

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : génie mécanique.

Spécialité : assemblage soudée et matériaux.

Par : ABDELOUAHAB Ahmed.

Sujet

Analyse de la génération des contraintes thermique par le procédé de soudage Friction Malaxage (FSW)

Soutenu publiquement, le 19 / Juin / 2025 , devant le jury composé de :

M. BENACHOUR Mustapha

MMEDJADI Nassima

M. BENSALD Ismail

Pr

MAA

MCA

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Président

Examineur

Encadreur

Co-Encadreur

Année universitaire : 2024 /2025

Remerciements

En premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant pour m'avoir accordé la force et la persévérance nécessaires à l'aboutissement de ce travail de recherche.

Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères à mes chers parents ainsi qu'à ma famille élargie pour leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours académique. Leur encouragement constant a été un moteur essentiel dans la réalisation de ce mémoire.

Une reconnaissance particulière va à mon éminent encadreur, Monsieur **BENSAID Ismail**, pour ses précieux conseils, son expertise et sa disponibilité tout au long de ce travail. Ses orientations avisées ont grandement contribué à la qualité de cette recherche.

Je n'oublie pas de remercier l'ensemble du corps professoral du département, avec une mention spéciale pour Monsieur **HADJOUI Fethi**, dont l'appui institutionnel a été déterminant.

Enfin, j'exprime ma gratitude envers mes collègues et amis qui, par leurs échanges constructifs et leur soutien moral, ont participé indirectement à l'élaboration de ce projet.

Dédicace

Avec une profonde gratitude et appréciation, j'exprime ma sincère gratitude à :

Tout d'abord et enfin, à mes chers parents, qui n'ont ménagé aucun effort pour m'offrir une éducation de qualité et des soins généreux. Ils ont été d'un grand soutien et d'une grande aide tout au long de mon parcours académique et de vie. Sans leur soutien inconditionnel et leurs énormes sacrifices, je ne serais pas là où je suis aujourd'hui.

J'adresse également mes sincères remerciements à mon regretté grand-père (que Dieu lui fasse miséricorde), qui a été un phare qui a illuminé mon chemin par ses précieux conseils et ses encouragements constants. Il m'a inculqué les valeurs de persévérance et de détermination qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

Je ne peux manquer d'exprimer ma profonde gratitude à mes estimés membres de ma famille,

Layan ; Hichem ; Yacine et à mes chers amis, qui ont été une source de soutien et d'encouragement tout au long des différentes étapes de ce parcours académique. Mes sincères remerciements, ma reconnaissance et mon respect à vous tous, **ELHADOURI Soumia ; ZIANI Maamoun ; FATMI FRID Housseem Eddine ; LAKEHAL Mohammed Abdelilah** pour votre soutien moral et matériel.

Enfin, je voudrais exprimer mes sincères remerciements et ma reconnaissance à mon superviseur, **M. BENSAID Ismail**, pour ses précieux conseils, sa patience et sa disponibilité constante, qui ont servi de pierre angulaire à l'achèvement complet de ce travail.

ملخص

تركز هذه الأطروحة على الدراسة المتعمقة لعملية اللحام بالتحريك الاحتكاكي (FSW)، وهي تقنية لحام الحالة الصلبة المبتكرة، والتي تجتذب اهتمامًا متزايدًا في القطاعات الصناعية التي تتطلب وصلات عالية الجودة. النهج المتبع يجمع بين التحليل النظري الدقيق والنمذجة العددية المتقدمة.

في الجزء النظري، تستكشف الأطروحة المبادئ الأساسية لـ FSW، ولا سيما آلية توليد حرارة الاحتكاك وخط المواد، والمناطق المختلفة المتأثرة حرارياً (الكتلة الصلبة، المنطقة المتأثرة ميكانيكياً حرارياً، وما إلى ذلك)، فضلاً عن تأثير هندسة الأداة (الكتف، الدبوس، الخيط) على جودة المفصل. ويتم أيضاً تحليل العيوب النموذجية للعملية، مثل الفراغات والأنفاق والشقوق، فيما يتعلق بظروف التشغيل.

يعتمد الجزء العددي على نمذجة العناصر المحدودة باستخدام برنامج Abaqus، مما يسمح بمحاكاة السلوك الحراري الميكانيكي للمادة أثناء اللحام. تأخذ هذه المحاكاة في الاعتبار المعلمات الرئيسية مثل معدل التغذية وسرعة دوران الأداة وقوة الدعم، من أجل دراسة تأثيرها على درجة الحرارة وتشوه البلاستيك والإجهاد المتبقي في المنطقة الملحومة.

تسلط النتائج التي تم الحصول عليها الضوء على العلاقات الواضحة بين معلمات اللحام والأداء الميكانيكي للمفصل، مما يفتح آفاقاً لتحسين العمليات لمختلف التطبيقات الصناعية، ولا سيما في مجال الطيران والسيارات والسكك الحديدية..

الكلمات المفتاحية : اللحام؛ FSW؛ درجة الحرارة؛ تدفق الحرارة؛ ABAQUS.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude approfondie du procédé de soudage par friction malaxage (FSW), une technique innovante de soudage à l'état solide, qui suscite un intérêt croissant dans les secteurs industriels exigeant des assemblages de haute qualité. L'approche adoptée combine une analyse théorique rigoureuse avec une modélisation numérique avancée.

Dans la partie théorique, le mémoire explore les principes fondamentaux du FSW, notamment le mécanisme de génération de chaleur par friction et de malaxage du matériau, les différentes zones affectées thermiquement (nugget, zone thermo-mécaniquement affectée, etc.), ainsi que l'influence de la géométrie de l'outil (épaulement, pin, filetage) sur la qualité du joint. Les défauts typiques du procédé, tels que les vides, les tunnels et les fissures, sont également analysés, en lien avec les conditions opératoires.

La partie numérique repose sur une modélisation par éléments finis sous Abaqus, permettant de simuler le comportement thermomécanique du matériau lors du soudage. Cette simulation prend en compte des paramètres clés tels que la vitesse d'avance, la vitesse de rotation de l'outil et la force d'appui, afin d'étudier leur effet sur la température, la déformation plastique et la contrainte résiduelle dans la zone soudée.

Les résultats obtenus mettent en évidence des relations claires entre les paramètres de soudage et la performance mécanique du joint, ouvrant ainsi des perspectives d'optimisation du procédé pour diverses applications industrielles, notamment dans l'aéronautique, l'automobile et le ferroviaire.

Mots-clés : Soudage; FSW; température; flux thermique; ABAQUS.

Abstract

This thesis focuses on the in-depth study of the friction stir welding (FSW) process, an innovative solid state welding technique, which is attracting increasing interest in industrial sectors requiring high quality joints. The approach adopted combines a rigorous theoretical analysis with advanced numerical modeling.

In the theoretical part, the thesis explores the fundamental principles of the FSW, notably the mechanism of friction heat generation and material mixing, the different thermally affected zones (nugget, thermos-mechanically affected zone, etc.), as well as the influence of the tool geometry (shoulder, pin, thread) on the quality of the joint. Typical defects of the process, such as voids, tunnels and cracks, are also analyzed in relation to operating conditions.

The numerical part is based on a finite element modeling under Abaqus, allowing to simulate the thermos-mechanically behavior of the material during welding. This simulation takes into account key parameters such as the feed rate, the tool rotation speed and the support force, in order to study their effect on temperature, plastic deformation and residual stress in the welded area.

The results obtained highlight clear relationships between welding parameters and mechanical performance of the joint, thus opening prospects for process optimization for various industrial applications, notably in aeronautics, automotive, and railway.

Keywords: Welding; FSW; temperature; heat flux; ABAQUS.

Sommaire

Remerciements	1
Dédicace	2
Résumé concis	4
Introduction Générale.....	17
Chapitre I généralité sur assemblage par friction malaxage	
I.1 Introduction	20
I.2 Historique	20
I.3 Technique de soudage par friction malaxage FSW.....	21
I.3.1 Principe.....	21
I.3.2 Caractérisation du procédé FSW	21
I.3.3 Différentes phases du soudage FSW	22
I.3.4 L'outil de soudage FSW	23
I.3.4.1 Définition de l'outil de soudage FSW	24
I.3.5 Vitesse de rotation et de translation.....	25
I.4 Paramètres influençant le processus FSW	25
I.4.1 Géométries du pion et de l'épaulement	25
I.4.2 Technologies de l'outil de soudage FSW	26
I.4.3 Matériau de l'outil	27
I.5 Paramètre de soudage FSW.....	28
I.5.1 Forme de l'épaulement.....	28
I.5.2 Forme du pion.....	28
I.5.3 Vitesse de rotation de l'outil (ω).....	28
I.5.4 Vitesse d'avance de l'outil (V)	29
I.6 Positions de soudage offertes	29
I.7 Équipements du procédé de soudage FSW	30
I.8 Avantages et Inconvénients.....	31

I.8.1 Avantages du FSW	31
I.8.2 Inconvénients du FSW.....	32
I.9 Matériaux adaptés au soudage par friction malaxage (FSW).....	32
I.9.1 Généralités sur les alliages d'aluminium.....	33
I.9.2 Propriétés de l'aluminium pur :[24 ; 25]	34
I.9.3 Désignation des états métallurgiques.....	35
I.9.4 Familles d'alliages d'aluminium	35
I.9.5 Propriétés générales des alliages d'aluminium.....	36
I.10 Imperfections dans les soudures FSW	37
I.11 Relation entre la température et les paramètres de soudage.....	41
I.12 Aspects physiques concernés	41
I.12.1 Mécanique	41
I.12.2 Thermique.....	42
I.12.3 Métallurgie.....	42
Conclusion	43
 Chapitre II analyse des contraintes thermiques par friction malaxage	
II.1 Introduction.....	45
II.2 Objectif	45
II.3 Problématique	45
II.4 Phénomènes physiques observés lors du FSW	46
II.4.1 Déformation plastique du matériau soudé.....	46
II.4.2 Génération de chaleur.....	47
II.4.3 Puissance et énergie de soudage.....	48
II.4.4 Cycles thermiques	49
II.4.5 Contraintes résiduelles liées au soudage	50
II.4.6 Interaction thermique outil-pièce	50
II.5 Aspects thermiques du procédé : estimation de l'échauffement.....	51

II.6 Modélisation mécanique	52
II.7 Modélisation thermique	55
II.7.1 Puissance de frottement.....	56
II.7.2 Puissance de déformation.....	56
II.7.3 Chaleur de friction.....	57
II.7.4 Flux thermique	57
II.7.5 Sources de chaleur en FSW	58
II.7.6 Conditions aux limites.....	60
II.8 Caractéristiques des joints soudés.....	61
II.8.1 Microstructure	61
II.9 Recherche expérimentale	63
II.9.1 Machine utilisée	63
II.9.2 Matériau utilisé.....	63
II.9.3 Mesure de la température	64
II.9.4 Simulation numérique	65
II.9.5 Résultat obtenu	66
Conclusion	67
 Chapitre III simulations et discussions	
III.1 Introduction	70
III.2 Éléments finis	70
III.3 Maillage	70
III.4 Présentation du logiciel ABAQUS®	71
III.4.1 ABAQUS®	72
III.4.2 Présentation générale du code de calcul ABAQUS	72
III.4.3 L'interface Abaqus CAE	73
III.4.4 Les modules	74
III.5 Modélisation du procédé de FSW	86

III.6 Résultats de Simulation	86
Conclusion Générale	99
Bibliographie /Webographie	102

Liste des figures

Figure 1.1 Présentation du soudage par friction malaxage. [3].....	21
Figure I.2 Schéma du procédé de soudage par friction-Malaxage. [4]	22
Figure I.3 Représentation des étapes du soudage par friction-malaxage (FSW). [5].....	23
Figure I.4 Fluctuations de la force axiale et du moment de torsion au cours des étapes de soudage. [5].....	23
Figure I.5 Représentation schématique de l'outil FSW ainsi que de diverses géométries du pion et de l'épaulement. (A, B). [8]	26
Figure I.6 Différentes technologies d'outil FSW. [10]	27
Figure I.7 les paramètres de vitesse de l'outil. [12]	29
Figure I.8 Les formes des joints de soudure FSW. [14].....	30
Figure I.9 Machines et équipement standard pour le soudage par friction malaxage. [12,10]	31
Figure I.10 Métal d'aluminium. [23]	34
Figure I.11 Apparition de défauts de surface sous forme d'éraflures. [31]	38
Figure I.12 Effondrement du noyau. [32]	39
Figure I.13 Défaut à la racine du cordon. [31]	39
Figure I.14 Insuffisance de consolidation de la matière en surface. [30].....	40
Figure I.15 Illustrant une soudure présentant un défaut de pénétration. [30]	40
Figure I.16 Cordon de soudure sous la forme d'un film discontinu. [33].....	41
Figure I.17 Transferts thermiques par conduction au cours du soudage FSW. [35].....	42
Figure I.18 Section d'une soudure réalisée sur un alliage d'aluminium. [34]	43
Figure II. 1 La translation de l'outil en direction du joint de la matière. [36]	47
Figure II. 2 Dispositif conçu pour évaluer la température (Jemal et al. [2011]). [51]	52
Figure II. 3 Interactions thermiques, mécaniques et métallurgiques dans le procédé de soudage par friction-malaxage (FSW). [52].....	53
Figure II. 4 Application d'une formulation ALE pour simuler l'écoulement plastique du matériau et l'émergence de défauts de soudure. [53]	55
Figure II. 5 Résumé des phénomènes ayant conduit à l'établissement d'un flux de chaleur. [60]	58
Figure II. 6 Répartition des flux thermiques dans l'outil. [62]	59

Figure II. 7 Conditions aux frontières en FSW. [66]	61
Figure II. 8 Microstructure d'un joint soudé par FSW. [67]	62
Figure II. 9 La machine et l'outil utilisés pour le processus FSW. [68]	63
Figure II. 10 Le joint soudé au 1er point du plan expérimental. (a) Une vue du dessus ; (b) Une vue de dessous. [68]	64
Figure II. 11 Schéma de mesure des positions de température dans la pièce à souder [68]. ...	64
Figure II. 12 Diagramme de la température aux points du plan expérimental numéro : 1, 20 et 34 [68].	65
Figure II. 13 Le schéma du mouvement de l'outil dans les simulations numériques. [68].	66
Figure II. 14 Distribution des champs de température : (a) À la fin de la première phase du processus FSW ; (b) À la fin de la deuxième phase du processus FSW. [68]	66
Figure II. 15 Diagramme de température résultant des simulations numériques aux six points sélectionnés pour les 33e, 34e, 35e et 36e points du plan expérimental [68].	67
Figure III. 1 (a) solide (Poutre en I) ; (b) modèle éléments finis. [70]	71
Figure III. 2 a) Maillage tétraédrique, b) Maillage hexaédrique structuré. [70]	71
Figure III. 3 Interface de code d'ABAQUS®.	72
Figure III. 4 Organisation d'Abaqus.	74
Figure III. 5 Réalisation de la mise en données d'un problème.	74
Figure III. 6 Module Partie (les plates).	75
Figure III. 7 Module Partie (Outil de soudage).	76
Figure III. 8 Propreté des Matériaux et sections.	77
Figure III. 9 Instance et assemblage.	78
Figure III. 10 Assemblage des pièces.	79
Figure III. 11 Création des étapes.	79
Figure III. 12 Interaction et création de la surface de contact.	80
Figure III. 13 Création des chargements (pression).	81
Figure III. 14 Création des chargements (fixe).	81
Figure III. 15 Création des chargements (Plongeant).	82
Figure III. 16 Création des chargements (Logement).	82
Figure III. 17 Création des chargements (soudage).	82
Figure III. 18 Module charge (Tout les chargements).	83
Figure III. 19 Création de maillage (Plate).	83

Figure III. 20 Création de maillage (outil).	84
Figure III. 21 Maillage structuré (Plate & outil).	84
Figure III. 22 Lancement du calcul.	85
Figure III. 23 Visualisation de l'opération de friction malaxage.	85
Figure III. 24 Visualisation du mode thermique d'un matériau d'Aluminium.	87
Figure III. 25 Distribution des contraintes résiduelles de Von Mises dans un assemblage soudé par FSW sous pression : Résultats de simulation numérique.	88
Figure III. 26 Distribution des contraintes résiduelles aux orientations (limitations) axiales/planes dans un assemblage soudé par FSW sous pression.	90
Figure III. 27 Visualisation du mode thermique de deux différentes valeurs de vitesse.	92
Figure III. 28 Graphe de la distribution de la température nodale le long du cordon (Al).	93
Figure III. 29 Graphe de la distribution de la température nodale le long du cordon (Al).	94
Figure III. 30 Graphe de la distribution de la température nodale le long du cordon (cuivre).	95
Figure III. 31 Graphe de la distribution de la température nodale le long du cordon (cuivre).	95
Figure III. 32 Graphes de la distribution de la température nodale le long du cordon (acier).	96

Liste des tableaux

Tableau I.I les divers types de matériaux d'outils en fonction des matériaux à souder. [6]....	27
Tableau II.1 Point Tracking (Température °C).	67
Tableaux III. 1 Exemples de les propriétés mécanique de procédé.	78
Tableaux III. 2 Les propriétés mécaniques des 03 matériaux.	86
Tableaux III. 3 valeurs des facteurs d'intensité des contraintes thermiques.	91

Liste d'abréviation

τ : cisaillement à l'interface (N/m²).

μ_f : Coefficient de frottement (Sans unité).

σ : contrainte normale appliquée (N/m²).

M : couple appliqué à l'outil en rotation (N·m).

ω : vitesse de rotation (rad/s).

η : correspond au rendement (Sans unité).

$\tilde{\sigma}$: tenseur des contraintes (Pa).

\vec{f} : forces volumiques souvent négligées dans le processus de soudage FSW (N/m³).

\vec{v} : champ de vitesse (m/s).

P : englobe l'ensemble des paramètres définis dans l'équation constitutive de la rhéologie du matériau (Dépend du paramètre spécifique).

ρ : densité (kg/m³).

c : capacité calorifique (J/ (kg·K)).

Λ : coefficient de conductivité thermique (W/ (m·K)).

Γ_d : Coefficient de chaleur de déformation inélastique selon Taylor Quinney (Sans unité).

$\tilde{\sigma}_0$: Contrainte d'écoulement de Von Mises (Pa).

$\dot{\tilde{\epsilon}}$: vitesse de déformation équivalente de Von Mises (s⁻¹).

Γ_d : Coefficient de Taylor-Quinney (Sans unité).

μ : coefficient de frottement entre l'outil et le matériau (Sans unité).

P : pression normale appliquée par l'outil (Pa).

ω : vitesse angulaire de rotation de l'outil (rad/s).

R : rayon de contact de l'épaulement (m).

$\bar{\sigma}$: Contrainte équivalente (Pa).

\mathcal{E} : Le taux de déformation équivalente (s^{-1}).

P_{av} : Puissance moyenne fournie à l'outil (W).

r_{shoulder}² : Rayon de l'épaulement (m).

r_{probe} : Rayon du pion (m).

H : hauteur (m).

τ_{contact} : Contrainte de cisaillement en N/m^2 .

A : l'aire de la surface de contact (m^2).

V_g : vitesse de glissement entre la matière et l'outil (m/s).

τ : représente la contrainte tangentielle (Pa).

T₀ : Température de l'environnement (C°).

PN : position nodale (m).

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction Générale

Le soudage par friction malaxage (FSW - Friction Stir Welding) représente une innovation majeure dans le domaine de l'assemblage des matériaux, particulièrement pour les alliages légers et les matériaux considérés comme difficilement soudables par les méthodes conventionnelles. Inventé originellement au début des années 1990 par The Welding Institute (TWI) au Royaume-Uni, ce procédé s'est rapidement imposé dans des secteurs exigeants tels que l'aéronautique, l'aérospatiale et l'automobile, grâce à ses nombreux avantages techniques et économiques.

Contrairement aux techniques de soudage par fusion, le FSW se déroule à l'état solide, éliminant ainsi de nombreux défauts métallurgiques associés à la solidification. L'absence de fusion permet également de réduire significativement la consommation d'énergie et d'éviter l'utilisation de matériaux d'apport ou de gaz de protection. Cependant, malgré ces avantages indéniables, le procédé FSW génère des phénomènes thermiques complexes qui induisent des contraintes résiduelles pouvant affecter les propriétés mécaniques et la durabilité des assemblages.

La génération et la distribution des contraintes thermiques lors du soudage FSW constituent un domaine d'étude particulièrement important pour l'optimisation du procédé. Ces contraintes, résultant des gradients thermiques et des transformations microstructurales, peuvent compromettre l'intégrité structurale des joints soudés si elles ne sont pas correctement maîtrisées. L'analyse approfondie de ces contraintes thermiques est donc fondamentale pour comprendre les mécanismes physiques sous-jacents et pour développer des stratégies efficaces de contrôle du procédé.

Dans ce contexte, ce mémoire de master vise à apporter une contribution significative à la compréhension des phénomènes thermiques et des contraintes associées dans le procédé FSW, en combinant une analyse approfondie des phénomènes physiques sous-jacents avec une modélisation numérique avancée. La première partie du document abordera les principes fondamentaux du procédé, incluant une description détaillée des paramètres opératoires, de la géométrie de l'outil et des défauts potentiels, tandis que la seconde partie se concentrera sur la discussion et modélisation des champs thermiques et des contraintes résiduelles, validée par

des approches expérimentales et numériques. Enfin, nous soutiendrons et prouverons notre thèse et travail en effectuant une simulation numérique du processus de soudage par friction malaxage et étude paramétrique menée sous le logiciel Abaqus permettra d'évaluer l'influence critique de la contrainte thermique, la vitesse de déplacement et des propriétés des matériaux sur la qualité des assemblages, offrant ainsi des perspectives d'optimisation pour des applications industrielles hautement performantes.

Cette étude menée vise non seulement à approfondir la compréhension scientifique (théorique, pratique et simulation) des mécanismes du FSW, mais aussi à fournir des outils prédictifs pour son implémentation optimale dans des environnements de production réels.

Chapitre I

GENERALITE SUR ASSEMBLAGE PAR FRICTION
MALAXAGE (FSW).

I.1 Introduction

Ce chapitre présente une analyse bibliographique approfondie sur le procédé de soudage par friction malaxage (FSW, Friction Stir Welding). L'étude explore les mécanismes fondamentaux du procédé, en mettant l'accent sur les interactions thermomécaniques lors de l'assemblage, ainsi que sur l'évolution microstructurale des alliages fréquemment utilisés dans le domaine industriel. Cette revue de littérature permet d'établir un cadre théorique complet pour appréhender les enjeux scientifiques et technologiques liés à cette technique.

I.2 Historique

L'histoire du soudage par friction malaxage (FSW) remonte à son invention par le Welding Institute (TWI) en décembre 1991. TWI a réussi à déposer des brevets en Europe, aux États-Unis, au Japon et en Australie. En 1992, TWI a lancé le projet 5651, intitulé "Développement de la nouvelle technique de soudage par friction pour l'aluminium", afin d'approfondir l'étude de cette méthode. Le projet de développement s'est déroulé en trois phases. La première phase a démontré que le FSW était une technique de soudage réaliste et pratique, tout en se concentrant sur le soudage des alliages d'aluminium de la série 6000. La deuxième phase a examiné avec succès le soudage des alliages d'aluminium utilisés dans l'aéronautique et la construction navale, correspondant aux séries 2000 et 5000, respectivement. Les tolérances des paramètres de processus, les caractéristiques métallurgiques et les propriétés mécaniques de ces matériaux ont été établies. La troisième phase a permis de développer des données pertinentes pour l'industrialisation ultérieure du FSW. Depuis son invention, ce procédé a suscité un intérêt mondial et est aujourd'hui utilisé dans la recherche et la production dans de nombreux secteurs, notamment l'aéronautique, l'automobile, le ferroviaire, la construction navale, les boîtiers électroniques, les refroidisseurs, les échangeurs de chaleur et les conteneurs de déchets nucléaires. Le FSW a prouvé son efficacité pour le soudage de l'aluminium, du laiton, du cuivre et d'autres matériaux à faible point de fusion. La phase la plus récente de la recherche sur le FSW vise à élargir l'application de cette procédure aux matériaux à haute température de fusion, tels que les aciers au carbone et inoxydables ainsi que les alliages à base de nickel, en développant des outils capables de résister aux températures et pressions élevées nécessaires pour unir efficacement ces matériaux. [1]

I.3 Technique de soudage par friction malaxage FSW

I.3.1 Principe

Le principe fondamental de ce procédé consiste à effectuer une soudure par malaxage localisé des matériaux des deux pièces à unir. La liaison métallurgique se forme à une température élevée, mais inférieure à celle de fusion des matériaux. Le procédé de soudage par friction-malaxage (FSW) présente deux avantages majeurs :

- Il n'entraîne ni soufflures ni fissures à chaud,
- Il permet la réalisation de soudures entre matériaux dissemblables.

Pour réaliser un assemblage par FSW, les pièces à souder doivent être positionnées de manière rigide, généralement sur une enclume, puis immobilisées afin d'éliminer tout déplacement parasite pendant l'opération. Afin de décrire les principes de base du procédé, prenons l'exemple d'une géométrie simple : l'assemblage bout à bout de deux tôles planes, la figure (I.1). [2]

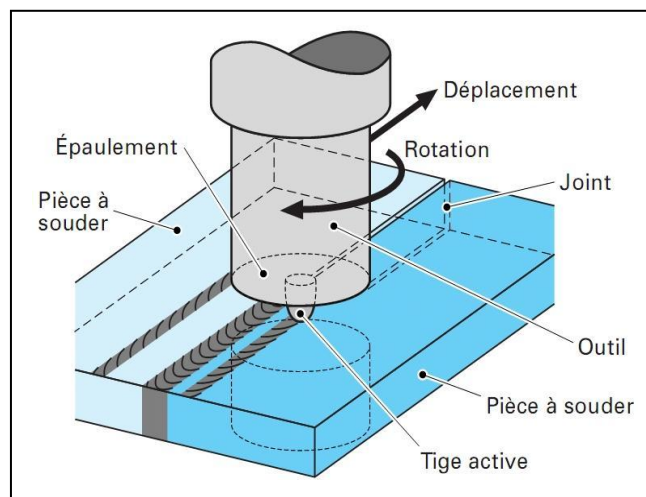


Figure 1.1 Présentation du soudage par friction malaxage. [3]

I.3.2 Caractérisation du procédé FSW

Une vitesse de rotation spécifique de l'outil, combinée à une pression exercée très élevée, est appliquée à l'outil en contact avec la surface des pièces à unir. La chaleur générée par le frottement de l'outil, en conjonction avec la pression appliquée, permet aux matériaux de passer à l'état plastique, facilitant ainsi leur assemblage. L'outil agit en mélangeant le métal des pièces. La soudure s'effectue grâce à un mouvement linéaire de l'outil en rotation, à une vitesse d'avance déterminée. [4]

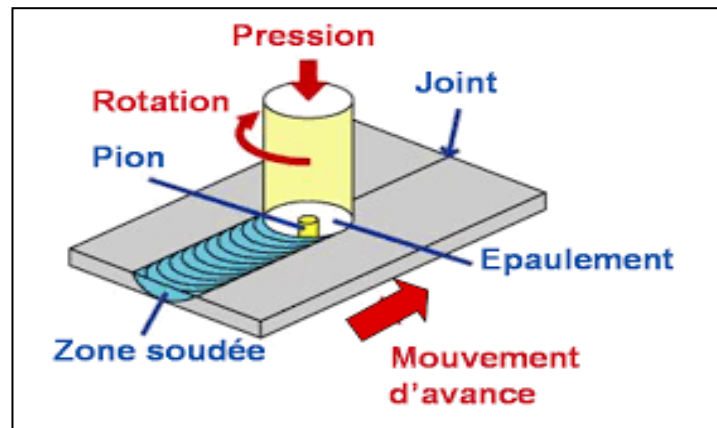


Figure I.2 Schéma du procédé de soudage par friction-Malaxage. [4]

I.3.3 Différentes phases du soudage FSW

Le processus de soudage par friction-malaxage (FSW) se divise en quatre phases distinctes :

- **Pénétration de l'outil (phase de plongée)**

Un outil rotatif (400-1400 tr/min), comportant un pion profilé et un épaulement (diamètre 2-3× supérieur au pion), est pressé contre les pièces à assembler. Le frottement génère un échauffement localisé, induisant un ramollissement du matériau qui permet la pénétration complète de l'outil jusqu'au contact épaulement-surface [5].

- **Préchauffage (phase d'attente)**

L'outil maintient sa rotation stationnaire pendant un intervalle spécifique (Dwell-time), crucial pour développer une zone thermoplastique suffisante. Cette durée, variable selon les paramètres matériaux et géométriques, doit garantir l'atteinte des températures de forgeage optimales.

- **Soudage (phase d'avance)**

L'outil progresse le long du joint (vitesse < 2 m/min), combinant :

- Action mécanique du pion (mélange du matériau plastifié)
- Effet de forge de l'épaulement (compactage)

Ce mécanisme génère une microstructure recristallisée homogène, créant une liaison métallurgique sans fusion - évitant ainsi les défauts typiques (porosités, fissurations) des techniques conventionnelles, comme la figure (I.3).

- **Retrait de l'outil (phase de retrait)**

L'extraction de l'outil rotatif peut laisser une dépression résiduelle (selon configuration), comme illustré en la figure (I.3).

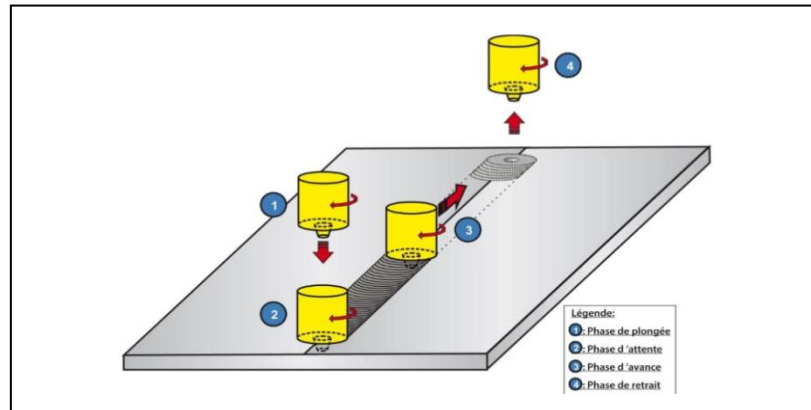


Figure I.3 Représentation des étapes du soudage par friction-malaxage (FSW). [5]

La figure I.4 présente l'évolution temporelle des paramètres mécaniques clés que sont la force axiale et le couple de rotation au cours des différentes phases du procédé. Ces grandeurs mécaniques présentent des variations caractéristiques directement liées à quatre facteurs principaux :

- La géométrie de l'outil (dimensions et profil)
- La configuration géométrique du joint
- La nature des alliages assemblés
- Les paramètres opératoires du soudage

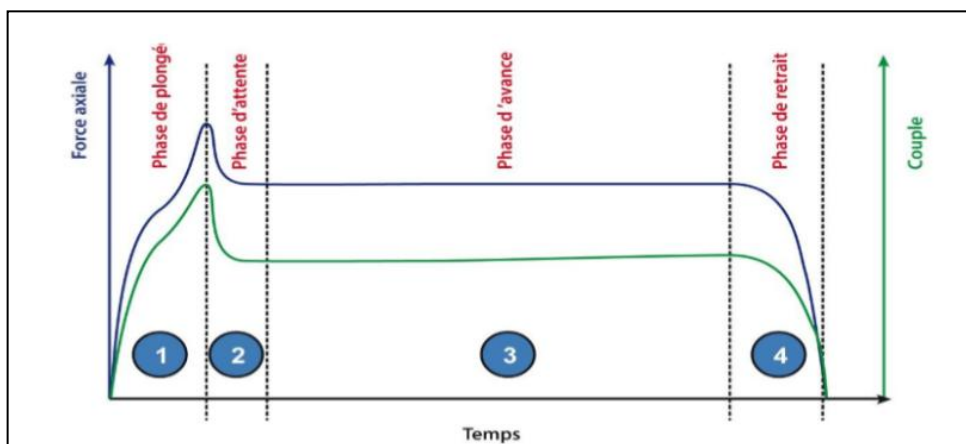


Figure I.4 Fluctuations de la force axiale et du moment de torsion au cours des étapes de soudage. [5]

I.3.4 L'outil de soudage FSW

I.3.4.1 Définition de l'outil de soudage FSW

Selon les recherches, l'outil de soudage par friction-malaxage (FSW) se compose des éléments suivants :

- **Épaulement**

Fonctions

- Encercler le matériau autour du pion : L'épaulement, qui constitue la partie la plus large de l'outil, maintient le matériau en position autour du pion durant le processus de soudage. Cela empêche le matériau de se déplacer latéralement et garantit une consolidation efficace de la soudure.
- Participer à l'échauffement et au mélange du matériau : L'épaulement génère de la chaleur par friction avec les surfaces des pièces à assembler. Cette chaleur joue un rôle crucial dans le ramollissement du matériau, facilitant ainsi son mélange.
- Contribuer à la déformation du matériau : En appliquant une pression sur la surface des pièces, l'épaulement favorise la déformation plastique du matériau, ce qui est indispensable pour établir une liaison robuste.

