

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur

Et de la recherche scientifique

Université Abderrahmane Mira Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication mécanique et productique

Par : Khelifa Lynda

Thème

**Comportement mécanique d'un joint de soudure obtenu par
friction-malaxage**

Soutenu le **02\07\2024** devant le jury composé de

Dr. HADJOU Madjid **Président**

Dr. IDIR Abdelhek **Rapporteur**

Dr. BELAMRI Abdelatif **Examineur**

Année Universitaire 2023-2024

REMERCIEMENTS

Avant tout, Je remercie dieu le tout puissant de Je voire donner la santé, la patience, la force et le courage tout au long de la préparation de ce mémoire de master.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de mémoire Mr. IDIR, Docteur en Génie Mécanique à l'université de Bejaia, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'université de Bejaia et les intervenants professionnels responsables de ma formation, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux Personnels du Hall de technologie de l'université de Bejaia, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire.

DÉDICACE

*Je dédie ce modeste travail aux êtres qui me sont les plus chère je
site :*

- *A ma très chère mère, honorable, aimable, tu représentes pour
Moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et
l'exemple dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour
moi. Ta prière et ta bénédiction ont été d'un grand secours pour mener
à bien mes études. je te dédie ce travail en témoignage de mon profond
amour, que dieu le protégé pour nous.*
- *Mes chéré frères*
- *Mes chéré sœurs*
- *Tous mes amis(e)*

Sommaire

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Liste des Tableaux

Liste des Figure

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

Nomenclature

Introduction Générale.....2

Chapitre I : Techniques d'assemblage de Matériaux. Contexte de l'étude et état de l'art

Introduction.....3

I.1 Description du procédé..... 3

I.1.1 Définition 3

I.1.2 Principe de soudage par friction malaxage FSW (Friction Stir Welding) 3

I.1.3 Paramètres du soudage par friction malaxage..... 4

I.1.4 Outils de soudage 5

I.2 Mécanismes physiques du procédé et microstructure 6

I.2.1 Mécanique 7

I.2.2 Thermique 7

I.2.3 Métallurgie 8

I.3 Les différentes phases opératoires de soudage par friction 9

I.3.1 Phase de pénétration..... 9

I.3.2 Phase de soudage.....9

I.3.3 Phase de retrait..... 10

I.4 Avantage et Inconvénient du soudage par friction malaxage 10

I.4.1 Avantages liée au procédé..... 10

I.4.2 Avantages liées à la soudure par FSW 11

I.4.3 Avantages économiques et environnementaux 11

Sommaire

I.4.4	Avantages liés à l'équipement.....	11
I.4.5	Inconvénients.....	11
I.5	Principe de soudage par friction Rotatif.....	12
I.6	Les différentes phases opératoires de soudage par friction.....	12
I.6.1	Phase d'accostage.....	12
I.6.2	Phase transitoire.....	13
I.6.3	Phase d'équilibre.....	13
I.6.4	Phase de forgeage.....	13
I.7	Cycle de soudage.....	14
I.8	Les caractéristiques mécaniques.....	14
I.8.1	Résistance à l'extension.....	14
I.8.2	Résistance à la torsion.....	14
I.8.3	Résistance à la flexion.....	14
I.8.4	Dureté.....	15
I.9	Avantages et les limites du soudage par friction rotative.....	15
I.9.1	Avantages du soudage par friction.....	15
I.9.2	Les limites du soudage par friction.....	15
I.10	Principaux domaines d'applications.....	16
I.10.1	Domaine de l'automobile.....	16
I.10.2	Domaine l'industrie aéronautique.....	16
I.10.3	Domaine naval.....	17
Chapitre II: Travaux sur la modélisation de de soudage par friction-malaxage		
Introduction.....		18
II.1	Modèle géométrique du FSW.....	19
II.1.1	Résulta et Discussion.....	20

Sommaire

II.2 Les travaux de Mr Bilal Ahmad et ses collaborateurs sur la modélisation numérique avancée du soudage par friction-malaxage d'acier faiblement allié (2018).....20

Chapitre III : Techniques expérimental

Introduction	23
III.1 Matériaux et équipements utilisés	23
III.1.1 Matériau utilisé	23
III.1.2 Découpage des échantillons	23
III.1.3 Les paramètres de procédé du soudage par FSW	24
III.1.4 Procédure expérimentale	25
III.1.5 Les paramètres de soudage par friction- malaxage	26
III.2 Techniques de caractérisations	27
III.2.1 Température	27
III.2.2 Microscopie optique	27
III.3 Modélisation du soudage par friction malaxage.....	29
III.3.1 Présentation du logiciel	29
III.3.2 Création de la géométrie	29
III.4 Modèle élastique-plastique de Johnson-Cook (Equation du logiciel Abaques)	31

Chapitre IV: Résultats et discussions

Introduction	33
IV.1 Microstructure de l'aluminium utiliser pour le soudage par friction malaxage	33
IV.2 Différence de paramétré de soudage par friction malaxage	34
IV.3 Inspection visuelle des soudures par friction malaxage	34
IV.3.1 Défauts des soudures dans le joint FSW	35
IV.3.2 Défauts identifiés via un contrôle visuel	36
IV.4 Résultats micro dureté	39
IV.5 Microstructure du cordon de soudure	40

Sommaire

IV.5.1	Comportement mécanique de dureté des joints de soudure	41
IV.5.2	Evolution de la température de contact en fonction du temps de soudage.....	43
IV.6.	Modélisation numérique du soudage par friction malaxage	44
IV.7	Distribution du champ de contraintes de Von-mises le long de la ligne de soudure.....	46
V	Conclusion générale	48
VI	Référence	49

Résume

Liste des Tableaux

Tableau I.1.les caractéristiques de soudage par friction.....	15
Tableau III.1.Composition chimique du matériau de base.....	23
Tableau III.2.Caractéristiques physiques et mécaniques de l'alliage aluminium.....	23
Tableau III.3.Différents essais avec différent paramètres.....	26

Liste des Figure

Chapitre I : Techniques d'assemblage de Matériaux. Contexte de l'étude et état de l'art

Figure I.1.(a) Illustration du procédé de soudage par friction et malaxage, (b) Exemple de système de bridage.....	4
Figure I.2.Visualisation des paramètres de soudage.	4
Figure I.3.Schéma simplifié de l'outil(tige et épaulement dans le soudage par friction-malaxage	5
Figure I.4.Les différentes formes de la tige.	6
Figure I.5.Les différentes formes d'épaulement.	6
Figure I.6.Transferts thermiques induits par le procédé FSW.	8
Figure I.7.Coupe d'une soudure sur un alliage d'aluminium.	9
Figure I.8.Schématisation de phase de pénétration	9
Figure I.9.Schématisation de phase de soudage.....	10
Figure I.10.Schématisation de phase de retrait de l'outil.....	10
Figure I.11.Principe du soudage par friction rotative.....	12
Figure I.12.Soudage par entraînement direct ou continu	13
Figure I.13.Le cycle de soudage par friction.....	14
Figure I.14.Soudage « friction-malaxage » par point utilisé pour l'automobile.....	16
Figure I.15.Voilure d'avion soudée par FSW	17
Figure I.16. (a) Bateau en aluminium construit en utilisant FSW / (b)Panneaux préfabriqués (Hydro Marine Aluminium) destine au pont du bateau de croisière	17

Chapitre II: Travaux sur la modélisation de de soudage par friction-malaxage

Figure II.1.Modèle géométrique du FSW - (A) Domaine eulérien, (B) Outil, (C) Assemblage.	18
Figure II.2.Profil de température au stade de la plongée.	19
Figure II.3.Profil de température au bord du soudage.....	19
Figure II.4.Evolution de la température pour chaque étape de soudage par friction malaxage	20
Figure II.5.La géométrie de la pièce et de l'outil sont illustrés.....	20
Figure II.6.Distribution de la température en C° à l'étape de plongée ; (a) Vue de dessus du modèle de soudure lente, (b) Vue de dessus du modèle de soudure rapide, (c) Vue en coupe	

Liste des Figure

du modèle de soudure lente et (d) Vue en coupe du modèle de soudure rapide. (Rotatif)	21
Figure II.7. Distribution de la température en C° au stade de la temporisation ; (a) vue isométrique du modèle de soudure lente, (b) Vue isométrique du modèle de soudure rapide, (c) Vue en coupe transversale du modèle de soudure lente et (d) Vue en coupe transversal	22

Chapitre III : Techniques expérimental

Figure III.1.(a) Tronçonneuse utilisée pour découpage, (b) Les échantillons après découpage	24
Figure III.2. Tour conventionnelle type SN 40 C du hall de technologie	24
Figure III.3. Les outils de soudage de FSW utilisé.	25
Figure III.4.a) Fraiseuse universelle modifiée de type FH 1.6 ALMO, (b) Pièce à souder Fixer avec des brides de serrage.	26
Figure III.5. Exécution de l'opération de soudage par friction et malaxage	27
Figure III.6. Thermomètre infrarouge	27
Figure III.7.(a) Polisseuse mécanique utilisée / (b) Eprouvette obtenus après polissage	28
Figure III.8.(a) Polisseuse électrolytique utilisée de type POLISEC C25 / (b) Eprouvette	28
Figure III.9. Microscope optique utilisé de type INNOVATEST Europe BV	29
Figure III.10. Interface de code d'ABAQUS.	29
Figure III.11. Géométrie de pièce et l'outil	29
Figure III.12.(a) Les plaques d'aluminium / (b) L'outil en acier créé par Abaque.	30
Figure III.13. L'assemblage des plaques et l'outil	30
Figure III.14. Maillage des plaques et de l'outil.	31
Figure III.15. L'assemblage des plaques et l'outil maillé.	31

Chapitre IV: Résultats et discussions

Figure IV.1.(a) Microstructure (b) micro dureté	33
Figure IV.2. Différents essais avec différent paramètres.	34
Figure IV.3. Essais avec une épaisseur supérieure.	34
Figure IV.4. Eprouvette soude par soudage friction malaxage.	35
Figure IV.5.(a) Eprouvette soudé / (b) Empreinte de l'outil.	35
Figure IV.6. Défauts laissés par des différents paramètre.	36
Figure IV.7. Défaut de surface de type éraillures	37
Figure IV.8. Défaut flux de métal a racine du cordon de soudure	37
Figure IV.9. Défaut tunnel interne.	38

Liste des Figure

Figure IV.10. Joint avec défaut de rainure en surface.....	39
Figure IV.11. Les différentes zones du joint de soudure.	40
Figure IV.12. Microstructure montrant l'effet du soudage par friction malaxage au début de la phase de pénétration.....	40
Figure IV.13. Morphologie du cordon de soudure, a) Vue sur la préférence b) Vue en profondeur du cordon de soudure.	40
Figure IV.14. Morphologie de l'alliage d'aluminium avant le soudage.	41
Figure IV.15. Morphologie du cordon de soudure. $N=1400\text{tr}\backslash\text{min}$, $V_c=25$	41
Figure IV.16. Empreintes de l'indenteur Vickers avant le soudage.....	42
Figure IV.17. Empreintes de Micro dureté de différents pion.	43
Figure IV.18. Courbes dévolution de la température pour les différents paramètres	44
Figure IV.19. Vue d'ensemble montrant la simulation numérique de distribution de la température pendant le soudage par friction malaxage.....	44
Figure IV.20. Distribution de la température le long de la ligne de soudure en fonction de du temps.	45
Figure IV.21. Pénétration de l'outil dans la profondeur des pièces à soudée.	46
Figure IV.22. Distribution de la température le long de la ligne de soudure : à la fin de la phase de plongée (8.000s).....	46
Figure IV.23. Distribution des contraintes de Von-mises le long de la ligne de soudure : (a) début de la phase de plongée (b) fin de la phase de plongée (8.000s) (c) vue d'ensemble	47

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

FSW : Soudage par friction malaxage

TMI: The Welding Institute

MIG: Metal inert gas

TIG : Tungstèn Inert Gas

MB : Métal de base

ZAT : Zone Affectée Thermiquement

ZATM : Zone Affectée Thermomécanique

Tmelt : La température du solidus

Troom : La température effective

A : La limite d'élasticité

B : Le facteur de déformation

n :L'exposant de déformation

m :L'exposant de température,

C : Vitesse de déformation.

E_p : Déformation plastique équivalent

E_{00} : Le normalisant de la vitesse de déformation

FEM : Méthodes des éléments finis

ZAC : Zane affectée la chaleur

Nomenclature

- La vitesse de rotation : $\text{tr}\backslash\text{min}$
- La vitesse d'avance : $\text{mm}\backslash\text{min}$
- Epaisseur : mm
- Diamètre : mm
- La limite d'élasticité : MPa
- Le facteur de déformation : MPa
- L'exposant de déformation : MPa
- L'exposant de température : MPa
- Vitesse de déformation : MPa

Introduction Générale

Introduction générale

Le soudage par friction malaxage (friction stir Welding) est une technique d'assemblage récente développée par l'institut de soudage [1]. Il s'agit d'une méthode de soudage solide (sans les faire fondre) et sans utilisation de métal, créée en 1991[2]. À la différence des techniques de soudage traditionnelles, FSW utilise un outil rotatif en forme de broche pour générer de la chaleur et mélanger les matériaux de soudage, ce qui permet de former un joint. L'instrument est introduit dans les deux pièces à souder et se déplace pour former une zone de soudure homogène [3]. Le froissement de l'outil ramène la matière sans la faire fondre, ce qui permet aux deux pièces de s'adhérer l'une à l'autre. Une fois que l'outil de soudage a parcouru toute la longueur de la jonction à souder, le joint est complètement soudé [4]. Il est fréquemment employé dans les secteurs de la construction navale, de l'automobile et de l'aérospatiale cette technique d'assemblage de matériaux composites, d'alliages d'aluminium et de magnésium et d'autres matériaux. Il présente de nombreux avantages tels qu'une faible distorsion, une zone de chaleur plus réduite, une résistance mécanique élevée et une excellente étanchéité. Étant donné que FSW ne génère pas de fumées, de gaz ou de déchets toxiques, il est également écologique [5].

- Le premier chapitre dresse une recherche bibliographique sur les fondements des procédés du soudage par friction. Différents procédés du soudage sont également exposés avec leurs avantages et inconvénients.
- Le deuxième chapitre, travaux sur la modélisation de la propagation des fissures.
- Le troisième chapitre présente les différentes étapes nécessaires pour expérimenter le soudage par friction-malaxage. Les étapes principales de cette méthode de soudage seront examinées et nous aborderons les principaux paramètres qui impactent la qualité du joint, tels que la vitesse de rotation, la vitesse d'avance, ainsi que la température générée pendant le processus.
- Le quatrième chapitre, présente les résultats obtenus au cours de cette étude.

Chapitre I :

Techniques d'assemblage des Matériaux. Contexte de l'étude et état de l'art

Introduction

Le soudage est une technique d'assemblage permanent qui permet de fusionner deux pièces de métal en utilisant la chaleur et/ou la pression pour créer une liaison solide et continue entre elles [6]. Cette méthode est utilisée dans de nombreux domaines industriels pour créer des structures métalliques complexes, des pipelines, des équipements de construction, des véhicules, des navires, des avions, des ponts, des meubles, des appareils ménagers et bien d'autres produits. Le soudage peut être effectué à l'aide de différentes techniques, chacune ayant ses avantages et ses limites en termes de vitesse, de coût, de qualité de la soudure, de facilité d'utilisation et de sécurité. Les soudeurs professionnels doivent suivre une formation et obtenir une certification pour garantir la qualité et la sécurité des soudures qu'ils produisent [7].

I.1 Description du procédé de soudage par friction-Malaxage (FSW)

I.1.1 Définition

Le soudage FSW, ou "**Friction Stir Welding**" en anglais, est une méthode prometteuse pour assembler des pièces en aluminium. Contrairement aux techniques traditionnelles de soudage qui impliquent la fusion des métaux, le FSW permet de souder des alliages d'aluminium à haute résistance sans les faire fondre. Avant cela, certains alliages d'aluminium étaient difficiles à souder avec les méthodes conventionnelles. De plus, cette technique est également utilisée et appréciée pour assembler des matériaux différents [8].

I.1.2 Principe de soudage par friction malaxage FSW (Friction Stir Welding):

Le soudage FSW utilise généralement la déformation plastique à chaud pour assembler des plaques. Un flux de chaleur est produit par la friction des matériaux (interface entre l'outil et la plaque) ainsi que par la déformation plastique causée par le malaxage des deux plaques en contact. Les plaques sont très serrées pour empêcher toute rotation lors du malaxage (**figure I.1**). En raison de cette circulation de chaleur, la température des matériaux augmente tout en restant inférieure à leur température de fusion. On produit de la chaleur grâce aux frottements. Intensés de l'outil de haute résistance mécanique et thermique avec la surface des pièces à souder. Grâce à son épaulement (en anglais "shoulder"), l'outil accomplit deux fonctions : le malaxage et la déformation de la matière. Le pion (pin) peut également malaxer la matière ramollie et effectuer un mouvement d'avance dans la direction de la ligne de joint à souder afin de former la soudure après réchauffement. [9]

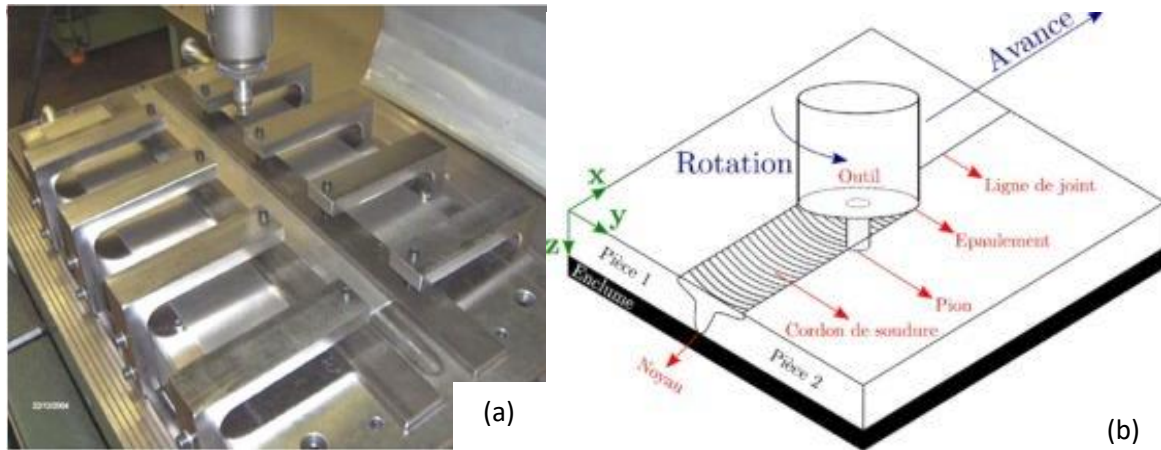


Figure I.1. (a) Illustration du procédé de soudage par friction et malaxage, (b) Exemple de système de bridage [10,11].

I.1.3 Paramètres du soudage par friction malaxage

- Géométrie de l'outil.
- Vitesse de rotation de l'outil, notée ω .
- La vitesse d'avance, qui correspond à la vitesse de déplacement de l'outil le long de la jonction à souder.
- La force axiale F_z , appliquée sur l'outil le long de son axe de rotation, pour compenser la pression générée dans la zone de soudage [12].

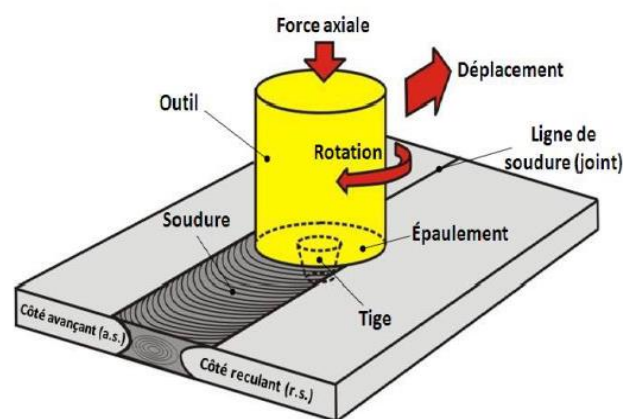


Figure I.2. Visualisation des paramètres de soudage [12].

