contraintes, certaines études [114] ont montré que l'application préalable d'une contrainte en tension équivalente à 70 % de la limite d'élasticité permet de les inverser, les faisant passer de tension à compression, figure I.54. Toutefois, cette méthode n'a pas d'effet significatif sur les contraintes transversales, qui restent faibles quelle que soit la condition. Il convient de noter que l'application de contraintes préalables devient complexe avec l'augmentation de la taille des pièces, limitant son usage industriel.

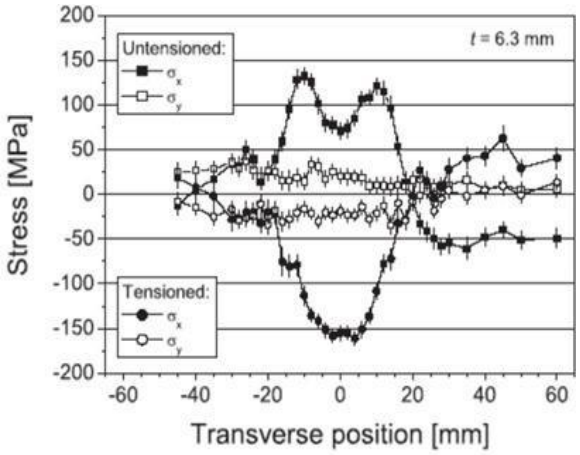


Figure I.54 : Contraintes résiduelles mesurées dans une plaque de 6,3 mm d'épaisseur en AA2024. Une soudure sans précontrainte et une soudure avec précontrainte à 70 % de la limite d'élasticité avant le soudage [114].

La caractérisation des contraintes résiduelles repose sur plusieurs techniques, regroupées en trois grandes catégories : les méthodes mécaniques utilisant des jauges d'extensomètre (carottage, perçage), les techniques ultrasonores, et les méthodes non destructives par diffraction de rayons X ou de neutrons, permettant une analyse fine sans altérer la soudure [115].

I.9.2 Influence des paramètres sur les contraintes résiduelles

Dans le contrôle des contraintes résiduelles longitudinales produites lors du soudage par friction-malaxage (FSW), la vitesse de rotation de l'instrument joue un rôle crucial. De nombreuses recherches ont démontré qu'une hausse de cette vitesse a tendance à diminuer les contraintes résiduelles, grâce à la chaleur intensifiée générée dans la zone de soudure, facilitant ainsi une détente partielle des tensions internes [116 ,117]. D'un autre côté, des vitesses de rotation réduites peuvent exagérer ces contraintes : par exemple, une rotation à 1 120 tr/min a été liée à une hausse de 12,5 % des contraintes longitudinales [116].

Le rôle de la vitesse d'avance, est également crucial. Une hausse de 25 à 31,5 mm/min a été associée à une montée des contraintes résiduelles au centre du joint, surtout sur le côté recule, là où le flux de matière est moins uniforme [116 ,117]. L'interaction entre la vitesse de rotation et la vitesse d'avance est ainsi cruciale, car elle contrôle l'apport de chaleur requis pour réaliser une soudure impeccable. L'harmonisation exacte de ces facteurs permet de réduire les contraintes résiduelles tout en garantissant la qualité métallurgique du joint [118].

Il convient toutefois de noter que la présence de contraintes résiduelles modérées peut être bénéfique dans certains cas. En effet, elles peuvent améliorer la résistance à la fatigue des assemblages soudés, en contribuant à une redistribution favorable des efforts internes [119].

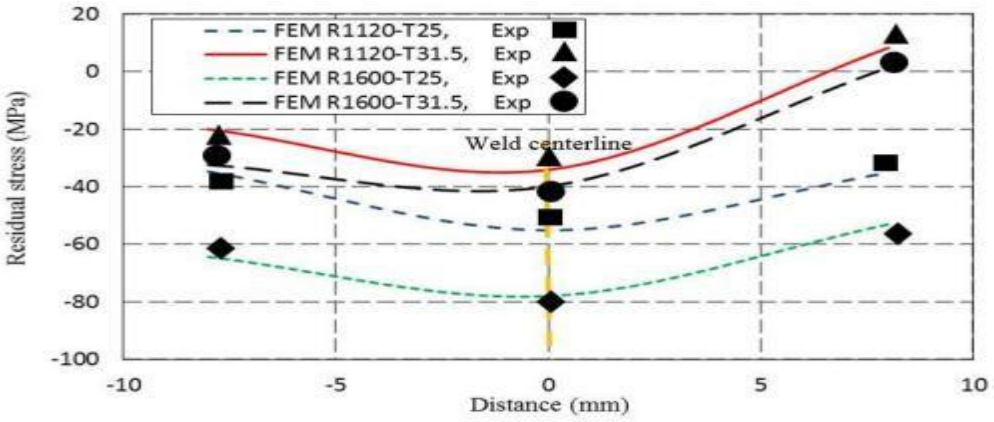


Figure I.55 : Distribution expérimentale des contraintes résiduelles transversales du procédé FSW [116].

I.10 COMPORTEMENT EN FATIGUE DES JOINTS FSW

I.10.1 Généralités sur la fatigue

Le concept de fatigue des matériaux fait référence au phénomène d'altération graduelle d'un matériau lorsqu'il est soumis à des contraintes cycliques ou variables dans le temps, généralement bien en-dessous de sa limite d'élasticité.

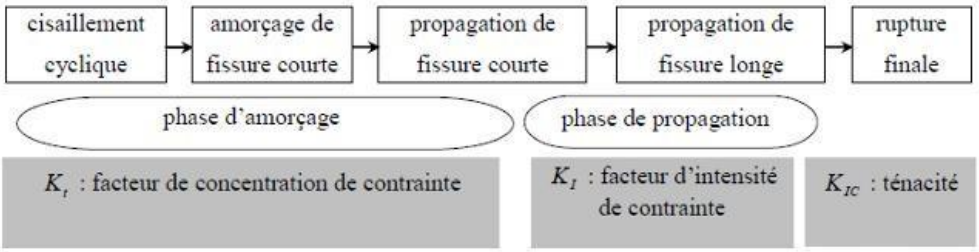


Figure I.56 : Différentes phases de la durée de vie en fatigue et exemple de paramètres associés [120].

La fatigue des matériaux est abordée de deux façons différentes, à savoir : le relevé de courbes de Wöhler et la mesure de la vitesse de fissuration. [121]

I.10.1.1 Modes élémentaires de fissuration

On peut décrire la fissuration des matériaux en se basant sur trois modalités essentielles : le Mode I (ouverture), où les bords de la fissure se séparent de manière perpendiculaire au plan de

fissure ; le Mode II (cisaillement dans le plan), qui implique un glissement parallèle à la fissure ; et le Mode III (cisaillement antiplan), qui est caractérisé par un déplacement perpendiculaire à la direction de propagation. Ces modes peuvent fonctionner indépendamment ou conjointement, affectant la progression des fissures en fonction des conditions de charge et des caractéristiques du matériau. Il est crucial de les comprendre pour prévoir les processus de rupture et élaborer des structures qui résistent à la fatigue.

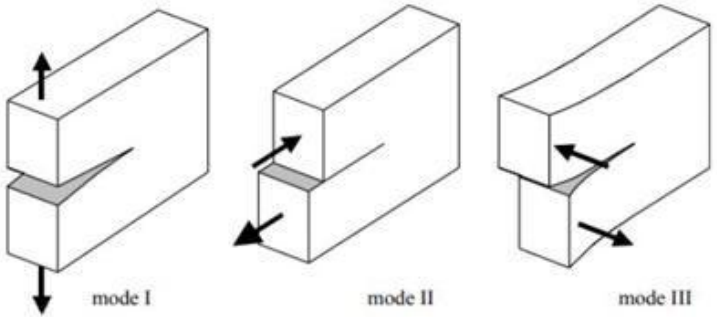


Figure I.57 : Modes élémentaires de fissuration (mode de sollicitations) [122].

I.10.1.2 Propagation de fissures par fatigue

L'estimation de la durée de vie en propagation de fissure est habituellement réalisée sur la base des principes de la mécanique de rupture, tout en considérant les fluctuations du facteur d'intensité des contraintes pendant le chargement cyclique. Cette méthode facilite l'évaluation de la pérennité des diverses zones du joint de soudure, y compris la zone de malaxage, la ZAT et le matériau de base.

En termes pratiques, la durée de vie en fatigue est caractérisée par le nombre de cycles menant à la fracture Nr, et se divise traditionnellement en trois phases distinctes [123, 124] :

- **Phase d'amorçage de la fissure**

L'étape d'amorçage représente la phase initiale du processus de rupture dû à la fatigue. Il s'agit de l'apparition graduelle d'une fissure due à des contraintes cycliques, généralement largement en dessous de la limite d'élasticité du matériau. Cette phase se caractérise par des phénomènes microstructuraux localisés, comme le déplacement de dislocations, l'établissement de bandes de glissement durables et l'accumulation de déformations plastiques dans certaines zones cristallines.

Sous l'effet répété des contraintes, ces zones connaissent une concentration de déformation qui mène à la formation d'une fissure microscopique. Elle peut se former à partir de vices initiaux (inclusions, porosités, irrégularités de surface) ou apparaître de manière aléatoire, en fonction de la microstructure et du conditionnement de la matière. Cette phase est influencée par divers facteurs, notamment :

- **L'amplitude et la fréquence du chargement,**
- **La rugosité et la propreté de la surface,**
- **La présence de contraintes résiduelles,**
- **Et les conditions environnementales (milieu corrosif, humidité, etc.).**

Dans les matériaux ductiles, cette phase peut représenter une part significative de la durée de vie en fatigue totale, la propagation de fissure étant relativement lente. En revanche, dans les matériaux fragiles ou les structures déjà endommagées, l'amorçage peut être quasi instantané.

L'amorçage se produit généralement en surface, notamment au fond des entailles, où l'état de surface joue un rôle déterminant. La présence de rayures, bavures ou sillons, souvent laissés par l'épaulement de l'outil lors du soudage FSW, constitue des sites préférentiels d'amorçage, en raison de l'amplification locale des contraintes. Il est donc essentiel d'examiner la distribution des contraintes dans ces zones pour mieux comprendre et anticiper le comportement en fatigue des joints soudés [123, 124].

- **Phase de propagation**

La phase de propagation commence dès que la fissure est initiée et se réfère à son expansion graduelle sous l'influence des contraintes cycliques. Ce processus est soumis aux lois de la mécanique de rupture, en particulier par le changement du facteur d'intensité des contraintes (K), qui est influencé par la dimension de la fissure, la contrainte mise en œuvre et la configuration du composant.

La vitesse de propagation est généralement modélisée par des lois empiriques, telles que la **loi de Paris** :

$$\frac{Da}{dN} = (\Delta K)^m \qquad \text{(I.2)}$$

où *da/dN* est la vitesse de croissance par cycle,

ΔK l'amplitude du facteur d'intensité

et *C*, *m* des constants du matériau.

Durant cette phase, la fissure traverse les différentes zones du matériau (zone de malaxage, ZAT, matériau de base), chacune ayant une résistance à la propagation différente selon sa microstructure. La propagation peut être stable ou instable, selon les conditions de chargement, les contraintes résiduelles, et l'environnement.

- **Phase de rupture**

La phase de rupture représente la dernière étape du processus de fatigue, signalant l'échec soudain du matériau. Cela se produit lorsque la fissure, après avoir atteint une dimension critique,

n'est plus maîtrisable par la structure. À ce point, l'endurance locale est surpassée et la fissure se développe de façon instable, fréquemment à une vitesse élevée, en raison des tensions résiduelles et de la charge appliquée.

Cette rupture est souvent délicate, présentant peu ou pas de déformation plastique observable, surtout dans le cas de matériaux ayant une faible ductilité. Elle peut survenir sans aucun signe précurseur, ce qui rend indispensable une détection en amont pour éviter des pannes désastreuses.

La durée de cette phase est très courte comparée aux phases d'amorçage et de propagation, mais ses conséquences sont souvent critiques pour la sécurité des structures.

I.10.2 Effet des paramètres sur la fatigue des joints soudés par FSW

L'évaluation du comportement en fatigue des joints soudés revêt une importance capitale dans les applications structurales. Bien que les études sur les assemblages réalisés par friction-malaxage (FSW) soient encore limitées, plusieurs travaux ont apporté des éclairages significatifs.

Costa et al ont examiné le comportement en fatigue de plaques en alliage AA6082-T6 d'épaisseur 4 mm, soudées en configuration bout à bout avec un angle d'inclinaison de 2°. Les essais ont été menés sous chargement à amplitude constante et variable, avec des rapports de contrainte R=0R = 0 et R=−1R = -1 [125, 126]. Les résultats ont révélé que les défauts de type tunnel ont un impact plus négatif sur la tenue en fatigue que les lèvres de cisaillement. L'élimination de ces défauts permettrait d'améliorer significativement les performances en fatigue des joints FSW [126].

Dans une autre étude, le comportement en fatigue de plaques AA7075-T651 de 10 mm d'épaisseur, soudées avec un angle d'inclinaison de 8°, a été analysé à l'aide d'essais de fatigue ultrasonique à haute fréquence (20 Hz). Il a été observé que la fissure de fatigue s'amorce dans la zone thermo mécaniquement affectée (TMAZ) lors des essais à durée de vie courte, tandis qu'elle débute dans la zone noyau (NZ) lors des essais à très haute durée de vie [127].

Ericsson et Sandström ont étudié l'effet de la vitesse d'avance sur le comportement en fatigue de plaques AA6082-T6 soudées par FSW. Les essais ont été réalisés avec une charge sinusoïdale, un rapport de contrainte de 0,5, une fréquence d'oscillation comprise entre 9 et 15 Hz, et une contrainte moyenne variant de 105 à 165 MPa. Les résultats ont montré qu'une augmentation de la vitesse d'avance de 700 à 1400 mm/min n'entraîne pas de variation significative des propriétés en fatigue. En revanche, une amélioration notable a été observée pour les échantillons soudés à 350 mm/min, comme illustré en figure I.58 [128].

Enfin, Lomolino et al ont compilé les données disponibles sur le comportement en fatigue des joints FSW d'alliages d'aluminium. Leur analyse statistique a permis de proposer des courbes

de référence pour les joints bout à bout. Ils ont constaté que la rupture en fatigue se produit généralement dans la zone soudée. Par ailleurs, l'influence du rapport de contrainte RR sur les joints FSW en AA5083 a été étudiée, et il a été suggéré que des opérations d'usinage mécanique post-soudage peuvent améliorer les propriétés en fatigue de ces assemblages [129].

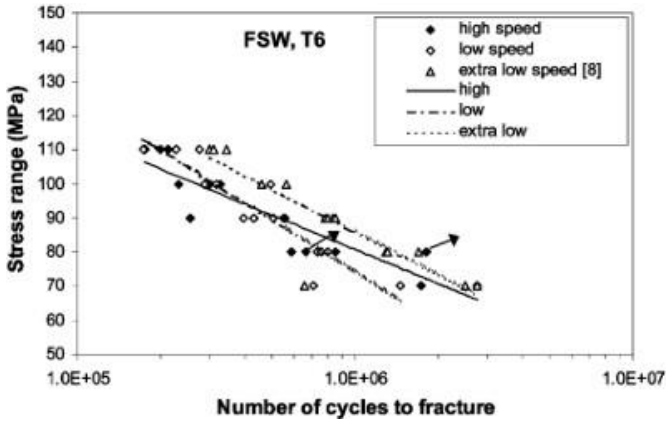


Figure I.58 : Comportement à la fatigue des échantillons AA 6082-T6 soudés à différentes vitesses de déplacement [128].

I.11 CONCLUSION

Ce premier chapitre a fourni une présentation globale du processus de soudage par friction-malaxage (FSW), en détaillant son principe, son développement historique et les phénomènes métallurgiques qui le soutiennent. Le FSW se démarque par sa faculté à unir de manière efficace les alliages d'aluminium, tout en étant adaptable à une vaste sélection de matériaux métalliques, y compris les métaux différents. Le processus implique une interaction étroite entre les effets mécaniques et thermiques, la chaleur étant produite par le frottement entre l'outil et les pièces, ainsi que par la déformation plastique qui se produit au niveau du pion.

La recherche bibliographique a révélé que la création du cordon de soudure découle principalement du flux de matière généré par l'intervention de l'instrument, et que les facteurs opérationnels — comme la vitesse d'avancement, la vitesse de rotation et le design de l'instrument — influencent considérablement la qualité du joint. Ces facteurs ont un impact direct sur la distribution de chaleur, les degrés de déformation, et donc la microstructure finale, particulièrement en ce qui concerne la dimension des grains et la précipitation.
Le FSW se présente donc comme une technologie porteuse d'avenir pour les applications industrielles de haute exigence. Les recherches à venir doivent viser une optimisation méticuleuse et systématique des paramètres opérationnels, dans le but d'améliorer les performances mécaniques des assemblages et d'étendre les champs d'application de la méthode.

Étude expérimentale

II.1 INTRODUCTION

De nombreuses études ont été menées sur le soudage par friction-malaxage (FSW) des alliages d'aluminium, grâce à ses avantages liés à la qualité des joints et à la réduction des défauts. Cependant, les recherches spécifiquement axées sur l'alliage d'aluminium AA5083-H111, en particulier pour le montage bout à bout, restent assez restreintes. Cet alliage, reconnu pour sa capacité à résister à la corrosion et ses excellentes caractéristiques mécaniques, trouve une utilisation répandue dans les domaines du naval et de l'aéronautique.

Cette recherche se concentre sur la caractérisation des joints soudés bout à bout réalisés par la méthode du FSW, en employant des plaques d'alliage AA5083-H111. La tâche implique l'étude de l'impact de divers facteurs de soudage, tels que la vitesse de rotation de l'outil et la vitesse d'avance, sur la qualité du joint. L'objectif premier est d'analyser l'influence de ces facteurs sur la condition de surface, la microstructure et le comportement mécanique des assemblages effectués.

De plus, une analyse approfondie des modes de rupture est effectuée pour comprendre précisément les zones sensibles du joint soudé et établir les conditions idéales pour garantir une soudure à la fois fiable et efficace. Cette méthode a pour objectif d'améliorer le processus FSW pour l'alliage AA5083-H111 dans les montages en bout à bout.

II.2 MÉTHODE ET MATÉRIELS

II.2.1 Alliage d'aluminium 5083H111

L'alliage d'aluminium AA5083-H111, qui fait partie de la série 5000, est une nuance non traitable thermiquement, se distinguant par une grande teneur en magnésium. Cette composition lui attribue une excellente capacité de résistance à la corrosion, surtout en environnement marin, ainsi qu'une solide résistance mécanique et une soudabilité exceptionnelle. La désignation H111 fait référence à un matériau légèrement écroui après avoir été recuit, qui présente une grande ductilité tout en maintenant des caractéristiques mécaniques constantes. Cela le rend idéal pour les utilisations structurelles dans les domaines du naval, du ferroviaire et de l'aéronautique [130].