Contact : L'épaulement est en contact direct avec la surface des pièces à assembler, agissant principalement sur la partie supérieure du joint soudé. [6]

- **Pion**

Fonctions

- Mélanger : Le pion, également désigné sous le terme "probe", est la composante de l'outil qui pénètre dans le matériau. Il est chargé du mélange mécanique des matériaux à assembler, permettant ainsi d'obtenir une liaison homogène.
- Faciliter une déformation plastique par rotation et avance : Le pion effectue une rotation tout en avançant, ce qui entraîne une déformation plastique du matériau. Cette déformation est essentielle pour réaliser une soudure solide sans fusion.
- Extruder le matériau : Le pion déplace le matériau de l'avant vers l'arrière de l'outil, ce qui permet de remplir le joint et de créer une soudure continue.

Contact : Le pion est en contact avec l'interface des pièces à assembler, pénétrant dans le matériau généralement jusqu'à une profondeur légèrement inférieure à l'épaisseur des plaques à souder. [6]

I.3.5 Vitesse de rotation et de translation

La vitesse de rotation et de translation de l'outil FSW constitue un paramètre déterminant qui impacte la qualité de la soudure. Ces vitesses varient.

Vitesse de rotation : Elle se situe généralement entre 100 et 1500 tr/min. Une augmentation de la vitesse de rotation engendre une élévation de la température par friction, ce qui est essentiel pour traiter des matériaux plus durs ou plus épais. Néanmoins, une vitesse trop élevée peut provoquer une surchauffe ou une détérioration du matériau.

Vitesse de translation : Elle varie habituellement entre 20 et 500 mm/min. Une vitesse de translation réduite favorise un mélange optimal du matériau, bien qu'elle puisse prolonger la durée du processus de soudage. [7]

I.4 Paramètres influençant le processus FSW

Géométrie de l'outil : La configuration et les dimensions de l'épaulement et du pion (diamètre, longueur, angle) exercent une influence considérable sur la qualité de la soudure.

Propriétés du matériau : Les matériaux ductiles tels que l'aluminium requièrent des vitesses de rotation et de translation distinctes de celles nécessaires pour des matériaux plus résistants comme l'acier ou le titane.

Épaisseur des plaques : Les plaques d'une épaisseur accrue nécessitent des outils dotés de pions plus longs et des vitesses de rotation supérieures.

Conditions de refroidissement : Un refroidissement adéquat peut s'avérer indispensable pour prévenir la surchauffe, en particulier pour les matériaux sensibles aux variations de température. [7]

I.4.1 Géométries du pion et de l'épaulement

L'illustration présente les diverses configurations géométriques du pion et de l'épaulement.

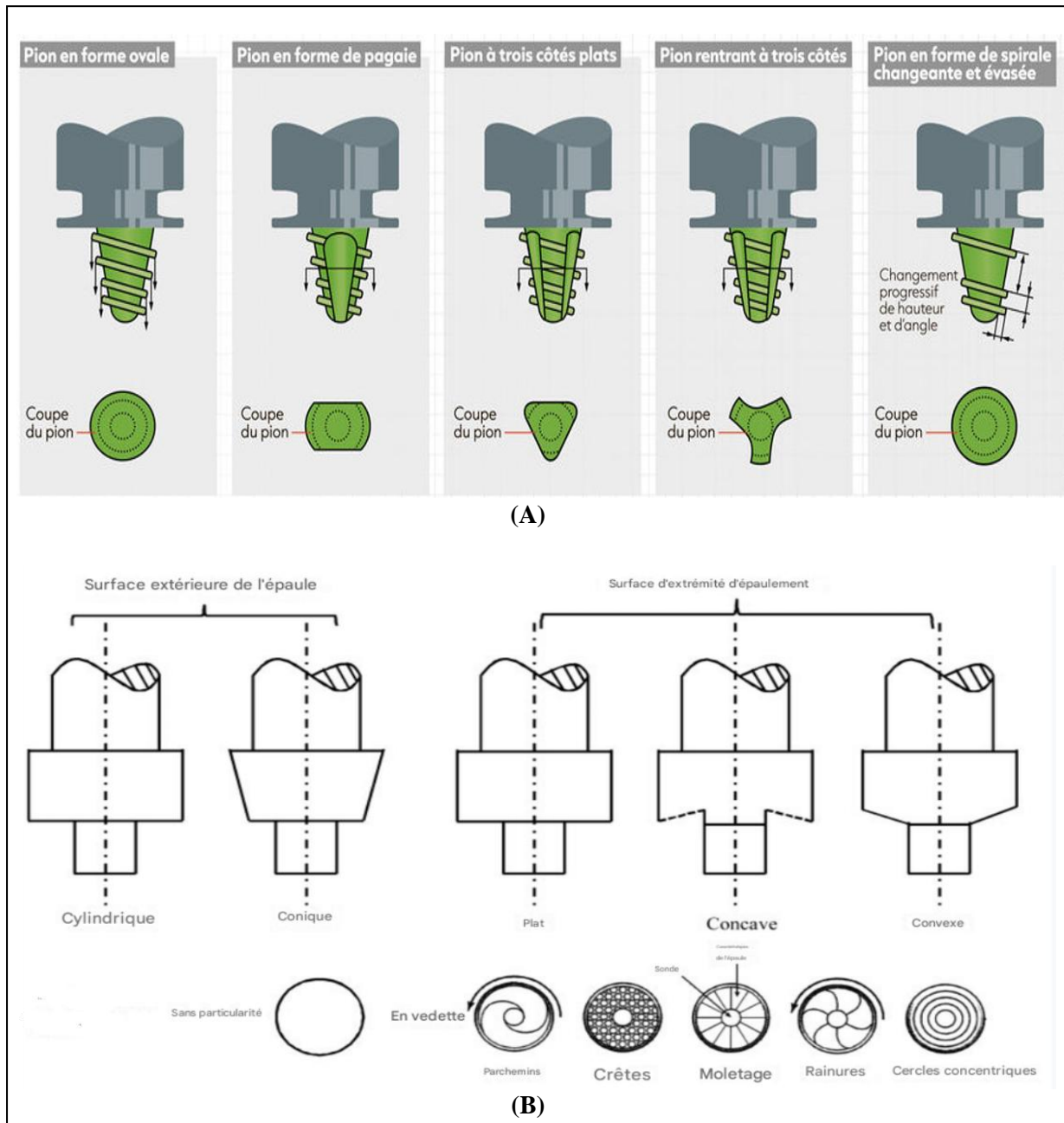


Figure I.5 Représentation schématique de l'outil FSW ainsi que de diverses géométries du pion et de l'épaulement. (A, B). [8]

I.4.2 Technologies de l'outil de soudage FSW

Les outils de soudage peuvent être répartis en trois catégories distinctes :[9]

- **Outil à pion fixe** : dans ce type d'outil, l'épaulement et le pion sont immobiles l'un par rapport à l'autre.

- **Outil à pion ajustable** : cet outil est doté d'un pion dont la longueur peut être modifiée. Cela permet d'introduire progressivement le pion dans l'épaulement, garantissant ainsi des soudures sans défaut à la fin du cordon, comme la figure (I.6).
- **Outil à double épaulement** : ici, les deux épaulements sont interconnectés par un pion dont la longueur est ajustable durant le processus de soudage. Ce mécanisme génère de la chaleur par frottement de manière équilibrée.

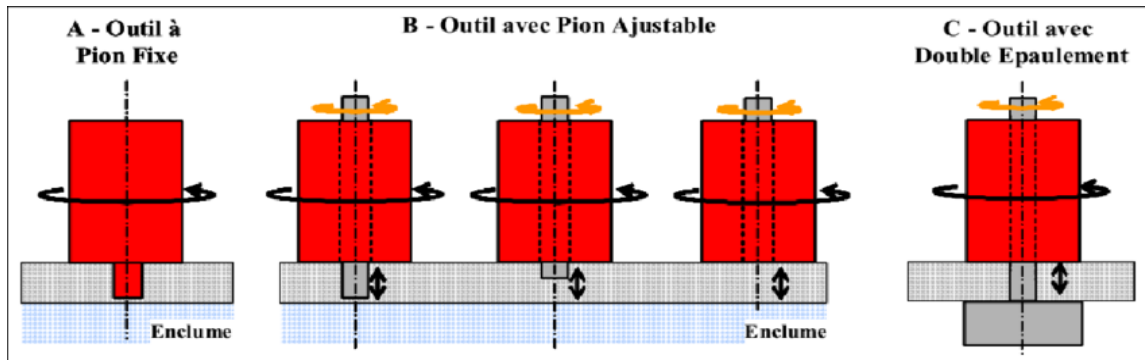


Figure I.6 Différentes technologies d'outil FSW. [10]

I.4.3 Matériau de l'outil

Le matériau utilisé pour l'outil doit être capable de supporter les contraintes et les températures élevées engendrées par le soudage FSW. D'autres facteurs doivent également être pris en considération, tels que la résistance à l'usure, [6] l'absence de diffusion vers le matériau soudé, ainsi que ses propriétés d'usinage, entre autres. Par conséquent, le choix du matériau de l'outil sera déterminé en fonction du matériau à souder et de l'épaisseur de la soudure, comme indiqué dans le tableau (I.1):

Tableau I.I les divers types de matériaux d'outils en fonction des matériaux à souder. [6]

Alliage	Epaisseur	Matériaux d'outil
Alliage d'aluminium	≤12 mm	Acier à Outil
	≤26 mm	MP159
Alliage de Magnésium	≤6 mm	Acier à Outil, WC
Alliage de Cuivre	≤50 mm	Alliage de Nickel, PCBN, Alliage W
Alliage de Titane	≤6 mm	Alliage W
Acier INOX	≤6 mm	Alliage W
Acier Faiblement allié	≤10 mm	PCBN, WC
Alliage de Nickel	≤6 mm	PCBN, Alliage W

I.5 Paramètre de soudage FSW

Les critères à sélectionner pour effectuer une soudure peuvent être classés en fonction de l'ajustement d'une configuration de soudage. [11]

I.5.1 Forme de l'épaulement

Épaulement concave : Cette configuration favorise une rétention optimale du matériau plastifié durant le processus de soudage, minimisant ainsi les risques de défauts tels que les perforations ou les fissures.

Épaulement plat avec rainure(s) : Cette forme facilite l'écoulement du matériau plastifié et est particulièrement adaptée à des configurations spécifiques nécessitant un contrôle précis du flux de matériau. [11]

I.5.2 Forme du pion

Le pion, ou pointe de l'outil, est la partie qui pénètre dans le matériau. Sa configuration a un impact significatif sur la répartition de la chaleur et le flux du matériau. Les formes les plus courantes comprennent :

Cylindrique : Idéale pour des soudures standards.

Conique : Permet une pénétration progressive et un meilleur contrôle de la profondeur de soudage.

Fileté : Optimise le malaxage et la circulation du matériau.

Avec cannelures : Augmente le cisaillement et favorise la plasticisation du matériau.

I.5.3 Vitesse de rotation de l'outil (ω)

La vitesse de rotation (exprimée en tr/min ou rad/s) joue un rôle crucial dans la génération de chaleur par friction. [11]

Vitesse élevée : Produit une chaleur accrue, bénéfique pour les matériaux épais ou difficiles à souder. Toutefois, une vitesse excessive peut provoquer une surchauffe ou des défauts.

Vitesse faible : Diminue la chaleur générée, ce qui est approprié pour les matériaux fins ou sensibles à la température.

I.5.4 Vitesse d'avance de l'outil (V)

La vitesse d'avance (mesurée en mm/min ou mm/s) détermine la rapidité avec laquelle l'outil se déplace le long du joint à souder, comme la figure (I.7).

Vitesse d'avance élevée : Réduit le temps de soudage, mais peut engendrer un malaxage insuffisant et des défauts.

Vitesse d'avance faible : Favorise un meilleur malaxage et une qualité de soudure supérieure, mais prolonge le temps de soudage. [11]

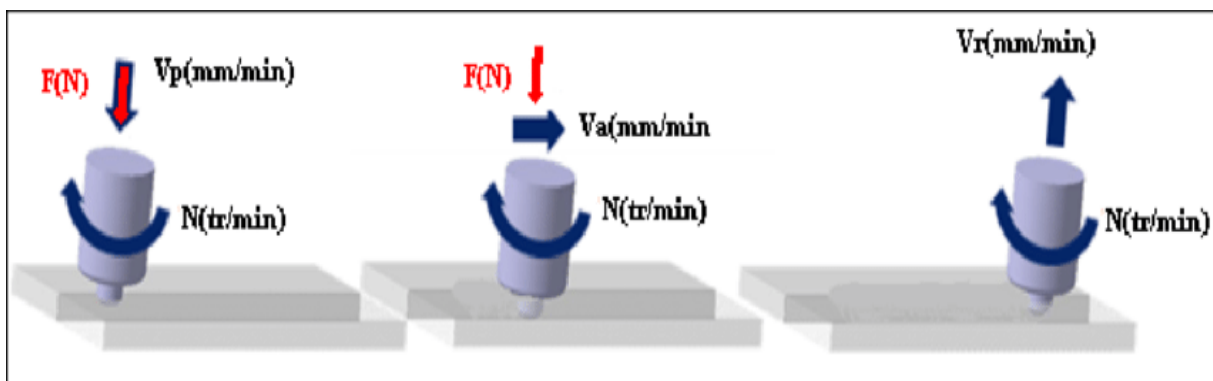


Figure I.7 les paramètres de vitesse de l'outil. [12]

I.6 Positions de soudage offertes

Les configurations de soudage proposées doivent répondre aux exigences suivantes [13] :

- ✓ Garantir le maintien des pièces afin d'éviter tout mouvement relatif sous l'effet des forces appliquées.
- ✓ Permettre un accès adéquat au plan de joint par l'outil et accueillir l'épaulement pour assurer un contact optimal avec la surface des pièces.
- ✓ Si nécessaire, positionner une enclume en dessous des pièces pour absorber l'effort exercé par l'outil et contenir la matière. La figure (I.8) présente les diverses configurations de joints de soudure FSW observées. [13]

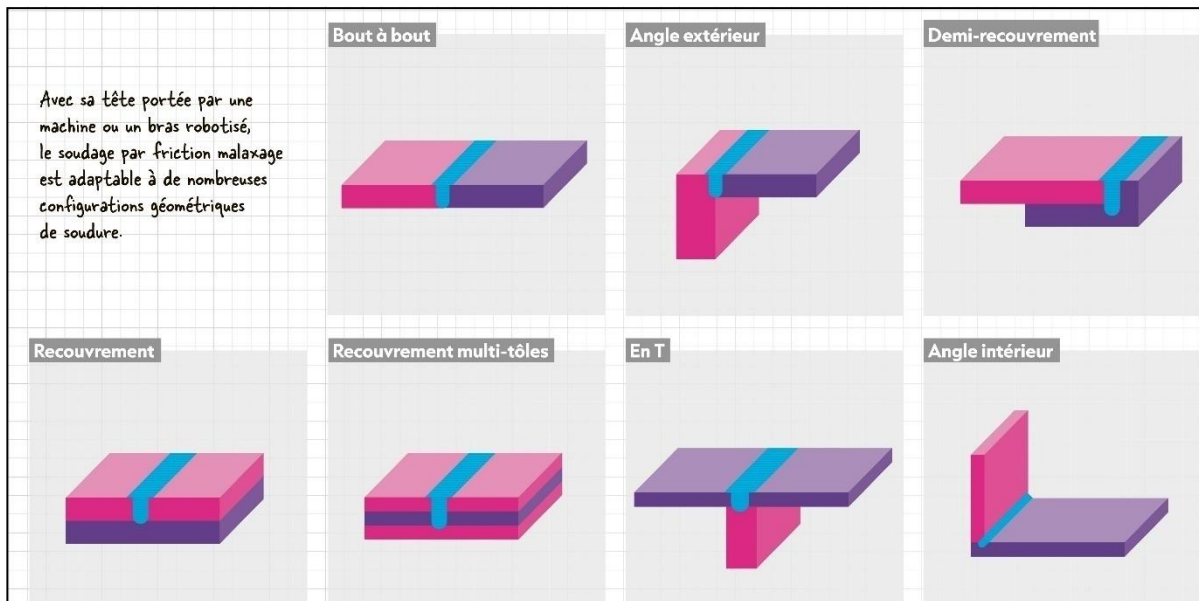


Figure I.8 Les formes des joints de soudure FSW. [14]

I.7 Équipements du procédé de soudage FSW

Tous les dispositifs équipés d'un mandrin rotatif peuvent être utilisés pour réaliser du soudage par friction malaxage. Cependant, il est essentiel que ces dispositifs soient capables de générer une force axiale suffisante pour garantir la réussite des soudures, la figure (I.1). [15]

Une machine de soudage « FSW » se compose principalement des éléments suivants :

- Un portique qui permet les mouvements de translation de la tête par rapport au châssis.
- Une tête de soudage qui fournit les mouvements additionnels nécessaires à l'outil de soudage. C'est cette tête qui assure la rotation de l'outil.
- Un outil, généralement constitué d'un pion et d'un épaulement. Le frottement produit par le pion et l'épaulement génère de la chaleur. La rotation de cet outil favorise le malaxage des deux matériaux, entraînant ainsi la formation d'une zone soudée.
- Une plateforme de soudage sur laquelle les pièces à assembler sont positionnées grâce à un montage approprié.

La tête de soudage comprend principalement le mandrin tournant, qui accueille l'outil généralement monobloc, ainsi que le mécanisme de commande d'approche qui permet de rapprocher l'outil et de fournir ensuite l'effort de pénétration et de pression axiale de l'épaulement sur la surface supérieure des tôles. [15]



Figure I.9 Machines et équipement standard pour le soudage par friction malaxage. [12,10]

I.8 Avantages et Inconvénients

I.8.1 Avantages du FSW

a) Capacité à assembler des pièces aux sections très variées : Le FSW permet de réaliser des soudures entre des pièces présentant des épaisseurs ou des configurations très différentes, à condition de respecter certaines précautions (comme l'adaptation de la géométrie de l'outil ou l'ajustement des paramètres de soudage). Cela ouvre de nouvelles perspectives d'application dans des secteurs tels que l'aérospatiale, l'automobile et la construction navale.

b) Assemblage de matériaux hétérogènes : Le FSW est en mesure d'assembler des matériaux qui posent des difficultés aux méthodes de soudage conventionnelles, tels que l'aluminium et le cuivre ou l'acier. Cela permet d'explorer des applications multi matériaux, où les caractéristiques spécifiques de chaque matériau sont mises à profit.[16]

c) Grande répétabilité et reproductibilité : Le FSW est un procédé stable et contrôlable, garantissant une répétabilité élevée (identité des résultats sur plusieurs soudures) et une reproductibilité (identité des résultats dans divers environnements). Sa facilité d'automatisation le rend adapté à la production industrielle en série.[16]

d) Absence de consommables et de métal d'apport : Contrairement à d'autres techniques de soudage, le FSW ne requiert ni métal d'apport, ni gaz de protection, ni flux. Cela contribue à diminuer les coûts opérationnels et à simplifier la logistique.

e) **Soudures de haute qualité** : Le FSW génère des soudures présentant une structure métallurgique optimale, car le matériau ne fond pas (il reste à l'état solide). Les joints soudés affichent une résistance mécanique élevée, une déformation minimale et une bonne résistance à la fatigue.[16]

I.8.2 Inconvénients du FSW

a) **Coût d'investissement élevé** : Les équipements de FSW présentent un coût élevé en raison de leur conception complexe et de la nécessité d'outils à la fois robustes et précis. Cela peut constituer un obstacle pour les petites entreprises ou les projets à faible volume.[17]

b) **Nécessité d'un maintien rigide des pièces à assembler** : Le FSW exige un maintien rigide des éléments à souder afin d'éviter toute déformation ou mouvement durant le processus de soudage. Cela peut engendrer des contraintes résiduelles dans les pièces assemblées, rendant parfois nécessaire un traitement thermique après le soudage pour les atténuer.[17]

c) **Exigence d'un dispositif de support (enclume ou support approprié)** : Le FSW requiert un support solide (enclume) capable de supporter la force d'insertion de l'outil et de maintenir les pièces en position. Cela limite la souplesse du procédé pour certaines géométries complexes ou pour des pièces de grande dimension.[17]

I.9 Matériaux adaptés au soudage par friction malaxage (FSW)

1. Alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium sont les matériaux les plus couramment soudés par FSW en raison de leur faible point de fusion et de leur excellente conductivité thermique.[18]

Exemples : Série 2xxx (Al-Cu), 5xxx (Al-Mg), 6xxx (Al-Mg-Si), 7xxx (Al-Zn).

2. Alliages de magnésium

Les alliages de magnésium sont également bien adaptés au FSW en raison de leur légèreté et de leur capacité à être soudés sans défauts majeurs.

Exemples : AZ31, AZ91.

3. Alliages de cuivre

Le cuivre et ses alliages peuvent être soudés par FSW, bien que leur haute conductivité thermique nécessite des paramètres de soudage spécifiques.

Exemples : Cuivre pur, alliages de cuivre-zinc (laiton).

4. Alliages de titane

Les alliages de titane sont soudables par FSW, mais nécessitent des outils en matériaux très résistants (comme le tungstène ou le carbure de tungstène) en raison de leur dureté et de leur résistance à haute température.[19]

Exemples : Ti-6Al-4V.

5. Aciers

Les aciers peuvent être soudés par FSW, mais le procédé est plus complexe en raison de leur haute résistance et de leur point de fusion élevé.

Exemples : Aciers doux, aciers inoxydables (séries 300 et 400).

6. Composites à matrice métallique (MMC)

Les composites à matrice métallique, comme les matériaux renforcés de particules ou de fibres, peuvent être soudés par FSW avec des précautions pour éviter la dégradation des renforts.

Exemples : Aluminium renforcé de carbure de silicium (Al-SiC).

7. Polymères et composites thermoplastiques

Le FSW est également utilisé pour souder des polymères et des composites thermoplastiques, bien que les paramètres de soudage diffèrent considérablement de ceux utilisés pour les métaux.

Exemples : Polypropylène (PP), polyéthylène (PE).

8. Matériaux dissimilaires

Le FSW est efficace pour assembler des matériaux dissimilaires, comme l'aluminium et le cuivre, ou l'aluminium et l'acier.[20]

Exemples : Al-Cu, Al-Fe, Al-Mg.

I.9.1 Généralités sur les alliages d'aluminium

L'aluminium, en tant que métal pur, est rarement utilisé en raison de sa résistance mécanique limitée, qui ne dépasse généralement pas 20 kg/mm², sauf dans des cas particuliers comme la miroiterie. Pour surmonter cette contrainte, l'aluminium est principalement utilisé sous forme d'alliages. L'ajout contrôlé d'éléments d'alliage tels que le cuivre, le silicium, le magnésium, le manganèse, le titane, le chrome, le zinc et le cobalt permet d'améliorer de

manière significative ses caractéristiques mécaniques. Le durcissement de l'aluminium est réalisé par l'incorporation de ces éléments d'addition, qui peuvent exister soit en solution solide, soit sous forme de précipités. [21,22]

Ces mécanismes jouent un rôle crucial dans le renforcement de la matrice métallique et l'optimisation des performances des alliages.

Les alliages d'aluminium se divisent en deux catégories principales :

. **Les alliages de fonderie** : Ces alliages sont développés en tenant compte de leurs propriétés à l'état liquide, afin de produire des pièces de fonderie de haute qualité, sans défauts.

. **Les alliages de corroyage** : Ces alliages sont conçus pour favoriser leur mise en forme à l'état solide, par des procédés tels que le laminage, l'extrusion ou le forgeage.

Et c'est précisément pour cela que nous avons choisi l'aluminium comme métal d'étude, car c'est le métal le plus adaptatif avec le soudage par friction malaxage.

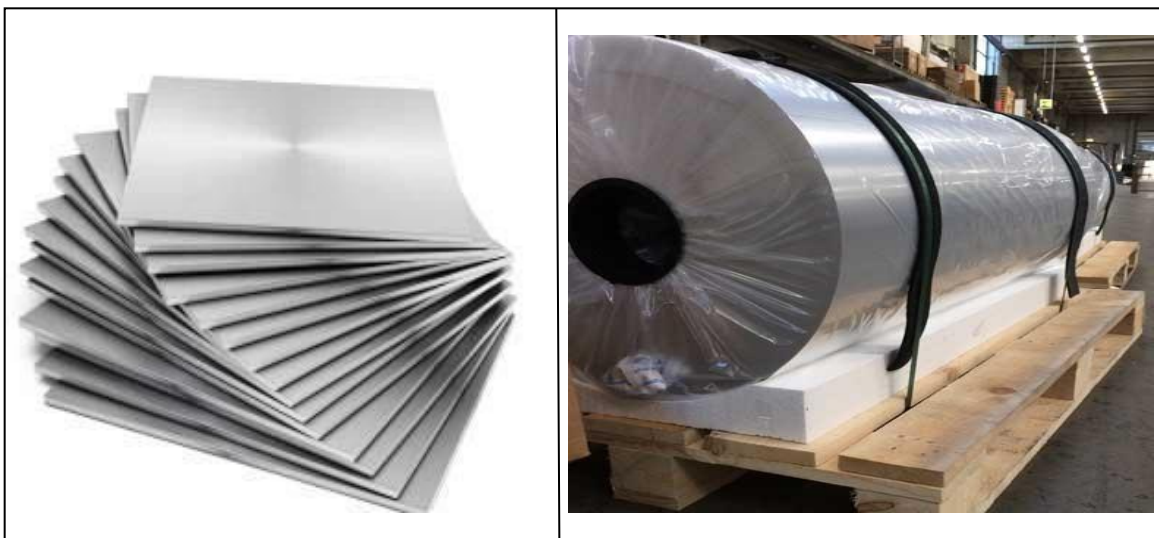


Figure I.10 Métal d'aluminium. [23]

I.9.2 Propriétés de l'aluminium pur : [24 ; 25]

- Paramètre de maille : 0.405 nm à 298K.
- Masse volumique à 25°C : 2698.7 kg/m³.
- Point de fusion : 660°C.
- Coefficient de dilatation moyen entre 20 et 300°C : $2.55 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$.

- Retrait volumique : 5.6% en cours de solidification.
- Capacité thermique massique à 20 °C : $c = 950 \text{ J. kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.
- Conductivité thermique à 20 °C : $\lambda = 217.6 \text{ W. m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.
- Résistivité électrique à 20 °C : $\rho = 2.63\mu\Omega \text{ cm}$.

I.9.3 Désignation des états métallurgiques

La classification des alliages d'aluminium est régie par la norme européenne EN 515, qui traite des produits corroyés en aluminium et de leur désignation en fonction des états métallurgiques.[25] Les composants fabriqués à partir d'alliages d'aluminium par déformation sont regroupés selon des états métallurgiques normalisés, identifiés par une lettre :

F: Brut de transformation. Cette désignation concerne une pièce après son processus de transformation (tel que le laminage, le forgeage ou le filage), indiquant qu'aucun traitement thermique n'a été appliqué et qu'il n'existe aucune garantie concernant les caractéristiques mécaniques.

O: Recuit. Ce niveau représente le minimum des caractéristiques mécaniques et est adapté à l'emboutissage.

H: Écroui. Cet état est spécifique aux alliages qui se durcissent par écrouissage.

T: Trempé. Cette désignation est réservée aux alliages qui subissent un durcissement par traitement thermique.

I.9.4 Familles d'alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium sont généralement identifiés par un code à quatre chiffres[26], où le premier chiffre indique la catégorie à laquelle ils appartiennent :

- Aluminium pur (Al) : 1000
- Aluminium allié au cuivre (Al + Cu) : 2000
- Aluminium allié au manganèse (Al + Mn) : 3000

- Aluminium allié au silicium (alliages de moulage) (Al + Si) : 4000
- Aluminium allié au magnésium (Al + Mg) : 5000
- Aluminium allié au magnésium et au silicium (Al + Mg + Si) : 6000
- Aluminium allié au zinc et au magnésium (Al + Zn + Mg) : 7000

I.9.5 Propriétés générales des alliages d'aluminium

Légèreté

Les alliages d'aluminium se caractérisent par une densité relativement faible, avoisinant $2,7 \text{ g/cm}^3$, ce qui les rend légers en comparaison avec d'autres métaux tels que l'acier ou le cuivre. Cette caractéristique est particulièrement bénéfique dans les secteurs aérospatial et automobile, où la minimisation du poids est essentielle.

Résistance mécanique

Bien que l'aluminium pur soit relativement tendre, l'incorporation d'éléments d'alliage tels que le cuivre, le magnésium, le silicium ou le zinc permet d'améliorer considérablement sa résistance mécanique. Les alliages d'aluminium peuvent atteindre des niveaux de résistance similaires à ceux de certains aciers tout en conservant une légèreté notable.[11,12]

Résistance à la corrosion

Les alliages d'aluminium développent une couche d'oxyde protectrice (Al_2O_3) à leur surface, offrant une protection contre la corrosion atmosphérique et chimique. Cette propriété est accentuée par des traitements de surface tels que l'anodisation.

Conductivité thermique et électrique

Les alliages d'aluminium présentent une bonne conductivité thermique et électrique, bien qu'elle soit légèrement inférieure à celle de l'aluminium pur. Ils sont couramment utilisés dans des applications électriques (câbles, conducteurs) ainsi que dans des systèmes de refroidissement. [27 ; 28]

Usinabilité et formabilité

Les alliages d'aluminium se distinguent par leur facilité d'usinage, de forgeage et d'extrusion. Leur aptitude à être formés à chaud ou à froid en fait des matériaux adaptés à la fabrication de pièces complexes.

Soudabilité

Certains alliages d'aluminium, tels que les séries 1xxx, 3xxx et 5xxx, se prêtent facilement à la soudure, tandis que d'autres, comme les séries 2xxx et 7xxx, requièrent des techniques spécifiques en raison de leur susceptibilité à la fissuration. [27 ;28]

Résistance aux basses températures

Contrairement à de nombreux matériaux qui perdent leur intégrité à des températures réduites, les alliages d'aluminium maintiennent, voire renforcent, leurs caractéristiques mécaniques dans des conditions cryogéniques. Cette propriété les rend particulièrement adaptés aux secteurs aérospatial et pétrolier.

Recyclabilité

Les alliages d'aluminium présentent une caractéristique écologique remarquable : leur recyclabilité intégrale sans dégradation de leurs propriétés mécaniques et physiques. Ce processus de retraitement offre un avantage énergétique significatif, nécessitant seulement 5% de l'énergie consommée lors de la production d'aluminium primaire [27,28].

Limites : Bien qu'ils possèdent de nombreuses caractéristiques favorables, les alliages d'aluminium présentent certaines limitations, telles qu'une résistance à la fatigue et à la fissuration qui est inférieure à celle de certains aciers, ainsi qu'une vulnérabilité à la déformation à des températures élevées.