Il faut ajuster ces paramètres en fonction des matériaux, de l'épaisseur de soudure et de la configuration de l'outil. Tout cela dépend de l'énergie fournie, du flux de matière, de la formation du cordon, des caractéristiques mécaniques de l'assemblage et des efforts produits

[13]. Bien entendu, ces paramètres diffèrent en fonction de divers éléments. Il est donc essentiel de bien appréhender leurs conséquences afin d'obtenir une soudure de haute qualité. L'outil et les paramètres de soudage jouent un rôle crucial dans la qualité d'un joint FSW. La Structure de l'outil joue un rôle essentiel dans la répartition de la chaleur et la quantité de métal entraînée par celui-ci [14]. Cependant, la vitesse d'avance, la vitesse de rotation de l'outil, la distance entre le pion et la racine de l'articulation, la force verticale exercée par l'outil et l'inclinaison de l'épaulement par rapport à la surface de l'articulation influencent tous les paramètres du processus. La qualité des joints Ces paramètres varient en fonction du métal soudé, de la configuration du joint et de la géométrie de l'outil utilisé. Ils sont généralement déterminés expérimentalement après sélection d'un outil. [15]

I.1.4 Outils de soudage

Cet outil remplit deux fonctions principales. Premièrement, cela crée une friction sur la pièce, ce qui provoque une concentration de chaleur qui ramollit le matériau, et permet au matériau de se déplacer du côté qui avance vers le côté retrait de la soudure [13].

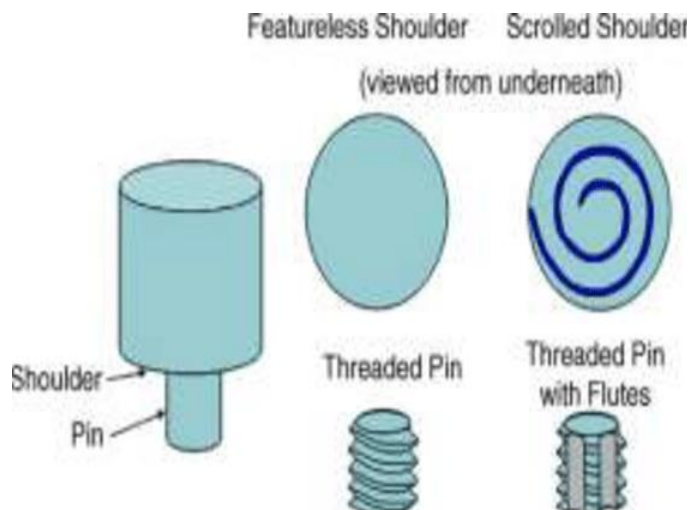


Figure I.3. Schéma simplifié de l'outil (tige et épaulement) dans le soudage par friction-malaxage [13].

La tige (également appelée goupille) est insérée dans le matériau jusqu'à ce que les épaules entrent en contact. La longueur de la canne à pêche détermine la profondeur de plongée. Le frottement de l'épaulement sur la pièce entraîne le taux de chaleur le plus élevé. La conception de l'outil joue un rôle important dans l'uniformité de la microstructure ainsi que dans les propriétés mécaniques du joint. Les tiges filetées et les épaulements concaves sont les plus utilisés car ils permettent un meilleur mélange des matériaux et évitent les déversements

et les bavures. [13]. Un aspect clé qui aide l'épaulement à distribuer la matière travaillée de l'avant vers l'arrière de l'outil est l'angle formé par la tige.

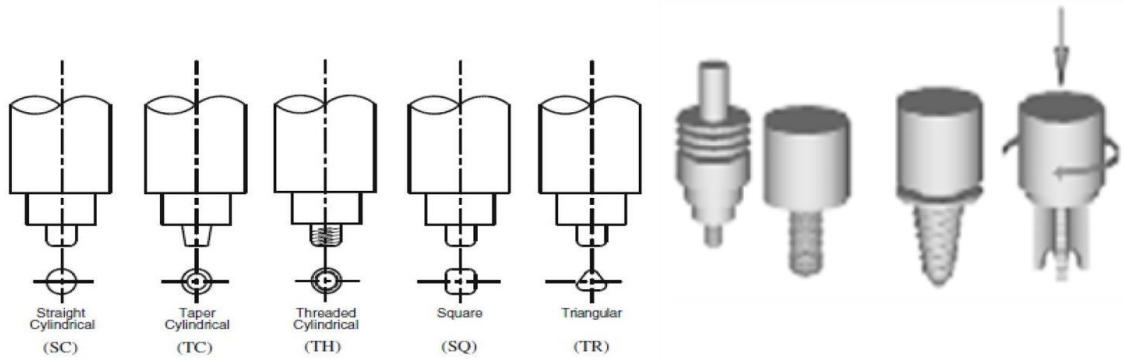


Figure I.4. Les différentes formes de la tige [16,17].

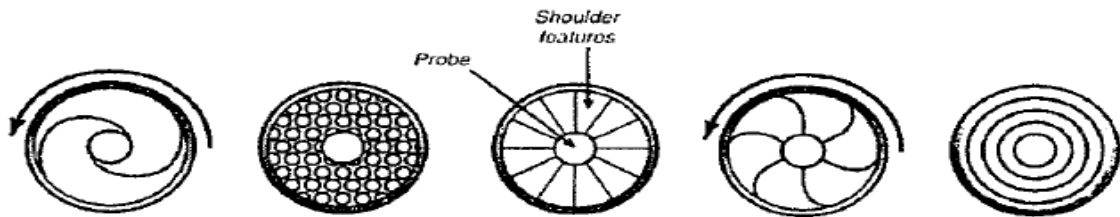


Figure I.5. Les différentes formes d'épaulement [13].

I.1.5 Equipement

Le soudage par friction malaxage (FSW) peut être réalisé avec divers équipements équipés d'un mandrin rotatif. Cependant, la réussite du soudage dépend de la capacité de l'équipement à fournir une force axiale significative. Il est nécessaire que l'équipement puisse pousser l'outil dans le métal et maintenir sa position, bien que ce paramètre soit souvent négligé. La "machine ESAB SuperStir" utilisée par le "Welding Institute" (TWI) illustre un exemple d'équipement spécifiquement conçu pour ce procédé, étant aussi performante que les machines d'usinage CNC et les robots industriels. Cependant, quelle que soit la nature de l'équipement utilisé, il est crucial de bien fixer les pièces à souder afin de prévenir les déplacements et de minimiser les déformations dues aux forces importantes exercées par le mandrin et les forces de réaction sur les supports. Alors que la plupart des machines utilisent des systèmes mécaniques ou hydrauliques, certaines emploient des systèmes de maintien par vide. [18]

I.2 Mécanismes physiques du procédé et microstructure

I.2.1 Mécanique

En général, les phénomènes mécaniques se produisent à cause du frottement entre l'outil et les pièces soudées, ainsi que de la déformation plastique du matériau. Le frottement se produit lorsque l'outil en rotation entre en contact avec le matériau. Ce frottement crée une force de glissement à l'endroit où ils se touchent. La déformation plastique du matériau est causée par son mouvement en rotation sous l'effet du frottement avec l'outil, ainsi que par le mélange provoqué par un élément appelé "pion". Cette déformation plastique est particulièrement importante sous l'outil [1].

I.2.1 Thermique

Les deux principaux phénomènes thermiques pendant le processus, FSW, sont la production et la transmission de chaleur. La chaleur est produite par une source surfacique causée par le frottement à l'interface et une source volumique causée par la déformation plastique du matériau. La distribution de la chaleur produite entre ces deux sources est influencée par la situation de contact entre l'outil et le matériau. Effectivement, lorsqu'il s'agit d'un contact presque collant, la chaleur est principalement produite par la déformation du matériau. En revanche, dans le cas d'un contact glissant, la majorité de la chaleur est générée par le frottement. La chaleur produite est principalement transmise par conduction. Dans les pièces soudées, le transfert par conduction repose sur deux facteurs. Tout d'abord, Il est conditionné par la conductivité thermique du matériau soudé, par exemple, l'aluminium présente une conductivité thermique élevée, ce qui favorise une évacuation rapide de la chaleur générée. Deuxièmement, cela est influencé par la quantité de chaleur évacuée dans la plaque support et dans l'outil, c'est-à-dire la résistance des interfaces de contact aux transferts thermiques (**voir figura I.6**). Enfin, la chaleur est également dissipée par convection entre l'outil, les deux plaques à souder et la plaque support, ainsi qu'avec l'environnement extérieur (ambient). [1]

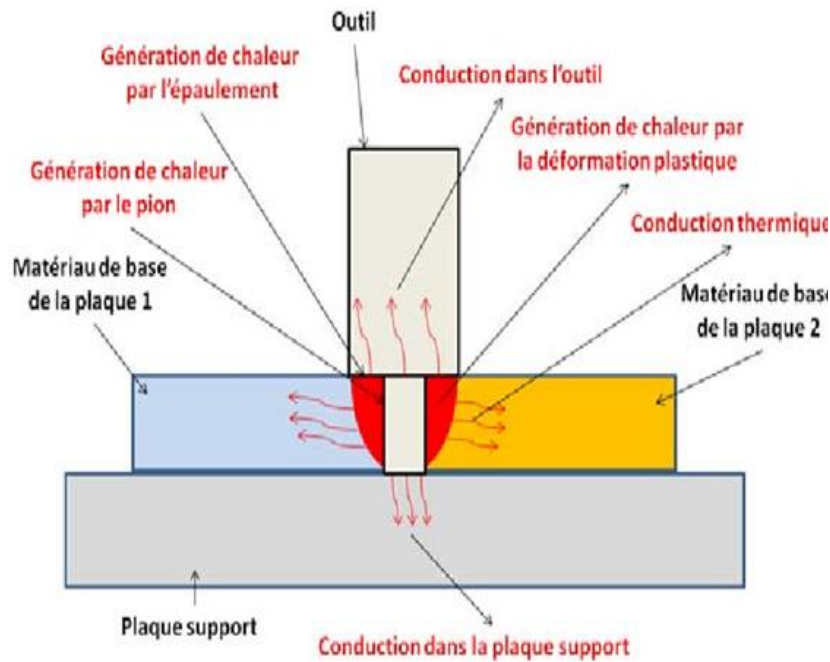


Figure I.6. Transferts thermiques induits par le procédé FSW [19].

I.2.3 Métallurgie

Dans tous les procédés de soudage par fusion, les phénomènes mécaniques et thermiques entraînent des modifications de la microstructure du matériau de base et de ses propriétés mécaniques. Cet inconvénient provient des phénomènes métallurgiques qui se produisent lors du soudage et représentent le lieu de concentration des contraintes en cas de contraintes extérieures. Le premier phénomène métallurgique est une modification de l'état de précipitation du matériau. La seconde est la recristallisation des matériaux. Au contraire, le procédé de soudage FSW peut obtenir des changements métallurgiques plus petits provoqués par différentes transformations de phase au cours du processus de soudage par rapport aux autres procédés. Grâce à la section transversale du joint soudé, il est possible d'obtenir différentes zones du matériau qui sont affectées thermiquement (zone affectée thermiquement HAZ) ou affectées thermo mécaniquement (zone affectée thermiquement TMAZ) (**voir figure I.7**). Chaque zone dépend des températures atteintes, des changements métallurgiques et des déformations subies lors de la déformation pendant le soudage [1].

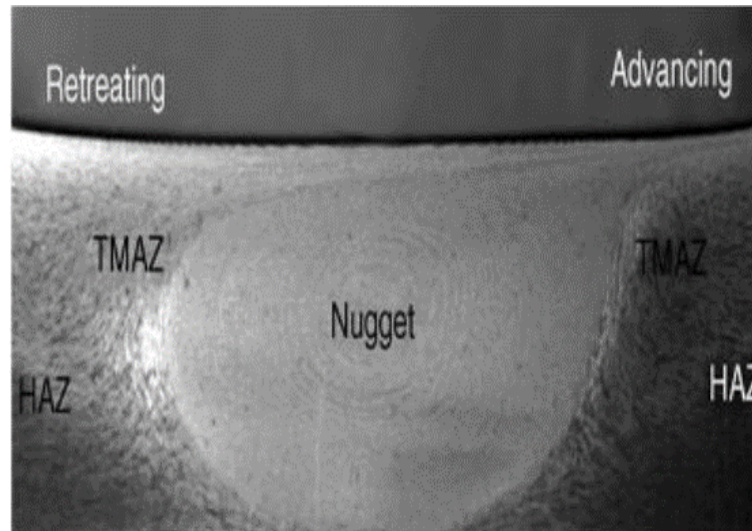


Figure I.7. Coupe d'une soudure sur un alliage d'aluminium [20].

I.3 Les différentes phases opératoires de soudage par friction

I.3.1 Phase de pénétration

Le petit clou pénètre lentement dans la partie où les deux morceaux se rencontrent, et on appuie dessus jusqu'à ce que la partie plate atteigne les morceaux. Par la suite, l'outil est laissé dans cette position pendant un certain temps, appelé temps de maintien, afin de chauffer les matériaux assez bien et de les rendre plus souples. Cela est démontré dans la (**figure I.8**). [21]

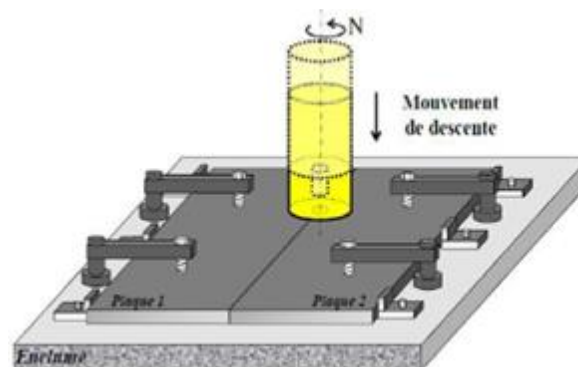


Figure I.8. Schématisation de phase de pénétration [22].

I.3.2 Phase de soudage

Après l'atteinte de la température requise pour souder les pièces, le petit clou commence à se déplacer le long de la ligne où les morceaux se font contact. Il est également Possible de déplacer la table plutôt que le petit clou. Cela facilite la fusion des matériaux entre les deux pièces. Au cours de cette étape, une force est exercée sur l'outil, appelée effort de forgeage, et il est maintenu en position. Les matériaux mélangés subissent une déformation Durable et

constituent le cordon de soudure. Le cordon obtenu n'est pas symétrique, car le mouvement combiné du petit clou en rotation et en avance forme deux faces : d'une part, le petit clou avance dans la même direction que son avance, et d'autre part, il avance dans le sens contraire (**voir la figure I.9**). [21]

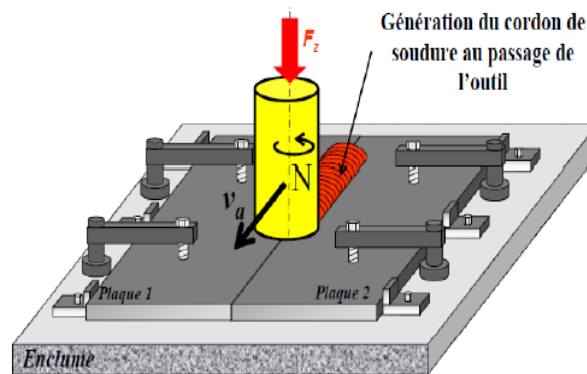


Figure I.9. Schématisation de phase de soudage [22].

I.3.3 Phase de retrait:

Une fois que le cordon est fait, le petit clou du joint est retiré, ce qui laisse un trou à la fin du cordon. Cependant, il est possible d'éviter cette fissure en utilisant un petit clou qui se rétracte seul. Dans cette situation, la surface plate reste en contact avec la matière jusqu'à ce que le clou soit entièrement retiré. Cela est démontré dans (**la figure I.10**). [21]

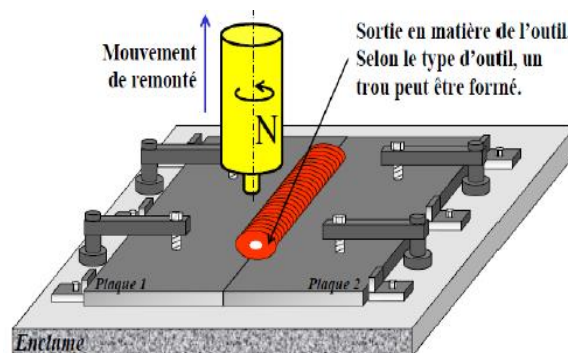


Figure I.10. Schématisation de phase de retrait de l'outil [22].

I.4 Avantage et Inconvénient du soudage par friction malaxage

I.4.1 Avantages liée au procédé

- Peut souder une grande variété d'épaisseurs,
- Prépare les surfaces des pièces mécaniquement,

- Pas besoin de décapage chimique pour les alliages légers,
- Peut souder des matériaux différents,
- Peut souder en une seule passe sur toute l'épaisseur ou en deux passes opposées,
- Aucune finition requise après le soudage,
- Peut souder dans toutes les orientations.

I.4.2 Avantages liées à la soudure par FSW

- Peut souder beaucoup de types de matériaux,
- Peut souder des alliages qui sont difficiles à souder normalement,
- Utilise un type de soudage solide : pas de refroidissement rapide du métal fondu (évite les problèmes de trous et de fissures),
- Produit des pièces avec de bonnes qualités mécaniques,
- Réduit les tensions restantes dans les pièces,
- Moins de changement de forme après le soudage.

I.4.3 Avantages économiques et environnementaux

- Ne pollue pas, pas de gaz dangereux ou de fumées,
- Économise de l'énergie,
- N'a pas besoin d'eau de refroidissement,
- Pas besoin de finition après sauf pour les soudures en cercle,
- Utilise efficacement l'énergie.

I.4.4 Avantages liés à l'équipement

- Facile à automatiser avec un contrôle par ordinateur,
- Utilise des équipements simples, similaires à des machines-outils,
- Pas besoin de protection thermique,
- Les seuls consommables sont l'électricité et les outils,
- Peut contrôler les paramètres en temps réel.

I.4.5 Inconvénients

Dans cette méthode, et à la différence des méthodes traditionnelles de soudure continue, la soudure est réalisée en "aveugle", car l'épaulement et l'appui dissimulent complètement les phénomènes dans la soudure résultante. L'absence de vision directe constitue un obstacle dans la recherche de paramètres et dans la surveillance et le contrôle en temps réel des paramètres. En outre, à l'extrémité du cordon, le retrait de l'outil laisse un trou qu'il n'est pas facile de

combler par FSW. Afin de réaliser des soudures linéaires ouvertes, il est nécessaire de mettre en place des taquets à retirer au début et à la fin du cordon. [1]

I.5 Principe de soudage par friction Rotatif

La **figure I.11** illustre les principales étapes du processus de soudage par friction rotative. En prenant en compte le fait que deux axes ou deux tubes doivent être soudés ensemble. L'une des pièces est coincée, l'autre tourne contre l'autre à une vitesse constante grâce à un moteur. Lorsque les deux pièces entrent en contact l'une avec l'autre, les forces de friction créent une résistance de couple. La chaleur produite est convertie en énergie dans la surface de contact. La chaleur produite entraîne une augmentation rapide de la température jusqu'à atteindre la température de soudage (température de forgeage). On détache ensuite la pièce en rotation du mandrin freiné jusqu'à ce qu'elle soit complètement arrêtée. [23]

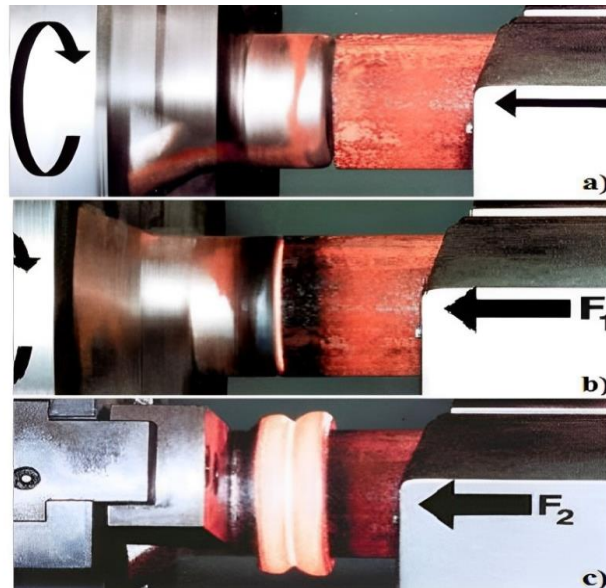


Figure I.11.Principe du soudage par friction rotative [24].