Une analyse chimique a été réalisée à l’aide de la technique **SEM-EDX** (microscopie électronique à balayage couplée à la spectrométrie des rayons X par dispersion d’énergie), permettant une identification précise des éléments constitutifs de l’alliage. Le **tableau II.1** présente la **composition chimique** des feuilles en alliage d’aluminium **AA5083-H111**, tandis que le **tableau II.2** détaille leurs **propriétés mécaniques**, déterminées par des **essais de traction**.

Tableau II.1 : Composition chimique [55]

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0,15	0,40	0,40	0,10	0,10	4,90	0,25	0,25	0,15

II.2.1.1 Essai de traction

Les éprouvettes de traction employées dans cette recherche ont été confectionnées selon la norme ASTM E8M-04, fixée par l'American Society for Testing and Materials (ASTM, 2009). Cette norme spécifie les dimensions, la géométrie et les modalités de test des échantillons prévus pour l'évaluation des caractéristiques mécaniques des matériaux métalliques, y compris la résistance à la traction, le module d'élasticité et l'allongement jusqu'à la rupture. La rigueur dans l'application de cette norme assure la fiabilité, la répétabilité et la possibilité de comparer les résultats obtenus.

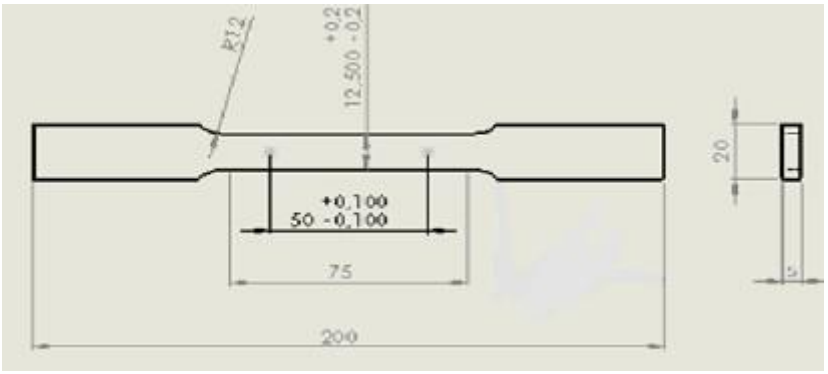


Figure II.1 : Géométrie de l'éprouvette de traction

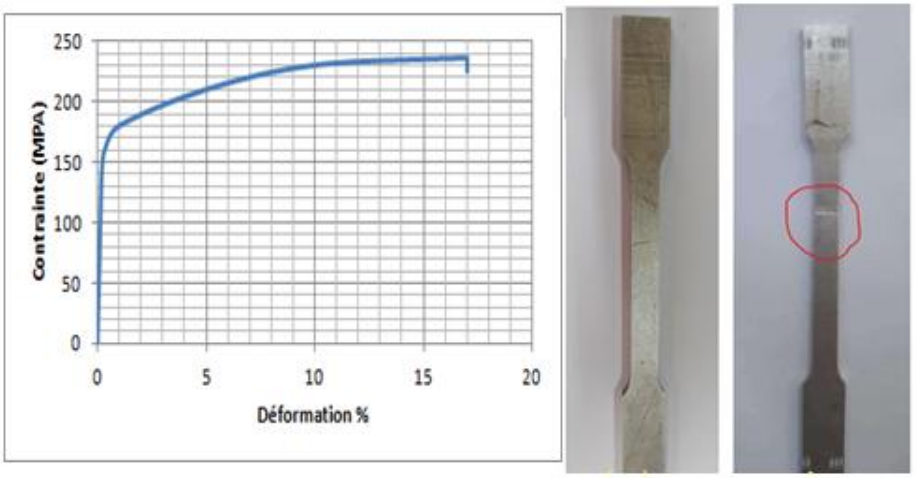


Figure II.2 : Courbe de traction

Tableau II.2 : Propriétés mécaniques

E MPa	YS MPa	UTS MPa	A %	K J/cm^2	Hv
71008	155	236	17	45	88

Des plaques de 5 mm d'épaisseur et de 300 x 100 mm de géométrie ont été obtenues par découpe mécanique à la cisaille, réalisée dans une tôle d'aluminium de 2000 x 1000 mm suivant le sens de laminage, pour réaliser le soudage, figure II.3.

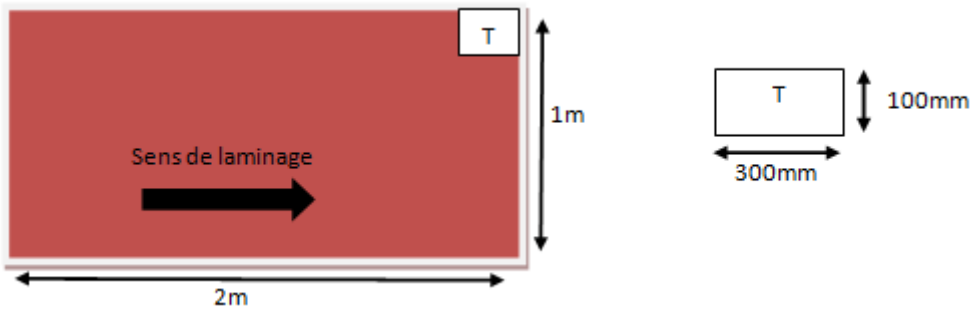


Figure II.3 : Découpage des plaques pour la réalisation des éprouvettes

II.2.2 Équipement utilisé pour le soudage FSW

Afin de réduire les effets indésirables liés à la texture induite par le laminage, le soudage a été réalisé dans le sens parallèle à la direction de laminage des tôles. Le procédé de mise en œuvre repose sur une technique de soudage à fusion limitée.

II.2.2.1 Machine de soudage

Le processus de soudage par friction-malaxage (FSW) a été réalisé à l'aide d'une fraiseuse spécialement adaptée, installée dans l'atelier d'usinage du département de Génie Mécanique, comme présenté dans la figure II.4. Cette machine dispose des caractéristiques cinématiques requises pour assurer la mise en œuvre efficace du procédé FSW. Les spécifications techniques de la fraiseuse utilisée sont les suivantes :

- Une puissance de 5 kW.
- Une gamme de vitesse de rotation de 45 à 2000 tr/min.
- Une gamme de vitesse d'avance de 16 à 800 mm/min.



Figure II.4 : Fraiseuse verticale adaptée pour le soudage FSW

II.2.2.2 Système de bridage

Pour assurer un soudage par friction-malaxage (FSW) sans défauts, les tôles à souder sont placées sur une enclume rigide, qui est fixée à la table de la fraiseuse. Un système de fixation constitué de brides principales à étagères est mis en place pour garantir leur stabilité durant le processus, stabilisant ainsi les pièces tout au long de la procédure. Ce dispositif offre une surveillance minutieuse du placement et de la fixation des tôles pendant le processus. La figure II.5 illustre le système de maintien employé.



Figure II.5 : Système de fixation des tôles

II.2-2-3 Outils de soudage

L'outil de soudage utilisé pour l'assemblage est en acier de type 42CrMo4, figure II.6. Il présente des caractéristiques mécaniques (R = 750-1300 MPa, A = 10-14 %, Re = 500-900 MPa et E = 210 000 MPa), une tige cylindrique filetée de 5 mm de diamètre et de 4,7 mm de longueur et un épaulement de 20 mm de diamètre). Le choix du matériau a également été motivé par des raisons de coût et de disponibilité.



Figure II.6 : Outils de soudage

II.2.3 Paramètres opératoires

Le procédé de soudage (FSW) a été réalisé en maintenant une vitesse de rotation de l'outil constante de 1400 tr/min, tandis que la vitesse de déplacement a été progressivement modifiée selon les valeurs suivantes : 16, 20, 25, 30, 40, 50 et 63 mm/min. Cette variation des vitesses d'avance a pour objectif d'analyser l'impact des paramètres de soudage sur la qualité des

assemblages, notamment en termes de morphologie du cordon, de structure micrographique et de propriétés mécaniques. La figure II.7 illustre un exemple représentatif des joints soudés obtenus pour les différentes conditions expérimentales, mettant en évidence les effets visuels liés aux variations de vitesse de soudage.

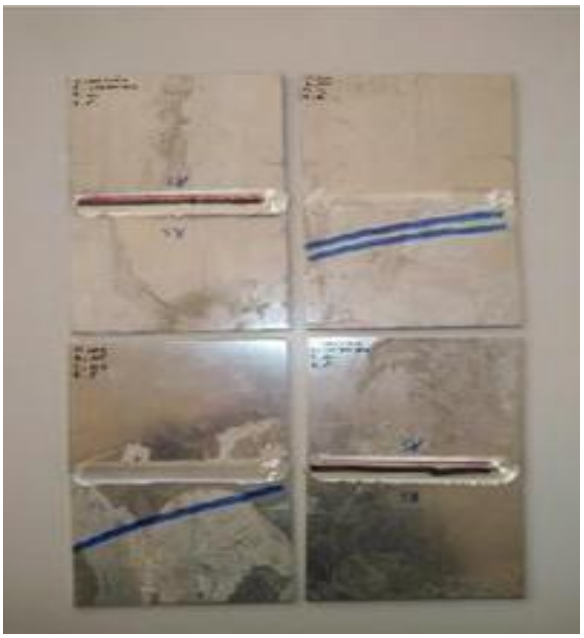


Figure II.7 : Exemple de joints soudés obtenus avec différentes vitesses de soudage

II.2.4 Procédures de caractérisation

Après le soudage par friction-malaxage (FSW), les échantillons ont été découpés selon la géométrie illustrée à la figure II.8. Les éprouvettes ainsi obtenues ont été sélectionnées pour être soumises à un essai de flexion trois points, conformément à la norme GB/T 232-999, afin d'évaluer la résistance mécanique des assemblages réalisés, l'état de surface des échantillons FSW a été évalué par la rugosité moyenne arithmétique (Ra), à l'aide d'un rugosimètre Mututiyo Surf Test SV-400. Cette caractérisation constitue un indicateur clé de qualité de finition des surfaces des joints. La dureté locale de la zone soudée a été mesurée pour chaque échantillon, en appliquant une charge de 1 000 g avec un temps de maintien de 10 secondes.

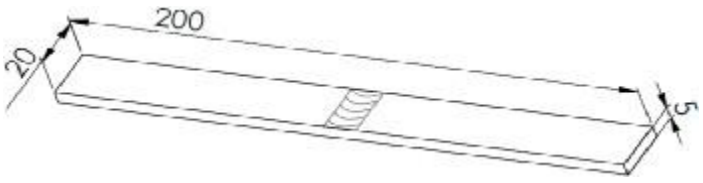


Figure II.8 : Géométrie de l'éprouvette de flexion trois points

II.2.4.1 Effet de la vitesse de soudage sur la rugosité de la surface des joints soudés

La figure II.9 illustre l'influence de la vitesse de soudage sur la qualité du joint, évaluée par la rugosité moyenne arithmétique (Ra). Il apparaît qu'une augmentation de la vitesse de soudage affecte directement la rugosité de surface, ce qui peut avoir un impact significatif sur les propriétés mécaniques, la résistance à la corrosion, ainsi que sur l'aspect esthétique du joint soudé.

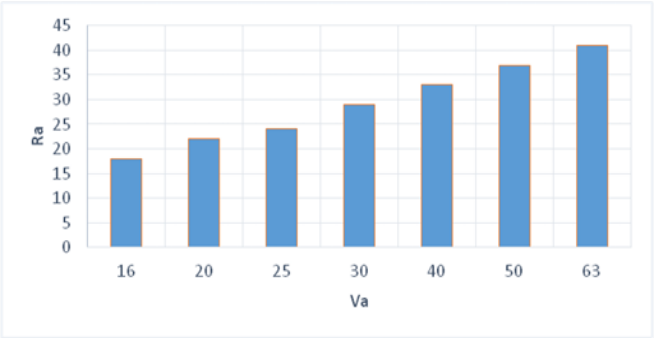


Figure II.9 : Effet de la vitesse de soudage sur la rugosité de la surface des joints soudés.



Figure II.10 : Appareil de rugosité.

Les résultats expérimentaux montrent que la rugosité maximale, atteignant 41 µm, est observée à une vitesse de rotation constante de 1 400 tr/min lorsque la vitesse d'avance est portée à 63 mm/min. À l'inverse, la rugosité minimale, de 18 µm, est obtenue à la même vitesse de rotation mais avec une vitesse de soudage réduite à 16 mm/min.

Ces observations sont en accord avec les travaux d'Abdullah et al. [131], qui ont mis en évidence une augmentation de la rugosité avec l'augmentation de la vitesse de soudage. Toutefois, d'autres études [82,132] rapportent une tendance inverse, suggérant que la rugosité peut diminuer avec l'augmentation de la vitesse de soudage, ce qui souligne la complexité du phénomène et l'influence potentielle d'autres paramètres tels que la géométrie de l'outil, la force d'appui ou les caractéristiques du matériau.

II.2.4.2 Mesures de la micro-dureté

L'évaluation de la dureté a été effectuée à l'aide du dispositif SHIMADZU HMV-2000, figure II.11. Une charge de 1000 grammes a été appliquée pendant une durée de 10 secondes à chaque

point de mesure. Conformément à la méthode Vickers (HV), les empreintes ont été espacées de 2 mm sur une longueur totale de 28 mm.



Figure II.11 : Micro duromètre

Il est crucial de réaliser un polissage préliminaire des échantillons avant toute évaluation de micro-dureté, pour garantir une surface sans stries susceptibles d'influencer la pénétration du pénétrateur. Cette procédure s'effectue grâce à une polisseuse mécanique, figure II.12, en suivant un processus graduel qui fait appel à des papiers abrasifs Si-C avec une granulométrie de plus en plus fine (600, 800, 1000, 1200 ,1500).



Figure II.12 : Polisseuse mécanique du type P 260 MECAPOL.

Dans la majorité des soudures réalisées, une variation significative de la dureté a été observée dans les différentes zones du joint soudé par friction-malaxage (FSW) de l'alliage AA5083-H111, comme illustré à la figure II.10. L'utilisation d'un outil à pion cylindrique a permis d'obtenir une distribution symétrique de la dureté par rapport à l'axe central du trou de FSW, quelle que soit la vitesse de soudage de l'outil et à vitesse de rotation constante.

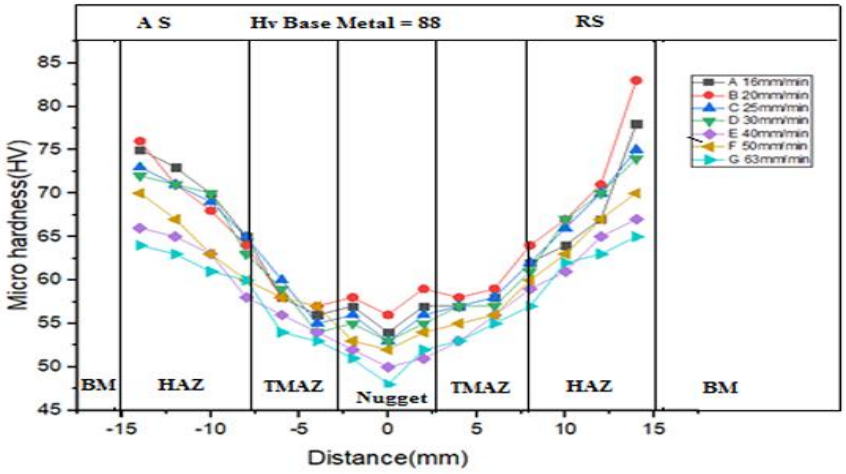


Figure II.13 : Variation de la micro-dureté

Il a été observé que la zone affectée thermiquement (ZAT) présente une dureté généralement plus élevée que celle de la zone soudée (ZS) et de la zone thermo mécaniquement affectée (ZATM). Cette diminution de dureté dans les zones ZS et ZATM est principalement attribuée au grossissement des grains et à la dissolution des précipités de renforcement, induits par les effets de vieillissement thermique.

La dureté mesurée dans les ZAT peut être inférieure de 20 à 30 % à celle du matériau de base, ce qui en fait un point critique du joint soudé, potentiellement plus vulnérable à la rupture sous contrainte mécanique.

On a enregistré une dureté maximale de 82 HV, relevée dans la zone affectée thermiquement (ZAT) du côté du retrait (RS) à une vitesse de soudage de 20 mm/min, alors qu'elle s'est établie à 75 HV du côté avance (AS). Cette variation est majoritairement due à une taille de grains plus fine et à une densité accrue de dislocations dans la zone de malaxage, ce qui favorise un durcissement localisé [133].

II.2.4.3 Les essais de flexion

Le test de flexion est une technique d'évaluation cruciale pour examiner les caractéristiques mécaniques et l'efficacité des soudures par friction-malaxage (FSW), spécifiquement pour l'alliage d'aluminium AA 5083-H111. Des tests de flexion à trois points ont été effectués sur tous les échantillons, de A à G, en utilisant un équipement CONTROLAB, figure II.14 et les résultats sont illustrés dans les figures II.15 et II.16. Les tests ont été réalisés à la fois sur la surface et l'arrière du joint, dans le but de mieux comprendre la ductilité et la résistance à la rupture des soudures FSW. La plupart des joints ont montré une bonne ductilité, en particulier celui obtenu à 1 400 tr/min avec une avance de 20 mm/min, configuration B, ou la flèche maximale atteinte est de **41 mm**, avec une **efficacité d'environ 90 %** par rapport au matériau de base. Cette performance est attribuée aux **températures élevées générées lors du procédé FSW**, qui ont permis un **ramollissement adéquat du matériau de base**, favorisant ainsi une **meilleure résistance à la flexion** [134].



Figure II.14 : Machine de flexion CONTROLAB



Figure II.15 : Les essais de flexion trois points.

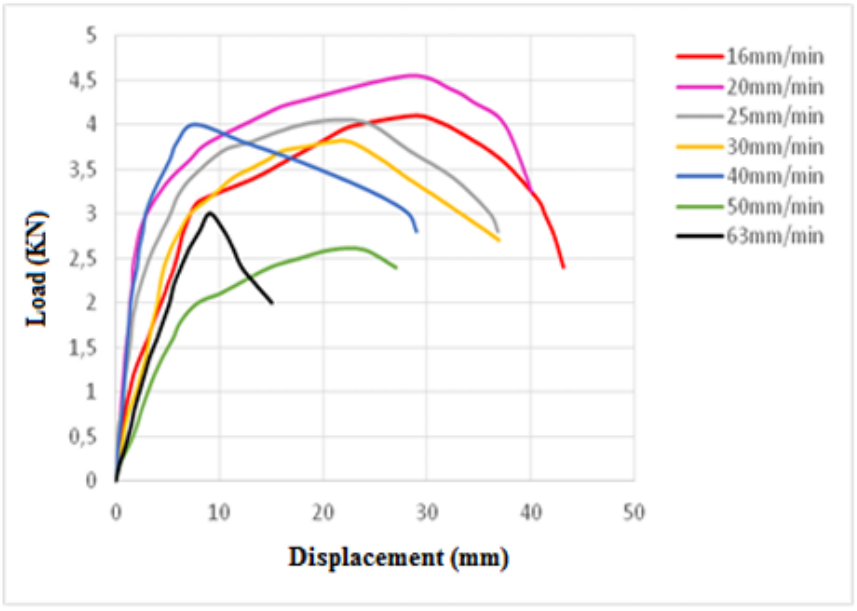


Figure II.16 : Essais de flexion trois points-déplacement

Dans la configuration G (avec une vitesse d'avance de 63 mm/min), on a noté une montée brusque de la force approximativement à 15 mm d'enfoncement, due à un glissement momentané entre les échantillons de flexion et les mâchoires de l'instrument. Cependant, ce déplacement n'a pas eu d'impact sur les résultats globaux, car il s'est produit de façon uniforme sur toutes les éprouvettes, préservant ainsi la possibilité de comparaison entre le matériau initial et les soudures [135].