I.10 Imperfections dans les soudures FSW

En raison des caractéristiques spécifiques de la formation du cordon de soudure par friction malaxage, il est possible d'identifier des défauts propres à ce procédé. Ces défauts résultent des interactions entre les propriétés des matériaux, la configuration du pion et les paramètres opérationnels. « Arbogast » a examiné la genèse de ces défauts en se concentrant sur le flux de matière. Selon ses recherches, les défauts observés en FSW peuvent être regroupés en deux

catégories : les défauts qualifiés de « géométriques » et ceux engendrés par le flux de matière. Nous adopterons cette classification. [29]

Ces défauts sont souvent liés à un malaxage insuffisant ou à des conditions opérationnelles thermiquement inappropriées, c'est-à-dire soit trop élevées, soit trop basses. Parmi les défauts, on note la présence de bavures excessives, connues sous le terme de « Ribbon flash », qui se manifestent au niveau des bords de la soudure. Ce type de défaut résulte d'un flux de matière excessif au niveau de l'épaulement, entraînant l'expulsion de métal le long du cordon. Ce phénomène est souvent associé à une température trop élevée du matériau, causée par une pénétration excessive de l'outil.

On peut également observer divers types de défauts, tels que :

- Des défauts de surface, incluant la formation d'éraillures ou d'écaillures résultant du passage de l'épaulement, comme la figure (I.11). [29;30]



Figure I.11 Apparition de défauts de surface sous forme d'éraflures. [31]

- L'effondrement du noyau résulte d'un afflux de matière trop important au niveau de l'épaulement. Par conséquent, un excès de matière s'accumule à l'intérieur du noyau, [29] entraînant une macrographie est présenté à la figure (I.12) :

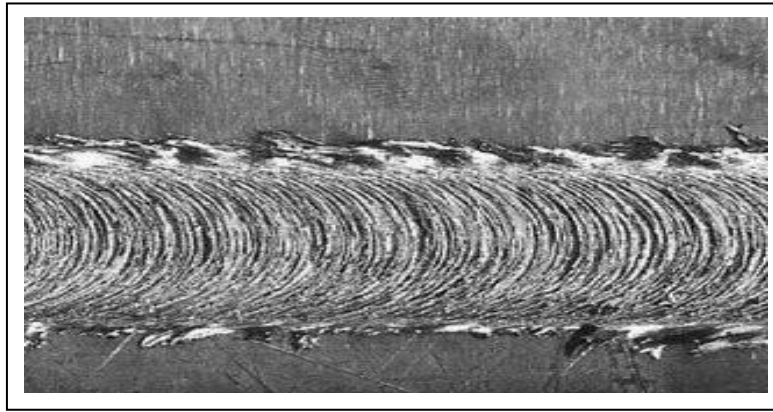


Figure I.12 Effondrement du noyau. [32]

- Ces imperfections se manifestent lorsque les conditions de fonctionnement sont excessivement élevées, entraînant un flux de matière excessif. Des conditions de fonctionnement trop élevées provoquent une diminution significative des propriétés mécaniques dans les zones touchées par la chaleur et les contraintes thermomécaniques. [29,30]
- Les défauts à la base du cordon, appelés « root flow », se forment à la surface des pièces lorsque l'outil pénètre de manière excessive dans celles-ci, comme la figure (I.13).



Figure I.13 Défaut à la racine du cordon. [31]

- La présence d'une rainure à la surface du cordon de soudure (fissures) résulte d'une insuffisance de consolidation du matériau, la figure (I.14). Ce défaut apparaît du côté de l'avance lorsque la profondeur de pénétration est insuffisante. Pour remédier à ce problème, il est conseillé d'augmenter l'effort de forgeage.

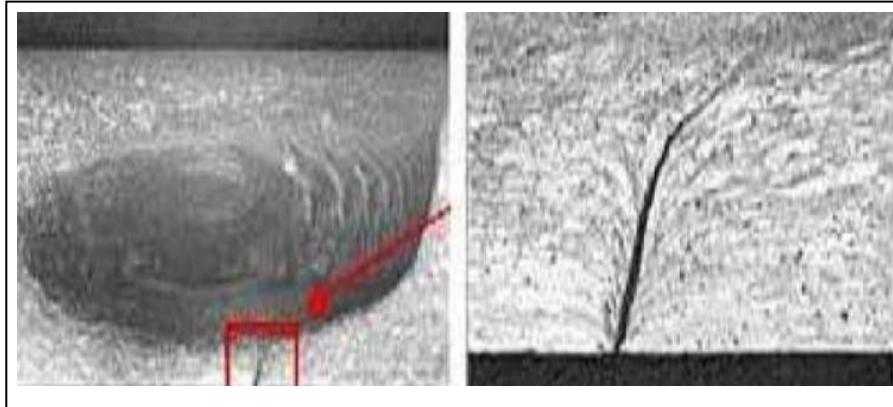


Figure I.14 Insuffisance de consolidation de la matière en surface. [30]

Les défauts typiques tels que le tunnel interne et la rainure superficielle surviennent principalement dans des conditions de soudage trop "froides", caractérisées par une énergie thermomécanique insuffisante conduisant à un malaxage incomplet du matériau. Ces imperfections peuvent également résulter d'un mauvais alignement des pièces en joint bout-à-bout ou d'un bridage inadéquat, favorisant des mouvements relatifs qui perturbent l'écoulement plastique du métal durant l'opération [29,30].

- La pénétration partielle se produit lorsque les deux pièces ne sont pas soudées sur l'intégralité de leur épaisseur, la figure (I.15).

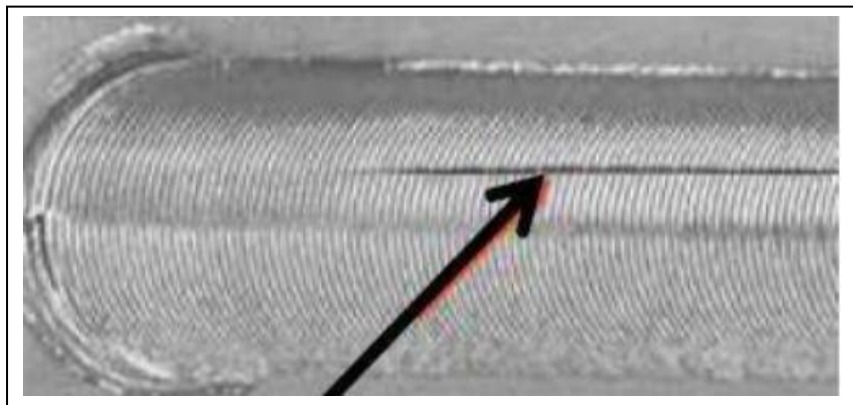


Figure I.15 Illustrant une soudure présentant un défaut de pénétration. [30]

- L'inclusion au sein de la ligne de joint, illustrée dans la figure, résulte du fait que la couche superficielle d'alumine n'a pas été suffisamment réduite, la figure (I.16), ce qui entraîne son emprisonnement dans le cordon de soudure sous la forme d'un film discontinu. [29 ; 30]

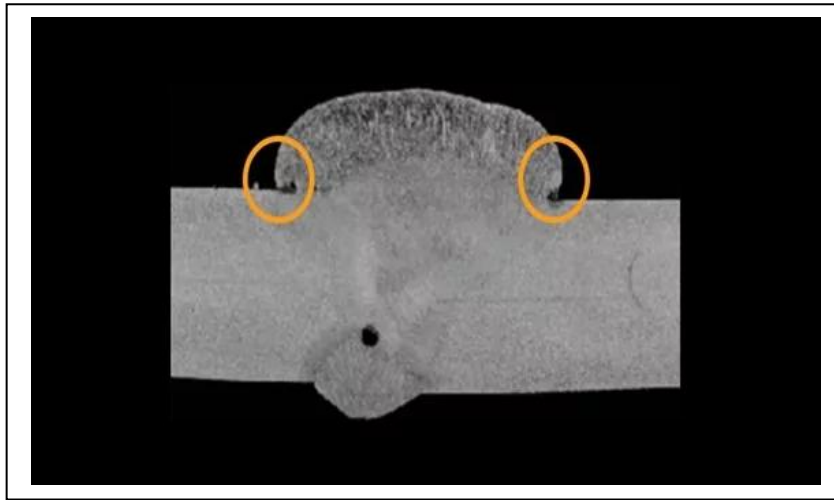


Figure I.16 Cordon de soudure sous la forme d'un film discontinu. [33]

I.11 Relation des paramètres de soudage et la température

L'alignement ainsi que la pression doivent être modifiés en fonction de la température de soudage. Par exemple :

- À des températures trop basses, une pression inadéquate peut exacerber les défauts de fusion et de consolidation.
- À des températures trop élevées, une pression excessive peut favoriser l'expulsion de matière ou entraîner des déformations.

I.12 Aspects physiques concernés

I.12.1 Mécanique

Les sollicitations mécaniques en FSW proviennent de deux phénomènes interdépendants : le frottement interfacial et la déformation plastique. Le premier résulte de l'interaction dynamique entre l'outil rotatif et le matériau, générant des contraintes de cisaillement dont l'intensité varie selon (1) la pression de contact, (2) la vitesse de rotation, et (3) le profil thermique local. Le second mécanisme combine deux effets complémentaires : le glissement du matériau le long des surfaces de l'outil et l'action de malaxage induite par le pion, conduisant à une redistribution homogène de la matière dans le joint soudé.

La zone directement soumise à l'outil présente des caractéristiques microstructurales distinctes :

- Modification des phases cristallines

- Écrouissage significatif
- Gradient de contraintes résiduelles contrôlé

Ces transformations, maximales dans la région où se superposent les gradients thermomécaniques les plus élevés, déterminent les propriétés mécaniques finales (résistance, ductilité) de l'assemblage. L'optimisation de ces mécanismes couplés constitue donc un enjeu critique pour la maîtrise des procédés de soudage par rotation [34].

I.12.2 Thermique

Le soudage par friction-malaxage (FSW) est un procédé autotherme qui génère sa propre chaleur sans recourir à des sources externes. La température nécessaire à la formation du joint est produite par deux phénomènes complémentaires : le frottement entre l'outil rotatif et les pièces à assembler, ainsi que la déformation plastique intense du matériau. Ces mécanismes permettent d'atteindre des températures comprises entre 70% et 80% du point de fusion du métal de base, suffisantes pour assurer une plastification optimale tout en maintenant le matériau à l'état solide. Comme le montre la figure I.17, ce processus crée un profil thermique caractéristique dans la zone soudée, marqué par des gradients de température spécifiques et une distribution asymétrique de la chaleur. Cette particularité thermodynamique explique les avantages du FSW en termes d'économie d'énergie et de qualité métallurgique des assemblages [34].

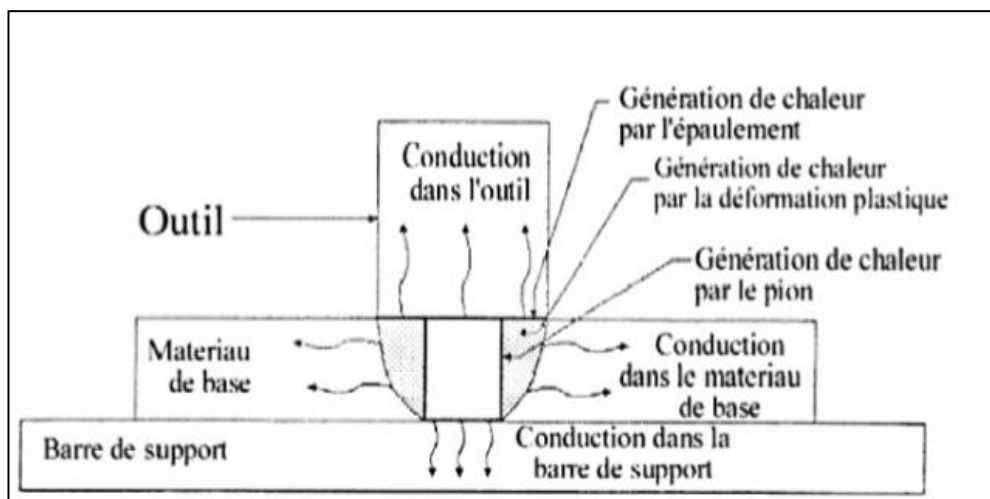


Figure I.17 Transferts thermiques par conduction au cours du soudage FSW. [35]

I.12.3 Métallurgie

Le soudage par fusion provoque des modifications microstructurales importantes dans le matériau de base, altérant ses propriétés mécaniques [34]. Ces transformations métallurgiques

indésirables incluent des changements dans la précipitation et la recristallisation, créant des zones sensibles aux concentrations de contraintes. À l'inverse, le soudage par friction-malaxage (FSW) génère des modifications moins sévères grâce à son processus thermomécanique mieux contrôlé. L'examen microstructural révèle clairement deux zones distinctes : la Zone Affectée par la Chaleur (HAZ), principalement influencée par les effets thermiques, et la Zone Affectée Thermo-Mécaniquement (TMAZ), soumise à la fois à des sollicitations thermiques et mécaniques. Ces zones présentent des caractéristiques uniques déterminées par leur histoire thermique, l'ampleur des déformations subies et les transformations métallurgiques spécifiques, expliquant les performances supérieures des assemblages FSW.. Comme la figure (I.18).

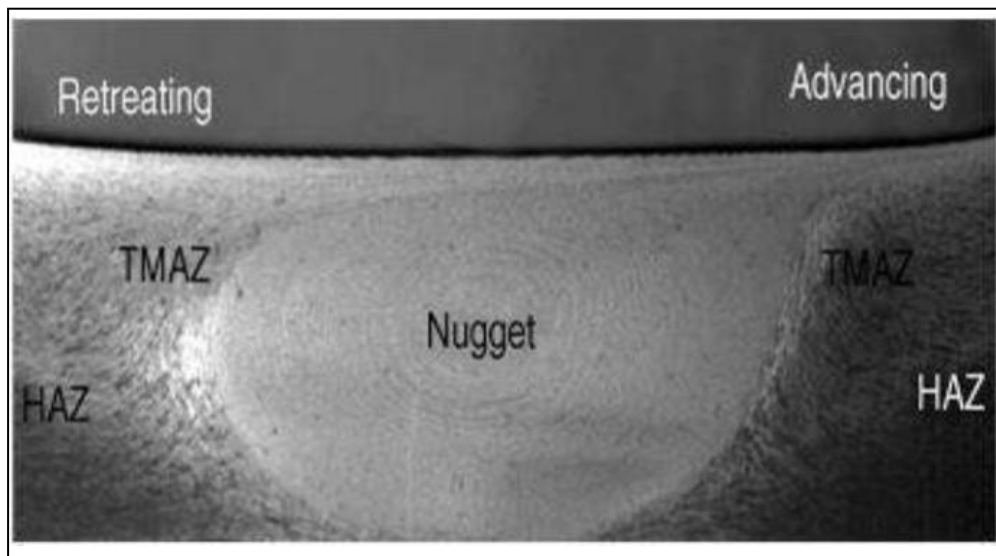


Figure I.18 Section d'une soudure réalisée sur un alliage d'aluminium. [34]

Conclusion

Ce chapitre a offert une analyse bibliographique concernant la technique de soudage par friction malaxage (FSW). Cette analyse nous a permis d'appréhender les phénomènes physiques associés au procédé de soudage, ce qui a conduit à l'établissement des conditions appropriées pour notre modèle thermique à étudier.

Chapitre II

**ANALYSE DES CONTRAINTES THERMIQUES DANS
SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE.**

II.1 Introduction

Les thermomètres sont indispensables pour déterminer la qualité et l'efficacité de l'assemblage par malaxage par friction (FSW). En effet, les variations de température au cours de ce procédé ont un impact direct sur la microstructure, les propriétés mécaniques et la stabilité des joints de soudure. Ce traitement augmente le risque de développer des déficiences majeures telles que des déformations, des concentrations accrues de contre-indications ou une diminution de la résistance à la fatigue. Ceci contredit l'origine de la nature du processus : le produit généré par la fuite et la déformation plastique engendre des asymétries des cycles thermiques, y compris des dilatations locales et des déformations plastiques locales. Ces effets sont particulièrement significatifs dans les zones affectées thermomécaniques (TMAZ) et les zones affectées thermiquement (HAZ), où les éléments chauffants microstructuraux augmentent les risques de fissures.

II.2 Objectif

Ce chapitre a pour but de développer une méthode systématique afin de comprendre et de quantifier les interactions complexes entre les phénomènes thermiques et mécaniques dans le processus de soudage par friction-malaxage (FSW). Nos objectifs spécifiques s'articulent autour de trois axes principaux :

- Modélisation du champ thermique
- Analyse des contraintes mécaniques et thermiques générées
- Validation par des approches expérimentales et numériques

L'originalité de cette démarche réside dans l'intégration systématique de la modélisation physique, de la simulation numérique et de la validation expérimentale, ce qui permet d'élaborer des recommandations pratiques pour l'optimisation du procédé FSW.

II.3 Problématique

Le soudage par friction malaxage (FSW) engendre des « gradients thermiques complexes » en raison de la chaleur générée localement et du refroidissement non uniforme. Ces gradients ont un impact direct sur l'intensité et la répartition des « contraintes résiduelles », influençant ainsi la qualité mécanique et géométrique des assemblages. Dans ce cadre, deux questions principales se posent :

1. De quelle manière les gradients thermiques affectent-ils les contraintes résiduelles ?
 - Quel est le rapport entre les profils de température (nugget, TMAZ, HAZ) et la répartition des contraintes résiduelles ?
 - Dans quelle mesure les dilatations inégales et les déformations plastiques causées par les cycles thermiques contribuent-elles à la formation de zones critiques (fissures, distorsions) ?
2. Quels facteurs déterminent la répartition de la température ?
 - Comment les paramètres du procédé (vitesse de rotation (ω), vitesse d'avance (v), géométrie de l'outil) influencent-ils les sources de chaleur (frottement, déformation plastique) ?
 - Quelles sont les relations entre ces paramètres et les propriétés thermo physiques du matériau (conductivité, capacité calorifique) ?

II.4 Phénomènes physiques observés lors du FSW

II.4.1 Altération plastique du matériau soudé

L'écoulement du matériau induit par l'outil lors du FSW présente une complexité notable en raison de l'impossibilité d'observation directe, nécessitant le recours à des méthodes d'analyse indirectes.

Ce procédé d'assemblage à l'état solide s'apparente mécaniquement aux opérations de mise en forme telles que le forgeage ou l'extrusion.

La déformation plastique résulte de l'action combinée de deux mouvements cinématiques : (1) une rotation générant un champ de vitesse tangentielle responsable d'un écoulement cylindrique puis conique autour du pion (Fig. 1-a et II.1) [36], et (2) une translation provoquant un déplacement horizontal de la matière plastifiée selon un mécanisme similaire à l'extrusion (Fig. 1-b).

Ces phénomènes d'écoulement, fortement influencés par la géométrie de l'outil et les paramètres opératoires, déterminent la qualité métallurgique du joint soudé.

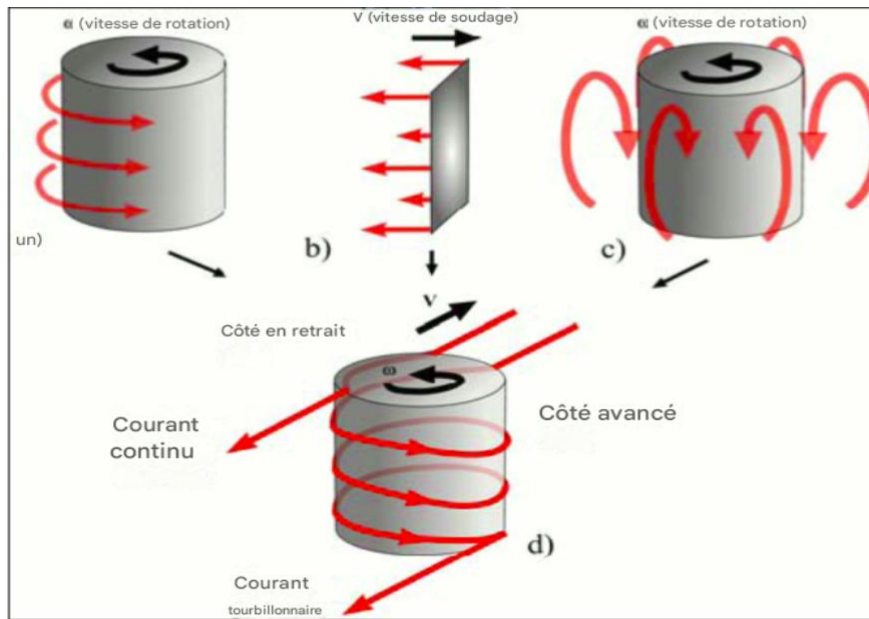


Figure II. 1 La translation de l'outil en direction du joint de la matière. [36]

Dans les dispositifs à configuration hélicoïdale, le matériau au contact de la tige subit un déplacement vertical dont la direction (ascendante ou descendante) dépend de la géométrie des filets et du sens de rotation. Le caractère incompressible du métal, associé à son confinement par l'épaulement, le support inférieur et le matériau environnant non plastifié, conduit à un mouvement oscillatoire vertical (Fig. 1-c). La superposition de ce mouvement avec les composantes rotationnelle et translationnelle génère un écoulement spiralé complexe (Fig. 1-d) [36], caractéristique essentielle influençant l'homogénéité du mélange et la qualité du joint soudé.

II.4.2 Génération de chaleur

L'élévation thermique joue un rôle fondamental dans le processus FSW en réduisant significativement la contrainte d'écoulement du matériau, ce qui facilite sa déformation plastique. Cette augmentation de température résulte principalement de deux phénomènes physiques distincts : (1) la dissipation énergétique par déformation plastique volumique et (2) le frottement interfacial générant un flux de chaleur à l'interface outil-matériau. La contribution relative de ces mécanismes dépend étroitement des conditions de contact à l'interface. Dans le cas extrême d'un contact collant (adhésion totale), où les vitesses de l'outil et du matériau sont identiques, la chaleur provient exclusivement de la déformation plastique. À l'inverse, un contact glissant induit un transfert thermique supplémentaire par frottement, décrit par la loi de Coulomb. Bien que ces principes soient établis, la quantification précise

des contributions thermiques respectives et leur dépendance aux paramètres opératoires restent des aspects nécessitant des investigations plus approfondies.

$$\tau = \mu_f \sigma \quad (1)$$

Où τ désigne le cisaillement à l'interface, μ_f le coefficient de frottement et σ la contrainte normale appliquée. Le contact collant constitue le cas extrême de cette loi, où le cisaillement à l'interface équivaut à la contrainte d'écoulement du matériau. [37]

Le couple exercé par l'outil, paramètre mesurable durant l'opération de soudage, est directement corrélé aux contraintes de cisaillement, tandis que la force axiale dépend principalement des contraintes normales. Cette relation mécanique implique une proportionnalité entre le couple et la force verticale en présence de phénomènes de frottement interfacial. Les approches de modélisation récentes intègrent simultanément les deux sources thermiques : (1) la dissipation surfacique par frottement et (2) la génération volumique par déformation plastique. Ces modèles démontrent une bonne adéquation avec les profils thermiques expérimentaux dans le cas de conditions de contact adhérent. Cependant, l'utilisation exclusive d'un modèle basé sur le frottement interfacial, avec un coefficient de frottement estimé, conduit systématiquement à des prédictions thermiques supérieures aux valeurs réelles [37], révélant ainsi la nécessité de considérer les deux mécanismes thermogènes pour une modélisation fidèle du procédé.

II.4.3 Energie et puissance de soudage

De nombreux chercheurs ont tenté d'établir une relation entre la température maximale observée et les divers paramètres de soudage, mais ces efforts n'ont pas abouti. Selon les travaux de Reynolds et al, il est complexe de corrélérer un seul paramètre de soudage avec la température maximale mesurée au centre du joint. En réalité, c'est une interaction complexe entre ces différents paramètres qui détermine la température observée. Néanmoins, cette interaction peut être considérée de manière indirecte en utilisant la puissance $W_{m\acute{e}canique}$ développée par la machine comme un paramètre global de soudage. Cette puissance peut être exprimée par la formule suivante :

$$W_{m\acute{e}canique} = \eta M \omega \quad (2)$$

Où M représente le couple appliqué à l'outil en rotation, ω désigne la vitesse de rotation et η correspond au rendement. Ce dernier est légèrement inférieur à 100 %, car une partie de l'énergie est perdue sous forme de chaleur dans l'équipement. Par conséquent, l'énergie transmise par l'outil n'est pas entièrement utilisée dans les pièces à souder. [38]

L'énergie de soudage (H) représente l'énergie apportée par unité de longueur. Elle se calcule en divisant la puissance de soudage par la vitesse d'avance :

$$H = \frac{W_{m\acute{e}canique}}{v} = \frac{\eta M \omega}{v} = \frac{\eta M}{k} \quad (3)$$

Où k désigne la distance parcourue par tour.

La détermination de la puissance mécanique et de l'énergie de soudage repose sur la mesure précise du couple exercé par l'outil, grandeur directement influencée par les paramètres opératoires. Ce couple constitue un indicateur clé des conditions thermomécaniques locales, variant en fonction : (i) des propriétés du matériau à la température de soudage, (ii) de la géométrie de l'outil, et (iii) des vitesses de rotation et d'avance. Son amplitude reflète ainsi l'intensité des interactions outil-matériau et permet d'estimer l'énergie dissipée durant le procédé.

II.4.4 Cycles thermiques

L'étude des profils thermiques dans les différentes zones du joint soudé revêt une importance capitale pour prédire à la fois l'évolution microstructurale (notamment l'état de précipitation) et l'apparition de contraintes résiduelles. La caractérisation expérimentale de ces cycles thermiques repose principalement sur l'utilisation de thermocouples positionnés stratégiquement, malgré les défis techniques liés à l'incertitude des mesures causée par la qualité du contact sonde-matériau. Cette approche demeure néanmoins la méthode la plus directe pour quantifier le transfert thermique réel. Des investigations systématiques ont ainsi révélé une corrélation entre le diamètre d'épaulement et le gradient thermique, avec des températures plus élevées observées pour les outils de plus grand diamètre à distance équivalente du joint. Toutefois [39], l'absence de quantification précise des incertitudes de mesure limite l'interprétation absolue des résultats, mettant en lumière la nécessité d'approches complémentaires pour une caractérisation thermique plus fiable.

II.4.5 Contraintes résiduelles liées au soudage

Le processus de soudage est souvent à l'origine de l'apparition de contraintes résiduelles. Ces contraintes, qui demeurent piégées dans la pièce après l'achèvement du soudage, résultent d'un chauffage localisé et d'un refroidissement inégal. Cela engendre une distribution complexe des contraintes résiduelles au niveau de la zone de joint, entraînant ainsi des déformations ou des distorsions indésirables de la structure soudée. La nature de la contrainte résiduelle peut être à la fois bénéfique et nuisible, selon qu'elle soit compressive ou t'ensile. Les contraintes résiduelles de traction peuvent favoriser l'initiation de fissures, diminuer le rendement ou provoquer la défaillance du produit. De plus, ces contraintes peuvent accroître la susceptibilité aux dommages par fatigue, fluage ou dégradation due à des facteurs environnementaux. En revanche, les contraintes de compression peuvent induire des modifications dans les performances du matériau. [40]

II.4.6 Interaction thermique outil-pièce

Les interactions mécaniques outil-pièce affectent la génération de chaleur, assurant une augmentation rapide de la température et un effet d'autolimitation, intrinsèque à la physique du processus, qui permet d'atteindre des températures élevées, parfois supérieures à celles de solidus, mais jamais au-dessus de celles de la fusion. La friction entre les deux corps solides au début du processus est telle qu'elle provoque une augmentation rapide de la température. La température à l'interface augmente au fur et à mesure qu'elle se diffuse dans le matériau, et la production de chaleur commence à diminuer au fur et à mesure que la résistance du matériau diminue.

Les températures plus élevées entraînent une baisse des propriétés mécaniques jusqu'à ce que le matériau atteigne un certain degré de ramollissement. La production de chaleur due au frottement diminue considérablement, ce qui détermine la stabilité thermique du procédé en ce qui concerne l'apport de frottement.

En général, si cette stabilité thermique induite par le frottement n'est pas atteinte, il est très probable que ce soit dans des conditions de soudage où la résistance du matériau est élevée et où l'outil a du mal à tourner et à avancer dans le milieu. La conséquence est une faible fluidité du matériau autour de l'axe avec la possibilité d'apparition de défauts internes ou externes induits par une configuration de soudage "à froid".

En plus de la contribution au frottement, il y a la chaleur générée par la déformation plastique. Une partie de l'énergie nécessaire pour déformer un matériau en plastique est transformée en chaleur, ce qui augmente la température. De plus, dans FSW, même si les températures atteintes par frottement sont élevées, la déformation plastique localisée dans le petit volume de matériau mélangé par l'outil en rotation provoque des augmentations de température locales. Le T induit par la déformation plastique est ajouté à celui obtenu grâce au frottement, déterminant la température de crête du FSW.

Connaître et comprendre le lien entre mécanique et thermique est fondamental car c'est précisément cela qui détermine le résultat final du processus (qualité et propriétés mécaniques de l'articulation). La thermique définit à la fois les propriétés viscoplastiques et l'écoulement de la matière pour assurer le remplissage correct de la cavité laissée par l'avancement de l'outil et le choc thermique subi par la matière de base et donc les propriétés mécaniques finales du joint. Pour cette raison, diverses études ont été faites au fil du temps pour étudier la tribologie du contact outil-pièce pour quantifier les coefficients de frottement [41], pour comprendre les différences possibles dans le contact entre les conditions de collage ou de glissement [42] selon la zone d'outil [43] et les paramètres du processus [44]. L'objectif était de comprendre le contact, déterminer les débits impliqués dans la production de chaleur liée à divers phénomènes, et développer des modèles capables de simuler d'abord la thermomécanique du processus. Cependant, malgré les efforts et la compréhension qu'un état mixte de glissement-collage existe au contact entre l'outil et la pièce à usiner, pour aller plus loin, cet aspect est complexe, et encore aujourd'hui, la communauté n'a pas été en mesure de distinguer les contributions réelles des éléments individuels.