I.6 Les différentes phases opératoires de soudage par friction

I.6.1 Phase d'accostage

Mettant en contact étroit les deux parties, cette étape se caractérise par :

- Le couple de friction et la force axiale augmentent progressivement jusqu'à atteindre la valeur maximale (optimale),
- A ce stade, la formation de billes n'est pas encore déclenchée (pas d'aucun raccourcissement axial ne se produit à ce stade),

I.6.2 Phase transitoire

Cette phase correspond au chauffage du local et se caractérise par :

- Même vitesse que la phase d'amarrage
- Le raccourcissement axial commence au début de cette phase
- La température de l'interface atteint la température de soudage
- Le métal est à l'état plastique
- Le couple de friction et la force axiale diminuent progressivement à ce stade jusqu'à atteindre la soi-disant valeur d'équilibre

I.6.3 Phase d'équilibre

- La formation de perles à ce stade
- Le couple de friction et la force axiale augmentent à ce stade
- La température moyenne diminuera jusqu'à la fin de l'opération de soudage

I.6.4 Phase de forgeage

- C'est la dernière étape du cycle de soudage, au cours de laquelle les pièces démarrent du refroidissement, ses caractéristiques sont :
- La pression de forgeage est supérieure à la pression de friction et au couple de friction
Puis diminuer et disparaître ;
- Augmenter le raccourcissement axial [25,26]

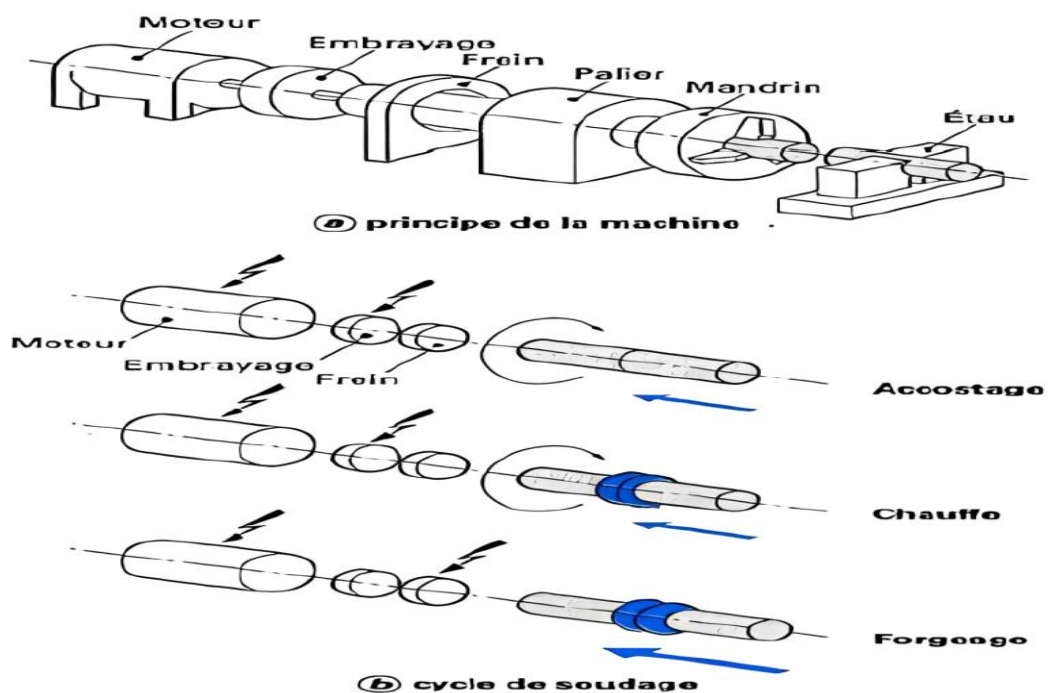


Figure I.12.Soudage par entraînement direct ou continu [27].

I.7 Cycle de soudage

Les facteurs qui affectent la qualité de cet assemblage:

- Le temps requis pour le soudage.
- La force appliquée entre les pièces.
- La vitesse de rotation relative.
- La quantité de matériau consommée.
- La pression axiale souda

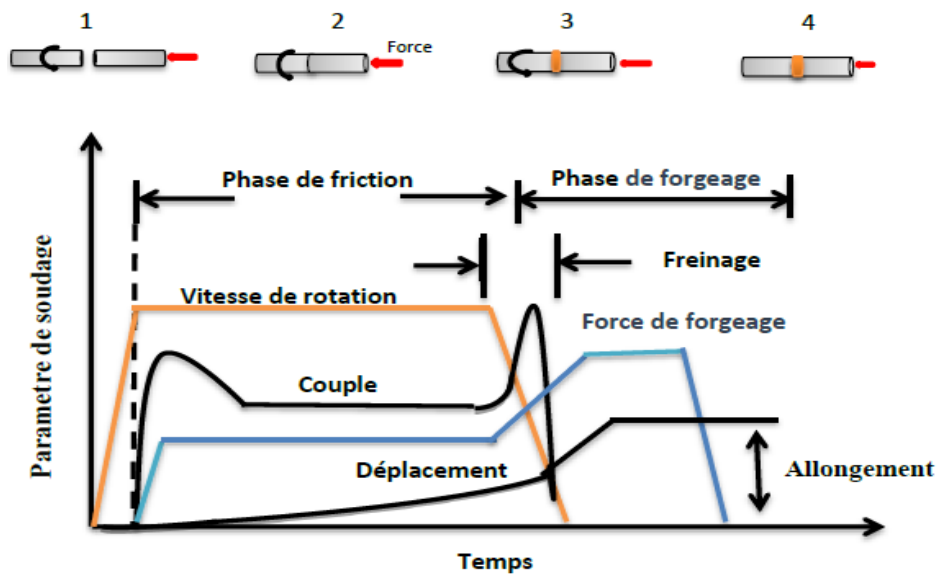


Figure I.13. Le cycle de soudage par friction [28].

I.8 Les caractéristiques mécaniques

Les propriétés mécaniques sont conservées voire améliorées :

I.8.1 Résistance à l'extension

Résistance à l'extension de la zone de montage. Au moins la même chose que les matériaux de soudage.

I.8.2 Résistance à la torsion

La zone d'assemblage a une résistance à la torsion similaire à celle des pièces soudées.

I.8.3 Résistance à la flexion

La résistance à la flexion est inférieure à celle des matériaux assemblés dans la zone de soudage, avec une perte d'environ 15 %.

I.8.4 Dureté

Dans la zone de soudage, la dureté est supérieure à la dureté des matériaux à assembler. Le gain de dureté varie selon le matériau, l'état métallurgique et le cycle de soudage. Les principales caractéristiques du soudage par friction sont présentées dans le **tableau I.1**.

Tableau I.1. Les caractéristiques de soudage par friction[29].

Vitesse de rotation	50 à 80 000 t/min
Pression axiale	15 à 400 MN/m ²
Gamme de diamètre	1 à 150 mm
Durée de cycle	5 à 500 s
Mise en œuvre	Machine standard à raccorder, outillage spécifique
Portabilité	Généralement fixe en atelier

I.9 Avantages et les limites du soudage par friction rotative

I.9.1 Avantages du soudage par friction sont :

- Les Par rapport aux autres procédés de soudage, le soudage par friction rotative (ou le soudage par friction en général) présente les avantages suivants avantages du soudage par friction sont:
- Produire des composants de haute qualité avec une bonne structure métallurgique,
- Aucune préparation particulière des pièces à souder n'est nécessaire,
- Plus rapide que le procédé de soudage traditionnel (fusion),
- En raison du temps de soudage court et de la basse température, la déformation après soudage est faible,
- Différents matériaux peuvent être assemblés, comme l'aluminium et le cuivre, l'acier et le nickel, etc.
- Possibilité d'automatisation,
- Pas de métal d'apport, pas de gaz de protection, pas de fumées de soudure ni de rayonnement.

I.9.2 Les limites du soudage par friction sont:

- L'une des pièces à souder doit avoir un axe de symétrie pour pouvoir tourner autour de cet axe.
- Les équipements et outils de soudage sont chers,

- Les matériaux non forgeables, comme la fonte, ne peuvent pas être soudés par friction.
- Certains matériaux, tels que le graphite, le sulfure de fer et le plomb, ne peuvent pas le soudage est utilisé en raison de son faible coefficient de frottement [30].

I.10 Principaux domaines d'applications

Le procédé FSW est principalement utilisé dans les industries des transports, l'aviation, l'automobile, aéronautique, naval, spatiale, etc.....

I.10.1 Domaine de l'automobile

Le FSW est utilisé dans l'industrie automobile pour assembler des pièces telles que des panneaux de carrosserie, des châssis, des structures intérieures et des composants de suspension. Comparée à d'autres technologies de soudage, cette technologie produit des soudures plus résistantes à la fatigue tout en étant solides, uniformes et esthétiques [31].

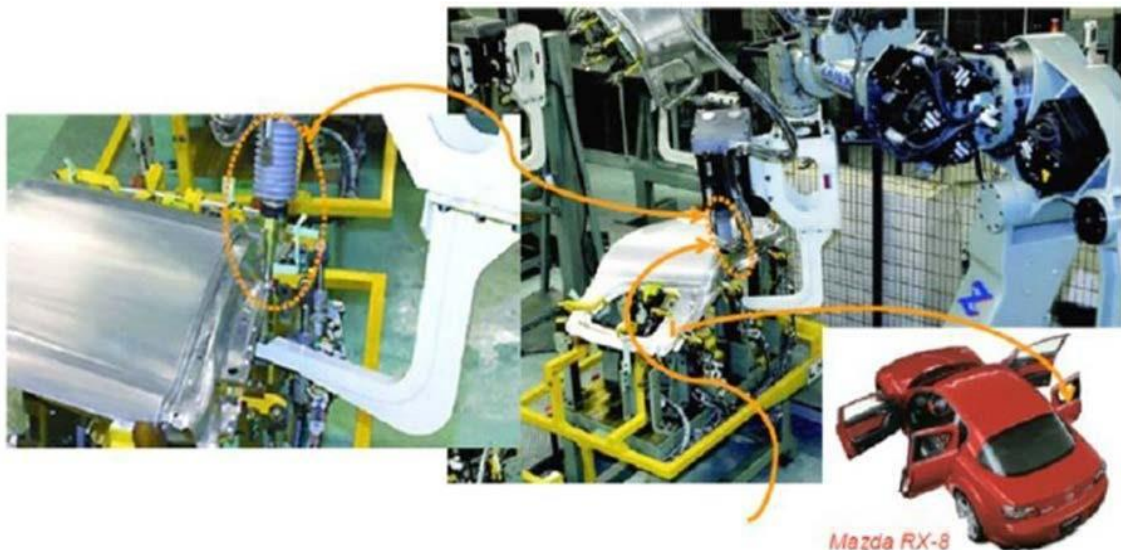


Figure I.14. Soudage « friction-malaxage » par point utilisé pour l'automobile [31].

I.10.2 Domaine l'industrie aéronautique

Le FSW est utilisé dans l'industrie automobile pour assembler des pièces telles que des panneaux de carrosserie, des châssis, des structures intérieures et des composants de suspension. Comparée à d'autres technologies de soudage, cette technologie produit des soudures plus résistantes à la fatigue tout en étant solides, uniformes et esthétiques [32].



Figure I.15.Voilure d'avion soudée par FSW [32]

I.10.3 Domaine naval

Le FSW est utilisé dans l'industrie de la fabrication maritime pour construire des composants tels que des coques, des superstructures, des réservoirs de carburant, des cloisons et des aménagements internes. Il peut réaliser un soudage continu de haute qualité sans pores, obtenant une résistance mécanique élevée et d'excellentes performances d'étanchéité.

De plus, il offre des avantages en matière de productivité et de durabilité. Le soudage de pièces de grande taille et de forme complexe devient possible. Ceci est crucial dans l'industrie de la fabrication navale car la structure est souvent importante [33].



Figure I.16. (a) Bateau en aluminium construit en utilisant FSW / (b)Panneaux préfabriqués (Hydro Marine Aluminium) destine au pont du bateau de croisière [33].

Chapitre II:
Travaux sur la modélisation de soudage
par friction-malaxage

Introduction

Les travaux de Mr Chetan Chalurkar et ses collaborateurs sur l'analyse de la température du soudage par friction-malaxage (**AA6061-T6**) à l'aide d'une approche couplée eulérienne-lagrangienne (**ICMSE 2022**).

Les travaux de M. **Chetan Chalurkar** et de ses collaborateurs, présentés lors de la conférence **ICMSE 2022**, se concentrent sur l'analyse de la température durant le FSW en utilisant une approche couplée eulérienne-lagrangienne. Cette méthode permet de modéliser avec précision le comportement thermique du matériau tout au long du processus de soudage, en tenant compte des interactions complexes entre les éléments en mouvement et la matrice de matériau. Le soudage par friction-malaxage (FSW) est une technique innovante qui permet de joindre des matériaux métalliques sans fusion. Cette méthode est particulièrement appréciée dans l'assemblage des alliages d'aluminium, tels que l'**AA6061-T6**, en raison de sa capacité à produire des joints de haute qualité avec une résistance accrue. Cependant, la gestion de la température pendant le processus de soudage est cruciale pour optimiser les propriétés mécaniques des soudures et minimiser les défauts.

II.1 Modèle géométrique du FSW

Le domaine eulérien 3D correspond à la dimension de la pièce à usiner, et l'outil déformable rigide 3D est modélisé. La formulation lagrangienne est utilisée pour modéliser l'outil et la formulation eulérienne est utilisée pour modéliser la pièce à usiner basée sur l'écoulement. La présente étude se concentre sur la simulation du comportement thermique du FSW avec l'AA6061 - T6. La géométrie correspond aux conditions expérimentales pendant le soudage. Les dimensions du domaine eulérien sont de 40×50×3 mm, et l'outil est modélisé en prenant un diamètre de broche cylindrique de 5 mm, une longueur de broche de 2,8 mm et un diamètre d'épaulement de 15 mm, comme le montre la (figure **II.1**).

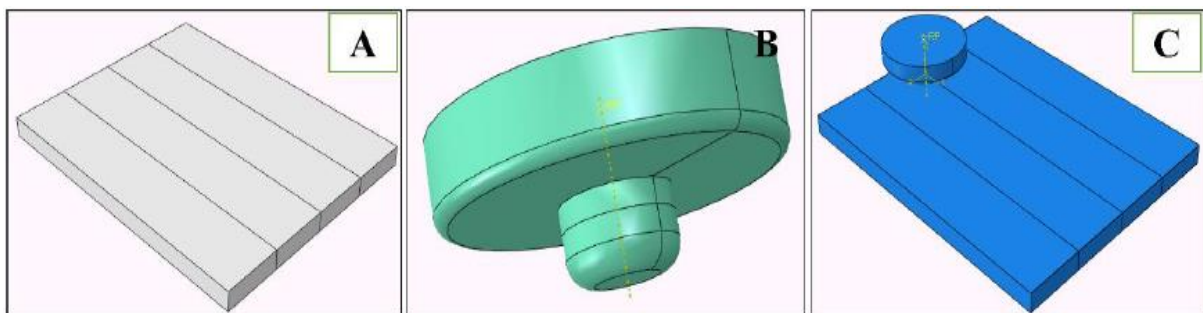


Figure II.1.Modèle géométrique du FSW - (A) Domaine eulérien, (B) Outil, (C) Assemblage.

II.1.1 Résulta et Discussion

Dans la présente étude, l'effet des paramètres du procédé FSW sur le comportement thermique par le profil de température est examiné. La procédure de simulation 3-D a été utilisée dans le progiciel **FEM ABAQUS** pour modéliser le processus. La température obtenue avec le modèle FEM est comparée à la température expérimentale pour valider le modèle FEM. Les **figures II. 2, 3 et 4** montre la distribution de la température pour le paramètre de soudage 1200 tr/min et 180 mm/min. Les sections A, B, C et D montrent la température maximale atteinte, le contour de la température et le tracé de la température en fonction des étapes. Respectivement pour chaque étape du FSW.

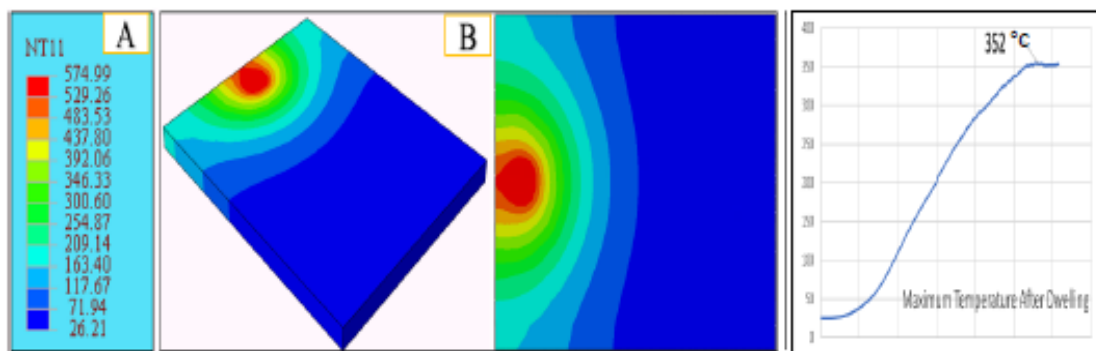


Figure II.2. Profil de température au stade de la plongée.

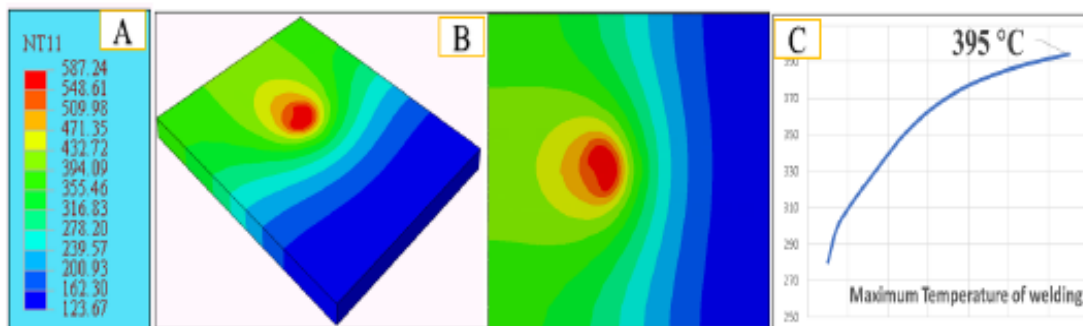


Figure II.3. Profil de température au bord du soudage.

Les graphiques pour chaque étape respectivement sont tracés en mesurant la température à 10 mm de la ligne de soudure du FSW. (**La figure II. 4**) montre le contour de la température pour l'étape de soudage après 8 secondes, après l'achèvement de l'étape de plongée et de soudage. La température maximale au centre de la soudure, après 8 secondes, est de 587,24 °C, soit 90 % de la température du point de fusion. La température maximale enregistrée lorsque le thermocouple du passage de l'outil est placé à 10 mm du cordon de soudure est de 357,24 de la soudure est de 357 °C et la température maximale obtenue par simulation en plaçant le point nodal à 10 mm est de 395 °C.

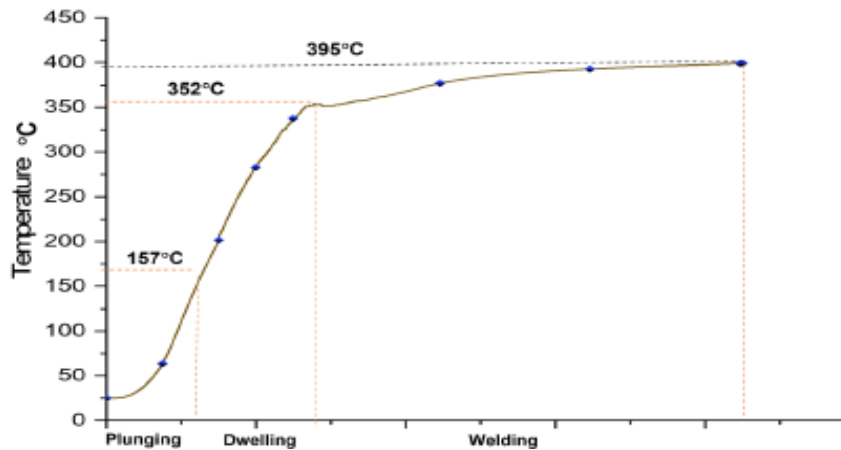


Figure II.4. Evolution de la température pour chaque étape de soudage par friction malaxage

Les chercheurs ont constaté que la température maximale est atteinte au début de la phase de logement. Dans la simulation, pour la phase de logement, le contour de température a atteint le coin de la pièce en faisant tourner l'outil jusqu'à sa position, créant une température adaptée au soudage, dans laquelle le matériau commence à se déformer et à s'écouler autour de l'outil, comme le montre la (figure II.2). Les auteurs ont conclu que la distribution de la température obtenue à partir des observations expérimentales et des simulations numériques s'est avérée bien conforme. [34]

II.2 Les travaux de Mr Bilal Ahmad et ses collaborateurs sur la modélisation numérique avancée du soudage par friction-malaxage d'acier faiblement allié (2018).

