

**ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

Faculté de Technologie

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : CONSTRUCTION MÉCANIQUE

PAR :

BOUBEKRI SAMIRA

FEDILA SARAH

Thème

Étude expérimentale et numérique du procédé de soudage par
friction-malaxage cas d'alliage Al-Mg

Soutenu le 04/072023 devant le jury composé de :

Mr Yaya kamall

Président

Mr Idir Abdelhak

Rapporteur

Mme Bouzidi Safia

Examinatrice

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2022-2023

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier DIEU le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous remercions Monsieur IDIR, pour avoir accepté de suivre et diriger notre travail, pour le temps qu'il a consacré, ensuite pour les précieux conseils qu'il n'a cessé de nous prodiguer tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous adressons nos remerciements les plus respectueux à Messieurs les membres du jury pour avoir pris le temps de lire et d'examiner notre travail.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Nous dédions ce travail :

A nos mères, nos pères, qui nous sont les

Plus chers au monde

A nos frères et sœurs, à nos familles

A tous nos amis et collègue .

Sommaire

Introduction générale	2
Chapitre 1 : Recherche bibliographique	4
1. Introduction	4
1.1. Techniques du procédé	4
1.1.1. Définition du FSW	4
1.1.2. Le principe du soudage par friction malaxage	5
1.1.3. Paramètres du soudage par friction malaxage	6
1.1.4. Outils de soudage	7
1.1.5. Équipements	9
1.1.6. Mécanismes physiques du procédé et microstructure	9
1.1.7. Les différentes phases opératoires de soudage par friction	10
a) Phase de pénétration	10
b) Phase de préchauffage	10
b) Phase de soudage	11
c) Phase de retrait	12
1.1.8. Phénomènes physiques observés dans le procédé	12
1.1.9. Principaux domaines d'applications	14
a) Domaine spatiale	14
b) Domaine de l'automobile	15
c) Domaine l'industrie aéronautique	15
d) Domaine du nucléaire	16
e) Domaine ferroviaire	16
f) Domaine naval	17
1.1.10. Les avantages et inconvénients du SFW	18
Chapitre 2 : Travaux réalisés sur le soudage par friction malaxage	20
2. Introduction	20

2.1. Définition des Matériaux et du modèle développé.....	20
2.2. Résultats et discussion.....	23
2.3. Études numériques et empiriques sur le soudage par friction-malaxage du laiton jaune 405-20.....	25
2.4. Les principaux résultats obtenus dans le cadre des recherches numériques et empiriques actuelles sont les suivants.....	30
2.5. Analyse expérimentale et numérique couplée du soudage par friction-malaxage de l'AA6063 par friction-malaxage. Ahmed Y Shash et all 2022.....	30
2.6. Les principaux résultats de cette étude sont résumés comme suite.....	36
Chapitre 3 : Procédure expérimentale.....	38
3. Introduction.....	38
3.1. Matériaux et équipements utilisés.....	38
3.1.1. Matériaux utilisés.....	38
3.1.2. Préparation des pièces à souder par friction malaxage.....	38
3.1.3. Les paramètres de procédé du soudage par FSW :.....	39
3.1.4. Équipements de soudage par friction malaxage.....	39
3.1.5. Les paramètres d'entrées.....	39
3.1.6. Température.....	40
3.1.7. Préparation des éprouvettes d'essai de traction.....	40
3.1.8. Essai de traction.....	41
3.1.9. Microscopie optique.....	42
3.2. Simulation numérique.....	43
3.2.1. Présentation du logiciel.....	43
3.3. Modélisation de la distribution de la température (Equation du logiciel Abaqus)....	45
3.3.1. Modèle thermique.....	45
3.3.2. Modèle élastique-plastique de Johnson-Cook.....	47
Chapitre 4 : Résultats et discussion.....	49
4. Introduction.....	49
4.1. Soudage et recherche des paramètres optimaux.....	49
4.2. Inspection visuelle des soudures par friction malaxage.....	50

4.2.1Défauts des soudures dans le joint FSW.....	51
4.2.2Défauts identifiés via un contrôle visuel	51
4.3. Caractérisation de la microstructure des joints soudés.....	55
4.4. Comportement mécanique de dureté des joints de soudure	57
4.5. Comportement mécanique en traction uniaxial des éprouvettes soudés	58
4.5. Résultats de la simulation.....	59
conclusion générale	63

Liste des figures

Figure 1.1 : Soudage par friction malaxage [10].	4
Figure 1.2 : Principe de fonctionnement du soudage FSW [15].	6
Figure 1.3 : Exemple de géométrie d'outil [18].	7
Figure 1.4 : Différentes géométries d'épaulement [18_19],[20].	8
Figure 1.5 : Schématisation de l'outil de soudage et de quelques géométries des pions et de l'épaulement [17-21].	9
Figure 1.6 : Phase de plongée [23].	10
Figure 1.7 : (a) Fin de phase de pénétration / (b) Phase de chauffage [16].	11
Figure 1.8 : Phase de soudage [23].	11
Figure 1.9 : Schématisation de phase de retrait de l'outil [23].	12
Figure 1.10 : Transferts thermiques induits par le procédé FSW [16].	13
Figure 1.11 : Utilisation du procédé FSW pour souder les réservoirs de carburant de ses fusées Delta par la compagnie Boeing [20].	14
Figure 1.12 : Soudage « friction-malaxage » par point utilisé pour l'automobile [20].	15
Figure 1.13 : Voilure d'avion soudée par FSW [24].	15
Figure 1.14 : Utilisation FSW dans le domaine nucléaire. :(a) -cartouche en cuivre avec insert en fonte pour le combustible nucléaire produite à SKB, avec un couvercle scellé, (b) - Aire de la section du couvercle soudé [20].	16
Figure 1.15 : Soudage par FSW trains : (a) Hitachi train Series 700, (b) Technique de soudage des carrosseries des trains Hitachi [25].	17
Figure 1.16 : (a) Bateau en aluminium construit en utilisant FSW / (b)-Panneaux préfabriqués (Hydro Marine Aluminium) destine au pont du bateau de croisière [26].	17
Figure 2.1 : (a)Machine de soudage par friction, (b) Géométrie et dimension de l'outil.	21
Figure 2.2 : (a) Modèle géométrique, (b) maillage d'éléments finis pour la pièce à usiner et (c) Maillage d'éléments finis pour l'outil FSW.	21
Figure 2.3 : Conditions aux limites et la vitesse utilisée.....	22
Figure 2.4 : Champ de température simulé pendant le processus FSW en régime permanent.	23
Figure 2.5 : Correspondance entre la déformation plastique équivalente estimée et le vide et la déformation plastique équivalente trouvée expérimentalement.	24
Figure 2.6 : Déformation plastique équivalente et vide pour (a) 50 mm/min ; et (b) 150 mm/min.	25
Figure 2.7 : Norme ASTM (E8/E8M-13a) pour la conception des éprouvettes de soudure.	26

Figure 2.8 : (a) Imageur thermique / (b) Dispositif de fixation de l'échantillon pour le FSW	27
Figure 2.9 : Échantillons fabriqués selon la norme ASTM E8/E8M-13a.	27
Figure 2.10 : (a) Éprouvette soudée par friction-malaxage, (b) Éprouvette après essais de traction.....	28
Figure 2.11 : Validation empirique des résultats numériques pour la température maximale.	28
Figure 2.12 : Comparaison de la résistance des soudures empirique et numérique.....	29
Figure 2.13 : Comparaison de la dureté obtenue à partir des expériences et des simulations.	29
Figure 2.14 : (a) Modèle géométrique / (b) conditions aux limites.	32
Figure 2.15 : Maillage de la géométrie de la pièce et de l'outil.....	33
Figure 2.16 : Prédiction du modèle FE pour les défauts internes.....	34
Figure 2.17 : Prédiction du modèle FE pour les défauts de surface.	35
Figure 2.18 : Échantillons d'essai de traction après rupture.....	36
Figure 3.1 : (a)Polisseuse mécanique utilisée / (b) éprouvettes obtenus après polissage mécanique.....	38
Figure 3.2 : Détails d'éprouvette d'essai de traction.....	40
Figure 3.3 : Éprouvettes de traction usiné par une fraiseuse.....	41
Figure 3.4 : Éprouvettes de traction.	41
Figure 3.5 : Machine de traction type Zwick/Roell Z050.....	42
Figure 3.6 : (a) polisseuse électrolytique utilisée de type POLISEC C25 / (b) éprouvette mise en contact de la solution.	43
Figure 3.7 : Microscope optique utilisé de type ZWICK/ZHV10.	43
Figure 3.8 : (a) , (b) les plaques d'aluminium crée par abaqus / (c) l'outil en acier crée par abaqus.....	44
Figure 3.9 : l'assemblage des plaques et l'outil.	44
Figure 3.10 : Maillage des plaques et de l'outil.	45
Figure 3.11 : l'assemblage des plaques et l'outil maillé.	45
Figure 4.1 : éprouvette soude par soudage friction malaxage.....	50
Figure 4.2 : (a) éprouvette soudé / (b) empreinte de l'outil.	51
Figure 4.3 : Défauts laissés par des différents paramètres.	52
Figure 4.4 : Défaut de bavures excessives.	53
Figure 4.5 : Défaut de surface de type éraillures.	53
Figure 4.6 : Défaut flux de métal a racine du cordon de soudure.	54

Figure 4.7 : Défaut tunnel interne.	54
Figure 4.8 : les différentes zones du joint de soudure.....	55
Figure 4.9 : Microstructure montrant l'effet du soudage par friction malaxage au début de la phase de pénétration.	56
Figure 4.10 : Morphologie du cordon de soudure. a) Paramètre 1400-16 b) 1400 25, c) 1400 63.....	56
Figure 4.11 : Morphologie de l'alliage d'aluminium avant le soudage.	57
Figure 4.12 : Empreintes de l'indenteur Vickers avant le soudage.....	57
Figure 4.13 : Empreintes de Micro dureté. a) Paramètre 1400-16 b) 1400 25, c) 1400 63. .	58
Figure 4.14 : Courbes dévolution de la températures pour les différents paramètres N=1400tr/min , V=20-25-16-50 mm/min.	59
Figure 4.15 : Résultat de la simulation numérique de la chaleur.	60

Liste des tableaux

Tableau 1 : Propriétés du matériau en fonction de la température pour l'Al6061-T6.....	22
Tableau 2 : Johnson-Cook constitutive model constants for Al6061-T6.	23
Tableau 3 : Composition chimique du laiton.....	26
Tableau 4 : Propriétés mécaniques du laiton	26
Tableau 5 : Propriétés thermiques du laiton.	26
Tableau 6 : Caractéristiques de l'AA6063. Composition chimique Propriétés mécaniques.	31
Tableau 7 : Propriétés thermomécaniques des matériaux de la pièce et de l'outil.....	32
Tableau 9 : Différents essais avec différent paramètres.	49
Tableau 10 : Essais avec une épaisseur supérieure.....	50

Introduction générale

Introduction générale

Le soudage par friction malaxage (friction stir Welding abrégé FSW) est un nouveau procédé d'assemblage mis au point par la société The Welding Institute [1]. C'est un procédé de soudage à l'état solide (sans les faire fondre) et sans métal d'apport, inventé en 1991 [2]. FSW utilise un outil rotatif en forme de broche pour produire de la chaleur et mélanger les matériaux de soudage par opposition aux techniques de soudage conventionnelles, qui font fondre le matériau pour former un joint. L'outil est inséré dans les deux pièces à souder et tourne sur lui-même pour créer une zone de soudure uniforme [3]. La matière est ramollie sans fondre par la chaleur produite par le frottement de l'outil, ce qui permet aux deux pièces d'adhérer à l'une à l'autre. Le joint est entièrement soudé une fois que l'outil de soudage a parcouru toute la longueur de la jonction à souder [4]. Cette méthode d'assemblage de matériaux composites, d'alliages d'aluminium et de magnésium et d'autres matériaux est largement utilisée dans les industries de la construction navale, de l'automobile et de l'aérospatiale. Une faible distorsion, une zone affectée par la chaleur plus petite, une résistance mécanique élevée et une excellente l'étanchéité ne sont que quelques-uns des nombreux avantages qu'il offre. Comme FSW ne produit pas de fumées, de gaz ou de déchets nocifs, il est également respectueux de l'environnement [5].

Le premier chapitre donne une description plus ou moins détaillée sur le procédé récent de soudage par friction et malaxage (FSW), considéré en tant que nouvelle technique du 21^{ème} siècle, qui permet de souder des alliages difficilement soudables par les procédés de soudages classiques. Les différents paramètres mis en jeu dans le procédé FSW sont également donné, ainsi que les principaux domaines de son utilisation [6].

Le deuxième chapitre est dédié au travaux réalisées par Monsieur Zhi ZhuUn sur le développement d'un modèle d'éléments finis pour simuler la formation de défauts pendant le soudage par friction-malaxage.

Le troisième chapitre, explique les étapes afin d'expérimenter le soudage par friction-malaxage. Nous passerons en revue les principales étapes de cette méthode de soudage et couvrirons les principaux paramètres qui influent sur la qualité du joint, tels que la Vitesse de rotation, la vitesse d'avance, et aussi température générée pendant le processus.

Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus au cours de cette étude.

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

1. 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 [7]. 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 [8].

1.1. Techniques du procédé

1.1.1. Définition du FSW

Le Welding Institute (Royaume-Uni) a créé et breveté le soudage par friction-malaxage (FSW) au début des années 1990 [9]. Le processus de soudage par friction-malaxage consiste à enfoncer un outil rotatif avec une broche et un épaulement dans le matériau jusqu'à ce que l'épaulement entre en contact avec la surface du matériau à souder (comme le montre la figure 1.1).

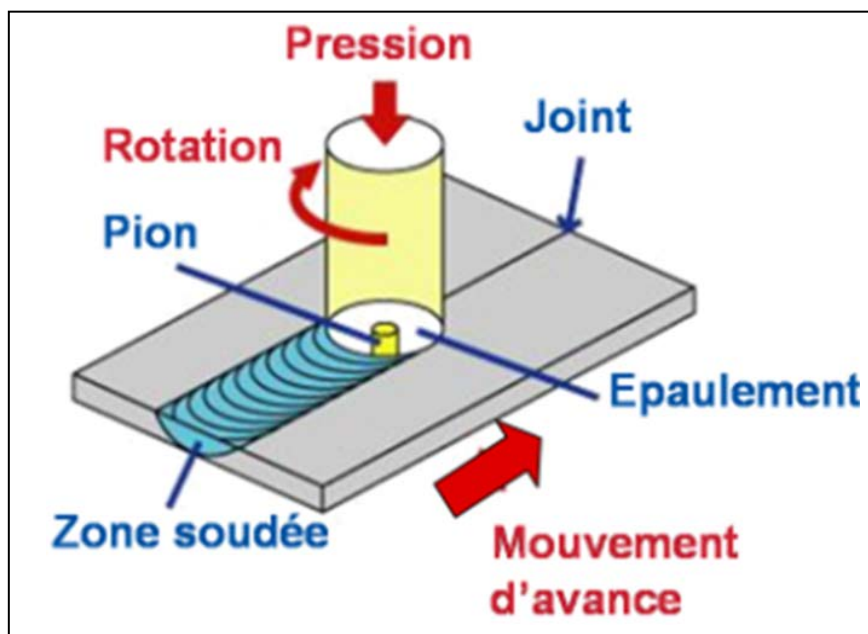


Figure 1.1 : Soudage par friction malaxage [10].

De cette façon, le matériau est chauffé par friction à une température où il peut être facilement moulé sans fondre [11]. Le matériau s'écoule de l'avant vers l'arrière de la broche pour former le joint soudé lorsque l'outil avance entre les tôles. Avec cette méthode, il est possible de souder des alliages d'aluminium non éligibles aux autres procédés de soudage ainsi que des alliages sensibles à la fissuration à chaud (alliages AlCu ou AlZnMgCu) [12].

1.1.2. Le principe du soudage par friction malaxage

Afin d'assembler des composants en phase solide, le soudage par friction-malaxage est utilisé. L'idée fondamentale derrière le mélange par friction est de déplacer un troisième corps axisymétrique en rotation dans les matériaux qui doivent être assemblés. Un échauffement local est produit par l'interaction tribologique des matériaux et de l'outil, ce qui fait entrer la zone malaxée dans l'état dit thixotrope, encore appelé « état pâteux » [13], où elle est malléable plutôt que liquide. Selon Reynolds [14], le procédé est assimilable à un phénomène d'extrusion contenue provoquée par un outil, combiné à un forgeage de la matière non mélangée. Le procédé se résume comme ceci :

- Préparation des pièces : Les pièces à souder sont nettoyées et alignées de manière à être en contact étroit.
- Positionnement de l'outil de soudage : L'outil de soudage est positionné à l'endroit où les pièces vont être jointes.
- Rotation de l'outil : L'outil de soudage est entraîné en rotation à une vitesse élevée, généralement plusieurs milliers de tours par minute.
- Pression de l'outil : L'outil de soudage est abaissé contre les pièces à souder avec une pression suffisante pour assurer un contact étroit entre les pièces.
- Friction et malaxage : Lorsque l'outil de soudage est en contact avec les pièces, il crée de la chaleur par friction qui ramollit les matériaux. L'outil de soudage est également conçu avec une forme spécifique qui permet de malaxer les matériaux ensemble pour former une jointure solide.
- Refroidissement : Une fois que le soudage est terminé, les pièces sont laissées à refroidir naturellement. Les pièces peuvent être usinées si nécessaire pour leur donner la forme et la finition finale souhaitées (comme le montre la figure 1.2).

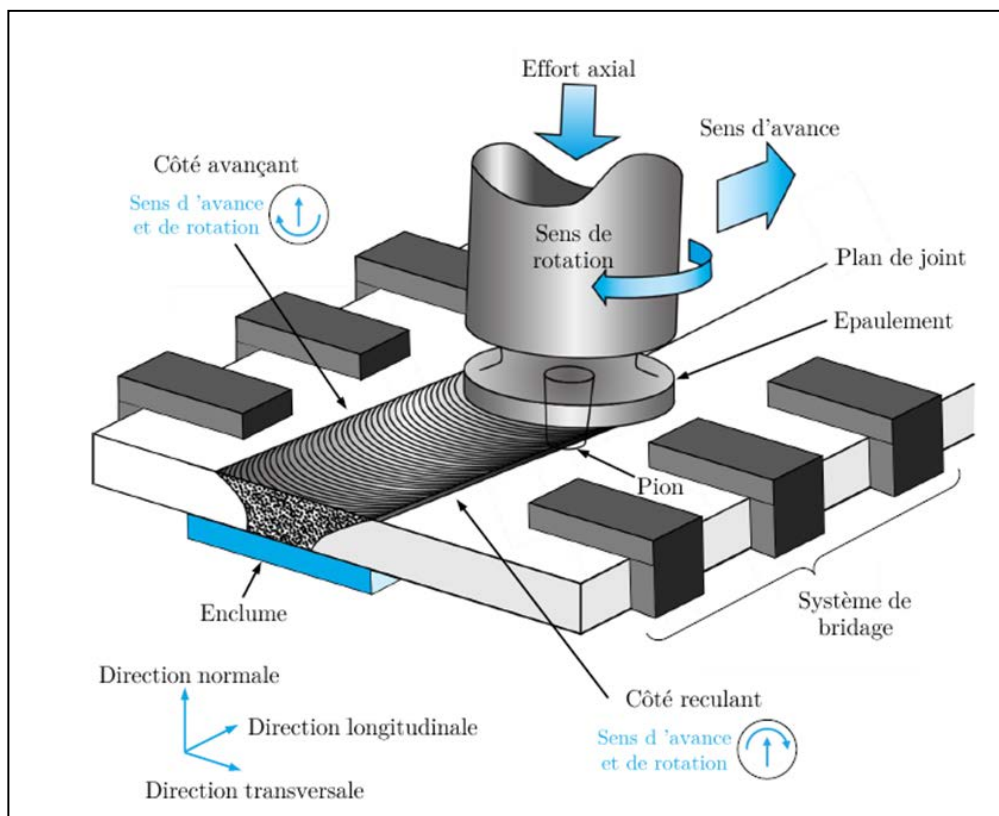


Figure 1.2 : Principe de fonctionnement du soudage FSW [15].

1.1.3. Paramètres du soudage par friction malaxage

Le procédé de soudage par friction malaxage est très différent des procédés de soudage conventionnels étant donné qu'aucun métal d'apport et qu'aucune source de chaleur externe ne sont utilisés. Il nécessite toutefois des équipements plus imposants que le soudage à l'arc ou au plasma et autant de précision au niveau du contrôle de ses paramètres. En effet, ceux-ci varient selon l'épaisseur, le type de matériau et le type de soudure à réaliser [14].

Les quatre principaux paramètres de soudage sont :

- La géométrie de l'outil
- La vitesse de rotation de l'outil
- La vitesse d'avance de l'outil
- La position de l'outil

Évidemment, ces paramètres varient selon plusieurs facteurs. Il est donc nécessaire de bien comprendre leurs effets pour obtenir une soudure de qualité.

1.1.4. Outils de soudage

Sans aucun doute, le processus de soudage par friction-malaxage est le plus affecté par l'outil de soudage (comme le montre la figure 1.3). Il a un impact direct sur le mélange du procédé et les déformations de la matière. La conception originale de l'outil comportait un épaulement au-dessus d'une tige cylindrique lisse. Ainsi, la majorité des simulations réalisées utilisent ce type d'outil car il s'agit d'une géométrie simple et simple à représenter dans un modèle numérique [16_17] [18].

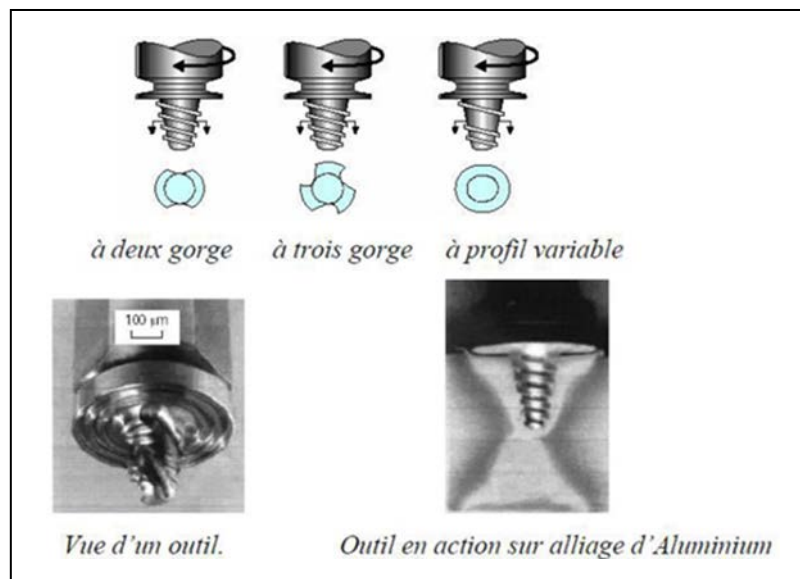


Figure 1.3 : Exemple de géométrie d'outil [18].