II.5 Aspects thermiques du procédé : évaluation de l'élévation de température

La mesure de la température lors du soudage par friction malaxage (FSW) est complexe en raison des déformations induites par le procédé, qui empêchent une prise directe dans la zone soudée. La plupart des chercheurs utilisent des thermocouples placés en dehors de la zone affectée par l'outil, puis extrapolent les données (Jacquin et al, 2011 ; Li et al., 2012 ; etc.). Bien que cette méthode soit laborieuse, certains ont tenté des mesures dans la zone déformée avant la destruction des capteurs (Li et al., 2006). D'autres approches, comme l'utilisation de caméras thermiques (Santiago et al, 2009 ; Zettler et al, 2006), permettent d'obtenir des températures de surface, mais pas en profondeur. Ces techniques sont cependant insuffisantes

pour étudier les gradients thermiques locaux, cruciaux pour les analyses numériques et métallurgiques, comme la figure (II.2). [45 ; 46 ; 47 ; 48 ; 49]

Pour une mesure plus précise, une solution consiste à instrumenter l'outil lui-même (Guerdoux et Fourment, 2007), comme l'a fait Jemal et al. (2011). Cette méthode permet un enregistrement continu des températures au contact outil/matière, utile pour modéliser les régimes transitoires. Toutefois, la résistance thermique à l'interface doit être prise en compte. Une connaissance exacte des températures dans la zone soudée est essentielle pour comprendre leur impact sur la microstructure et pour calibrer les modèles thermiques. [50 ;51]

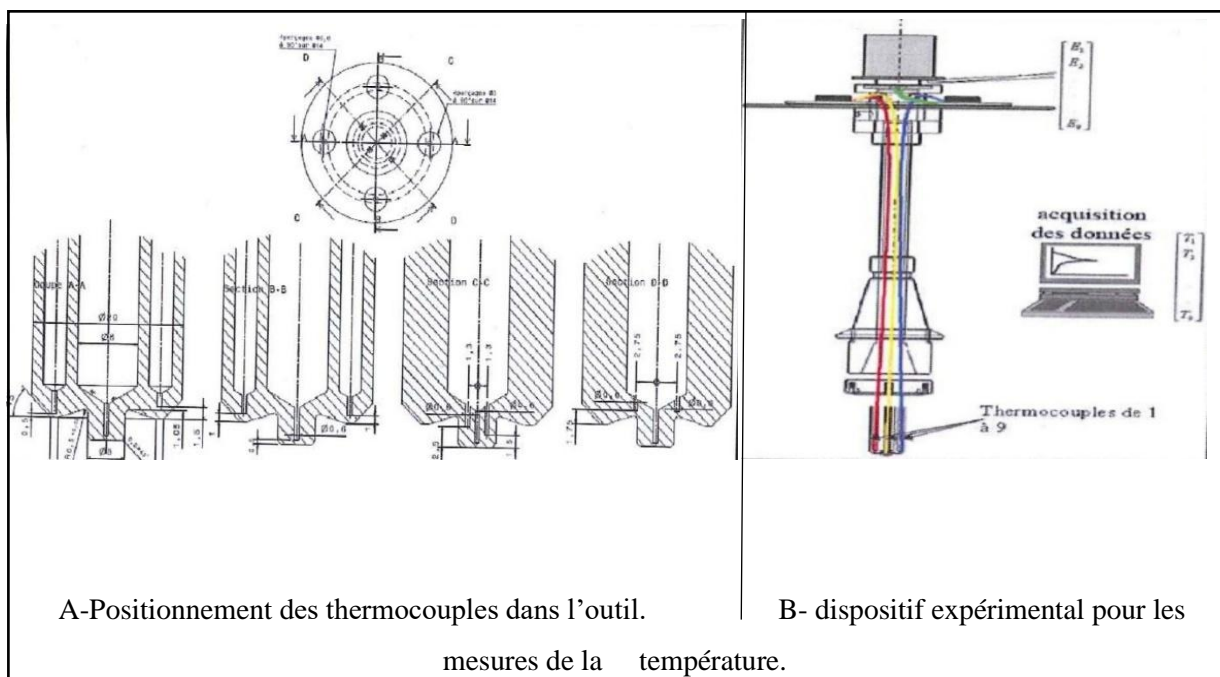


Figure II. 2 Dispositif conçu pour évaluer la température (Jemal et al. [2011]). [51]

II.6 Modélisation mécanique

Les approches de modélisation mécanique du soudage par friction malaxage (FSW) se divisent en deux catégories principales. D'une part, les modèles basés sur la mécanique des milieux continus solides permettent d'analyser le comportement élastoplastique du matériau, particulièrement utile pour étudier les contraintes résiduelles et les déformations structurales à l'échelle macroscopique. D'autre part, les modèles issus de la mécanique des fluides sont plus adaptés pour décrire les phases de déformation plastique intense lors du procédé. Ces différentes approches de modélisation offrent des outils précieux pour simuler et optimiser les paramètres opérationnels du FSW, tout en contribuant à une meilleure compréhension des

phénomènes thermomécaniques complexes impliqués dans ce processus de soudage à l'état solide.. Figure (II.3).

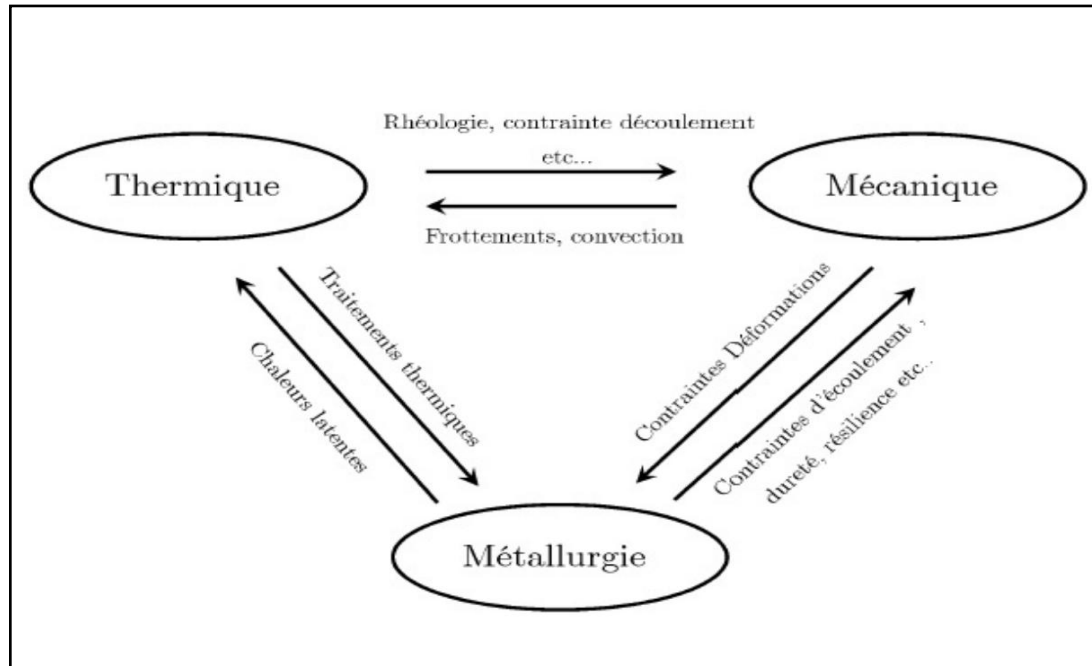


Figure II. 3 Interactions thermiques, mécaniques et métallurgiques dans le procédé de soudage par friction-malaxage (FSW). [52]

Modélisation en mécanique des solides Les modèles en mécanique des solides reposent sur l'équation de continuité ainsi que sur l'équation régissant la dynamique des solides, qui s'énoncent respectivement comme suit :

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (4)$$

$$\overrightarrow{div}(\tilde{\sigma}) = m \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \vec{f} \quad (5)$$

Où $\tilde{\sigma}$ désigne le tenseur des contraintes, \vec{f} représente les forces volumiques souvent négligées dans le processus de soudage FSW, et \vec{v} correspond au champ de vitesse. Le tenseur de contrainte de Cauchy introduit un couplage avec la température et la non-linéarité au sein du système. La loi d'écoulement, également appelée loi constitutive, se formule à travers la contrainte équivalente $\tilde{\sigma}$:

$$\tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T, P) \quad (6)$$

Où \mathbf{P} englobe l'ensemble des paramètres définis dans l'équation constitutive de la rhéologie du matériau.

La résolution numérique s'effectue généralement par la méthode des éléments finis, qui combine :

- Une formulation variationnelle faible (approche de Galerkin)
- Une discrétisation spatiale du domaine

Certaines simplifications sont parfois adoptées :

- Introduction de champs de température expérimentaux
- Hypothèse de température uniforme pour des modèles purement mécaniques

La formulation éléments finis repose sur le principe des puissances virtuelles, exprimant l'équilibre sous forme faible :

$$\overrightarrow{div}(\tilde{\sigma}) \cdot \delta \mathbf{v}^{\rightarrow} = \left(m \frac{\partial \mathbf{v}^{\rightarrow}}{\partial t} - \mathbf{f}^{\rightarrow} \right) \cdot \delta \mathbf{v}^{\rightarrow} \quad (7)$$

Cette approche permet de prendre en compte les couplages complexes entre thermique et mécanique tout en conservant une base physique rigoureuse.

Dans le cadre de la simulation numérique en mécanique des solides appliquée au procédé FSW, comme la figure (II.4), une approche lagrangienne est généralement utilisée en raison de sa capacité à suivre le déplacement des particules de matière, ce qui est essentiel pour l'analyse de l'évolution thermomécanique et microstructurale. Toutefois, les fortes déformations engendrées par le processus induisent des distorsions importantes du maillage, nécessitant des opérations de remaillage. Cela peut compromettre le suivi précis des particules et, par conséquent, l'étude de la microstructure. Pour pallier ces limitations, une formulation mixte de type **Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)** est proposée par plusieurs chercheurs (Guerdoux et Fourment, 2007 ; Schmidt et Hattel, 2005). Cette méthode combine les avantages des approches lagrangienne et eulérienne : elle permet de maintenir un suivi local des interfaces tout en autorisant un écoulement continu du matériau, ce qui facilite la prédiction des défauts (vides, discontinuités) et l'optimisation des conditions d'interface, notamment le coefficient de frottement. [53]

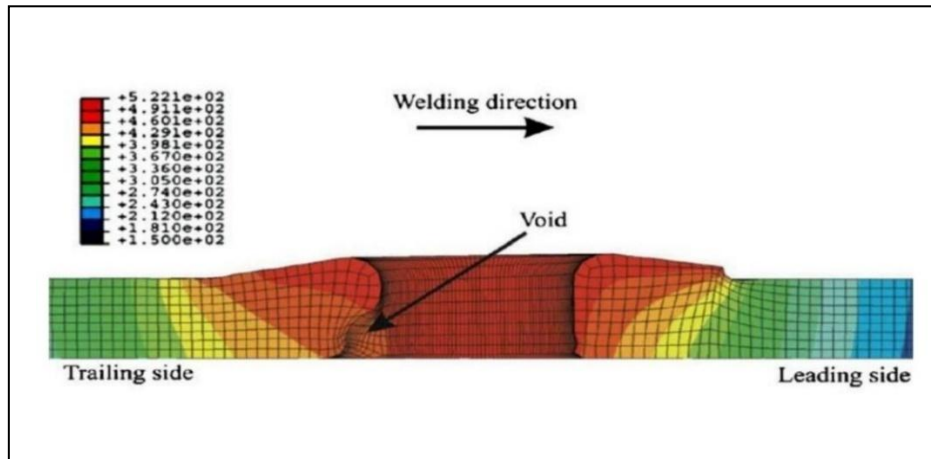


Figure II. 4 Application d'une formulation ALE pour simuler l'écoulement plastique du matériau et l'émergence de défauts de soudure. [53]

II.7 Modélisation thermique

En règle générale, les modèles thermiques associés au soudage par friction-malaxage (FSW) reposent sur l'équation classique de conservation de l'énergie, également connue sous le nom d'équation de la chaleur, formulée comme suit :

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \text{grad}(T) \right) = \lambda \Delta T + \Gamma_d \tilde{\sigma}_0 \dot{\tilde{\epsilon}} \quad (8)$$

Où ρ représente la densité, c la capacité calorifique, λ le coefficient de conductivité thermique, Γ_d le coefficient de chaleur de déformation inélastique selon Taylor Quinney, $\tilde{\sigma}_0$ la contrainte d'écoulement de Von Mises, et $\dot{\tilde{\epsilon}}$ La vitesse de déformation équivalente de Von Mises.

Le couplage mécanique est associé à la vitesse supposée \vec{v} , qui est liée aux variables mécaniques $\tilde{\sigma}_0$ et $\dot{\tilde{\epsilon}}$. Pour éviter des calculs mécaniques jugés peu pertinents ou coûteux, des modèles thermiques spécifiques au soudage ont été développés. Ceux qui estiment que la composante mécanique est peu utile pour leur application ont ainsi conçu des modèles exclusivement thermiques. Ces derniers sont employés pour déterminer la distribution de température au sein du joint et son évolution durant le processus de soudage. Les cycles thermiques ainsi obtenus sont précieux pour anticiper les contraintes résiduelles générées par le soudage, et par conséquent, la déformation qui en découle. De plus, ces modèles permettent

La prédiction de l'évolution des précipitations et des propriétés mécaniques des alliages lors du soudage par friction malaxage (FSW) peut être abordée par des approches simplifiées utilisant des formulations analytiques.

Ces méthodes, alternatives aux simulations numériques couplées thermomécaniques, reposent sur des relations empiriques dérivées d'observations expérimentales ou sur des analogies avec les écoulements en mécanique des fluides (Jacquin et al., 2011 ; Zhang et al., 2011 ; Arora et al., 2011 ; Heurtier et al., 2006 ; Schmidt & Hattel, 2008) [54–57]. Par ailleurs, la génération de chaleur dans le FSW résulte de deux contributions principales : (i) le frottement interfacial entre l'outil et le matériau, et (ii) la dissipation plastique dans la zone déformée autour de l'outil.

Ces mécanismes thermogènes, dont les contributions relatives dépendent des conditions de soudage, influencent directement la microstructure et les performances mécaniques du joint.

II.7.1 Puissance de frottement

Le frottement entre l'outil et la matière se divise en deux catégories : le frottement entre le pion et la matière, ainsi que celui entre l'épaulement et la matière. Il est fréquent que la puissance de frottement entre le pion et la matière soit sous-estimée. Pour évaluer la puissance de frottement entre l'outil et la matière, les chercheurs se réfèrent généralement à l'une des quatre lois suivantes : parmi celles-ci, la **loi de Tresca**, qui relie la puissance de frottement à la contrainte d'écoulement de la matière, est particulièrement notable :

$$\Phi_f = \bar{m} \frac{\bar{\sigma}_0}{\sqrt{3}} \Delta \mathbf{v}_s \quad (9)$$

De plus, une fois que la puissance de frottement est établie, il reste à déterminer comment cette puissance se répartit entre l'outil (α outil) et les pièces à assembler (α matière). Le coefficient de partage α matière est habituellement défini en fonction des effusivités $e = \sqrt{(p_c p_\lambda)}$ des matériaux en contact. [58]

$$\alpha_{matière} = \frac{e_{matière}}{e_{matière} + e_{outil}} \quad (10)$$

II.7.2 Puissance de déformation

La puissance de déformation inélastique est généralement reconnue par de nombreux chercheurs comme la principale source d'énergie dans le soudage par friction-malaxage

(FSW). La majorité de cette énergie est transformée en chaleur. Cette chaleur, notée φ_d , est intégrée dans l'équation thermique par le terme suivant :

$$\Gamma_d \tilde{\sigma}_0 \dot{\epsilon} \quad (11)$$

Où Γ_d représente le coefficient de Taylor-Quinney, qui quantifie la proportion d'énergie de déformation inélastique convertie en chaleur. Un coefficient Γ_d égal à 1 indique que l'intégralité de l'énergie de déformation inélastique est transformée en chaleur. Pour l'aluminium, Γ_d est souvent estimé à 0,9. Cependant, certains chercheurs, tels que Song et Kovacevic [2003], ont minimisé l'impact de la déformation inélastique sur les aspects thermiques du processus. [59]

II.7.3 Chaleur de friction

La chaleur générée par la friction entre l'outil (épaulement et pion) et la surface du matériau est la source dominante. Elle est généralement exprimée par :

$$Q_f = \mu \cdot P \cdot \omega \cdot R^2 \quad (12)$$

Où :

μ = coefficient de frottement entre l'outil et le matériau,

P = pression normale appliquée par l'outil,

ω = vitesse angulaire de rotation de l'outil (rad/s),

R = rayon de contact de l'épaulement (m).

II.7.4 Flux thermique

Dans le cadre du procédé de soudage par friction-malaxage (FSW), la chaleur est principalement générée par le frottement entre l'outil et le matériau (source de chaleur 1 surfacique), comme la figure (II.5). Il est généralement admis que 90 % de l'énergie produite par le frottement se transforme en chaleur [Schmidt+2008]. Les 10 % restants sont consacrés à la déformation plastique du matériau (malaxage) et sont associés à divers mécanismes métallurgiques, tels que la création et le réarrangement des dislocations, ainsi que la précipitation et la dissolution de phases, qui constituent une seconde source de chaleur (source de chaleur 2 volumique). Toutefois, cette chaleur latente est considérée comme négligeable

Le bilan énergétique du soudage par friction malaxage est dominé par la conduction thermique vers trois composantes principales : le matériau soudé, l'outil et l'enclume. Cette dissipation thermique, dont la répartition dépend des propriétés thermophysiques des matériaux et des résistances de contact aux interfaces, montre que la contribution de la déformation plastique reste généralement inférieure à celle du frottement. Les études expérimentales et numériques confirment que les températures maximales atteintes lors du procédé n'excèdent pas 80% du point de fusion du matériau de base (Feulvarch et al., 2016) [60], caractéristique fondamentale expliquant les avantages métallurgiques du FSW par rapport aux techniques de soudage par fusion.

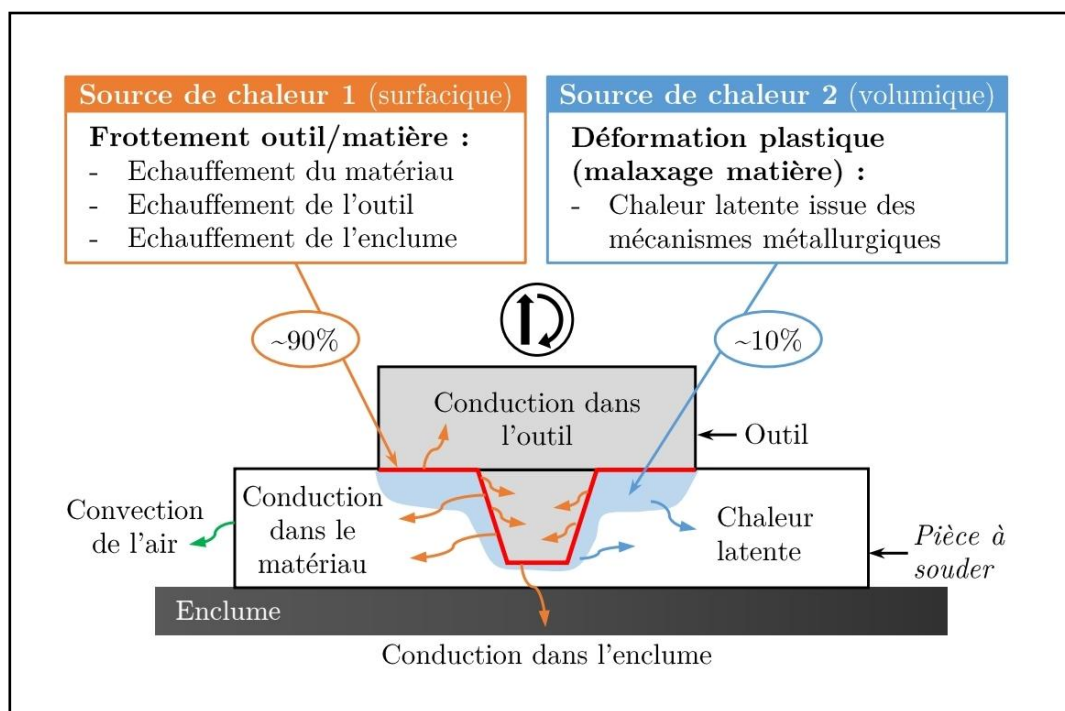


Figure II. 5 Résumé des phénomènes ayant conduit à l'établissement d'un flux de chaleur. [60]

La zone thermo-mécaniquement affectée, dont l'étendue correspond approximativement au diamètre de l'épaulement, présente des caractéristiques microstructurales distinctes. Située à proximité immédiate du noyau, cette région subit : (1) un échauffement notable bien que moins intense que dans le noyau, et (2) des déformations plastiques importantes induites par le cisaillement mécanique. Contrairement au noyau, les conditions thermomécaniques dans cette zone ne permettent généralement pas d'atteindre le seuil de recristallisation dynamique.

II.7.5 Sources de chaleur en FSW

Dans le cadre du FSW, les sources de chaleur se divisent en deux catégories :

• Sources volumiques

Les sources de chaleur volumiques proviennent des déformations plastiques, ce qui les relie aux lois de comportement des matériaux à souder [60 ; 61].

$$\frac{q}{V} = f \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} \tag{13}$$

Ici, f est un facteur compris entre 0,9 et 1, représentant le pourcentage d'énergie converti en chaleur, $\bar{\sigma}$ tandis que désigne la contrainte équivalente et $\dot{\bar{\epsilon}}$ le taux de déformation équivalente. Cette source est généralement intégrée dans les modèles couplés thermo-mécaniquement.

• Sources surfaciques

Le soudage par friction malaxage produit des flux thermiques principalement à deux interfaces : épaulement-matériau et pion-matériau. Khandkar et al. [62] ont développé un modèle calculant ces flux à partir de la puissance totale dissipée, avec une répartition linéaire selon le rayon de l'outil. Cette modélisation, qui intègre la géométrie de l'outil, nécessite une évaluation précise des paramètres de contact et des propriétés tribologiques pour une bonne fiabilité.

$$q(r) = \frac{P_{av}}{\frac{2}{3} \pi r_{shoulder}^2 + 2 \pi r_{probe} H} \tag{14}$$

Avec P_{av} représentant la puissance moyenne fournie à l'outil, et $r_{shoulder}^2$ et r_{probe} désignant respectivement le rayon de l'épaulement, le rayon du pion et H sa hauteur. La modélisation de H. Schmidt et al. Figure (II.6). [19]

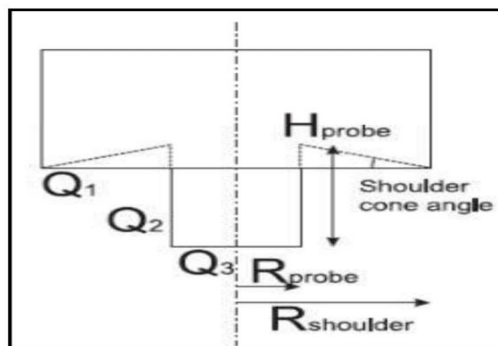


Figure II. 6 Répartition des flux thermiques dans l'outil. [62]

La chaleur générée par chaque surface est déterminée en intégrant sur la zone de contact entre l'outil et les pièces à souder. La chaleur par unité de surface est évaluée en fonction de la chaleur perdue par frottement, selon l'équation suivante [63] [64] :

$$dq = \omega dM = \omega r dF = \omega r \tau_{\text{contact}} dA \quad (15)$$

Avec ω représente la vitesse angulaire en rad/s, τ_{contact} est la contrainte de cisaillement en N/m² et A est l'aire de la surface de contact.

D'où la quantité de chaleur totale :

$$q_{\text{total}} = q_1 + q_2 + q_3 \quad (16)$$

Dans les modèles numériques couplés thermo-mécaniquement, [65] utilisent généralement l'expression de la source de chaleur surfacique sous la forme suivante :

$$q = \tau V_g \quad (17)$$

V_g Étant la vitesse de glissement entre la matière et l'outil, et τ représente la contrainte tangentielle.

II.7.6 Conditions aux limites

Le transfert de chaleur entre la matière et son environnement se fait par convection, ce qui est représenté par un coefficient de convection thermique noté h.

L'équation régissant le transfert thermique par convection s'exprime de la manière suivante :

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_0) \quad (18)$$

Pièce/milieu ambiant :

Où T_0 représente la température de l'environnement.

Pour faciliter l'élaboration des modèles thermiques, l'échange de chaleur entre l'enclume et les pièces à souder est souvent simplifié par l'utilisation d'un coefficient de convection. Khandkar et al. [18] ont procédé à l'optimisation de ce coefficient d'échange thermique dans

leurs modèles. En adoptant un coefficient de convection de $h=1000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, ils ont réussi à aligner leur modèle avec les données de température mesurées.[66]

La figure ci-après (II.7) illustre un exemple des conditions aux limites prises en compte lors du soudage FSW :

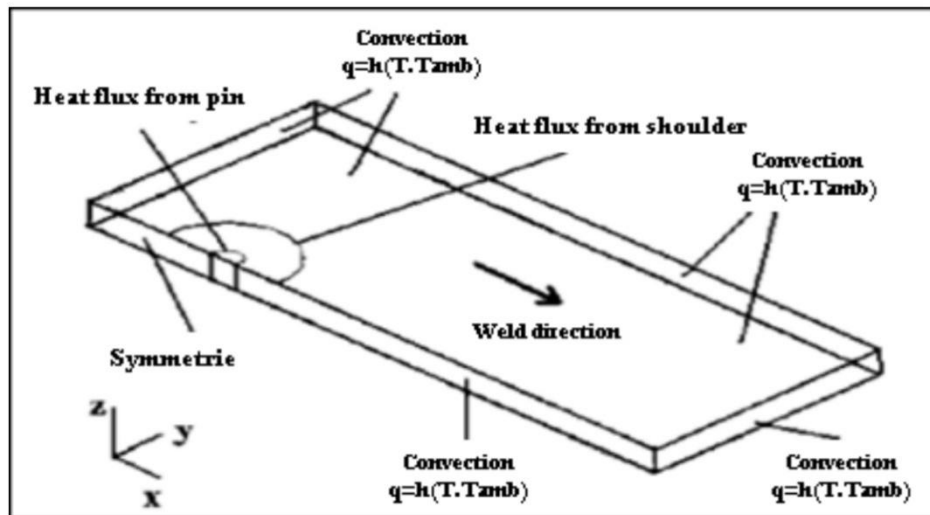


Figure II. 7 Conditions aux frontières en FSW. [66]

II.8 Caractéristiques des joints soudés

II.8.1 Microstructure

Le procédé de soudage par friction malaxage induit un gradient thermomécanique caractéristique, avec une intensité maximale au centre du joint qui décroît progressivement vers les régions périphériques. Cette distribution spatiale des sollicitations thermiques et mécaniques engendre une évolution microstructurale différenciée selon la distance par rapport à l'axe de soudure. L'analyse métallurgique permet de distinguer quatre zones distinctes (figure II. 8) : depuis la région centrale soumise aux sollicitations les plus intenses jusqu'aux zones non affectées du matériau de base, en passant par des régions de transition présentant des modifications microstructurales intermédiaires. [67]

Le noyau, également désigné comme zone malaxée (nugget ou stirred zone en anglais), représente la zone en contact direct avec le pion durant le processus de soudage. Il subit les

niveaux les plus élevés d'échauffement et de malaxage. Les températures élevées, combinées à une déformation plastique significative, entraînent généralement une recristallisation dynamique du métal, résultant en une microstructure à grains fins et équiaxes. L'asymétrie du procédé est souvent visible sur les micrographies, se manifestant par la forme du noyau qui s'étire vers le côté AS. Une transition plus marquée entre le noyau et la région adjacente est également observée du côté AS. La figure (II.8)

L'analyse métallurgique des joints soudés par friction malaxage révèle trois zones distinctes (Fig. II.8) :

(1) La Zone Affectée Thermo-Mécaniquement (TMAZ), adjacente au noyau et d'extension comparable au diamètre de l'épaulement, subit simultanément un échauffement notable et une déformation plastique induite par le cisaillement de l'outil, sans toutefois atteindre le seuil de recristallisation dynamique ;

(2) La Zone Affectée Thermiquement (HAZ), uniquement soumise à un cycle thermique, présente des modifications microstructurales similaires à celles d'un traitement thermique conventionnel [67] ;

(3) Le Métal de Base (MB), préservé de toute altération, conserve intactes ses caractéristiques microstructurales et mécaniques initiales. Cette zonation reflète le gradient décroissant des sollicitations thermomécaniques depuis l'axe du joint vers le matériau non affecté.

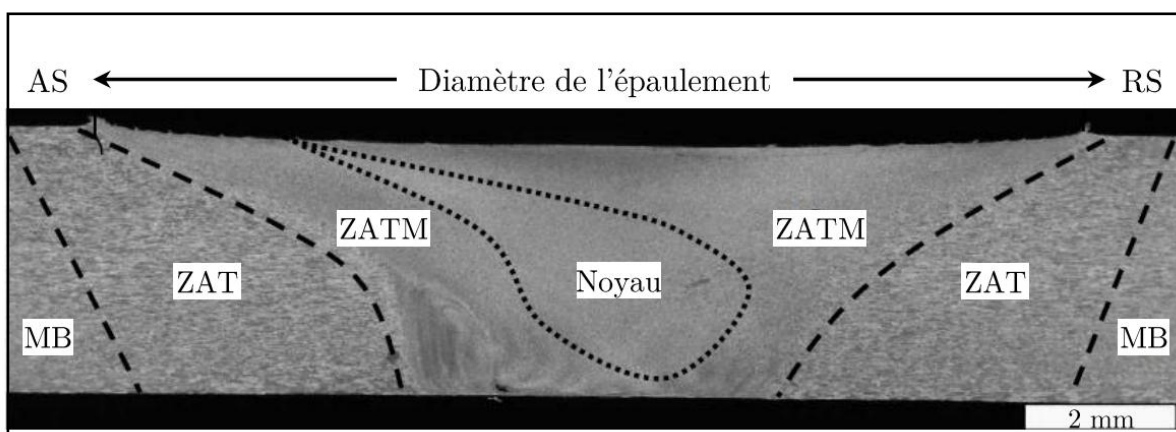


Figure II. 8 Microstructure d'un joint soudé par FSW. [67]

II.9 Recherche expérimentale

Sur la base de ces éléments, notre démarche méthodologique s'est appuyée sur une expérimentation pratique, inspirée des travaux de Nikola Sibalic et Milan Vukcevic de la Faculté de Génie Mécanique de l'Université du Monténégro, afin d'analyser plus précisément les contraintes thermiques et d'enrichir leur compréhension. Le choix de cette expérience s'est justifié par sa pertinence dans l'étude des phénomènes thermomécaniques, permettant ainsi une approche rigoureuse et une validation empirique de notre hypothèse de recherche.[68]

II.9.1 Machine utilisée

La machine utilisée pour le procédé FSW est une machine universelle de grande rigidité. Elle est équipée d'une table de travail mobile de 1 500 mm × 300 mm, avec possibilité de réglage de la vitesse de course (mm/min) et de la vitesse de rotation de la broche principale (tr/min). Le poids de la machine est de 3 500 kg et la puissance du moteur est de 10 kW.

II.9.2 Matériau utilisé

Le matériau utilisé pour la recherche expérimentale est l'alliage d'aluminium AA6082-T6 d'une épaisseur de 7,8 mm. Cet alliage est très utile dans l'industrie grâce à ses bonnes propriétés mécaniques et à sa soudabilité relativement faible. Pour les besoins de l'expérience, des pièces de 200 mm × 50 mm × 7,8 mm ont été fabriquées. Pour le procédé de soudage, l'outil de forme géométrique simple est présenté à la figure (II.9) Le procédé FSW est réalisé à vitesse de soudage constante [68].



Figure II. 9 La machine et l'outil utilisés pour le processus FSW. [68]

Pour les besoins de la recherche, un ensemble d'outils dont les valeurs géométriques ont été variées en fonction du plan d'expérience adopté. En outre, 72 pièces ont été produites, qui sont reliées par le procédé FSW en 36 points expérimentaux. Sur la figure (II.10), le composé soudé obtenu est montré au point expérimental numéro 1. [68]

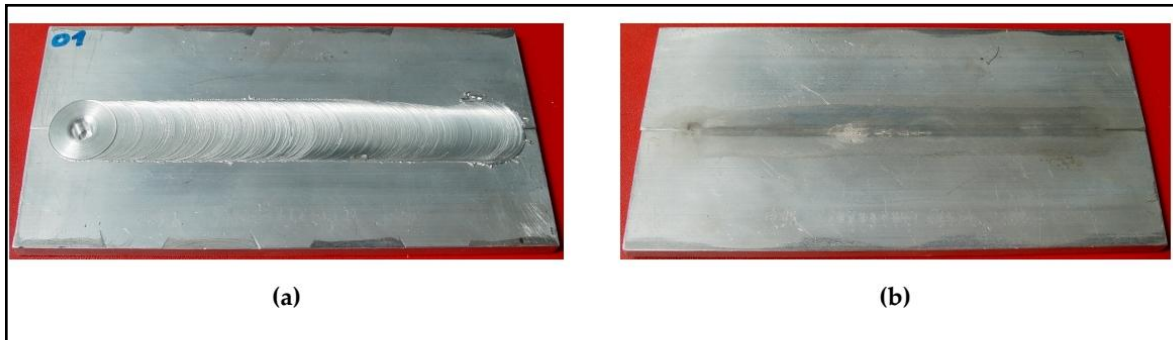


Figure II. 10 Le joint soudé au 1er point du plan expérimental. (a) Une vue du dessus ; (b) Une vue de dessous. [68]

II.9.3 Mesure de la température

Pour mesurer la température, des pièces avec des thermocouples montés en fil Al-Cr sont fait. Le schéma d'installation du thermocouple adopté par rapport à la ligne de joint est donné dans la figure dessous (II.11).

La mesure de la température a été adoptée dans 6 positions. Trois sont situés dans la zone supérieure et trois dans la zone inférieure de soudage. Ce calendrier adopté nous permet de mesurer la température dans toutes les zones microstructurales.