On peut établir une corrélation entre les résultats des tests de flexion et les caractéristiques microstructurales des soudures, telles que la taille et la distribution des grains, les propriétés de la zone affectée thermiquement (ZAT), ainsi que la présence de défauts. Cette corrélation permet de mieux comprendre comment les modifications microstructurales induites par le procédé FSW influencent les performances mécaniques des joints soudés.

Le tableau II**.**3 présente les résultats des tests de flexion effectués sur tous les joints FSW, qui ont été fabriqués à une vitesse de rotation de 1 400 tours par minute et soumis à des vitesses de soudage de 16, 20, 25, 30, 40, 50 et 63 mm/min. Les anomalies détectées sont essentiellement des insuffisances de pénétration, des cavités du genre « wormholes », des espaces vides et aussi des défauts à la racine du joint [136]. D'autres anomalies observées incluent des inclusions riches en fer, qui, selon les analyses, peuvent être classées comme des particules d'oxyde de fer présentes dans la soudure.

Pour les trois premiers cas où les vitesses de soudage étaient de 16, 20 et 25 mm/min, les résultats post-essai de flexion ont montré que les éprouvettes n'ont présenté aucune rupture, ce qui indique une bonne qualité de liaison entre les matériaux soudés. De manière générale, dans l'ensemble des essais FSW réalisés, il apparaît que la vitesse de rotation et la vitesse d'avance influencent fortement la qualité de courbure et la résistance à la flexion, en agissant sur la quantité de chaleur générée dans les zones de soudure [136].

Tableau II.3 : Défauts obtenus sur les éprouvettes

V, mm/min / Angle of Bend, °	Weld photos	Observations
16 / 80		No fracture
20 / 83		No fracture
25 / 83		No fracture
30 / 86		Crack on bend surface
40 / 80		Crack on bend surface
50 / 80		Crack on bend surface
63 / 82		Crack on bend surface

II.2.4.4 Microstructure et propriétés des joints FSW

Le procédé de soudage par friction-malaxage (FSW) appliqué à l'alliage d'aluminium AA 5083-H111, fréquemment employé dans le secteur maritime et automobile, provoque des changements microstructuraux spécifiques du métal en fusion. L'observation des microstructures dans les zones de soudure a été réalisée au microscope optique, et les images microscopiques associées sont illustrées à la figure II.17, bien que toutes les surfaces de rupture présentent des cupules caractéristiques d'une rupture ductile, des variations de taille et de forme de ces cupules ont été relevées. Par ailleurs, certaines zones planes sans cupules sont visibles sur la figure II.17,

indiquant une fracture ductile localisée. En revanche, la figure II.17 révèle la présence de nombreux défauts tels que des vides, des fissures et des porosités.

L'augmentation de l'apport thermique tend à réduire la dureté dans la zone affectée thermiquement (ZAT**)**, où la recristallisation ne se produit pas. Les marques en rivière divergentes vers le bas sur la surface des **traces d'outil,** figure 17b, et vers le haut à l'extrémité des anneaux d'oignon non consolidés, figure 17d, indiquent les zones principales d'initiation des fissures dans le tunnel de soudure.

La zone affectée thermiquement (ZAT) montre une taille de grain supérieure en comparaison à la zone de mélange (ZF), où l'on remarque les grains les plus fins [63]. Dans la zone de coupe, la température atteint son niveau maximal et le matériau subit une intense déformation plastique due à la rotation de l'outil. Ce phénomène provoque un perfectionnement notable des grains, menant à une microstructure à grains fins, habituellement de taille inférieure à celle du matériau initial.

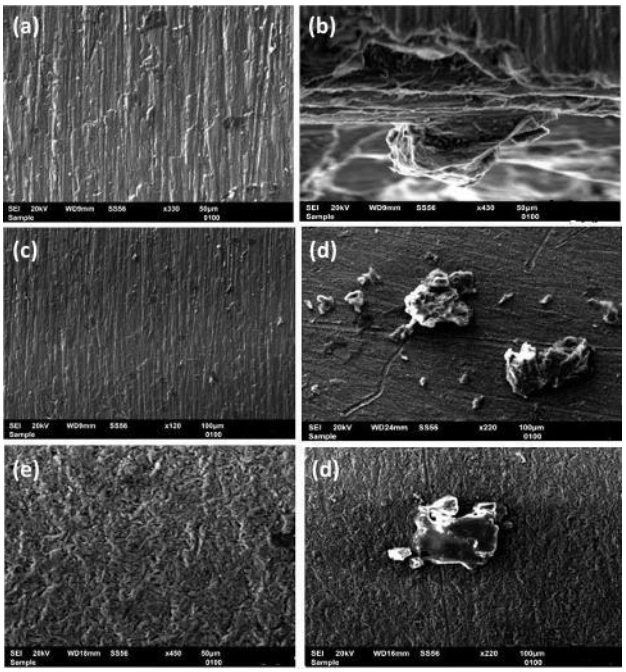


Figure II.17 : Image SEM DES enchantions soudées

La ZF comporte aussi une plus grande quantité de particules de seconde phase, de taille réduite, ce qui augmente le nombre de sites potentiels d'amorçage de fissures. Ainsi, cette zone devient un site privilégié pour l'initiation des fissures [137,138]. Cet effet synergique favorise un processus accéléré et approfondi de recristallisation dynamique, qui affine davantage les grains dans la ZF et déplace la fracture en dehors de cette zone [139].

Par ailleurs, la zone de malaxage peut présenter des motifs en "anneaux d'oignon", résultant de l'écoulement du matériau autour de l'outil rotatif. Ces motifs sont généralement visibles dans la microstructure et peuvent induire des variations locales des propriétés mécaniques.

II.2.5 Optimisation

Une approche d'optimisation expérimentale a été déployée pour approfondir la compréhension des processus liés à la technique de soudage par friction-malaxage (FSW) et pour perfectionner la qualité des joints fabriqués. Dans cette optique, les paramètres de soudage ont été soigneusement étudiés, en particulier la vitesse de rotation (1 000, 1 400 et 2 000 tours par minute) et la vitesse d'avance (20, 25 et 30 mm/min), afin de définir les conditions opératoires optimales

Cette méthode a permis d'établir des corrélations précises entre les paramètres de soudage, les caractéristiques microstructurales des zones affectées et les propriétés mécaniques des joints obtenus. Les résultats obtenus contribuent à une meilleure compréhension du comportement du matériau sous l'effet du FSW, tout en offrant des perspectives d'amélioration en termes de résistance mécanique, de qualité de surface et de durabilité des soudures.

II.2.5.1 Mesure de température

Des thermocouples de type K, figure II.18, ont été placés à divers points sur les pièces à souder, pour surveiller le profil thermique pendant le processus de soudage. L'acquisition précise des données thermiques a été réalisée grâce à l'utilisation d'un enregistreur GTH-1160 pour mesurer la température. Cette configuration expérimentale permet de prévoir précisément les changements de température dans la région de soudure, et par conséquent d'apprécier l'influence thermique sur la microstructure du matériau, en particulier en ce qui concerne la création des zones affectées et les modifications métallurgiques induites.



Figure II.18 : Thermocouple utilisé pour la mesure des températures.

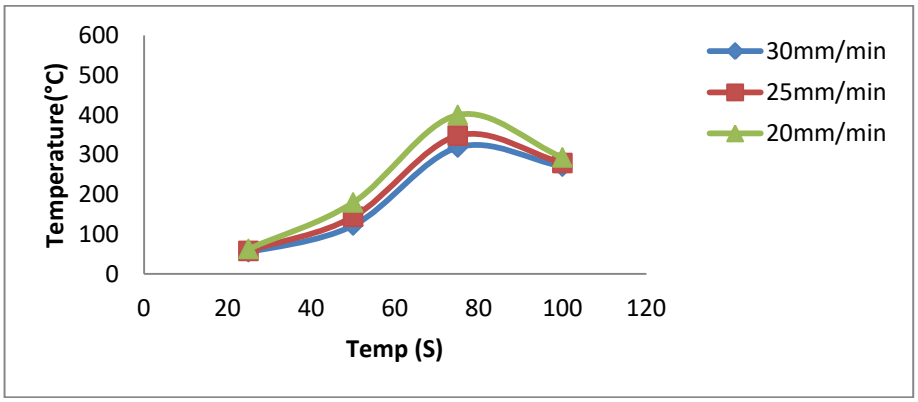


Figure II.19 : Variation de la température pour la vitesse 1000 tr/min

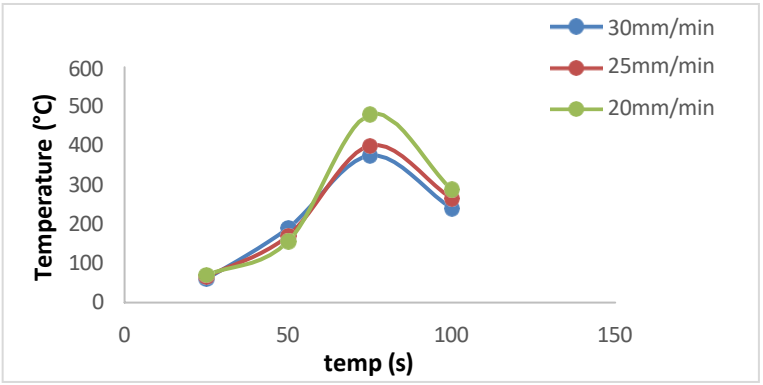


Figure II.20 : Variation de la température pour la vitesse 1400 tr/min.

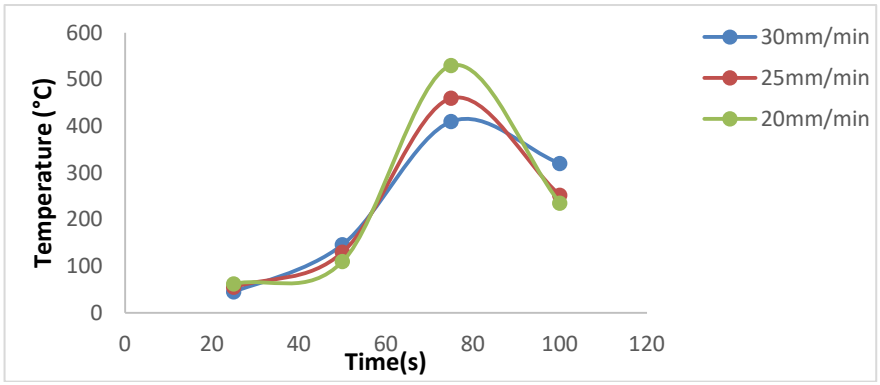


Figure II.21 : Variation de la température pour la vitesse 2000 tr/min.

Il est observé que les courbes thermiques présentent une forme similaire pour l'ensemble des paramètres étudiés. Les mesures effectuées à la surface du pion montrent une augmentation progressive de la température jusqu'à une valeur maximale, suivie d'une stabilisation durant le reste du cycle de soudage. La température maximale, atteignant 502 °C, est enregistrée pour une vitesse de rotation de 2000 tr/min et une vitesse d'avance de 20mm/min, tandis que la température minimale, estimée à 318°C, correspond à une vitesse de rotation de 1000 tr/min et vitesse d'avance de 20mm/min. On constate qu'à la fin du cycle, les températures deviennent pratiquement équivalentes, ce qui suggère qu'au début du cycle, les températures élevées sont localisées à la surface du pion, puis que la chaleur se diffuse progressivement vers la périphérie de celui-ci [140].

II.2.5.2 Mesure de rugosité

L'évaluation de la qualité de surface des échantillons soudés a été effectuée en déterminant la rugosité arithmétique moyenne (Ra). La figure II.22 montre les valeurs obtenues pour chaque configuration. L'analyse des résultats montre que les paramètres de soudage, notamment la vitesse de rotation de l'outil et la vitesse d'avance, ont une grande influence sur le mode de finition des éprouvettes soudées.

- **Vitesse de rotation de l'outil (rpm)** :

La vitesse de rotation de l'outil joue un rôle déterminant dans le comportement thermique et mécanique des joints soudés. Sur le plan de la qualité de surface, une augmentation de la vitesse de rotation entraîne une génération accrue de chaleur, favorisant un raffinement des grains et conduisant à une surface plus lisse. Toutefois, une surchauffe excessive peut engendrer un écoulement instable du matériau, susceptible de provoquer l'apparition de défauts internes tels que des discontinuités ou des irrégularités dans la zone soudée [144].

- **Vitesse d'avance de l'outil (mm/min)** :

La vitesse d'avance est un facteur crucial dans le processus de FSW, car elle détermine la durée du contact entre l'outil et le matériau. Une vitesse réduite permet à l'outil de maintenir un contact prolongé avec les pièces a soudés, favorisant ainsi un écoulement plastique idéal. Ce phénomène facilite le malaxage uniforme du matériau autour de l'outil, ce qui contribue à minimiser les irrégularités de surface et à obtenir une rugosité moyenne (Ra) plus faible. Cependant, si la vitesse de malaxage est trop rapide, le temps alloué pour le transfert thermique et la déformation plastique sera réduit, ce qui peut compromettre la qualité du malaxage. Ainsi, le matériau n'a pas assez de temps pour se plastifier et s'écouler de manière adéquate, ce qui peut provoquer des imperfections superficielles comme des stries. Ces défauts sont souvent associés à une rugosité accrue, traduisant une instabilité du processus et une diminution de la qualité de finition.

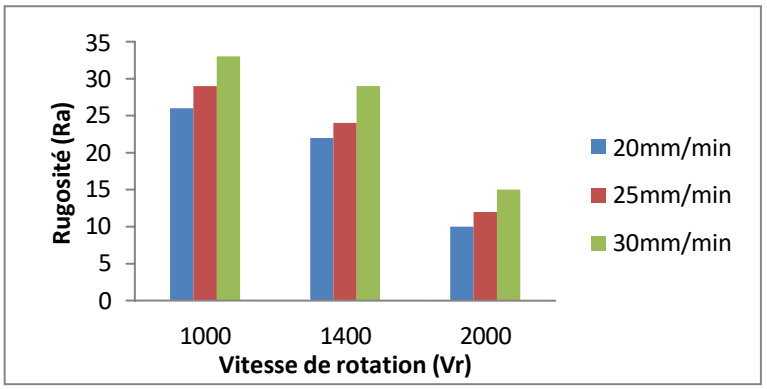


Figure II.22 : Mesure de rugosité pour différentes configurations.

La rugosité optimale est obtenue par un équilibre entre rotation et avance, trop de l'un ou trop de l'autre peut compromettre la qualité de surface.

II.2.5.3 Micro-dureté

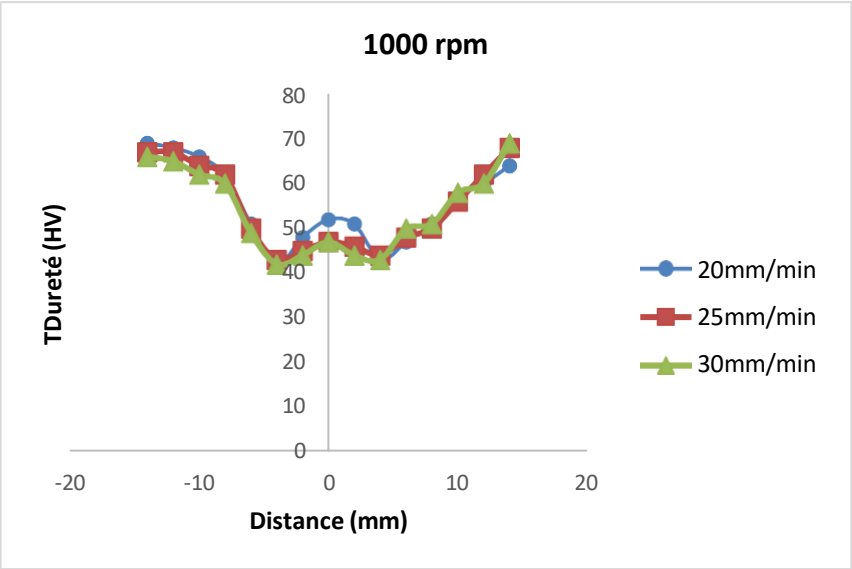


Figure II.23 : Mesure de la micro-dureté pour la vitesse 1000 tr/min

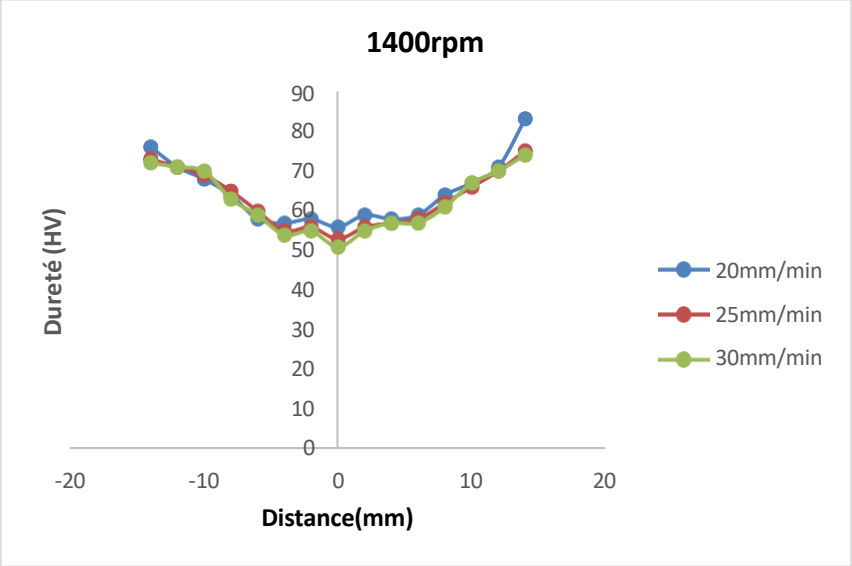


Figure II.24 : Mesure de la micro-dureté pour la vitesse 1400 tr/min

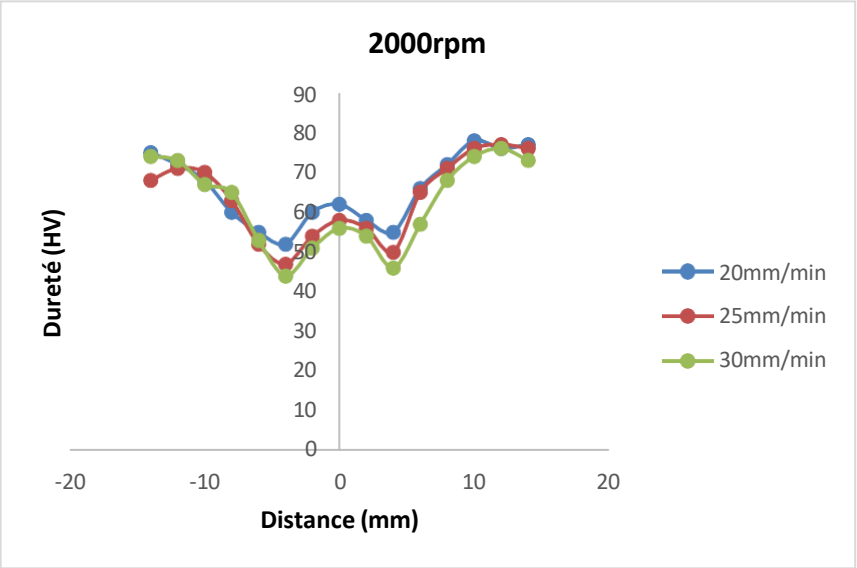


Figure II.25 : Mesure de la micro-dureté pour la vitesse 2000 tr/min

L'évolution de la micro-dureté en fonction de différentes vitesses de rotation (1000, 1400 et 2000 tr/min) et des vitesses d'avance (20, 25 et 30 mm/min) est représentée dans les figures 23, 24 et 25. Dans toutes les configurations analysées, nous avons observé que la micro-dureté se réduit par rapport au matériau initial dans les diverses zones de soudage.