Le soudage par friction-malaxage (FSW) est une technique de soudage solide, particulièrement adaptée à l'assemblage des aciers faiblement alliés. En 2018, M. Bilal Ahmad et ses collaborateurs ont mené des travaux sur la modélisation numérique avancée de ce procédé, visant à améliorer les performances de soudage et à comprendre les mécanismes thermomécaniques impliqués.

Le présent travail de recherche fait progresser la compréhension scientifique du FSW de l'acier de construction en développant un modèle thermomécanique. La géométrie de la pièce et de l'outil sont illustrés dans (la figure II.5).

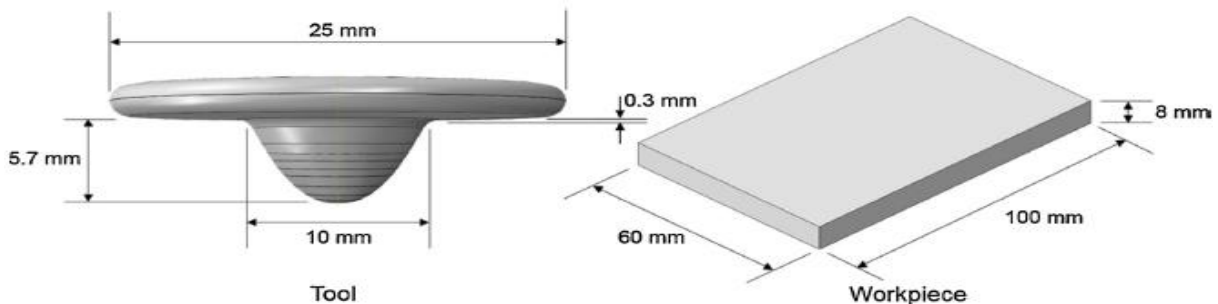


figure II.5. La géométrie de la pièce et de l'outil sont illustrés.

La (**figure II.6**) présente les courbes de température dans la vue isométrique et les coupes transversales des modèles de soudure lente et rapide pour la phase de plongée. Comme la vitesse d'avance dans la direction descendante a été fixée à un niveau constant (100 mm/min) pour les deux modèles, la comparaison des résultats dans la phase de plongée est uniquement basée sur la vitesse de rotation de l'outil. La température dans la phase de plongée pour le modèle de soudage rapide est légèrement plus élevée que celle du modèle de soudage lent, comme le montre la (**figure II.6**). Cela s'explique par la vitesse de rotation plus élevée dans le modèle de soudage rapide que dans le modèle de soudage lent.

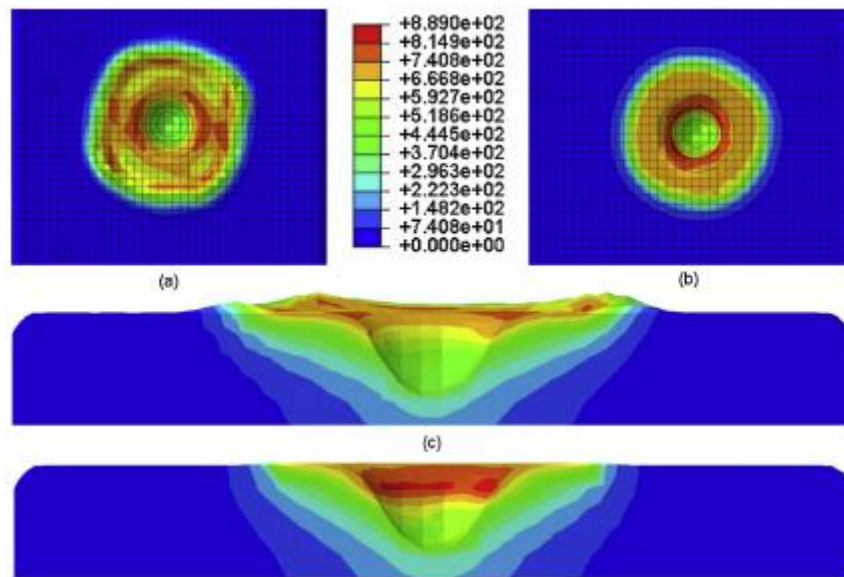


Figure II.6. Distribution de la température en C° à l'étape de plongée ; (a) Vue de dessus du modèle de soudure lente, (b) Vue de dessus du modèle de soudure rapide, (c) Vue en coupe du modèle de soudure lente et (d) Vue en coupe du modèle de soudure rapide. (Rotatif)

Dans le logement, la distribution de la température dans le modèle de soudage lent (**Fig. II.7a et c**) couvre une plus grande surface que dans le modèle de soudage rapide (**Fig. II.7b et d**). En revanche, la température maximale dans le modèle de soudage lent a atteint 993,7 °C à l'interface épaulement-pièce, et 1084 °C dans le modèle de soudage rapide dans la même région. Le profil de température a eu tendance à s'étendre vers les côtés et le fond. L'outil n'ayant pas de mouvement de translation, le profil de température des deux modèles était très symétrique par rapport à l'axe de la soudure. Cela montre que le temps de séjour pour le modèle de soudure rapide peut être réduit car il a tendance à chauffer le matériau environnant en moins de temps. La non-uniformité de la distribution de la température autour de l'outil sur la surface des deux modèles est attribuée à la génération de bavures au cours du processus.

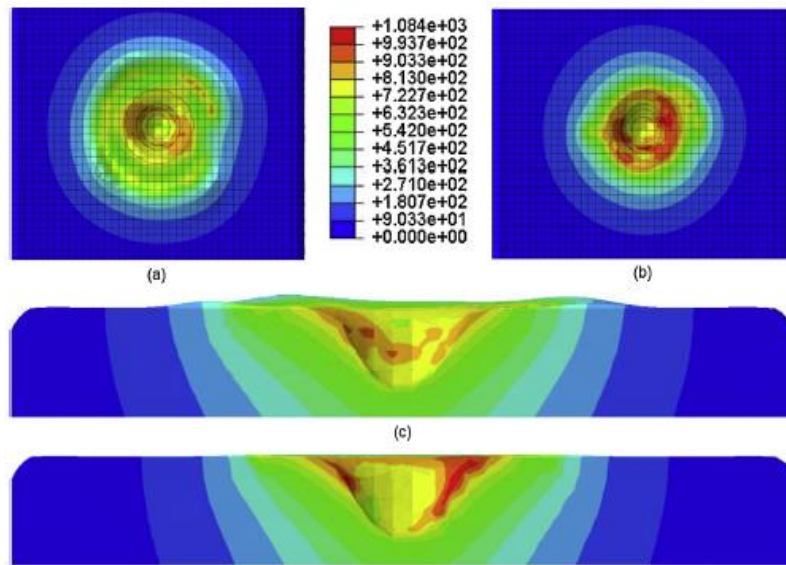


Figure II.7. Distribution de la température en C° au stade de la temporisation ; (a) Vue isométrique du modèle de soudure lente, (b) Vue isométrique du modèle de soudure rapide, (c) Vue en coupe transversale du modèle de soudure lente et (d) Vue en coupe transversal.

Les chercheurs ont mis en évidence par la simulation numérique au moyen du logiciel ABAQUS la distribution des champs de la température dans la phase de plané et dans la phase logement de l'outil. Des conclusions tirées de cette étude est que la distribution inhomogène de la température est due à la génération de bavures au cours du processus de soudage par friction malaxage (effet de la vitesse de rotation de l'outil dont l'amplification du taux de déformation plastique des plaques soudées). [35]

Sur la base de la littérature abondante qui porte sur la modélisation du procédé de soudage par friction malaxage nous avons constaté que le soudage d'aluminium reste toujours un défi et n'exige pas des connaissances approfondies en termes de caractérisations microstructurales, mécanique du joint de soudure. Notre étude porte sur la caractérisation microstructurale, mécanique (dureté) d'un joint de soudure obtenu par le procédé conventionnel de soudage par friction malaxage de l'aluminium pur. L'opération de soudage a été réalisée par une fraiseuse conventionnelle du hall de technologie de l'université de Bejaia. La modélisation par éléments finis a été effectuée par le logiciel ABAQUS. Les propriétés mécaniques et microstructurales du joint de soudure ont été discutées, et la distribution du champ de contraintes thermiques ont été comparées à ceux obtenus expérimentalement.

Chapitre III :
Techniques expérimentales

Introduction

Dans ce chapitre, on présente les matériaux utilisés, les méthodes de soudage et les techniques de caractérisation.

III.1 Matériaux et équipements utilisés

III.1.1 Matériau utilisé :

Les matériaux utilisés dans cette étude expérimentale sont : deux plaques d'aluminium de la série 6000 (**ALMgO.7Si**) et un outil d'acier mi-dur **XC48**. La composition chimique et les propriétés mécaniques et physiques sont obtenues par une analyse spectrométrique au sein du hall de technologie de l'université de Bejaïa. Sont élément ci-dessous de l'aluminium.

Tableau III.1.Composition chimique de l'aluminium

Élément	Si	Fe	Mn	Mg	Al
%en masse	0.2-0.6	0-0.75	-	045-0.8	99.14%

Le **tableau III.2** ci-dessous donne plus de détails sur les caractéristiques physiques et mécaniques de l'alliage aluminium.

Tableau III.2.Caractéristiques physiques et mécaniques de l'alliage aluminium

Module de Young	68000000MPa
Coefficient de poisson	0.31
Masse volumique	2700Kg cm^3
conductivité	200 W/m.k

III.1.2 Découpage des échantillons

Afin de caractériser, nous avons recueilli divers échantillons pour des tests. Nous avons employé une tronçonneuse de modèle **Struers Discotom-5** pour cela. Cet appareil est fréquemment employé pour prélever des échantillons de divers matériaux afin de simplifier les études et les tests ultérieurs.

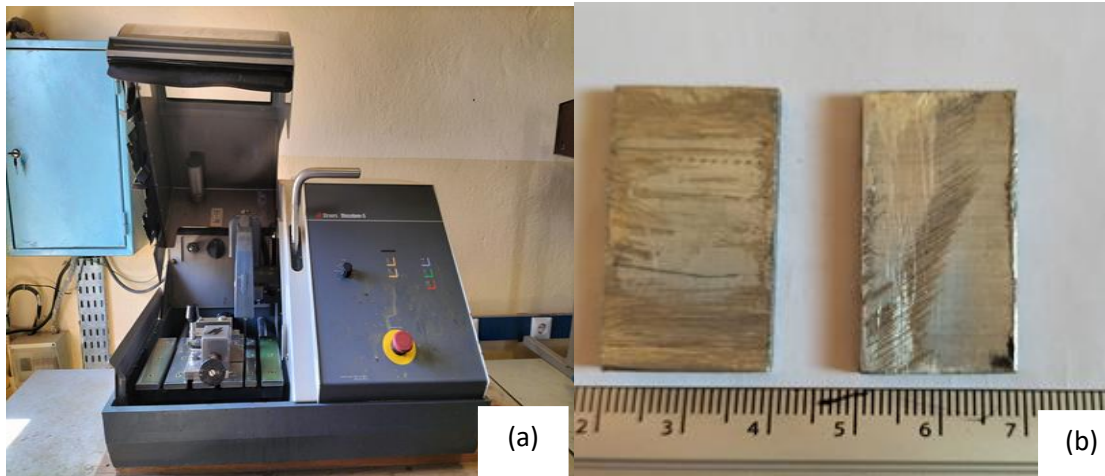


Figure III.8.(a) Tronçonneuse utilisée pour découpage, (b) Les échantillons après découpage .

III.1.3 Les paramètres de procédé du soudage par FSW :

Les outils utilisés pour le soudage par friction malaxage (FSW) sont en acier XC48 moyennement dur. Ce matériau est généralement très résistant pour résister aux efforts lors du soudage et suffisamment dur pour résister aux outils utilisés lors de l'opération de soudage, qui sont usinés par tournage dans le hall technique (**Figure III.2**), ils ont la forme cylindrique suivent la (**figure III.3**).



Figure III.9.Tour conventionnel type SN 40 C du hall de technologie.

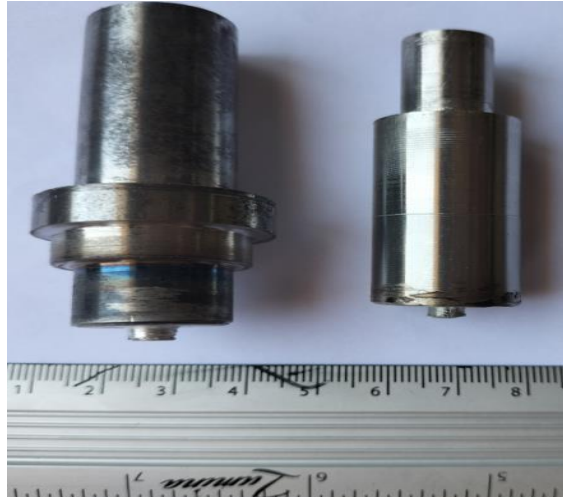


Figure III.10. Les outils de soudage de FSW utilisé.

Les expérimentations FSW ont été réalisées sur une fraiseuse universelle ALMO_FH.

III.1.4 Procédure expérimentale :

Les essais ont été réalisés sur une fraiseuse universelle type "ALMO_FH " (figure III .4(a)). Les plaquettes d'aluminium sont fixées avec un système de bridage qui a quatre brides de serrage afin d'éviter toute déformation lors de l'opération de soudage (figure III.4(b)).



(a)



(b)

figure III.11.a) Fraiseuse universelle modifiée de type FH 1.6 ALMO, (b) Pièce à souder Fixées avec des brides de serrage.

III.1.5 Les paramètres de soudage par friction- malaxage

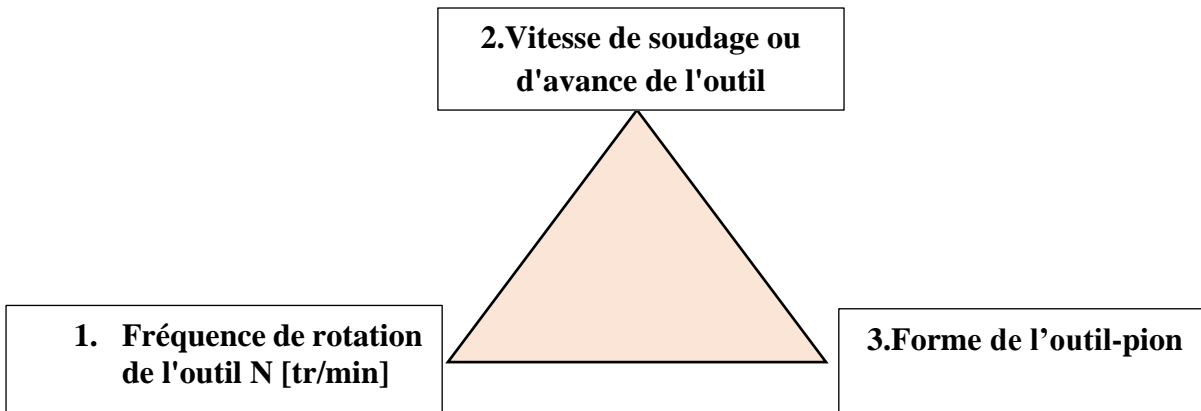


Tableau III.3. Différents essais avec différents paramètres.

N°de l'essais	N (tr/min)	Vf (mm/min)	Épaisseur d'aluminium
1	1400	16	2mm
2	1400	20	1.9mm
3	1400	20	2mm
4	1400	20	3mm
5	1400	16	3mm
6	1400	20	3mm
7	1400	25	3mm
8	1400	25	3mm



Figure III.12. Exécution de l'opération de soudage par friction et malaxage

III.2 Techniques de caractérisation

III.2.1 Température

La principale source de chaleur lors du soudage par malaxage est la friction entre l'épaule de l'outil et le dessus de la plaque. Afin de mesurer la température, on utilise un thermomètre infrarouge, comme illustré dans la (figure III.6).



Figure III.13. Thermomètre infrarouge

III.2.2 Microscopie optique

Après les opérations de soudage des plaques d'aluminium, on prélève des échantillons pour l'étude microstructurale en utilisant le microscope optique. Les échantillons à étudier vont être préparés de la manière suivante :

- **Polissage mécanique**

Une technique utilisée pour lisser la surface d'un matériau en utilisant une machine spéciale appelée polisseuse mécanique (**MATASERV 2000**). Cette méthode implique l'application de pression et de mouvement rotatif sur un matériau avec un abrasif, tel que du papier de verre, afin d'éliminer les imperfections et d'obtenir une surface lisse et brillante. Améliorer surfaces d'un matériau.

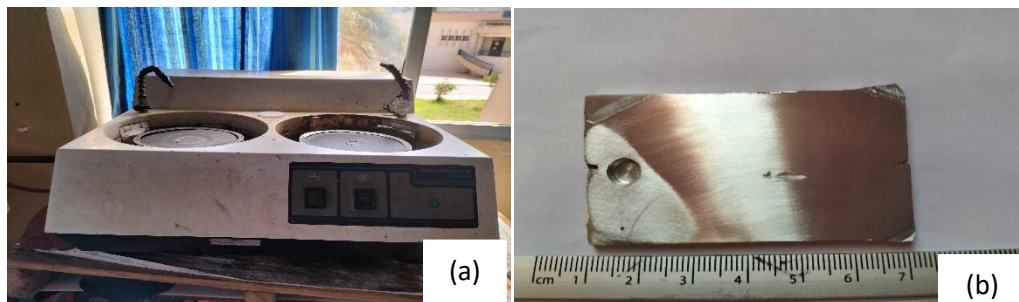


Figure III.14.(a) Polisseuse mécanique utilisée / (b) Eprouvette obtenue après polissage

- **Polissage électrolytique**

Afin d'obtenir un état de surface miroir et d'éliminer les rayures liées au polissage mécanique, on a fait aux éprouvettes à analyser un polissage électrolytique avec une polisseuse de type **POLISEC C25**. La solution utilisée est composée de :

- 900 ml d'éthanol.
- 50 g d'acide tartrique.
- 60 ml d'acide perchlorique.

Les éprouvettes sont mises en contact de la solution pendant 20s dans le bain.



Figure III.15.(a) Polisseuse électrolytique utilisée de type POLISEC C25 / (b) Epreuve

- **Observations par microscopie optique soudé**

Les observations par microscopie optique permettent d'examiner l'état de l'interface du joint. Pour nos études, les observations sont réalisées à l'aide d'un microscope optique de Type (INNOVATEST Europe BV).



Figure III.16. Microscope optique utilisé de type INNOVATEST Europe

III.3 Modélisation du soudage par friction malaxage

III.3.1 Présentation du logiciel

ABAQUS/CAE est divisé en unités fonctionnelles appelées module. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation.