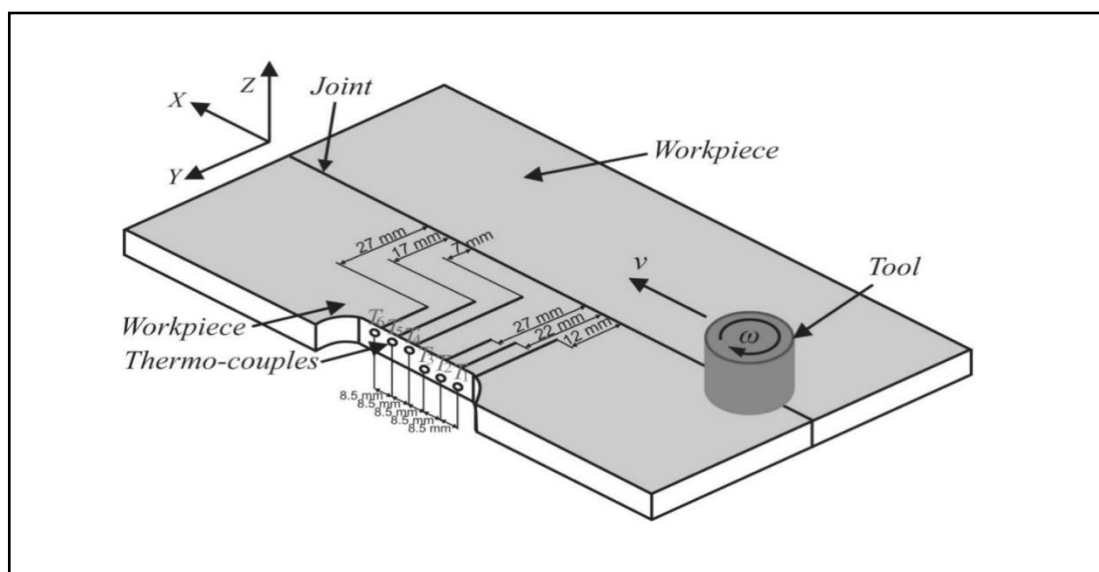


Figure II. 11 Schéma de mesure des positions de température dans la pièce à souder [68].

La figure (II,12), les diagrammes de la température mesurée aux points 1, 20 et 34 de le plan expérimental pour les positions des thermocouples T1...T6 en fonction de le temps est affiché

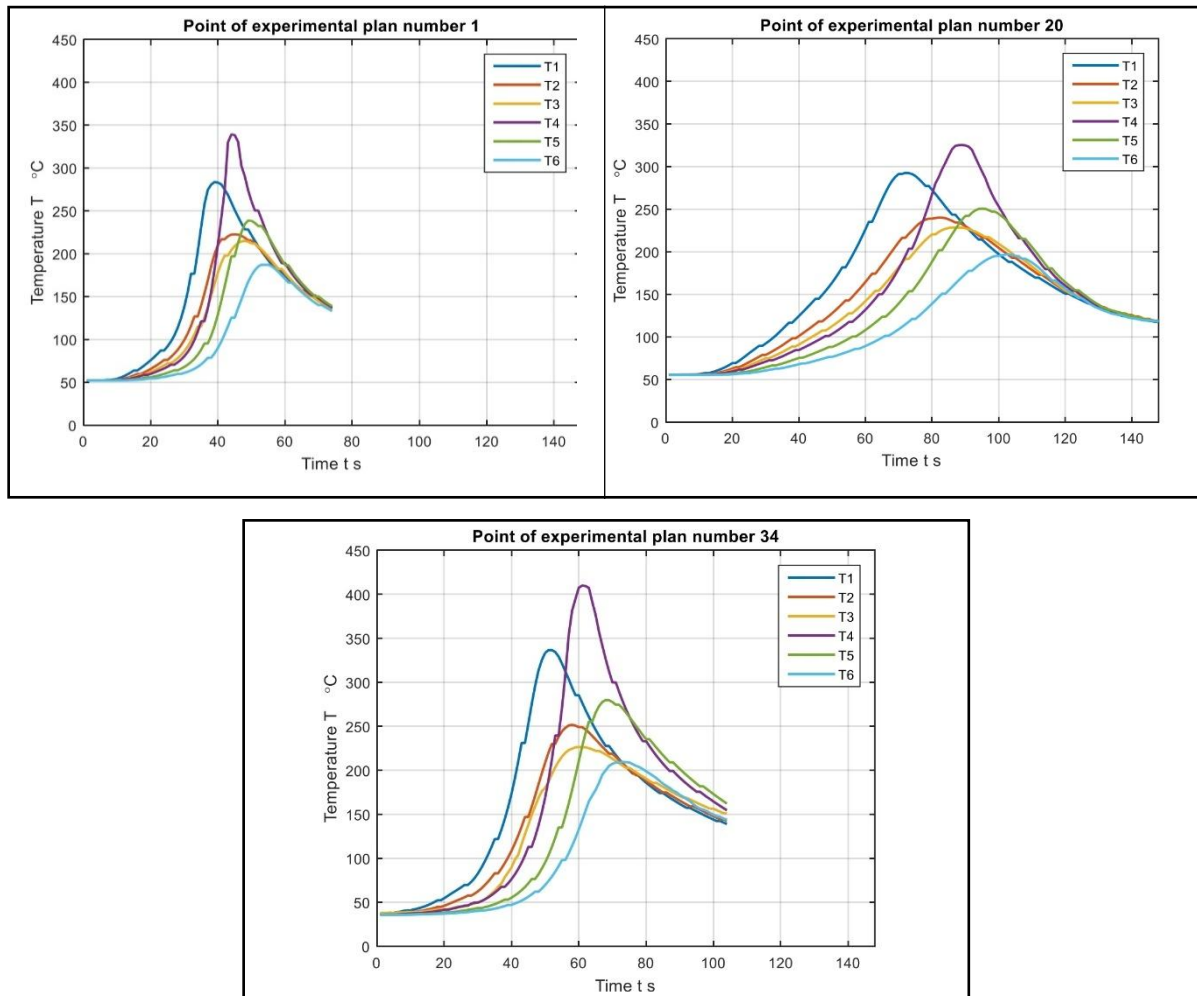


Figure II. 12 Diagramme de la température aux points du plan expérimental numéro : 1, 20 et 34 [68].

II.9.4 Simulation numérique

Des simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel DEFORM 3D. Les outils et les pièces sont générés dans le logiciel de CAO. Afin de comparer les résultats obtenus aux conditions réelles, 36 simulations numériques ont été réalisées sur la base du plan expérimental adopté. La simulation numérique, pour chaque point du plan expérimental, peut être divisée en deux phases comme la figure (II.13).

Dans la première phase, l'outil à broche se déplace axialement et s'enfonce dans la matière à une profondeur de 6,9 mm et dans un épaulement de l'outil à 0,1 mm, à une vitesse $v = 30$ mm/min. Dans la seconde phase, l'outil se déplace longitudinalement sur 166 mm, à des vitesses variables : $v = 200$ mm/min, $V_l = 80$ mm/min et $v_b = 125$ mm/min.

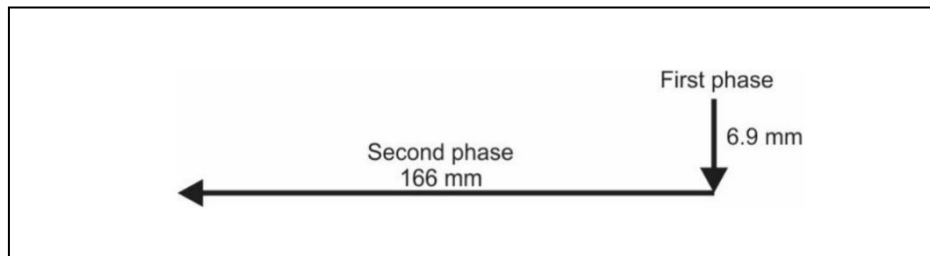


Figure II. 13 Le schéma du mouvement de l'outil dans les simulations numériques. [68]

II.9.5 Résultat obtenu

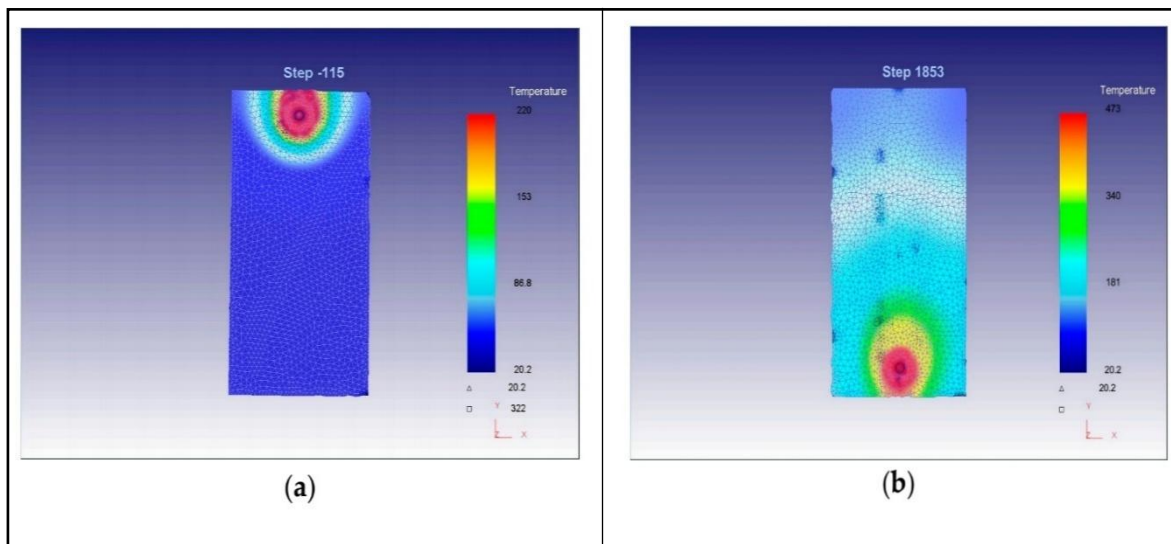


Figure II. 14 Distribution des champs de température : (a) À la fin de la première phase du processus FSW ; (b) À la fin de la deuxième phase du processus FSW. [68]

Pour les positions de mesure définies de la température de la pièce dans les zones micro structurales du sous-module Point Tracking, les résultats pour les points centraux du plan expérimental sont présentés dans la figure (II.14), tandis que le tableau (II.1) montre les valeurs maximales des valeurs de température reçues dans les points de mesure adoptés pour 1 et 20 et 34 le point du plan expérimental [68].

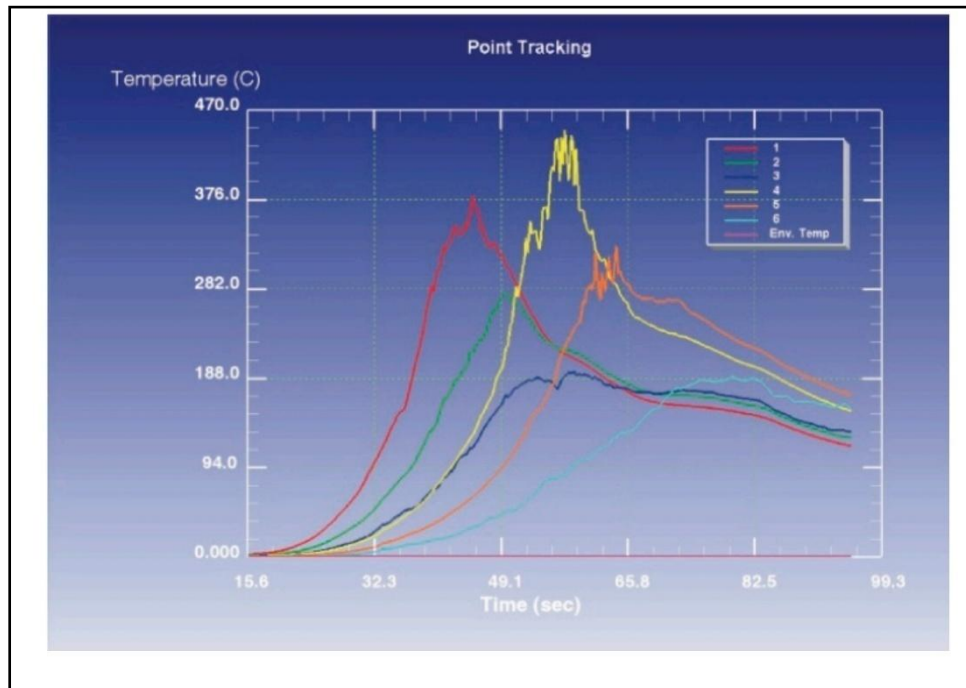


Figure II. 15 Diagramme de température résultant des simulations numériques aux six points sélectionnés pour les 33e, 34e, 35e et 36e points du plan expérimental [68].

Tableau II.1 Point Tracking (Température °C).

Numéro	1	2	3	4	5	6
1.	305.92	219.31	170.23	371.82	263.51	161.90
20.	313.46	243.85	193.96	358.62	281.47	187.19
34.	383.25	278.42	193.17	445.10	328.03	187.62

Conclusion

Ce chapitre présente une méthodologie exhaustive pour analyser les contraintes thermiques associées au soudage par friction malaxage (FSW). Cette approche repose sur trois axes principaux : « modélisation théorique », « simulation numérique » et « validation expérimentale ».

L'examen des gradients thermiques et des contraintes résiduelles permettra d'évaluer leur influence sur la qualité des soudures, tout en déterminant les paramètres optimaux (tels que la vitesse de rotation et l'avance) afin de réduire les défauts. Les outils numériques (comme ANSYS et ABAQUS) ainsi que les techniques de mesure (telles que les thermocouples,

l'imagerie infrarouge et la diffraction des rayons X) fourniront des données comparatives pour la validation des modèles. En conclusion, cette recherche ouvre la voie à une optimisation intelligente du procédé, intégrant potentiellement des méthodes d'intelligence artificielle. Cette démarche systématique vise à améliorer la maîtrise du FSW pour des applications industrielles de haute exigence.

Chapitre III

SIMULATION ET DISCUSSIONS.

III.1 Introduction

L'environnement industriel contemporain se caractérise par une compétitivité accrue, marquée par des cycles de développement produits toujours plus courts et une exigence croissante de réactivité. Cette conjoncture impose une optimisation drastique des processus de conception, favorisée par l'intégration des outils numériques. L'avènement des technologies CAO/FAO a révolutionné les méthodologies de conception, permettant à la fois une réduction significative des délais de développement et une amélioration notable de la précision des simulations. Dans ce contexte, la tendance actuelle vise à minimiser le recours aux prototypes physiques, traditionnellement utilisés pour valider les calculs de résistance et vérifier la fiabilité des simulations numériques. Ce chapitre présente une méthodologie de modélisation par éléments finis appliquée au soudage par friction malaxage (FSW) à l'aide du logiciel ABAQUS.

La première section introduira les capacités générales de cette plateforme de simulation, tandis que la seconde détaillera la démarche de modélisation 3D et l'analyse des résultats obtenus pour le procédé FSW [69].

III.2 Éléments finis

La méthode des éléments finis constitue une approche universelle pour aborder les problématiques industrielles en élaborant des modèles de simulation de manière particulièrement efficace. Actuellement, elle est mise en œuvre dans une variété de domaines pour traiter des enjeux liés à la mécanique des solides et/ou des fluides, ainsi qu'à la thermique, à l'électricité et à l'électromagnétisme. Les résultats générés permettent d'évaluer la répartition de la température et son pic durant le processus, ainsi que les valeurs des contraintes et des déformations. [70]

III.3 Maillage

La création du modèle par éléments finis repose sur l'assemblage d'éléments distincts. Ce processus est désigné sous le terme de discrétisation ou maillage du modèle mécanique de la structure à analyser. Le solide est divisé en éléments ayant une forme géométrique simple, partageant des côtés communs, et dont les sommets, ou nœuds, servent de points de connexion entre plusieurs éléments. Ces nœuds constituent les points d'application des forces

internes ou externes, et l'opération de décomposition est ce que l'on appelle le maillage. Un maillage efficace doit optimiser les opérations prévues par un logiciel. Il est donc essentiel d'adopter une méthode systématique pour la numérotation des éléments et des nœuds, comme la figure (III.1,...2). [70]

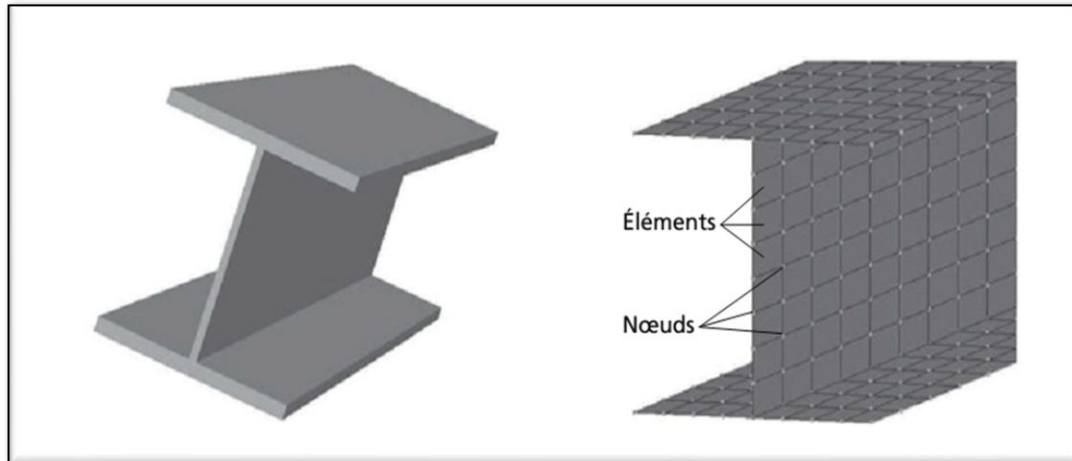


Figure III. 1 (a) solide (Poutre en I) ; (b) modèle éléments finis. [70]

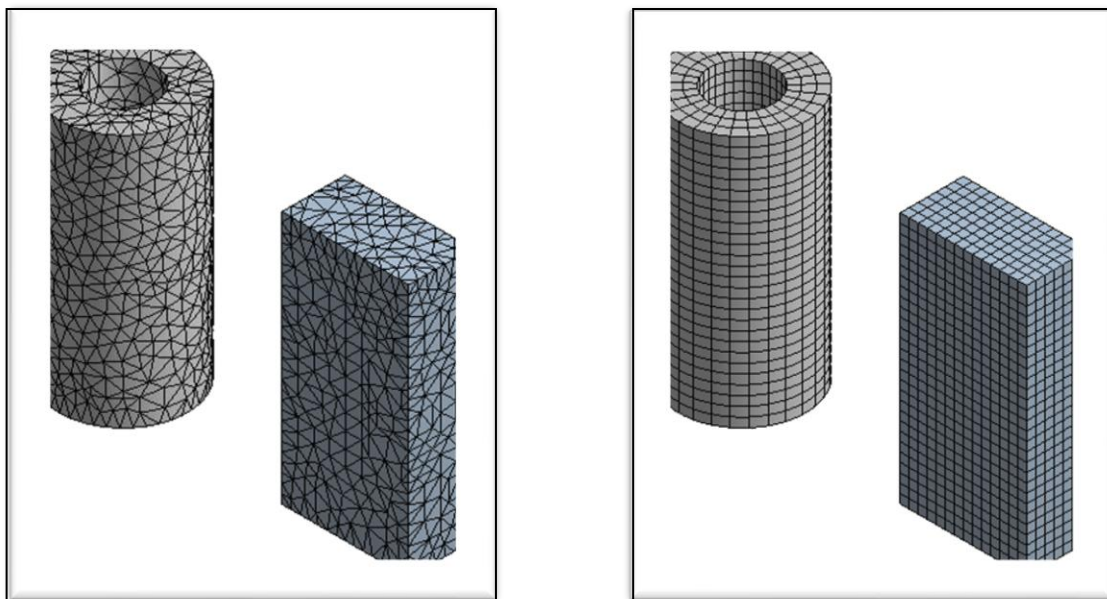


Figure III. 2 a) Maillage tétraédrique, b) Maillage hexaédrique structuré. [70]

III.4 Présentation du logiciel ABAQUS®

Il convient de noter que le marché regorge de logiciels dédiés à la conception et aux calculs assistés par ordinateur. Parmi les plus couramment utilisés, on trouve Nastran, Catia, ABAQUS® et SolidWorks®, et ANSYS®. Ces outils partagent des fonctionnalités similaires, à savoir la génération de structures ainsi que l'analyse de leurs caractéristiques et

des problèmes associés. Ils procèdent ensuite à des calculs concernant l'évolution de ces structures, tels que les déformations, les ruptures et la plastification, avant de permettre le traitement des résultats pour en extraire des données exploitables.

De nombreuses entreprises recourent à une combinaison de ces logiciels, chacun ayant ses propres atouts dans certaines tâches. Par exemple, il est fréquent d'utiliser Catia pour la conception, ABAQUS® pour les calculs, et Nastran pour le post-traitement. Ainsi, une connaissance approfondie de plusieurs de ces outils sera souvent exigée dans le milieu professionnel, ce qui souligne l'importance de se familiariser avec ABAQUS®. [71]

III.4.1 ABAQUS®

Le logiciel Abaqus FEA (analyse par éléments finis) et CAE (ingénierie assistée par ordinateur) constitue un outil de simulation avancé destiné aux ingénieurs et aux chercheurs pour modéliser et créer en 1978, analyser et visualiser le comportement physique de matériaux et de structures complexes dans diverses conditions. Conçu par Dassault Systèmes, Abaqus propose une plateforme performante pour simuler des processus physiques réels, permettant aux utilisateurs de prévoir les performances des produits, de diminuer la nécessité de prototypes physiques et d'accélérer le processus de développement, la figure (III.3). [71]

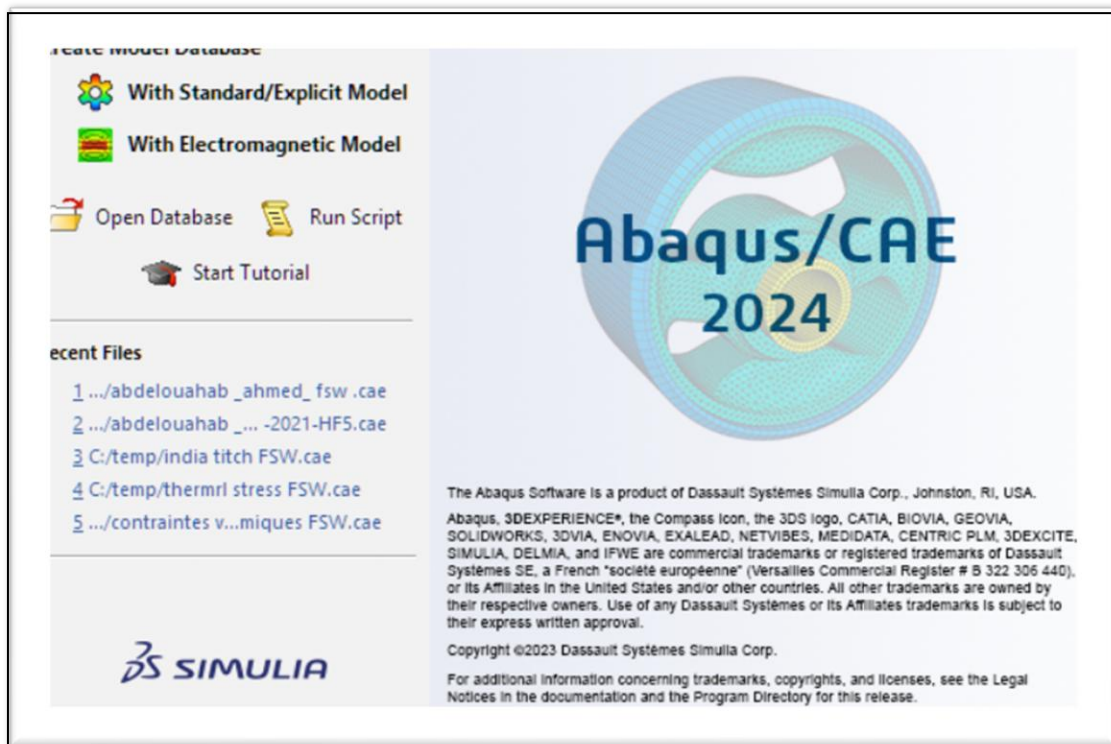


Figure III. 3 Interface de code d'ABAQUS®.

III.4.2 Présentation générale du code de calcul ABAQUS

ABAQUS se décline en trois versions : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE.

ABAQUS/Standard : Ce solveur général adopte un schéma d'intégration implicite classique.

- Il repose sur l'algorithme de Newton-Raphson ainsi que sur la méthode de Riks.
- Il permet de traiter des problèmes tant linéaires que non linéaires, en géométrie 1D, 2D, 3D et axisymétriques.
- Il offre une multitude de procédures d'analyse dans les domaines temporel et fréquentiel.

ABAQUS/Explicit : Cette version utilise un schéma d'intégration explicite, adapté à la résolution de problèmes dynamiques ou quasi-statiques non linéaires.

- Elle se concentre sur l'analyse non linéaire, avec une discrétisation tant spatiale que temporelle.
- Elle traite des problèmes transitoires et dynamiques des structures.
- La résolution s'effectue par la méthode explicite d'intégration du temps.

ABAQUS/CAE : Cette interface intégrée permet la visualisation et la modélisation pour les solveurs mentionnés. Chacune de ces versions est accompagnée de modules supplémentaires et optionnels, adaptés à des applications spécifiques. Conçu initialement pour l'analyse des comportements non linéaires, ABAQUS dispose d'une large gamme de modèles de matériaux, avec une attention particulière portée à la modélisation des élastomères, qui mérite d'être soulignée. [71]

III.4.3 L'interface Abaqus CAE

Il convient de noter que le module CAE (Environnement Complet Abaqus), que nous allons utiliser pour élaborer l'ensemble des données, est relativement récent (de quelques années) et est principalement conçu pour la préparation des données concernant des problèmes relativement standards. Par conséquent, toutes les commandes disponibles dans Abaqus ne sont pas nécessairement adaptées, et il est souvent préférable d'opter pour les paramètres par défaut, la figure (III.4).

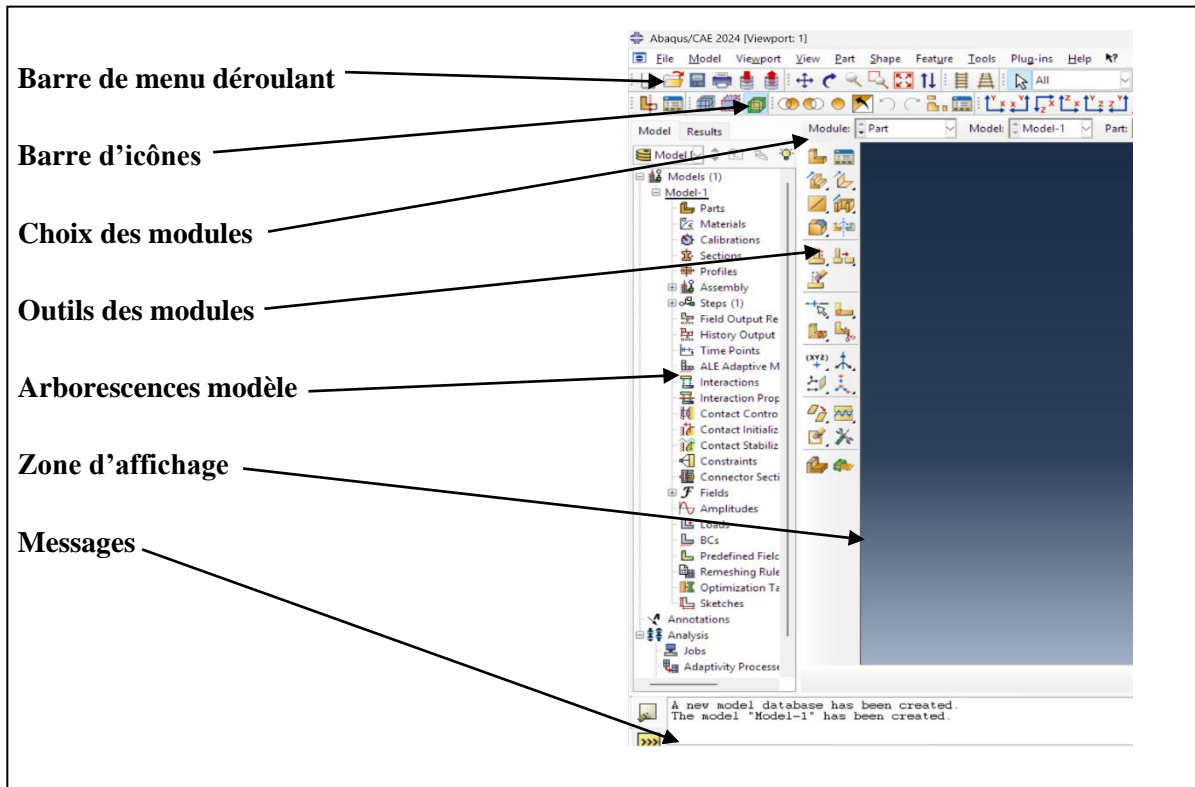


Figure III. 4 Organisation d'Abaqus.

III.4.4 Les modules

La création intégrale d'un ensemble de données se réalise après un passage successif à travers les différents modules, la figure (III.5).

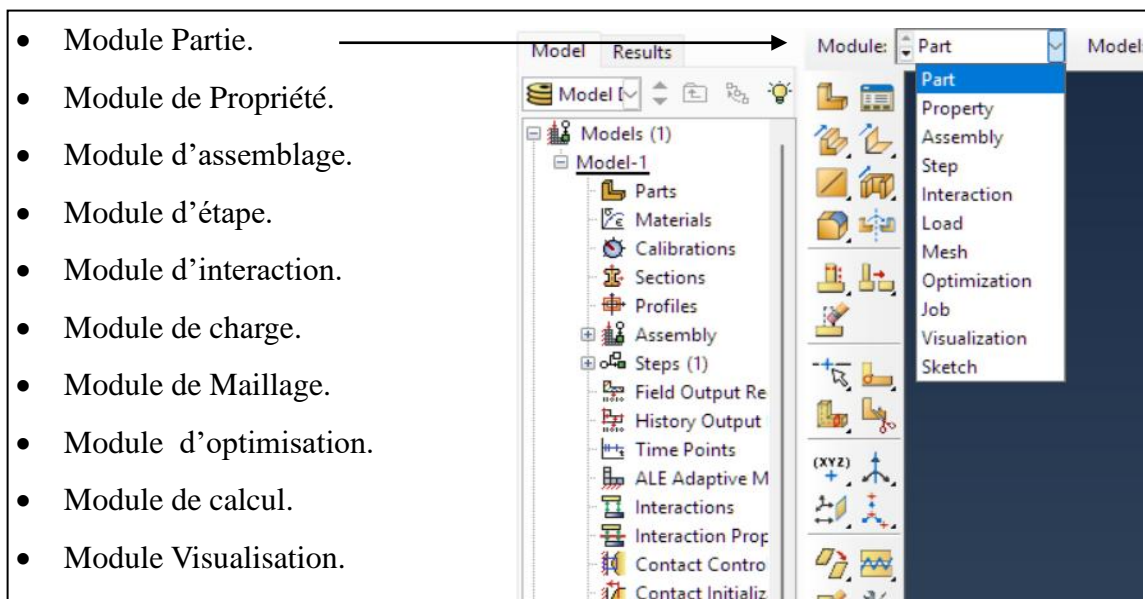


Figure III. 5 Réalisation de la mise en données d'un problème.

Module pièce (Module Part)

Ce module établit la géométrie des entités au sein du modèle. Il inclut à la fois des éléments déformables et des éléments rigides. Pour leur création, il convient d'utiliser l'icône de création située en haut à gauche, puis de sélectionner les options appropriées :

- L'espace de modélisation : par exemple, 3D ;
- Le type d'entité à générer : déformable ;
- La forme de l'entité.

Dans tous les cas, nous allons évoluer vers un environnement de type CAO où nous concevrons nos pièces. Pour un solide rigide, il est essentiel de définir un point de référence. Ce point détermine les degrés de liberté du solide, sur lesquels nous appliquerons ultérieurement des conditions aux limites. Cette opération s'effectue dans le menu Outils, via la commande Point de référence. Ce module comprend également un sous-module nommé Sketch, qui permet de créer des formes bidimensionnelles non associées à un objet. Bien qu'il puisse être utilisé pour des extrusions, nous avons choisi d'ignorer ce module, ayant déjà modélisé notre pièces sur SW. Le module Part offre également la possibilité d'importer notre pièce, dans ce cas, nous avons choisi de travailler sur métal d'Aluminium, comme l'illustre la figure (III.6).