Dans certaines configurations, la dureté diminue graduellement de la zone affectée thermiquement (ZAT) à la zone affectée par thermomécanique (ZATM), puis atteint un point bas avant de recommencer à augmenter vers la zone de malaxage (ZF). Cette différence est principalement due à la recristallisation des grains provoquée par le processus FSW dans la région de malaxage [141].

On observe aussi une légère baisse de la dureté dans la zone ZF lorsque la vitesse de soudage s'accroît [140]. La configuration 1 400 tours/minute – 20 mm/min obtient les meilleures valeurs de dureté, alors que la valeur la plus basse est notée dans la ZATM pour la configuration 1000 tours/minute – 30 mm/min.

L'élévation de la température lors du processus FSW est perçue comme la raison primordiale de l'assouplissement constaté dans certaines régions. On peut soutenir que l'étendue de la zone adoucie et les mesures de dureté obtenues dans cette région sont considérablement affectées par les paramètres du processus de soudage [142].

II.2.5.4 Test de flexion

Des tests de flexion à trois points ont été effectués sur des échantillons soudés par (FSW), en gardant une vitesse de rotation stable de 2000 tours par minute, dans le but d'examiner l'impact de la vitesse d'avance sur la qualité de la soudure et les caractéristiques mécaniques liées.

La figure II.26 présente les résultats expérimentaux, soulignant une fluctuation notable de la résistance selon la vitesse d'avance. La courbe associée à une vitesse de 20 mm/min indique la charge maximale la plus importante, signifiant une résistance mécanique accrue et une qualité d'adhésion supérieure. En comparaison, les configurations à 25 mm/min et 30 mm/min montrent une réduction de la charge maximale, suggérant une diminution de l'efficacité de la liaison soudée.

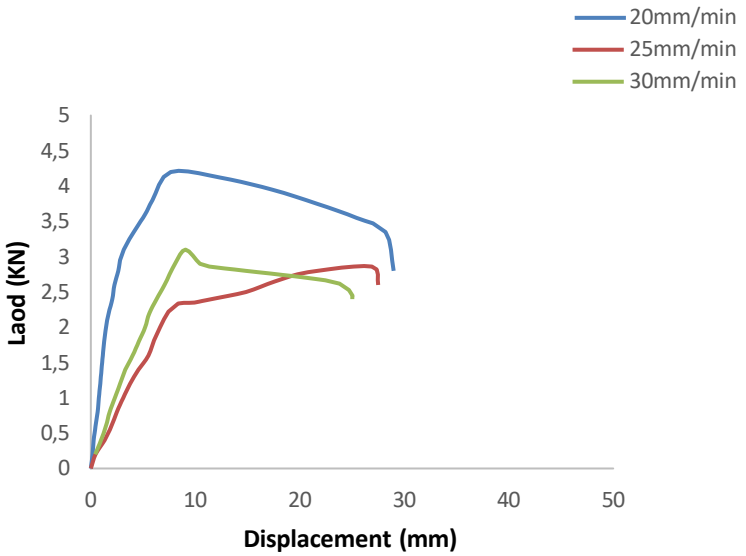


Figure II.26 : Essai de flexion pour la vitesse de rotation 2000 tr/min

On note également qu'à une vitesse de 30 mm/min, la flèche maximale (déplacement) est la plus faible, même si la charge maximale dépasse légèrement celle enregistrée à 25 mm/min. On peut imputer ce comportement à une modification de la ductilité ou de la rigidité des soudures.

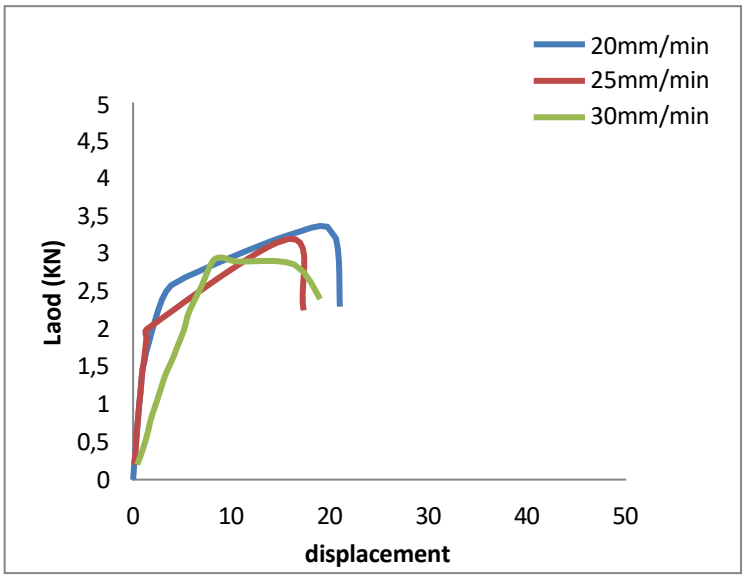


Figure II.27 : Essai de flexion pour la vitesse de rotation 1000 tr/min

Les résultats de flexion obtenus à une vitesse de rotation constante de 1000 tr/min correspondent parfaitement aux observations précédentes. On note une diminution progressive de la charge maximale et du déplacement lorsque la vitesse d'avance (Va) passe de 20 à 30 mm/min.

Des tests précédents ont démontré que la vitesse d'avance a une influence cruciale sur le profil thermique et la durée de plastification lors du processus FSW. Une vitesse d'avance réduite favorise une plastification plus efficace du matériau, menant à un joint plus uniforme et à une résistance mécanique améliorée. Cependant, une hausse de la vitesse d'avance diminue la durée de contact entre l'outil et le matériau, ce qui peut conduire à une soudure froide et à un renforcement insuffisant et la formation de défauts internes [143].

II.2.5.5 Test de traction

Une étude comparative a été menée entre une éprouvette soudée selon la configuration de 1400 rpm et 20 mm/min et le métal de base dans le cadre d'un essai de traction. Les résultats obtenus révèlent une diminution de 6 % de la résistance mécanique pour l'éprouvette soudée, mettant en évidence une altération modérée mais significative des propriétés mécaniques du matériau.

Cette réduction est principalement attribuée aux effets thermiques et métallurgiques induits par le procédé de soudage par friction-malaxage (FSW), en particulier dans la zone affectée thermiquement (ZAT). Les transformations microstructurales dans cette zone, telles que la recristallisation dynamique, la modification de la taille des grains et la présence potentielle de précipités dissous ou coagulés, peuvent altérer la résistance du matériau par rapport à son état initial [145].

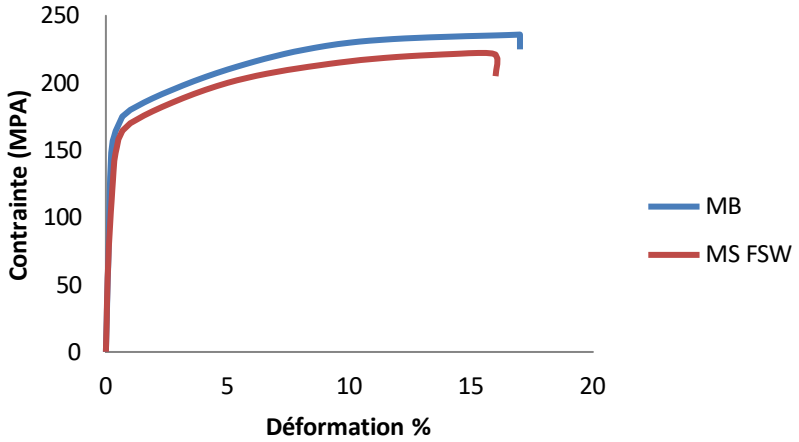


Figure II.28 : Courbe de traction comparative entre métal de base et métal soudé pour la configuration (1400rpm, 20mm/min).

Tableau II.4 : Propriétés mécaniques du métal soudé.

E MPa	YS MPa	UTS MPa	A %
66748	148	221	15,9

Bien que nous ayons observé une certaine diminution de performance, le taux d'efficacité calculé demeure élevé atteignant **94 %,** ce qui témoigne d'une bonne conservation des propriétés mécaniques après soudage et d'une qualité globale satisfaisante du joint soudé.

II.2.5.6 Test de fatigue

Le seul essai de fatigue réalisation dans le cadre de cette étude, avant la mise hors service de notre machine universelle, a servi à mieux comprendre la résistance mécanique des assemblages réalisés par soudage par friction-malaxage (FSW), ainsi que d'évaluer l'efficacité du procédé, notamment dans les applications de réparation de structures endommagées.

- **Machine d'essai**

Les essais de fatigue ont étés réalisés sous air à température ambiante sur une machine servo-hydraulique INSTRON 8516 de capacité +/- 100 kN, en statique et +/- 50 kN, en dynamique. La machine, figure II.29, est disponible au laboratoire de fatigue du département de Génie Mécanique. Elle est pilotée par un ordinateur équipé du logiciel MTS (TestSuite) pour le pilotage et l'acquisition des données. Le suivit de la propagation d'une fissure est assuré grâce à un montage d'une lunette binoculaire et d'un stroboscope, figure II.30.



Figure II.29 : Machine d'essai servo - hydraulique (Instron 8516)

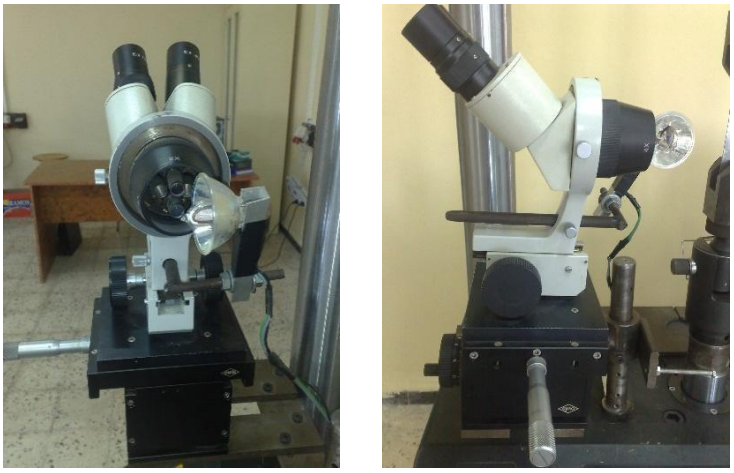


Figure II.30 : Montage de la lunette binoculaire et du stroboscope

La figure II.31 illustre l'évolution de la longueur de fissure (a) en fonction du nombre de cycles de chargement (N), L'éprouvette a d'abord été examinée dans son état initial (métal sain), puis réparée à l'aide de la FSW en utilisant la configuration de 1400 rpm et 20 mm/min, avant d'être soumise à un second essai de fatigue.

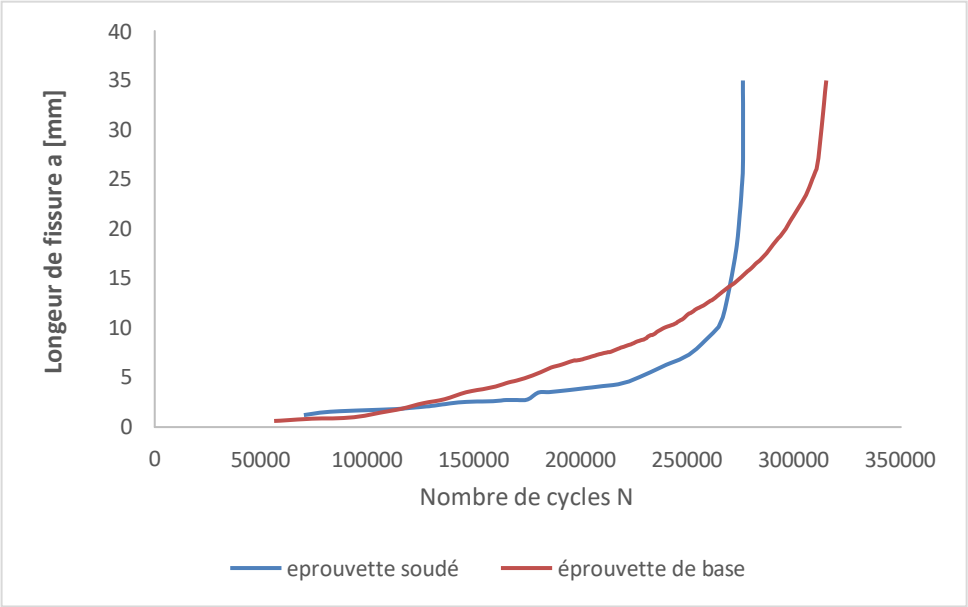
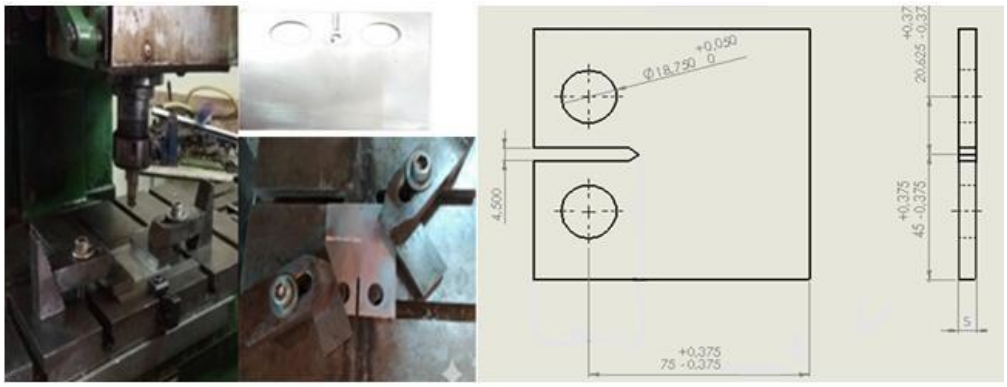


Figure II.31 : Longueur de fissure a en fonction du nombre de cycles N à ΔP=constante pour l'éprouvette soudé et saine.



A B

Figure II.32 : A) Préparation de l'éprouvette, B) géométrie de l'éprouvette e CT75.

Lors de la première épreuve de fatigue effectuée sur l'éprouvette saine, le début de la fissure a été constaté après Na = 70 000 cycles, sous une contrainte maximale de 2500 N et un ratio de charge R = 0,1. Avant la rupture, la longueur de fissure atteinte était de a = 26,7 mm, ce qui correspondait à un total de N = 310 000 cycles. La courbe de propagation associée à cette éprouvette, représentée en orange, révèle une croissance plus rapide de la fissure pour un nombre de cycles équivalent, en particulier dans la phase finale de l'essai, traduisant une diminution progressive de la résistance à la fatigue à mesure que la fissure progresse.

Pour comparaison, suite à une réparation par soudage, l'éprouvette a montré une longueur de fissure avant fracture de a = 22,6 mm, correspondant à un total de cycles N = 275 000. Même si la durabilité finale est légèrement inférieure à celle de l'éprouvette saine, les données indiquent une meilleure résistance à la fatigue durant les phases premières de propagation.

La courbe liée à l'éprouvette réparée (en bleu) indique une progression de fissure plus modérée, ce qui témoigne d'une résistance renforcée à la fatigue suite à la réparation. Ce comportement indique que le procédé FSW a efficacement rétabli les caractéristiques mécaniques du matériau, spécifiquement dans la zone malaxée. En effet, l'affinement de la microstructure et la diminution des anomalies internes favorisent une diminution de la progression des fissures sous charges cycliques.

II.3 CONCLUSION

Dans le cas du soudage par friction-malaxage (FSW) de l'alliage d'aluminium AA5083-H111, les paramètres de soudure influencent considérablement le comportement en flexion à trois points et la qualité de surface des soudures. Un réglage optimal des paramètres assure une distribution thermique appropriée et un flux uniforme du matériau, conduisant à une amélioration des caractéristiques mécaniques et de la qualité de surface. Toutefois, une vitesse trop élevée peut provoquer une mauvaise jointure et l'apparition des défauts en surface, ce qui pourrait nuire à la performance mécanique du joint soudé.

Modélisation & Simulation numérique

III.1 INTRODUCTION

Dans le domaine industriel, il est essentiel de modéliser les produits et les phénomènes physiques liés afin de prévoir leur comportement durant leur utilisation. À cet effet, la méthode des plans d'expériences (Design of Experiments, DOE) s'impose comme un outil méthodologique stratégique, permettant d'optimiser les conditions expérimentales de manière économique et rationnelle. Elle contribue à réduire le nombre d'essais nécessaires, à améliorer la qualité des produits, et à minimiser les coûts et les délais de développement. Le but principal de cette recherche est d'élaborer un modèle mathématique basé sur l'analyse de la variance (ANOVA) afin de diminuer le nombre d'expérimentations requises pour optimiser le processus de soudage. Dans ce but, une campagne expérimentale a été réalisée pour mesurer l'impact des paramètres de soudage sur différentes réponses importantes, y compris la température produite, la charge appliquée et la micro dureté au niveau du noyau des joints. Un plan d'expériences a été mis en place afin de déterminer rationnellement les facteurs les plus importants. Les résultats ont démontré que la vitesse de rotation et la vitesse d'avance sont les paramètres les plus significatifs, ayant un impact crucial sur la qualité des soudures.

