

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Amar Télidji – Laghouat

FACULTE : Technologie

DEPARTEMENT : Génie Mécanique



MEMOIRE DE MASTER

Présenté par

ELBIA Younes Abdelhak

BOUSSBIA Abdelatif

DOMAINE : Science et Technologie

FILIERE : Génie Mécanique

SPECIALITE : Fabrication Mécanique et Productique

Thème

Simulation numérique d'une opération de soudage par friction

Jury de soutenance

Nom et Prénom	Garde	Qualité
Rezig Ahmida	MCB	Président
Mechraoui Ameer	MAA	Examineur
Maati Ahmed	MCA	Encadreur

Année Universitaire 2022-2023

ملخص

الهدف من هذا العمل هو محاكاة عملية اللحام بالاحتكاك (على سبيل المثال FSW) لسبائك الألمونيوم باستخدام طريقة العناصر المنتهية عبر برنامج ABAQUS. توضح هذه الدراسة المراحل المختلفة للمحاكاة العددية (الهندسة، الشبكة، الشروط الحدية، الخ...). تأخذ المحاكاة العددية في الحسبان بعض عوامل التأثير على عملية التلحيم بالاحتكاك مثل سرعة دوران الأداة وسرعة تقدم الصفائح المعدنية. الخصائص التي تم فحصها هي بشكل خاص مجال درجة الحرارة داخل الأجزاء الملحومة والتدفق الحراري المتولد أثناء اللحام بالاحتكاك.

Résumé

Le présent travail a pour objectif de simuler numériquement le procédé de soudage par friction d'un alliage d'aluminium en utilisant le code de calcul éléments finis ABAQUS. L'étude vise à mettre en évidence les différentes étapes de simulation de l'opération (géométrie, maillage, conditions aux limites, etc.). La simulation prend aussi en considération l'effet de quelques paramètres d'influence sur l'opération de soudage tels que la vitesse de rotation de l'outil et la vitesse d'avance des plaques. Les paramètres évalués sont notamment le champ de température et le flux de chaleur générés.

Mots clés: Soudage par friction, Abaqus, FEA, Flux de chaleur, Champs de température.

Abstract

The objective of this work is to numerically simulate the friction welding (for example FSW) process of an aluminum alloy using FEA via ABAQUS software. This study shows the different phases of the numerical simulation (geometry, mesh, boundary conditions, etc.). The numerical simulation takes into account the effect of certain welding parameters such as the rotation speed of the tool, the feed rate of plates. The investigated parameters are especially the field of temperature inside the welded parts and the heat flux generated during the friction welding.

Key Words: Friction welding, Abaqus, Heat flux, Temperature field.

Remerciements

Principalement ALLAH dieu merci pour tout et pour le succès dans nos carrières d'étude

Nous exprimons, nos profondes gratitudees à Monsieur MAATI Ahmed d'avoir accepté de diriger ce travail, pour son aide et ses encouragements.

Un grand merci à tous les personnels qui nous donne leur aide pour réaliser ce travail.

Enfin un grand merci à nos parents .toute nos familles et tous nos amis qui n'ont encouragé de près ou de loin pendant la fin de mon mémoire.

... Founes et Abdelatif

Dédicace

Je dédie ce travail

à mes yeux et mes supports dans cette vie mon cher père Khaled et ma chère mer

à mon bras droit, mon frère Salah eddine

à mes chères sœurs

à toute la grande famille et mes vrais réels amis

...Foumes abdelhak

Dédicace

A ma chère mère & mon cher père Ahmed

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices. Quisse Dieu le très haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.

A mes tres chers freres et mes belles sœurs

...Abdelatif

Liste des figures

Figure I.1 : Classifications des procédés de soudage CETIM 1989

Figure I.2 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus

Figure I.3 : Soudage à l'arc électrique

Figure I.4: Soudage par résistance

Figure II.1 : Principe du soudage par friction.

Figure II.2 : Principaux procédés de soudage par friction, a – Friction rotative, b – Friction linéaire, c – Friction malaxage (FSW)

Figure II.3: Soudage par friction de tuyaux avec disque intermédiaire rotatif

Figure II.4 : Soudage par friction linéaire

Figure II.5 : Schéma montrant les principales composantes de l'outillage en soudage par friction malaxage (FSW)

Figure II.6 : étapes d'un cycle de soudage par friction

Figure II.7 : Effets de la pression et la vitesse sur la morphologie de la ZAT

Figure III.1 : structure d'analyse sur ABAQUS.

Figure III.2 : Eléments de l'opération de soudage (Module Part).

Figure III.3 : Module Property

Figure III.4: Assemblage des deux plaques et le pion.

Figure III.5: Module Step

Figure III.6: Interactions entre le pion et les deux plaques

Figure III.7 : Maillage des éléments de l'opération de soudage

Figure III.9 : Module Job.

Figure III.10 : Visualisation des résultats de simulation.

Figure III.11 :

Figure III.12 : Influence vitesse de rotation de pion sur NT11

Figure III.13 : Influence vitesse de rotation de pion sur HFL

Figure III.14 : Influence de la vitesse d'avance des deux plaques par NT11

Figure III.14 : Influence de la vitesse d'avance des deux plaques par HFL

Liste des tableaux

Tableau III.1: Unités prises en considération lors de la simulation par ABAQUS.....	19
Tableau III.2: Propriétés Matériau	21
Tableau III.3: Températures maximales pour les différentes vitesses de rotation considérées NT11.....	27
Tableau III-4: Flux de chaleur maximales pour les différentes vitesses de rotation considérées HFL	29
Tableau III.5: Températures maximales pour les différentes vitesses d’avance considérées	31
Tableau III.6: Flux de chaleur maximales pour les différentes vitesses d’avance considérées HFL	32

Sommaire

Remercîment	iii
Dédicace	v
Table des matières.....	vii
Table des figures	vi
Liste des tableaux	
Introduction général	1
Chapitre I : Généralités sur les procédés de soudage des tôles métalliques....	
I.1 Introduction	5
I.2 Définition de soudage.....	5
I.3 Procédés de Soudage.....	6
I.4 Types de soudage	7
I.4.1 Soudage par fusion.....	7
I.4.2 Soudage à l'état solide.....	8
Chapitre II : Soudage par friction : principe et modalité.....	10
II.1 Introduction.....	11
II.2 Définition de soudage par friction	12
II.3 Histoire de soudage par friction.....	12
II.4 Principe de fonctionnement.....	12
II.5 Types de soudage par friction.....	13
II.5.1 Soudage par friction rotative.....	14
II.5.1.1 Principe du soudage par friction rotative.....	15

II.5.2 Soudage par friction linéaire.....	16
II.5.3 Soudage par friction malaxage.....	17
II.6 Phases d'un cycle de soudage par friction.....	17
II.7.1 Phase de friction.....	18
II.7.2 Phase de forgeage.....	19
II.8 Paramètres du soudage par friction.....	19
II.8.1 Vitesse.....	19
II.8.2 Pression.....	19
II.8.3 Temps.....	20
II.9 Avantages du soudage par friction.....	21
II.10 Inconvénients du soudage par friction.....	21

Chapitre III : simulation numérique d'une opération de soudage par friction malaxage.....23

III.1 Soudage par friction malaxage FSW (Friction Stir Wilding).....	24
III.2 Présentation du code de calcul par éléments finis ABAQUS.....	24
III.3 Logiciels sur le marché :.....	24
III.4 Deux solveurs principaux:.....	25
III.6 Les systèmes d'unités dans le logiciel ABAQUS.....	26
III.7.1 Module Part :.....	27
III.7.2 Module Property.....	28
III.7.3 Module Assembly.....	29
III.7.4 Module Step.....	30
III.7.5 Module interaction.....	31
III.7.6 Module Mesh.....	31
III.7.7 Module Load.....	32

III.7.8 Module Job.....	33
III.7.9 Module vitalisation.....	33
III.8 Résultantes et discussions.....	34
III.9 Influence de la vitesse de rotation de Pion.....	35
III.10 Influence de la vitesse d'avance des de Plaques.....	38
III Conclusion General	42
Références	
bibliographiques.....	43

Introduction Général

Introduction général

Le soudage par friction est considéré comme une technique moderne de fabrication, permettant d'assembler des alliages difficilement soudables par des procédés de soudages classiques. Le soudage à l'état solide est classé parmi les procédés de soudage basés sur l'échauffement de la matière, qui consiste à lier deux pièces en les amenant dans un état pâteux grâce à un pion en rotation. Lors du soudage par friction malaxage, un outil rotatif constitué d'un pion profilé et d'un épaulement est enfoncé dans la matière jusqu'à ce que l'épaulement touche la surface du matériau à souder. La matière est donc chauffée par friction à des températures où elle est facilement déformable. Lorsque l'outil avance, la matière s'écoule de l'avant vers l'arrière du pion pour former le joint soudé, performant est nécessaire pour obtenir des joints de qualité.

Dans ce travail nous nous intéressons à la simulation numérique d'une opération de soudage par friction malaxage.

Ce travail peut être divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les procédés de soudage des tôles métalliques en mettant en évidence les paramètres d'influence pour un bon déroulement de l'opération de soudage.

Le deuxième chapitre présente plus de détails sur les procédés de soudage par friction en donnant les avantages et les inconvénients de tels procédés ainsi que les phénomènes physiques qui se produisent lors du soudage par friction.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation numérique d'une opération de soudage par friction malaxage utilisé souvent pour assembler deux tôles de même nature. Cette simulation nous permettra de mettre en évidence les différents paramètres d'entrée et de sortie de ce type de soudage.