Pour améliorer la résistance de la soudure, pour souder différents matériaux, composants de différentes épaisseurs, ou dans différentes configurations géométriques, plusieurs utilisateurs ont créé et breveté des outils avec différentes géométries. En conséquence, des tiges à nervures hélicoïdales, diverses géométries de section, des épaulements nervurés et concaves ainsi que des profils à deux voire trois rainures ont commencé à apparaître. Il va sans dire que la géométrie et le matériau de l'outil de soudage dépendent du type de soudure à réaliser [18]. Semblable à l'épaisseur de la pièce, la longueur de la tige pénétrante doit être utilisée. Il ne doit pas être trop court ni plus épais que la pièce. Lorsqu'il est présent, le sens des filets doit également permettre un écoulement du matériau vers le bas afin d'éviter l'apparition d'un vide sous la tige.

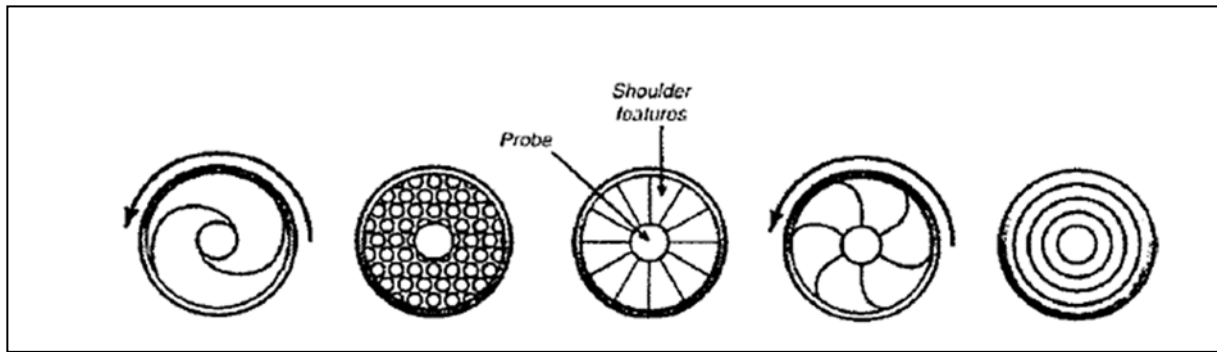


Figure 1.4 : Différentes géométries d'épaulement [18_19],[20].

Pour que l'épaulement entraîne la matière (mélange), assure une bonne pénétration de la tige et évite le reflux de la matière soudée vers le haut, il doit entrer en contact avec la surface de la pièce. Pour éviter tout débordement de matière de part et d'autre de l'outil, l'épaulement est souvent de forme concave. Le matériau de l'outil doit en outre être plus résistant à la chaleur que le matériau soudé en raison du frottement que cet épaulement provoque. Par exemple, l'acier dur comme le 4340 sont généralement utilisés pour fabriquer l'équipement de soudage pour l'aluminium F. Padmanaban et Balasubramanian ont utilisé cinq profils de tige différents [18_19], trois profils d'épaulement et cinq types de métaux différents (acier doux, acier inoxydable, acier blindé, acier à haute teneur en carbone et acier rapide) pour souder un alliage de magnésium (AZ31B) afin d'étudier l'impact de la géométrie de l'outil. Pour chaque essai, les mêmes valeurs de vitesse de rotation, d'avance et de force axiale ont été utilisées. La tige filetée en forme de cylindre est la plus efficace, selon les auteurs. Il n'y avait aucun défaut dans les soudures et l'apparence de grains plus fins de la zone recristallisée dynamiquement se reflétait dans les caractéristiques de traction et de dureté améliorées du matériau. L'épaulement qui avait un rapport diamètre d'épaulement/diamètre de tige de trois s'est avéré être la meilleure option car la chaleur qu'elle produisait était juste, ni trop ni trop peu. En conséquence, les propriétés de traction et la dureté des soudures étaient plus élevées et les grains obtenus dans la zone soudée étaient plus fins. L'outil en acier à haute teneur en carbone a fini par produire les meilleurs résultats. Cependant, les soudures créées avec l'alliage de magnésium sont à l'origine de toutes ces conclusions. Pour l'aluminium A16061-T6 plus dur, les résultats pourraient être très différents [18].

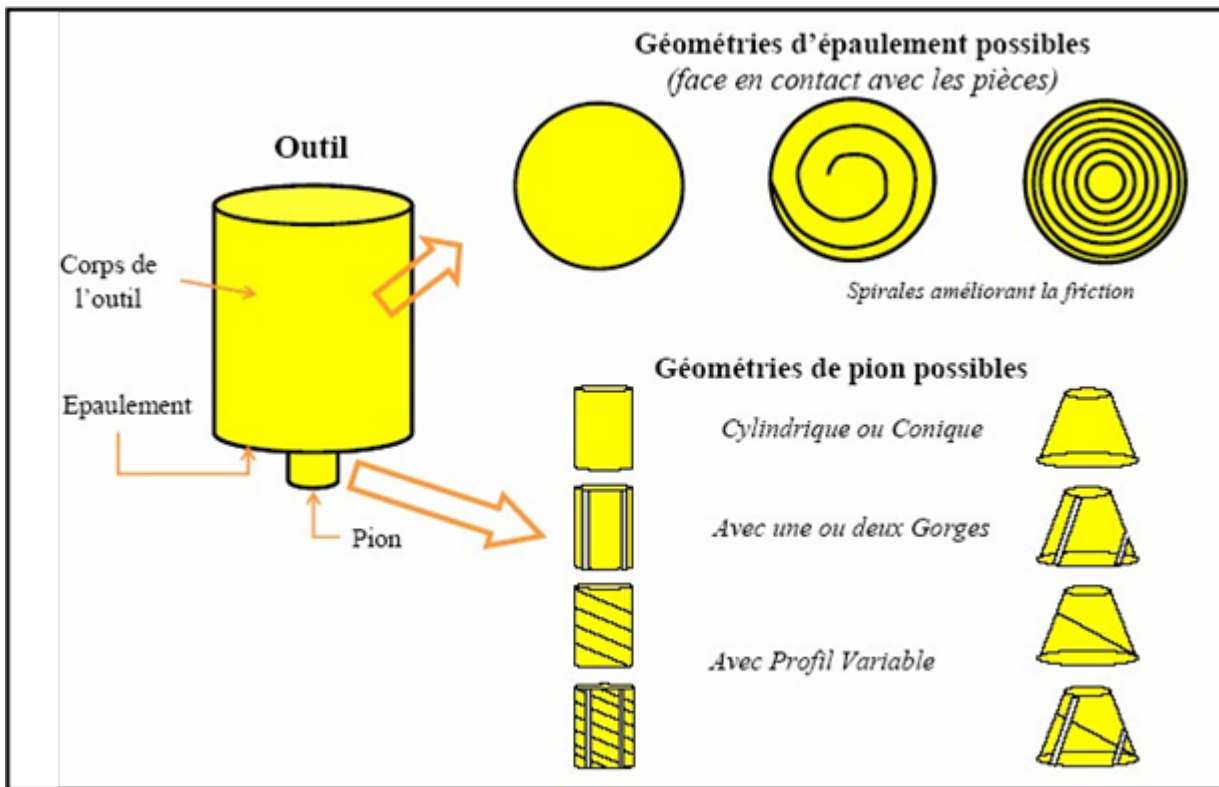


Figure 1.5 : Schématisation de l'outil de soudage et de quelques géométries des pions et de l'épaulement [17-21].

1.1.5. Équipements

Le soudage par friction-malaxage peut être effectué avec n'importe quel appareil doté d'un mandrin rotatif. Pour réussir les soudures, il doit cependant pouvoir délivrer un effort axial important. L'appareil doit pouvoir enfoncer l'outil dans le métal et maintenir sa position, même si ce paramètre est rarement maîtrisé. La "machine ESAB SuperStir" utilisée par "The Welding Institute" (TWI) est un exemple de machine spécialement conçue pour ce processus, et elle est aussi efficace que les machines d'usinage CNC et les robots industriels. Cependant, quel que soit le type de dispositif utilisé, il est essentiel que les pièces à souder soient solidement fixées afin d'éviter les déplacements et de minimiser leurs déformations provoquées par les efforts importants du mandrin et les réactions aux appuis. Alors que la plupart des machines utilisent un système mécanique ou hydraulique, certaines machines utilisent un système de maintien sous vide [18].

1.1.6. Mécanismes physiques du procédé et microstructure

La procédure de soudage par friction-malaxage entraîne des augmentations de température importantes et de grandes déformations plastiques. La microstructure du matériau change en conséquence, ce qui affecte ses caractéristiques physiques. Afin d'optimiser les paramètres de soudage et la résistance des soudures, il est alors nécessaire d'appréhender l'évolution des

Propriétés mécaniques et thermiques du matériau [18]. De nombreux chercheurs ont tenté de modéliser mathématiquement les composantes thermiques et mécaniques (contrainte et déformation) du procédé de soudage par friction-malaxage au fil des ans. Des mesures expérimentales pour déterminer les déformations mécaniques ont été faites, et les profils thermiques ont également été obtenus. Pour ce qui suit, un résumé de cette recherche est fourni ci-dessous [19].

- Distribution de température
- Écoulement du matériau
- Microstructure

1.1.7. Les différentes phases opératoires de soudage par friction

a) Phase de pénétration

Dans cette étape. On réalise la pénétration du pion sous l'effet d'un effort vertical, il pénètre progressivement à l'intérieur du joint, grâce à la vitesse de rotation jusqu'à ce que l'épaulement soit au contact avec des plaques à souder [16-17], [22].

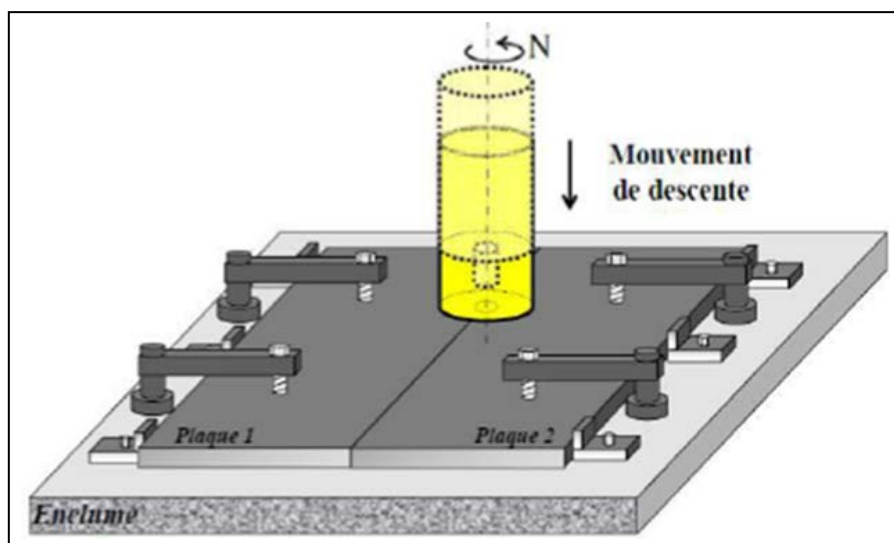


Figure 1.6 : Phase de plongée [23].

b) Phase de préchauffage

Cette étape transitoire consiste à entraîner localement l'épaulement dans un mouvement de rotation pour transformer la matière à l'état pâteux. Cette étape de pré-soudage dure une à trois secondes avant le passage à l'étape de soudage [22].

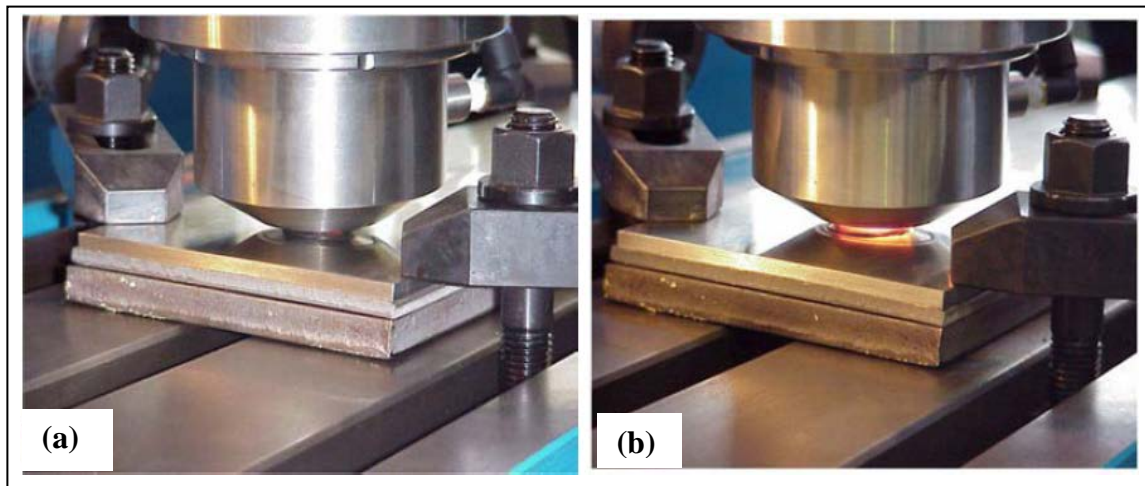


Figure 1.7 : (a) Fin de phase de pénétration / (b) Phase de chauffage [16].

b) Phase de soudage

Une fois la température de soudage (état ramolli de la matière) atteinte, la broche rotative commence à avancer le long de la ligne de joint (autre configuration : déplacement de la table), assurant le mélange de la matière entre les deux pièces. Au cours de cette étape, l'outil est soumis et maintenu sous une force appelée force de forgeage. Le cordon de soudure est créé par déformation plastique du matériau mélangé. Le cordon qui a été produit n'est pas symétrique. En fait, les deux côtés qui sont créés par le mouvement combiné de rotation et d'avance sont :

- Un côté avance (advancing side) où le sens de la vitesse de rotation de l'outil coïncide avec sa vitesse d'avance.
- Un côté recul (retreating side) où le sens de la vitesse d'avance de l'outil s'oppose à sa vitesse d'avance [22].

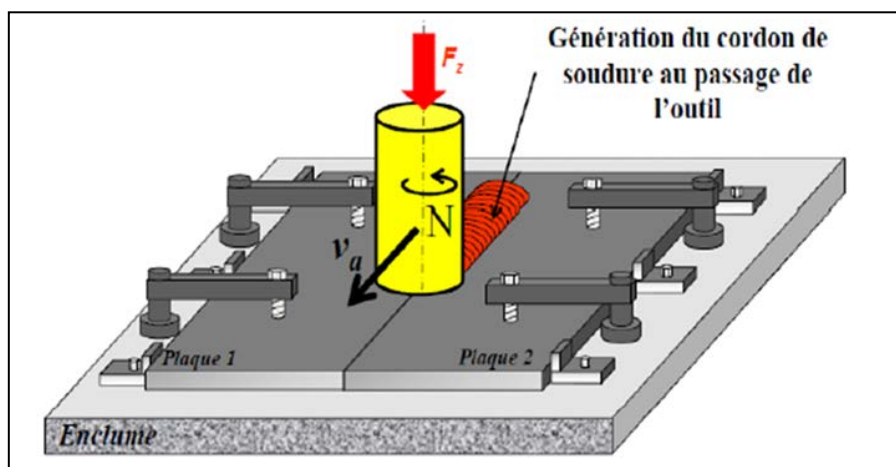


Figure 1.8 : Phase de soudage [23].

c) Phase de retrait

Une fois le cordon réalisé, le pion est retiré du joint en laissant un trou à l'extrémité du cordon, un outil à pion rétractable permet d'éviter la formation de ce trou. Dans ce cas, l'épaulement reste en contact avec la matière jusqu'à la fin de retrait du pion [22].

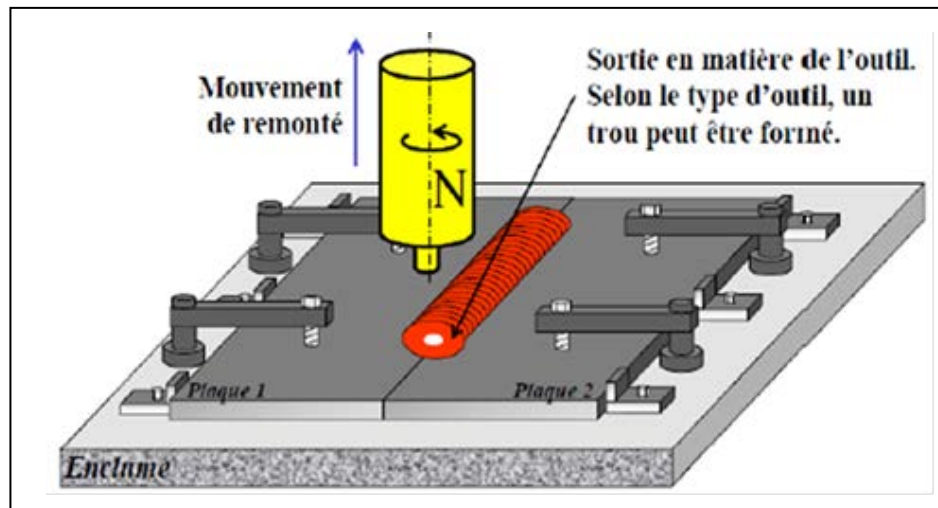


Figure 1.9 : Schématisation de phase de retrait de l'outil [23].

1.1.8. Phénomènes physiques observés dans le procédé

Les divers phénomènes physiques, mis en jeu pendant le soudage par FSW, sont de trois types [17] :

- **Mécanique** : Les phénomènes mécaniques sont généralement causés par le frottement au point de rencontre de l'outil et des pièces soudées, ainsi que par la déformation plastique du matériau. Le contact entre l'outil en rotation et le matériau est à l'origine de la friction. La contrainte de cisaillement à l'interface est ce qui donne au frottement ses caractéristiques. Le mouvement de la matière lors de sa rotation à l'interface plateau-outil sous l'effet du frottement et le brassage provoqué par la goupille sont les deux principales causes de déformation plastique. La zone sous l'outil subit une déformation plastique importante [17].

- **Thermique** : Les deux phénomènes thermiques les plus importants au cours du processus FSW sont la génération de chaleur et la conduction thermique. La chaleur est générée à partir d'une source de chaleur de surface due au frottement à l'interface et d'une source de chaleur globale due à la déformation plastique du matériau. La répartition de la génération de chaleur entre ces deux sources de chaleur dépend du contact entre l'outil et le matériau. En effet, lors d'un contact quasi-cohésif,

La chaleur est principalement générée par la déformation plastique du matériau. En contact glissant, par contre, la majeure partie de la chaleur est générée par le frottement. La chaleur générée est transférée principalement par conduction. Le transfert conducteur dans les pièces soudées dépend de deux choses. Tout d'abord, cela dépend de la conductivité thermique du matériau de soudage. Par exemple, l'aluminium se caractérise par une conductivité thermique élevée et dissipe rapidement la chaleur générée. D'autre part, la chaleur dissipée dans la plaque-support et l'outil, c'est-à-dire la résistance de l'interface de contact au transfert de chaleur, est importante. Enfin, la chaleur est également dissipée par convection entre l'outil, les deux tôles à souder, la tôle porteuse et le milieu extérieur (environnement) [17].

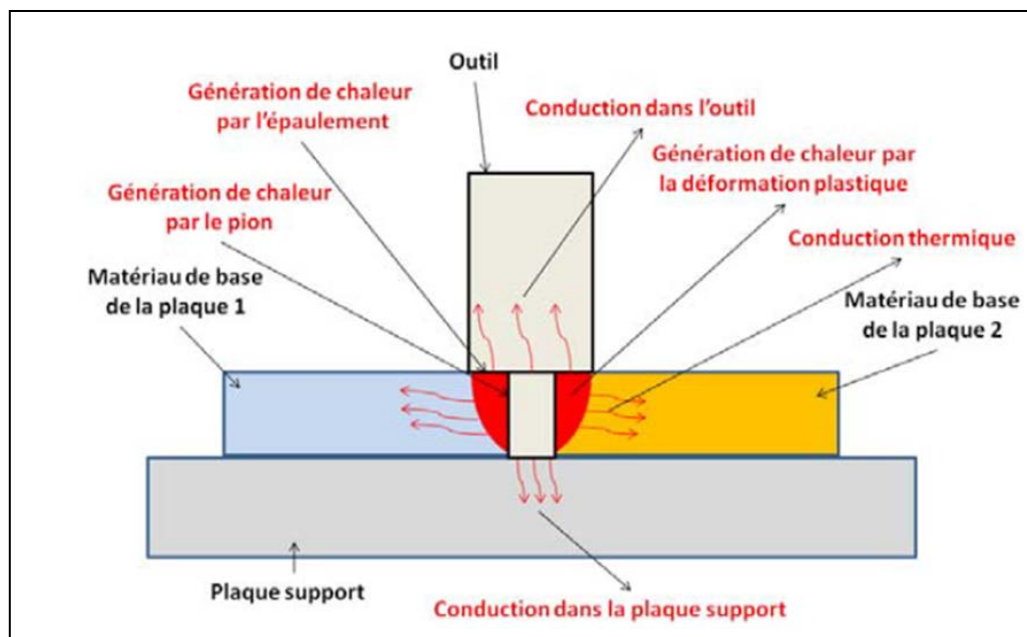


Figure 1.10 : Transferts thermiques induits par le procédé FSW [16].

- **Métallurgie** : Dans tous les procédés de soudage par fusion, des phénomènes mécaniques et thermiques modifient la microstructure du matériau de base et ses propriétés mécaniques. Cet inconvénient est dû aux phénomènes métallurgiques qui se produisent lors du soudage, concentration de contraintes en cas de sollicitation externe. Le premier phénomène métallurgique est le changement d'état de précipitation du matériau. La seconde est la recristallisation du matériau. D'autre part, le procédé de soudage FSW peut supprimer les changements métallurgiques causés par divers changements de phase pendant le soudage dans une moindre mesure que d'autres procédés. Les coupes transversales des joints soudés permettent d'identifier différentes zones dans lesquelles le matériau est affecté thermiquement (zone affectée thermiquement HAZ) ou affecté thermomécaniquement (zone affectée thermomécaniquement TMAZ) [17].