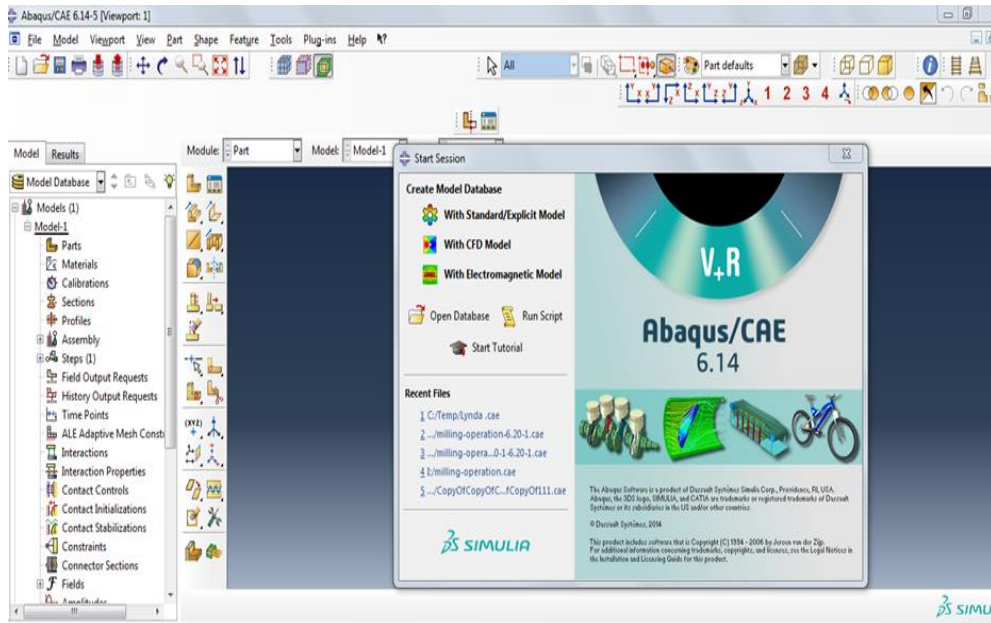


Figure III.17. Interface de code d'ABAQUS.

III.3.2 Création de la géométrie

La géométrie de notre pièce a été conçue au moyen du logiciel ABAQUS de version 6.14-5. Pour faire, une commande dite "Part" a été utilisée pour la création du modèle en 2D comme le montre la (figure III.11).

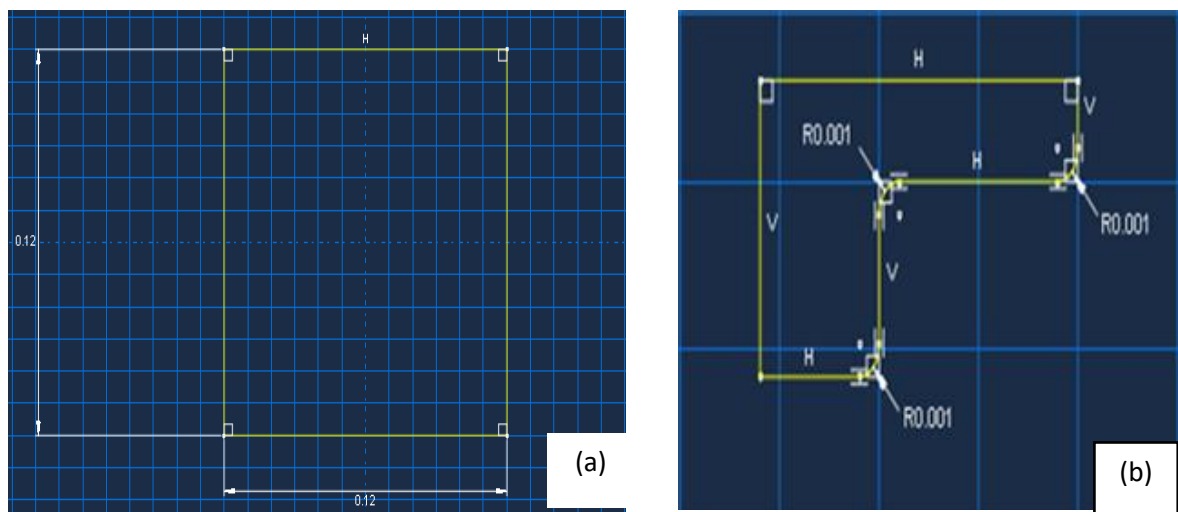


Figure III.18. Géométrie de la pièce et l'outil

Il s'agit en effet d'une plaque rectangulaire en aluminium en 3d avec des dimensions 30mm×48mm×3mm et un outil en acier de diamètre 18mm qui contient un pion de diamètre 5 mm avec un congé de 1 mm

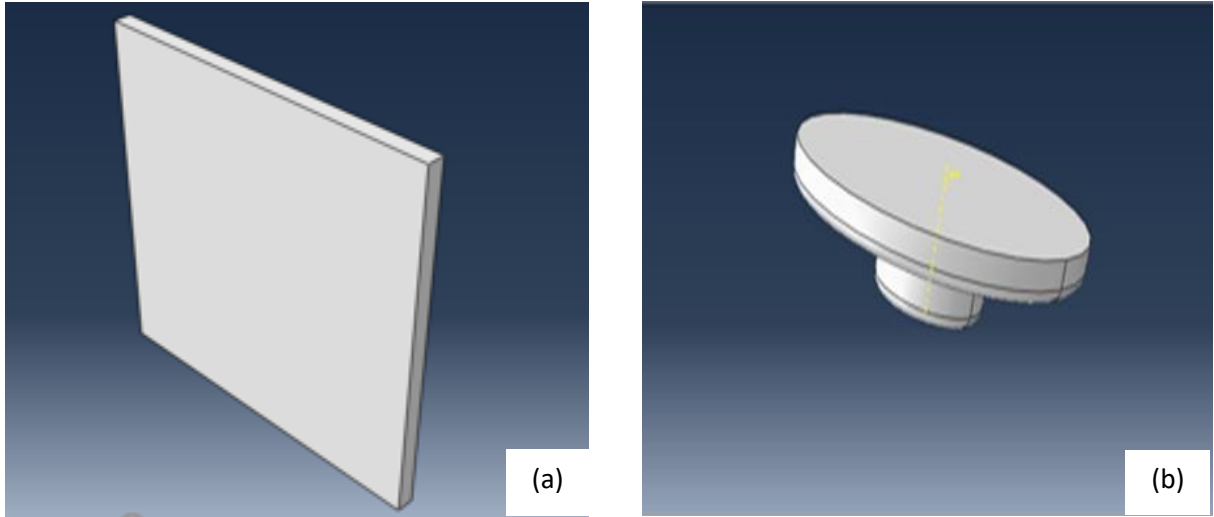


Figure III.19.(a)Les plaques d'aluminium / (b) L'outil en acier créé par Abaqe.

On assemble la plaque d'aluminium et l'outil d'acier comme présenté dans la figure suivante :

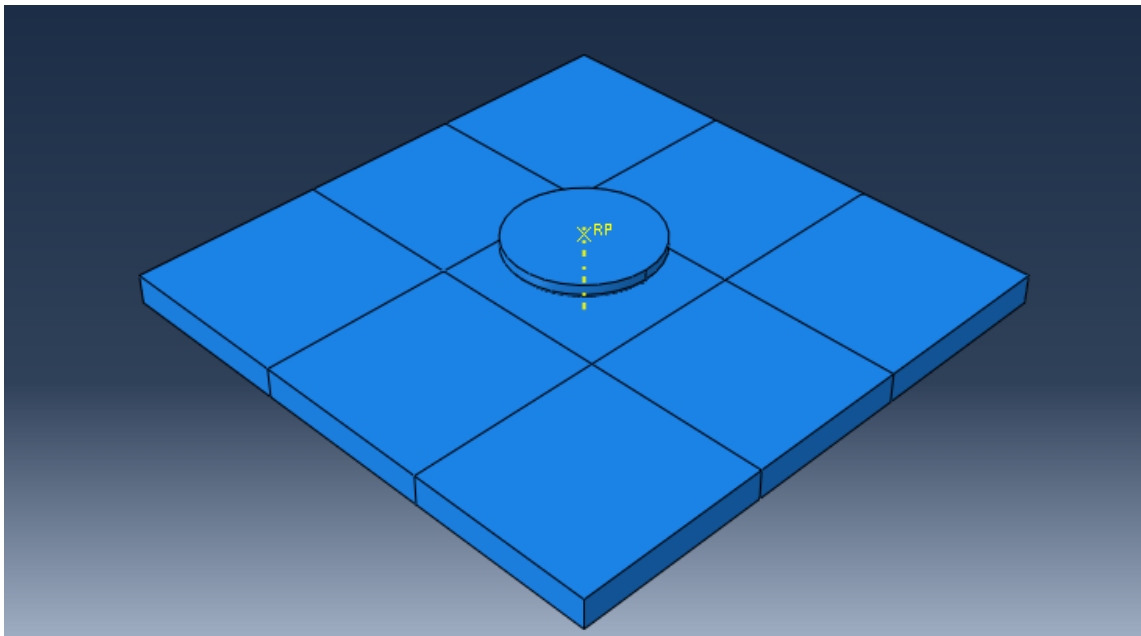


Figure III .20.L'assemblage des plaques et l'outil

Ensuite nous avons procédé au maillage de notre pièce en utilisant la fonction dite "Mesch" du logiciel ABAQUS. Nous avons choisi le maillage de type C3D8RT. Un maillage très fin de taille 0.002 pour l'outil comme indiqué par des lignes rouges dans la (figure III.21) de

taille 0.003, pour la partie à soudée sur les plaque comme indiquer par grossier pour c'est le maillage de plaque d'aluminium et l'outil d'acier pour donner une forme géométrique.

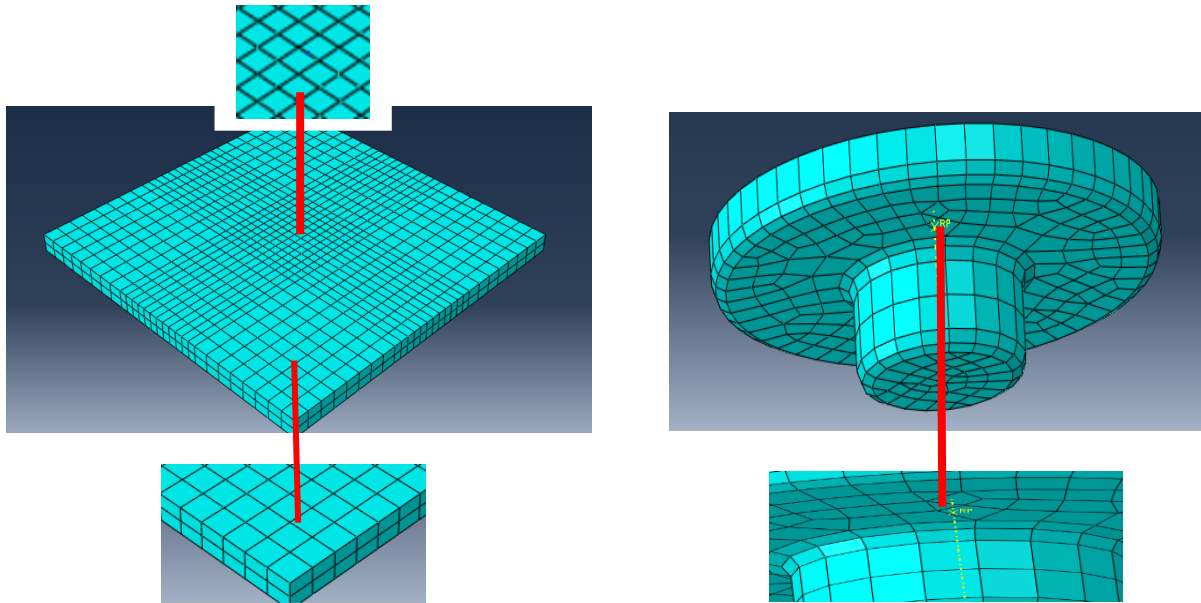


Figure III.14. Maillage des plaques et de l'outil.

Montre l'assemblage des plaques ainsi que l'outil maillé

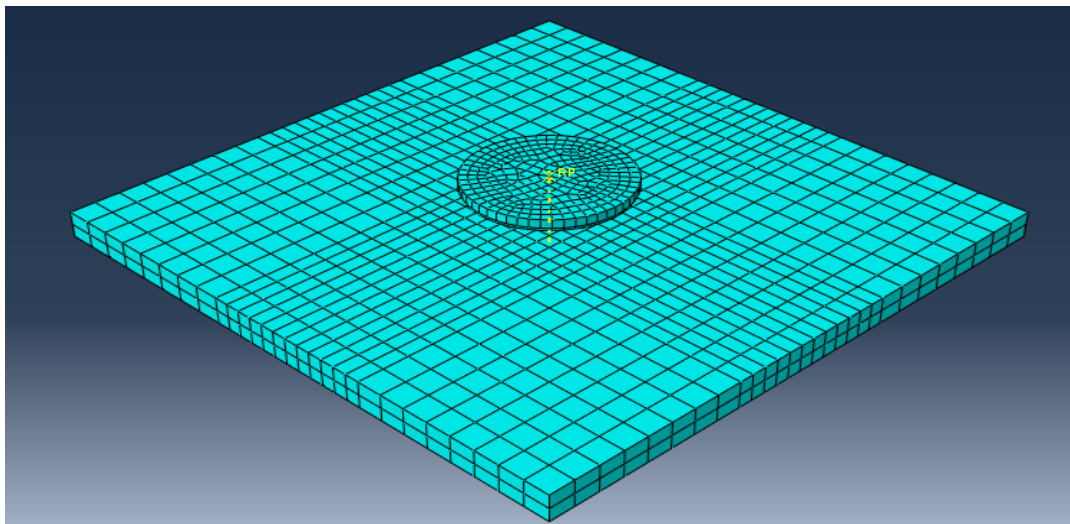


Figure III.15. L'assemblage des plaques et l'outil maillé.

III.4 Modèle élastique-plastique de Johnson-Cook (Equation du logiciel Abaqes)

Dans la zone thermomécanique affectée (TMAZ), une déformation significative se produit pendant le processus. L'interaction entre la contrainte d'écoulement, la température, la déformation plastique et la vitesse de déformation est cruciale pour la modélisation du

processus FSW. C'est pourquoi le modèle élastoplastique de Johnson-Cook a été choisi. Ce modèle est formulé sur la base de données empiriques et décrit le comportement des matériaux élasto-plastiques selon l'équation suivante [36]:

$$\delta y = (A + B(\epsilon p))(1 + c \ln \left(\frac{\epsilon' p}{\epsilon' 00}\right)) \left(1 - \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right) \dots \dots \dots III.1$$

A, B, C, n, T_{melt}, T_{room} et m sont les constantes du matériau/essai pour la limite D'élasticité dépendante de la vitesse de déformation de Johnson-Cook.

δy = Représente une variable de déformation ou un changement dans une propriété matérielle (par exemple, la dureté ou la résistance).

A = La limite d'élasticité.

B = Le facteur de déformation.

n = L'exposant de déformation.

m = La sensibilité à la l'exposant de température.

C = La sensibilité à la vitesse de déformation.

εp = Le taux de déformation plastique équivalent.

ε00 = Le normalisant de la vitesse de déformation.

T_{melt} = Le point de fusion ou la température du solidus.

T_{room} = La température ambiante, T/°C est la température effective.

Chapitre IV:
Résultats et discussions

Introduction

Ce chapitre commence par l'analyse micrographique des matériaux utilisés dans l'étude, ainsi que des joints de soudure obtenus par friction malaxage d'alliages d'aluminium. Il aborde ensuite les différents types de défauts observés dans ces joints, fabriqués sous différentes conditions de soudage (rotation, avance et pénétration de l'outil).

Dans une deuxième partie, une étude paramétrique est présentée pour établir une corrélation entre les caractéristiques mécaniques des cordons de soudure et les paramètres opérationnels du procédé. Une discussion approfondie est menée sur les résultats de caractérisation tels que la micro dureté.

Enfin, une troisième partie de l'étude aborde la modélisation numérique du procédé de soudage par friction malaxage, en prenant en compte les mêmes paramètres que ceux utilisés dans la partie expérimentale.

IV.1 Microstructure de l'aluminium utiliser pour le soudage par friction malaxage

La **figure IV.1** présente deux aspects essentiels : la microstructure et la micro dureté. La microstructure décrit l'organisation et la composition des grains, phases et défauts à une échelle microscopique. Elle est cruciale pour évaluer les propriétés mécaniques et la performance globale du matériau. La micro dureté mesure la résistance d'un matériau à la déformation plastique à une échelle microscopique. Elle est souvent utilisée pour caractériser les variations locales de dureté dans un matériau et peut fournir des indications sur sa résistance et sa durabilité.

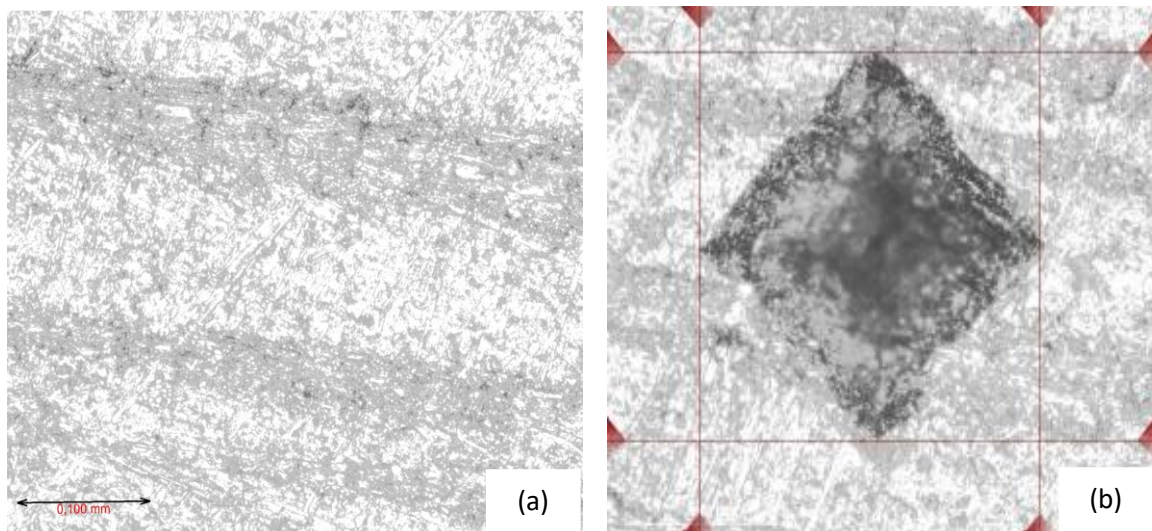


Figure IV.1. (a) Microstructure (b) Micro dureté

IV.2 Différence de paramètres du soudage par friction malaxage

Déterminer les paramètres optimaux pour le processus (avance, vitesse rotation, force de coupe, etc.), nécessitant de nombreux travaux de soudage et tests mécaniques coûteux. C'est la raison de l'utilisation intensive des plaques aluminium (Dans notre méthode, nous avons varié la vitesse d'avance et la différente épaisseur d'aluminium et trouvé les résultats suivants).

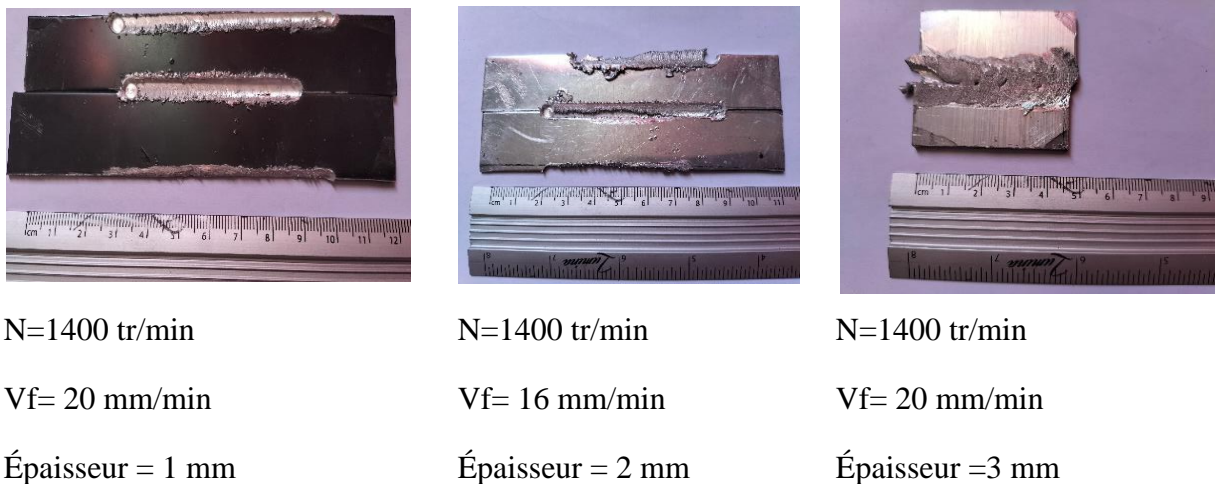
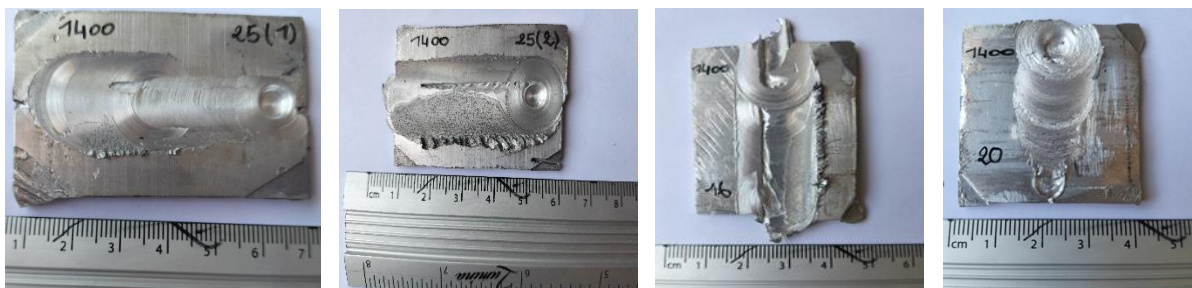


Figure IV.2. Différents essais avec différent paramètres.