Enfin une conclusion générale qui va montrer l'importance de la simulation numérique des procédés de fabrication mécanique et en particulier le procédé de soudage.

Chapitre I :
Généralités sur les procédés
de soudage des tôles
métalliques

I.1 Introduction

Nous présentons brièvement différents procédés de soudages employés pour assembler des pièces métalliques de même ou différentes nature. Ils sont généralement classés en deux catégories : les procédés de soudage par fusion et ceux à l'état solide, comme le soudage par friction [1]

Le soudage par friction est un procédé de fabrication utilisé en générale pour assembler des pièces mécaniques par frottement l'une contre l'autre, cependant il peut être appliqué dans certains cas particulier, en mode de soudage hétérogène pour assembler deux pièces de nature différentes.

L'assemblage par soudage occupe une place importante dans tous les domaines de l'industrie et de la construction mécanique. Que ce soit pour l'assemblage de bateaux, de trains, d'avions, de fusées, ou encore de voitures, de ponts, de tuyaux, de réservoirs, de tige de forage, etc. . La facilité de sa mise en œuvre et le contrôle des propriétés mécaniques, rendent le soudage très indispensable surtout du point de vue économique [2].

I.2 Définition de soudage

Le soudage est l'opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage de façon permanente, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, avec ou sans emploi d'un produit d'apport. On considère qu'un matériau métallique est soudable par un procédé et pour un type d'application, lorsqu'il est possible d'assurer une continuité métallique par la constitution d'un joint soudé qui, par ses caractéristiques locales et les

conséquences globales de sa présence, satisfait au mieux les propriétés requises pour l'application souhaitée [3].

I.3 Procédés de Soudage :

On dénombre quelques dizaines de procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres, la continuité métallique est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques (frottements). Les sources d'énergies utilisées dans le domaine du soudage sont de types chimiques, électriques, optiques ou mécaniques [4].

Selon Perry et al [5], on peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre comme il est présenté sur la Figure I.1.

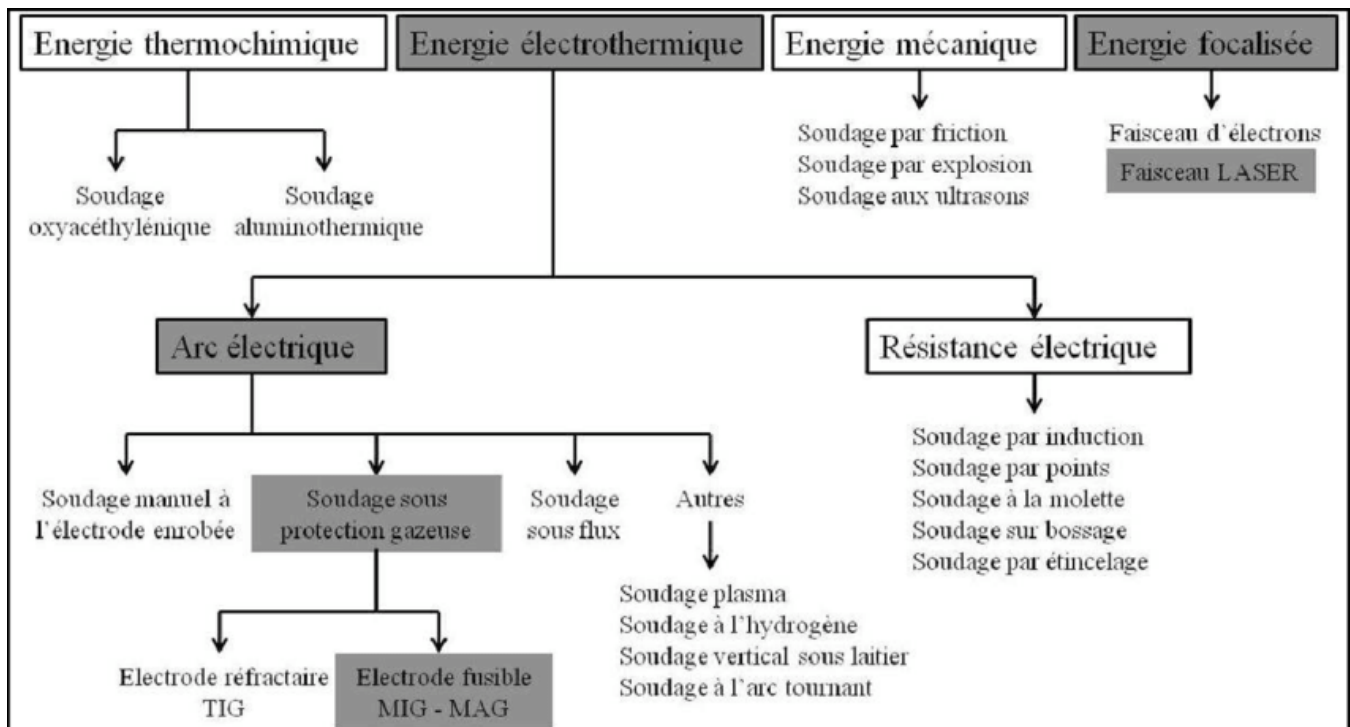


Figure I.1 : Classifications des procédés de soudage CETIM 1989 [6].

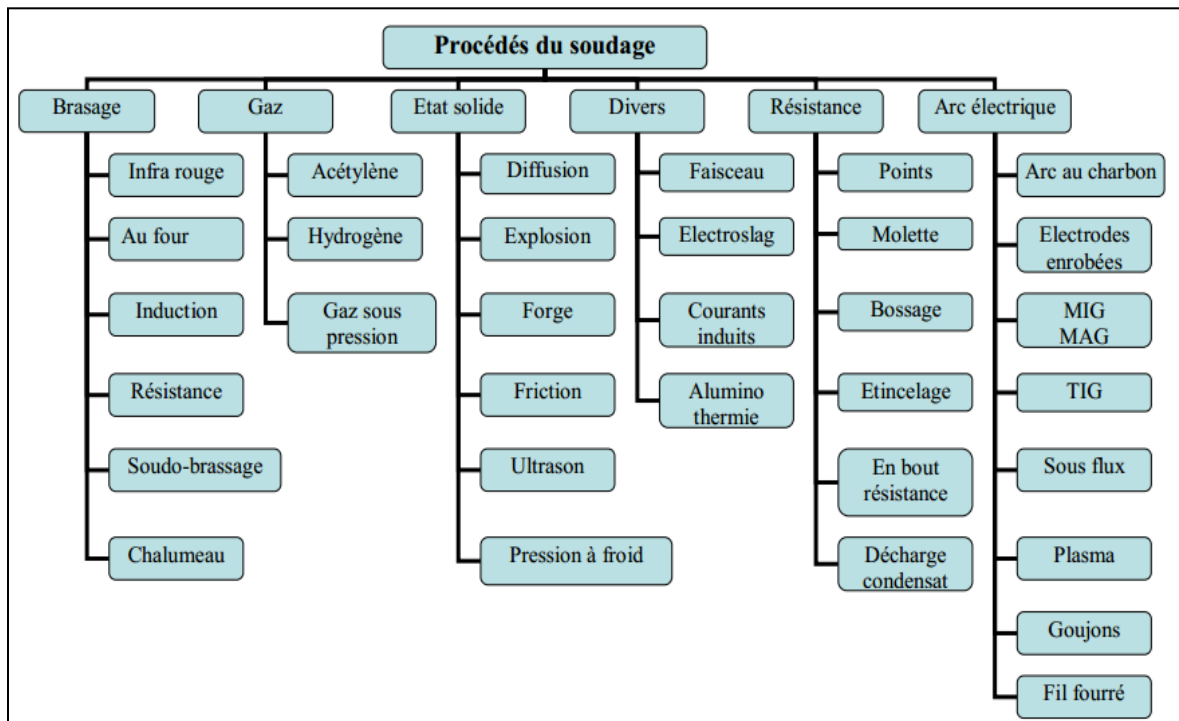


Figure I.2 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus

I.4 Types de soudage:

Il existe deux types de soudage : soudage par fusion et soudage à l'état solide.