Chaque zone dépend de la température atteinte, des changements métallurgiques et des déformations qui se produisent pendant le processus de soudage.

1.1.9. Principaux domaines d'applications

Le procédé FSW est principalement utilisé dans les industries du bâtiment et des transports, y compris l'espace, l'aviation, l'automobile, le chemin de fer, le maritime, etc...

a) Domaine spatiale

Le FSW est utilisé dans l'espace pour assembler une variété de pièces, y compris des panneaux solaires, des réservoirs de carburant, des structures de fusée et des revêtements d'engins spatiaux. L'un des principaux avantages de FSW dans ce domaine est sa capacité à conserver des matériaux solides et structurellement sains, même dans des conditions difficiles telles que le vide spatial et les conditions de lancement [20].

De plus, FSW est privilégié dans le secteur aérospatial en raison de sa capacité à souder des alliages d'aluminium de première qualité, qui sont fréquemment utilisés en raison de leur résistance et de leur légèreté. De plus, la méthode permet de souder des formes à la fois grandes et complexes, ce qui est crucial pour les structures spatiales.

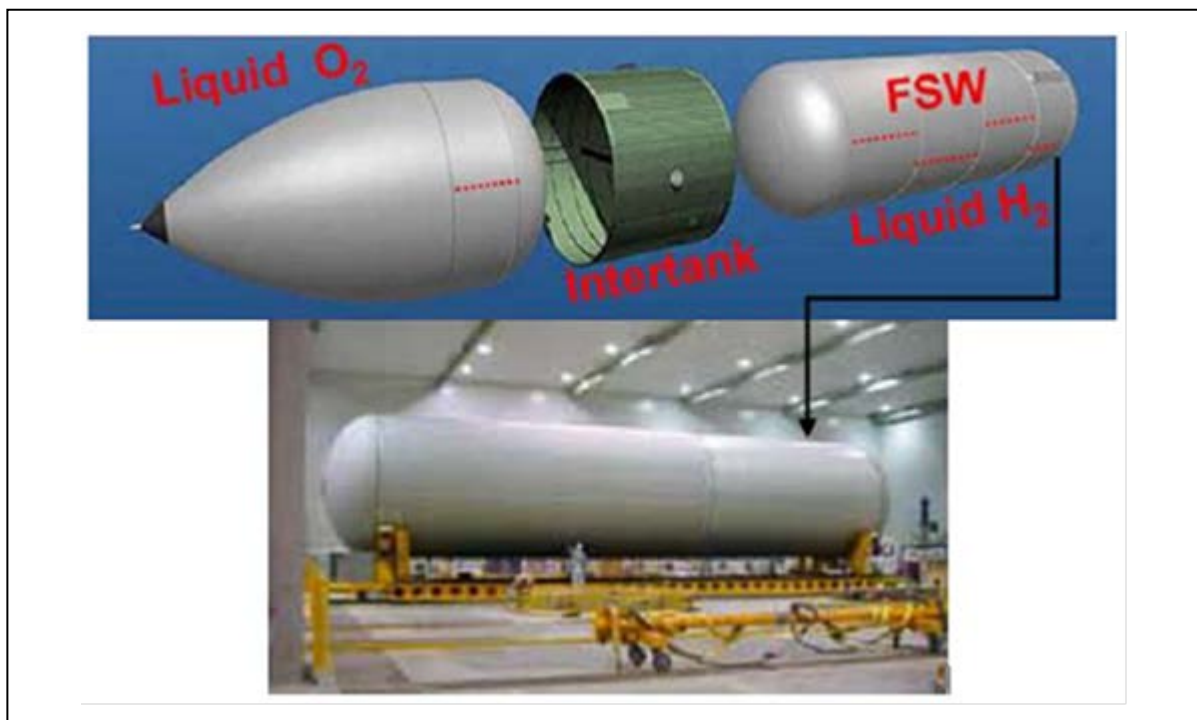


Figure 1.11 : Utilisation du procédé FSW pour souder les réservoirs de carburant de ses fusées Delta par la compagnie Boeing [20].

b) 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 internes et des composants de suspension. Par rapport à d'autres techniques de soudage, la technique permet la production de soudures plus résistantes à la fatigue tout en étant solides, homogènes et esthétiques [20].

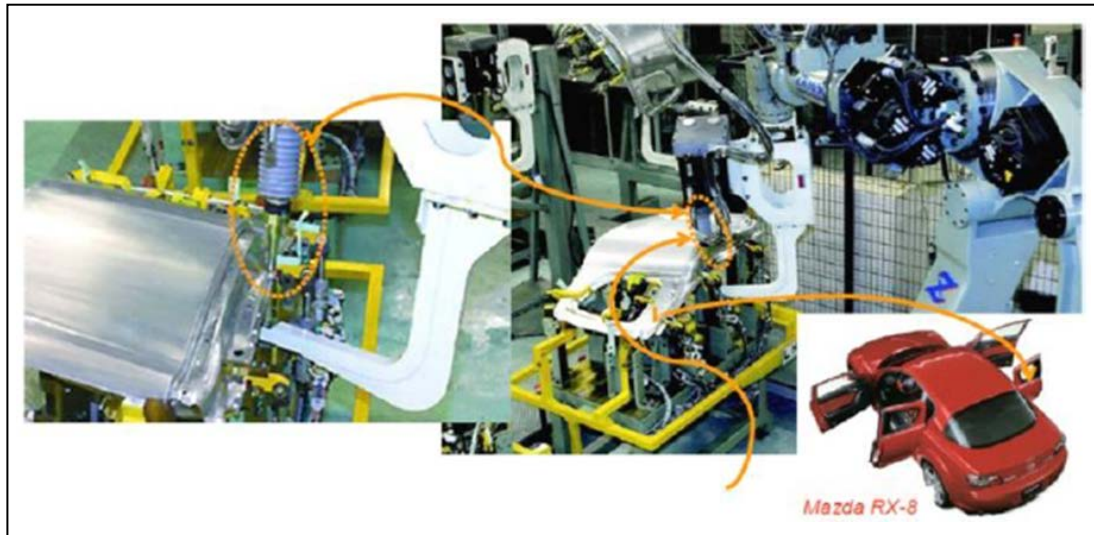


Figure 1.12 : Soudage « friction-malaxage » par point utilisé pour l'automobile [20].

c) Domaine l'industrie aéronautique

L'assemblage de nombreuses pièces différentes, y compris les longerons, les cloisons, les ailes, les réservoirs de carburant, les poutres et les structures internes de l'avion, est effectué dans l'industrie aéronautique à l'aide de FSW. Il permet d'obtenir des soudures de haute qualité avec une forte résistance mécanique et un état de surface lisse [24].

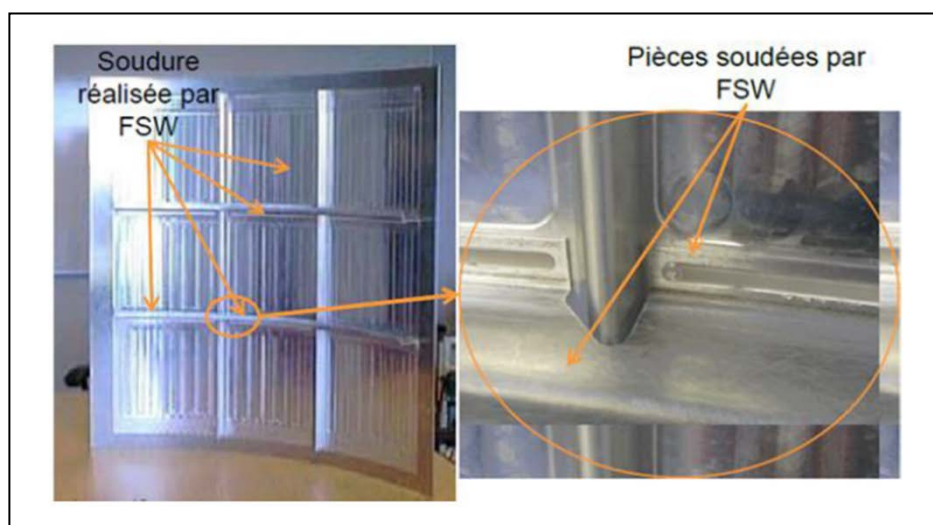


Figure 1.13 : Voilure d'avion soudée par FSW [24]

d) Domaine du nucléaire

Le FSW est utilisé dans l'industrie nucléaire pour assembler des composants tels que les gaines de combustible, les assemblages structuraux, les cuves de stockage, les échangeurs de chaleur et les composants du circuit primaire. Cela permet d'obtenir des soudures solides et sans pores avec une excellente résistance mécanique et de bonnes propriétés d'étanchéité.

De plus, FSW offre des avantages en termes de maintenance et de réparation dans le secteur nucléaire. Cela réduit les temps d'arrêt et les coûts associés car le composant peut être réparé sans être complètement retiré de l'usine [20].

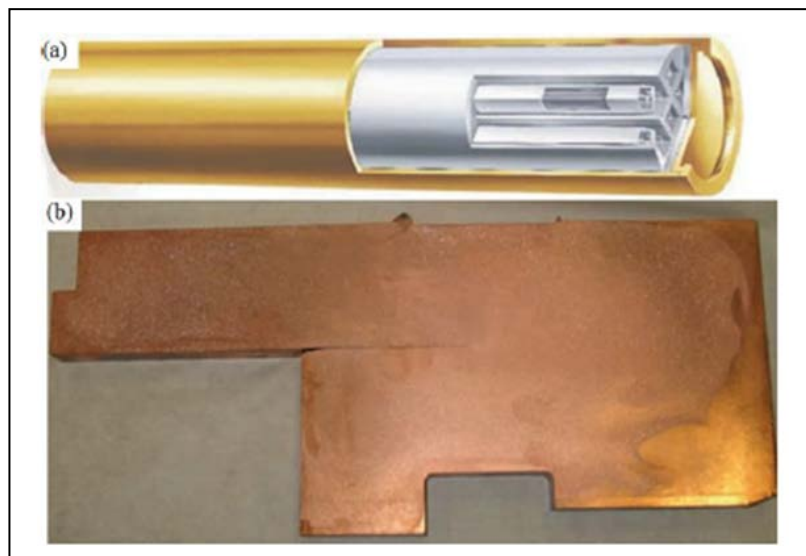


Figure 1.14 : Utilisation FSW dans le domaine nucléaire. :(a) -cartouche en cuivre avec insert en fonte pour le combustible nucléaire produite à SKB, avec un couvercle scellé, (b) - Aire de la section du couvercle soudé [20].

e) Domaine ferroviaire

Le FSW est utilisé dans l'industrie ferroviaire pour assembler des pièces telles que des boîtes de train, des structures de châssis, des panneaux de carrosserie, des bogies et des pièces intérieures. Grâce à cette technologie, il est possible de réaliser des soudures continues de haute qualité sans défauts et avec une bonne résistance mécanique [25].

De plus, il offre d'importants avantages environnementaux. Comme il s'agit d'un processus à l'état solide, aucune charge ou gaz protecteur n'est utilisé. Cela réduit les déchets, les émissions et les coûts associés au soudage traditionnel et contribue à une approche plus durable dans l'industrie ferroviaire.

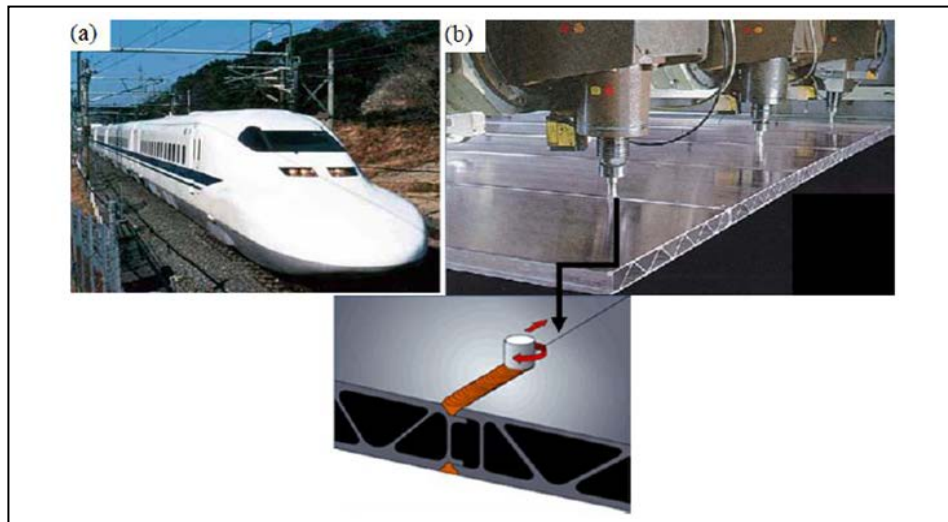


Figure 1.15 : Soudage par FSW trains : (a) Hitachi train Series 700, (b) Technique de soudage des carrosseries des trains Hitachi [25].

f) Domaine naval

Le FSW est utilisé dans l'industrie de la construction navale pour assembler des pièces telles que des coques, des superstructures, des réservoirs de carburant, des cloisons et des aménagements intérieurs. Un soudage continu de haute qualité sans porosité est possible, ce qui permet d'obtenir une résistance mécanique élevée et d'excellentes performances d'étanchéité.

De plus, il offre des avantages en termes de productivité et de durabilité. Le soudage de pièces de grande taille et de forme compliquée devient possible. Ceci est essentiel dans la construction navale, où les structures sont souvent importantes [26].



Figure 1.16 : (a) Bateau en aluminium construit en utilisant FSW / (b)-Panneaux préfabriqués (Hydro Marine Aluminium) destinés au pont du bateau de croisière [26].

1.1.10. Les avantages et inconvénients du SFW

Le soudage par friction malaxage (FSW) présente de nombreux avantages, tels que :

- Une zone affectée thermiquement (ZAT) réduite par rapport aux méthodes de soudage conventionnelles, car le matériau de base n'est pas fondu.
- Une forte résistance mécanique des joints soudés grâce à la formation de microstructures fortes.
- Une faible distorsion des pièces soudées, ce qui permet une plus grande précision dans les assemblages de précision.
- Une absence de porosité ou d'autres défauts dans les joints soudés.
- La possibilité de souder des matériaux de différentes épaisseurs et compositions.
- Un processus écologique et économique en termes de coûts de production, d'énergie et de consommation de matériaux [12_18] [27].

Cependant, il y a aussi quelques inconvénients potentiels, tels que :

- Une limitation de la taille des pièces soudées, en raison de la taille des équipements de soudage.
- Une limitation de la géométrie des pièces soudées en raison de la forme et de la taille de l'outil de soudage.
- Un temps de soudage relativement long, ce qui peut limiter la productivité dans certains cas.
- Un coût initial élevé pour l'acquisition de l'équipement de soudage par friction malaxage [12].

Malgré ces inconvénients, le soudage par friction malaxage est une technique de soudage innovante qui offre de nombreux avantages par rapport aux méthodes de soudage conventionnelles, et est largement utilisé dans l'industrie automobile, aérospatiale, marine et d'autres industries où la qualité et la durabilité des joints soudés sont essentielles.

Chapitre 2 : Travaux réalisés sur le soudage par friction malaxage

Chapitre 2 : Travaux réalisés sur le soudage par friction malaxage

2. Introduction

Travaux de Monsieur **Zhi ZhuUn** et all (2017) sur le développement d'un modèle d'éléments finis pour simuler la formation de défauts pendant le soudage par friction-malaxage.

Dans cette étude, Monsieur **Zhi ZhuUn et ses collaborateurs**, ont développé un modèle par éléments finis **thermo-mécanique couplé en 3D** pour prédire et analyser la formation de défauts pendant le soudage par friction-malaxage sur la base d'une méthode lagrangienne eulérienne couplée. Le modèle est validé en comparant la température de soudage estimée, la forme de la zone traitée et la taille du vide avec celles obtenues expérimentalement. Dans le présent modèle, le transfert de chaleur par convection et par rayonnement et le transfert de chaleur par contact entre la pièce à usiner et la plaque d'appui sont tous pris en considération. En outre, différents paramètres de soudage et profils de broches de l'outil FSW sont pris en compte dans l'analyse. Le modèle est validé en comparant la température de soudage estimée, la forme de la zone traitée et la taille du vide avec celles obtenues expérimentalement.

2.1. Définition des Matériaux et du modèle développé

Des plaques d'alliage d'aluminium Al6061-T6 (300 mm de longueur, 150 mm de largeur et 6 mm d'épaisseur) ont été soudées par friction-malaxage sur un équipement FSW modifié à partir d'une fraiseuse universelle (Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Chine) (figure 2.1 (a)). Un outil avec un épaulement concave et une broche lisse conique, en alliage W6, a été utilisé ; son profil de section transversale et ses principales dimensions sont présentés à la figure (2.1 (b)). Dans cette expérience, un contrôle de position a été appliqué à l'outil de FSW. L'angle d'inclinaison de l'outil a été maintenu constant à 0 et la profondeur de plongée de l'épaulement dans la pièce a été fixée à 0 mm pendant le processus de soudage. Les paramètres de soudage suivants ont été pris en compte : la vitesse de rotation de l'outil était de 600 tr/min, l'avance de plongée était de 3 mm/min et la vitesse de soudage était de 50 mm/min. Pendant l'expérience de soudage, les cycles thermiques ont été mesurés à l'aide de thermocouples de type K (Changzhou Jinailian Electronic Technology Co., Ltd, Changzhou, Chine) encastrés dans de petits trous à des emplacements de 10 mm dans de petits trous situés à 10 mm, 15 mm, 20 mm et 25 mm de la ligne de jonction, tant du côté de l'avancement (AS) que du côté du recul (RS). Après le

soudage, la section transversale du joint a été préparée pour caractériser la macrostructure par microscopie optique

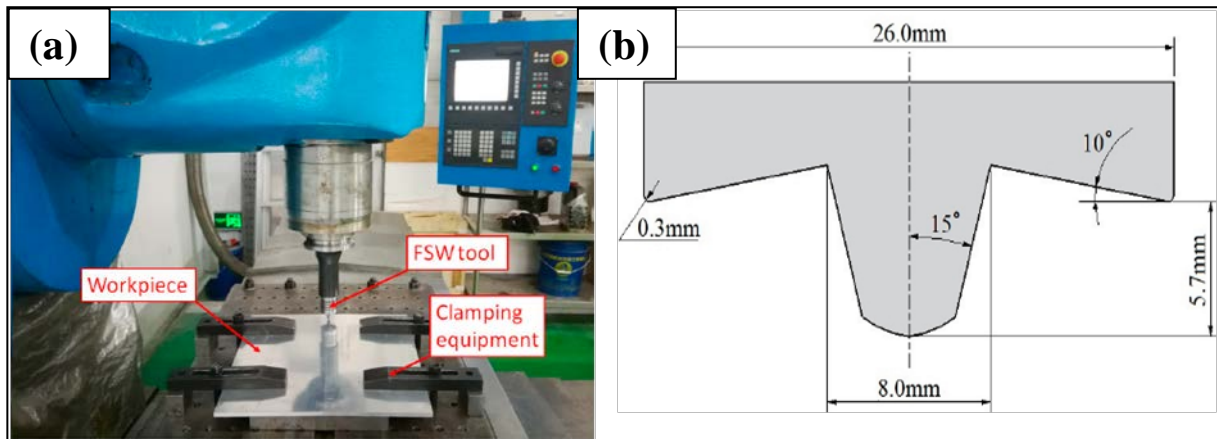


Figure 2.1 : (a) Machine de soudage par friction, (b) Géométrie et dimension de l'outil.

Le Logiciel ABAQUS/Explicit a été utilisé pour simuler le processus de soudage par friction malaxage. Le domaine Eulérien et le maillage de l'outil sont présentés dans la figure 2.2 la forme et la taille de l'outil étaient similaires à celles utilisées dans l'expérience de soudage, et un élément quadri latéral rigide bilinéaire 3D à 4 nœuds a été utilisé pour mailler la surface rigide de l'outil, comme le montre la figure 2.2 (c).

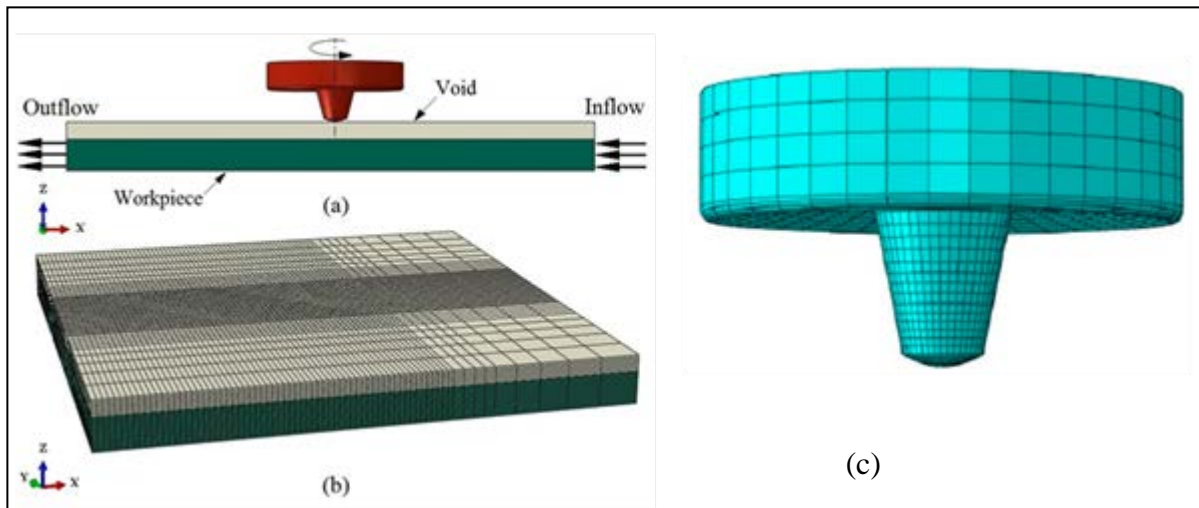


Figure 2.2 : (a) Modèle géométrique, (b) maillage d'éléments finis pour la pièce à usiner et (c) Maillage d'éléments finis pour l'outil FSW.

La figure 2.3 illustre schématiquement les conditions limites de vitesse utilisées dans le présent modèle. Les conditions du processus de soudage utilisées dans le modèle, notamment la vitesse de rotation de l'outil, l'avance de plongée, la vitesse de soudage, l'angle

D'inclinaison de l'outil et la profondeur de plongée, sont exactement les mêmes que celles de l'expérience de soudage.