III.2 MÉTHODOLOGIE DES PLANS D'EXPÉRIENCES (DOE)

III.2.1 Définition

Les plans d'expériences ANOVA (Analyse de la Variance) sont des structures expérimentales élaborées pour examiner l'impact de plusieurs facteurs sur une ou plusieurs variables dépendantes, tout en offrant une analyse statistique précise des résultats. Ils se basent sur la modélisation linéaire des données et ont pour objectif de mesurer l'impact des facteurs (également connus sous le nom de variables explicatives) ainsi que leurs interactions.

Cette méthode cherche à établir un lien entre deux sortes de grandeurs :

a) La réponse

Aussi connue sous le terme de variable dépendante (VD), la réponse expérimentale désigne une caractéristique physique quantifiable qui définit un produit ou un processus. Elle représente le cœur de l'analyse, dont la fluctuation est examinée en relation avec les changements effectués sur les facteurs expérimentaux. Cette sélection de réponse n'est pas triviale et va au-delà du cadre théorique des plans d'expériences standards. Cela nécessite une étude détaillée des phénomènes physiques en jeu, ainsi que la considération des défis scientifiques, des buts de l'enquête et des restrictions techniques. Ce processus méthodique est essentiel pour repérer les réponses les plus appropriées, garantissant ainsi la crédibilité et la validité des conclusions tirées [146].

b) Les facteurs

Les facteurs expérimentaux, aussi nommés variables indépendantes (VI), font référence aux quantités physiques que le chercheur a la capacité de modifier dans le contexte d'un protocole expérimental. On suppose que ces facteurs ont un impact direct sur les fluctuations observées dans la réponse examinée. Elles peuvent être qualitatives, si elles sont déterminées par des catégories ou des attributs, ou quantitatives, si elles sont exprimées en valeurs mesurables. En fonction de leur portée, les facteurs peuvent être continus, s'ils sont capables d'assumer toute valeur dans une plage déterminée, ou discontinus, s'ils sont restreints à des valeurs discrètes. En outre, ils se différencient par leur niveau de contrôle : les facteurs contrôlables peuvent être directement ajustés par l'expérimentateur (comme la vitesse de rotation ou la vitesse d'avance dans un procédé de soudage), tandis que les facteurs non contrôlables, bien qu'ils ne soient pas modifiables, demeurent importants pour l'analyse (tels que les conditions ambiantes ou les caractéristiques intrinsèques du matériau) [146], [147].

III.2.2 Définition Interaction entre facteurs et réponse

Dans le cadre d'un plan d'expérience, on parle d'interaction entre facteurs quand l'influence d'un facteur sur la réponse est conditionnée par le niveau d'un autre facteur. En d'autres termes, les facteurs n'opèrent pas de façon isolée : leur impact combiné peut produire un effet global distinct de la simple somme de leurs effets individuels. Plus spécifiquement, une interaction entre deux facteurs, indiquée par AB, implique que l'effet du facteur A sur la variable de réponse diffère en fonction du niveau du facteur B. Cette interdépendance manifeste une synergie ou un antagonisme entre les deux paramètres, qui altère la réaction de façon non linéaire ou imprévisible.

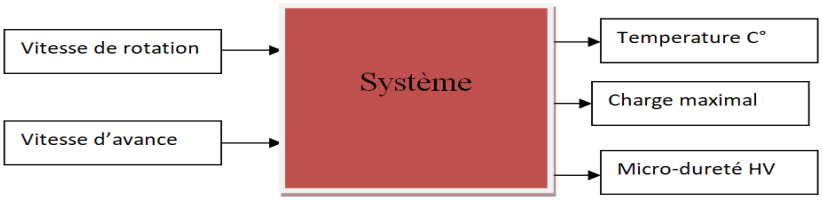


Figure III.1 : Relation entre paramètres du FSW (entrées) et les réponses mesurées (sorties).

III.2.3 Domaine d'applications des plans d'expériences

Dans le domaine de la recherche et développement industrielle, les plans d'expériences, qui constituent des éléments clés de la méthodologie expérimentale, sont largement employés. L'adoption de ces technologies s'est répandue dans divers secteurs, y compris la chimie, la pétrochimie, la pharmacie, l'automobile, l'aéronautique, l'agroalimentaire et l'électronique. Cela

est dû à leur potentiel d'optimisation des processus, de diminution du nombre d'essais requis et de détection des interactions significatives entre les facteurs influents [148].

III.3 MÉTHODOLOGIE DES SURFACES DE RÉPONSE (RSM)

L'approche des surfaces de réponse (RSM) représente une méthode statistique sophistiquée destinée à modéliser et optimiser les liens entre plusieurs variables indépendantes et une ou plusieurs réponses quantifiables. Elle s'appuie sur la création de modèles empiriques, souvent polynomiaux, qui illustrent le comportement du système examiné dans un espace expérimental déterminé. Cette démarche utilise des moyens comme les plans d'expérimentation, les méthodes de régression et les analyses de variance (ANOVA) dans le but de déterminer les effets majeurs et les interactions entre divers facteurs. Elle offre non seulement la possibilité de prévoir les résultats en fonction des paramètres opérationnels, mais aussi d'identifier les conditions idéales pour optimiser la performance d'un processus ou l'excellence d'un produit.

Dans le contexte de cette recherche, la RSM a été utilisée pour concevoir un modèle non linéaire dédié aux assemblages soudés en alliage d'aluminium AA 5083H111. Les résultats ont souligné que les vitesses de rotation et d'avance influencent de manière significative les réponses mesurées. Le modèle conçu offre la possibilité de prévoir la température produite lors du processus de soudage, ainsi que la charge maximale et la micro-dureté au centre, contribuant à une compréhension approfondie et à l'optimisation de la technique.

III.3.1 Modélisation et développement du modèle mathématique

Pour mener à bien les analyses statistiques indispensables à l'interprétation des données expérimentales dans cette recherche, le logiciel MODDE 5.0 a été employé. L'approche choisie est celle de la régression linéaire multiple (MLR), qui convient particulièrement à la modélisation des liaisons entre plusieurs variables autonomes et les résultats observés.

Après l'intégration des données expérimentales dans le programme, ce dernier se charge de traiter les informations et d'aider l'utilisateur à comprendre les résultats. Il permet également la prédiction des réponses en fonction des paramètres étudiés, facilitant ainsi l'optimisation du procédé et la prise de décision technique.

L'optimisation a été réalisée grâce à un modèle polynomial de deuxième degré, qui est donc quadratique, exprimé selon la structure suivante :

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^{3} ai\ xi + \sum_{1\leq i<j\leq 3} a_{ij}\ x_i x_j\ \sum_{i=1}^{3} a_{ii}\ {x_i}^2 + e \qquad \text{(III.1)}$$

Où a_0 est la valeur de réponse prédite au centre du domaine expérimental, ai représente l'effet du facteur, et aij représente l'interaction entre le facteur xi et xj.

Les modèles mathématiques obtenus permettent d'établir une relation fonctionnelle entre les paramètres d'entrée (vitesse de rotation Vr, vitesse d'avance Va) et les grandeurs de sortie telles que la charge maximale, la température, le déplacement et la micro dureté. Ces polynômes d'ajustement sont utilisés pour optimiser les paramètres de soudage en vue d'obtenir les réponses souhaitées.

Le tableau III.1 présente les résultats des neuf tests expérimentaux menés selon le plan d'expérimentation prévu. Le tableau III.2 présente une matrice d'expérience élaborée pour définir une relation fonctionnelle entre les paramètres d'entrée (opérationnels) et les résultats de sortie (réponses mesurées).

Tableau III.1: Résultats de la matrice d'expériences

N°	Vitesse de rotation (tr/min)	Vitesse d'avance (mm/min)	Charge (kN)	Déplacement (mm)	Micro-dureté (ZAT)	Temp. T4 (°C)
1	1000	20	3,3	21	64	348
2	1000	25	3,2	17	69	329
3	1000	30	2 ,95	19	69	318
4	1400	20	4,5	41	82	466
5	1400	25	4	38	75	400
6	1400	30	3,8	37	74	385
7	2000	20	4,2	29	78	502
8	2000	25	3,85	27,5	77	460
9	2000	30	3,3	25	76	410
10	1400	25	3,9	37	74	388
11	1400	25	4 ,2	38	75	400
12	1400	25	4	39	76	409

Tableau III.2: Matrice de réponses (Charge, Déplacement, dureté et Température).

N°	Vitesse de rotation (tr/min)	Vitesse d'avance (mm/min)	Charge (KN)	Déplacement (mm)	Micro-dureté (ZAT)	Temp. T4 (°C)
1	-1	-1	3,3	21	64	348
2	-1	0	3,2	17	69	329
3	-1	1	2 ,95	19	69	318
4	0	-1	4,5	41	83	466
5	0	0	4	38	75	400
6	0	1	3,8	37	74	385
7	1	-1	4,2	29	78	502
8	1	0	3,85	27,5	77	460
9	1	1	3,3	25	76	410
10	0	0	3,9	37	74	388
11	0	0	4 ,2	38	75	400
12	0	0	4	39	76	409

Les graphiques présentés aux figures III.2, III. 3, III. 4 et III. 5 démontrent que tous les points expérimentaux se trouvent dans les bornes de validation établies par le modèle. Cette correspondance entre les données réelles et les prévisions sert à confirmer la crédibilité des résultats expérimentaux [149], attestant de ce fait de la solidité du modèle statistique employé pour l'analyse.

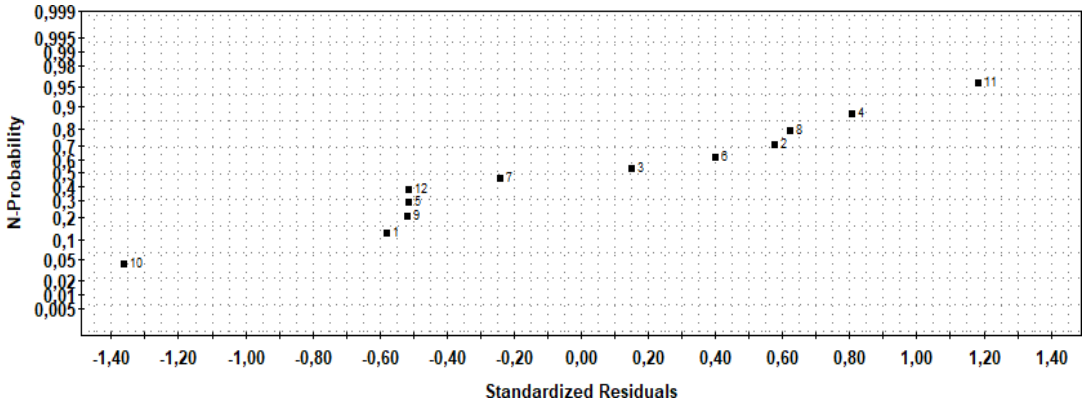


Figure III.2 : Intervalle de confiance du modèle, (Charge).

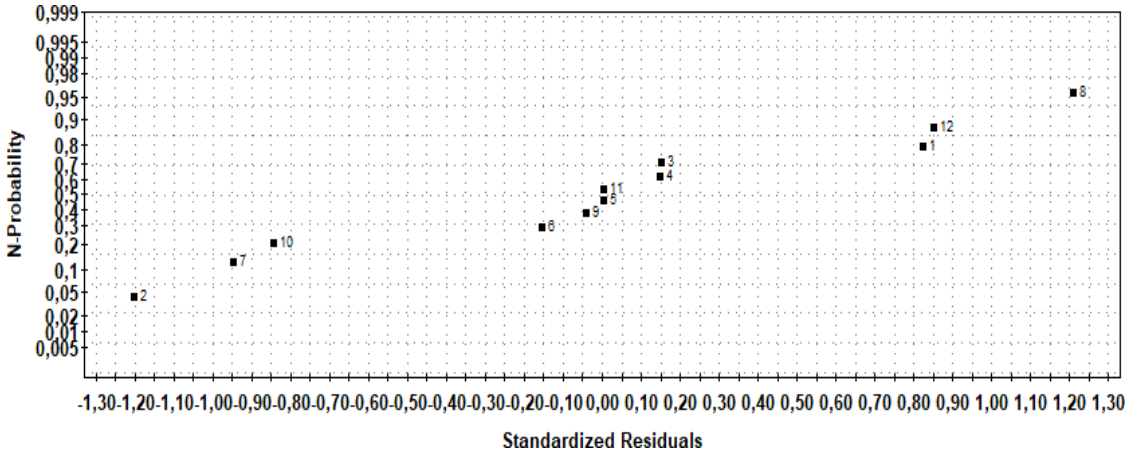


Figure III.3 : Intervalle de confiance du modèle, (Déplacement).

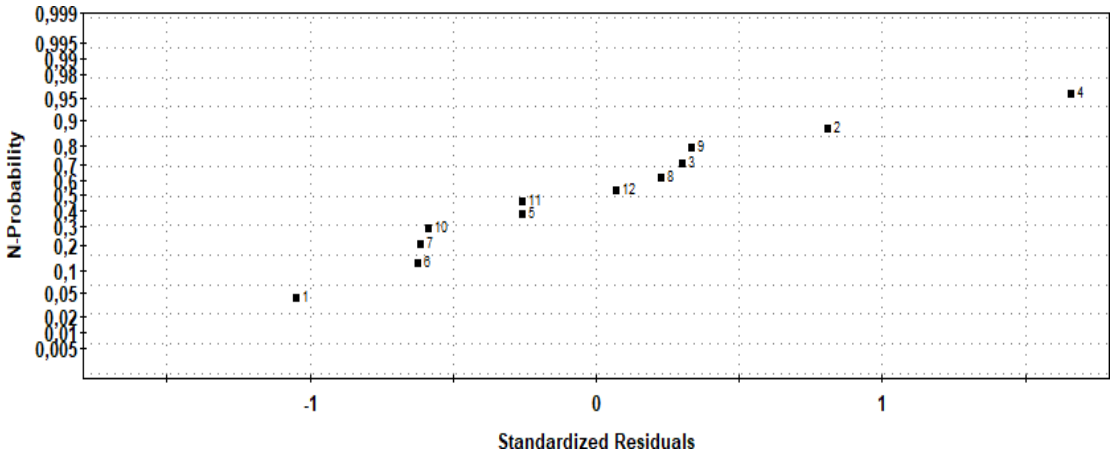


Figure III.4 : Intervalle de confiance du modèle, (Dureté).

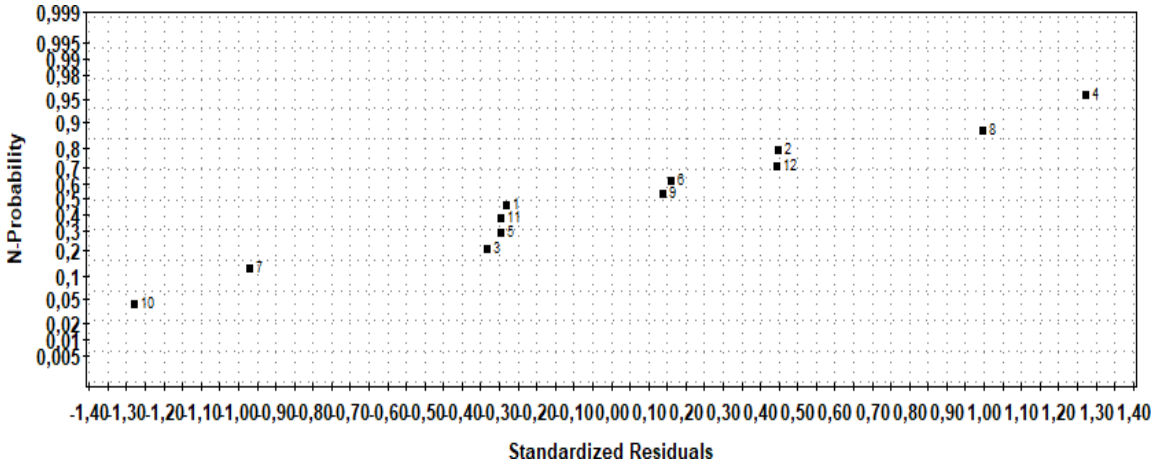


Figure III.5 : Intervalle de confiance du modèle, (Température).

III.3.1.1 Modèle mathématique

Les modèles mathématiques proposés par MODDE 5.0 sont :

$$(Charge) = 4{,}06066 - 0{,}240662 * \mathrm{Va} + 0{,}238023 * \mathrm{Vr} + 0{,}00996243 * Va^2 - 0{,}330677 * Vr^2 - 0{,}0588247 * \mathrm{Va} * \mathrm{Vr} \quad \text{(III. 2)}$$

$$(Déplacement) = 37{,}9963 - 1{,}34406 * \mathrm{Va} + 2{,}82751 * \mathrm{Vr} + 0{,}549613 * Va^2 - 8{,}59098 * Vr^2 - 0{,}663045 * \mathrm{Va} * \mathrm{Vr} \quad \text{(III. 3)}$$

$$(Dureté) = 75{,}7942 - 0{,}745229 * \mathrm{Va} + 3{,}6134 * \mathrm{Vr} + 0{,}610843 * Va^2 - 2{,}38631 * Vr^2 - 0{,}783993 * \mathrm{Va} * \mathrm{Vr} \quad \text{(III.4)}$$

$$(Temperature) = 403{,}597 - 24{,}912 * \mathrm{Va} + 45{,}9108 * \mathrm{Vr} + 7{,}19067 * Va^2 - 9{,}75056 * Vr^2 - 10{,}3834 * \mathrm{Va} * \mathrm{Vr} \quad \text{(III.5)}$$

III.3.2 Influence des paramètres FSW sur les résultats

Les graphiques examinés démontrent la fluctuation de la charge maximale, le déplacement, la micro-dureté et la température selon deux éléments cruciaux du processus FSW : la vitesse d'avancement (Va) et la vitesse de rotation (Vr). Ces graphiques ont été élaborés à partir des données expérimentales et modélisés selon l'approche des surfaces de réponse.

III.3.2.1 Charge maximale

Dans les trois configurations expérimentées, on note une réduction graduelle de la charge maximale lorsque la vitesse d'avance (Va) augmente. Cette tendance indique qu'une vitesse d'avance élevée réduit le temps d'interaction thermique entre l'outil et le matériau, ce qui peut compromettre la qualité de la liaison soudée et entraîner une baisse de la résistance mécanique lors des essais de flexion.

Pour ce qui est de la vitesse de rotation (Vr), la charge maximale montre une fluctuation non linéaire. Elle augmente initialement jusqu'à atteindre un maximum aux alentours de 1500 tr/min, puis diminue au-delà de cette valeur. Cette progression souligne la présence d'une plage idéale de rotation, où l'apport de chaleur est suffisant pour assurer une plastification efficace du matériau, sans provoquer de surchauffe ou d'anomalies internes. Cependant, si Vr excède cette plage optimale, une surchauffe peut affecter la microstructure du joint ou engendrer des défauts de métallurgie, conduisant à un affaiblissement des caractéristiques mécaniques.