I.4.1 Soudage par fusion

Dans l'industrie, le procédé le plus utilisé pour construire des assemblages de matériaux de mêmes propriétés est le soudage en phase liquide [7]. Les principaux types de soudage par fusion sont ;

- Le soudage à l'arc électrique
- Le soudage par faisceaux d'électrons
- Le soudage par faisceaux laser

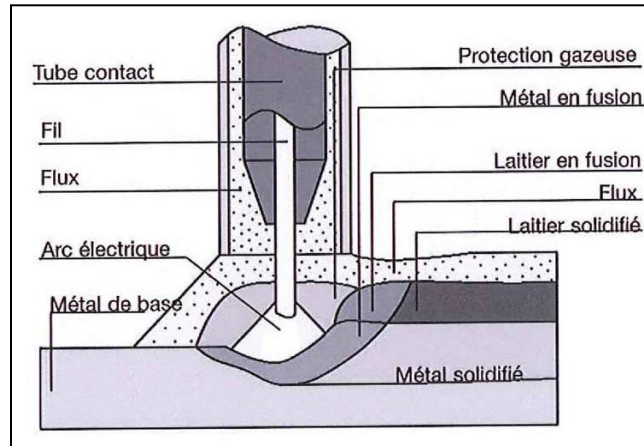


Figure I.3 : Soudage à l'arc électrique

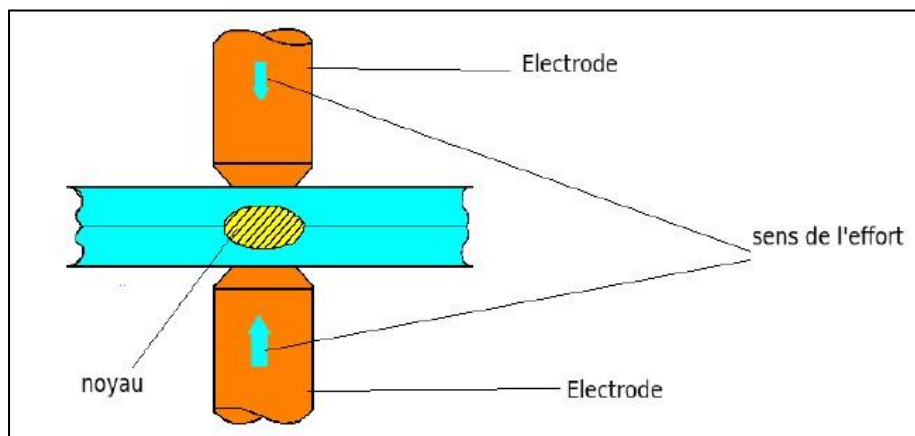


Figure I.4 : Soudage par résistance

I.4.2 Soudage à l'état solide

Les procédés de soudage à l'état solide regroupent tous les procédés où il y a création d'une liaison métallique sans que les matériaux (métaux de base et éventuellement le métal d'apport) n'atteignent pas leur température de fusion respective. Le nettoyage des surfaces s'effectue alors par un frottement et/ou une déformation intense localisée conduisant à chasser les impuretés et créer un contact

Chapiter III

intime entre les matériaux à assembler permettant à la diffusion et aux forces interatomiques de prendre le relais [8]. Les principaux types de soudage à l'état solide sont :

- Soudage par diffusion
- Soudage par friction
- Soudage par friction-malaxage
- Soudage par ultrason
- Soudage par impulsion magnétique explosion

Chapitre II :
Soudage par friction :
principe et modalités

II.1 Introduction

Connu dès la fin du siècle dernier, mais rarement employé, le soudage par friction a été développé sous sa forme industrielle en union soviétique vers 1956 puis en Grande-Bretagne et aux États-Unis quelques années plus tard.

Le soudage par friction permet de réaliser des assemblages en bout de deux pièces dont l'une au moins a une symétrie de révolution. Il met en œuvre l'effet thermique engendré dans leur plan de joint par la rotation rapide sous pression des pièces l'une sur l'autre ou encore par friction. La puissance de chauffage résulte du couple résistant et de la vitesse de rotation maintenue en principe constante. C'est un procédé d'assemblage global qui se classe parmi les procédés de forgeage. Du fait du fluage du matériau pendant la friction et lors du forgeage, la température de fusion n'est jamais atteinte.

Il est difficile d'emploi sur des matériaux n'ayant pas de caractéristiques favorables au phénomène de friction et en particulier les matériaux très électroconducteurs tels que le cuivre et ses alliages.

Dans une application donnée, il peut entrer en compétition favorable avec les autres procédés utilisables, à savoir et essentiellement : le soudage en bout par résistance ou par étincelage, le soudage par bossage annulaire, le soudage par faisceau d'électrons et le brasage. Son point fort se situe au niveau de sa source de chaleur – de nature mécanique – particulièrement facile à réaliser et à maîtriser grâce à sa stabilité naturelle. Il en découle pour les machines une morphologie très simple et des avantages intéressants : pas d'appel de courant

élevé, pas de projections, des outillages sans usure, pas d'apport de métal coûteux, un contrôle aisé, etc., appréciés dans les ateliers de construction mécanique [9].

II.2 Définition de soudage par friction

Dans les machines de soudage par friction, L'utilisation du mouvement relatif entre les pièces à souder sous l'effet de la pression de contact sert à la conversion de l'énergie mécanique en une quantité de chaleur au niveau du joint de soudure à l'aide du frottement produit à l'interface de contact. La génération du frottement est effectuée selon le type et les directions de ce mouvement. On distingue trois types de mouvements : mouvement de rotation, mouvement alternatif et mouvement linéaire [10].

II.3 Histoire de soudage par friction

la première brevet les dates soudage par friction de 1891 aux États-Unis. Ils ont suivi d'autres brevets en Europe et l'Union soviétique. Les compagnies américaines chenille, Rockwell International, fonderie de fabrication américaine et Thompson soudage par friction ont développé des machines pour ce type de processus. L'archive historique le plus complet se trouve à l'American Welding Society

II.4 Principe de fonctionnement

Le soudage par friction est un procédé de soudage dans lequel l'assemblage est réalisé en frottant l'une contre l'autre les surfaces à assembler et ce, sous une pression contrôlée. Le frottement entre les pièces à assembler crée de la chaleur (Figure II.1). La température dans la surface de contact augmente sans atteindre la température de fusion. Quand la température désirée est atteinte, le frottement est arrêté et les pièces devenues plastiques sont pressées l'une contre l'autre pour former l'assemblage. La friction fournit un chauffage de façon relativement simple

et assure également que les surfaces de la soudure soient suffisamment nettoyées. Par le mouvement relatif, les impuretés ou les oxydes sont éliminées de la zone de la soudure. Les paramètres à contrôler pour tous les procédés basés sur le frottement sont la force de contact, la vitesse relative et la durée du frottement

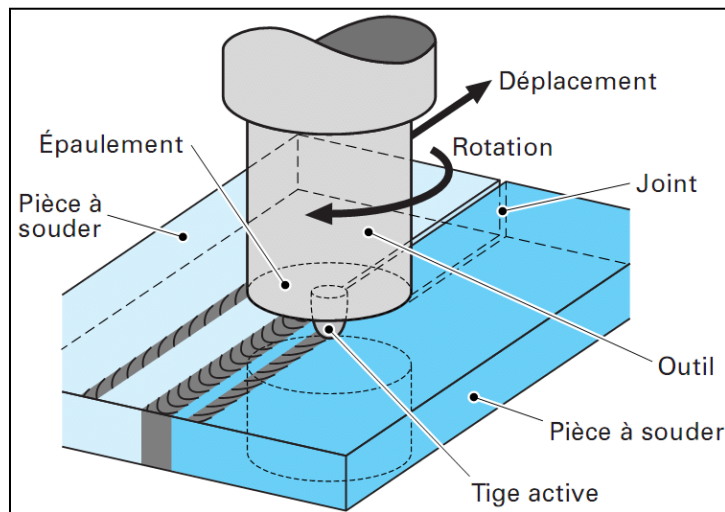


Figure II.1 : Principe du soudage par friction.

II.5 Types de soudage par friction

Selon la manière de produire le frottement, il existe différentes variantes du procédé de soudage par friction, à savoir le procédé de soudage par friction rotative (Figure II.2.a), le soudage par friction linéaire (Figure II.2.b) et le procédé de soudage par friction malaxage (Figure II.2.c).

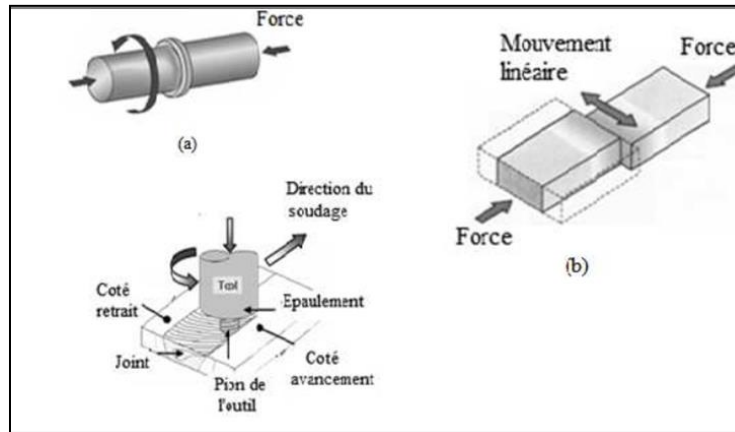


Figure II.2 : Principaux procédés de soudage par friction, a – Friction rotative, b – Friction linéaire, c – Friction malaxage (FSW)

II.5.1 Soudage par friction rotative

Ce type de soudage est utilisé pour les pièces de révolution. Dans ce processus, une pièce est animée d'un mouvement de rotation autour de son axe tandis que l'autre est maintenue immobile sous un effort axial de compression. Lors du soudage par friction rotative, l'énergie de rotation pendant la phase de friction peut être générée et transférée à la pièce tournante selon deux manières. Par l'utilisation d'un moteur tournant à vitesse constante (*soudage par friction pilotée*) ou par l'utilisation de l'énergie cinétique stockée dans un volant rotatif (*soudage par friction inertielle*).