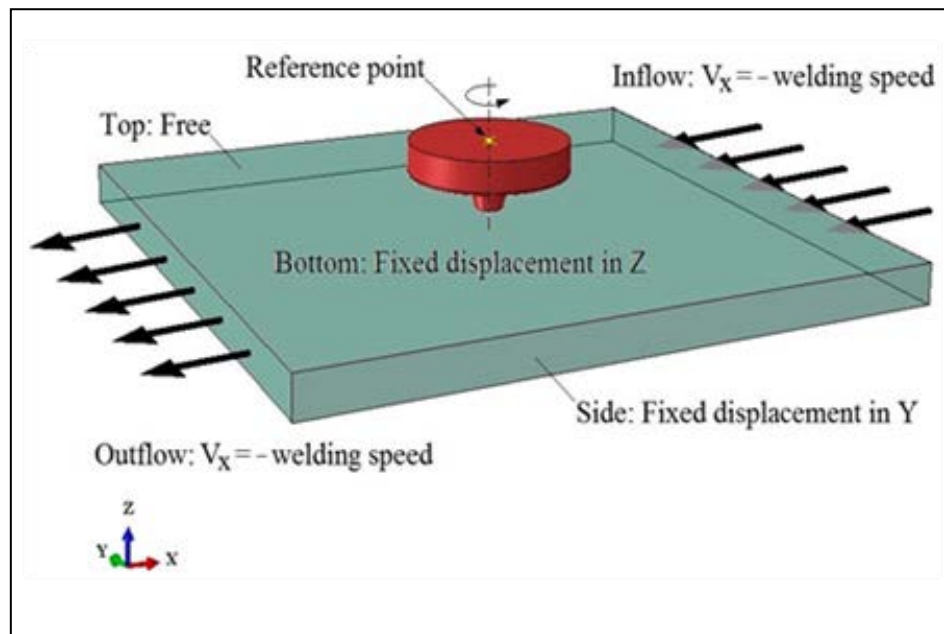


Figure 2.3 : Conditions aux limites et la vitesse utilisée.

Outre la plasticité du matériau, les propriétés élastiques et thermiques ont été considérées comme dépendant de la température. Dans le présent modèle, les propriétés thermiques et mécaniques ainsi que les paramètres de Johnson-Cook de l'Al6061-T6 (tableaux 1 et 2, respectivement) peuvent être trouvés dans la littérature.

$T[^\circ\text{C}]$	$\rho[\text{kgm}^{-3}]$	$E[\text{GPa}]$	ν	$\alpha[10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$	$C_P[\text{J kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$	$\lambda[\text{W m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$
25	2690	66.94	0.33	23.5	945	167
100	2690	63.21	0.334	24.6	978	177
149	2670	61.32	0.335	25.7	1000	184
204	2660	56.8	0.336	26.6	1030	192
260	2660	51.15	0.338	27.6	1052	201
316	2630	47.17	0.36	28.5	1080	207
371	2630	43.51	0.4	29.6	1100	217
427	2600	28.77	0.41	30.7	1130	223
482	-	20.2	0.42	-	1276	-

Tableau 1 : Propriétés du matériau en fonction de la température pour l'Al6061-T6.

A [MPa]	B [MPa]	C	n	m	T [°C]	T [°C]	$\dot{\epsilon}_0$
324	114	0.002	0.42	1.34	24	583	1.0

Tableau 2 : Johnson-Cook constitutive model constants for Al6061-T6.

2.2. Résultats et discussion

La figure 2.4 montre le champ de température simulé pendant le processus de soudage en régime permanent. Il apparaît clairement que la distribution de la température est asymétrique autour de l'axe de la soudure, ce qui est dû à l'écoulement non uniforme de la matière autour de l'outil. La région à haute température se situe sous l'épaulement, où la densité d'énergie est extrêmement élevée.

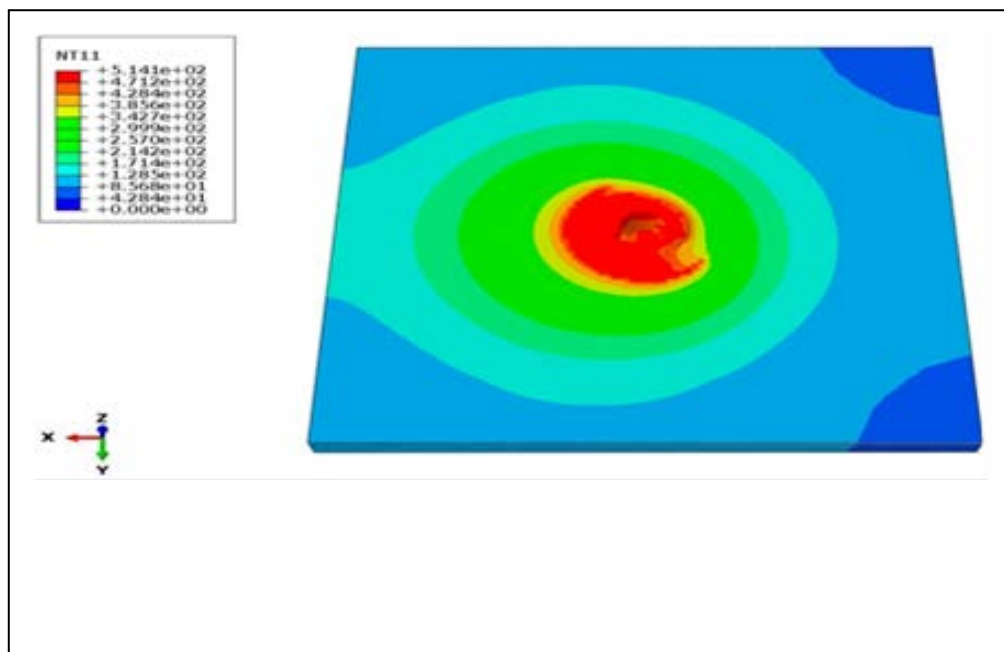


Figure 2.4 : Champ de température simulé pendant le processus FSW en régime permanent.

Une validation supplémentaire est effectuée en comparant la zone de déformation plastique équivalente estimée à la microstructure de la zone traitée obtenue expérimentalement, comme le montre la figure 2.5. Les résultats comparés révèlent que la forme de la zone de déformation plastique équivalente estimée est en bon accord avec la microstructure de la zone traitée obtenue expérimentalement.

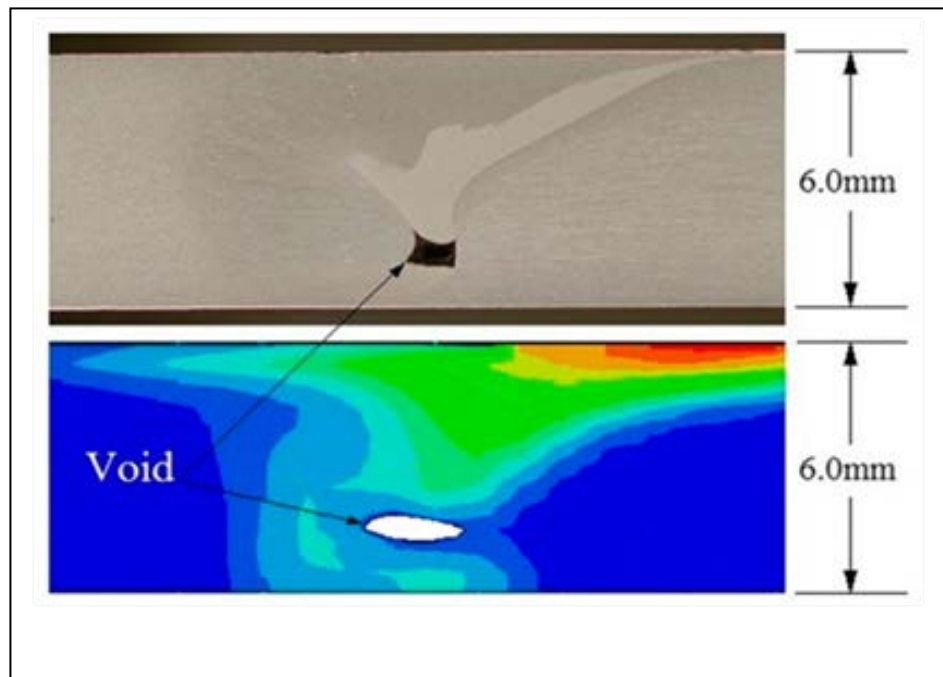


Figure 2.5 : Correspondance entre la déformation plastique équivalente estimée et le vide et la déformation plastique équivalente trouvée expérimentalement.

Il est bien connu que la vitesse de soudage et la vitesse de rotation de l'outil sont les deux paramètres de soudage qui ont une influence importante sur l'écoulement du matériau dans la soudure et la formation de défauts pendant le processus FSW. Dans cette étude, les deux conditions ont été simulées à l'aide du modèle FE développé. L'effet de la vitesse de soudage : deux vitesses de soudage de 50 mm/min et 150 mm/min ont été sélectionnées pour étudier l'effet de la vitesse de soudage sur la déformation plastique équivalente et la formation de vides. Les résultats comparaison illustrés dans la figure 2.6. Les résultats ont montré que les valeurs estimées de la déformation plastique équivalente augmentent lorsque la vitesse de soudage est réduite. Les zones hautement plastifiées sous l'épaulement de l'outil sont plus importantes lorsque la vitesse de soudage est plus faible. En outre, le soudage à la vitesse de 50 mm/min produit un vide plus petit près de l'extrémité de la tige de l'outil FSW.

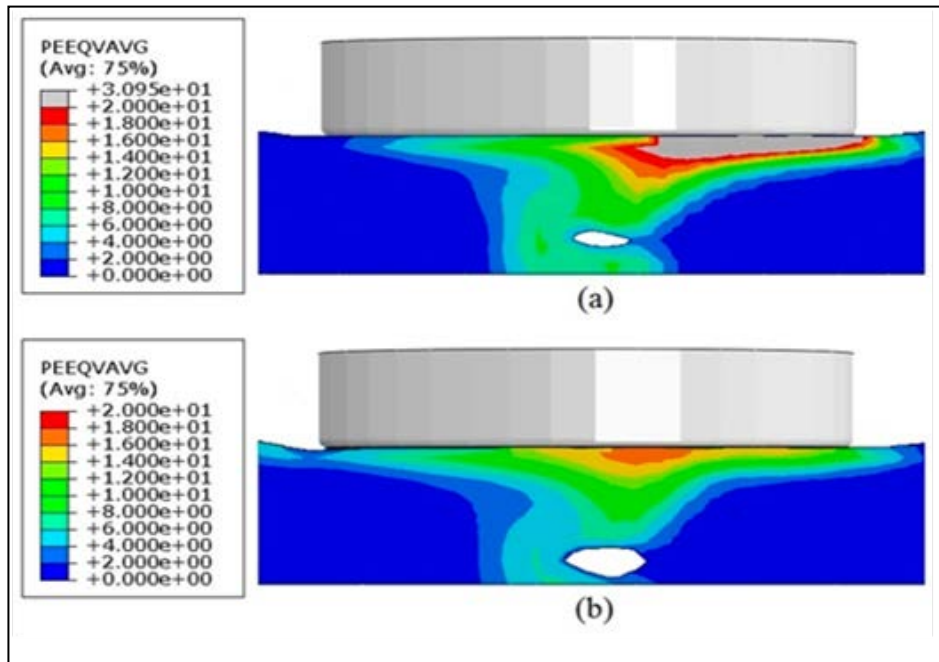


Figure 2.6 : Déformation plastique équivalente et vide pour (a) 50 mm/min ; et (b) 150 mm/min.

Les auteurs ont conclu que :

- Le modèle peut prédire la forme de la zone plastifiée et la présence de vide dans la soudure de manière assez précise. Cependant, la taille du vide est surestimée.
- La taille du vide est directement affectée par les paramètres de soudage. Le soudage à faible vitesse de soudage ou à vitesse de rotation élevée de l'outil peut produire un vide plus petit

2.3. Études numériques et empiriques sur le soudage par friction-malaxage du laiton jaune 405-20

Les travaux de **SyedFarhanRaza et al 2021** se sont concentrés sur le soudage par friction malaxage du laiton jaune 405-20 [28]. La distribution thermique pendant le FSW du laiton a été enregistrée à l'aide de simulations et d'expériences. En outre, la résistance ultime à la traction a également été mesurée numériquement et validée par rapport à sa contrepartie empirique. Enfin, la dureté a été mesurée numériquement sous la forme de la résistance à la compression du laiton soudé, et elle a également été validée expérimentalement. La modélisation géométrique a été réalisée dans le logiciel SolidWorks sur la base de la norme ASTM (E8/E8M-13a), comme le montre la figure 2.7. La géométrie a été importée dans le logiciel Ansys Workbench. Le matériau laiton, avec sa composition chimique et ses

propriétés mécaniques et thermiques, a été attribué au modèle géométrique importé. Ces propriétés sont indiquées dans les tableaux 3, 4 et 5.

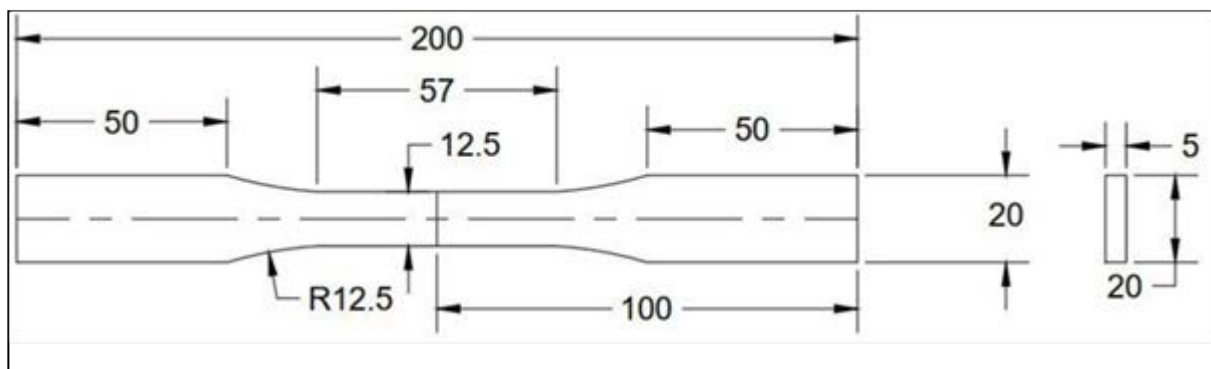


Figure 2.7 : Norme ASTM (E8/E8M-13a) pour la conception des éprouvettes de soudure.

Matériau	Cu	Zn	Pb	Sn
Laiton	63.0	34.7	1.0	1.0

Tableau 3 : Composition chimique du laiton

Matériau	UTS (MPa)	Limite d'élasticité (MPa)	Dureté (HR-15N)	Allongement t (%)
Brass405-20	275	250	82avg.	15

Tableau 4 : Propriétés mécaniques du laiton

En outre, la température de surface à l'interface de la soudure a été mesurée à l'aide de l'analyse thermique transitoire et validée à l'aide de l'imageur thermique fourni par la société testo, comme le montre la figure 24 (a). Le dispositif de fixation de l'échantillon pour la réalisation du soudage par friction malaxage est montré dans la figure 24 (b).

Matériau	Chaleur spécifique (C) J/kg°C	Conductivité thermique (K) W/m°C	Densité (ρ) Kg/m3	Emissivité (ε) (600°C)	Point de fusion (Tm) °C
Brass405 -20	380		119		8800

Tableau 5 : Propriétés thermiques du laiton.



Figure 2.8 : (a) Imageur thermique / (b) Dispositif de fixation de l'échantillon pour le FSW

Le laiton jaune 405-20 est un alliage composé de cuivre à 63%, de zinc à 34,7% et de faibles traces de plomb et d'étain. Les échantillons ont été fabriqués en deux moitiés conformément à la norme ASTM E8/E8M- 13a, comme le montre la figure 2.8 (a). L'acier à outils rapide au molybdène (M2 HSS) a été utilisé comme matériau d'outil comme le montrent la figure 2.8 (b).

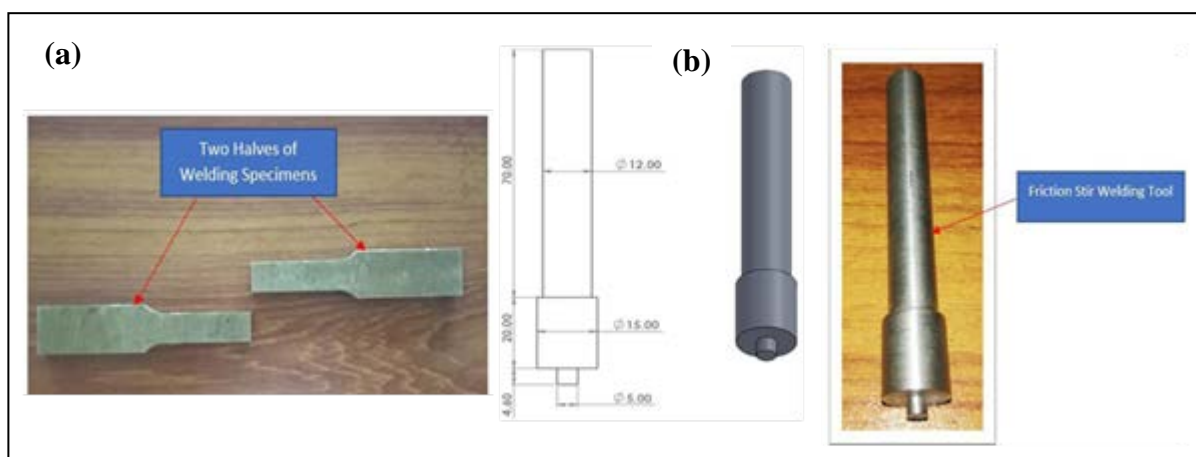


Figure 2.9 : Échantillons fabriqués selon la norme ASTM E8/E8M-13a.

Les éprouvettes de traction obtenus avec le soudage par friction malaxage a été teste sure une machine de traction uni-axial pour des caractérisations mécaniques. Les échantillons avant et après l'essai de traction sont montrés dans la figure 2.10.

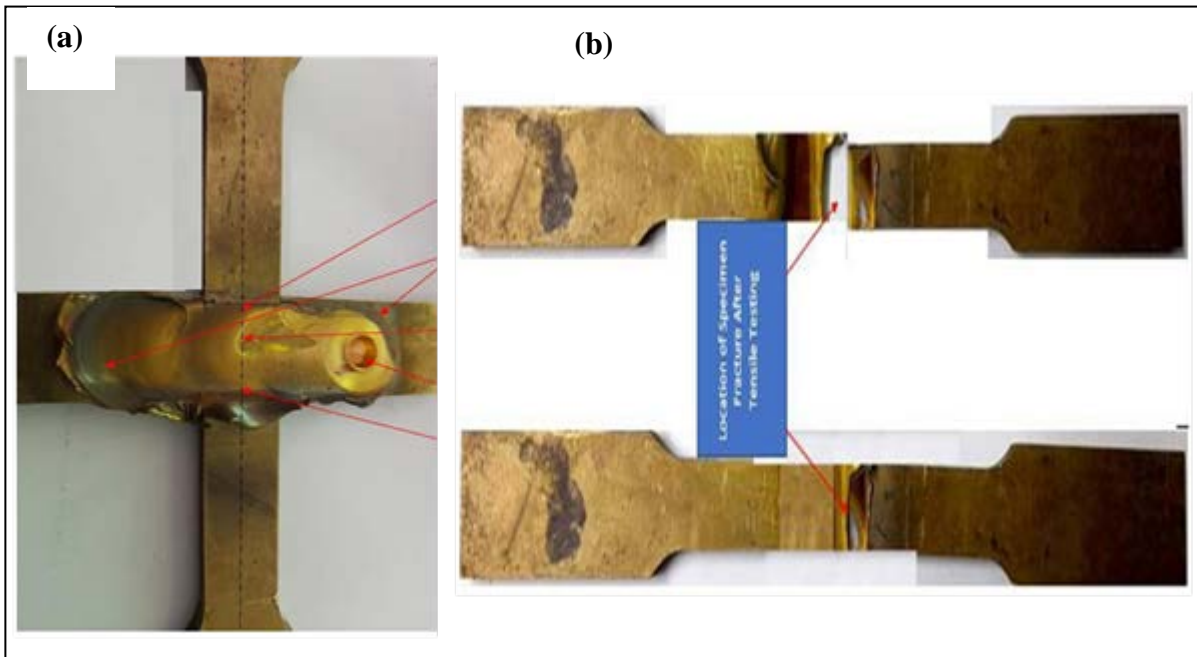


Figure 2.10 : (a) Éprouvette soudée par friction-malaxage, (b) Éprouvette après essais de traction.

Les résultats obtenus à partir des études numériques et empiriques montrent qu'il existe une bonne concordance globale entre les deux, comme le montrent les figures 2.11 , 2.12et 2.13 . À l'exception de quelques divergences dans les deux cas pour la résistance des joints et de quelques incohérences pour la dureté.

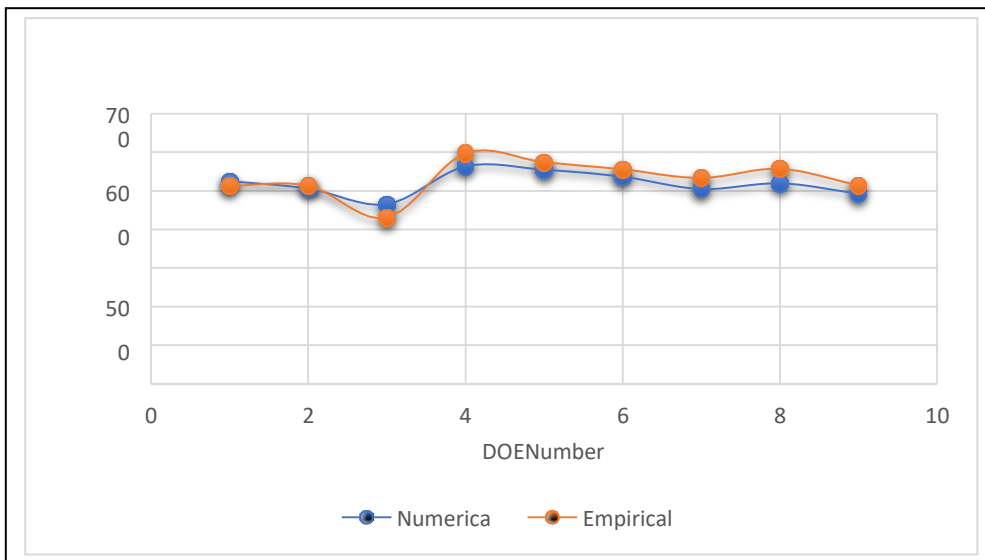


Figure 2.11 : Validation empirique des résultats numériques pour la température maximale.