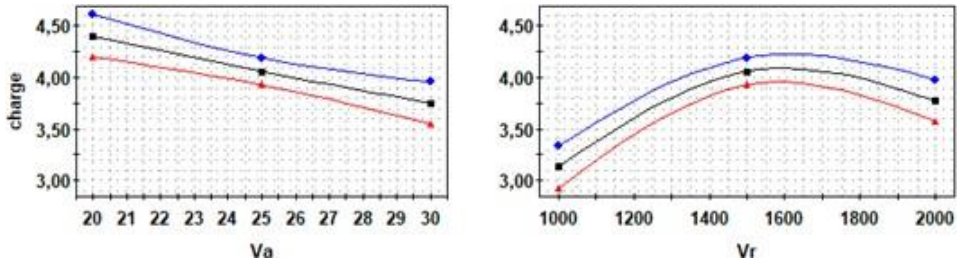


Figure III.6 : Relation entre paramètres du FSW et la charge maximale.

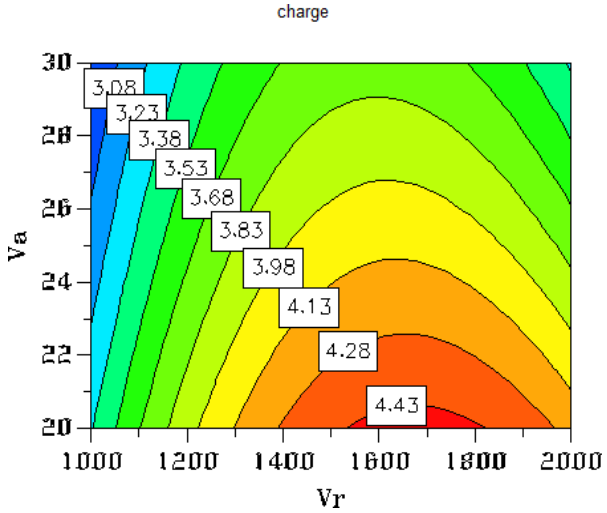


Figure III.7 : : Variation de la charge en fonction des paramètres FSW.

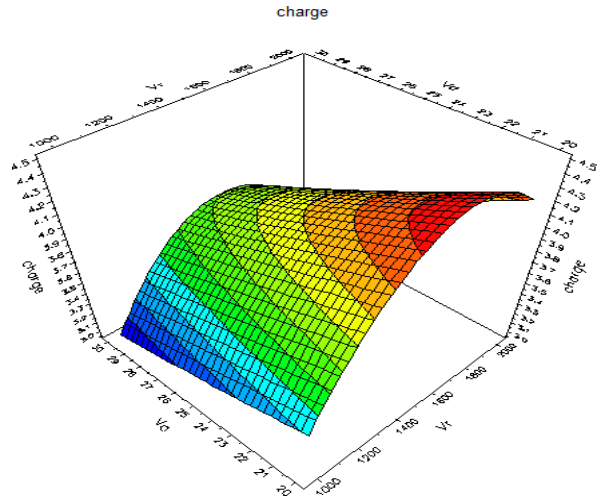


Figure III.8 : Variation tridimensionnelle (3D) de la charge en fonction de la vitesse de rotation et de la vitesse de soudage.

III.3.2.2 Déplacements

La figure III.9 représente l'évolution du déplacement en fonction de deux paramètres de soudage : la vitesse d'avance (Va) et la vitesse de rotation (Vr).

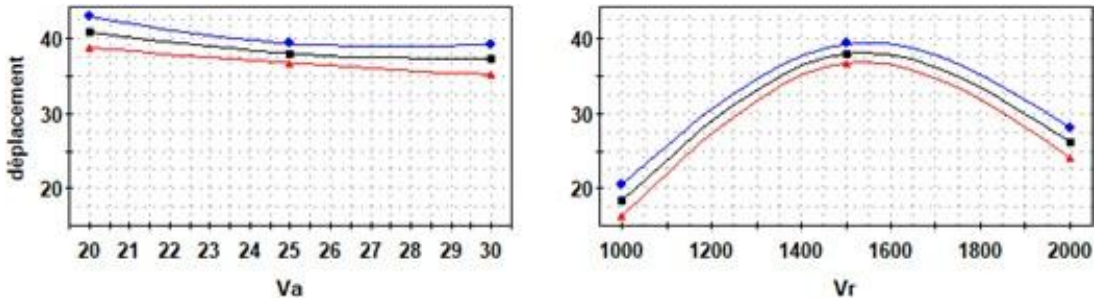


Figure III.9 : Relation entre paramètres du FSW et le déplacement.

Les courbes de gauche montrent que le déplacement diminue progressivement avec l'augmentation de la Va, quelle que soit la condition expérimentale. Les courbes à droite indiquent une fluctuation non linéaire du déplacement en fonction de la Vr. On observe une augmentation du déplacement jusqu'à un maximum situé autour de 1500 tr/min, suivie d'une légère diminution, Ce progrès indique une diminution de la flexibilité mécanique du joint soudé, possiblement due à un apport thermique excessif qui pourrait modifier la microstructure ou créer des anomalies internes, et par conséquent influencer la capacité de déformation du matériau sous contraintes.

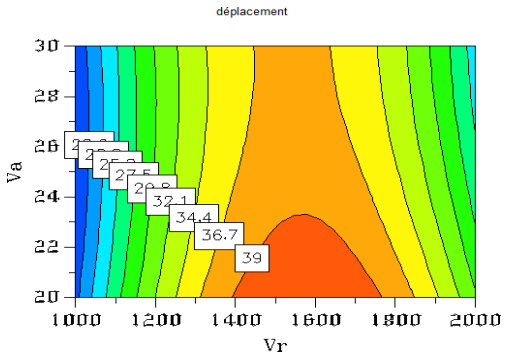


Figure III.10 : Variation de la flèche (déplacement) en fonction des paramètres FSW.

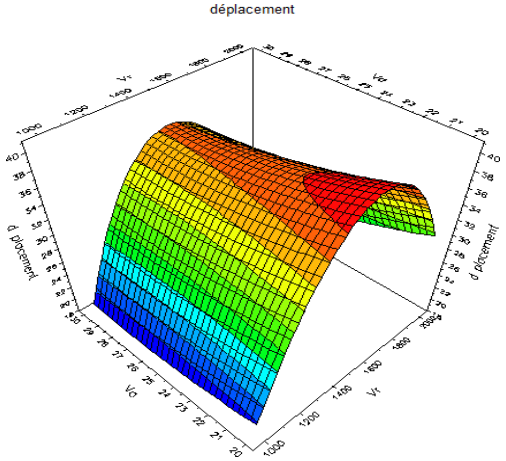


Figure III.11 : Variation tridimensionnelle (3D) de la flèche (déplacement) en fonction de la vitesse de rotation et de la vitesse de soudage.

III.3.2.3 Micro-dureté

La ZAT est une région sensible dans le FSW, où la microstructure est altérée par une température élevée sans fusion. Dans cette région, la micro-dureté témoigne de la qualité du joint, de la stabilité thermique et de l'efficacité du processus.

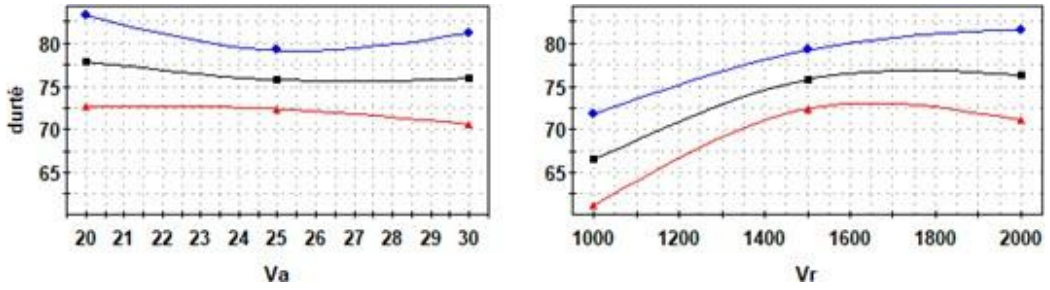


Figure III.12 : Relation entre paramètres du FSW et la dureté.

La figure III.12 *montre* que la vitesse d'avance (Va) a un impact relativement sur la microdureté des soudures réalisées par le FSW. Les fluctuations remarquées sont peu importantes et surtout notables à des vitesses d'avancement faibles et proches, indiquant une sensibilité limitée de cette caractéristique mécanique à ce facteur dans la plage étudiée.

Par contre, l'effet de la vitesse de rotation (Vr) est plus prononcé : une progression graduelle de la micro-dureté est notée avec l'augmentation de Vr, jusqu'à ce qu'elle atteigne un pic, signifiant une amélioration de la plastification et du raffinement microstructural dans la zone soudée. Cependant, au-delà de ce niveau optimal, une légère baisse de la micro-dureté est observée, sans doute en raison d'une surchauffe excessive.

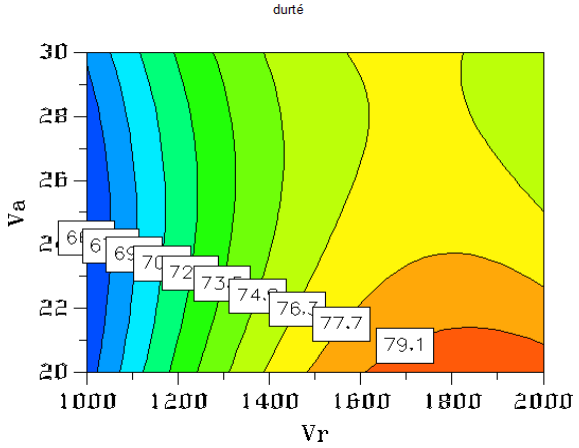


Figure III.13 : Variation de la dureté en fonction des paramètres FSW.

L'échelle de dureté varie de 66 HV à 79.1 HV, signalant la réactivité notable de la ZAT face aux conditions thermomécaniques générées par le processus.

Les zones de couleur bleue sur le diagramme de contours, qui représentent les valeurs les plus basses (66-70 HV), sont observées lorsque la vitesse de rotation est basse (≈1000 tr/min) et la

vitesse d'avance est élevée (≈28-30 mm/min). Cette configuration produit une énergie thermique inadéquate et un temps d'interaction diminué, entravant ainsi la recristallisation dynamique et encourageant l'apparition d'une microstructure plus granuleuse ou partiellement modifiée.

En revanche, les zones rouges (77-79 HV) se manifestent quand Vr est important (≈1500–2000 tr/min) et que Va est faible à moyenne (≈20–22 mm/min). Cette association favorise une production thermique plus forte et un mélange plastique idéal, menant à une recristallisation intégrale et à un affinage des grains, ce qui résulte en une amélioration significative de la dureté.

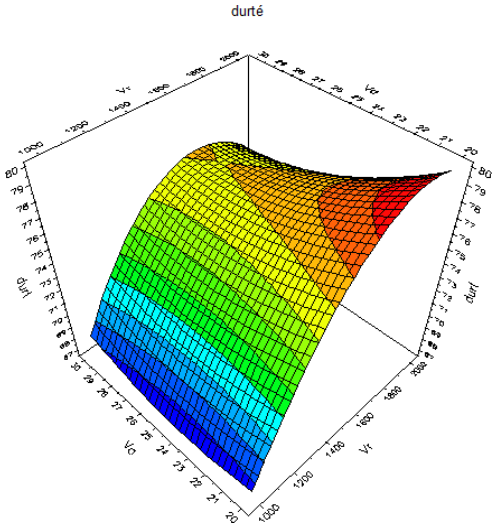


Figure III.14 : Variation tridimensionnelle (3D) de la dureté en fonction de la vitesse de rotation et de la vitesse de soudage.

III.3.2.4 Température

Les graphiques et le modèle 3D fournis permettent d'examiner l'influence des paramètres opérationnels sur la température produite lors du processus de soudage par friction-malaxage. Ce paramètre de température est essentiel, car il affecte directement la plastification du matériau, la création du joint, et la qualité métallurgique de l'assemblage.

Les figures III.15, III.16 et III.17 affichent des résultats qui concordent avec diverses études [150], [151], [152], attestant que la température produite pendant le soudage FSW s'élève avec l'accroissement de la vitesse de rotation (Vr) et se réduit avec l'augmentation de la vitesse d'avance (Va). Cette observation est attribuée à la friction accrue entre l'outil et le matériau causée par une vitesse de rotation plus grande, ce qui intensifie la production de chaleur. Par contre, une avance plus rapide diminue la durée du contact entre l'outil et la pièce, limitant ainsi le transfert de chaleur et entraînant une température réduite dans la zone affectée par la chaleur (ZAT).

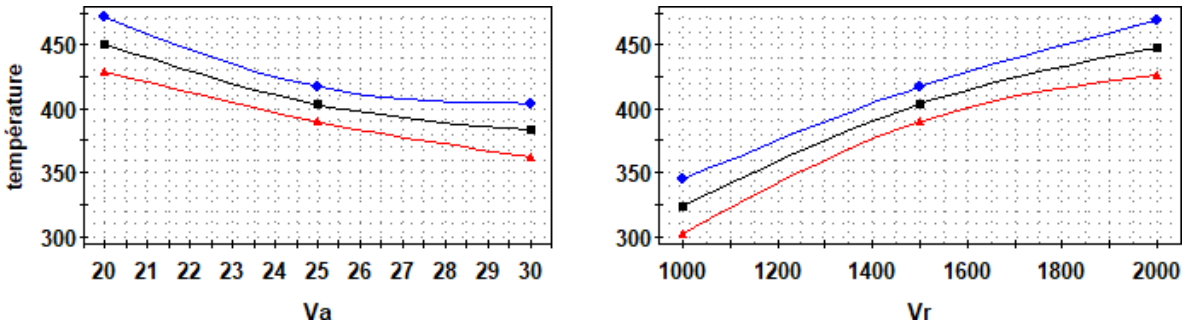


Figure III.15 : Relation entre paramètres du FSW et la température.

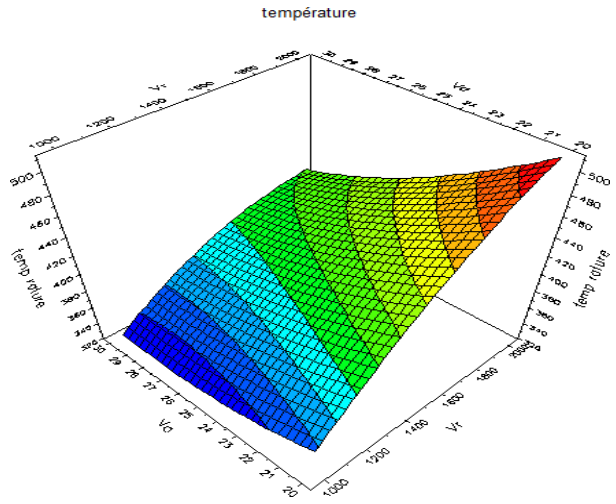


Figure III.16 : Variation tridimensionnelle (3D) de la température en fonction de la vitesse de rotation et de la vitesse de soudage.

La surface 3D confirme ces tendances en montrant une augmentation combinée de la température lorsque Vr augmente. Les zones rouges indiquent des régions thermiquement intensives, tandis que les zones bleues correspondent à des conditions plus froides.

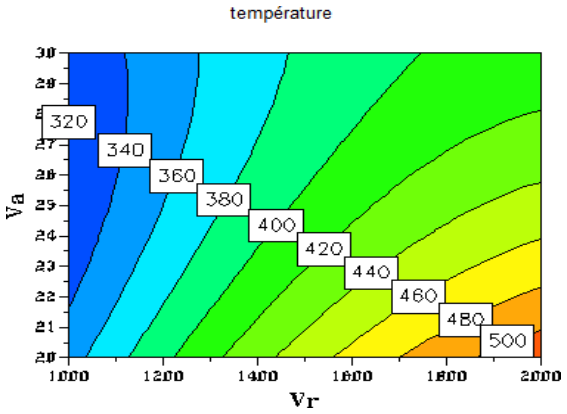


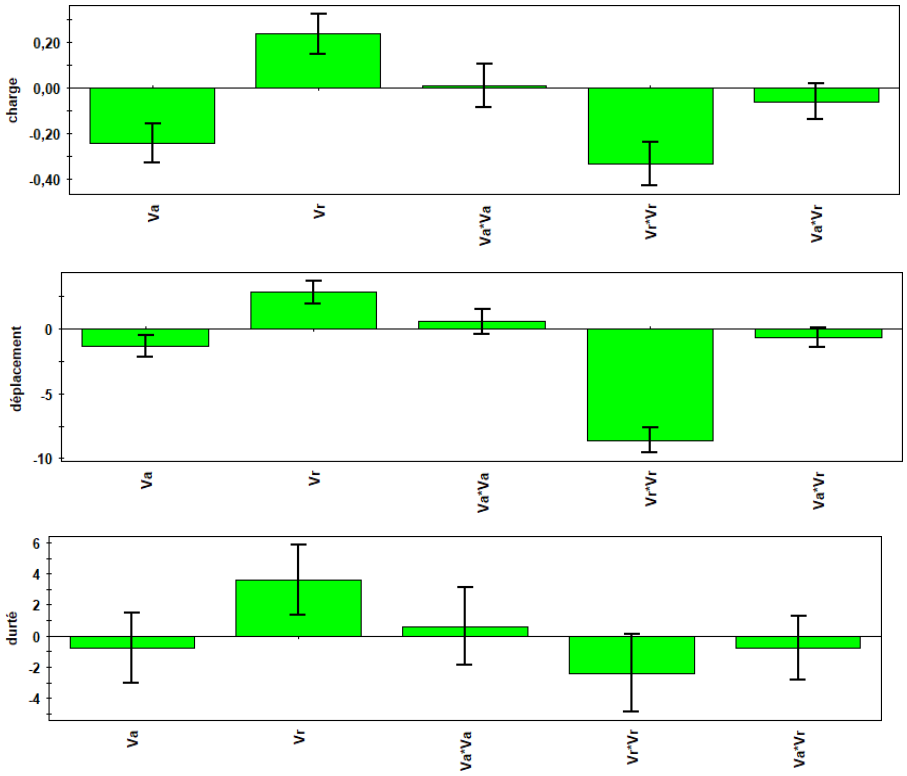
Figure III.17 : Variation de la température en fonction des paramètres FSW.