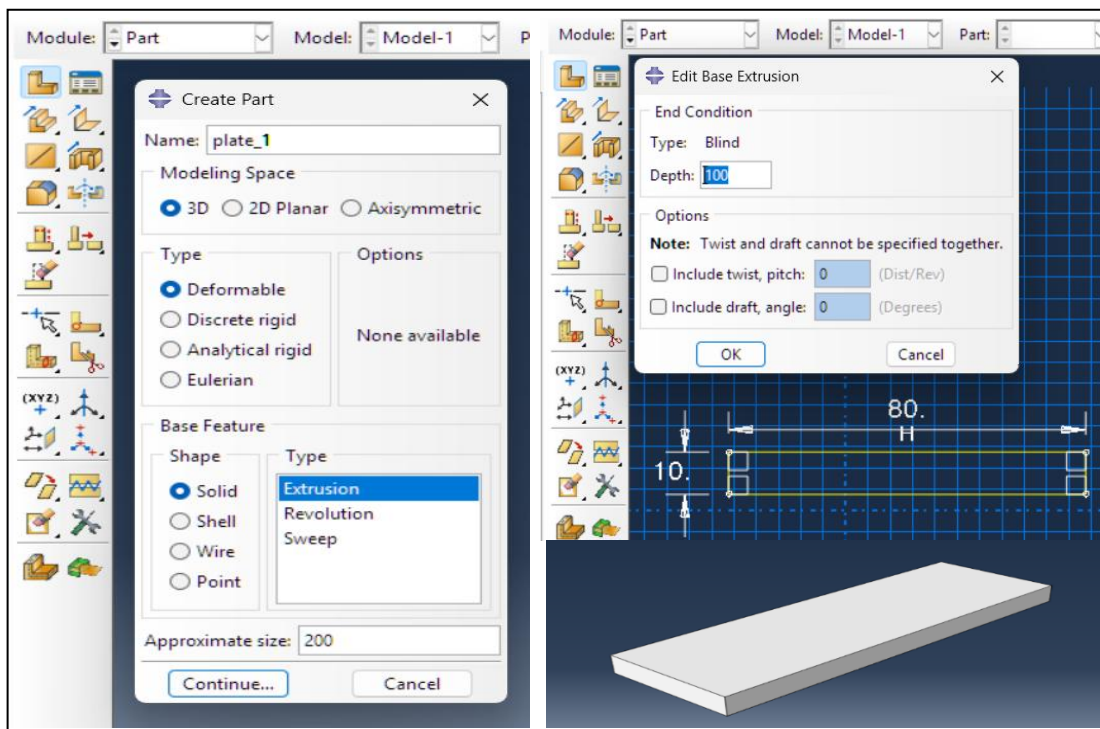


Figure III. 6 Module Partie (les plaques).

Comme indiqué dans la figure ci-dessus (III.7), nous avons créé les deux plaques à sceller. Nous avons défini les dimensions de la façon suivante :

Longueur : 100 mm.

Largeur : 80 mm.

Épaisseur : 10 mm.

Maintenant, nous allons créer l'outil de soudage, comme indiqué dans la figure suivante :

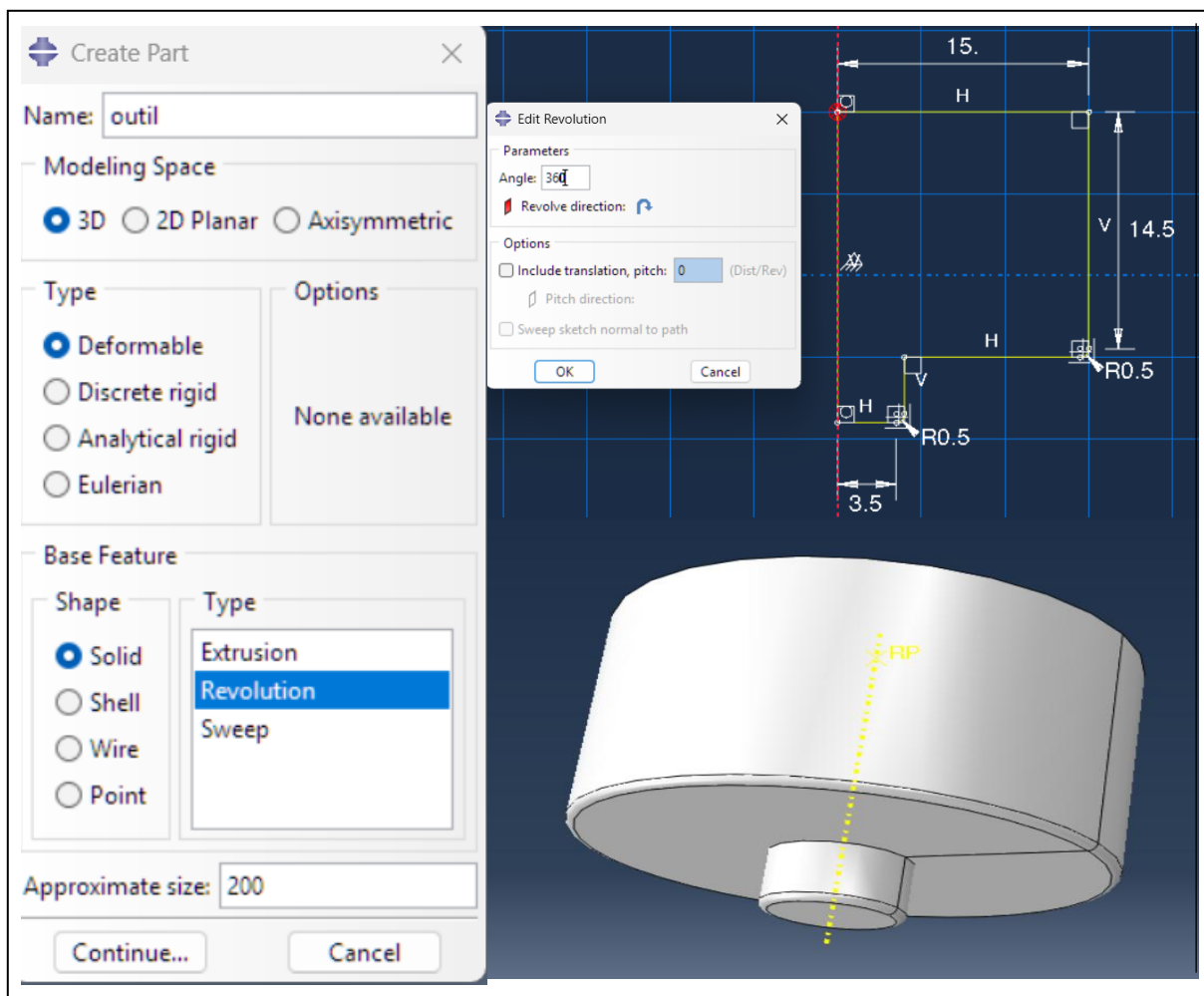


Figure III. 7 Module Partie (Outil de soudage).

Module propriété (Module Proprety)

Ce module permet de définir les caractéristiques des matériaux (parties déformables du modèle) ainsi que la masse des corps rigides si nécessaire. Dans ce contexte, il est essentiel de spécifier des propriétés élastiques et/ou plastiques. Pour créer un matériau, il suffit de cliquer sur l'icône située en haut à gauche. Il est recommandé d'attribuer un nom distinct à chaque La

modélisation numérique requiert une caractérisation précise des propriétés mécaniques du matériau, implémentée selon une approche systématique. La procédure comporte trois étapes principales : (1) la définition des caractéristiques élastiques (module de Young et coefficient de Poisson) dans le module mécanique/élasticité, (2) la spécification du comportement plastique via le module mécanique/plasticité en adoptant une loi d'écroutissage isotrope, où la courbe contrainte-déformation est exprimée en termes de contrainte vraie (Cauchy) et de déformation logarithmique, et (3) l'assignation de ces propriétés aux éléments du maillage. Cette dernière étape nécessite la création d'une référence matériau et la définition du paramètre géométrique critique qu'est l'épaisseur. L'ensemble de ces données constitue une base essentielle pour la simulation numérique fiable du comportement mécanique., figure (III.8).

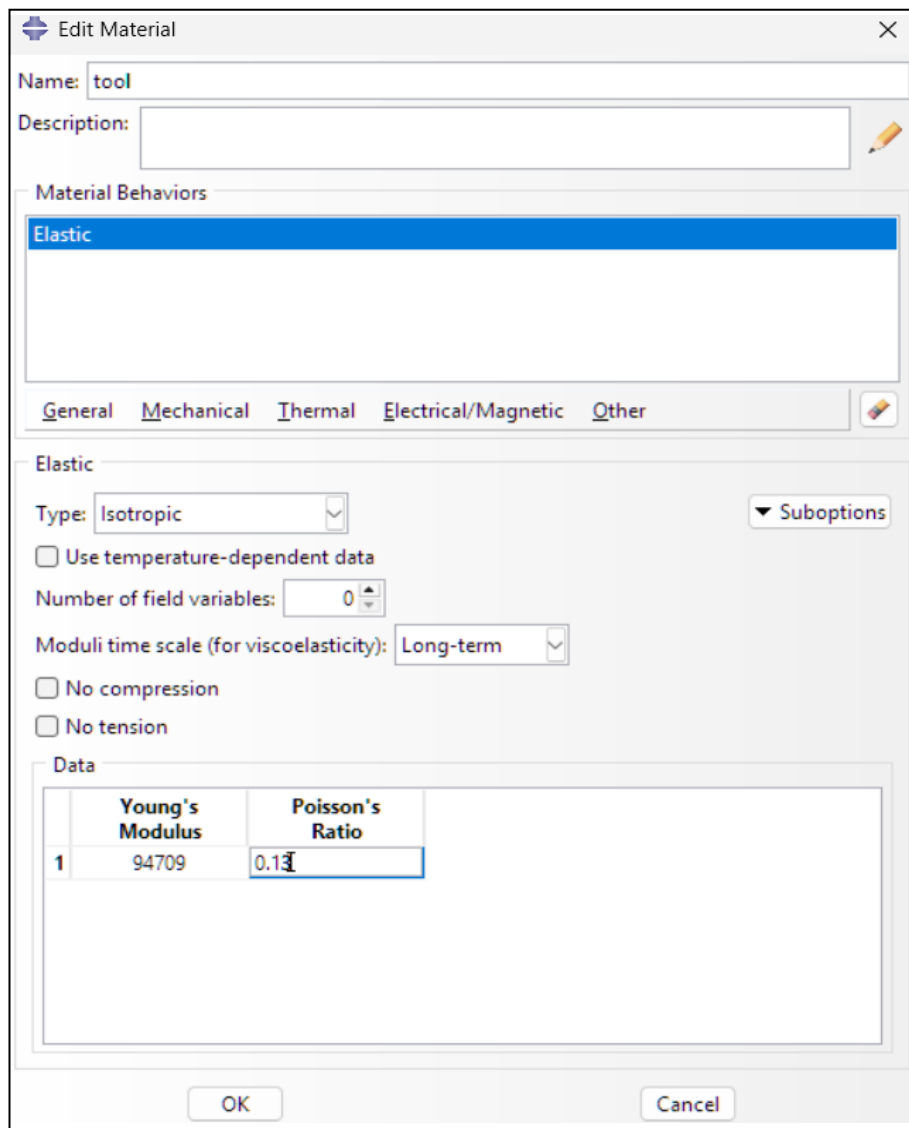


Figure III. 8 Propriété des Matériaux et sections.

Dans la section des Comportements des Matériaux, il est possible d'entrer diverses valeurs numériques ou modèles physiques. Le logiciel Abaqus opère sans unités, il est donc recommandé de les établir au préalable et de s'y conformer tout au long du processus de calcul.

Le tableau ci-dessous (III.1) représente les propriétés mécaniques de l'outil et des deux plaques à souder :

Tableaux III. 1 Exemples de les propriétés mécanique de procédé.

	Densité (g/ cm ³)	Conductivité (W/m. k)	Expansion (10 ⁻⁶ /K)	Module d'Young (GPa)	Specific Heat (J/g-K)	Limite élasticité (MPa)
Outil(Acier)	7.85	60	13	210	0.5	300
Plate(Aluminium)	2.7	167	23.6	70	0.896	275

Coefficient de Poisson : 0.33

Déformation plastique : 0.1955

Module assemblage (Module Assembly)

Ce module consiste à générer une instance, comme illustré à la figure (III.9), à partir des entités définies dans le module **Part**. Ces instances seront celles que nous utiliserons ultérieurement dans le modèle. En règle générale, pour créer une instance, il convient de sélectionner tous les éléments créés dans le module **Part** en utilisant l'icône située en haut à gauche.

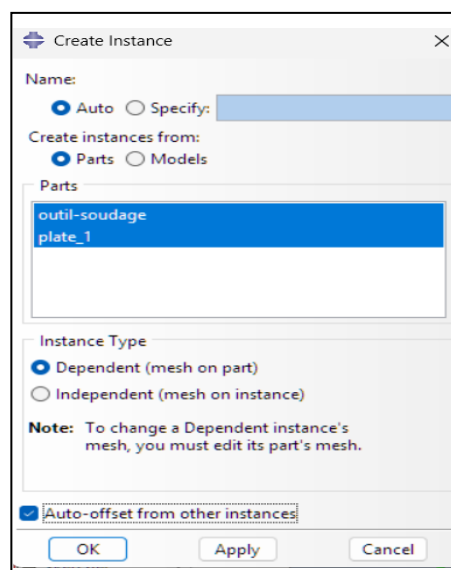


Figure III. 9 Instance et assemblage.

Et après que nous sélectionné les pièces, ils sont ensemble, figure (III.10).

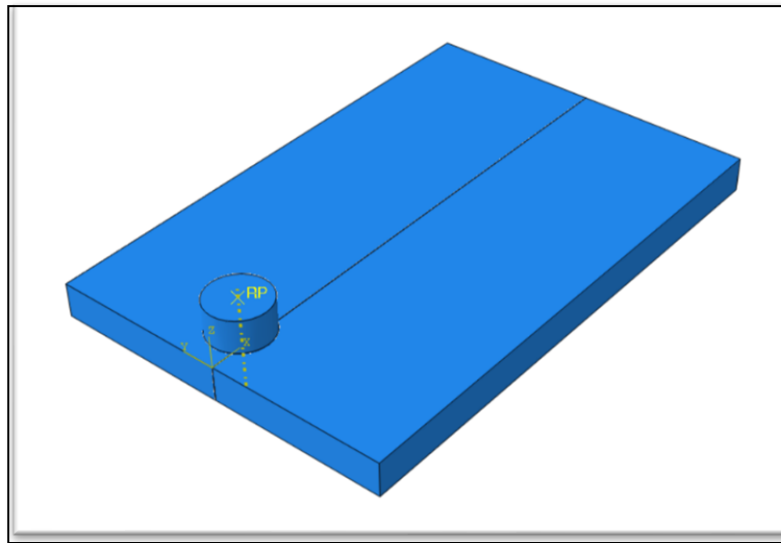


Figure III. 10 Assemblage des pièces.

Module étape (Module Step)

C'est à ce stade que nous opérons pour le module Dynamique explicite dans le cadre d'analyses de crash ou d'impact. Nous observerons également les diverses autres options disponibles dans ce logiciel de calcul, comme la figure (III.11).

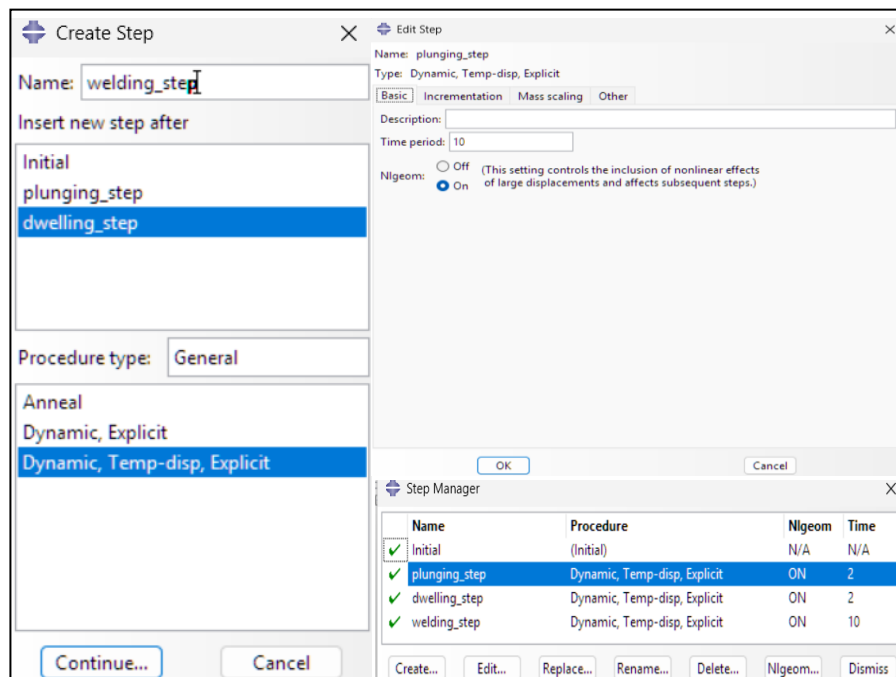


Figure III. 11 Création des étapes.

Maintenant que nous avons collecté toutes les pièces, nous entrons dans les paramètres d'étape pour l'outil de soudage, comme indiqué dans la figure ci-dessus. **Plongeant** (plunging step); **Logement** (dwelling step); **Soudage** (welding step).

Module interaction

Ce module permet de définir toutes les interactions entre les diverses parties et zones du modèle, qu'elles soient de nature mécanique, thermique ou d'une autre sorte. Il est important de noter qu'ABAQUS ne considère que les interactions qui sont clairement spécifiées, la simple proximité géométrique ne suffisant pas, figure (III.12).

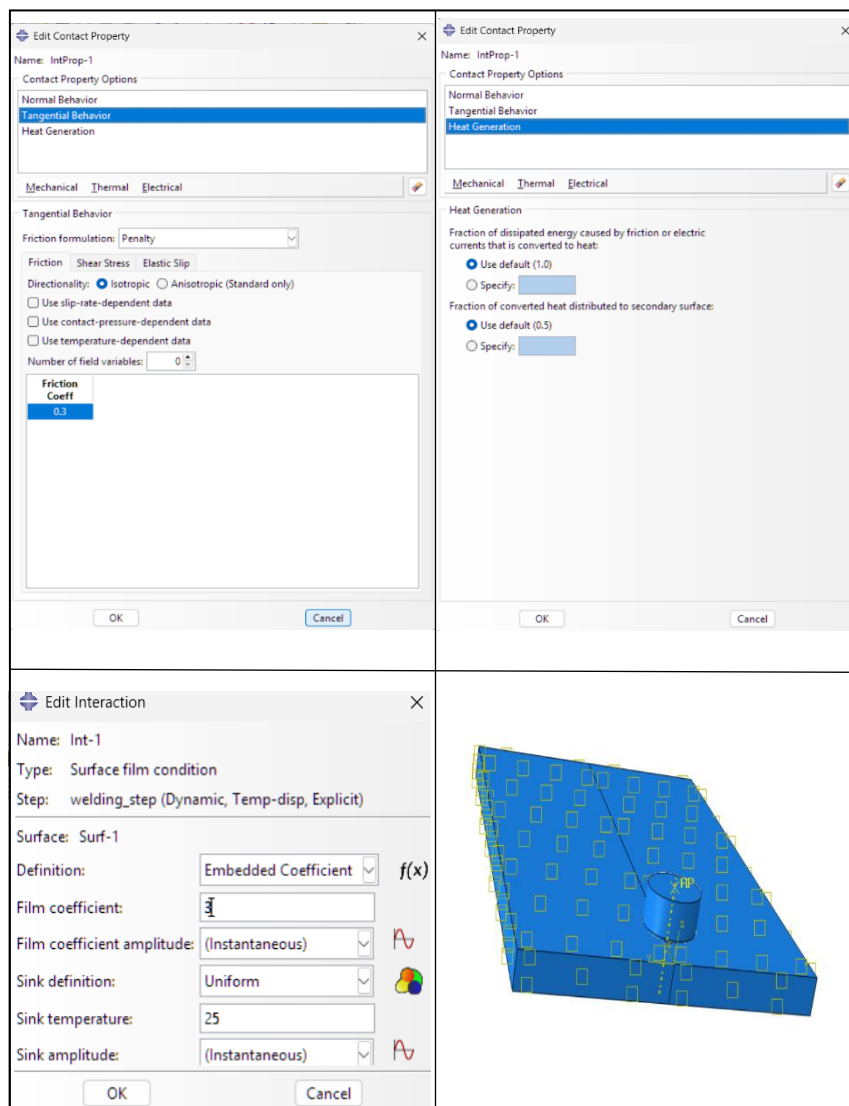


Figure III. 12 Interaction et création de la surface de contact.

Module Charge (Module Load)

Le module Charge a pour fonction de définir l'ensemble des chargements, des conditions limites et des champs. Il est importante de noter que les chargements et les conditions limites sont liés aux étapes, par exemple, une force est appliquée à l'étape 1 mais reste inactive à l'étape 2. Comme les figures (III.13,...18).

Par exemple, notre travail exige d'appliqué d'un 3 forces pour chaque étape (pression ; rotation ; et déplacement), et sans oublier de fixer les pièces, comme indiqué dans les figures :

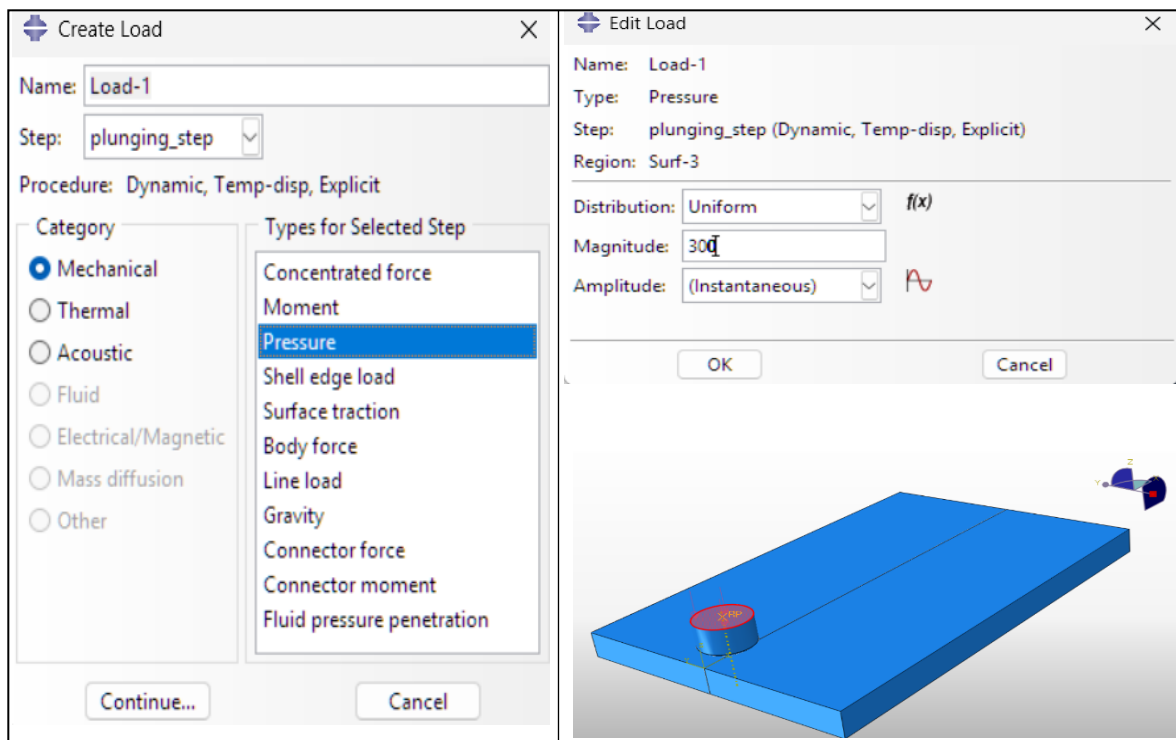


Figure III. 13 Création des chargements (pression).

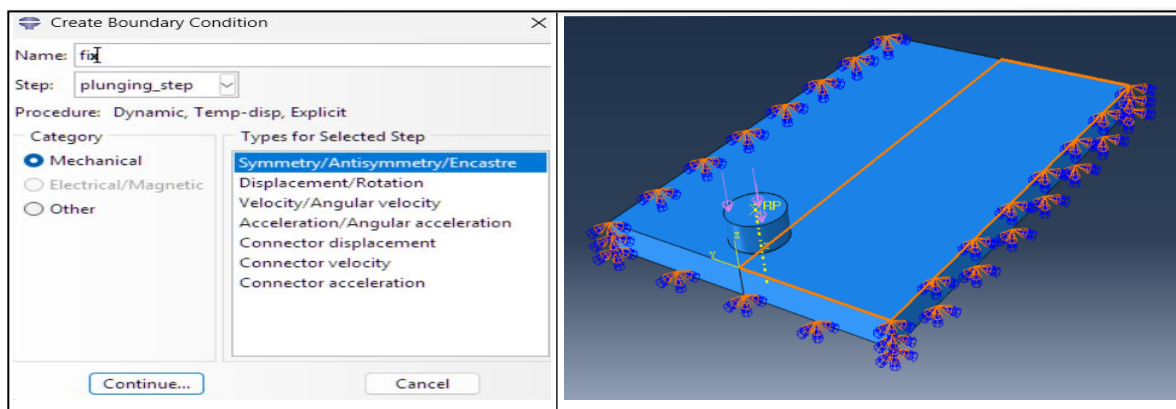


Figure III. 14 Création des chargements (fixe).

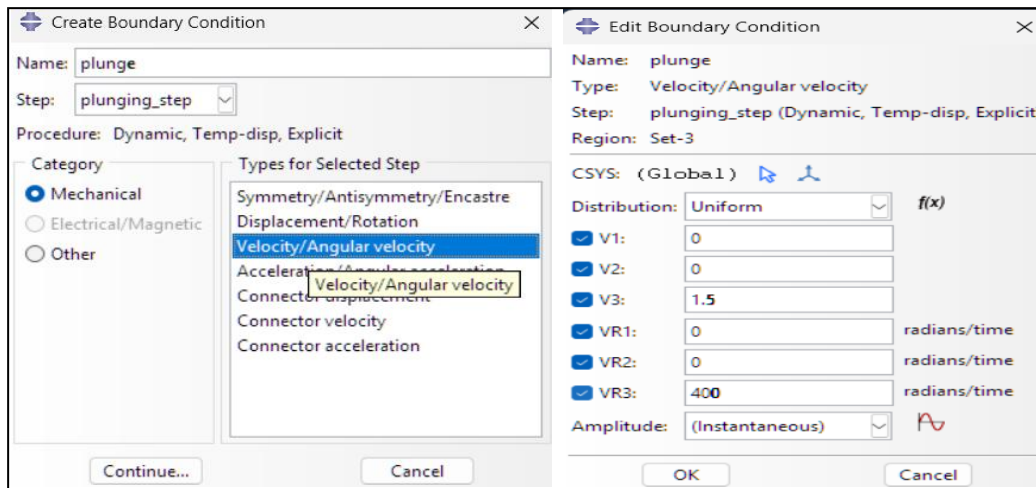


Figure III. 15 Création des chargements (Plongant).

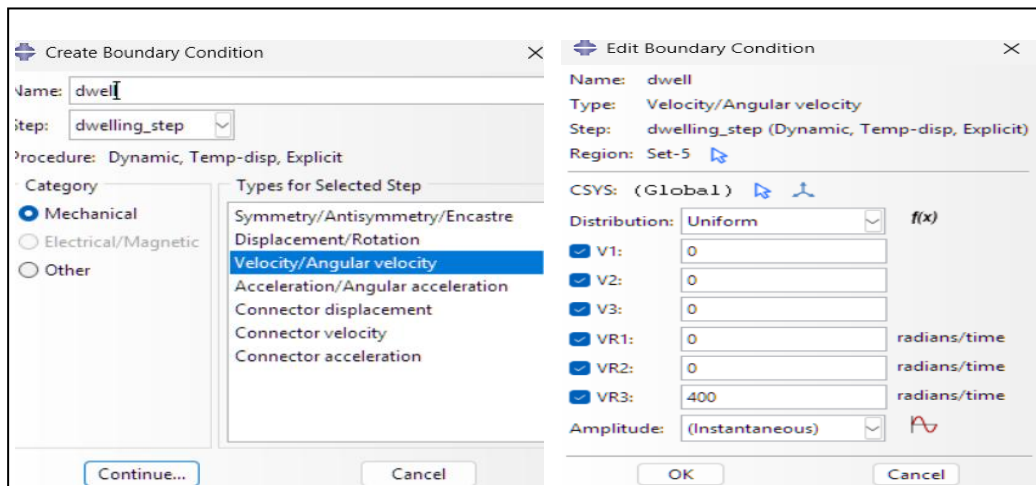


Figure III. 16 Création des chargements (Logement).

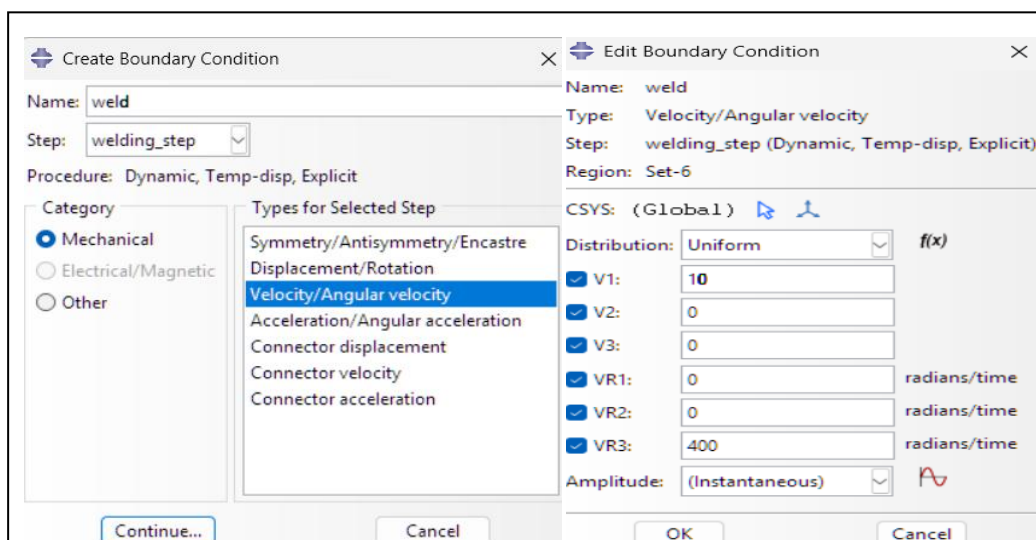


Figure III. 17 Création des chargements (soudage).