En outre, la résistance à la compression a été mesurée numériquement et validée par les mesures de dureté Rockwell. La comparabilité de la dureté et de la résistance à la compression a été justifiée par la littérature, ce qui a permis d'obtenir une bonne

concordance, comme le montre la figure 5. La figure 4 montre la soudure expérimentale FSW juste après le soudage et juste avant l'essai de cisaillement en traction après avoir retiré les bandes de support à l'aide d'une scie à métaux électrique. Cependant, la dureté s'est avérée être la plus faible pour le DOE4, ce qui, à première vue, annule l'affirmation des niveaux de facteurs optimaux pour le DOE4. En fait, ce point doit être examiné en détail pour soutenir le DOE4 en tant qu'ensemble optimal de niveaux de facteurs de soudure. La valeur empirique de dureté la plus faible pour le DOE4 est de 73 HR.

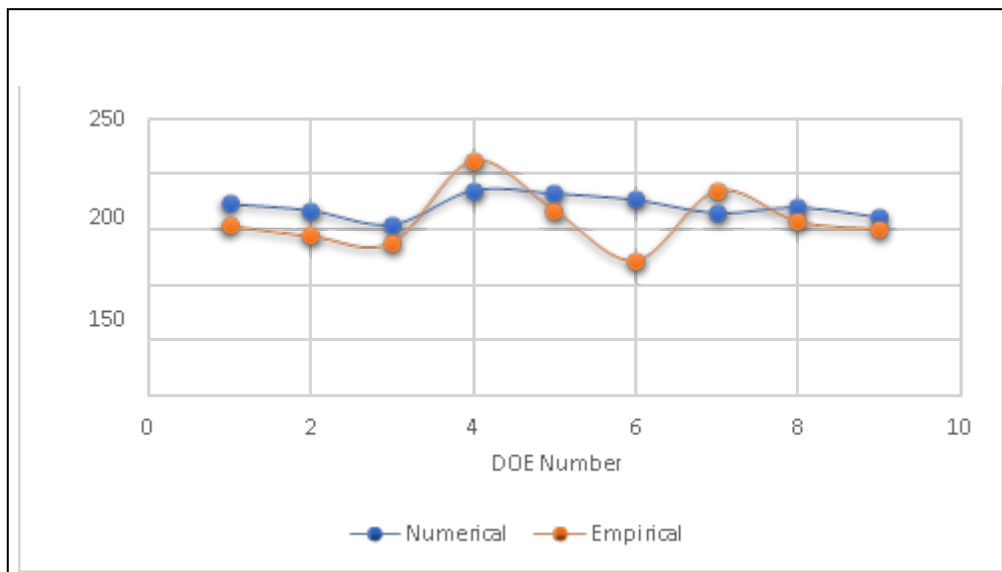


Figure 2.12 : Comparaison de la résistance des soudures empirique et numérique.

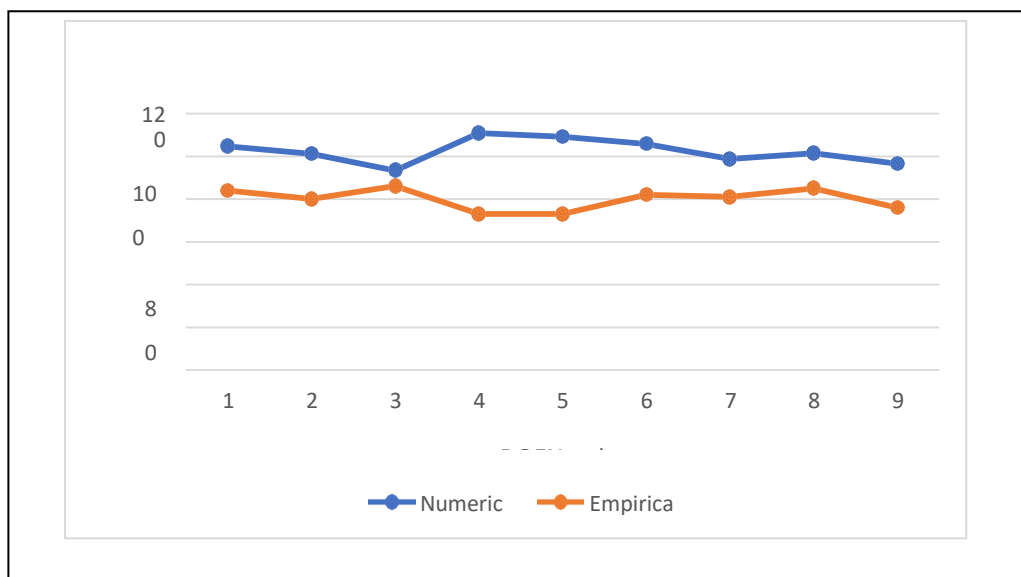


Figure 2.13 : Comparaison de la dureté obtenue à partir des expériences et des simulations.

La résistance maximale du joint a été empiriquement trouvée à 212 MPa pour DOE4, soit 77,1 % de la résistance à la traction (UTS). L'efficacité de soudage du joint en termes d'approche du métal de base (UTS) est satisfaisante, puisqu'elle est supérieure à 75 %.

2.4. Les principaux résultats obtenus dans le cadre des recherches numériques et empiriques actuelles sont les suivants

- Les études numériques réalisées sont en bon accord avec le travail empirique, à l'exception de quelques divergences concernant la dureté des joints.
- Les niveaux optimaux des facteurs FSW se sont avérés être 1450 rpm et 60 mm/min pour DOE4 dans des paramètres factoriels complets.

2.5. Analyse expérimentale et numérique couplée du soudage par friction-malaxage de l'AA6063 par friction-malaxage. Ahmed Y Shash et all 2022.

Les travaux de Monsieur **Ahmed Y Shash et all 2022** se sont concentrés sur le développement d'un modèle couplé eulérien-lagrangien pour prédire les forces et les défauts produits par le processus de soudage par friction-malaxage de l'AA6063 [29]. En outre, les résultats obtenus à partir du modèle développé ont été validés expérimentalement. En outre, le processus de soudage a été effectué suivant différentes vitesses de rotation.

Cette étude se concentre sur la modélisation des forces de réaction de l'outil et l'évolution des défauts. Le modèle développé prend en compte :

- a) Le frottement entre les surfaces de l'outil et de la pièce
- b) L'échange de chaleur entre les corps en contact
- c) La perte de chaleur dans l'environnement.

Le modèle a été validé par des données expérimentales obtenues lors du soudage par friction-malaxage de plaques AA6063 dans quatre conditions différentes. En outre, des tests réels ont été réalisés pour évaluer la qualité du processus de soudage.

Dans ses travaux, des échantillons en AA6063 ont été soudés par friction-malaxage à deux vitesses de rotation (1000 et 1250 tr/min) et deux vitesses de déplacement (25 et 50 mm/min). Toutes les combinaisons possibles ont été testées. La composition chimique et les propriétés mécaniques de l'aluminium sont indiquées dans le tableau 6.

Mg	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Al	σ_y ,MPa	σ_u ,MPa	El%
0.39	1.73	0.09	0.14	0.06	0.16	0.33	0.25	96.85	314	325	11

Tableau 6 : Caractéristiques de l'AA6063. Composition chimique Propriétés mécaniques.

Chaque échantillon de soudure était composé de deux plaques de 100 x 50 x 5 mm disposées en conurbation bout à bout. Toutes les soudures ont été réalisées avec un outil fileté cylindrique en acier à outils AISI H13. L'outil a été traité thermiquement pour augmenter sa dureté et sa résistance. Les dimensions de l'outil ont été calculées en fonction de l'épaisseur de l'échantillon. Le diamètre de l'épaulement de l'outil était de 18 mm, tandis que le diamètre de la broche était de 6 mm. Un jeu de 0,3 mm a été laissé à la racine de la soudure pour éviter que l'outil ne frotte contre la plaque d'appui.

Une fraiseuse universelle conventionnelle Arsenal FU-281 a été utilisée pour effectuer les travaux expérimentaux. Pendant le processus de soudage, l'éprouvette en aluminium est soumise à une pression de 0,5 bar. La qualité du processus de soudage a été évaluée sur la base de la microstructure développée et de la résistance à la traction. Les sections transversales des échantillons ont été meulées, polies et attaquées avec le réactif de Keller, puis observée au moyen d'un microscope optique (à une magnification de 100X). En ce qui concerne la résistance à la traction, trois échantillons de 100 x 20 x 5 mm ont été découpés dans chaque échantillon de soudure perpendiculairement à la direction de la soudure. Ils ont été chargés jusqu'à la rupture sur une machine d'essai universelle à une vitesse de 1 mm/min.

Un modèle thermomécanique local tridimensionnel a été développé à l'aide du schéma CEL pour prédire les forces de réaction de l'outil ainsi que les défauts internes et de surface. La figure 2.14 montre les pièces du modèle dans leur état initial. La pièce à usiner est représentée par un domaine eulérien cubique dont la longueur, la largeur et la hauteur sont respectivement de 30, 30 et 6 mm.

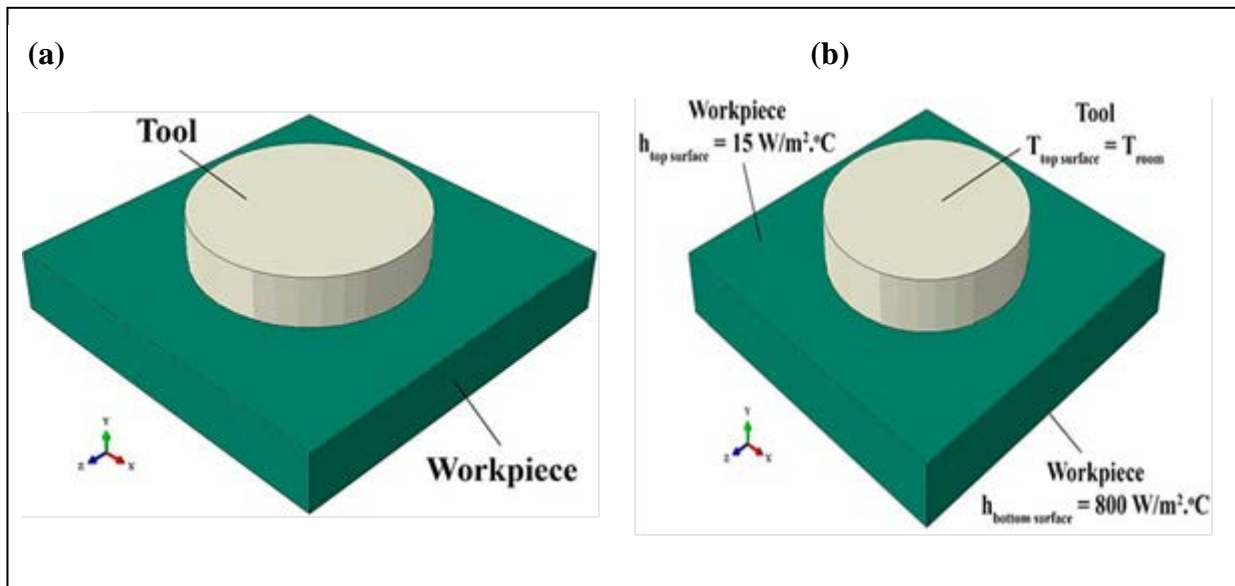


Figure 2.14 : (a) Modèle géométrique / (b) conditions aux limites.

	Matériaux	Propriétés	Valeurs		
Echantillons	AA6063	$\rho, Kg/m^3$	2700		
		E,GPa	70		
		ν	0.33		
		$\alpha, 10^{-5} \circ C$	2.35		
		K,W/(m $^\circ C$)	167		
		C,J/(Kg $^\circ C$)	945		
		A,MPa	314		
		B,MPa	20		
		n	0.04		
		D1	0.11		
		Energie Fracture, J/m 2	40		
		Outil	AISI H13	$\rho, Kg/m^3$	7850
				E, GPa	210
ν	0.3				
K, W/(m oC)	52				
C, J/(Kg oC)	489				

Tableau 7 : Propriétés thermomécaniques des matériaux de la pièce et de l'outil.

La figure 2.15 montre les parties du modèle et leurs maillages respectifs. La pièce en aluminium a été maillée avec 19 044 éléments eulériens hexaédriques couplés thermiquement (22 090 nœuds). Sa taille de maille était inférieure à celle de la pièce de l'outil, qui a été discrétisée avec 1887 éléments hexaédriques lagrangiens couplés température-déplacement (2230 nœuds).

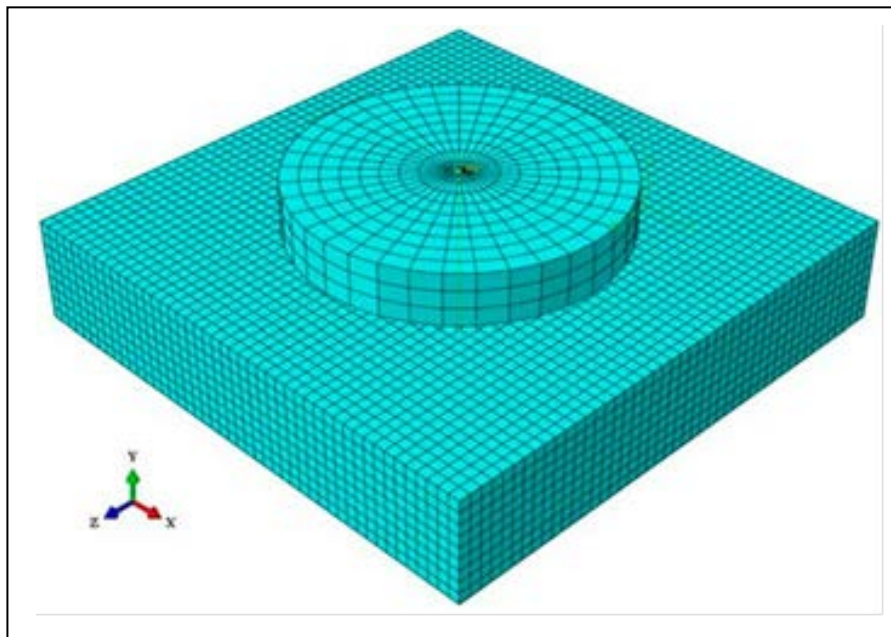


Figure 2.15 : Maillage de la géométrie de la pièce et de l'outil.

Le modèle a anticipé avec succès l'évolution des défauts du tunnel du côté de l'avancement. Comme le montre la figure 2.16, la taille des défauts simulés est bien mise en évidence. En effet, lorsque plusieurs tunnels se sont formés, comme dans les joints obtenus à 50 mm/min, ils sont apparus comme un seul grand tunnel. Les auteurs ont constaté que le modèle est valable pour prédire la taille du tunnel à des valeurs de vitesse de soudage inférieures avec une erreur approximative de 22 %.

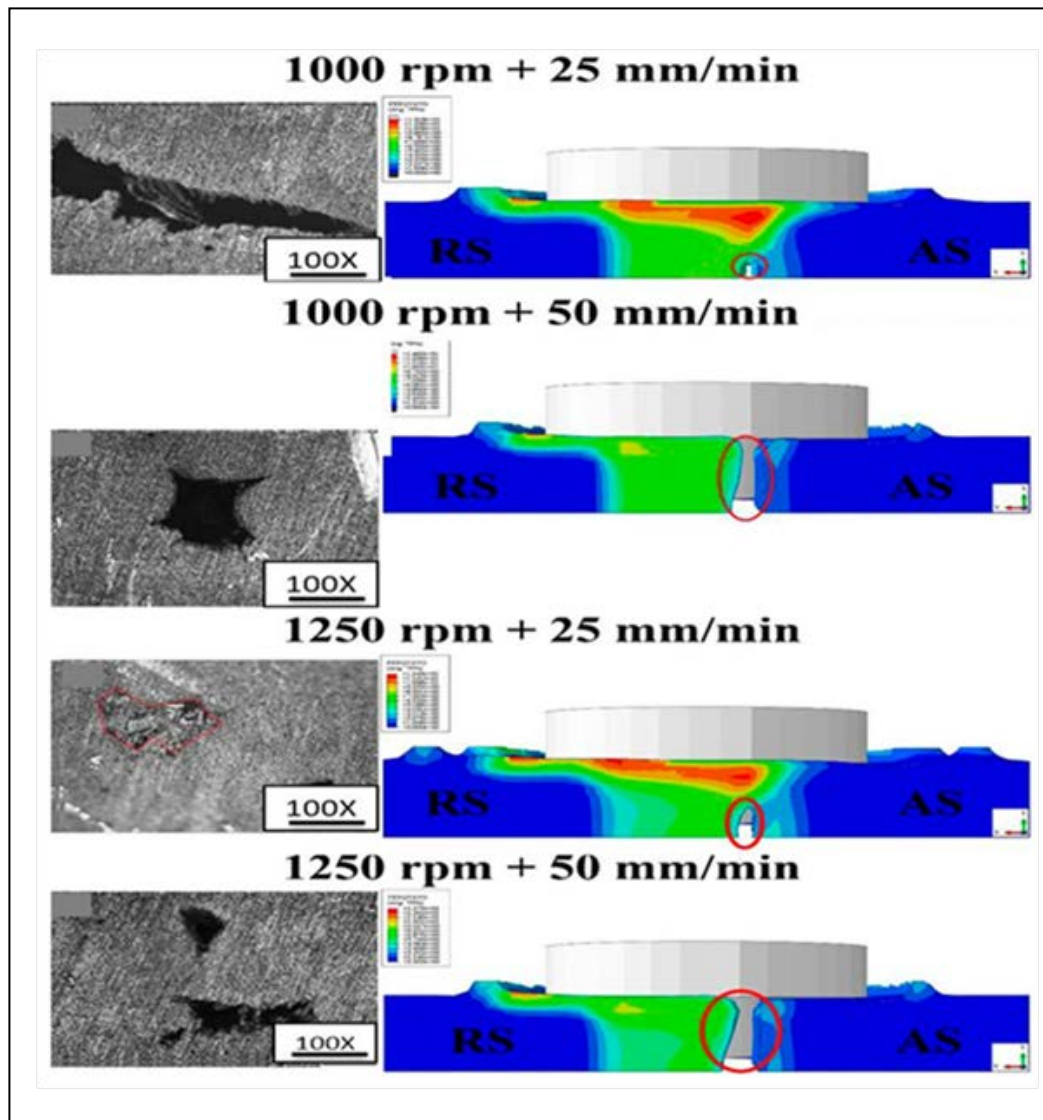


Figure 2.16 : Prédications du modèle FE pour les défauts internes.

D'autre part, les défauts de flash excessifs ont également été prédits avec succès par le modèle. Le flash de surface apparaît préférentiellement du côté du retrait de l'outil en raison de l'utilisation d'un outil flat-shouldered. Cette observation s'est manifestée dans la simulations, comme le montre la figure 2.17. En conclusion, le modèle a permis de prédire non seulement les défauts internes, mais aussi les défauts de surface dans une tolérance acceptable.

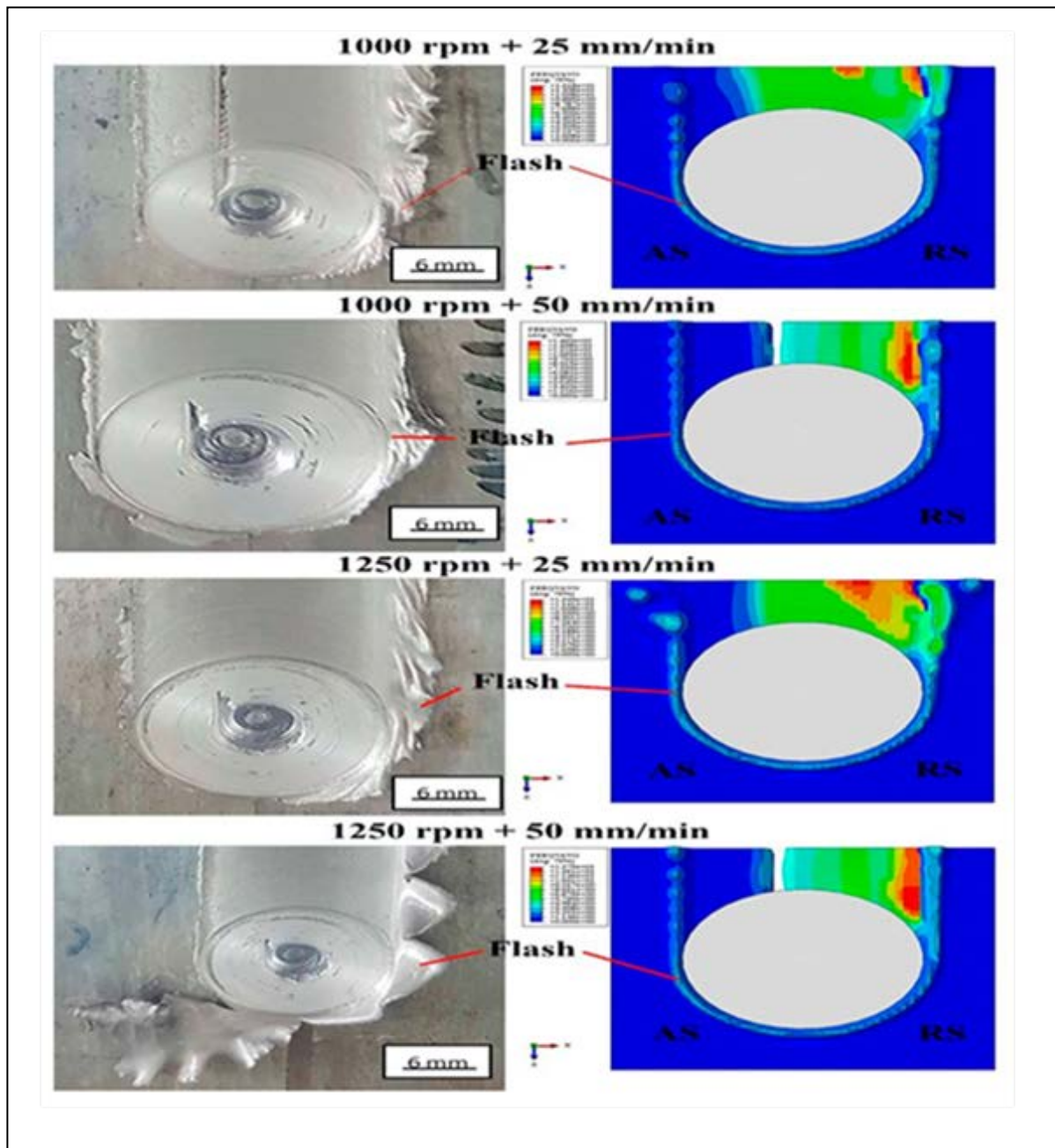


Figure 2.17 : Prédications du modèle FE pour les défauts de surface.