III.3.3 Effets des interactions sur les résultats

Les résultats présentés dans les quatre graphiques en barres, figure III.8, illustrant les effets principaux et les interactions des paramètres de soudage FSW sur différentes réponses mécaniques et thermique :

L'étude des effets principaux ainsi que des interactions entre les paramètres de soudage, à savoir la vitesse d'avance (Va) et la vitesse de rotation (Vr), met en évidence leur impact distinct sur les réponses mécaniques et thermiques du processus FSW. Les données indiquent que Vr a un impact notable et habituellement bénéfique sur la charge maximale, le déplacement en flexion, la dureté et la chaleur produite, démontrant une progression de la plastification et de l'état du joint jusqu'à un niveau optimal. Par contre, Va a des impacts légèrement négatifs sur la charge et le déplacement, tout en contribuant à la réduction de la dureté et la température, grâce à un temps de contact réduit entre l'outil et le matériau.

Les effets quadratiques (Va^2, Vr^2) et l'interaction croisée ($Va \cdot Vr$) mettent en évidence des réactions non linéaires dans la réponse du processus FSW. Plus précisément, ils soulignent des phénomènes comme la saturation thermique ou le durcissement du joint à des vitesses de rotation élevées, qui pourraient affecter les caractéristiques mécaniques du soudage. Ces conclusions mettent en évidence l'importance d'un réglage précis et équilibré des paramètres opératoires pour parvenir à un compromis optimal entre la résistance mécanique, la ductilité, la stabilité thermique et l'efficacité du processus.



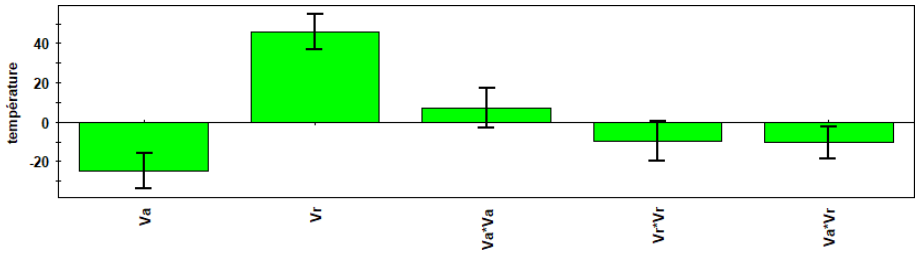


Figure III.18 : Effets des facteurs sur les résultats et leur interaction

III.4 CONCLUSION

L'objectif principal de cette étude était de comprendre et d'expliquer les interactions entre les paramètres mentionnés ci-dessus, et de mettre en évidence l'effet de chacun sur les réponses.

Les résultats obtenus soulignent que les paramètres de soudage FSW, notamment la vitesse de rotation (Vr) et la vitesse d'avance (Va) ont un impact crucial sur les réponses mécaniques (charge maximale, déplacement, dureté) ainsi que thermiques (température) du processus. Une rotation optimale combinée à une avance modérée permet d'obtenir des joints de soudure de haute performance, qui sont à la fois solides et déformables, tout en conservant un contrôle thermique approprié. Inversement, des vitesses trop élevées ou mal équilibrées peuvent provoquer une surchauffe, un durcissement du joint, ou une dégradation de la ductilité. Les effets quadratiques et les interactions entre paramètres révèlent des comportements non linéaires, soulignant la nécessité d'une optimisation multiparamétrique pour garantir un équilibre entre qualité du joint, efficacité opérationnelle et stabilité thermomécanique du procédé FSW.

La technique du soudage par friction-malaxage (FSW) marque sa place dans l'industrie moderne grâce à son efficacité énergétique et sa fiabilité mécanique. Surtout pour les assemblages d'alliages d'aluminium, la recherche bibliographique dans cette thèse met en évidence l'importance de ce procédé en soulignant ses avantages par rapport aux techniques de soudage conventionnelles.

L'objectif principal de ce travail étaient de mieux comprendre ce procédé en l'appliquant à l'assemblage de tôles en alliage d'aluminium AA5083-H111, une étude paramétrique vise à analyser l'impact des paramètres de soudage sur le comportement des assemblages, afin d'identifier les conditions optimales garantissant à la fois la performance mécanique et la fiabilité des soudures. Le défi était d'obtenir des bons résultats en termes de résistance mécanique en flexion et de qualité de surface des joints soudés.

L'analyse expérimentale présentée dans le deuxième chapitre montre la relation entre les paramètres opératoires du FSW, en particulier la vitesse de rotation et la vitesse d'avance, et la caractéristique mécanique des soudures obtenues. Dans une première étape, l'étude a porté sur l'effet de la vitesse d'avance sur le comportement des joints soudés. Les résultats ont montré que l'augmentation de ce paramètre joue un rôle crucial dans la performance des assemblages, influençant directement leur résistance et leur qualité.

Dans une seconde phase, l'objectif était de déterminer les conditions idéales pour optimiser la performance générale des assemblages. Plusieurs configurations expérimentales ont été examinées pour apprécier l'effet conjoint des paramètres. Les conclusions de l'étude révèlent qu'une vitesse de rotation idéale, combinée à une vitesse d'avance modérée, mène à des soudures de grande qualité, dotées d'une résistance mécanique accrue et d'une excellente qualité de surface.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation numérique. Cette approche s'articule sur l'utilisation combinée de l'analyse de la variance (ANOVA) et de la méthode de régression linéaire multiple (MLR), dans le but de réduire le nombre d'essais expérimentaux nécessaires à l'optimisation du procédé. Les résultats obtenus déterminent que la vitesse de rotation de l'outil et la vitesse d'avance constituent les facteurs les plus significatifs, avec des interactions marquées entre eux. Ces observations soulignent l'influence des paramètres opératoires sur les réponses mesurées, telles que la température, la charge appliquée et les propriétés mécaniques des joints soudés. La modélisation proposée confirme la crédibilité des résultats expérimentaux, attestant de ce fait de la solidité du modèle statistique employé pour l'analyse.

L'optimisation des paramètres opératoires nous a donné une méthode de réparation fiable et économique permet de garantir l'amélioration des performances des assemblages réalisés par

soudage par friction-malaxage (FSW) et renforcer la fiabilité des structures, de réduire l'apparition de défauts et d'élargir les champs d'application de ce procédé.

Références bibliographiques

[01] Thomas, W., et al., Friction stir butt welding, International Patent Application no. 1991(9125978.8).

[02] Boundaoui Zahir & Benferhat Nouara, Conception et réalisation d'un outil de soudage par friction et malaxage FSW, Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri-Tizi-Ouzou, 2016-2017.

[03] Ammar Guedoiri, Contribution à la modélisation et à la simulation numérique du soudage par friction et malaxage, Thèse de doctorat, école Nationale Supérieure D'arts Et Métiers Spécialité " Mécanique - Matériaux ", N° 432, Paris France, 2012.

[04] Okamura, H., Aota, K., Sakamoto, M., Ezumi, M., & Ikeuchi, K. (2002). Behaviour of oxides during friction stir welding of aluminium alloy and their effect on its mechanical properties. *Welding international*, *16*(4), 266-275.

[05] Gite, R. A., Loharkar, P. K., & Shimpi, R. (2019). Friction stir welding parameters and application: A review. *Materials Today: Proceedings*, *19*, 361-365.

[06] Nasiri, Z., et al., Enhanced mechanical properties of as-cast Mg-Al-Ca magnesium alloys by friction stir processing. 2021. 296: p. 129880.

[07] Nouri, Z., et al., Mechanical properties enhancement of cast Al-8.5 Fe-1.3 V-1.7 Si (FVS0812) alloy by friction stir processing. 2020. 20(4): p. 1-12.

[08] Masroor, Z., et al. Crack repairing of aluminum alloy 2024 by reinforcement of Al 2 O 3 and B 4 C particles using friction stir processing. in 2019 Sixth International Conference on Aerospace Science and Engineering (ICASE). 2019. IEEE.

[09] Gunter, C., et al., Solid state crack repair by friction stir processing in 304L stainless steel. 2018. 34(1): p. 140-147.

[10] R. Nandan, T. Debroy and H. K. D. H. Bhadeshia†, Recent Advances in Friction Stir Welding – Process, Weldment Structure and Properties, Department Of Materials Science and Engineering, Park, 2008.

[11] Sandra Zimmer, Thèse, contribution à l'industrialisation du soudage par friction malaxage, n°: 2009-enam-0035.

[12] Gnofam Jacques Tchein, Étude des couplages thermomécaniques et microstructuraux d'un alliage de titane au cours du soudage FSW, Thèse de doctorat, École Doctorale Des Sciences Physiques Et De L'ingénieur, Bordeau, France, 2018.

[13] Abdelaziz Timesli, Simulation du soudage par friction et malaxage à l'aide de méthodes sans maillage, Thèse de doctorat, Lorraine, 2013.

[14] C. Genevois, Genèse des microstructures lors du soudage par friction malaxage d'alliages d'aluminium de la série 2000 & 5000 et comportement mécanique résultant, thèse soutenue en 2004 à l'INPG

[15] HEBIRET, N. Étude morphologique et structurale d'un alliage d'aluminium AlSi12.

[16] Taylor, B., & Weidmann, E. (2008). Metallographic preparation of titanium, struers application notes. *Struers Den. Rosendahls Bogtryk*.

[17] Ahmad, Z. (Ed.). (2012). Aluminium alloys: new trends in fabrication and applications. BoD–Books on Demand.

[18] S. Zimmer, W. Chapeau, B. Da Costa, X. Stassart, N. Ben Slima Ayadi, L. Langlois, J.C. Goussain, B. de Meester, L. D'Alvise, Manuel Pédagogique, Le soudage par friction malaxage, friction stir welding, ISBN 978-2-900781-67-8

[19] Fawzia Dardouri, dispositif d'assistance associé à des robots manipulateurs utilisés dans des procédés de fabrication/FSW, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts Et Métiers - Karlsruhe Institut Für Technologie (KIT), 2018.

[20] Genevois, C., et al., Quantitative investigation of precipitation and mechanical behaviour for AA2024 friction stir welds. Acta Materialia, 2005. 53(8): p. 2447-2458.

[21] N. Balasubramanian, B. Gattu, R. S. Mishra, 2009, Process forces during friction stir welding of aluminium alloys, Science and Technology of Welding and Joining 2009, VOL 14-NO 2 p.: 141 – 145

[22] Labed Mohammed Mouhieddine, Réalisation d'un montage de soudage des métaux dissimilaires, Mémoire de master, Génie Métallurgique, Biskra, 2019.

[23] Association, E.A., The aluminium automotive manual. Joining-Adhesive bonding. EAA, 2013.

[24] Andersson, C., et al. A comparison of copper canister fabrication by the electron beam and friction stir processes. in Proceedings of the 2nd International Symposium —Friction Stir Welding‖, Gothenburg. 2000.

[25] Kaellgren, T., Friction Stir Welding of Copper Canisters for Nuclear Waste, 2005, Royal Inst. of Tech.

[26] Bernard TISSOT, Recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs, 2009, commission nationale d'évaluation (CNE2): Paris. p. 248.

[27] Chen, Y. C., & Nakata, K. (2008). Effect of the surface state of steel on the microstructure and mechanical properties of dissimilar metal lap joints of aluminum and steel by friction stir welding. *Metallurgical and materials transactions A*, *39*, 1985-1992.

[28] Kulekci, M. K., Şik, A., & Kaluç, E. (2008). Effects of tool rotation and pin diameter on fatigue properties of friction stir welded lap joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *36*, 877-882.

[29] Silva, A.C., et al., Ultimate tensile strength optimization of different FSW aluminium alloy joints. 2015. 79(5): p. 805-814.

[30] Wakchaure, K., et al., Multi-objective optimization of friction stir welding of aluminium alloy 6082-T6 Using hybrid Taguchi-Grey relation analysis-ANN method. 2018. 5(2): p. 7150 7159.

[31] Jemal, N., et al., Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé. 2014.

[32] CEWAC, Centre d'étude Wallon de l'Assemblage et du Contrôle des matériaux http://cewac.be

[33] Bulletin technique N°46 Le soudage Friction Stir Welding sur Machine-Outil à Commande Numérique. institut maupertuis., avril 2016.

[34] Baratzadeh, F., Widener, C., Lankarani, H. M., & Burford, D. A. (2012). Methods to Increase the Fatigue Life of Friction Stir Lap Welds in No-load Transfer Coupons Using a Retractable Pin Tool. *Journal of Astm International*, *9*(5), 103899. https://doi.org/10.1520/JAI103899

[35] Lyu, Z., Wan, L., Liu, X., Huang, T., Jichao, W., & Huang, Y. (2017). Friction stir welding tool capable of achieving double-channel forming through one time of welding.

[36] Hilgert, J., Knowledge based process development of bobbin tool friction stir welding, 2012.

[37] He, H., et al., Strength Prediction of Aluminum–Stainless Steel-Pulsed TIG Welding–Brazing Joints with RSM and ANN. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2014. 27(6): p. 1012-1017.

[38] Woo, W., et al., Influence of the tool Pin and shoulder on microstructure and natural aging kinetics in a friction-stir-processed 6061–T6 aluminum alloy. Metallurgical and Materials Transactions A, 2007. 38(1): p. 69-76.

[39] Mishra, R.S., Z.J.M.s. Ma, and e.R. reports, Friction stir welding and processing. 2005. 50(1-2): p. 1-78.

[40] Scialpi, A., et al., Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy. 2007. 28(4): p. 1124-1129.

[41] Safeen, W., et al., Predicting the tensile strength, impact toughness, and hardness of friction stir-welded AA6061-T6 using response surface methodology. 2016. 87(5-8): p. 1765 1781.

[42] Zhang, Y. N., Cao, X., Larose, S., & Wanjara, P. (2012). Review of tools for friction stir welding and processing. *Canadian Metallurgical Quarterly*, *51*(3), 250-261.

[43] Arbegast, W.J., Modeling friction stir joining as a metalworking process. Proceedings of Hot Deformation of Aluminum Alloys III, 2003: p. 313-327.

[44] Ahmed, W., Kadhum, A. H., & Salleh, M. S. (2024). A Review on Tool Pin Geometry of Friction Stir Welding. *Al-Khawarizmi Engineering Journal*, *20*(2), 39–55. https://doi.org/10.22153/kej.2024.02.001

[45] Jafar, M. S., Hameed, A. S., & Altemeemi, O. (2021). *A comparison study for the Different Geometry of Tools used in the FSW*. *1090*(1), 012132. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1090/1/012132

[46] Ramanjaneyulu, K., G. Madhusudhan Reddy, and A.J.T.o.t.I.I.o.M. Venugopal Rao, Role of tool shoulder diameter in friction stir welding: an analysis of the temperature and plastic deformation of AA 2014 aluminium alloy. 2014. 67(5): p. 769-780.

[47] C. B. Fuller, 2007, Friction Stir Welding and Processing - Chapter 2 Friction Stir Tooling: Tool Materials and Designs, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International

[48] C. Philip, Soudage des alliages d'aluminium, Cours ENSAM bordeaux, http://courscoeli.ensam.eu/content/download/1321/5424/file/soudage-alu.pdf (consulté le 25 mai 2009)

[49] Colegrove, P. A., Shercliff, H. R., & Zettler, R. (2007). Model for predicting heat generation and temperature in friction stir welding from the material properties. Science and Technology of Welding and Joining, 12(4), 284-297.

[50] W. Tang, X. Guo, J. C. McClure, L. E. Murr, and A. Nunes. Heat input and temperature distribution in friction stir welding. Journal of Materials Processing and Manufacturing Science, 7(2):163–172, October 1998. doi: 10.1106/55tf-pf2g jbh2-1q2b. URL https://doi.org/10.1106/55tf-pf2g-jbh2-1q2b. 29, 30

[51] Elangovan, K., V. Balasubramanian, and M. Valliappan, Influences of tool pin profile and axial force on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008. 38(3-4): p. 285-295.

[52] Di Bella, G., Borsellino, C., Chairi, M., Campanella, D., & Buffa, G. (2024). Effect of Rotational Speed on Mechanical Properties of AA5083/AA6082 Friction Stir Welded T-Joints for Naval Applications. *Superalloys*, *14*(12), 1410.
https://doi.org/10.3390/met14121410

[53] Watanabe, T., et al., Observation of the Solid State Welded Interface between Steel and Aluminum Alloy Using a Rotating Pin-Solid State Welding of Dissimilar Metals Using a Rotating Pin(Report 2). Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2005. 23(4): p. 603-607.

[54] ARAB Mustapha Amine, étude de la résistance mécanique de structures soudées par le procédé FSW, Thèse de doctorat, Spécialité : Génie Mécanique, Sidi Bel Abbés, 2018-2019.

[55] GHAZI Abdelkader caractérisation mécanique des assemblages soudes par friction malaxage (étude expérimentale et numérique), Thèse doctorat, Université de Sidi Bel Abbes, 2012

[56] A.Robineau, Goussain-JC, S.Bozzi, A.L.Etter, I.DrouelleT.Baudin Le soudage par Friction Malaxage (ou FSW), un nouveau procédé pour l'obtention de soudures bimétalliques, MATERIAUX 2006 13-17 Novembre 2006 – Dijon, France.

[57] Liu, H. J., Zhou, L., & Liu, Q. W. (2010). Microstructural characteristics and mechanical properties of friction stir welded joints of Ti–6Al–4V titanium alloy. *Materials & Design*, *31*(3), 1650-1655.

[58] Yan, J., Sutton, M. A., & Reynolds, A. P. (2005). Process–structure–property relationships for nugget and heat affected zone regions of AA2524–T351 friction stir welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, *10*(6), 725-736.

[59] Cavaliere, P., et al., Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6056 joints produced by friction stir welding. Journal of materials processing technology, 2006. 180(1-3): p. 263-270.

[60] K. Aota, H. Okamura, K. Sato, Friction stir welding method for reducing the friction force, in: E.P. Office (Ed.) European Patent Office, Hitachi, Ltd. Chiyoda-ku, Tokyo (JP), 2003.

[61] Kumar, K. S. V. K., & Kailas, S. V. (2008). The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation. *Materials Science and Engineering: A*, *485*(1-2), 367-374.

[62] Chen, H. B., Yan, K., Lin, T., Chen, S. B., Jiang, C. Y., & Zhao, Y. (2006). The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds. *Materials Science and Engineering: A*, *433*(1-2), 64-69.

[63] Dellal, N., Merzoug, M., Mimmi, A., Ghazi, A., & Lousdad, A. (2023). Experimental based determination and analysis of mechanical properties of AA 3003 alloy welded with friction stir lap welding process. *Journal of Applied Engineering Science*, *21*(2), 451-461

[64] Nejah Jemal, Thèse, Contribution à la caractérisation thermique et mécanique de la zone soudée en FSW. Arts et Métiers Paris-Tech, 2011.

[65] T.Le Jolu, Etude de l'influence des défauts de soudage sur le comportement plastique et la durée de vie en fatigue de soudures par friction-malaxage d'un alliage AL-Cu-Li, thèse soutenue en 2011 à l'école nationale supérieure des mines de paris.