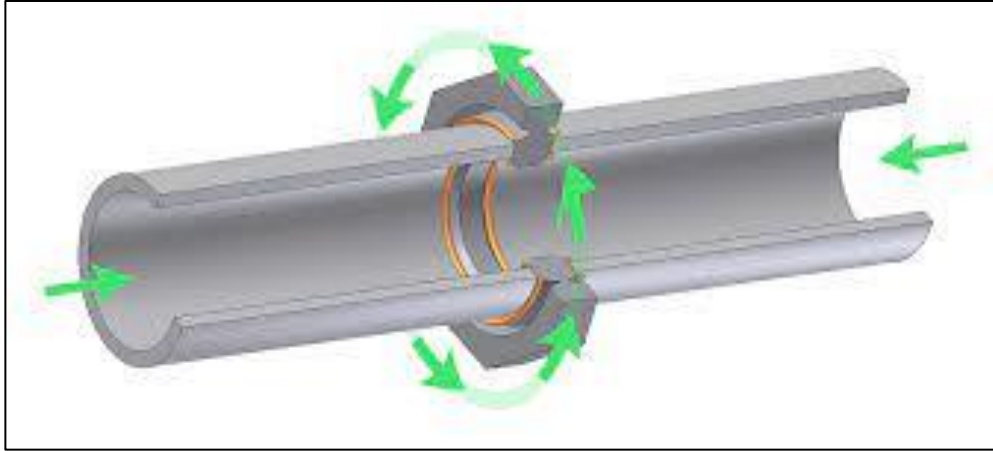


Figure II.3: Soudage par friction de tuyaux avec disque intermédiaire rotatif

II.5.1.1 Principe du soudage par friction rotative

Un grand nombre de pièces fabriqués à partir de différents matériaux ont traditionnellement nécessité certaines opérations d'assemblage. Habituellement, certaines méthodes de soudage par fusion sont utilisées pour souder des aciers à faible teneur en carbone. Cependant, le soudage des aciers à haute teneur en carbone et des superalliages est plus difficile que de souder des aciers à faible ou moyen carbone en raison de la teneur élevée en carbone qui affaiblit la soudabilité du matériau. Bien que les méthodes de soudage par fusion conventionnelles ne soient pas facilement compatibles avec les dernières nuances de superalliages à haute résistance, des techniques de soudage par friction sont en cours de développement dans ces applications. Le soudage par friction rotative est un processus qui produit une soudure sous l'effet d'une force de compression, mettant en contact deux pièces en rotation l'une par rapport à l'autre afin de produire de la chaleur et de déformer plastiquement le matériau à l'interface de contact [11]. Le joint de soudure peut être obtenu sans atteindre le point de fusion du matériau; ce

qui réduit considérablement les problèmes de fissuration et la déformation grossière des soudures lors de la solidification. En outre, le soudage par friction présente des avantages supplémentaires par rapport aux techniques de soudage par fusion [12].

II.5.2 Soudage par friction linéaire

Le soudage par friction linéaire est un processus dans lequel une pièce est fixe et l'autre est animée d'un mouvement linéaire oscillatoire sous une pression normale. Le soudage par friction linéaire peut souder des pièces prismatiques (non circulaires) et la génération de chaleur est presque uniforme sur toute la section du joint.

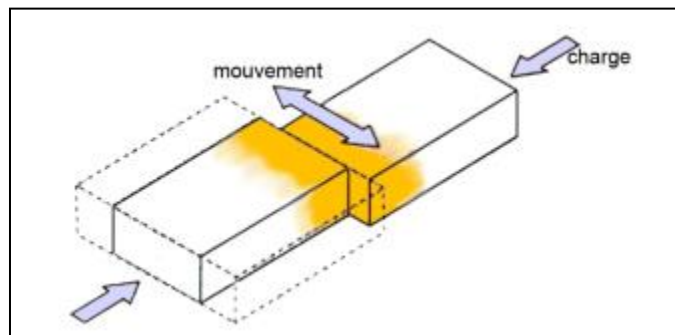


Figure II.4 : Soudage par friction linéaire

II.5.3 Soudage par friction malaxage

Lors du soudage par friction-malaxage (FSW), un outil rotatif à épaulement qui se termine par un pion fileté se déplace le long des surfaces de contact de deux plaques serrées de manière rigide, comme illustré à la Figure I.3. L'épaulement est en contact avec la surface supérieure des pièces à souder. La chaleur générée par le frottement entre le pion de l'outil rotatif et les deux pièces ramollit le matériau à souder. Une déformation plastique sévère et un écoulement de ce métal plastifié se produisent lorsque l'outil est déplacé dans le sens de la soudure [13].

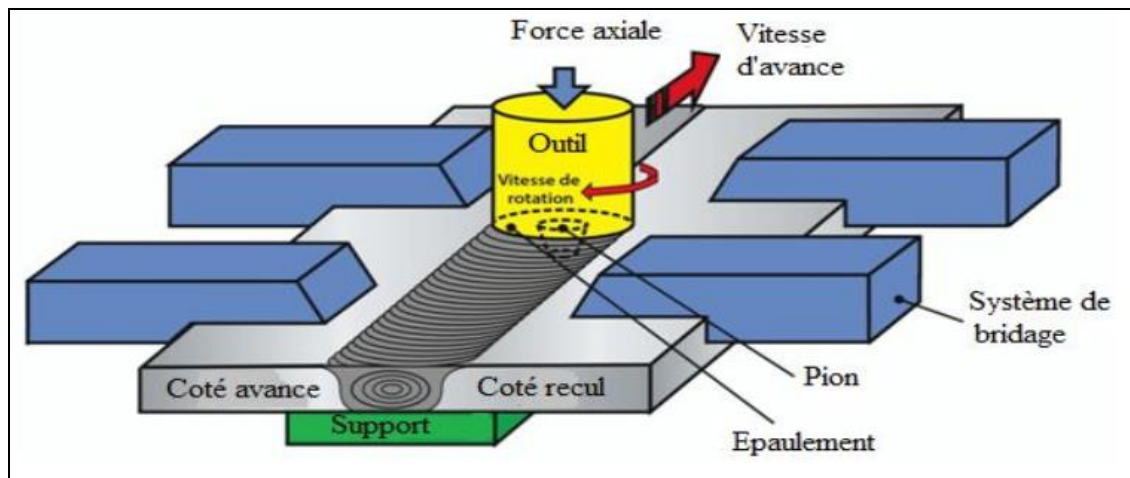


Figure II.5 : Schéma montrant les principales composantes de l'outillage en soudage par friction malaxage (FSW) [14].

II.6 Phases d'un cycle de soudage par friction

La réalisation d'un cycle de soudage par friction rotative consiste en première étape à mettre en rotation la pièce tournante, l'accostage et la mise en contact des deux pièces à souder. Une force de compression axiale est ensuite appliquée pour que les deux pièces frottent l'une contre l'autre. Durant cette étape, la chaleur nécessaire au soudage est générée, ce qui provoque une déformation plastique du matériau à l'interface de contact. Après avoir atteint une durée ou un raccourcissement axial prédéterminé, la pièce en rotation est arrêtée et la force axiale est augmentée en même temps jusqu'à ce que la soudure soit consolidée et refroidie. Les étapes de base du soudage par friction rotative sont illustrées à la Figure II.6.

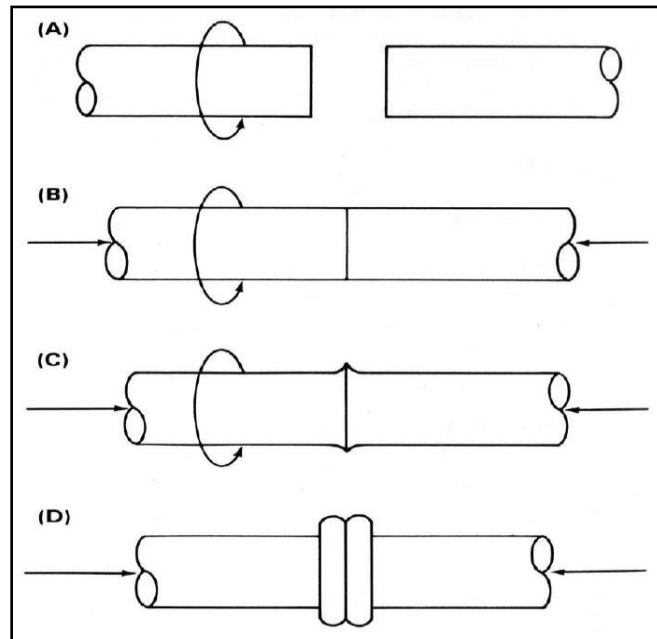


Figure II.6 : étapes d'un cycle de soudage par friction

II.7.1 Phase de friction

Durant la phase de friction, les surfaces en contact se frottent l'une contre l'autre sous l'action d'un effort axial de compression. Ceci permet la génération de la chaleur et une forte adhésion se produit à la zone de contact. Après un certain moment, un cisaillement se produit et le métal est transféré d'une surface à l'autre. À mesure que le frottement continue, la température à l'interface et le couple augmentent et la quantité de la matière transférée croit. Pendant cette période, le couple augmente et diminue jusqu'à une valeur minimale qui reste constante. Lorsque le métal est chauffé et plastifié, il est transféré - sous l'effet de la force axiale - à partir de l'interface vers les bords extérieurs. Le raccourcissement axial se poursuit à augmenter [15].

II.7.2 Phase de forgeage

Lorsque la vitesse de rotation tend à diminuer (à la fin de la phase d'échauffement) et la pression est augmentée (au début de la phase de forgeage), un deuxième pic de couple se produit lorsque la liaison métallique se produit à l'interface et se refroidit. Le couple est ensuite tend à diminuer lorsque la vitesse de rotation s'annule. Pour les métaux dissemblables, plusieurs facteurs peuvent influencer le mécanisme de liaison ce qui le rend plus complexe et très difficile de prédire l'aptitude à la soudabilité des métaux différents. Parmi ces facteurs, on cite notamment les propriétés physiques et mécaniques, la structure cristalline, la solubilité mutuelle et les composés intermétallique [16].