Toutes les éprouvettes de traction se sont rompues près du côté de l'avancement où se trouvaient les défauts du tunnel (voir figure 2.18). Normalement, les discontinuités de soudage diminuent la zone de charge à l'endroit où elles se forment. Sous une charge de traction donnée, les points défectueux subissent une valeur de contrainte plus élevée car la charge est répartie sur une surface plus petite. Par conséquent, la fracture s'amorce dans ces régions à forte contrainte et se propage vers la surface au fur et à mesure que la charge augmente.

D'après la figure 2.18, la résistance à la traction la plus élevée obtenue ici ne représentait que 37 % de celle du métal de base. Elle se situe en dehors de la fourchette habituelle (65 à 96 %) pour les alliages d'aluminium pouvant être traités thermiquement. Il a été constaté que la valeur la plus élevée a été obtenue aux vitesses de déplacement et de rotation les plus élevées.

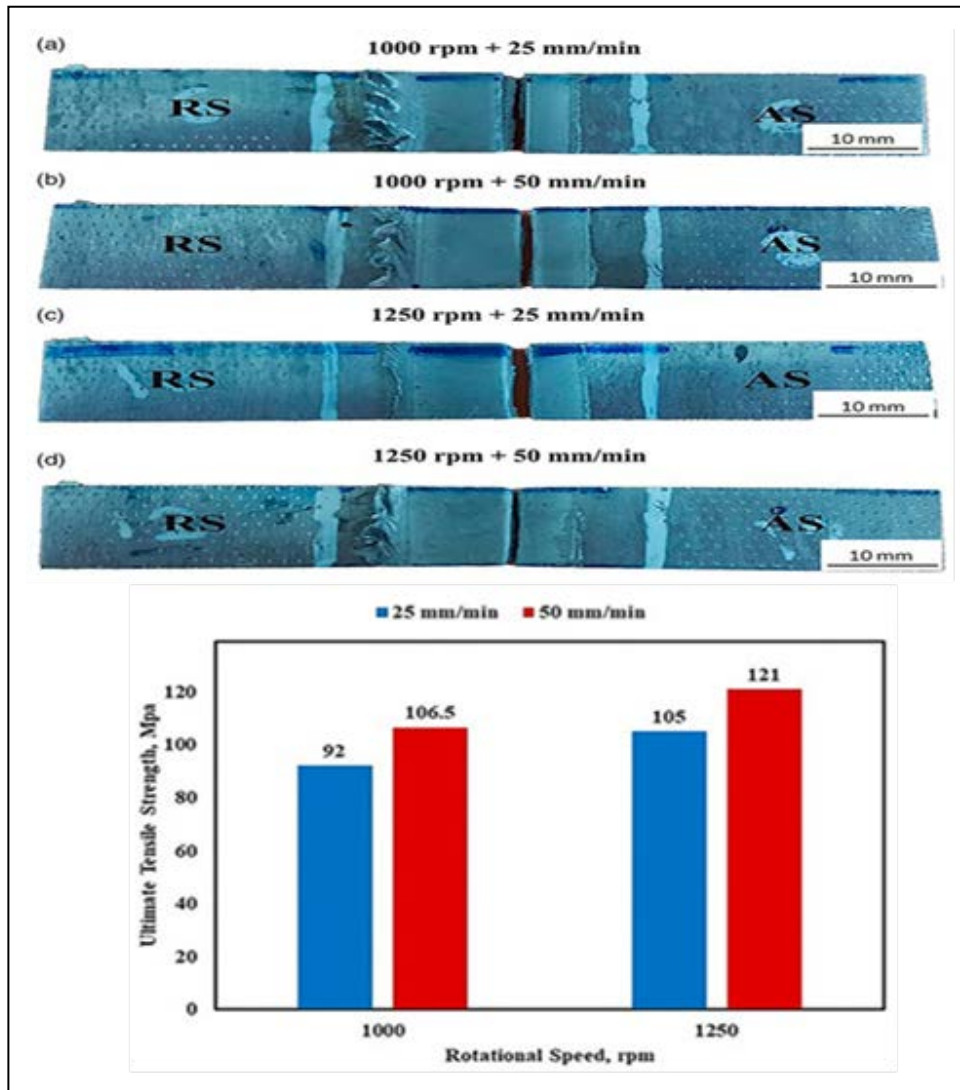


Figure 2.18 : Échantillons d'essai de traction après rupture.

2.6. Les principaux résultats de cette étude sont résumés comme suite

Les résultats ont révélé l'apparition d'un défaut de tunnel dans tous les joints soudés avec flash de surface. Le modèle actuel a permis de prédire avec succès l'évolution des deux défauts. En ce qui concerne la résistance à la traction, la valeur la plus élevée a été obtenue à 1250 tr/min et 50 mm/min, tandis que la valeur la plus faible a été obtenue à 1000 tr/min et 25 mm/min. Une combinaison optimale de la vitesse de rotation et de la vitesse de déplacement.

Chapitre 3 : Procédure expérimentale

Chapitre 3 : Procédure expérimentale

3. Introduction

Le soudage par friction-malaxage est une technologie de pointe dans les industries de la fabrication et de la construction mécanique pour assembler des matériaux métalliques sans ajouter de matériau. Cette méthode innovante offre de nombreux avantages par rapport aux méthodes de soudage traditionnelles telles qu'une réduction significative des défauts de soudure, une résistance mécanique accrue du joint et une déformation minimale des pièces soudées.

3.1. Matériaux et équipements utilisés

3.1.1. Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans cette étude expérimentale sont : l'acier mi-dur XC48 pour l'outil, un alliage d'Aluminium dont la composition chimique est obtenue par une analyse spectrométrique au sein du hall de technologie de l'Université de Béjaia.

3.1.2. Préparation des pièces à souder par friction malaxage

Avant d'entamer le processus de soudage par friction malaxage, les plaques du matériau utilisés (aluminium) sont découpées à des échantillons de dimensions 58mm x 68mm x 4mm (figure 3.1 b). Les extrémités des échantillons ont été polies et nettoyées afin de réduire l'effet des contaminants qui peuvent affecter la qualité des joints. Pour cela on a utilisé une polisseuse de type MATASERV 2000 (figure 3.1 a).



Figure 3.1 : (a) Polisseuse mécanique utilisée / (b) éprouvettes obtenus après polissage mécanique.

3.1.3. Les paramètres de procédé du soudage par FSW :

Les deux outils utilisés au cours de l'opération de soudage ont été usinés par tournage au sein du Hall de technologie (figure 3.2 a), ils ont une forme de pion qui est cylindrique, cylindrique fileté à la filière et une longueur de 3,8 mm (figure 3.2 b).

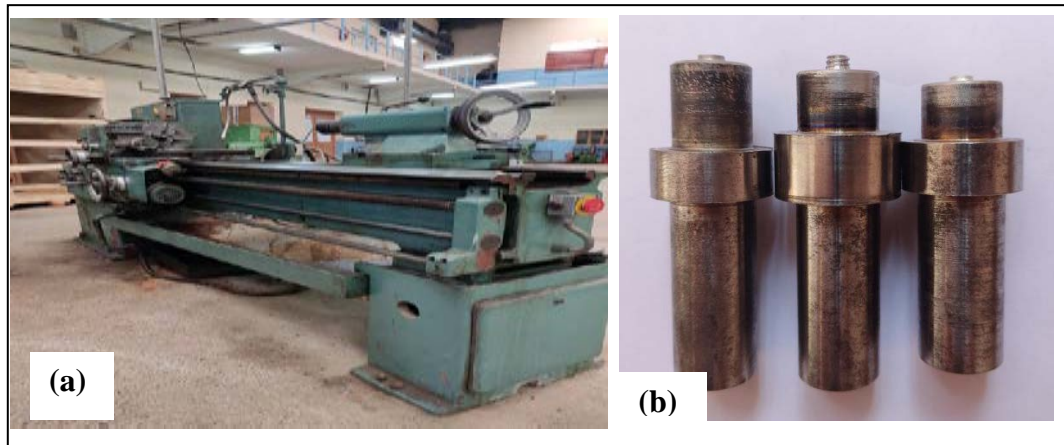


Figure 3.2 : (a) Tour conventionnelle type SN 40 C du hall de technologie/(b) Les outils de soudage de FSW utilisés.

3.1.4. Équipements de soudage par friction malaxage

Les essais ont été réalisés sur une fraiseuse universelle type "ALMO_FH " (figure 3.3 a). Les deux pièces sont fixées avec quatre brides de serrage afin d'éviter toute déformation lors de l'opération de soudage (figure 3.3 b).

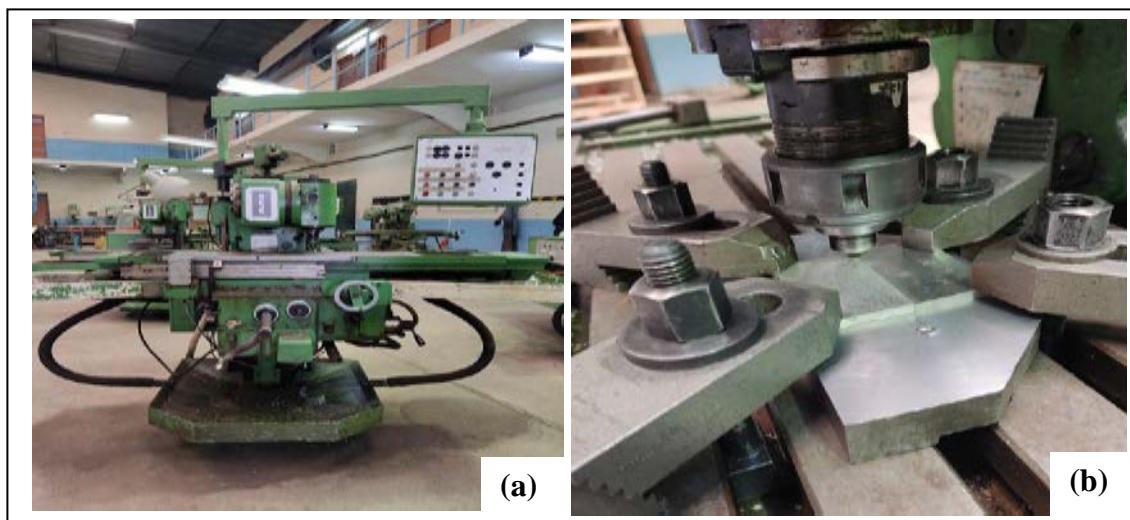


Figure 3. 3 : (a) Fraiseuse universelle modifiée de type FH 1.6 ALMO / (b) pièce à souder fixer avec des brides de serrage.

3.1.5. Les paramètres d'entrées

Les paramètres de soudage pris en considération sont :

- La fréquence de rotation de l'outil N [tr/min]
- La vitesse de soudage ou d'avance de l'outil V [mm/min]
- La forme du pion

3.1.6. Température

Durant le soudage malaxage, la source principale de chaleur est créée par le frottement entre l'épaulement de l'outil et le dessus de la plaque, Pour mesurer la température on a utilisé un thermomètre infrarouge comme le montre la (figure 3.4).



Figure 3.4 : Thermomètre infrarouge.

3.1.7. Préparation des éprouvettes d'essai de traction

Les éprouvettes sont prélevées perpendiculairement à la direction de soudage puis usinées, à l'aide d'une fraiseuse (figure 3.8). Les éprouvettes avaient une section d'environ 4 mm x 68 mm (figure 3.7).

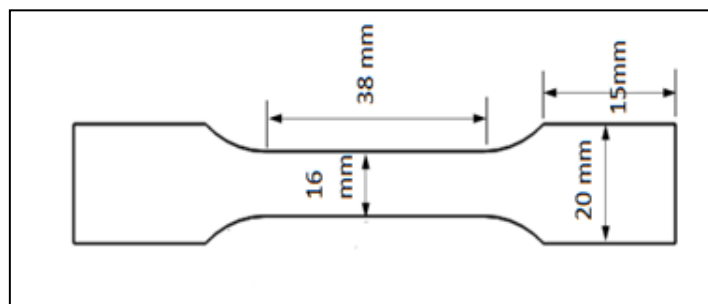


Figure 3.2 : Détails d'éprouvette d'essai de traction.



Figure 3.3 : Éprouvettes de traction usiné par une fraiseuse.

3.1.8. Essai de traction

Les essais ont été fait sur tous les échantillons soudés (figure 3.9), sous différents paramètres, étaient positionnés à la verticale sur la presse. Lors des essais, la force était mesurée 1mm/min (La vitesse d'étirement).



Figure 3.4 : Éprouvettes de traction.



Figure 3.5 : Machine de traction type Zwick/Roell Z050.

3.1.9. Microscopie optique

Pour l'observation optique de la microstructure du matériau soudé, la surface de l'éprouvette doit être brillante, propre pour cela nous avons suivi ces étapes :

- **Polissage mécanique**

Les éprouvettes ont été polis en utilisant une polisseuse mécanique (la même qu'on a utilisé pour la préparation des éprouvettes figure 3.1 (a)).

- **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 (figure 3.11 (a)). 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.

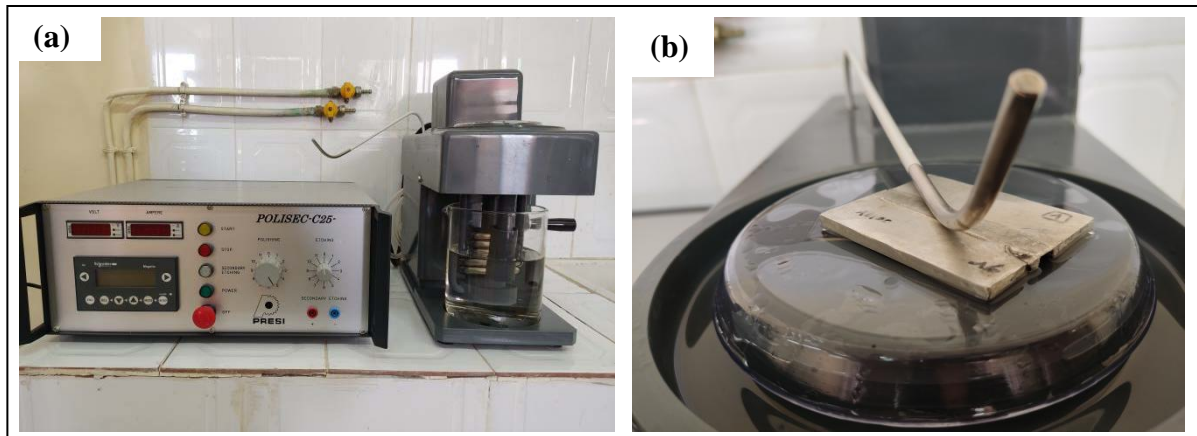


Figure 3.6 : (a) polisseuse électrolytique utilisée de type POLISEC C25 / (b) éprouvette mise en contact de la solution.

- **Analyse de la microstructure du matériau soudé**

L'analyse a été effectuée avec un microscope optique qui permet l'obtention de photos des microstructures avec différents grossissements.



Figure 3.7 : Microscope optique utilisé de type ZWICK/ZHV10.

3.2. Simulation numérique

3.2.1. Présentation du logiciel

Abaqus est une suite logicielle d'analyse par éléments finis largement utilisé dans divers domaines d'ingénierie tels que l'analyse structurelle, l'analyse du transfert de chaleur et la mécanique des fluides.

On a créé des plaques en aluminium en 3d avec des dimensions 60mm×30mm× et un outil en acier de diamètre 18mm qui contient un pion de diamètre 6 mm avec un congé de 1 mm comme le montre la figure 3.8

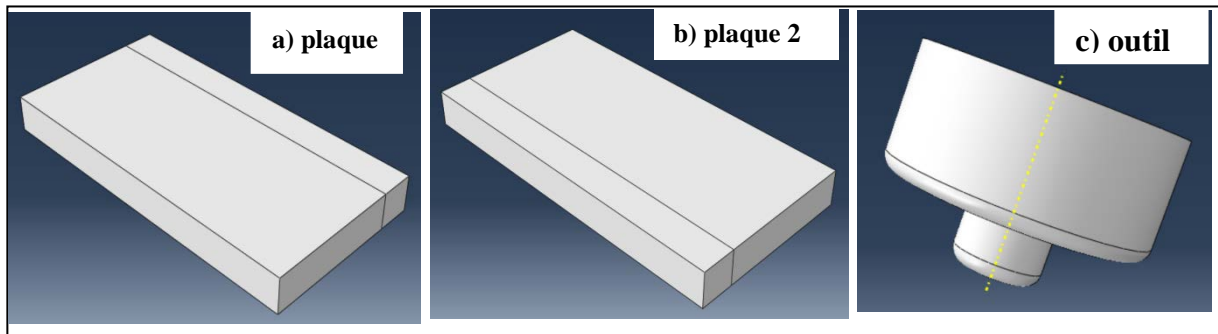


Figure 3.8 : (a) , (b) les plaques d'aluminium crée par abaqus / (c) l'outil en acier crée par abaqus.

Ensuite on a assemblé les deux plaques ainsi que l'outil comme le montre la figure 3.9

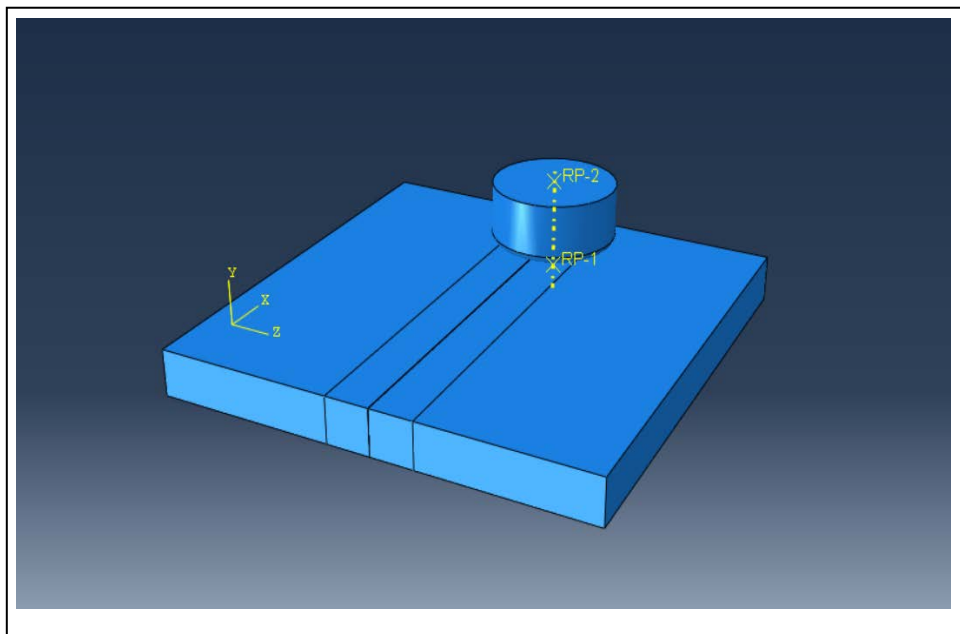


Figure 3.9 : l'assemblage des plaques et l'outil.

Après l'assemblage on a effectué un maillage grossier et fin dans la zone destine à la soudure comme le montre la figure 3.16, et aussi un maillage pour l'outil

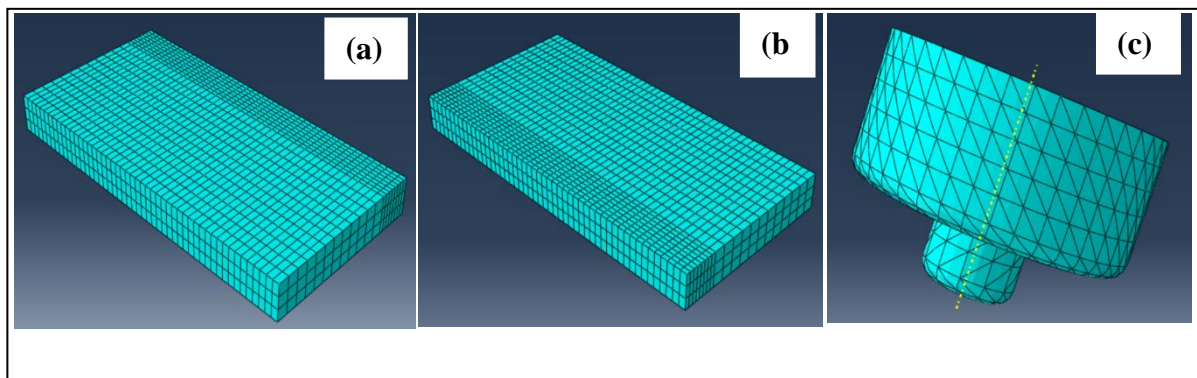


Figure 3.10 : Maillage des plaques et de l'outil.

La figure 3.15 montre l'assemblage des deux plaques ainsi que l'outil maillé

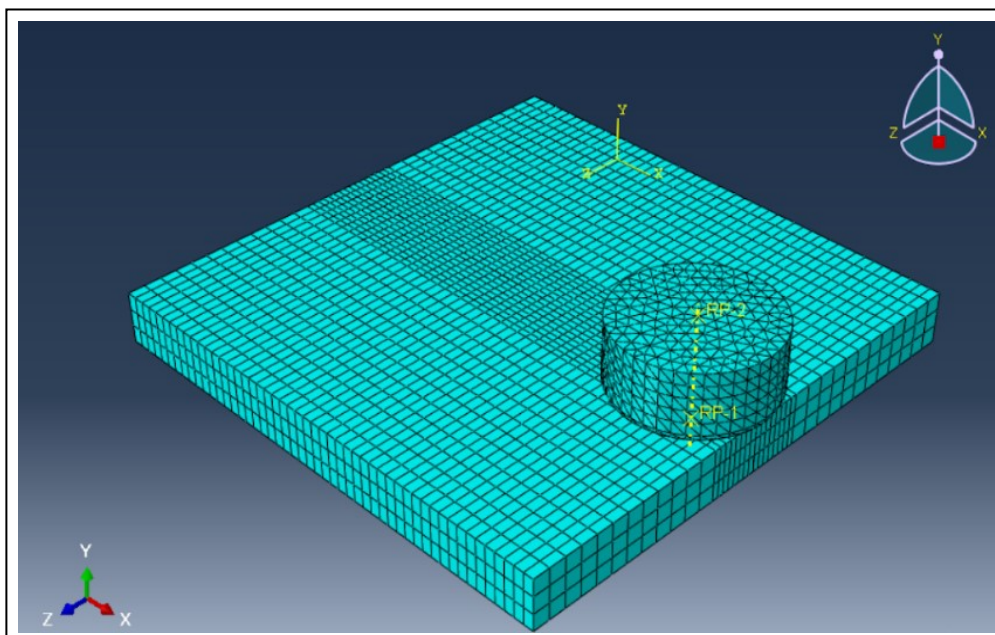


Figure 3.11 : l'assemblage des plaques et l'outil maillé.