[66] Threadgill P.L., Leonard A.J., Shercliff H.R., Withers P.J., " Friction stir welding of aluminium alloys", International Materials Reviews, volume 54,pages 93, 2009

[67] El meguenni Imane, Influence de la profondeur de pénétration de l'épaulement de l'outil sur la qualité du soudage FSW, Mémoire de mastère, Département De Génie Mécanique Laboratoire De Matériaux Et Systèmes Réactifs, Sidi Bel Abbes, 2014.

[68] Heidarzadeh, A., et al., Tensile behavior of friction stir welded AA 6061-T4 aluminum alloy joints. 2012. 37: p. 166-173.

[69] F.Thibeault, Etude numérique et expérimentale du soudage par friction malaxage, thèse soutenue en 2012 à l'Univesrité du Québec à Chicoutimi.

[70] Mariem Zoghlami, Influence des paramètres du procédé FSW sur les caractéristiques des bandes alternées (onion rings) dans les alliages d'aluminium, Mémoire de master,Ecole De Technologie Supérieure, Québec, 2017.

[71] Thamizhmanii, S., Ravikumar, E., Senthilkumar, J. S., & Karpagaraj, A. (2023). Review on Friction Stir Welding of Dissimilar Metals. *Advances in Science and Technology*. https://doi.org/10.4028/p-5uaphw

[72] Afsari, A., Heidari, S., & Jafari, J. (2020). Evaluation of Optimal Conditions, Microstructure, and Mechanical Properties of Aluminum to Copper Joints Welded by FSW. *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, *9*(4), 61–81. http://mpmpjournal.iaun.ac.ir/article_680098.html

[73] R. Ueji, H. Fujii, L. Cuib, A. Nishioka, K. Kunishige, K. Nogi "Friction stir welding of ultrafine grained plain low-carbon steel formed by the martensite process", Materials Science and Engineering A 423 (2006) 324–330.

[74] Huseyin Uzun "Friction stir welding of SiC particulate reinforced AA2124 aluminium alloy matrix composite", Materials and Design (2006) 11-17.

[75] W. Woo, H. Choo a,b,D.W. Brown c, P.K. Liaw a, Z. Feng b "Texture variation and its influence on the tensile behavior of a friction stir processed magnesium alloy", Scripta Materialia 54 (2006) 1859–1864.

[76] C. Genevois, A. Deschamps, P. Vacher "Comparative study on local and global mechanical properties of 2024 T351, 2024 T6 and 5251 O friction stir welds", Materials Science and Engineering A 415 (2006) 162–170.

[77] M. Amirizad, A.H. Kokabi, M. Abbasi Gharacheh, R. Sarrafi, B. Shalchi, M. Azizieh; "Evaluation of microstructure and mechanical properties in friction stir welded A356+15%SiCp cast composite", Materials Letters 60 (2006), pp. 565–568.

[78] Threadgill, P., et al., Friction stir welding of aluminium alloys. International Materials Reviews, 2013.

[79] Eisa, A., & Mabrouk, O. (2022). Influence of Process Parameters of Friction Stir Welding (FSW) on the Mechanical Properties and the Surface Quality of Welded Joint. *ERJ. Engineering Research Journal*, *45*(1), 51–64. https://doi.org/10.21608/erjm.2022.96775.1114

[80] Al-Ablani, B. A., Mohammed, S. S., Al-Ghimlas, N. A., Abdallah, S. A., & Gaafar, A. M. (n.d.). *The Effect of Rotation and Welding Speeds on Surface Texture of FSW AL Plates*. https://doi.org/10.21608/erjsh.2019.243166

[81] Bouamama, M., Belaziz, A., Elmeiche, A., Elmeguenni, I., & Elhannani, A. (2024). Experimental Investigation of Hardness and Surface Roughness in the Friction Stir Welding of the 6061-T6 Aluminum Alloy. *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*, *52*(1), 37–43. https://doi.org/10.33927/hjic-2024-06

[82] Bhushan, R. K., & Sharma, D. (2020). Investigation of mechanical properties and surface roughness of friction stir welded AA6061-T651. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, *15*(1), 7.

[83] BOUKRAA, M., Aissani, M., Tala-Ighil, N., & MATAOUI, A. (2015). Étude numérique du transfert de chaleur pendant le procédé de soudage par friction malaxage FSW (comparaison de Al 7075-T6 et Al6061-T6). In *3ème Conférence Internationale des Energies Renouvelables*.

[84] H.W. Zhang, Z. Zhang, J.T. Chen "The finite element simulation of the friction stir welding process, Department of Engineering Mechanics", Materials Science and Engineering A 403 (2005) 340–348.

[85] Eric Feulvarch, Frédéric Boitout, Jean-Michel Bergheaun "Modélisation thermomécanique et microstructurale du soudage par friction-malaxage", Rapport ESI Group, LTDS UMR 5513 CNRS/ECL/ENISE, 2001.

[86] Bocchi, S., D'Urso, G. D., & Giardini, C. (2021). The effect of heat generated on mechanical properties of friction stir welded aluminum alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *112*(5), 1513–1528. https://doi.org/10.1007/S00170-020-06462-9

[87] KAOU, A. (2025). Contribution à la Simulation Numérique de l'Etude Paramétrique du Procédé de Soudage par Friction Malaxage (FSW): Application aux Matériaux Polymères (Doctoral dissertation).

[88] Senthil Kumar, V. S., Gopal, K. A., & Kuppusamy, R. (2024). *Parameters Optimization of Submerged Friction Stir Welding for Dissimilar Alloys AA2024 and AA7075*. https://doi.org/10.1115/imece2024-141189

[89] Das, S., Gain, S., & Sahoo, P. (2021). *Friction Stir Welding* (pp. 1–39). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63986-0_1

[90] Karthikeyan, S., Mohan, K., & Arivazhagan, S. (2021). *Multi objective optimization of fsw process parameters to enhance the tensile strength and hardness of aa7068 welded joints*. *9*(4), 045010. https://doi.org/10.1088/2051-672X/AC0E7D

[91] Maurice Duval. Soudage de l'aluminium par friction malaxage FSW. Centre d'expertise et d'innovation sur aluminium. 11 Janvier 2018.

[92] St-Georges, L., Le soudage par friction malaxage : principes et applications,. éd. : Les Presses de l'aluminium, Chicoutimi, Québec 2015.

[93] Hussein, S.A., et al., Unstable temperature distribution in friction stir welding. Advances in Materials Science and Engineering, 2014. 2014.

[94] Raviprakash, T. N., Taranath, T. P., & Sreedharamurthy, T. (2024). A Study on Weld Quality and Tunnel Defect Characterization in Friction Stir Welding Using Acoustic Emission Techniques. *International Journal of Science and Research*, *13*(12), 1342–1347. https://doi.org/10.21275/sr241220181939

[95] Daneji, A., Ali, M., & Pervaiz, S. (2018). Influence of tool geometry and processing parameters on welding defects and mechanical properties for friction stir welding of 6061 Aluminium alloy. 346(1), 012041. https://doi.org/10.1088/1757-899X/346/1/012041

[96] Chitturi, V., S. Pedapati, and M. Awang, Challenges in dissimilar friction stir welding of aluminum 5052 and 304 stainless steel alloys. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2020. 51(6): p. 811-816.

[97] Zhou, N., et al, Influence of the kissing bond on the mechanical properties and fracture behaviour of AA5083 H112 friction stir welds. Materials Science and Engineering: A, 2018. 719: p. 12-20.

[98] Mehta, K.P. and V. Badheka, Experimental investigation of process parameters on defects generation in copper to AA6061-T651 friction stir welding. International Journal of Advances in Mechanical & Automobile Engineering, 2016. 3(1): p. 55-58.

[99] Soni, N., et al., Defects Formation during Friction Stir Welding: A Review. International Journal of Engineering and Management Research (IJEMR), 2017. 7(3): p. 121- 125.

[100] Lacki, P., W. Więckowski, and P. Wieczorek, Assessment of joints using friction stir welding and refill friction stir spot welding methods. Archives of Metallurgy and Materials,

[101] Hirasawa, S., Badarinarayan, H., Okamoto, K., Tomimura, T., & Kawanami, T. (2010). Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method. *Journal of materials processing technology*, *210*(11), 1455-1463.

[102] Bayazid, A., M. Heddad, and I. Cayiroglu, A review on friction stir welding, parameters, microstructure, mechanical properties, post weld heat treatment and defects. Material Sci & Eng, 2018. 2(4): p. 116-126.

[103] Tabatabaeipour, M., et al., Non-destructive ultrasonic examination of root defects in friction stir welded butt joints. Ndt & E International, 2016. 80: p. 23-34.

[104] Zettler, R., T. Vugrin, and M. Schmücker, Effects and defects of friction stir welds, in Friction Stir Welding. 2010, Elsevier. p. 245-276.

[105] Singh, V.P., et al., Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium–magnesium alloys: a critical review. Journal of Materials Research and Technology, 2020. 9(3): p. 6217-6256.

[106] Peel, M., A. Steuwer, et al. (2003). "Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminum AA5083 friction stir welds." Acta Materialia 51(16): 4791-4801.

[107] Lombard, H., D. G. Hattingh, et al. (2009). "Effect of process parameters on the residual stresses in AA5083-H321 friction stir welds." Materials Science and Engineering A 501(1-2): 119-124.

[108] Lima, E. B. F., J. Wegener, et al. (2003). "Dependence of the microstructure, residual stresses and texture of AA 6013 friction stir welds on the welding proces." Zeitschrift fuer Metallkunde/Materials Research and Advanced Techniques 94(8): 908-915.

[109] Ali, A., M. W. Brown, et al. (2006). "Characterization of 2024-T351 friction stir welding joints." Journal of Failure Analysis and Prevention 6(4): 83-96.

[110] Dattoma, V., M. Giorgi, et al. (2007). On the Residual Stress Field in the Aluminum Alloy Fsw Joints. Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures: 943-944.

[111] Prime, M. B., T. Gnäupel-Herold, et al. (2006). "Residual stress measurements in a thick, dissimilar aluminum alloy friction stir welding." Acta Materialia 54(15): 4013-4021.

[112] Buffa, G., L. Fratini, et al. (2008). "On the thermo-mechanical loads and the resultant residual stresses in friction stir processing operations." CIRP Annals - Manufacturing Technology 57(1): 287-290.

[113] Jata, K., K. Sankaran, et al. (2000). "Friction-stir welding effects on microstructure and fatigue of aluminum alloy 7050-T7451." Metallurgical and Materials Transactions A 31(9): 2181-2192.

[114] Staron, P., M. Kocak, et al. (2002). Residual stresses in friction stir welded Al sheets, Applied Physics A, Springer-Verlag, Vol A74(1): 1161-1162.

[115] Pasta, S. and A. P. Reynolds (2008). "Evaluation of residual stresses during fatigue test in an FSW joint." Strain 44(2): 147-152.

[116] Farhang, M., Sam-Daliri, O., Farahani, M., & Vatani, A. (2021). Effect of friction stir welding parameters on the residual stress distribution of Al-2024-T6 alloy. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, *15*(1), 7684–7694. https://doi.org/10.15282/JMES.15.1.2021.06.0606

[117] Sarfaraz, Z., & Saeed, H. A. (2024). Influence of Process Parameters on Residual Stresses in Dissimilar Friction Stir Welding of Aluminum Alloys. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 1478–1492. https://doi.org/10.38124/ijisrt/ijisrt24jul1249

[118] Delijaicov, S., Silva, P. A. de O., Resende, H. B., & Batalha, M. H. F. (2018). Effect of Weld Parameters on Residual Stress, Hardness and Microstructure of Dissimilar AA2024-T3 and AA7475-T761 Friction Stir Welded Joints. *Materials Research-Ibero-American Journal of Materials*, *21*(6). https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0108

[119] Guo, Y., & Li, P. (2024). Effect of Residual Stress and Microstructure on the Fatigue Crack Growth Behavior of Aluminum Friction Stir Welded Joints. *Materials*. https://doi.org/10.3390/ma17020385

[120] J. Schijve, Fatigue of Structures and Materials (2nd Edition); Netherland, Kluwer Academic Publishers 2007.

[121] Aboulghit El Malki Alaoui, Influence du chargement sur la propagation en fatigue de fissures courtes dans un acier de construction navale, thèse de doctorat, Spécialité : Sciences De L'ingénieur Option : Mécanique Des Matériaux, l'Université De Metz, Soutenue Le 23 Février 2005.

[122] cour M. bengdiabe mécanique à la rupture,2021.

[123] Kambouz Youb, Comportement en fatigue des assemblages soudes par friction malaxage, Thèse de doctorat, Spécialité: Génie Mécanique, Sidi-Bel-Abbès, 2017.

[124] Baptiste Jean Patrice Guerin, Soudage d'alliages d'aluminium par la technologie friction stir welding bobbin tool, Thèse de doctorat, Spécialité : Sciences Et Génie Des Matériaux, N0567, 2015.

[125] J.D. Costa, J.A.M. Ferreira, L.P. Borrego, Influence of spectrum loading on fatigue resitance of AA6082 friction stir welds, International Journal of Structural Integrity 2(2) (2011) 122-134.

[126] J.D. Costa, J.A.M. Ferreira, L.P. Borrego, L.P. Abreu, Fatigue behaviour of AA6082 friction stir welds under variable loadings, International Journal of Fatigue (2011).

[127] C. He, Y. Liu, J. Dong, Q. Wang, D. Wagner, C. Bathias, Fatigue crack initiation behaviors throughout friction stir welded joints in AA7075-T6 in ultrasonic fatigue, International Journal of Fatigue 81 (2015) 171-178.

[128] M. Ericsson, R. Sandström, Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG, International Journal of Fatigue 25(12) (2003) 1379-1387.

[129] S. Lomolino, R. Tovo, J. Dos Santos, On the fatigue behaviour and design curves of friction stir butt-welded Al alloys, International Journal of Fatigue 27(3) (2005) 305-316.

[130] Karagöz, I., Buğdaycı, M., & Öncel, L. (2024). The effect of tempering time and cooling environment on the corrosion behavior of AA5083-H111 alloy. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*. https://doi.org/10.1002/mawe.202300217

[131] Abdullah IS, Mohammed SA, Abdallah S. Artificial neural network modelling of the surface roughness of friction stir welded AA7020-T6 aluminum alloy. Engineering Research Journal-Faculty of Engineering (Shoubra). 2020;1(46): 1–5.

[132] Chinchanikar S, Gharde S, Gadge M. Investigation of tool forces, weld bead micro-hardness and surface roughness during friction stir welding of aluminium 6063 alloy. Advances in Materials and Processing Technologies. 2020;8(1): 1–9.

[133] Wang B, Chen F, Liu F, Wang W, Xue P, Ma Z. Enhanced mechanical properties of friction stir welded 5083Al H19 joints with additional water cooling. Journal of Materials Science & Technology. 2017;33(9): 1009–1014.

[134] Msomi V, Mbana N. Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA1050-H14 and AA5083-H111 Joint: Sampling Aspect. Metals. 2020;10(2): 214.

[135] Muhsin J, Ayad MT, Nawzad KK. Comparison between friction stir welding (FSW) and friction stir processing (FSP) of AA5086 aluminium alloy. International Journal of Technical Research and Applications. 2015;3(6): 205–210.

[136] Naimuddin SK, Ahamad T, Kampurath V, Ali Y. Mechanical properties of friction stir welding joints of similar & disimilar aluminium alloys AA6061 & 6082. International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2016;7(4): 256–266.

[137] Dorbane A, Harrou F, Sun Y. Exploring Deep Learning Methods to Forecast Mechanical Behavior of FSW Aluminum Sheets. Journal of Materials Engineering and Performance. 2022;32: 4047–4063.

[138] Dorbane A, Ayoub G, Mansoor B, Hamade RF, Imad A. Effect of temperature on microstructure and fracture mechanisms in friction stir welded Al6061 joints. Journal of Materials Engineering and Performance. 2017;26(6): 2542–2554.

[139] Abdul Khaliq U, Muhamad MRB, Yusof F, Ibrahim SB, Mohd Isa MS, Chen Zh, Çam G. A review on friction stir butt welding of aluminum with magnesium: A new insight on joining mechanisms by interfacial enhancement. Journal of Materials Research and Technology. 2023;27: 4595–4624.

[140] Merzoug, M., Boulenouar, A., Bouchouicha, B., Serrier, M., & Mazari, M. (2018). Effects of welding parameters on fssw: experimental and numerical study. *Archives of Metallurgy and Materials*, *63*(1), 247-256.

[141] Eric FEULVARCH. Modélisation numérique du soudage par friction-malaxage (Friction Stir Welding). Université Jean Monnet de Saint-Étienne. 2005

[142] Raturi, M., & Bhattacharya, A. (2023). Temperature variation and influence on local mechanical properties assessed by nanoindentation in AA6061-AA7075 dissimilar FSW. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.107079

[143] Turkan, M., & Karakaş, Ö. (2022). Numerical modeling of defect formation in friction stir welding. *Materials Today Communications*, *31*, 103539. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103539

[144] Ambrosio, D., Wagner, V., Garnier, C., Jacquin, D., Tongne, A., Fazzini, M., Cahuc, O., & Dessein, G. (2020). Influence of welding parameters on the microstructure, thermal fields and defect formation in AA7075-T6 friction stir welds. *Welding in The World*, *64*(5), 773–784. https://doi.org/10.1007/S40194-020-00869-4

[145] Wciślik, W. (2024). Selected microstructural phenomena in fsw joints. *Structure and Environment*, *16*(2), 97–110. https://doi.org/10.30540/sae-2024-009

[146] Goupy, J., Plans d'expériences2006: Ed. Techniques Ingénieur.

[147] DAAS, M.S., Plans d'expériences.

[148] Triboulet, P., Notions de bases sur les plans d'expériences. Chalon sur Saône, 2008.

[149] Rajakumar, S., Muralidharan, C., & Balasubramanian, V. (2010). Optimization of thefriction-stir-welding process and tool parameters to attain a maximum tensile strength ofAA7075–T6 aluminium alloy. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, PartB: Journal of Engineering Manufacture, 224(8), 1175-1191.

[150] Rzaev, R. A., Гуревич, Л. М., Derzhavin, I. M., & Merkulov, D. I. (2024). Computer simulation of temperature fields in a weld with changing technological parameters of friction stir welding of aluminum and copper. *Известия Волгоградского Государственного Технического Университета*, *10 (293)*, 57–65. https://doi.org/10.35211/1990-5297-2024-10-293-57-65

[151] Gupta, S. K., Pandey, K. N., & Kumar, R. (2015). Effect of Friction Stir Welding Process Parameters on Temperature Profile and Tensile Strength of Dissimilar Aluminum Alloys. *Applied Mechanics and Materials*, 425–430. https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.813-814.425

[152] Syafiq, W. M., Afendi, M., & Mazlee, M. N. (2021). *Effect of FSW parameters on temperature profile and grain size of AA6061-T6 and S275JR mild steel FSW joint*. *2339*, 020082. https://doi.org/10.1063/5.0044554