II.8 Paramètres du soudage par friction

Les paramètres importants qui affectent la qualité des soudures obtenues par friction rotative sont la vitesse de rotation, la pression axiale et le temps nécessaire pour réaliser un cycle de soudage.

II.8.1 Vitesse

La vitesse de rotation est liée à la nature du matériau à souder et au diamètre de la surface à souder à l'interface. Ce paramètre a des effets différents sur les propriétés mécaniques des joints de soudure par friction. Une grande vitesse de rotation entraîne la génération d'une quantité importante de chaleur à l'interface, ce qui entraîne par conséquent, un ramollissement du matériau et une augmentation de la formation intermétallique. Afin de minimiser les effets néfastes et produire des joints de bonne qualité, les vitesses de rotation utilisées doivent être appropriées. Car, la variation des vitesses de rotation produit des effets différents sur la qualité du joint [17].

II.8.2 Pression

La pression axiale choisie dépend des métaux assemblés et de la géométrie du joint. Cette pression a un effet sur la température dans la zone de soudure, la puissance d'entraînement requise et le taux de raccourcissement axial (volume du bourrelet écoulé). L'effet combiné sur la forme et la largeur de la soudure (Figure 8), nécessite que le choix de la pression axiale et la vitesse de rotation doit se situer dans une plage appropriée pour chaque matériau à souder et ne doit pas être d'une manière indépendante [18].

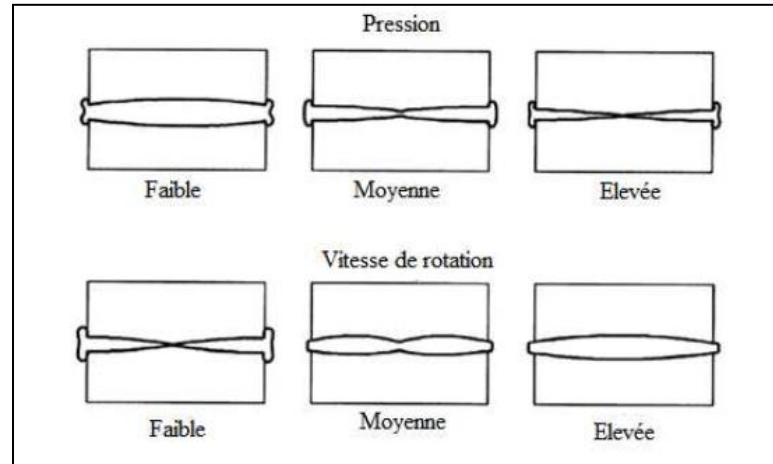


Figure II.7 : Effets de la pression et la vitesse sur la morphologie de la ZAT[18].

II.8.3 Temps

Le temps caractérise la rapidité et la productivité du processus de soudage. Un temps d'échauffement très court peut entraîner un chauffage inadéquat et peut créer des zones non soudées à l'interface, ce qui produit des soudures faibles. Par contre, un temps de chauffage très long limite la productivité et entraîne un gaspillage de la matière (taux de raccourcissement important). Le contrôle du temps de chauffage peut se faire de deux manières. La première consiste à arrêter la

rotation à la fin d'une durée prédéterminée à l'aide d'un système de chronométrage approprié. La deuxième méthode qui est configurée pour consommer une longueur suffisante pour assurer un chauffage adéquat, consiste à arrêter la rotation après un raccourcissement axial prédéterminé [19]. En résumé, pour un raccourcissement axial donné lors du soudage, le temps de chauffage sera gouverné par la vitesse et la pression de chauffage. Donc, le temps de chauffage décroît avec l'augmentation de la pression de chauffage [20].

II.9 Avantages du soudage par friction [21]

- ✓ Assemblages de haute qualité ayant une bonne structure métallurgique comme le matériau n'est pas porté à fusion.
- ✓ Pas de préparation spéciale des pièces.
- ✓ Le procédé de soudage est beaucoup plus rapide que les procédés de soudage conventionnels.
- ✓ Peu de déformations après soudage en raison des temps de soudage courts et des faibles températures maximales.
- ✓ Possibilité d'assembler des pièces de sections fortement différentes à condition de prendre certaines mesures de précaution.
- ✓ Economique: le soudage par friction permet de réaliser d'intéressantes économies sur le coût des pièces soudées (économie en temps, en matériau).
- ✓ Des matériaux dissemblables peuvent être assemblés, comme l'aluminium ou le cuivre à de l'acier.
- ✓ Très bonne reproductibilité et possibilités d'automatisation.
- ✓ Métaux d'apport pas nécessaires.
- ✓ Soucieux de l'environnement: pas de gaz de protection, pas de fumées de soudage ou rayonnement.
- ✓ Moins de bruit: les soudures ne doivent pas être meulées.
- ✓ Pas de nécessité de soudeurs agréés.

II.10 Inconvénients du soudage par friction

- Limité aux joints bout à bout angulaires et plats.
- Le coût de mise en place est très élevé.
- La préparation de la pièce est difficile.
- Le matériel non forgeable ne peut pas être soudé.
- Il ne peut être utilisé que pour les petites pièces de machines, les grandes pièces ne sont pas compatibles avec lui.

*Chapitre III : simulation
numérique d'une opération
de soudage par friction
malaxage*

III.1 Soudage par friction malaxage FSW (Friction Stir Welding)

Le "soudage par friction malaxage" est issu d'un brevet déposé par Thomas et ses collaborateurs en 1991 à la TWI (The Welding Institute – Royaume-Uni), Le terme français est maintenant défini, et la méthode est très étudiée. L'usage industriel de ce procédé a été limité aux alliages légers, typiquement les alliages d'aluminium, car il n'existait pas d'outils assez résistants pour les autres familles d'alliages dont les aciers. De récents développements technologiques, notamment l'usage de nitrure de bore cubique polycristallin (ou PCBN), a permis d'élargir le champ d'utilisation du FSW. Cela nous permet d'éviter les défauts causés par le processus de solidification, après utilisation de soudage par fusion. Ce procédé FSW est appliqué dans la construction navale, les avions, les voitures et industries aérospatiales

III.2 Présentation du code de calcul par éléments finis ABAQUS [22] :

Fondé en 1978, ABAQUS, est l'un des premiers fournisseurs mondiaux de logiciels et Services pour l'analyse par éléments finis. La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommée mondiale

Dans tous les secteurs industriels.

ABAQUS offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Le logiciel fournit un environnement inégalé pour l'analyse par éléments finis, proposant un grand nombre de choix aux opérations impliquant des fournisseurs et des produits multiples.

III.3 Logiciels sur le marché :

Il faut savoir que les logiciels de conception et de calculs assistés par ordinateur sont très nombreux sur le marché. Les plus utilisés sont NASTRAN, CATIA,

ABAQUS et SolidWorks. Tous ces logiciels effectuent les mêmes tâches, c'est à dire qu'ils génèrent les caractéristiques et de faire des calculs d'une structure (déformations, ruptures, plastification...) et enfin ils permettent de traiter ces résultats afin d'en sortir des données utilisables et exploitables.

La plupart des entreprises utilisent un assortiment de ces logiciels qui sont plus ou moins performants dans l'une ou l'autre de ces tâches, par exemple, dessiner avec CATIA, calculer avec ABAQUS et faire du post traitement avec NASTRAN. Il vous sera donc certainement demandé dans le monde de l'entreprise une maîtrise de plusieurs de ces outils, d'où l'intérêt de commencer avec ABAQUS. [23]

III.4 Deux solveurs principaux:

Le programme d'éléments finis que nous utilisons dans l'espace FEA (Final Élément Analyse) est *ABAQUS / CAE*, une interface utilisateur inspirée et similaire pour l'ensemble du système. ABAQUS est une suite de modules d'analyse par éléments finis. Les modules d'analyse, *ABAQUS / Standard* et *ABAQUS / Explicit*, constituent le cœur des outils d'analyse complémentaires et intégrés.

ABAQUS/CAE intègre les modules d'analyse dans un environnement ABAQUS complet pour la modélisation, la gestion et la surveillance de l'analyse ABAQUS et la visualisation des résultats. [24]

III.4.1 ABAQUS/Standard : Algorithme implicite

- Code général d'analyse par éléments finis (discrétisation spatiale)
- Résolution basée sur l'algorithme de Newton-Raphson et la méthode de Riks.
- Problèmes linéaires et non linéaires.
- Géométrie 1D, 2D, 3D et Axisymétrique.
- Nombreuses procédures d'analyse dans le domaine temporel et fréquentiel

III.4.1 ABAQUS/Explicit: Algorithme « dynamique » explicite.

- Analyse non linéaire (discrétisation spatiale et temporelle).
- Problème transitoire et dynamique des structures.
- Résolution basée sur la méthode explicite d'intégration en temps.

Mais possibilité d'analyses quasi-statiques où il existe un comportement non linéaire important.

III.5 Structure d'une analyse sous Abaqus :

Abaqus n'est qu'un solveur (implicite, explicite) qui effectue la résolution d'un Problème décrit par un fichier d'entrée (ou fichier de données) et qui écrit la solution vers un Fichier de sortie (ou fichier de résultats).