N= 1400tr\min	N= 1400tr\min	N=1400tr\min	N=1400 tr\min
Vf= 25 mm\min	Vf= 25 mm\min	Vf= 16mm\min	Vf= 20mm\min
Epaisseur=3mm	Epaisseur=3mm	Epaisseur =3mm	Épaisseur = 3 mm

Figure IV.3. Essais avec une épaisseur supérieure.

IV.3 Inspection visuelle des soudures par friction malaxage

(Figure IV.4) montre un exemple typique de joint soudé obtenu après soudage par friction malaxage d'un alliage d'aluminium à l'aide d'outils en acier doux paramètre de soudage FSW la vitesse de rotation.

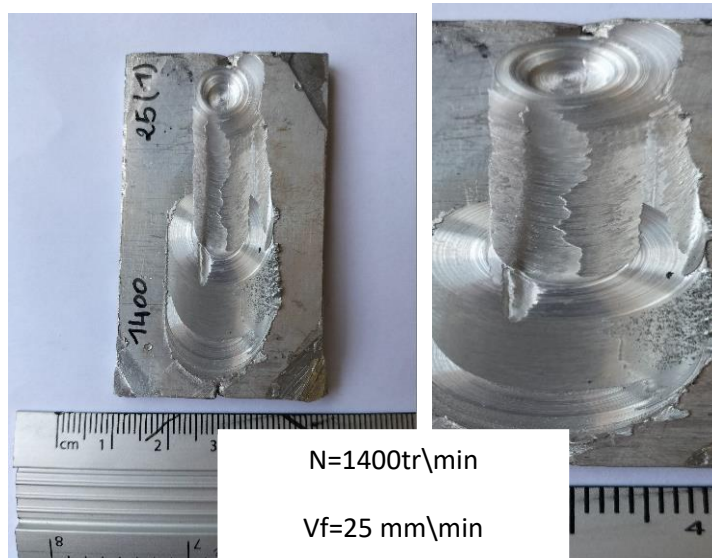


Figure IV.4. Eprouvette soudée par soudage friction malaxage.

Lors du passage de l'épaulement sur la surface des pièces, des stries peuvent être observées au niveau du joint de soudure et à la frontière des deux plaques soudées. Généralement, une légère anomalie peut apparaître de chaque côté du cordon de soudure. La **(figure IV.5)** montre également le cordon de soudure avec un agrandissement de l'empreinte finale de l'outil. Le soudage a été réalisé à une vitesse de rotation de $N = 1400 \text{ tr/min}$ et une vitesse d'avance $V_f = 25 \text{ mm/min}$ dans cette configuration. Dans cette situation de soudage, la qualité du joint était satisfaisante, sans présence de défauts significatifs tels que des rainures d'arrachement, des fissures ou des cannelures.

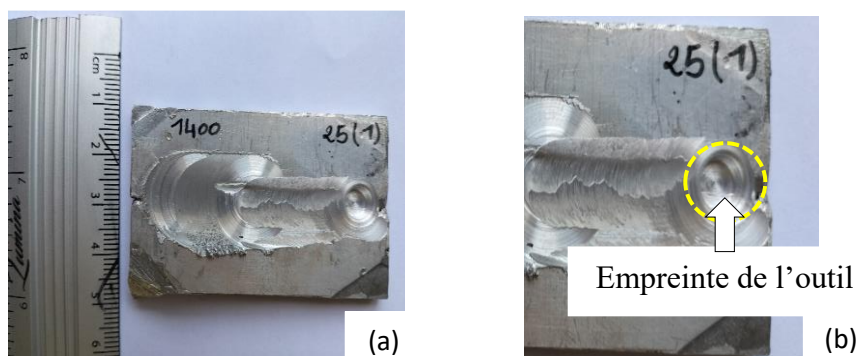


Figure IV.5. (a) Eprouvette soudé / (b) Empreinte de l'outil.

IV.3.1 Défauts des soudures dans le joint FSW

Il est crucial de noter que, dans un processus de soudage par friction, la qualité du joint est fortement influencée par une combinaison de paramètres de soudage spécifiques au matériau

à souder. En effet, les paramètres de friction et de malaxage jouent un rôle essentiel dans la détermination de la qualité du joint de soudure.

IV.3.2 Défauts identifiés via un contrôle visuel

- **Aspect visuel du cordon**

En règle générale, la surface des joints soudés est exempte de défauts (**voir figure IV.6**), et les traces laissées par l'outil sont apparentes. Cependant, lorsque la vitesse de rotation de l'outil est de 1400 tr/min et qu'il avance à des vitesses de 25 et 16 à 20 mm/min, des défauts volumiques significatifs se manifestent dans le joint et sont perceptibles à sa surface (**voir figure IV.6**).

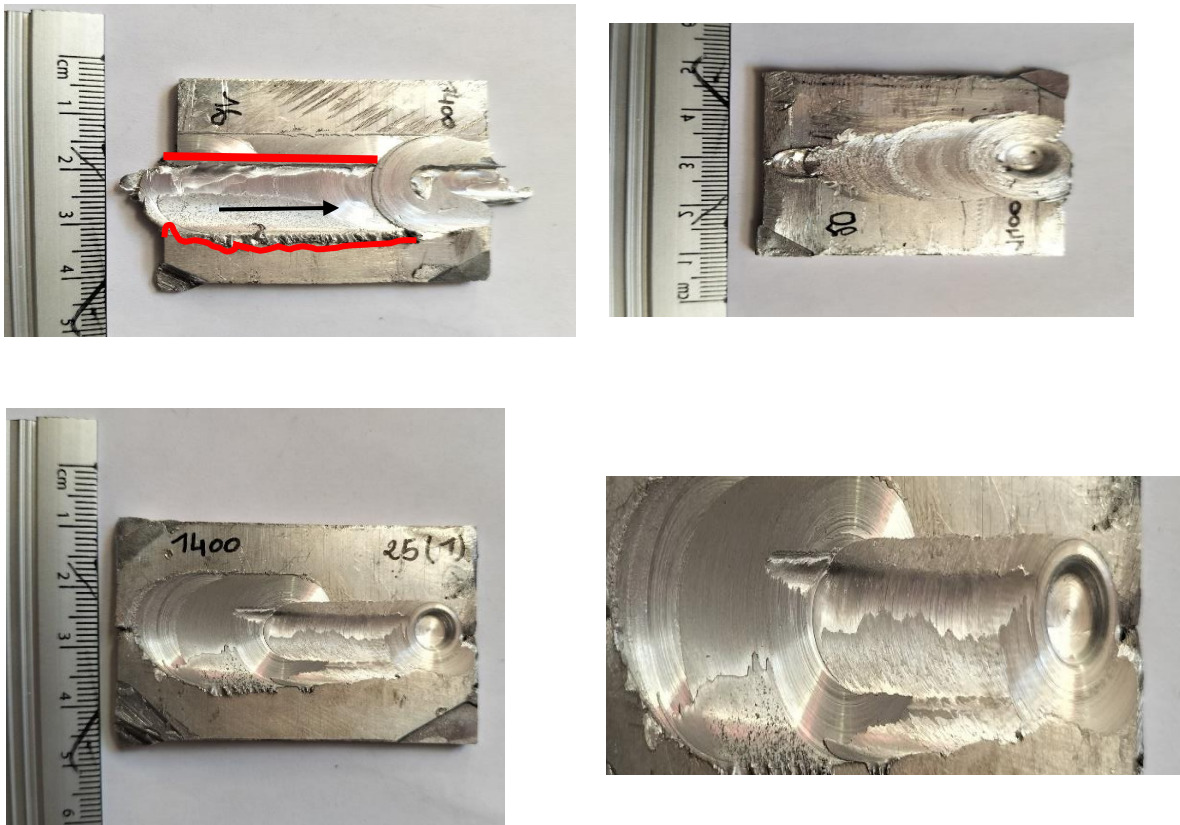


Figure IV.6. Défauts laissés par des différents paramètres.

- **Défauts de surfaces éraillures ou « écailles »**

À une vitesse d'avance de 20 mm/min, des défauts de type feuilles d'épaulement ainsi que des défauts de surface tels que des rayures ou des « écailles » sont observés au centre du connecteur du côté d'alimentation, comme illustré dans la (**figure IV.7**).

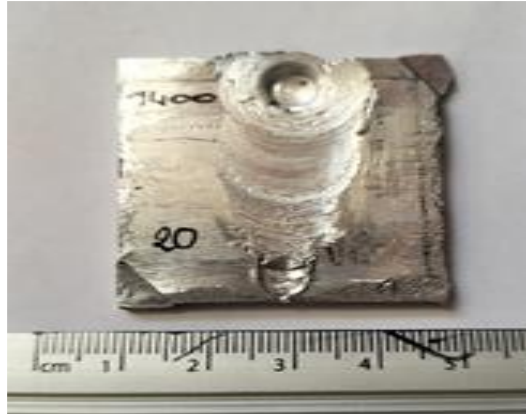


Figure IV.7. Défaut de surface de type écaillures

- **Défaut à la racine du cordon**

La (figure IV.8) montre un zoom sur le défaut situé à la racine du cordon de soudure. Ce problème résulte d'un excès de métal de fusion sous la pointe de la broche. De plus, il peut également être causé par une longueur excessive des goupilles ou des chevilles, pénétrant trop profondément entre les plaques à souder.



Figure IV.8. Défaut flux de métal a racine du cordon de soudure

- **Défaut tunnel interne**

La (figure IV.9) montre une défaillance de tunnel interne attribuée au manque de consolidation des matériaux adjacents dans les joints. Cette situation survient lorsque le débit d'eau est insuffisant ou que la quantité de matériaux utilisée est insuffisante.



Figure IV.9. Défaut tunnel interne.

- **Défaut de rainure**

Le défaut de rainure se produit lorsque la consolidation de la matière dans une soudure est insuffisante, souvent attribuable à une vitesse de rotation excessive, par exemple jusqu'à 1800 tr/min, ou à une profondeur de pénétration de la soudure inadéquate. Ce problème se manifeste par la présence d'une fissure sur la surface soudée. Pour remédier à ce défaut, il est généralement nécessaire d'appliquer une pression de forgeage plus élevée pendant le processus de soudage.

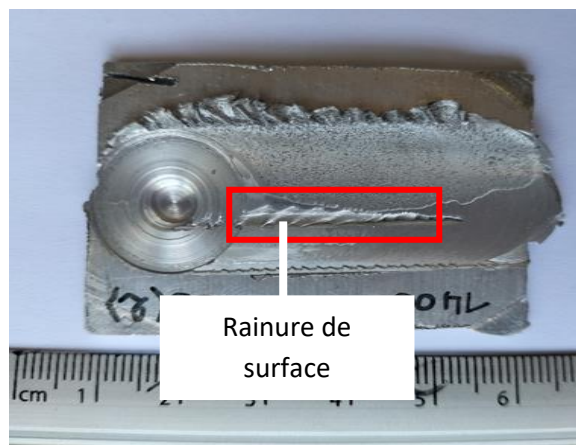


Figure IV.10. Joint avec défaut de rainure en surface.

L'étude de l'aspect morphologique des cordons de soudure à révéler que le paramètre optimal du soudage par friction malaxage de l'aluminium **série 6000** correspond à une vitesse de 1400 tr/min et une vitesse d'avance de 25 mm/min. Dans ce qui précède, nous allons nous concentrer sur l'étude des propriétés microstructurales par le microscope optique de cette éprouvette.

IV.4 Résultats micro dureté

La caractérisation métallographique des joints de soudure inclut typiquement l'examen des différentes zones du joint à l'aide d'un microscope optique (**voir la figure IV.11**). Cela permet d'observer et d'analyser la microstructure de échelles, en particulier dans les zones critiques comme la zone affectée par la chaleur (ZAC), le métal fondu, et le métal de base adjacent au cordon de soudure.

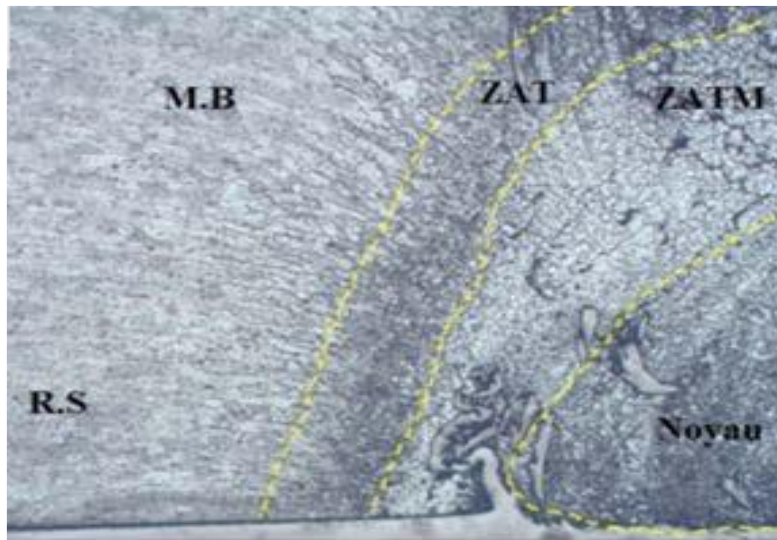


Figure IV.11. Les différentes zones du joint de soudure.

- **Zone Métal de Base (MB) :**

Représente le métal de base, donc aucune modification de la microstructure et des propriétés mécaniques.

- **Zone Affectée Thermiquement (ZAT) :**

La ZAT est une région critique dans un joint de soudure où des changements microstructuraux significatifs peuvent se produire en raison des températures élevées du processus de soudage, ce qui peut influencer les propriétés et la performance du matériau soudé.

- **Zone Affectée Thermiquement (ZATM) :**

Zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM). Les propriétés mécaniques et la microstructure sont modifiées par la température et la déformation créée par la rotation de l'outil de soudage.

- **La zone de Noyau :**

Dans cette zone, la température est maximale est la déformation et aussi importante. On trouve une structure granulaire fine résultant d'un phénomène de recristallisation dynamique.

IV.5 Microstructure du cordon de soudure

La (figure IV.12) La microstructure résultant du soudage par friction malaxage au début de la phase de pénétration montre une organisation particulière des grains métallurgiques. Ils sont alignés selon le sens de rotation de l'épaulement, formant ainsi une structure orientée. Cette orientation des grains est caractéristique du processus de soudage par friction malaxage et est due à la déformation plastique intense et à la chaleur générée par le frottement et la pression pendant le processus.

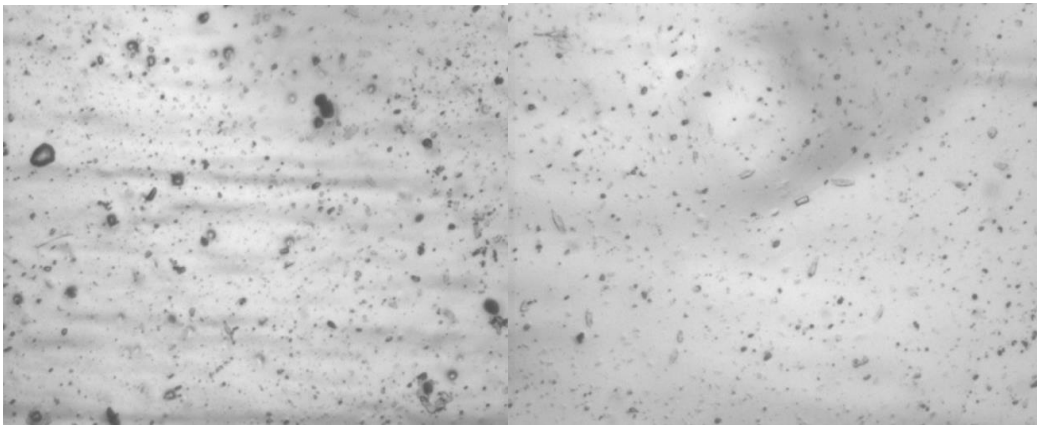


Figure IV.12. Microstructure montrant l'effet du soudage par friction malaxage au début de la phase de pénétration

La figure IV.13 présente deux aspects de la morphologie d'un cordon de soudure. Vue sur la face du cordon de soudure cette perspective permet d'examiner la surface externe du cordon de soudure. On y évalue la régularité du dépôt de métal fondu, la présence de défauts visibles et l'aspect général du joint soudé et Vue en profondeur du cordon de soudure cette vue implique une coupe transversale du cordon de soudure pour examiner sa structure interne.

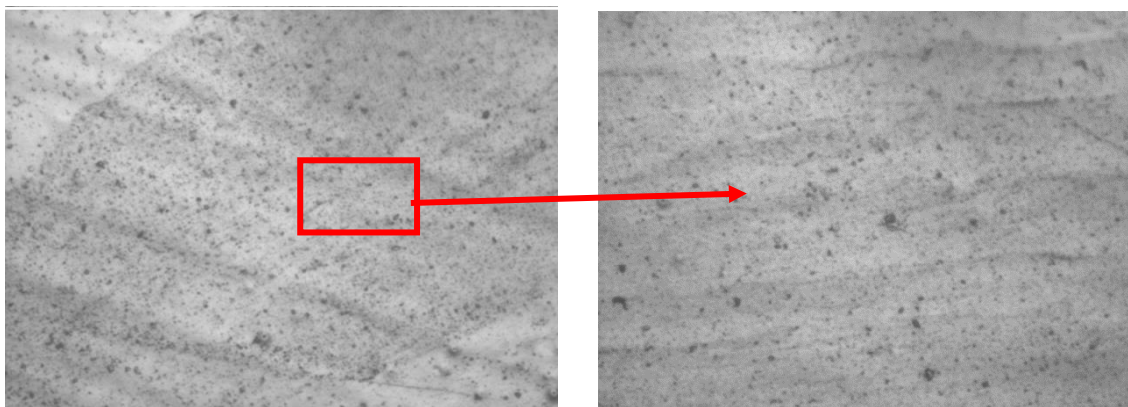


Figure IV.13. Morphologie du cordon de soudure, a) Vue sur la surface b) Vue en profondeur du cordon de soudure.

La (figure IV.14) montre que malgré l'efficacité du soudage par friction malaxage pour créer des liaisons entre l'aluminium et l'acier, une intégration parfaite n'est pas toujours atteinte. Des fragments d'acier restent visibles, comme indiqué par les flèches rouges. Cela souligne que même avec ce procédé avancé, il peut subsister des résidus de matériaux d'origines distinctes, ce qui affecte l'homogénéité du mélange entre les deux métaux. Ce phénomène peut influencer les propriétés mécaniques et la durabilité de la soudure, nécessitant une évaluation et une gestion appropriée lors de l'application de cette technique de soudage mixte.