3.3. Modélisation de la distribution de la température (Equation du logiciel Abaqus)

3.3.1. Modèle thermique

En général, la production de chaleur provient de deux sources :

Le chauffage par friction à l'interface entre l'outil et la plaque de soudure et la dissipation de l'énergie plastique due à la déformation cisaillement dans la zone fondue. L'équation

générale pour le processus de transfert de chaleur pendant la phase de plongée de du procédé FSW peut s'écrire comme suit :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial T}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial T}{\partial z} \left[k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \dot{p}_q (1)$$

D'où

ρ : est la densité,

c : est la chaleur spécifique

k : est la conductivité thermique,

T : est la température,

t : est le temps

\dot{p}_q : est la production de chaleur provenant de la dissipation de l'énergie plastique due à la déformation par cisaillement, et x , y et z sont des coordonnées spatiales. Le taux de génération de chaleur due à la dissipation de l'énergie plastique, \dot{p}_q est calculée à partir de:

$$\dot{p}_q = \eta \sigma \dot{\epsilon}^{PL} (2)$$

D'où

η : est le facteur de conversion de l'énergie mécanique en mécanique en énergie thermique

σ : est la contrainte de cisaillement

$\dot{\epsilon}^{PL}$: est le taux de déformation plastique

La production de chaleur causée par le frottement entre l'outil et les pièces à usiner peut s'écrire comme suit :

$$\dot{p}_f = \frac{4}{3} \pi^2 m P N R (3)$$

D'où

\dot{p}_f : est la production de chaleur par frottement

μ : est le coefficient de frottement

P : est la traction

N : vitesse de rotation

R : est le rayon de la surface.

3.3.2. Modèle élastique-plastique de Johnson-Cook

Dans la zone thermomécanique affectée (TMAZ), une déformation très importante se produit au cours du processus. L'interaction de la contrainte d'écoulement avec la température, la déformation plastique et la vitesse de déformation est essentielle pour modéliser le processus FSW. C'est pourquoi le modèle élastique-plastique de Johnson-Cook a été choisi. La formulation de ce modèle est basée sur des données empiriques. La loi de Johnson-Cook sur les matériaux élasto-plastiques est donnée comme ceci :

$$\sigma_y = [A + B(\varepsilon_p)^n] \times \left[1 + C \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right] \times \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{mech} - T_{room}}\right)^m\right] \quad (4)$$

Dou

T_{melt} = 582 °C est le point de fusion ou la température du solidus

T_{room} = 25 °C est la température ambiante, T/°C est la température effective

A = 324 MPa est la limite d'élasticité

B = 114 MPa est le facteur de déformation

n = 0,42 est l'exposant de déformation

m = 1,5 est l'exposant de température,

C = 0,12 le facteur de vitesse de déformation.

$\dot{\varepsilon}_p$ = est le taux de déformation plastique équivalent

$\dot{\varepsilon}_0$ = est le normalisant de la vitesse de déformation

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.

Chapitre 4 : Résultats et discussion

Chapitre 4 : Résultats et discussion

4. Introduction

Ce chapitre présente dans un premier temps l'observation micrographique des matériaux utilisés dans l'étude ainsi que celles des joints de soudure obtenus par friction malaxage d'alliage d'aluminium, puis nous présentons les différents types de défauts observés dans les joints réalisés à différentes conditions de soudage (vitesse de rotation, vitesse d'avance et pénétration de pion).

Dans un deuxième temps, nous présentons une étude paramétrique dont le but de lier les caractéristiques mécaniques des cordons de soudure aux paramètres opératoires du procédé. Les résultats de caractérisation telle que la dureté et l'essai de cisaillement par traction du cordon seront discutés.

Une troisième partie de l'étude sera consacrée à la modélisation numérique du procédé de soudage par friction malaxage au respect des mêmes paramètres ritualisées dans la partie expérimentale.

4.1. Soudage et recherche des paramètres optimaux

Pour déterminer les paramètres optimaux de ce procédé (vitesse d'avance, vitesse de rotation, effort de plongée, etc.), il est nécessaire de réaliser une multitude de soudures et d'essais mécaniques coûteux. C'est ce qui justifie l'utilisation massive des plaques d'aluminium (Dans notre démarche, nous avons fait varier la vitesse d'avance et la fréquence de rotation).




		
N=1400 tr/min V= 16 mm/min Épaisseur = 1.2 mm	N=1400 tr/min V= 20 mm/min Épaisseur = 1.2 mm	N=1400 tr/min V= 25 mm/min Épaisseur = 1.2 mm

Tableau 8 : Différents essais avec différent paramètres.




		
N=1400 tr/min V= 16 mm/min Épaisseur = 3 mm	N=1400 tr/min V= 20 mm/min Épaisseur = 3 mm	N=1400 tr/min V= 25 mm/min Épaisseur = 3 mm

Tableau 9 : Essais avec une épaisseur supérieure.

4.2. Inspection visuelle des soudures par friction malaxage

La figure 4.1 montre un exemple type d'un joint de soudure obtenu après soudage par friction malaxage de l'alliage d'aluminium avec un outil en acier à faible teneur du carbone.

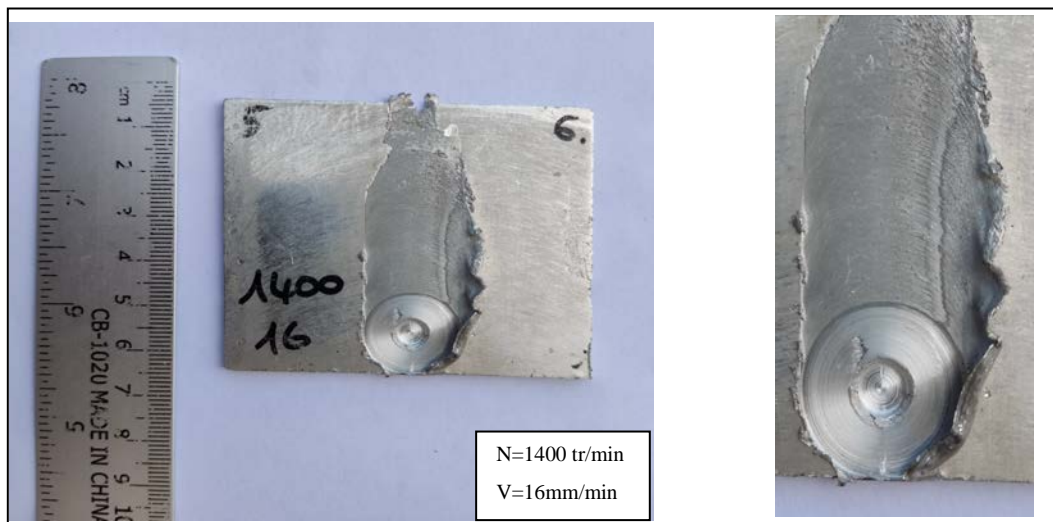


Figure 4.1 : éprouvette soude par soudage friction malaxage.

On remarque que le passage de l'épaulement sur la surface des pièces laisse des stries au niveau du joint de soudure et sur la frontière des deux plaques soudées. De façon générale, une légère bavure peut se former de chaque côté du cordon. La figure 4.2 montre aussi le cordon de soudure, avec un agrandissement de l'empreinte finale de l'outil. Dans cette image, la soudure est effectuée avec une vitesse de rotation $N = 1400$ tr/min et une vitesse d'avance $V = 16$ mm / min. Pour cette condition de soudage, on a obtenu qualité de joint acceptable. Il est clair qu'aucun défaut majeur n'apparaît dans le cordon (rainures d'arrachement, fissures, cannelure).

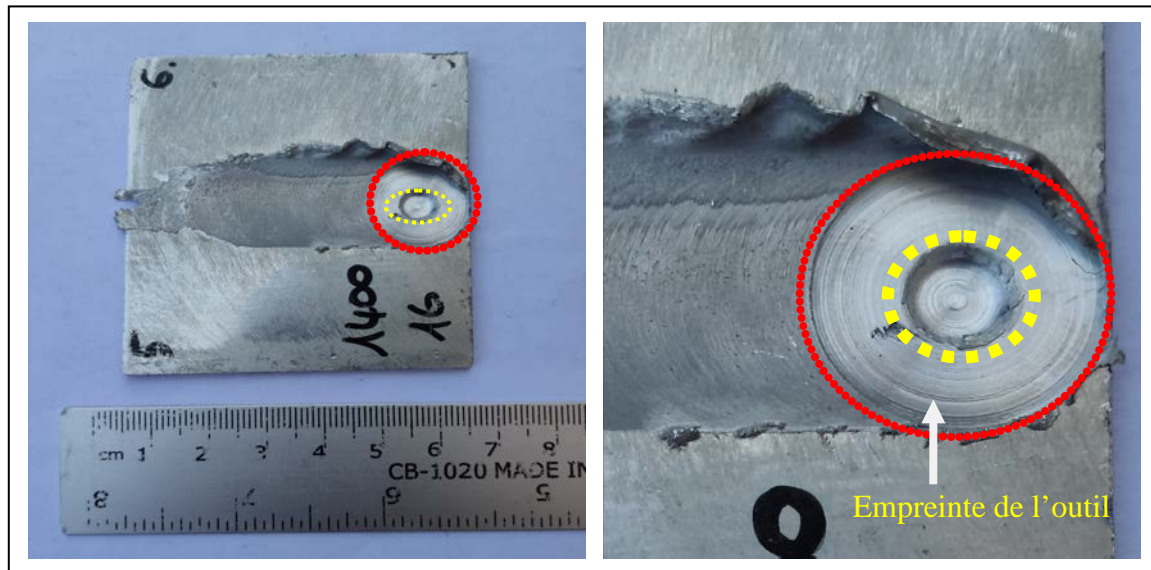


Figure 4.2 : (a) épreuve soudée / (b) empreinte de l'outil.

4.2.1 Défauts des soudures dans le joint FSW

On rappelle que dans un procédé de soudage par friction, la qualité du joint dépend de la combinaison des paramètres de soudage et qui sont spécifiques au matériau à souder. En effet les paramètres de soudage par friction malaxage sont d'une importance capitale dans la détermination de la qualité du joint de soudure.

4.2.2 Défauts identifiés via un contrôle visuel

- **Aspect visuel du cordon**

La surface des joints soudés ne présente généralement pas de défauts (figure 4.2) et les stries laissées par l'outil y sont visibles. Cependant, lorsque la vitesse de rotation de l'outil est de 1400 tr / min et que sa vitesse d'avance est de 25 et 16 et 50 mm / min, d'importants défauts volumiques apparaissent dans le joint et sont visibles à sa surface (figure 4.3).

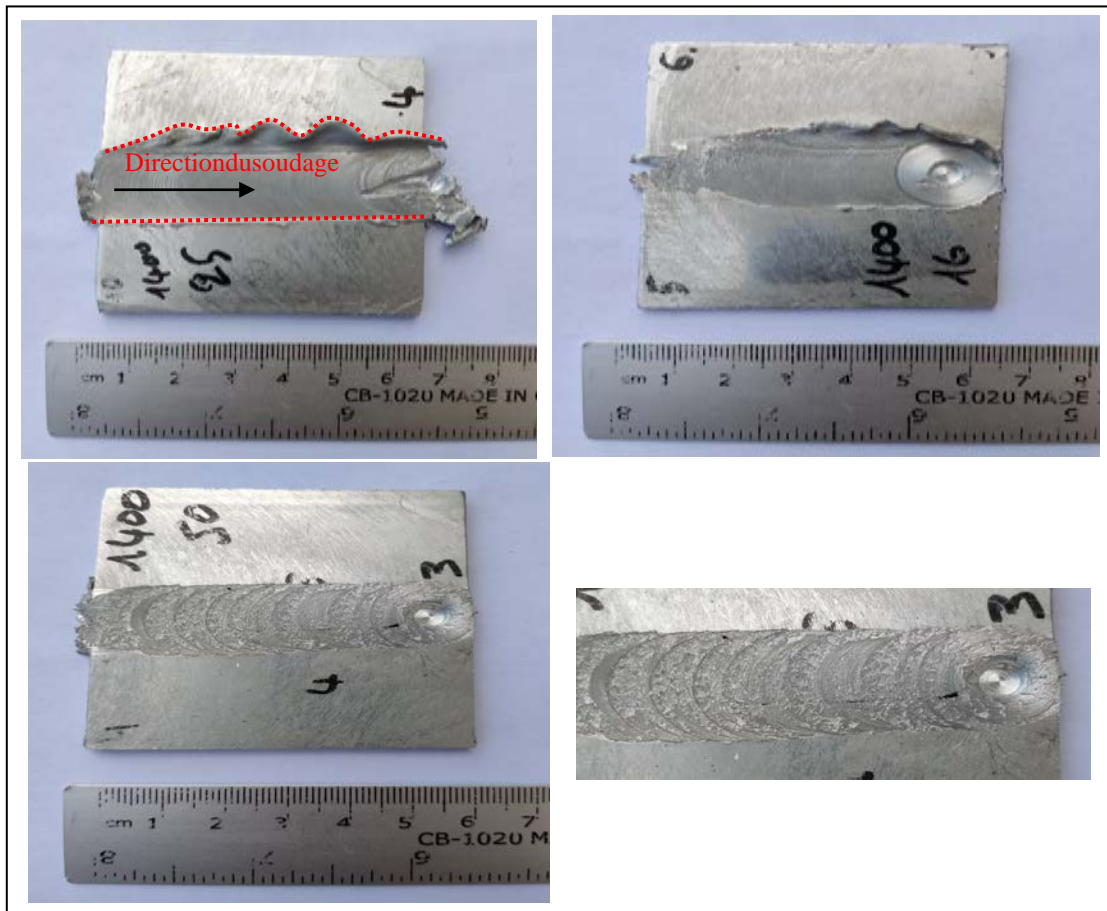


Figure 4.3 : Défauts laissés par des différents paramètres.

- **Défaut de bavures excessives**

Le choix des conditions opératoires thermiquement inadaptées, c.à.d. « trop chaudes » ou « trop froides » et « mauvais malaxage » provoquent la formation de défauts, ces défauts liés au flux de matière. Au cours du soudage, l'outil s'enfonce au sein de la matière entraînant une pénétration excessive de l'outil. Cela conduit à la formation de bavures excessives comme il est présenté dans la figure 4.4



Figure 4.4 : Défaut de bavures excessives.

Au niveau du bord de la soudure, ce défaut est un excès de métal le long du cordon de soudure. Il provient d'un flux de matière trop important sous l'épaule et de la partie latérale du pion marquer sur les deux plaques soudées.

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

Le passage de l'épaule d'une vitesse d'avance 20mm / min laisse un défaut de type défauts de surfaces, de type éraillures ou « écailles » au centre du joint dans le côté d'avance (figure 4.5).



Figure 4.5 : Défaut de surface de type éraillures.

- **Défaut à la racine du cordon**

La Figure 4.6 présente un agrandissement de défaut à la racine du cordon. Ce défaut est dû à un flux excessif de métal sous la pointe du pion. En outre, il est dû à la longueur excessive du pion ou lorsque le pion pénètre excessivement entre les plaques à souder.



Figure 4.6 : Défaut flux de métal a racine du cordon de soudure.

- **Défaut tunnel interne**

La figure 4.7 montre un défaut tunnel interne. Ce type de défaut est dû au manque de consolidation de la matière malaxée à l'arrière du joint. Ce phénomène est causé par un flux de matière insuffisant.



Figure 4.7 : Défaut tunnel interne.

4.3. Caractérisation de la microstructure des joints soudés

Il est à noter qu'une liaison métallique est créée entre les deux plaques. La caractérisation métallographique est effectuée au moyen d'observation par microscope optique des différentes zones du joint de soudure (MB, ZAT, ZATM et NG). L'analyse micrographique nous permet de mettre en évidence la morphologie des différentes zones des joints soudés.

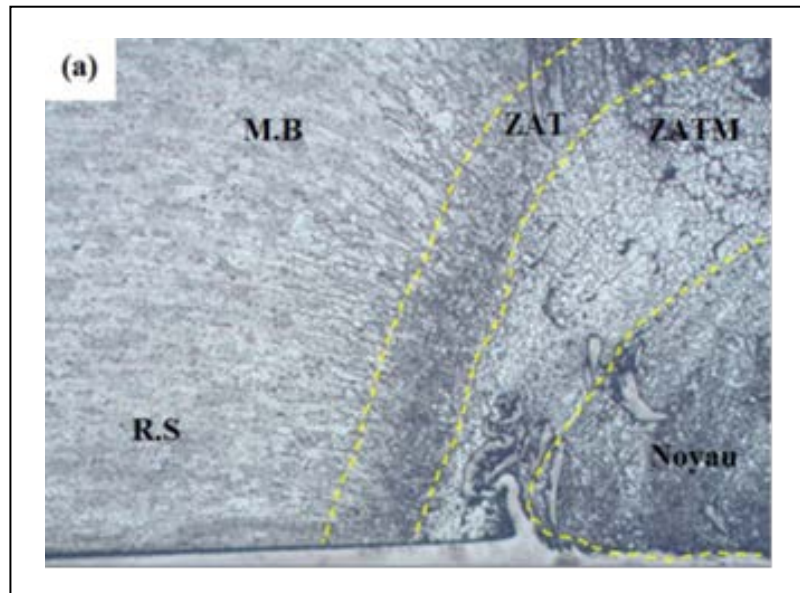


Figure 4.8 : les différentes zones du joint de soudure.

- **MB** : représente le métal de base, donc aucune modification de la microstructure et des propriétés mécaniques.
- **ZAT** : représente la zone affectée thermiquement (ZAT). Cette zone subit un échauffement [6] mais pas de déformations plastiques.
- **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.
- **Noyau** : Dans cette zone la température est maximale et la déformation et aussi importante on y trouve une structure granulaire fine résultant d'un phénomène de recristallisation dynamique.

La figure 4.9 Présente une microstructure montrant l'effet du soudage par friction malaxage au début de la phase de pénétration, où on y constate que les grains sont orientés dans le sens de rotation de l'épaulement.

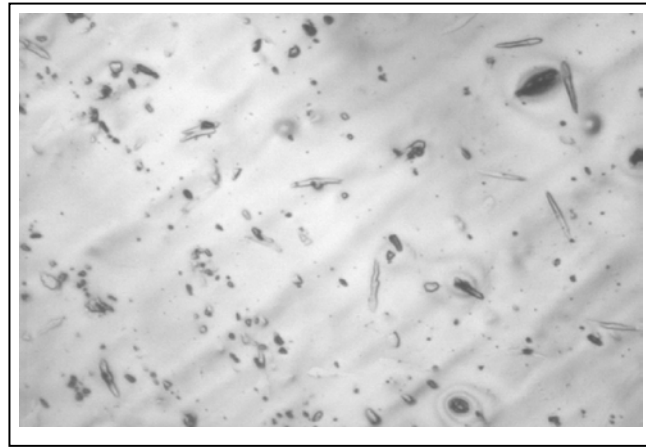


Figure 4.9 : Microstructure montrant l'effet du soudage par friction malaxage au début de la phase de pénétration.

Néanmoins, il faut noter que le fait de ne pas dépasser le point de fusion du métal nous permet d'obtenir des modifications moins importantes qu'avec des procédés de soudage par fusion. La figure 4.10 montre une vue globale du joint soudé. On remarque bien la présence des morceaux de petite particules sur la matrice de l'aluminium. Ce phénomène est dû au procédé de malaxage. On note que le mélange aluminium et l'acier n'est pas complètement malaxé, car on remarque quelques fragments d'acier comme il est montré par des flèches rouges sur la figure 4.10 (a) (b) et (c).

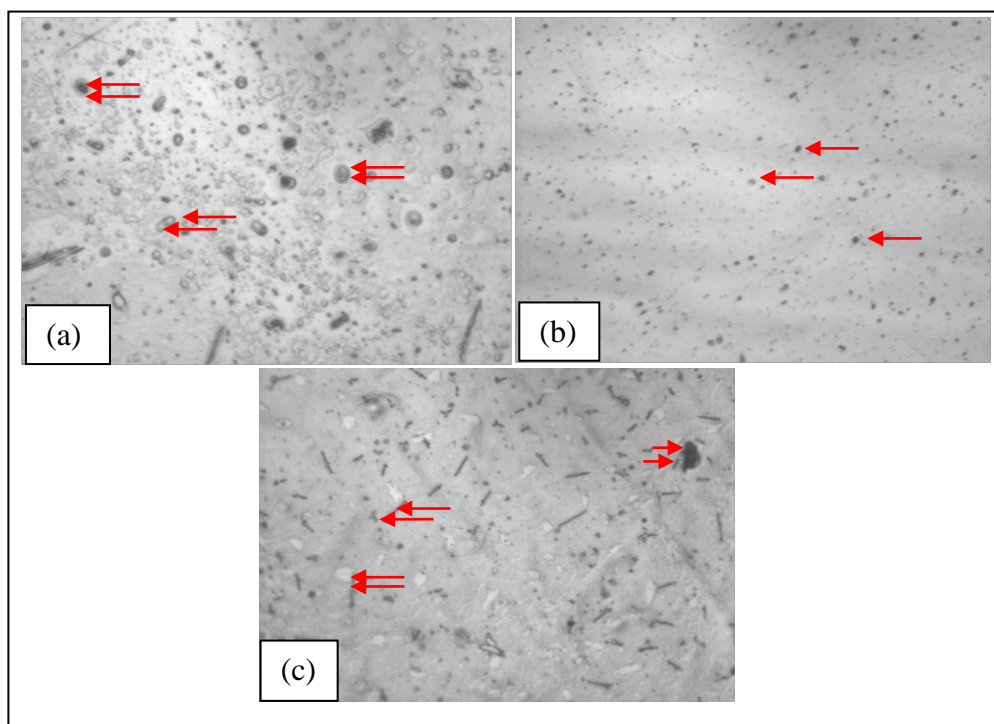


Figure 4.10 : Morphologie du cordon de soudure. a) Paramètre 1400-16 b) 1400 25, c) 1400 63.