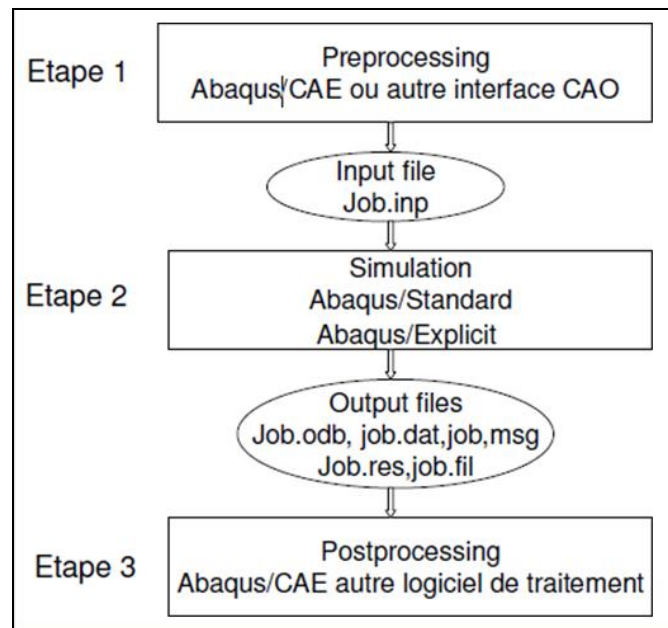


Figure III.1 : structure d'analyse sur ABAQUS. [24]

III.6 Les systèmes d'unités dans le logiciel ABAQUS : [22]

Avant de commencer à définir un modèle, vous devez choisir le système d'unités que vous utiliserez. ABAQUS n'a pas de système intégré d'unités. Toutes les données d'entrée doivent être spécifiées dans des unités cohérentes dans les résultats qui suivent le système d'unité et base sur SI (mm).

Tableau III-1: Unités prises en considération lors de la simulation par ABAQUS.

Quantity	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Length	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Mass	kg	tonne (10^3 kg)	slug	lbf s ² /in
Time	s	s	s	s
Stress	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)	lbf/ft ²	psi (lbf/in ²)
Energy	J	mJ (10^{-3} J)	ft lbf	in lbf
Density	kg/m ³	tonne/mm ³	slug/ft ³	lbf s ² /in ⁴

III.7 Simulation numérique de l'opération de soudage par friction:

III.7.1 Module Part :

Dans le module part on dessine les deux plaques d'aluminium avec les mêmes dimensions et l'outil de soudage (pion).

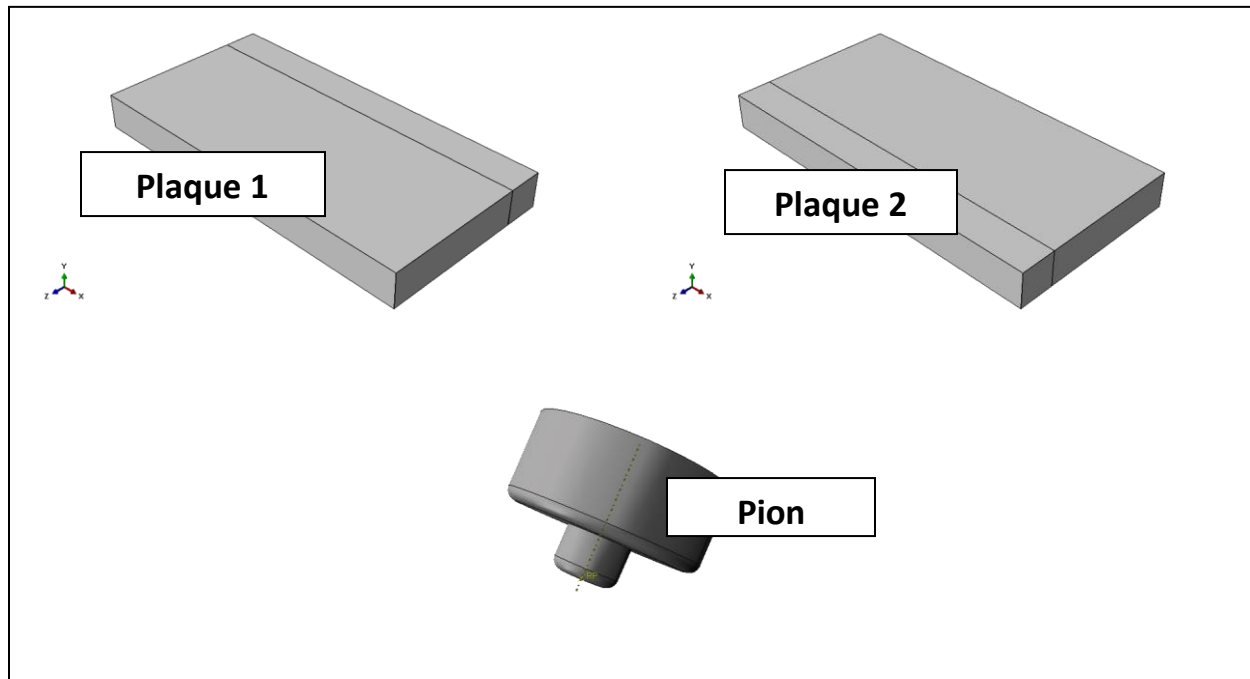


Figure III.2 : Eléments de l'opération de soudage (Module Part).

III.7.2 Module Property

Dans ce module on introduit les différentes propriétés mécaniques telles que le module de Young, le coefficient de poisson, la densité, la conductivité et la chaleur spécifique. Le Tableau

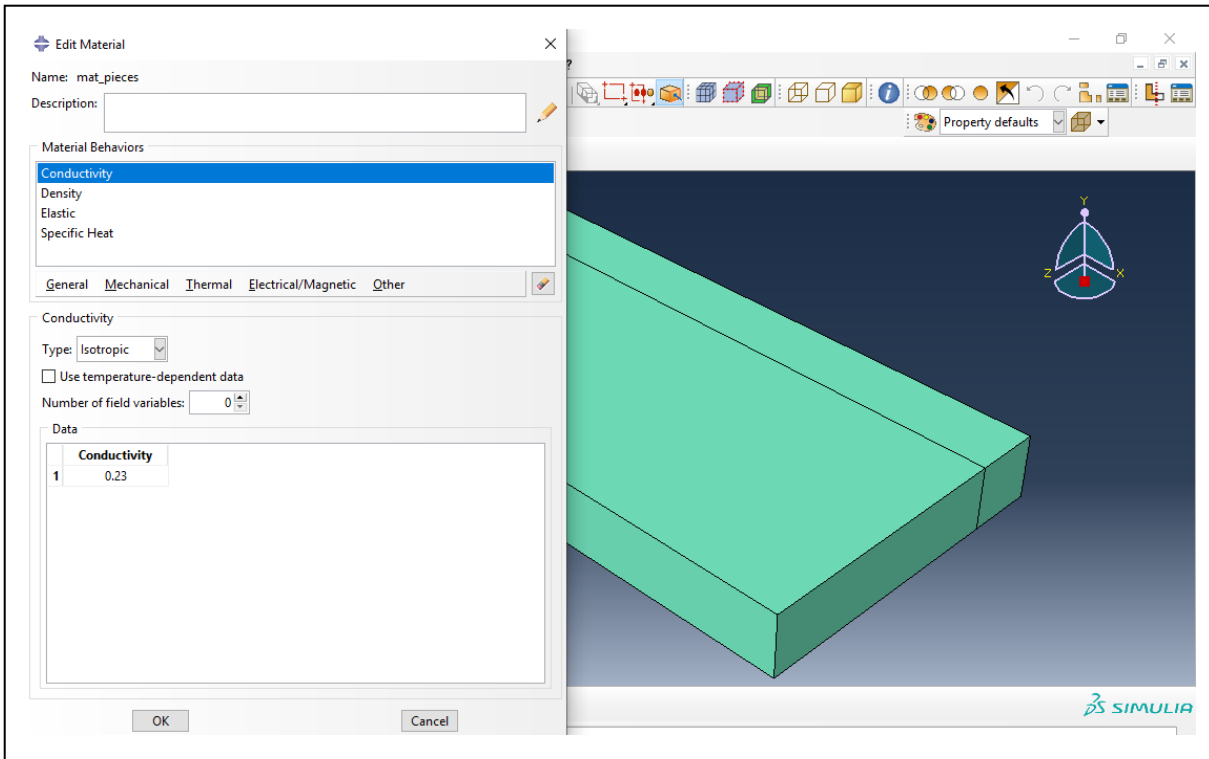


Figure III.3 : Module Property

Tableau III.2: Propriétés Matériau

	Aluminium
Densité (Kg m ⁻³)	0.12
Module deYoung (MPa)	10000
Coefficient de Poisson ν	0.15
Conductivité thermique (W/m.K)	0.23
Spectie heat (J)	0.25

III.7.3 Module Assembly

On crée l'assemblage des éléments de l'opération de soudage par friction : Plaque 1, plaque 2 et le pion.