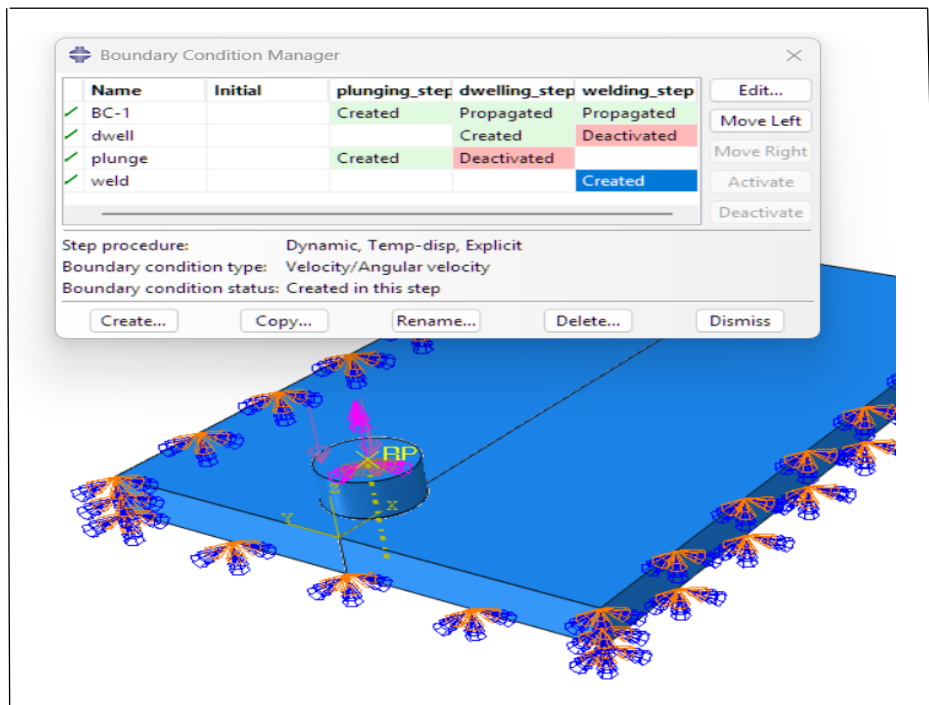


Figure III. 18 Module charge (Tout les chargements).

Maillage (Module mesh)

Ce module comprend l'ensemble des outils requis pour créer un maillage par éléments finis sur un assemblage, les figures (III.19) (III.20).

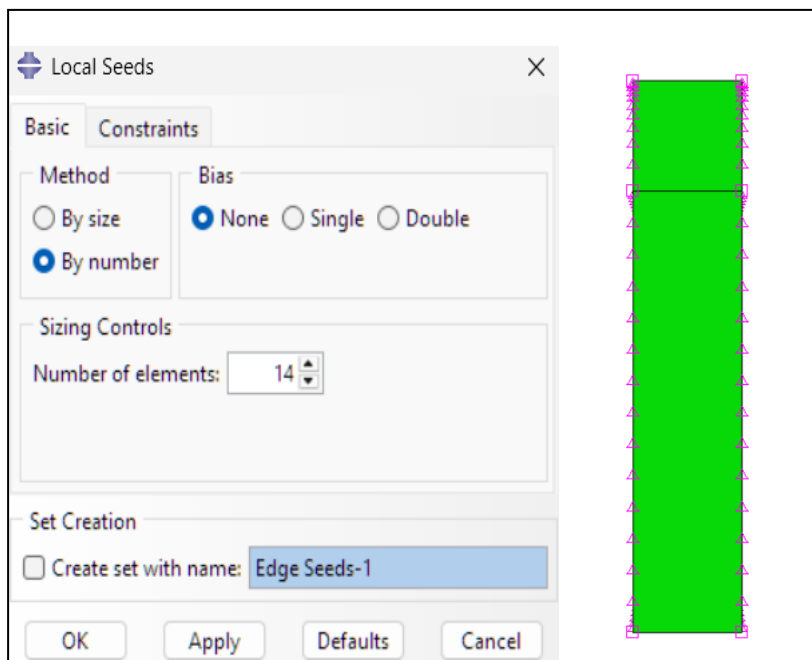


Figure III. 19 Création de maillage (Plate).

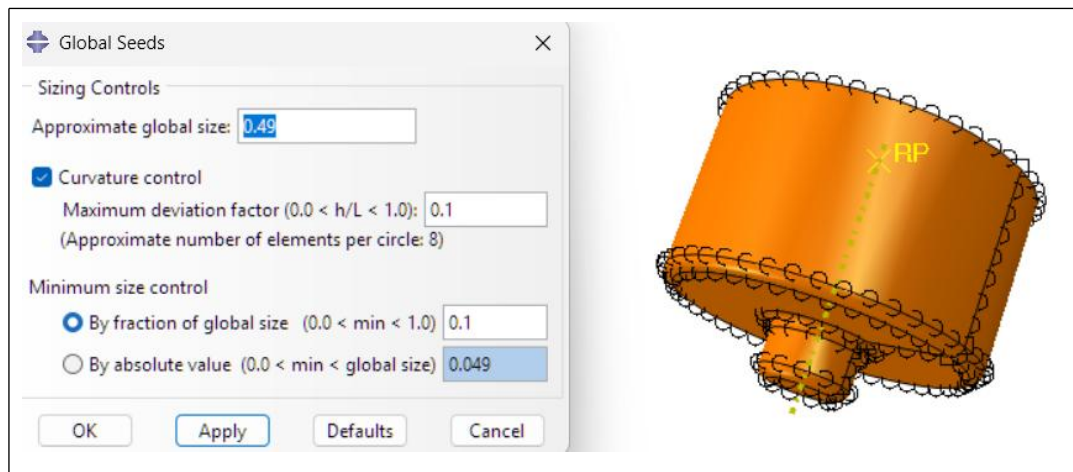


Figure III. 20 Création de maillage (outil).

La figure ci-dessous (III.21) représente un maillage structuré pour un outil de FSW et les deux plates soudées à denture droite, nous avons choisi un maillage moyen de 1807 nœuds de l'outil et un maillage plus fin à 2880 nœuds de plate.

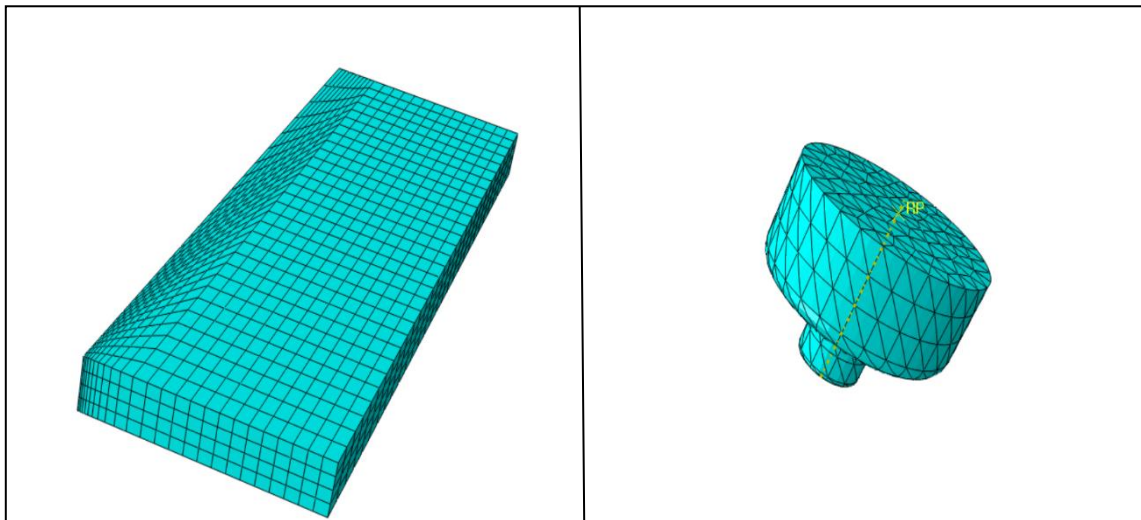


Figure III. 21 Maillage structuré (Plate & outil).

Module calcul (Module job)

Le démarrage du calcul est standard. Une fois le calcul initié, il est possible de suivre le déroulement du processus en sélectionnant l'option Monitor. Cela nous permet d'observer en temps réel l'évolution des incréments de chargement et d'évaluer la convergence des calculs.

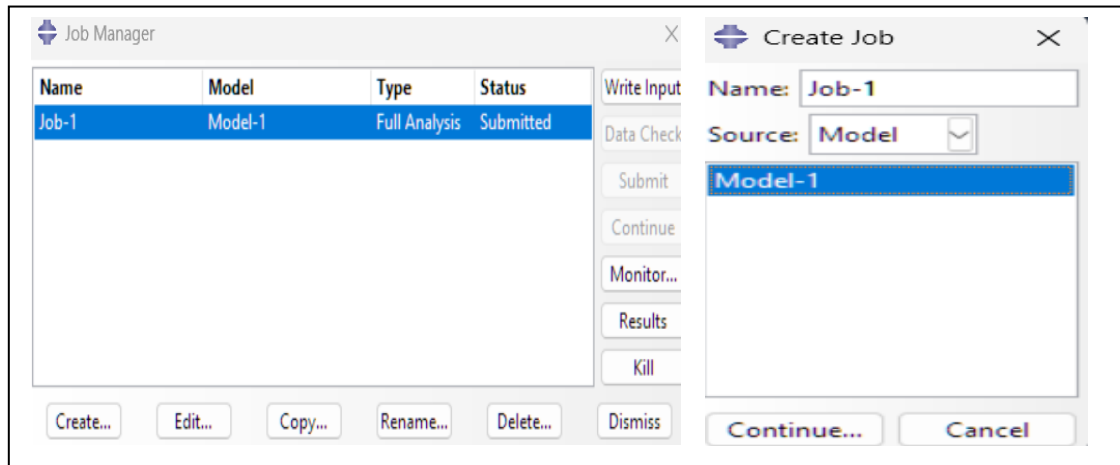


Figure III. 22 Lancement du calcul.

Module visualisation (Module visualization)

Ce module offre la possibilité d'examiner les résultats des modèles obtenus, ainsi que les courbes de charge et les déformations, comme la montre la figure ci-dessous (III.23).

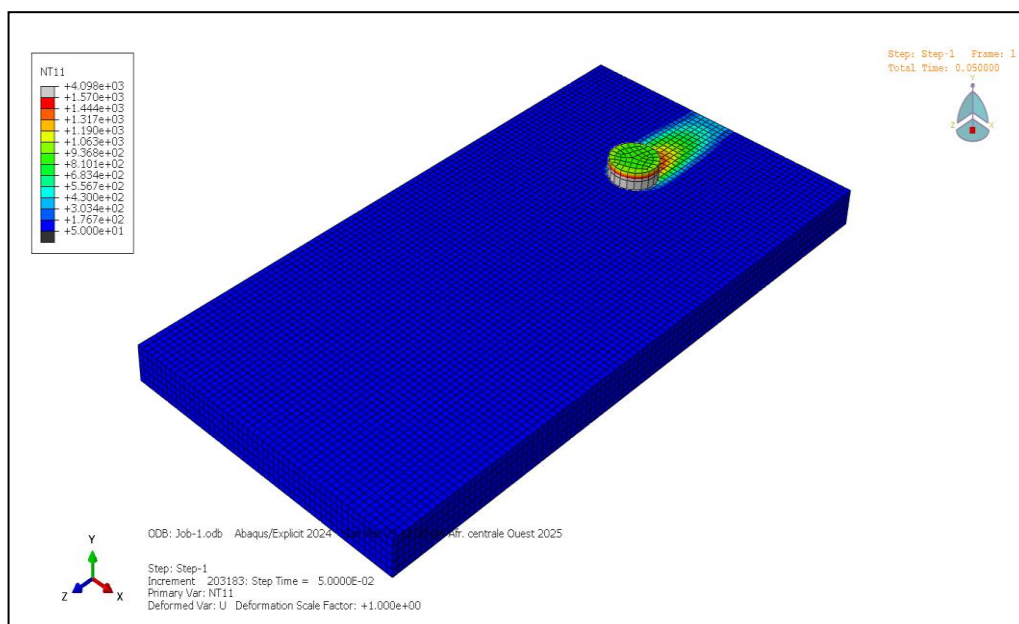


Figure III. 23 Visualisation de l'opération de friction malaxage.

Problématique

Généralement, le soudage par friction malaxage peut engendrer des problèmes vibratoires au niveau de l'outil ou de la pièce pendant le processus, ce qui peut influencer la qualité du cordon, provoquer des défauts internes et affecter la résistance mécanique de l'assemblage. Pour atteindre notre objectif, nous présentons une analyse modale et harmonique en faisant

varier différents paramètres (comme la vitesse de rotation, l'avance ou la géométrie de l'outil), afin de montrer l'influence de ces derniers sur le comportement vibratoire du procédé de soudage par friction malaxage.

III.5 Modélisation du procédé de FSW

Nous avons intégré les propriétés mécaniques à l'aide du logiciel ABAQUS, et ses caractéristiques physiques sont présentées dans le tableau ci-après (III.2):

Tableaux III. 2 Les propriétés mécaniques des 03 matériaux.

	Aluminium	Cuivre	Acier
Densité (g/ cm³)	2.7 ^E -09	8.96 ^E -09	7.85 ^E -09
Conductivité (W/m.k)	0.15	0.401	0.5
Module d'Young (GPa)	70000	110000	210000
Specific Heat (J/g-K)	670000	385000	460000

1^{ère} vitesse de déplacement : 100 mm/min.

2^{ème} vitesse de déplacement : 50 mm/min.

III.6 Résultats de Simulation

A. Analyse thermomécanique

La figure suivante (III.24) représentent modélisation du l'opération du soudage par friction malaxage pour la matière d'aluminium :

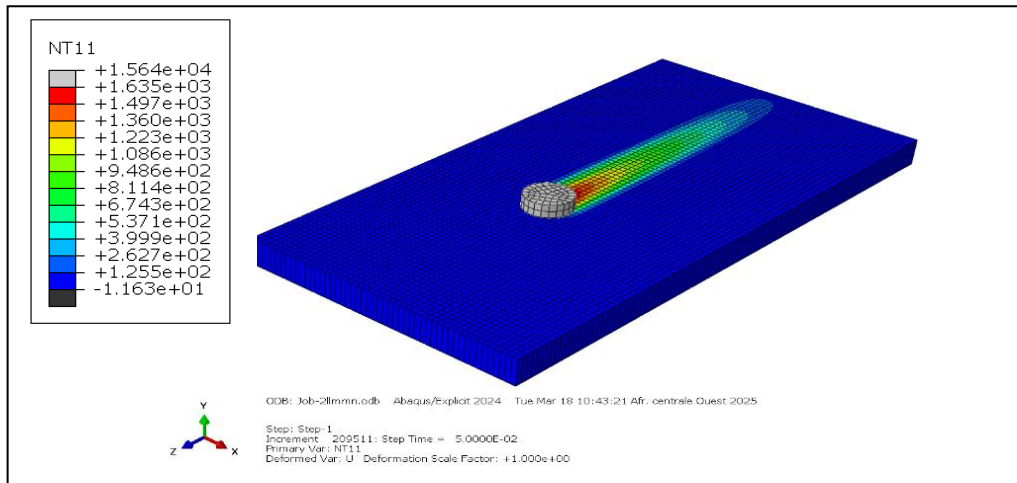


Figure III. 24 Visualisation du mode thermique d'un matériau d'Aluminium.

Interprétation des résultats

La figure (III.24) présente les résultats d'une simulation thermique (NT11) réalisée durant un processus de soudage par friction malaxage (FSW), obtenus à partir d'un modèle Abaqus/Explicit. Les températures affichées, allant de $+1.564 \times 10^4$ à -1.163×10^1 , révèlent une distribution thermique asymétrique le long de la zone de soudure, typique du FSW, où la chaleur est générée par le frottement et la déformation plastique. Les températures élevées, atteignant $+1.564 \times 10^4$ (en °C, bien que ces valeurs soient anormalement élevées pour des matériaux conventionnels), indiquent une concentration locale d'énergie, tandis que le gradient décroissant témoigne de la dissipation thermique dans le matériau environnant. L'étape simulée (Step Time = 5.0000×10^{-2}) correspond à un moment clé du processus, où les contraintes résiduelles thermiques commencent à se développer, impactant ainsi les propriétés mécaniques finales de l'assemblage.

A.1 Distribution des contraintes thermiques au niveau de la soudure pour FSW

L'effet thermique induit par le procédé de soudage par friction-malaxage (FSW) dans une structure provoque une répartition non uniforme des contraintes, principalement dues aux gradients de température. En effet, ce type de soudure engendre localement une élévation de température sans atteindre la fusion du matériau, ce qui modifie les propriétés mécaniques dans les zones soudées et adjacentes. Afin de mettre en évidence la concentration des contraintes thermiques au niveau de la soudure, une simulation thermique a été réalisée en appliquant un flux thermique représentant la chaleur générée par l'outil en rotation et en déplacement. Les résultats montrent une répartition inégale des contraintes thermiques selon les différentes zones affectées par le processus (zone de malaxage, zone thermo

mécaniquement affectée et zone affectée thermiquement), révélant ainsi les effets du gradient thermique sur la structure soudée, la figure (III.25).

➤ Contrainte moyenne (V. Mises) :

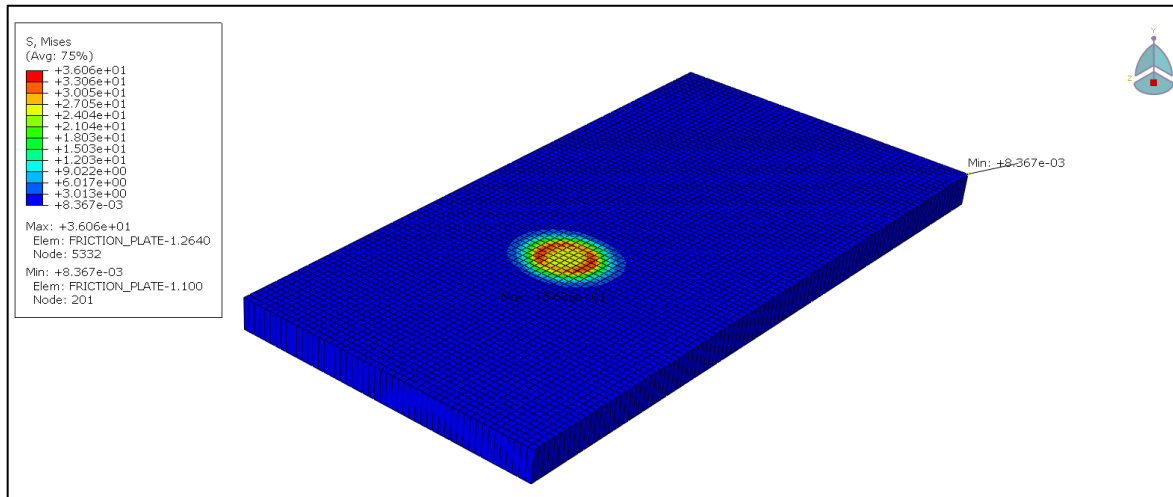
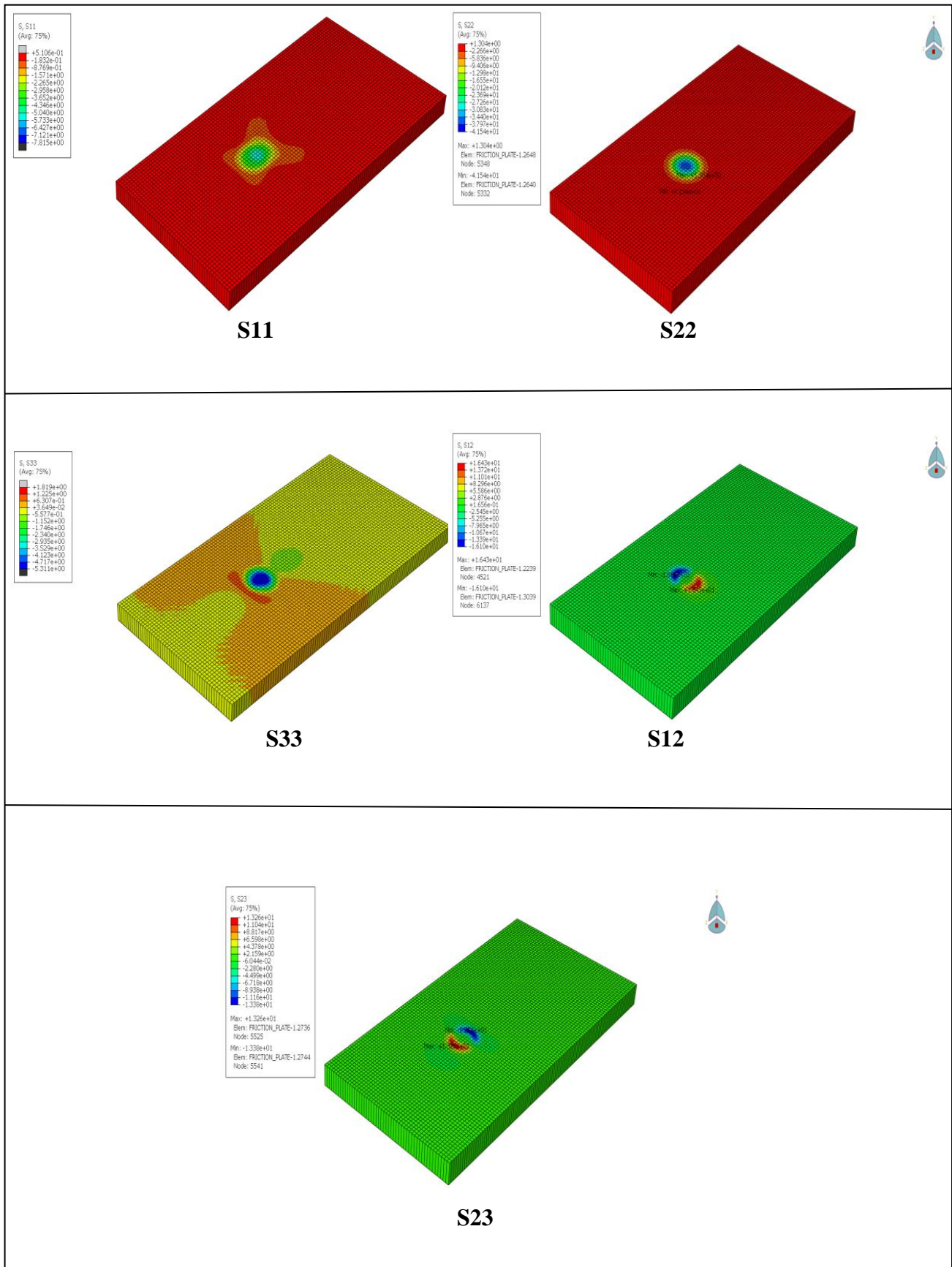


Figure III. 25 Distribution des contraintes résiduelles de Von Mises dans un assemblage soudé par FSW sous pression : Résultats de simulation numérique.

Interprétation

La figure (III.25) présente Distribution des contraintes résiduelles de Von Mises dans un assemblage soudé par FSW sous pression : Résultats de simulation numérique, obtenue via une simulation numérique sous Abaqus/Explicit. Les valeurs de contrainte, exprimées en notation scientifique, varient de $+1.564e+04$ à $-1.163e+01$, indiquant une distribution hétérogène des contraintes résiduelles à travers la zone soudée. Les contraintes les plus élevées se concentrent probablement près de la ligne de soudure, reflétant l'effet combiné de la déformation plastique intense et de la pression appliquée durant le procédé FSW. Les valeurs négatives, bien que faibles, suggèrent la présence de contraintes de compression localisées, souvent associées au retrait thermique lors du refroidissement. Cette distribution est typique des soudures FSW, où les gradients thermomécaniques induisent des contraintes résiduelles complexes, pouvant influencer la durabilité et les performances mécaniques de l'assemblage.

➤ Conformément aux orientations (limitations) axiales/planes, figure (III.26)



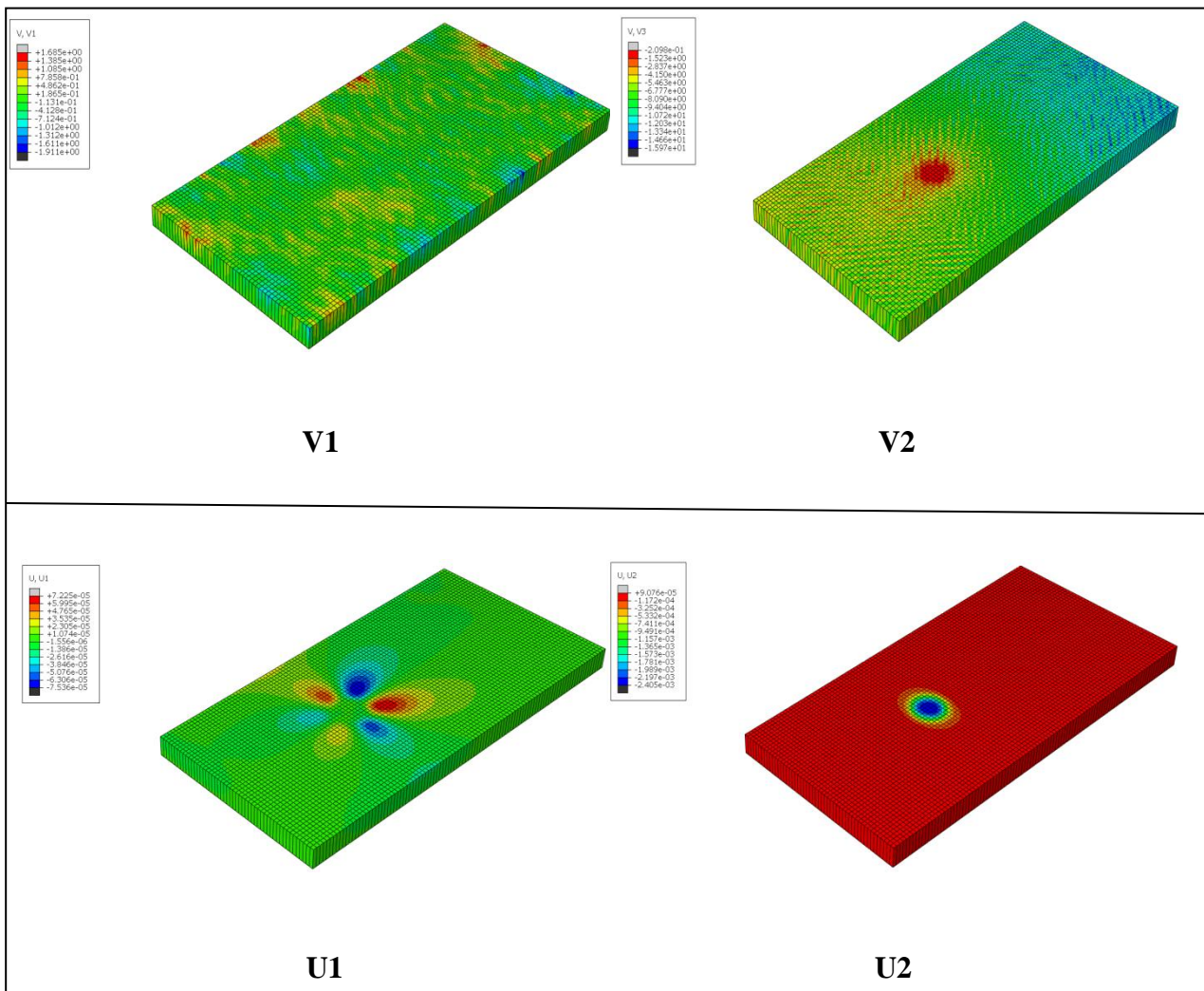


Figure III. 26 Distribution des contraintes résiduelles aux orientations (limitations) axiales/planes dans un assemblage soudé par FSW sous pression.

Interprétation

Les figures (III.26) présentent une analyse numérique des contraintes résiduelles et des champs de déformation dans un assemblage soudé par friction malaxage (FSW) sous pression. Les cartographies des contraintes (S11, S22, S33) révèlent une anisotropie marquée, avec des valeurs maximales en traction (+1.643e+01 MPa pour S12) et en compression (−4.154e+01 MPa pour S22), localisées près de la zone de friction, reflétant l'hétérogénéité des gradients thermomécaniques induits par le procédé. Les déplacements (U1, U2) et vitesses (V1) montrent des asymétries directionnelles, avec des maxima en U1 (+1.127e-04 mm) et des minima en U2 (−4.8124e-03 mm), confirmant l'influence de la pression appliquée sur la cinématique de déformation. La présence de contraintes résiduelles élevées et de gradients de déformation suggère des risques potentiels de fissuration ou de distorsion, soulignant

l'importance d'optimiser les paramètres de soudage (pression, vitesse de rotation) pour minimiser ces effets.

- Le tableau suivant (III.3) présente les valeurs des facteurs de densité thermique dans les directions (contraintes) axiales/planes en fonction de la circonférence de la soudure dans 5 positions nodales (PN) :

Tableaux III. 3 valeurs des facteurs d'intensité des contraintes thermiques.

	PN 1	PN 2	PN 3	PN 4	PN 5
S11(x)	+7.519 ^{e-1}	-1.975	-7.429	-1.152 ^{e+01}	-1.561 ^{e+01}
S22(y)	+1.304	-1.298 ^{e+01}	-2.012 ^{e+01}	-3.440 ^{e+01}	-4.154 ^{e+01}
S33(z)	+3.767	-9.542 ^{e-01}	-4.495	-6.856	-1.040 ^{e+01}

Interprétation

L'analyse des contraintes thermiques selon les trois axes principaux (S11-x radial, S22-y circonférentiel, S33-z axial) comme le tableau (III.3) révèle une évolution spatiale marquée des contraintes le long de la soudure. Les résultats montrent une transition générale de contraintes de traction vers des contraintes de compression pour toutes les directions entre les positions 1 et 5. La composante circonférentielle S22 présente l'amplitude de contraintes la plus élevée, atteignant -41.54 en position 5, ce qui suggère un effet de confinement thermique important dans cette direction. La composante axiale S33, bien qu'initialement en traction (+3.767), développent des contraintes compressives croissantes le long de la soudure. La composante radiale S11 montre quant à elle un gradient de contraintes moins prononcé mais toujours significatif. Cette distribution hétérogène des contraintes, avec des valeurs particulièrement élevées en positions 4 et 5, pourrait engendrer des risques de fissuration thermique ou de déformation plastique différentielle, nécessitant une attention particulière dans la conception et le procédé de soudage pour ces zones critiques.

B. Analyse paramétrique

Dans cette section, nous examinerons l'impact des paramètres tels que la vitesse de déplacement et les caractéristiques mécaniques des matériaux sur le processus de soudage.

➤ **1^{er} cas : Impact de la vitesse de déplacement**

Les deux figures suivantes (III.27) représente la différence entre deux valeurs de vitesse déplacement (a = 100 mm/min; b = 50 mm/min) :

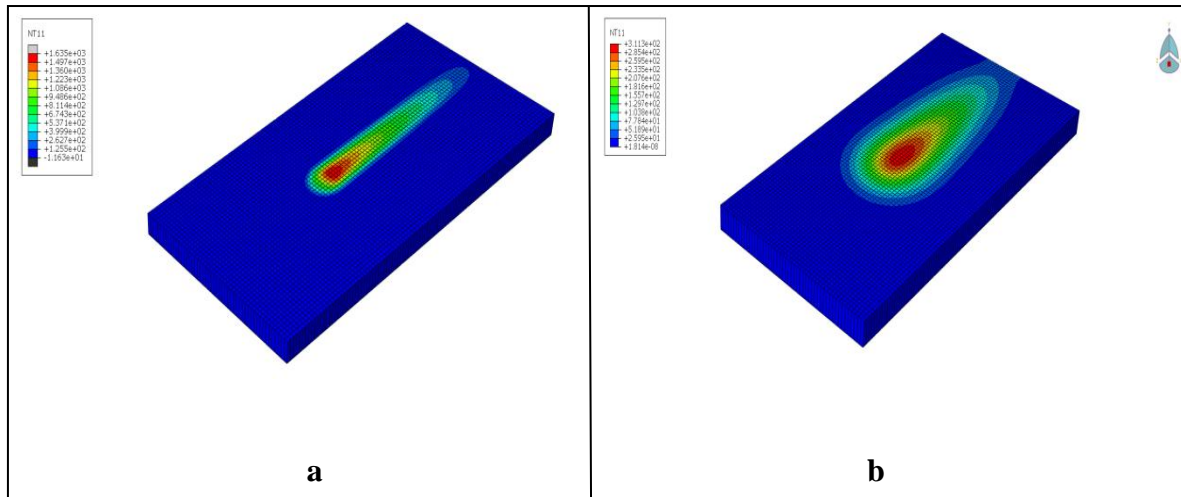


Figure III. 27 Visualisation du mode thermique de deux différentes valeurs de vitesse.