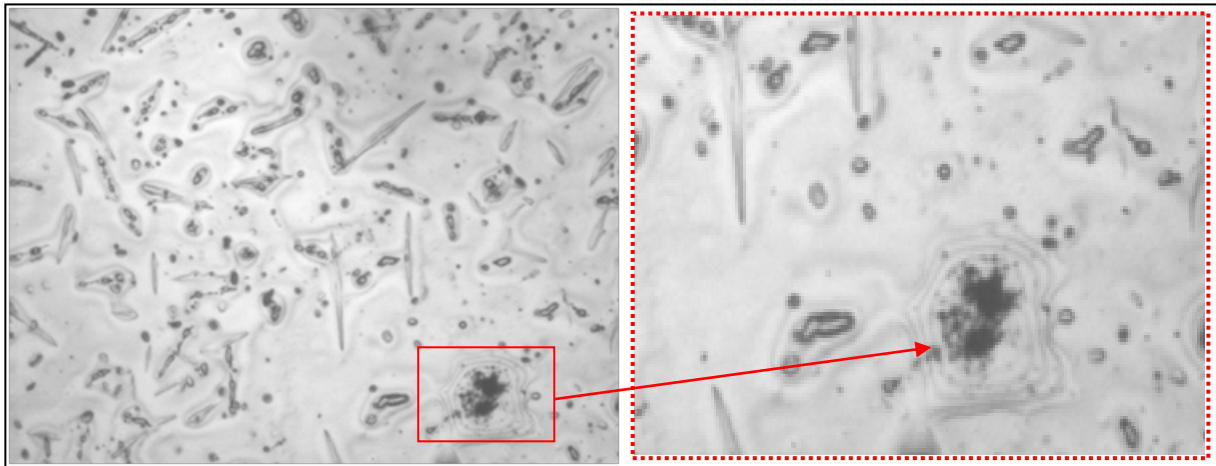


Figure 4.11 : Morphologie de l'alliage d'aluminium avant le soudage.

4.4. 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 4.12).

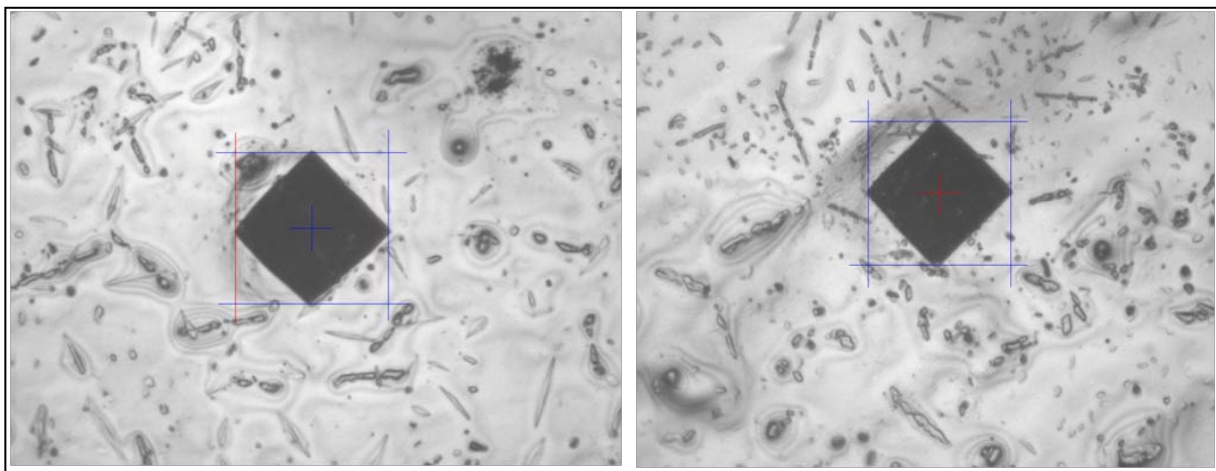


Figure 4.12 : Empreintes de l'indenteur Vickers avant le soudage.

L'analyse des résultats de micro dureté sur les éprouvettes soudées avec des différents paramètres révèle des variations significatives de dureté. La valeur 68H qui est la plus élevée indique une meilleure résistance à la déformation plastique, tandis que les valeurs basses peuvent signaler des défauts de soudure ou une fragilisation (figure 4.13).

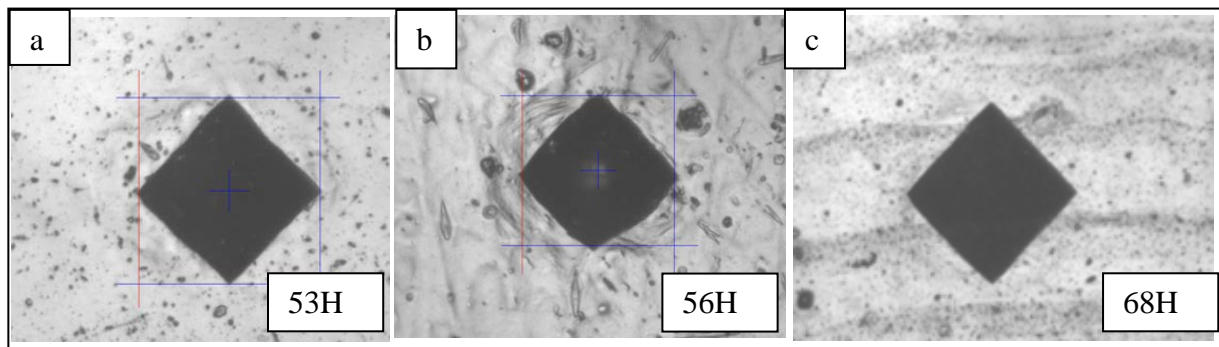


Figure 4.13 : Empreintes de Micro dureté. a) Paramètre 1400-16 b) 1400 25, c) 1400 63.

4.5. Comportement mécanique en traction uniaxial des éprouvettes soudés

- **Résultats expérimentaux de l'essai de traction**

La résistance à la rupture est une mesure de la force nécessaire pour rompre ou briser un matériau. Elle est généralement exprimée en termes de contrainte de rupture La contrainte de rupture est la force maximale qu'un matériau peut supporter par unité de surface avant de se rompre. Elle est calculée en divisant la force de rupture par la section transversale du matériau.

$$R_r = \frac{F}{S}$$

Tel que :

R_r : résistance à la rupture ; F : force maximale ; S : la section du matériau

Paramètre	Fmax (N)	S(mm ²)	R _r (MPa)
1400_16	6413,60	47,84	134,06
1400_20 (1)	6779,21	67,62	100,25
1400_20 (2)	9956,33	67,62	147,23
1400_50 (1)	7655,62	69,92	109,49
1400_50 (2)	7409,56	69,92	105,97
1400_20 epi (1)	8132,12	47,84	169,98
1400_20 epi (2)	9959,29	47,84	208,17

- **Evolution de la température de contact en fonction du temps de soudage.**

Après avoir effectué les essais de traction, on remarque que la température augmente au fur et à mesure que l'outil avance. Et cette chaleur est provoqué par le frottement de l'outil

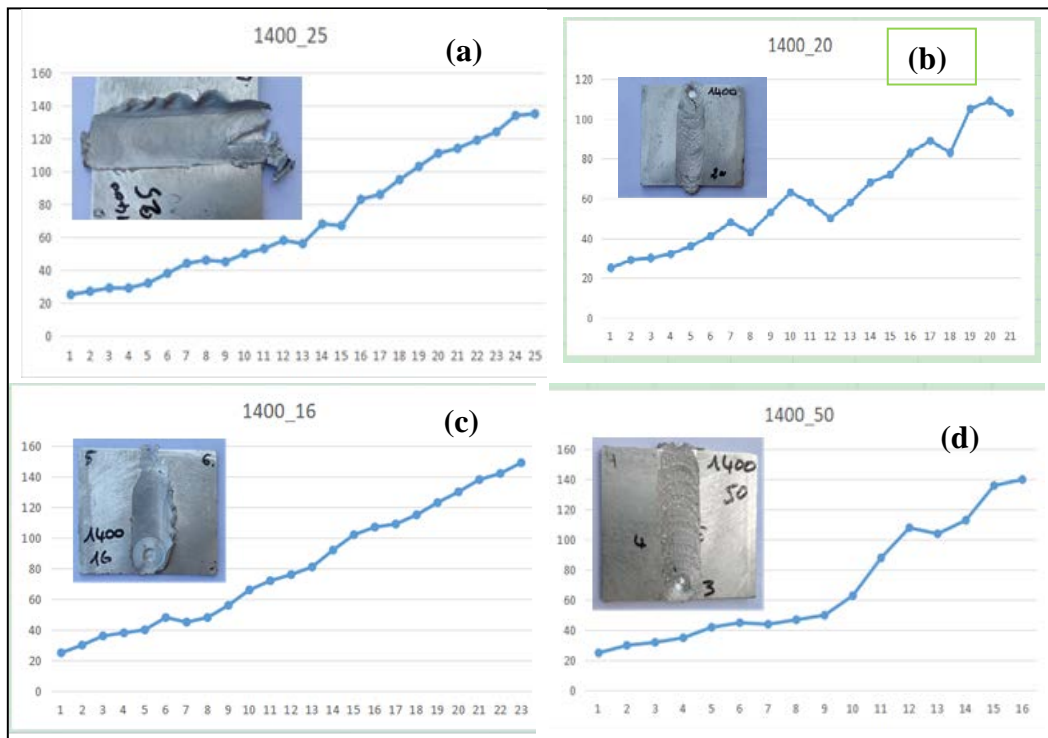
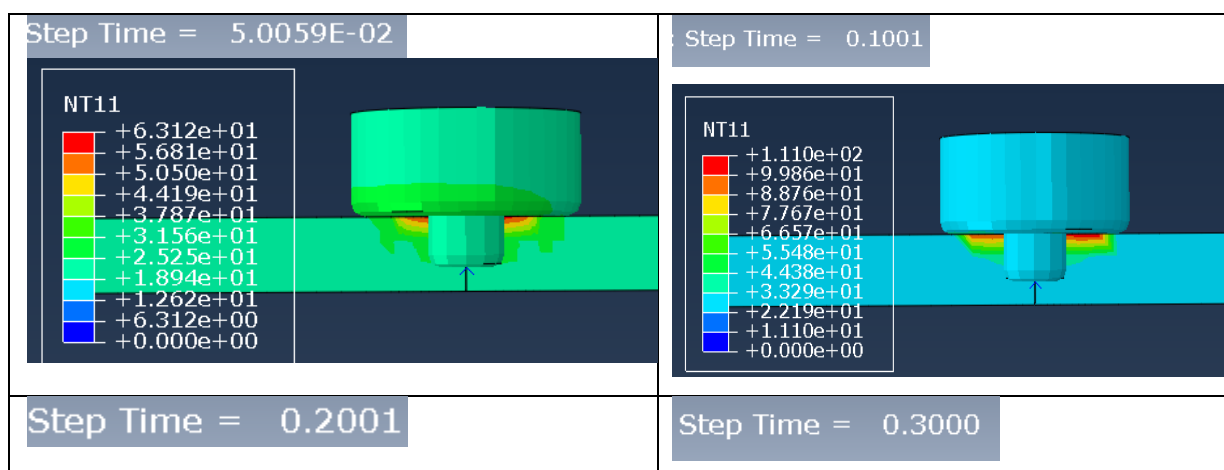


Figure 4.14 : Courbes dévolution de la températures pour les différents paramètres $N=1400\text{tr/min}$, $V=20-25-16-50\text{ mm/min}$.

4.5. Résultats de la simulation



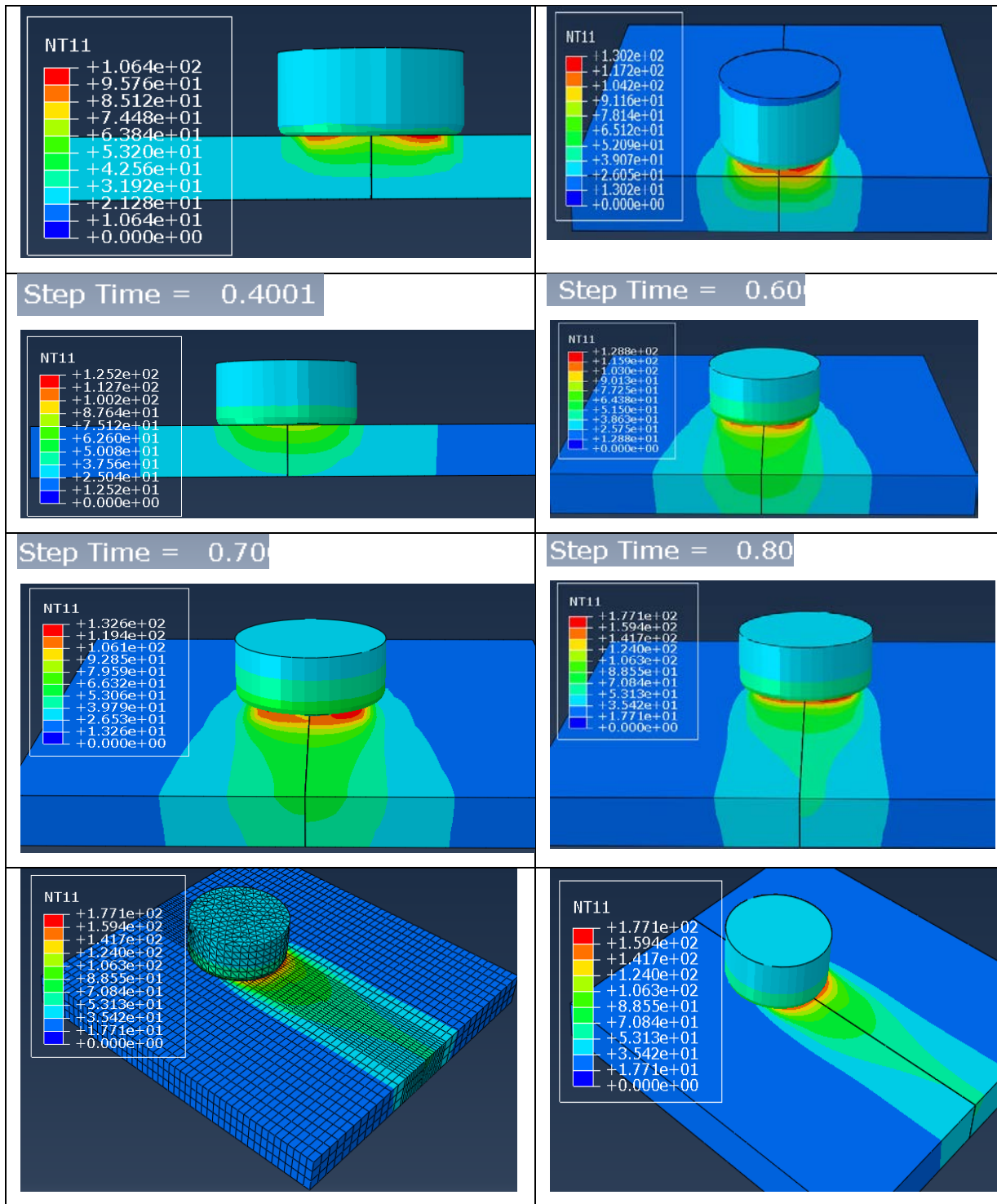


Figure 4.15 : Résultat de la simulation numérique de la chaleur.

Nous avons examiné la distribution et l'évolution temporelle de la température dans les pièces à souder.

Au début du processus de soudage, la température augmente rapidement à fur et à mesure que les plaques d'aluminium entrent en contact avec l'outil rotatif, formant une zone affectée

thermiquement (ZAT), les zones les plus chaudes étaient localisées sous l'outil de soudage (zone rouge), où la température dépassait largement la température ambiante (zone verte).

Nous avons observé une diminution progressive de la température à mesure que l'on s'éloigne de la zone de contact, indiquant une dissipation thermique efficace dans les plaques d'aluminium.

Après la fin du processus de soudage, la température diminue progressivement à mesure que la chaleur est dissipée dans les plaques d'aluminium refroidies représentées par des zones bleues situées en périphérie de la ZAT.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le soudage par friction malaxage (FSW) devient la méthode d'assemblage préférée pour les alliages d'aluminium, fournissant des soudures de haute précision dans un processus à l'état solide.

L'étude s'est concentrée sur l'application du FSW dans le soudage des alliages d'aluminium et a mis en évidence le potentiel du FSW dans l'industrie moderne.

Cette étude a été menée en deux étapes différentes. La première étape a été consacrée à la mise en œuvre d'une méthode expérimentale de soudage par friction malaxage des alliages d'aluminium. Le but de cette partie de l'étude était d'obtenir des données empiriques sur les paramètres optimaux du processus, les propriétés des joints soudés et les performances mécaniques qui en résultent. La deuxième phase de l'étude s'est concentrée sur les simulations numériques à l'aide du logiciel ABAQUS/CAE. Cette approche de modélisation numérique a permis d'analyser et de prédire le comportement des matériaux au cours du processus FSW, fournissant ainsi des informations précieuses pour l'optimisation des paramètres de soudage et la prédiction des propriétés finales des joints soudés. Cette étude a permis une compréhension approfondie du procédé de soudage par friction malaxage des alliages d'aluminium en combinant résultats expérimentaux et simulations numériques. Ces connaissances sont essentielles pour améliorer la qualité, la fiabilité et l'efficacité de cette méthode d'assemblage dans diverses applications industrielles, tout en ouvrant la voie à de nouvelles innovations dans le domaine de la fabrication des matériaux.

- [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] Timesli, Abdelaziz. Simulation du soudage par friction et malaxage à l'aide de méthodes sans maillage. 2013. Thèse de doctorat. Université de Lorraine.
- [7] 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.
- [8] Khaled, Boulahem et Salem, Sahbi ben. Modélisation expérimentale et optimisation des conditions de soudage par friction et malaxage cas d'alliage d'aluminium 2017A.
- [9] Faes, Koen. Le soudage par friction, un procédé e soudage multiple et innovateur.
- [10] Meddah, Hadj Miloud, EL Bahri, O. U. D., Lounis, Abdellah, *et al.* Caractérisation d'un cordon de soudure Par FSW: Cas des matériaux polymères. *Revue Nature et Technologie*, 2018, vol. 10, no 01, p. 83-86.
- [11] Goyal, Amit, Rohilla, Punit Kumar, et Kaushik, Atul Kumar. Effect of process parameters on mechanical properties of friction stir welded dissimilar AA6061 T6 and AA5086 H32 aluminium alloy joints. *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, vol. 12, no 1, p. 21-32.
- [12] Faes, Koen. Le soudage par friction, un procédé e soudage multiple et innovateur.

- [13] Mathers, Gene. The welding of aluminium and its alloys. Elsevier, 2002.
- [14] Farouk, Rezgui. Réalisation d'une machine de soudage par friction malaxage.
- [15] Geyer, Morgane. Impact des paramètres du procédé FSW sur les évolutions métallurgiques multi-échelles et le comportement mécanique de soudures hétérogènes Al2024/Ti-6Al-4V en transparence. 2021. Thèse de doctorat. Ecole des Mines d'Albi-Carmaux.
- [16] Fethi, M. Sebaa et Mohamed, M. Rahou. Procédés et matériels de soudage. Université AboubakrBelkaïd– Tlemcen –. 2019/2020.
- [17] Sayah Brahim, Dellal Asma. Simulation numérique d'un soudage par friction malaxage d'un alliage d'aluminium et un acier réaliser sous ABASQUS Université SAAD Dahleb, Blida1. 2019-2020.
- [18] Thibeault, Frédéric. Étude numérique et expérimentale du soudage par friction malaxage. Université du Québec à Chicoutimi, 2012.
- [19] Padmanaban, G. et Balasubramanian, V. Influences of pulsed current parameters on mechanical and metallurgical properties of gas tungsten arc welded AZ31B magnesium alloy. *Metals and Materials International*, 2011, vol. 17, p. 679-687.
- [20] 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. Université Mohamed Khider Biskra.
- [21] Remaki, Malika. *Méthodes numériques pour les équations de Maxwell stationnaires en milieu hétérogène*. 1999. Thèse de doctorat. Ecole des Ponts ParisTech.
- [22] N. Jemal, Contribution à la caractérisation thermique et mécanique de la zone soudée en
- [23] S. Zimmer, contribution à L'industrialisation du soudage par friction malaxage ,Thèse de doctorat, pp,24-25,2009.

- [24] D. Macel, 'Exemples De Travaux En Brasage : Essais Mécaniques Et Métallographies', (Institut De Soudure) 1601_0232_P_041_047- 41.
- [25] Ra; Murr, LE; Shindo, DJ; Soto, HF. Tool wear in the friction stir welding of aluminium alloy 6061+20% Al₂O₃ : A preliminary study. *Scripta Materialia* 45: 75–80. Doi: 10.1016/S1359- 6462(01)00994-0.
- [26] Kallee S W, 'Friction Stir Welders Provide Prefabricated Components and Panels'. Aluminium International. 2004.
- [27] Geyer, Morgane. Impact des paramètres du procédé FSW sur les évolutions métallurgiques multi-échelles et le comportement mécanique de soudures hétérogènes Al₂₀₂₄/Ti-6Al-4V en transparence. 2021. Thèse de doctorat. Ecole des Mines d'Albi-Carmaux.
- [28] Raza, Syed Farhan, Amjad, Muhammad, Habib, Muhammad Salman, *et al.* Investigating the Welding Parameters in Friction Stir Welding of Yellow Brass 405-20. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no 4, p. 2433.
- [29] Shash, Ahmed Y., El-Moayed, Mohamed H., Abd Rabou, Mahmoud, *et al.* A coupled experimental and numerical analysis of AA6063 friction stir welding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, vol. 236, no 15, p. 8392-8400.

Résumé

L'objectif de ce travail est de réaliser et de simuler numériquement le procédé de soudage par friction-malaxage (FSW) des alliages d'aluminium à l'aide du logiciel Abaqus, en tenant compte de l'influence de certains paramètres de soudage, tels que la vitesse de rotation de l'outil, la vitesse d'avance (outil /ou pièce), le coefficient de frottement appliqué de l'épaule/du matériau à assembler et le flux de chaleur résultant sur le champ de force et de température vers l'outil.

Abstract

The aim of this work is to implement and numerically simulate the friction stir welding (FSW) process for aluminum alloys using Abaqus software, taking into account the influence of certain welding parameters, such as tool rotation speed, feed speed (tool /or workpiece), the applied coefficient of friction of the shoulder/material to be joined and the resulting heat flux on the force and temperature field towards the tool.