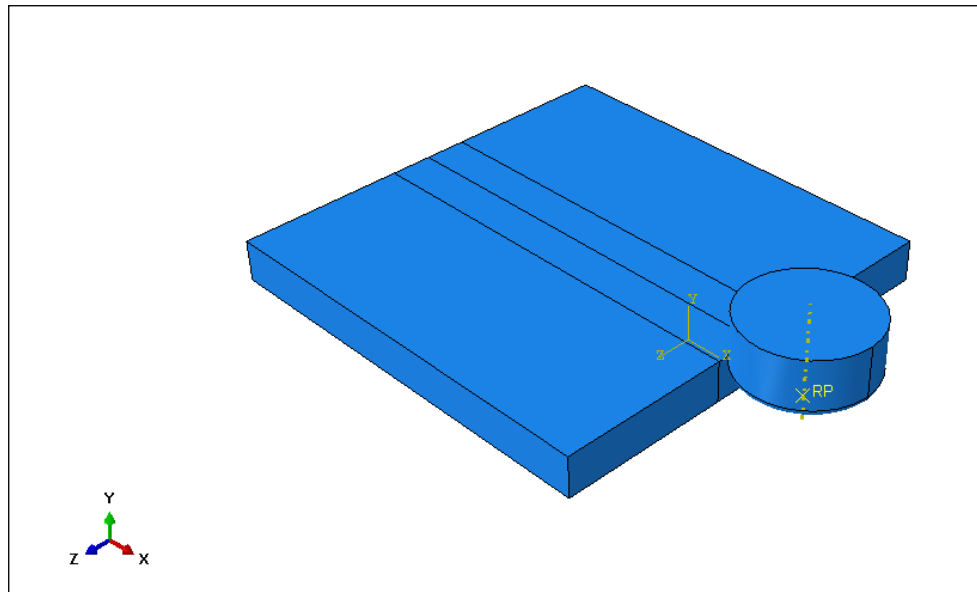


Figure III.4: Assemblage des deux plaques et le pion.

III.7.4 Module Step

Un seul step a été choisi est le step Friction. Le type du Step est Dynamic coupled Température - dis placement Explicit avec un temps de calcul de 20s et un user-defined time incrément 0.001.

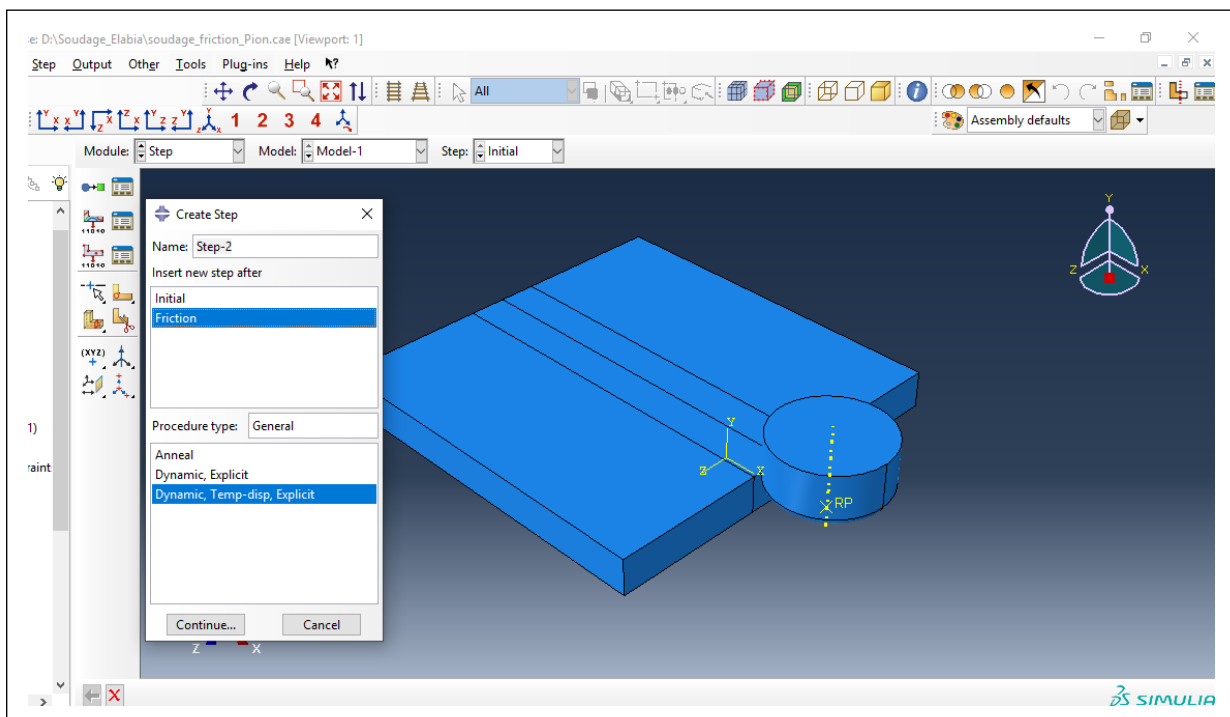


Figure III.5: Module Step

III.7.5 Module interaction

On Détermine les types de contacte entre les différents éléments de l'ensemble. Un coefficient de frottement $\mu = 0.3$ entre les éléments de soudage.

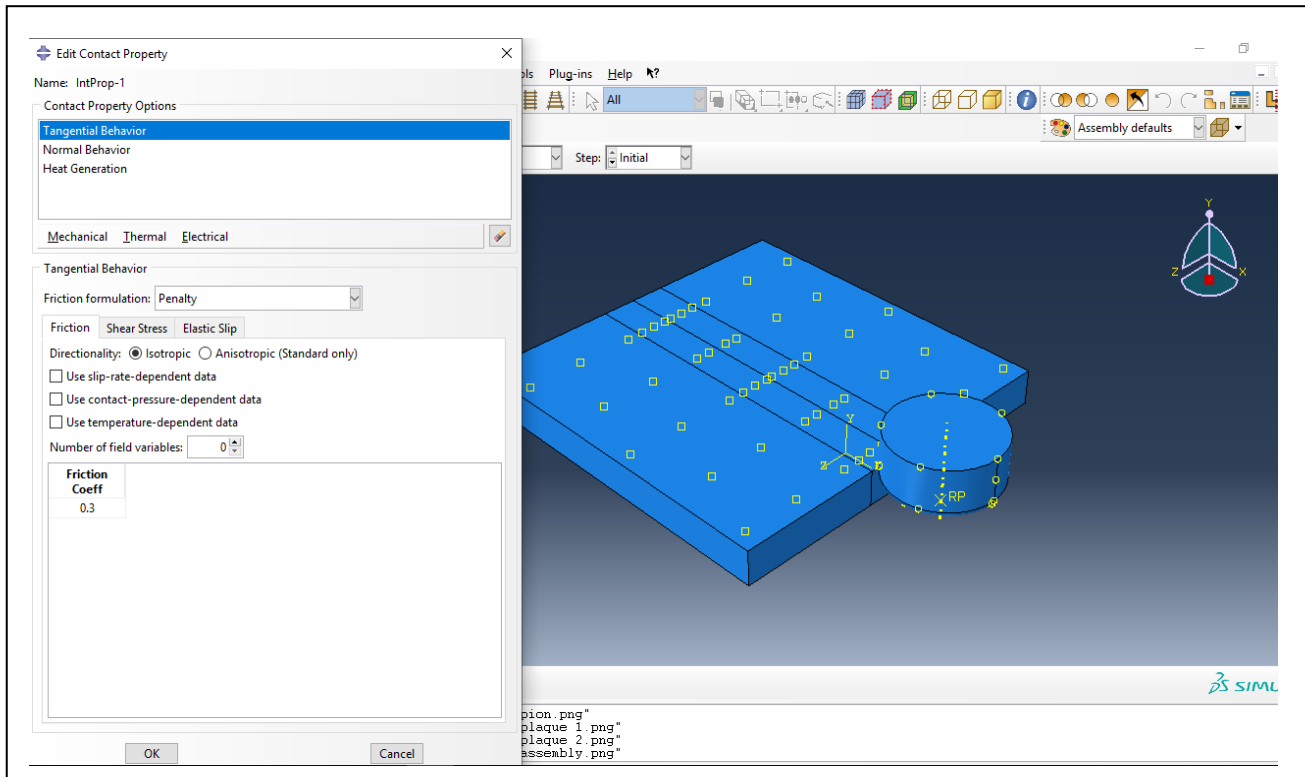


Figure III.6: Interactions entre le pion et les deux plaques

III.7.6 Module Mesh

Module Mesh est utilisé pour créer la grille de segments. Contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage d'éléments finis sur les différents éléments de l'ensemble. On resserre le maillage dans la zone traversé par le pion.

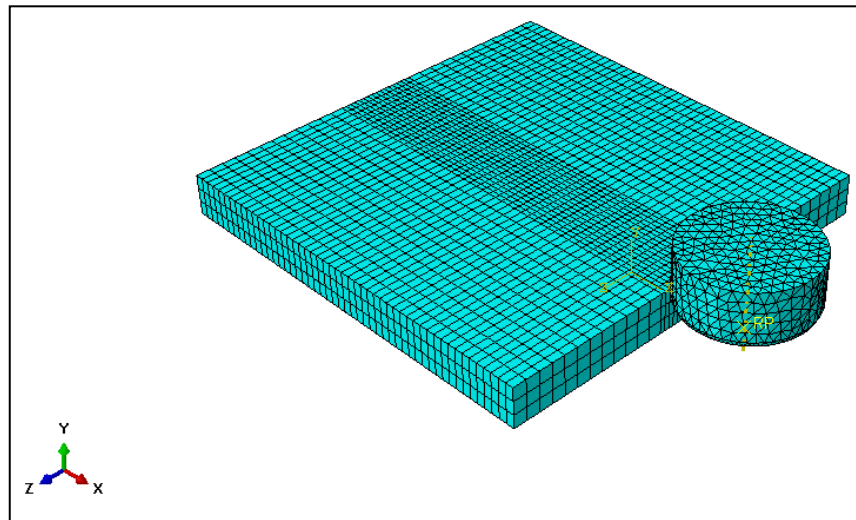


Figure III.7 : Maillage des éléments de l'opération de soudage

III.7.7 Module Load

Dans ce module on applique les conditions aux limites sur les éléments de l'ensemble pour mener à bien l'opération de soudage :

- Appliquer une pression $P=10$ MPa sur la surface Top du pignon ;
- Imposer une vitesse d'avance $V=10$ mm/s pour les deux plaques ;
- Imposer une vitesse de rotation autour de l'axe OY : $VR2=10$ rd/s.