Interprétation

Les deux figures (NT11), représentant des valeurs de vitesse de déplacement distinctes (100 mm/min et 50 mm/min), révèlent des comportements mécaniques contrastés. La première figure (100 mm/min) affiche des valeurs élevées, variant de (+1.635e+03 à -1.163e+01), avec une décroissance marquée, ce qui suggère une dissipation énergétique importante et des contraintes résiduelles significatives à haute vitesse. La seconde figure (50 mm/min) présente des valeurs nettement inférieures (+3.113e-02 à +1.814e-08), indiquant une réponse plus stable et une réduction drastique des phénomènes dissipatifs à vitesse réduite. La présence de valeurs négatives dans le premier cas témoigne possiblement de zones de compression locale comme la figure (III.27), absentes dans le second cas.

Cette comparaison met en évidence l'influence critique de la vitesse de déplacement sur la distribution des contraintes : une vitesse élevée génère des gradients importants et des effets inertiels prononcés, tandis qu'une vitesse réduite favorise une réponse plus homogène et maîtrisée, essentielle pour des applications nécessitant une précision accrue ou une intégrité structurale préservée.

➤ **2ème cas : Impact des caractéristiques mécaniques**

Les figures suivants (III.28,...32) représentent les graphes de la distribution de la température nodale le long du cordon en fonction de temps.

a. Aluminium

1^{ère} vitesse : 100 mm/min

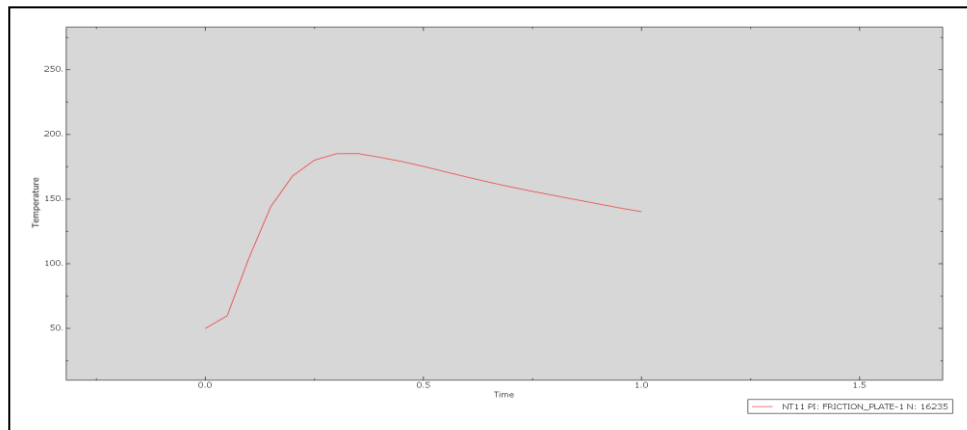


Figure III. 28 Graphe de la distribution de la température nodale le long du cordon (Al).

Interprétation

Les résultats obtenus révèlent l'évolution de la température au cours d'un processus de soudage par friction malaxage (Friction Stir Welding, FSW) appliqué à un alliage d'aluminium, avec une vitesse de déplacement de 100 mm/min. Dès le début du procédé, une augmentation rapide de la température est observée, atteignant un maximum d'environ 250°C, suivie d'une phase de stabilisation relative avant une diminution progressive comme la figure (III.28). Cette courbe caractéristique illustre les étapes essentielles du FSW : l'échauffement initial causé par le frottement et la déformation plastique, la phase stable où la production de chaleur et la dissipation thermique s'équilibrent, et enfin le refroidissement qui se produit après l'arrêt de l'outil. De plus, la température maximale atteinte (250°C) est cruciale pour assurer une qualité de soudure optimale. Une température insuffisante pourrait compromettre la fusion des matériaux, tandis qu'une température trop élevée pourrait altérer les propriétés mécaniques de l'alliage. La vitesse de déplacement de 100 mm/min ne semble pas générer un profil thermique adéquat, mais des analyses supplémentaires (microstructure, résistance mécanique) seraient nécessaires pour confirmer l'optimisation des paramètres.

2^{ème} vitesse : 50 mm/min

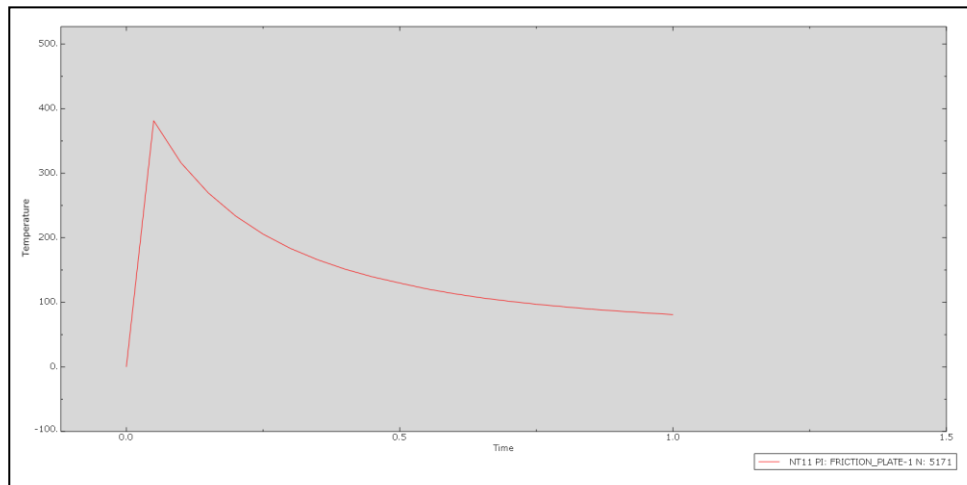


Figure III. 29 Graphe de la distribution de la température nodale le long du cordon (Al).

Interprétation

En comparant les deux courbes, en fonction de deux vitesses distinctes : 100 mm/min (premier essai) et 50 mm/min (deuxième essai). La réduction de la vitesse à la moitié entraîne des variations thermiques notables la figure (III.29). À 100 mm/min, la température atteint un maximum modéré d'environ 250°C, avec une montée rapide suivie d'un refroidissement soudain, ce qui indique un temps de processus court et une accumulation de chaleur limitée la figure (III.28). En revanche, à 50 mm/min, la température maximale grimpe à 400°C, avec un réchauffement plus progressif et un plateau thermique prolongé, ce qui est typique d'une durée de soudage plus longue et d'une énergie de friction plus élevée. Cette disparité peut être attribuée à un temps de contact prolongé entre l'outil et le matériau à une vitesse réduite, ce qui génère davantage de chaleur et favorise une plasticité accrue, tout en présentant un risque potentiel de surchauffe localisée. La vitesse de 50 mm/min. pourrait donc être privilégiée pour des assemblages plus épais nécessitant une fusion plus complète, tandis que 100 mm/min serait plus adaptée aux pièces fines ou aux alliages sensibles à la chaleur.

b. Cuivre

1^{ère} vitesse : 100 mm/min

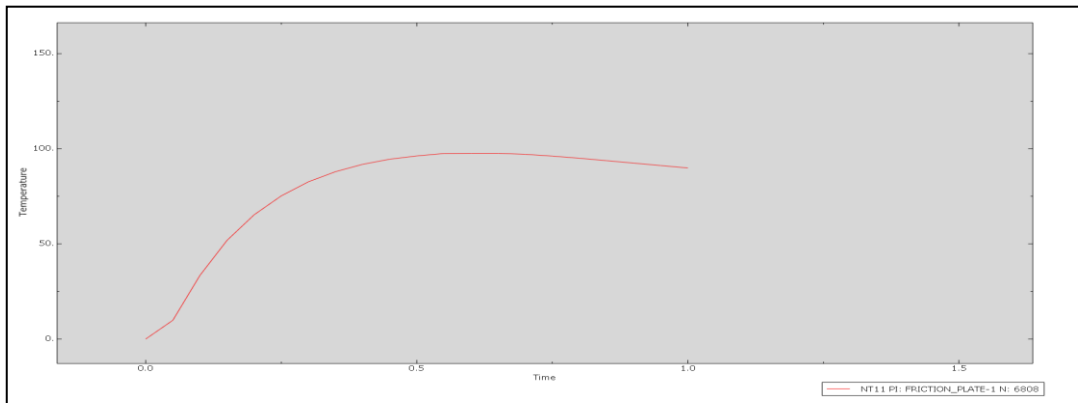


Figure III. 30 Graphe de la distribution de la température nodale le long du cordon (cuivre).

2ème vitesse : 50 mm/min

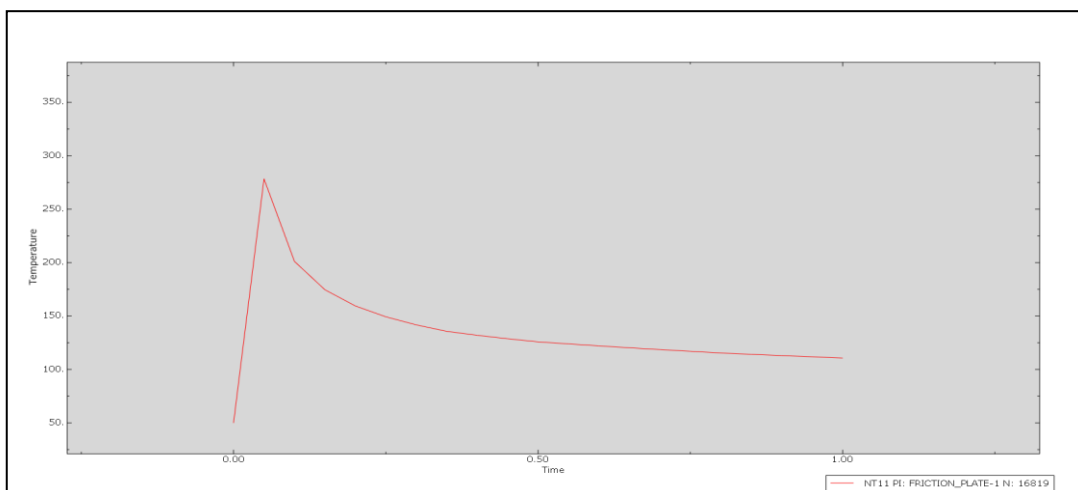


Figure III. 31 Graphe de la distribution de la température nodale le long du cordon (cuivre).

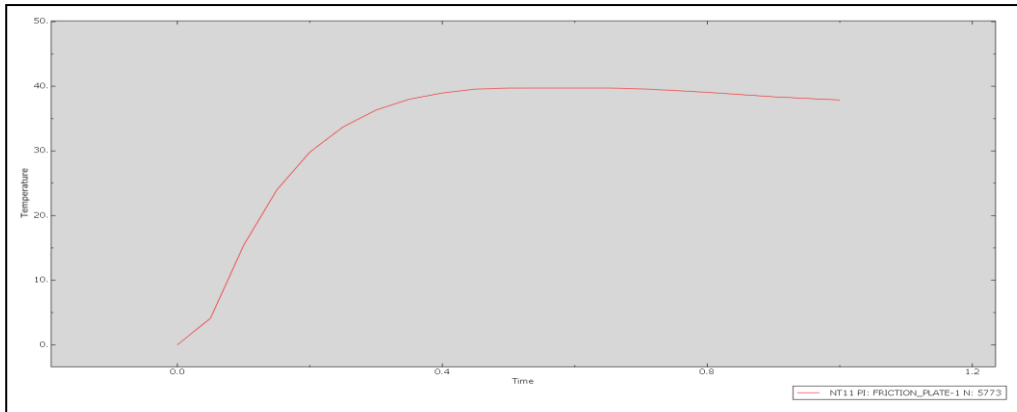
Interprétation

Les deux courbes mettent en évidence les différences marquées dans le comportement thermique du cuivre lors du soudage par friction-malaxage, en fonction de la vitesse de déplacement la figure (III.30). À 100 mm/min, on observe une montée rapide de la température, atteignant un minimum de 100°C, indiquant une faible production de chaleur due à un faible frottement. En revanche, à 50 mm/min, la montée en température est plus progressive, avec un pic maximal élevé de 300 °C, indiquant une distribution d'énergie plus contrôlée la figure (III.31). Ces différences indiquent qu'une vitesse plus élevée (100 mm/min) favorise une fusion rapide, ce qui n'est pas idéal pour les joints à haute résistance, mais comporte le risque d'une chute de température entraînant un soudage médiocre et

inefficace, tandis qu'une vitesse plus lente (50 mm/min) permet un meilleur contrôle thermique.

c. Acier

1ère vitesse : 100 mm/min



2ème vitesse: 50 mm/min

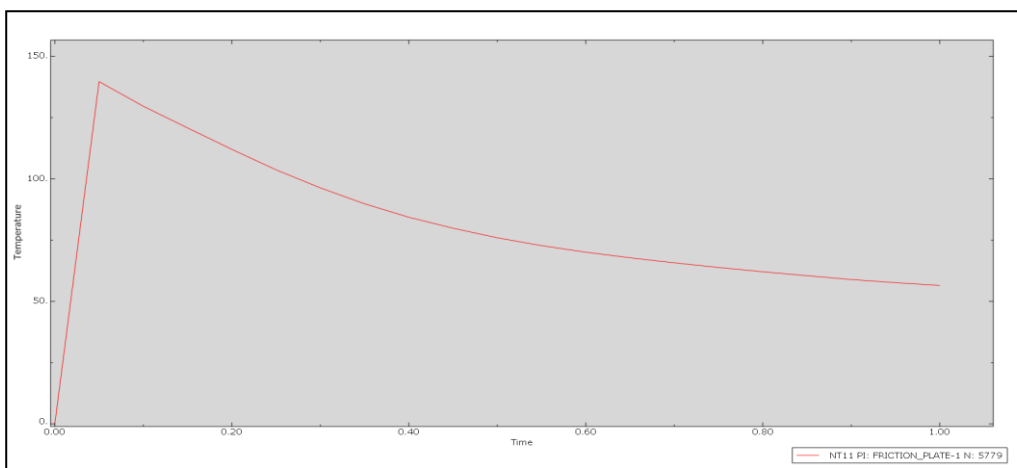


Figure III. 32 Graphes de la distribution de la température nodale le long du cordon (acier).

Interprétation

Les données thermiques relatives au soudage par friction malaxage sur acier montrent des comportements variés en fonction des vitesses de déplacement. À la première vitesse de 100 mm/min, le système enregistre une température de référence de 40°C, avec une évolution rapide dans le temps (0-1,2 unités de temps). En revanche, à la seconde vitesse de 50 mm/min, la courbe est plus complexe, affichant des températures oscillantes entre 100°C et 150°C sur une période d'une unité, ce qui conduit à une valeur finale légèrement plus élevée, figure (III.30).

Nous observons que la température de l'acier est nettement inférieure à celle des métaux précédemment mentionnés, à savoir l'aluminium et le cuivre. Cette différence s'explique par le fait que chaque métal possède une température de fusion spécifique. Pour obtenir une chaleur de soudage optimale, l'acier requiert une vitesse de frottement plus élevée.

Interprétation générale et comparative des alliages (Cuivre, Acier, Aluminium) en soudage par friction malaxage

L'examen comparatif des trois alliages met en évidence des comportements thermiques variés, tout en restant en accord avec leurs caractéristiques matérielles. Pour le cuivre, une vitesse élevée (100 mm/min) entraîne un pic thermique moins prononcé (100C°) par rapport à une vitesse plus faible (250C°). En revanche, l'acier présente des valeurs finales proches (100C° contre 150C° unités), malgré des cinétiques divergentes. L'aluminium se distingue par une élévation de sa température maximale (de 250°C à 400°C) lorsque la vitesse diminue, ce qui diffère des autres matériaux. Ces variations peuvent être expliquées par : (1) la conductivité thermique élevée du cuivre, qui favorise une dissipation rapide à basse vitesse, (2) la résistance mécanique de l'acier, qui requiert des températures constantes indépendamment de la vitesse, et (3) la sensibilité thermique de l'aluminium, où une vitesse réduite permet une meilleure accumulation de chaleur.

En conclu Le choix des paramètres optimaux repose essentiellement sur la combinaison matériau/application. Les vitesses élevées (100 mm/min) sont adaptées aux opérations nécessitant un cycle thermique court (cuivre, aciers minces), tandis que les vitesses plus faibles (50 mm/min) sont préférables pour les matériaux à faible conductivité thermique (aluminium) ou pour les assemblages plus épais. Une tendance se dessine : plus un matériau est conducteur (Aluminium > Cuivre > Acier), plus l'impact de la vitesse sur le profil thermique est significatif.

Conclusion

Cette étude de simulation du soudage par friction malaxage (FSW) a offert une analyse détaillée de l'impact des paramètres de vitesse sur le comportement thermique de divers matériaux, notamment le cuivre, l'acier et l'aluminium. Les résultats obtenus soulignent la nécessité d'ajuster les conditions de soudage en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque alliage afin d'assurer la qualité des assemblages.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale

Au terme de cette étude consacrée à l'analyse de la génération des contraintes thermiques dans le procédé de soudage par friction malaxage (FSW), plusieurs conclusions importantes peuvent être dégagées, ouvrant la voie à des perspectives prometteuses pour l'optimisation de cette technique d'assemblage innovante.

Ce travail vise à statistiquement l'influence de plusieurs paramètres de soudage, dont la vitesse de déplacement, les caractéristiques mécaniques des matériaux et la géométrie de l'outil sur la qualité des assemblages par soudage par friction malaxage.

Les résultats confirment l'efficacité de la modélisation thermique pour améliorer la qualité des soudures. L'analyse des contraintes thermiques, telles que la modélisation numérique, a permis de valider des combinaisons optimales de paramètres, démontrant une amélioration significative de la qualité des assemblages.

En appliquant les études paramétriques (vitesse de déplacement, les caractéristiques mécaniques des matériaux) avec une modélisation numérique de FSW par logiciel D'ABAQUS, les conclusions qui ressortent de ce travail se résument comme suite :

- Procédé à l'état solide, évitant les défauts de fusion.
- Importance des paramètres opératoires : vitesse de rotation, vitesse d'avance, géométrie de l'outil.
- Gradients thermiques significatifs malgré l'absence de fusion.
- Corrélation directe entre paramètres de soudage et intensité des contraintes résiduelles.
- Zone Affectée Thermiquement (ZAT) présentant des gradients prononcés.
- Modèle prédictif fiable pour les champs de température et contraintes thermiques.
- Optimisation du ratio vitesse de rotation/vitesse d'avance cruciale pour minimiser les contraintes.

- Performances par matériau : I) Aluminium : Température optimale de 400°C à 50 mm/min. II) Cuivre : Contrôle précis de la conductivité thermique nécessaire. III) Acier : Vitesses élevées requises pour une fusion satisfaisante.

Les perspectives ouvertes par ce travail sont multiples. Sur le plan scientifique, l'extension du modèle numérique pour intégrer les transformations microstructurales induites par les cycles thermiques constituerait une avancée significative. Sur le plan technologique, l'application des connaissances acquises à d'autres configurations de soudage (joints en T, etc.) et l'étude de la faisabilité du FSW pour de nouveaux alliages à haute performance.

BIBLIOGRAPHIE/ WEBOGRAPHIE

Références

- [1].Roland Cazes : 'Soudage par friction-malaxage.' Techniques de l'ingénieur, traité Génie mécanique, BM 7 746.
- [2].ZIMMER, Sandra. Contribution a l'industrialisation du soudage par friction malaxage. 2009. Thèse de doctorat. Arts et Métiers ParisTech.
- [3].https://www.researchgate.net/figure/Schema-de-principe-du-soudage-par-friction-malaxage-FSW-40_fig17_278636361.
- [4].MOULAY ALI Boujellel ; Etude du comportement des joints soudés par FSW du PEHD : Etude Numérique et Expérimentale, Thèse de magister Université de Mascara Algérie - 2013.
- [5].SOUDAGE DE L'ALUMINIUM PAR FRICTION MALAXAGE (FSW) Auteur : Maurice Duval .11 Janvier 2018.
- [6].Fuller, C.B., Friction stir tooling: tool materials and designs. Friction stir welding and Processing, 2007: p. 7-36
- [7].Guo, J. F., H. C. Chen, C. N. Sun, G. Bi, Z. Sun, and J. Wei. 2014. «Friction stir welding of dissimilar materials between AA6061 and AA7075 Al alloys effects of process parameters», Materials & Design, 56: 185-92.
- [8].C. B. Fuller, 2007, Friction Stir Welding and Processing - Chapter 2 Friction Stir Tooling: Tool Materials and Designs, Friction Stir Welding and Processing, Edit par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International.
- [9].W. J. Arbegast, 2007, Chapter 13: Application of Friction Stir Welding and Related Technologies, Friction Stir Welding and Processing, Edit par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International.
- [10].https://www.researchgate.net/figure/Figure-16-Les-differentes-technologies-de-soudage-12_fig4_330616339.
- [11].stirweld. Comment définir mes paramètres de soudage par Friction Malaxage.
- [12].https://www.researchgate.net/figure/Principe-du-soudage-par-friction-malaxage-Dans-un-cadre-dune-industrialisation-du_fig1_281946547.

- [13].S. Zimmer, W. Chapeau, B. Da Costa, X. Stassart, N. Ben Salima Ayadi, L. Langlois, J.C. Goussain, B. de Meester, L. D'Alvise, Manuel Pédagogique, Le soudage par friction malaxage, Friction stir welding, ISBN 978-2-900781-67-8.
- [14].Scribd.com, POSITION-DE-SOUDAGE. Tj andrian.
- [15].LORRAIN, Olivier. Analyses expérimentales et numériques du procédé de soudage par Friction malaxage FSW. 2010. Thèse de doctorat. Arts et Métiers ParisTech.
- [16].Novembre 18, 2022 Categories :Bond Technologies, Friction Stir Welding .
- [17].XD THERMAL.27octobre2023. Friction stirs welding.
- [18].Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murch, M. G., Temple-Smith, P., & Dawes, C. J. (1991). Friction stir butt welding. *International Patent Application PCT/GB92/02203*.
- [19].Nandan, R., DebRoy, T., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2008). Recent advances in friction-stir welding—process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*, 53(6), 980-1023.
- [20].Threadgill, P. L., Leonard, A. J., Shercliff, H. R., & Withers, P. J. (2009). Friction stir welding of aluminum alloys. *International Materials Reviews*, 54(2), 49-93.
- [21].L. F. Mondolfo, Aluminum Alloys, Structures and Properties, Butterworth, London, vol. 12, p.14-18, (1976).
- [22].B. Dubost, p. Sain fort, Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques, Paris, vol. 240, p. 2-37, (1994).
- [23].https://www.google.com/search?q=les+alliages+d%27aluminium&sca_esv=9535a44266e54a5f&sxsrf=AHTn8zoiVUMDqx5S92p0wGN0Wv7ic3ZpA:1738246490750&source=hp&biw=1472&bih=741&ei=WombZTTktu4hbIPwJyeuQU&iflsig=ACkRmUkAAAAAZ5uXauT88a4ZtumQudI_G4bNlfxGv2JI&oq=les+alliages+d%27&gs_lp=EgNpbWciD2xlcyBhbGxpYWdlcyBkJyoCCAeyBRAAGIAEMgUQABiABDIEEAAYHjIEEAAYHjIGEAAAYBRgeMggQABgFGAoYHjIGEAAAYCBgeMgYQABgIGB4yBhAAGAgYHkj_dFCID1i0X3ABeACQAQCYAcsBoAHfEqoBBjAuMTMuMrgBAcgBAPgBAYoCC2d3cy13aXotaW1nmAIQoAKpE6gCCsICBxAjGCcY6gLCAGcQABiABBgKmAMJkcgGMS4xMy4yoAfHSg&sclient=img&udm=2#vhid=yzsOj0xFNsy-PM&vssid=mosaic

- [24].B. Barlas ; « Etude du comportement et de l'endommagement en fatigue d'alliages d'aluminium de fonderie » thèse de doctorat ; Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris ; France (2004).
- [25].R. Develay ; « Données numériques sur l'aluminium non allié » ; Techniques de l'ingénieur M443.
- [26].Christian VARGEL, 10 mars 2010, Familles d'alliages d'aluminium Métallurgie de l'aluminium.
- [27].Beaulieu, D. (2003). Calcul des charpentes d'aluminium (6e éd.). Chicoutimi, Québec : Les Presse de l'aluminium.
- [28].Levéé V. (2016). Aluminium 101. Magazine FORMES, 12(2), 28.
- [29].Arbegast, W.J., A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding. Scripta Materialia, 2008. 58(5): p. 372-376.
- [30].Kooney, A., et al., Friction Stir Process Mapping Methodology. 2002.
- [31].C. B. JAGADEESHA, FSW between Al alloy and Mg Alloy: The comparative study, Aout 2017.
- [32].TRA-C industrie, Soudage par Friction Malaxage FSW (Friction Stir Welding).2009.
- [33].ZINTILON, Le 29 janvier 2024, Défaut de soudure : types, causes et remèdes.
- [34].B.J. Connolly, A.J. Davenport, M. Jariyaboon, C. Padovani, R. Ambat, S.W. Williams, D.A. Price, A. Wescott, C.J. Goodfellow & C.-M. Lee. 5th International Symposium on Friction Stir Welding, 2004.
- [35].M. J. Russel & H. R. Shercliff. 1st International Symposium on Friction Stir Welding, 1999.
- [36].Schneider, J. A., & Nunes Jr., A. C. (2004). Characterization of plastic flow and resulting microtextures in a friction stir weld. Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing, 35(4), 777-783.
- [37].Schmidt, H., & Hattel, J. (2004). Modelling thermomechanical conditions at the tool/matricinterface in friction stir welding. 5th International Symposium on Friction Stir Welding, Metz, France.

- [38].Reynolds, A. P., Tang, W., Khandkar, Z., Khan, J. A., & Lindner, K. (2005).Relationship between weld parameters, hardness distribution and temperature history in alloy 7050friction stir welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, 10(2), 190-199.
- [39].Kurt, A., Uygur, I., & Ates, H. (2006). The effect of shoulder diameter to weldability on thefriction stir welding. 6th International Symposium on Friction Stir Welding, St-Sauveur, Canada TWI.
- [40].Feng, Z., Processes and mechanisms of welding residual stress and distortion.Woodhead Publishing in materials. 2005, Boca Raton, Fla.: CRC Press.
- [41].Durdanović, M. B., Mijajlović, M. M., Milčić, D. S. et Stamenković, D. S. (2009). Heat generation during friction stir welding process. *Tribology in Industry*, 31(1-2):8–14
- [42].Schmidt, H., Hattel, J. et Wert, J. (2004). An analytical model forthe heat generation in friction stir welding. *Modelling and Simulation in Materials Scienceand Engineering*, 12(1):143–157.
- [43].Schneider, J., Beshears, R. et Nunes, A. C. (2006). Interfacialsticking and slipping in the friction stir welding process. *Materials Science and EngineeringA*, 435-436:297–304.
- [44].Morisada, Y., Imaizumi, T. et Fujii, H. (2015). Clarification ofmaterial flow and defect formation during friction stir welding. *Science and Technology ofWelding and joining*, 20(2):130–137.
- [45].Jacquin, D., De Meester, B., Simar, A., Deloison, D., Montheillet, F., and Desrayaud, C. (2011). A simple Eulerian thermomechanical modeling of friction stir welding. *Journal Of Materials Processing Technology*, 211(1) :57–65.
- [46].Li, W., Zhang, Z., Li, J., and Chao, Y. (2012). Numerical analysis of joint temperature Evolution during friction stir welding based on sticking contact. *Journal of materials Engineering and . . .*, 21(9) :1849–1856.
- [47].Li, T., Gan, W., and Khurana, S. (2006). Friction stir welding of L80 and X70 steels. *Proceedings of the 6th International FSW Symposium*.
- [48].Santiago, D., Urquiza, S., Lombera, G., Vedia, L. D., and Aires, B. (2009). 3D Modeling

Of Material Flow and Temperature in Friction Stir Welding. 14(3) :248–256.

[49].Zettler, R., Santos, J. F., Donath, T., Beckmann, F., and Lohwasser, D. (2006). Material Flow in friction stir butt welded aluminium alloys . Development, pages 1–10.

[50].Guerdoux, S. and Fourment, L. (2007). Error estimation and accurate mapping based ALE formulation for 3D simulation of friction stir welding. AIP Conference Proceedings, 908 :185–190.

[51].Jemal, N., Girot, F., Langlois, L., and Masse, J.-E. (2011). Qualification du domaine de Soudabilité en soudage par friction malaxage. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure D'Arts et Métiers.

[52].Jacquin, D. and Desrayaud, C. (2009). Modélisation de l'histoire thermomécanique des Zones soudées en Friction Stir Welding. Application à la prévision des microstructures.

[53].Schmidt, H. and Hattel, J. (2005a). A local model for the thermomechanical conditions In friction stir welding. . . . And Simulation in Materials Science and . . . , 13(1) :77–93.

[54].Zhang, X. X., Xiao, B. L., and Ma, Z. Y. (2011). A Transient Thermal Model for Friction Stir Weld. Part I : The Model. Metallurgical and Materials Transactions A, 42(10) :3218–3228.

[55].Arora, A., DebRoy, T., and Bhadeshia, H. (2011). Back-of-the-envelope calculations in friction stir welding—Velocities, peak temperature, torque, and hardness. Acta materialia, 59(5) :2020–2028.

[56].Heurtier, P., Jones, M., and Desrayaud, C. (2006). Mechanical and thermal modelling of Friction stir welding. Journal of Materials . . . , 171(3) :348–357.

[57].Schmidt, H. and Hattel, J. (2008). Thermal modelling of friction stir welding. Scripta Materialia, 58(5) :332–337.

[58].Song, M. and Kovacevic, R. (2003). Thermal modeling of friction stir welding in a moving Coordinate system and its validation. International Journal of Machine Tools and . . . ,

43 :605–615. Microtextures in a friction stir weld. Metallurgical and Materials Transactions B : Process Metallurgy and Materials Processing, 35(4), 777-783.

[59].Feulvarch2016] E. Feulvarch. « Modélisation numérique du procédé de soudage par Friction malaxage ». In : Techniques de l'ingénieur : Assemblage des matériaux Par soudage (2016) (cf. p. 12, 21, 27).

[60].L. Fourment, S. Guerdoux, M. Miles, T. Nelson, Numerical Simulation of the Friction Stir Welding Process using both Lagrangian and Arbitrary Lagrangian Eulerian Formulations, Proc. 5th Int. Symp. On Friction Stir Welding, Metz, France, 2004, TWI Ltd.

[61].Z. Zhang, J. T. Chen, Z. W. Zhang ,H. W. Zhang. Coupled thermo-mechanical model based Comparison of friction stir welding processes of AA2024-T3 in different thicknesses. Journal of Science Volume 46, Number 17, pp. 5815-5821.

[62].M.Z.H. Khandkar, J.A. Khan and A.P. Reynolds. Prediction of temperature distribution and thermal History during friction stir welding : input torque based model. Science and Technology of Welding and Joining 2003 Vol. 8 No. 3, pp.165-174.

[63].H Schmidt, J Hattel and J Wert . An analytical model for the heat generation in friction stir welding. Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 12 (2004), pp. 143-157.

[64].Frigaard, Ø Grong, and O.T. Midling. A Process Model for Friction Stir Welding of Age Hardening Aluminum Alloys. Metallurgical and Materials transactions A ; volume 32A, May 2001-1197.

[65].G. Buffa, J. Hua, R. Shivpuri, and L. Fratini, A continuum based fem model for friction stir welding Model development. Materials Science and Engineering : A Volume 419, Issues 1-2, 15 March 2006, pp. 389-396.

[66].M. Song, R. Kovacevic. Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system andIts validation. International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003), pp. 605-615.

[67].A. Guedoiri. « Contribution à la modélisation et à la simulation numérique du soudage par friction et malaxage ». ENSAM. Thèse de doct. 2012 (cf. p. 26).

[68].Sibalic, N. Modeling and Simulation of the Process of Joining by Deformation-FSW. Ph.D. Thesis, University of Montenegro, Podgorica, Montenegro, 2010.

[69].Maurizio Targhetta-Fotolia.com-Nouvelle présentation 2013 © Dunod, Paris, 2003, 2008

ISBN 978-2-10-059861-8-Usinage de la photo de couverture.

[70].Mohamed AMIRAT, Méthode des éléments finis, Note de cours, ECAM de Rennes, 2012.

[71].MEFTEH KAMEL. Cours : Introduction général au logiciel Abaqus université de Biskra. 2013.