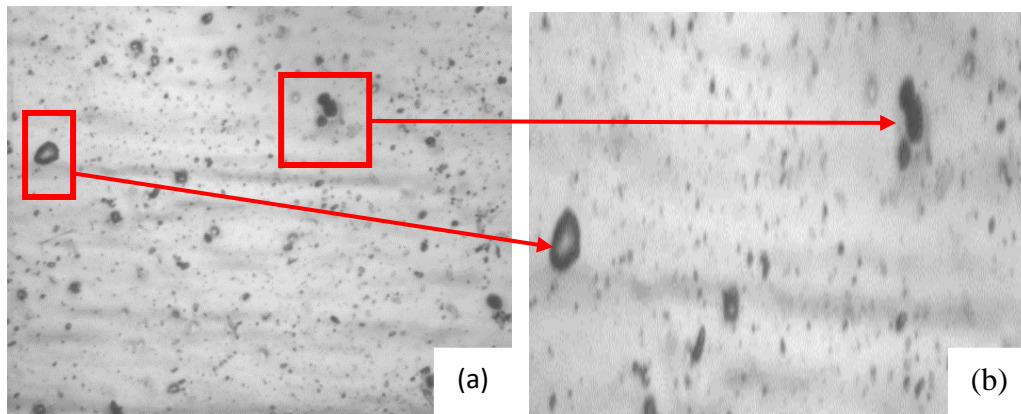


Figure IV.14. Morphologie de l'alliage d'aluminium avant le soudage.

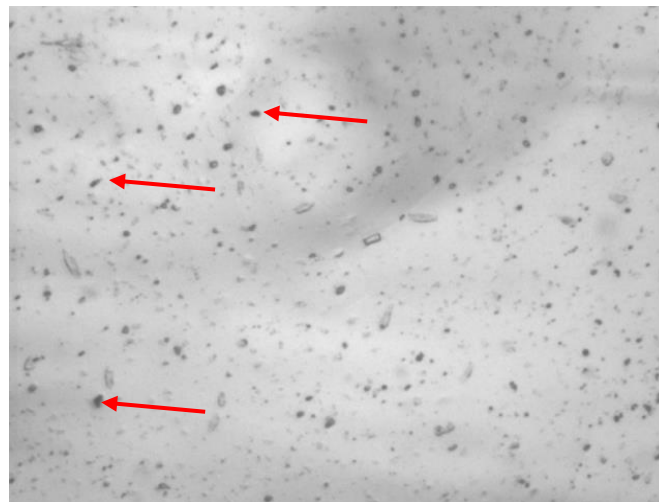


Figure IV.15. Morphologie du cordon de soudure. $N=1400\text{tr}\backslash\text{min}$,
 $V_f=25\text{mm}\backslash\text{min}$.

IV.5.1 Comportement mécanique de dureté des joints de soudure

L'empreinte de l'indenteur Vickers avant le soudage montre une surface lisse et uniforme, Ses contours nets suggèrent une bonne résistance à la déformation plastique (figure IV.16).

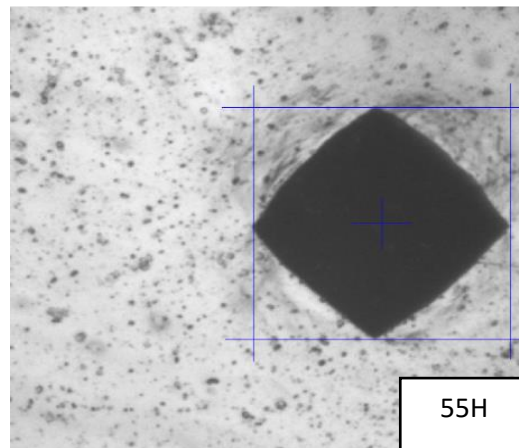
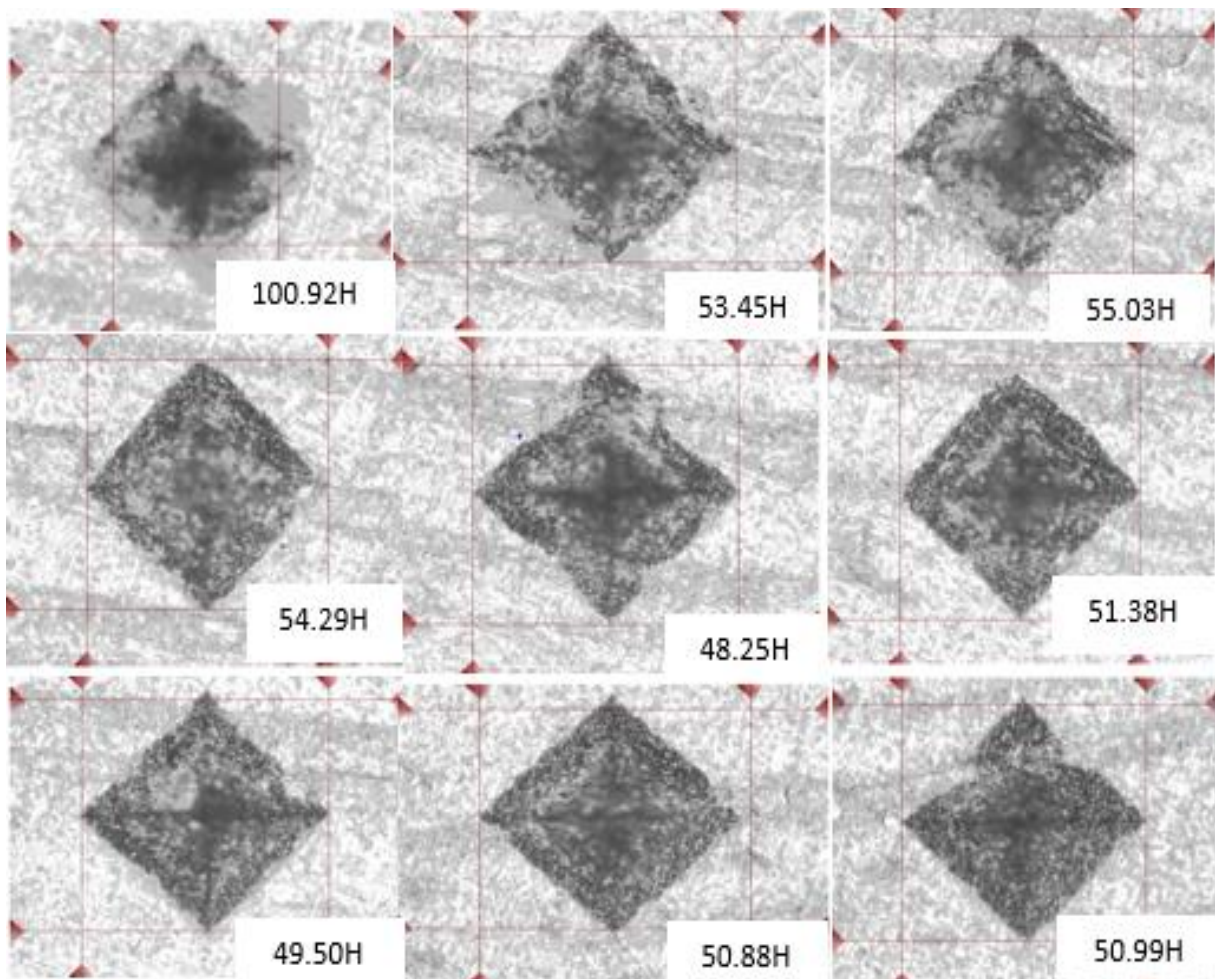


Figure IV.16. Empreintes de l'indenteur Vickers avant le soudage.

L'analyse des résultats de micro dureté sur les éprouvettes soudées avec des différents pions sur la surface de soudage révèle des variations significatives de dureté. La valeur **100.92H** indique une meilleure résistance à la déformation plastique. Cela peut être le résultat d'une microstructure plus fine et plus homogène dans la zone affectée par la chaleur (ZAC) de la soudure. Une ZAC bien formée avec une taille de grain fine tend à avoir une dureté plus élevée, ce qui est bénéfique pour la résistance mécanique et la durabilité de la soudure. (**figure IV.17**).



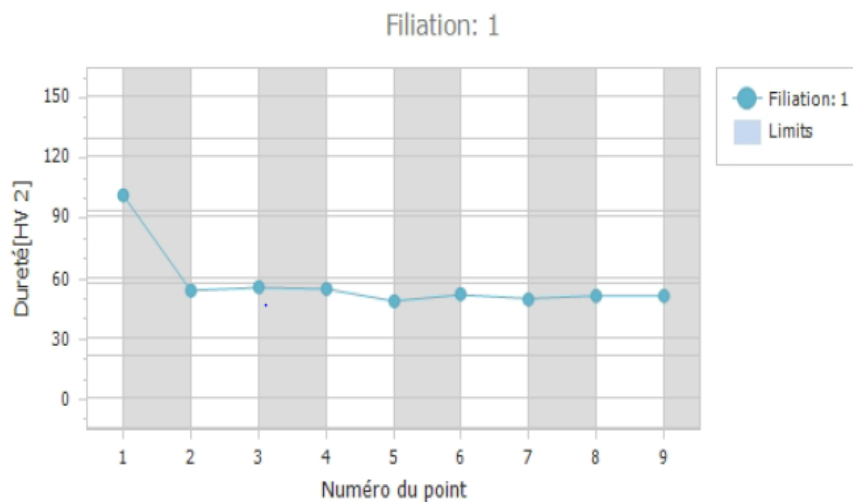


Figure IV.17. Empreintes de Micro dureté de différence de pion.

IV.5.2 Evolution de la température de contact en fonction du temps de soudage.

Pendant le test de traction, la température de contact fluctue de manière significative en fonction du temps de soudage. Ceci est principalement dû à la friction créée par la rotation de l'outil à 1400 tours/minute. Les vitesses de déplacement varient pour chaque étape de soudage : 20 mm/min, 16 mm/min et 25 mm/min pour la dernière étape. Ces différences affectent la manière dont la chaleur est distribuée autour de la zone de soudure, créant des différences de température qui peuvent être inégales et potentiellement des zones chaudes ou non chauffées près de la zone de soudure.

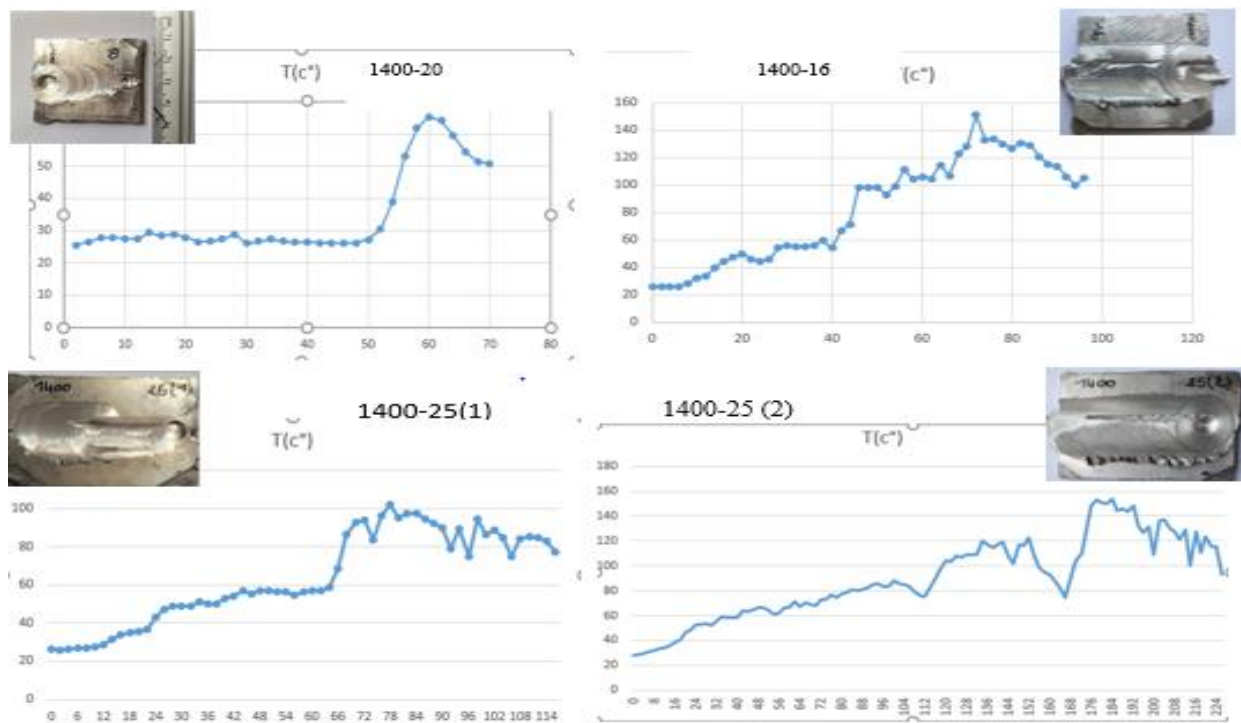


Figure IV.18. Courbes évolution de la température pour les différents paramètres

IV.6 Modélisation numérique du soudage par friction malaxage

Le modèle d'éléments finis développé dans ce travail permet d'analyser les résultats significatifs Al- FSW tels que la distribution de la température, la distribution des contraintes, la pression de plongée, etc. (**figure IV.19**), tout au long du processus pour l'aluminium pure. Le Logiciel **ABAQUS/EXPLICIT** est utilisé pour effectuer l'analyse thermomécanique au cours de la première phase de soudage (phase de planée de l'outil) et la déformation thermomécanique au cours de cette phase.

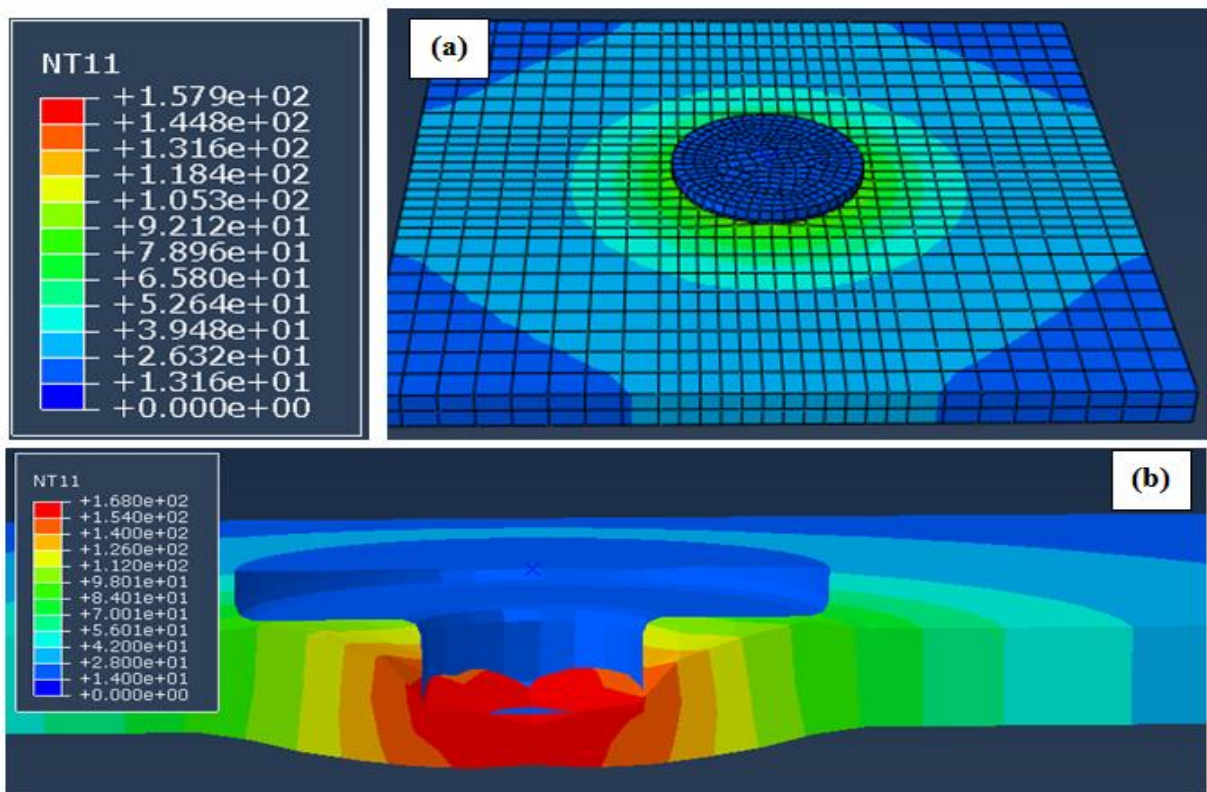


Figure IV.19. Vue d'ensemble montrent la simulation numérique de distribution de la température pendant le soudage par friction malaxage

La distribution de la température le long de la ligne de soudure à différents moments est illustrée à la (**figure IV.20**), correspondant à la phase de plongée, de temporisation et de traversée. Une période de traitement de 8 secondes a été utilisée pour démontrer les étapes de plongée. La courbe de niveau indique que la température maximale pendant la phase de plongée (**figure IV.20**) est générée dans la zone où la tige touche la surface de la plaque (indiquée en rouge) ; la température correspond à celle de la température ambiante ou l'outil n'a pas encore pénétré dans les pièces à souder. Cependant, une augmentation du temps de soudage de 1.600s

à 8.000 s, induit une augmentation progressive de la température développée à l'interface outil/plaques à soudée.

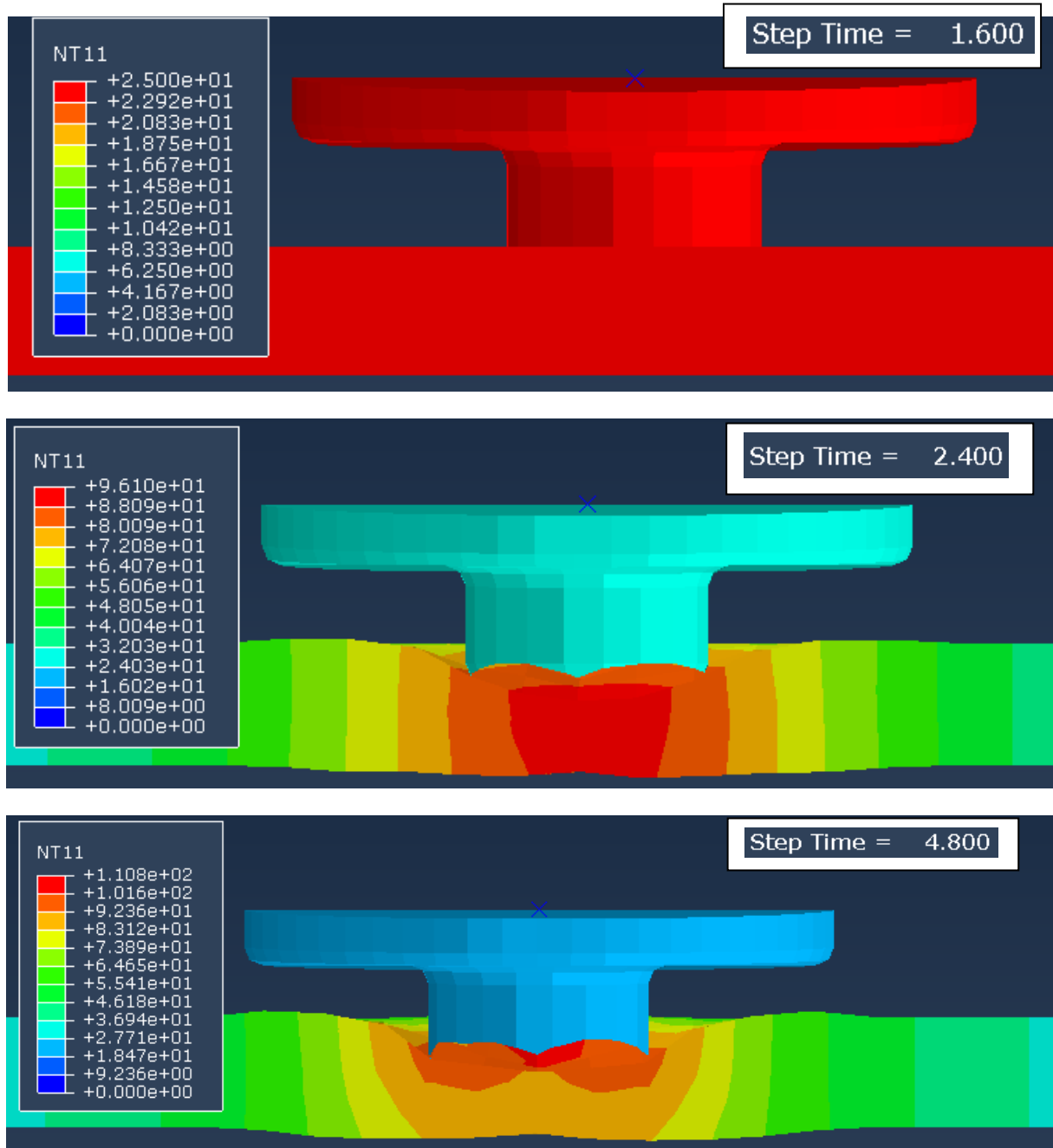


Figure IV.20. Distribution de la température le long de la ligne de soudure en fonction de du temps.

La température maximale est générée dans la zone d'angle formée par la plaque et la surface inférieure de l'épaulement (**figure IV.21**). Les forces et les couples de plongée devraient également être les plus élevés pendant la phase de plongée. Pendant la période de repos, le processus d'agitation ramollit le métal et le taux d'augmentation de la température et de la force axiale diminue.

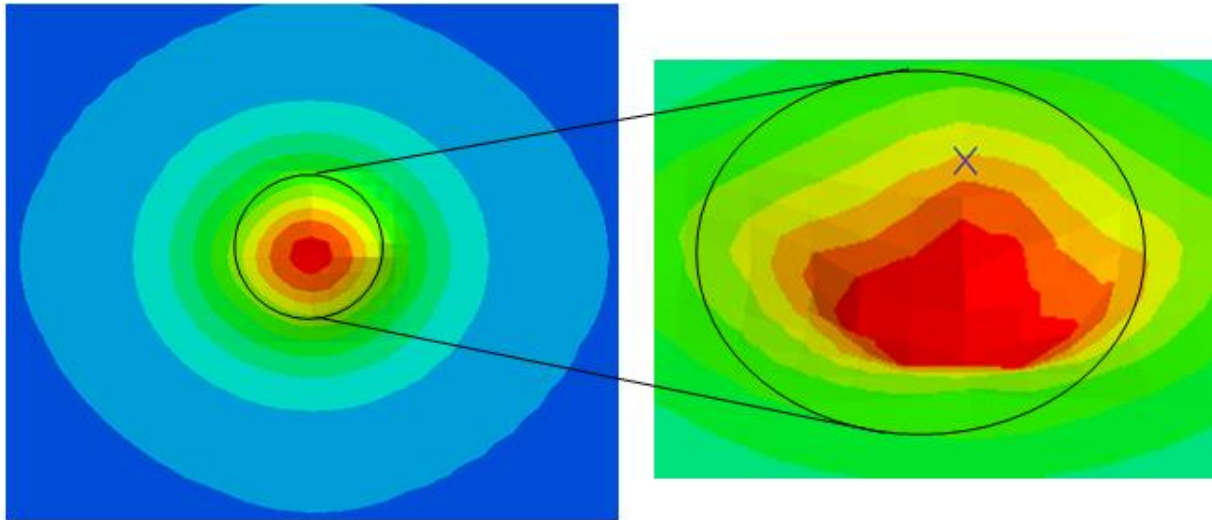


Figure IV.21. Pénétration de l'outil dans la profondeur des pièces à soudée.

Après 8 secondes comme montré dans la **figure IV.22**, c'est-à-dire à la fin de la période de plongée, la température atteint une valeur maximale de 168°C . Ensuite, le profil de température reste plus stable et pratiquement identique à celui obtenu expérimentalement.

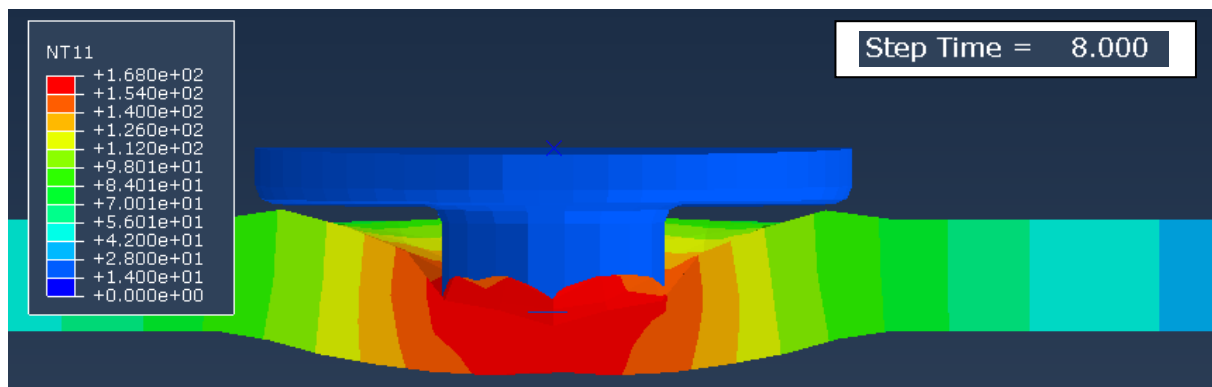


Figure IV.22. Distribution de la température le long de la ligne de soudure : à la fin de la phase de plongée (8.000s).

IV.7 Distribution du champ de contraintes de Von-mises le long de la ligne de soudure

Le modèle d'éléments finis développé dans ce travail a été exploré pour étudier les contraintes générées dans les pièces pendant le processus de soudage. La (**figure IV.23**) montre les contours des contraintes de Von Mises développées dans les plaques pendant le processus de FSW Comma pendant la phase de plongée. Comme le montre clairement la (**figure IV.23(a)**), au départ, aucunes contraintes n'ont été générées juste sous la broche de l'outil et dans la zone environnante. Au fur et à mesure que la broche pénètre dans la plaque, des contraintes de compression élevées sont créées, principalement en raison de l'application d'une

charge axiale (**figure IV.23(b)**). Au fur et à mesure que le contact entre l'outil et le matériau de la pièce augmente, la température augmente et, par conséquent, le ramollissement du matériau déclenché par l'action de l'agitation entraîne une réduction de la résistance à l'écoulement du matériau. Les contraintes augmentent encore pendant la période de plongée, où la température la plus élevée a été générée, atteignant 739 MPa dans la zone d'agitation.

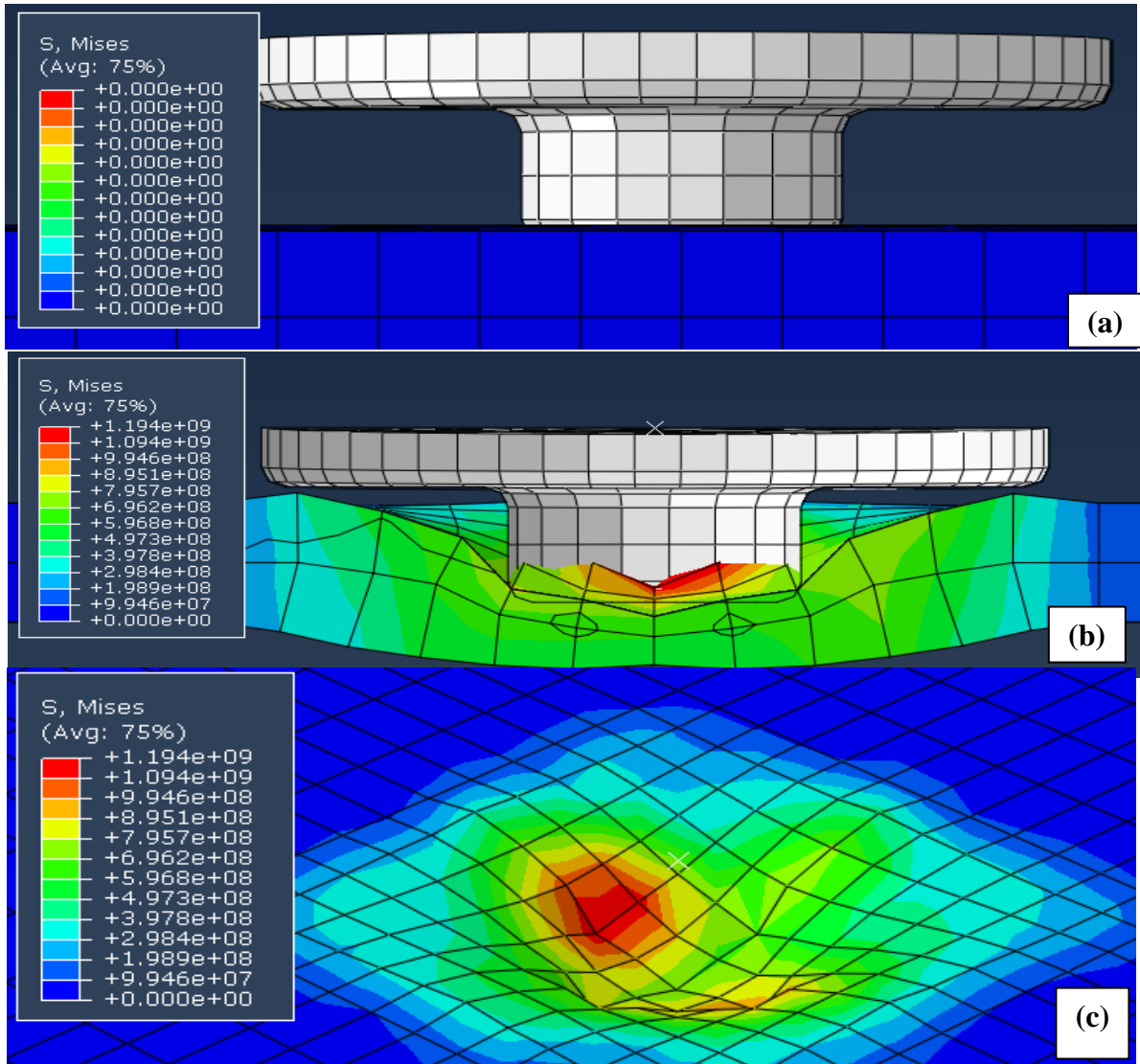


Figure IV.23. Distribution des contraintes de Von-mises le long de la ligne de soudure : (a) Début de la phase de plongée (b) Fin de la phase de plongée (8.000s) (c) Vue d'ensemble

Conclusion générale

V Conclusion générale

Le soudage par friction malaxage (FSW) devient la méthode d'assemblage préférée pour les alliages d'aluminium et d'acier, permettant de réaliser des soudures de grande fidélité à l'état solide. Le but principal de cette étude était de réaliser le soudage par friction malaxage d'un alliage d'aluminium. Elle était divisée en deux parties : une partie expérimentale et une partie de simulation numérique à l'aide du logiciel ABAQUS/CAE.

Partie expérimentale :

- **Évaluation des paramètres de soudage :** Les essais expérimentaux sont menés pour étudier l'influence de chaque paramètre sur la qualité du joint soudé, en mettant l'accent sur la résistance mécanique et la microstructure de la soudure. Cela comprend l'ajustement des paramètres comme la vitesse de rotation de l'outil, la vitesse de déplacement et la pression appliquée.
- **Analyse de la microstructure :** Les échantillons soudés sont examinés pour observer la taille des grains, la distribution des phases et les défauts éventuels, ce qui permet de corréler les paramètres de soudage avec les propriétés microstructurales.

Partie numérique :

- **Utilisation du logiciel ABAQUS/CAE :** La simulation numérique est employée pour modéliser virtuellement le processus de FSW. Cela permet de reproduire précisément les conditions thermiques, les déformations et les contraintes internes du matériau pendant le soudage.
- **Approfondissement de la compréhension:** L'objectif est d'approfondir la compréhension des phénomènes physiques impliqués dans le FSW, comme la génération de chaleur par frottement, la plasticité du matériau et la formation de la soudure. Les résultats numériques aident à identifier les zones de contraintes élevées et à optimiser les paramètres pour minimiser les défauts et maximiser la résistance mécanique.

Références bibliographiques

VI Les références

- [1] TIMESLI, Abdelaziz. Simulation du soudage par friction et malaxage à l'aide de méthodes sans maillage. 2013. Thèse de doctorat. Université de Lorraine.
- [2] RAO, K. Venkata. Evaluation of welding characteristics using three-dimensional finite element simulation and experimentation for FSW of aluminum 6061. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, vol. 40, no 2, p. 86.
- [3] COLLIGAN, K. J. The friction stir welding process: an overview. *Friction stir welding*, 2010, p. 15-41.
- [4] PERIYASAMY, P., MOHAN, B., BALASUBRAMANIAN, V., *et al.* Multi-objective optimization of friction stir welding parameters using desirability approach to join Al/SiCp metal matrix composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, vol. 23, no 4, p. 942-955.
- [5] BHUSHAN, Rajesh Kumar et SHARMA, Deepak. Optimization of FSW parameters for maximum UTS of AA6082/SiC/10P composites. *Advanced Composites Letters*, 2019, vol. 28, p. 0963693519867707.
- [6] HARIBALAJI, V., BOOPATHI, Sampath, et ASIF, M. Mohammed. Optimization of friction stir welding process to join dissimilar AA2014 and AA7075 aluminum alloys. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 50, p. 2227-2234.
- [7] KHALED, BOULAHM et SALEM, SAHBI BEN. Modélisation expérimentale et optimisation des conditions de soudage par friction et malaxage cas d'alliage d'aluminium 2017A.
- [8] Institut De Recherche Appliquée En Productique, Contour Antoine De St Exupery Campus De Ker Lann 35170 Bruz (Bulletin Technique N°8 Octobre 2007).
- [9] Rombaut, p. joining of dissimilar materials through rotary friction welding, Faculty of Engineering GHENT University. 2011.

Références bibliographiques

- [10] Girard, M., et al., Friction stir diffusion bonding of dissimilar metals. *Science and Technology of Welding and Joining*, 15(8): p. 661-665. 2010.
- [11] Pauty, E., Les Carbures cémentés WC-Co. *Matériaux et joints d'étanchéité pour les hautes pressions*, 2: p. 81. 2004.
- [12] Cook G.E., Smartt H.B., Mitchell J.E., Strauss A.M., Crawford R., Controlling robotic friction stir welding, *Welding Journal*, Vol. 82 No.6, pp.28-34, 2003.
- [13] Mishra, R. S., and Z. Y. Ma. 2005. «Friction stir welding and processing», *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 50: 1-7.
- [14] Thèse D'Amévi Tongne : Étude Expérimentale Et Numérique Du Soudage Fsw (Friction Stir Welding) : Analyse Microstructurale Et Modélisation Thermomécanique Des Conditions De Contact Outil/Matière Transitoires, A Saint-Etienne.
- [15] MÉMOIRE De Frédéric Thibeault : Étude Numérique Et Expérimentale Du Soudage Par Friction Malaxage, Université Du Québec A Chicoutimi.
- [16] Elangovan, K., V. Balasubramanian, and M. Valliappan. 2008. «Effect of Tool Pin Profile and Tool Rotational Speed on Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA6061 Aluminum Alloy», *Materials and Manufacturing Processes*, 23: 251-60.
- [17] Çam, Gürel, and Selcuk Mistikoglu. 2014. «Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys», *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23: 1936-53.
- [18] THIBEAULT, Frédéric. Étude numérique et expérimentale du soudage par friction Malaxage. Université du Québec à Chicoutimi, 2012.
- [19] Zhang Z., Zhang H.W.: "3D Numerical studies on effect of axial pressure in Friction Stir Welding", *Science and Technology of Welding and Joining*, volume 12, pages 226-248, 2007.
- [20] Thomas W. M., Nicholas E. D., Smith S.D., Das S.K., Kaufman J.G., Lienert T.J.: "Aluminum 2001-Proceedings of the TMS 2001 Aluminum Automotive and Joining Sessions", TMS, page 213, 2001.
- [21] N. Jemal, Contribution à la caractérisation thermique et mécanique de la zone soudée en FSW, *Génie mécanique [physics.class-ph]*. Artset Métiers Paris Tech, 2011.Français. NNT: 2011ENAM0046. Pastel-00766216.

Références bibliographiques

- [22] S. ZIMMER, CONTRIBUTION A L'INDUSTRIALISATION DU SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE, Thèse de doctorat, pp,24-25,200.9.
- [23] Dr.IR. KOEN FAES : « Le soudage par friction, un procédé de soudage multiple et innovateur ».
- [24] Article soudage par friction, « technique de l'ingénieur », traité génie mécanique B7745 ;2010.
- [25] G. SAYEGH, et R. GAZES. Possibilités et perspectives du soudage par friction Applications – évolution de la technique et perspectives. 1981.
- [26] S.ELLIOT, ET E.R.WALLACH. Joining aluminum to steel part 2- friction welding, metal construction, pp. 221-224, April 1981.
- [27] Article soudage par friction, technique de l'ingénieur ; traité génie mécanique B (7745).
- [28] W. Li, A. Vairis, M. Preuss and T. Ma, “Linear and rotary friction welding review”, International Materials Reviews, 2016.
- [29] BAARI Aziz « Etude de soudage a l'état solide « soudage par friction », étude de cas : soudage d'une tige de forage » diplôme de master Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [30] Mr. FARES KHALFLLAH « soudage par friction de l'acier avec du céramique » Thèse, diplôme de Doctorat Université Mohamed khider- Biskra.
- [31] HELAL, Yazid. L'effet de soudage par friction sur la microstructure et les propriétés Mécaniques d'un joint soudé composé d'un alliage d'aluminium industriel et un acier. 2017. Thèse de doctorat. UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
- [32] D. Macel, 'Exemples De Travaux En Brasage : Essais Mécaniques Et Métallographies', (Institut De Soudure) 1601_0232_P_041_047- 41.
- [33] Kallee S W, 'Friction Stir Welders Provide Prefabricated Components and Panels' Aluminium International. 2004.

Références bibliographiques

[34] Chalurkar, Chetan et Shukla, Dinesh Kumar. Temperature Analysis of Friction Stir Welding (AA6061-T6) with Coupled Eulerian-Lagrangian Approach. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2022. p. 012035.

[35] Ahmad, Bilal, Galloway, Alexander, et Toumpis, Athanasios. Advanced numerical modelling of friction stir welded low alloy steel. Journal of Manufacturing Processes, 2018, vol. 34, p. 625-636.

[36] BOUBEKRI SAMIRA et FEDILA SARAH< étude expérimentale et numérique du procédé de soudage par friction- malaxage cas d'alliage Al-Mg<MEMOIRE DIPLOME DE MASTER UNIVERSITE Abderrahmane mira Bejaia 2023.

Résumé

Dans ce travail nous avons étudié les effets des paramètres de soudage à savoir ; l'effort exercé sur le pignon, la fréquence de rotation et la vitesse d'avance de l'outil, sur les performances de soudage d'un alliage d'aluminium, dans le but de déterminer les conditions opératoires conduisant à une qualité, résistance mécanique ainsi qu'une dureté optimale du joint de soudure.

Le but de ce travail est de réaliser le procédé de soudage et d'effectuer une simulation numérique Friction Stir Welding (FSW) des alliages d'aluminium à l'aide du logiciel Abaqus, en tenant compte l'effet de certains paramètres de soudage, comme la vitesse de soudage, est la vitesse d'avance (outil/ou pièce), coefficient de frottement appliqué. Les épaulements/matériaux à connecter et le flux de chaleur généré par le champ de force et Vers la température de l'outil.

Mots Clés : Soudage, Modélisation numérique, ABAQUS, Aluminium.

Abstract

In this work we have studied the effects of the welding parameters namely; the exerted effort on the pin, the rotation frequency and the advance speed of the tool, on the weld performance of an aluminum alloy, in order to determine the operating conditions leading to a quality, mechanical strength as well as an optimum hardness of welding joint.

The aim of this work is to realize the welding process and to perform a numerical simulation Friction Stir Welding (FSW) of aluminum alloys using Abaqus software, taking into account The effect of certain welding parameters, such as welding speed, is the advance speed (tool/or piece), the friction coefficient applied. The shoulders/materials to be connected and the heat flow generated by the force field and towards tool temperature

ملخص

في هذا العمل قمنا بدراسة تأثيرات معلمات اللحام وهي: الجهد المبذول على الترس وتردد الدوران والسرعة المتقدمة للأداة على أداء لحام الألومنيوم، من أجل تحديد ظروف التشغيل التي تؤدي إلى جودة وقوة ميكانيكية بالإضافة إلى الصلابة المثلى لمفصل اللحام.

لسبائك (FSW) الهدف من هذا العمل هو تحقيق عملية اللحام وإجراء محاكاة عددية لحام الاحتكاك بالتدوير ، مع الأخذ في الاعتبار تأثير بعض معلمات اللحام، مثل سرعة اللحام، وسرعة التقدم Abaqus الألومنيوم باستخدام برنامج (الأداة/ القطعة)، ومعامل الاحتكاك المطبق. الأكتاف/المواد المراد توصيلها والتدفق الحراري الناتج عن مجال القوة ونحو درجة حرارة الأداة.