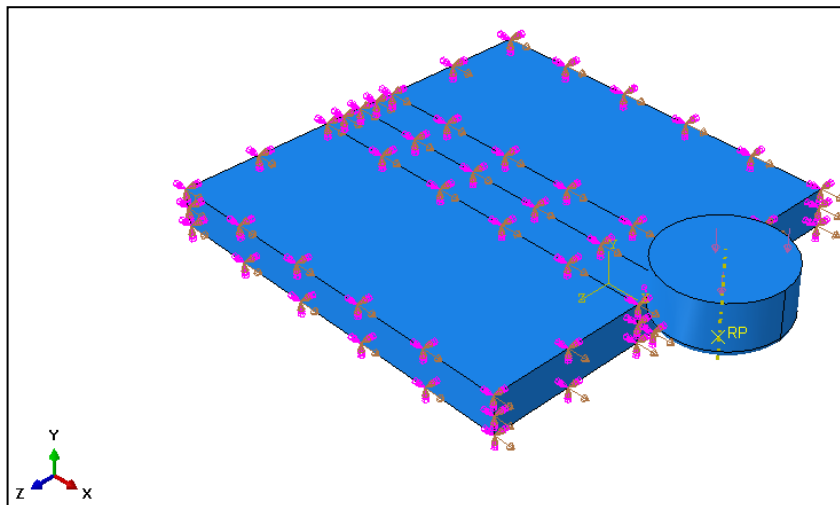


Figure III.8 : Conditions aux limites appliquées sur le système de soudage par friction.

III.7.8 Module Job

Module Job permet de lancer et de contrôler le calcul.

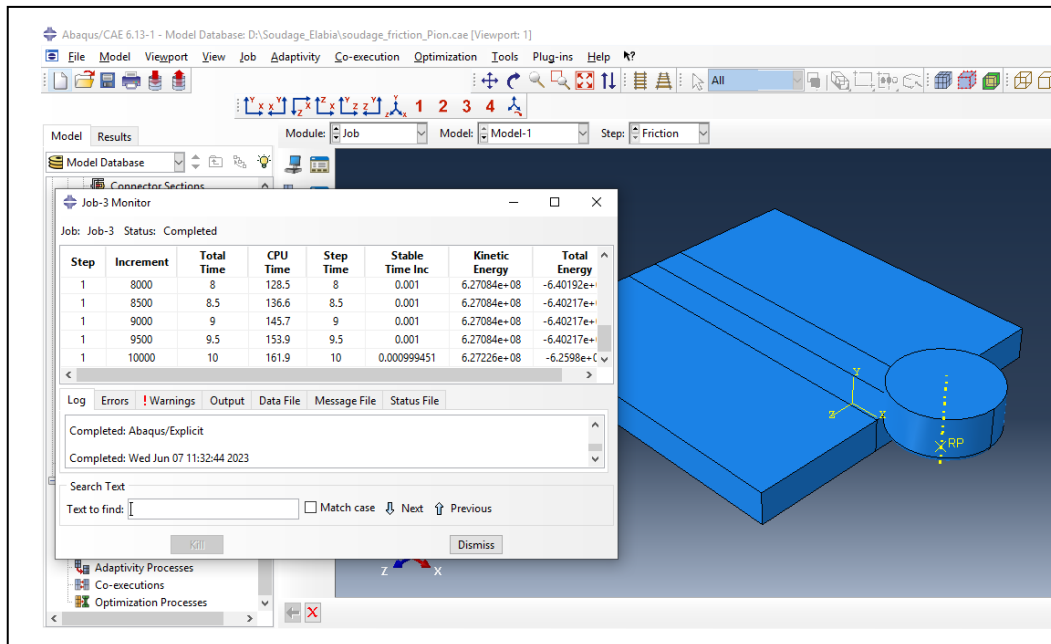


Figure III.9 : Module Job.

III.7.9 Module vitalisation

Visualiser les différents résultats obtenus par la simulation numérique.

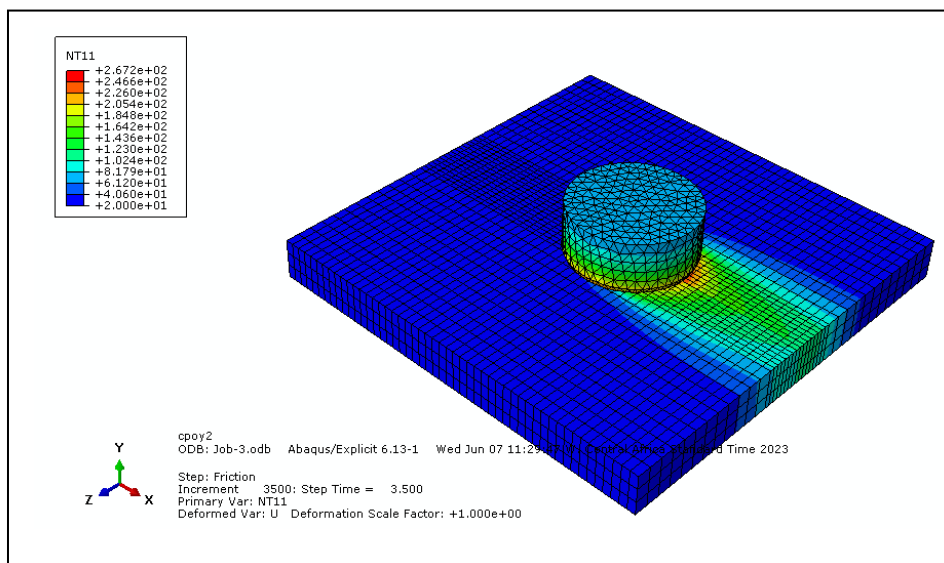


Figure III.10 : Visualisation des résultats de simulation.

III.8 Résultats et discussions

Plusieurs résultats ou paramètres de sortie peuvent être obtenus dans le fichier .odb . Ces paramètres caractérisent l'évolution du process de soudage par friction ainsi que de mettre en évidence les paramètres d'influence sur la qualité de la soudure tels que la vitesse d'avance de la plaque et la vitesse de rotation du pion.

Avant de prévoir l'influence des différents paramètres on donne quelques définitions des paramètres de sortie choisis dans le fichier field output requests.

- **NT11** : Degré de liberté de température 11 à un nœud

Pour prévoir l'évolution de NT11 pendant l'opération de soudage et sous les conditions imposées, nous avons choisi un trajet de nœuds (path) rassemblant 20 nœuds au milieu de la soudure, **Figure III.10**.

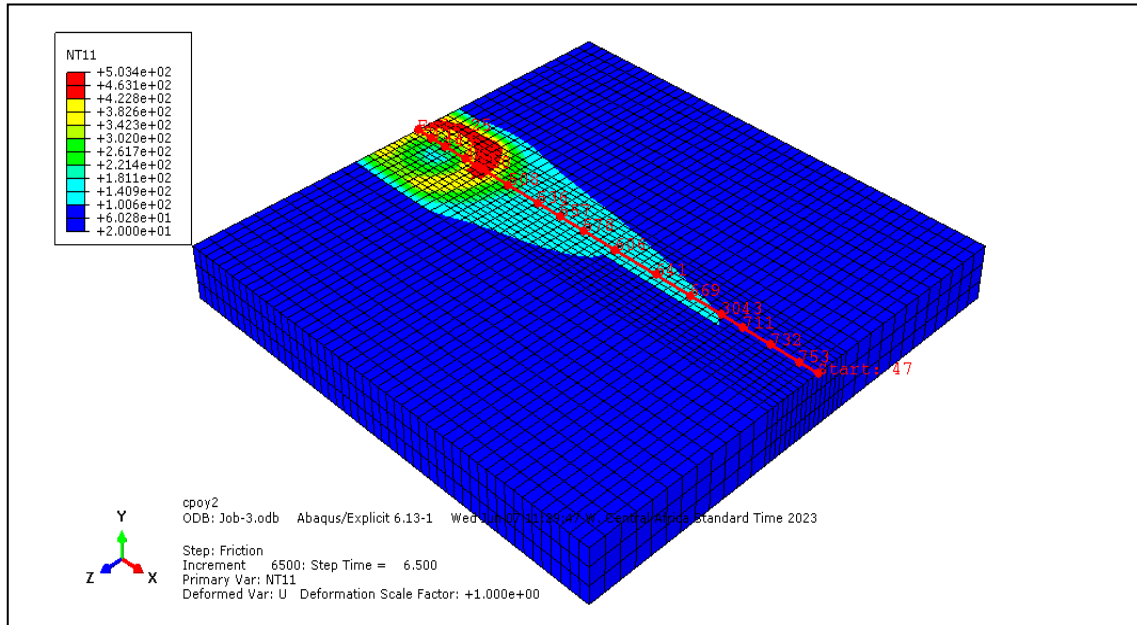


Figure III.11 : Trajet de nœuds choisi (path).

III.9 Influence de la vitesse de rotation du Pion

La **Figure III.12** montre l'influence de la vitesse de rotation du pion sur le soudage par friction, en particulier le gradient de température générée pendant l'opération.

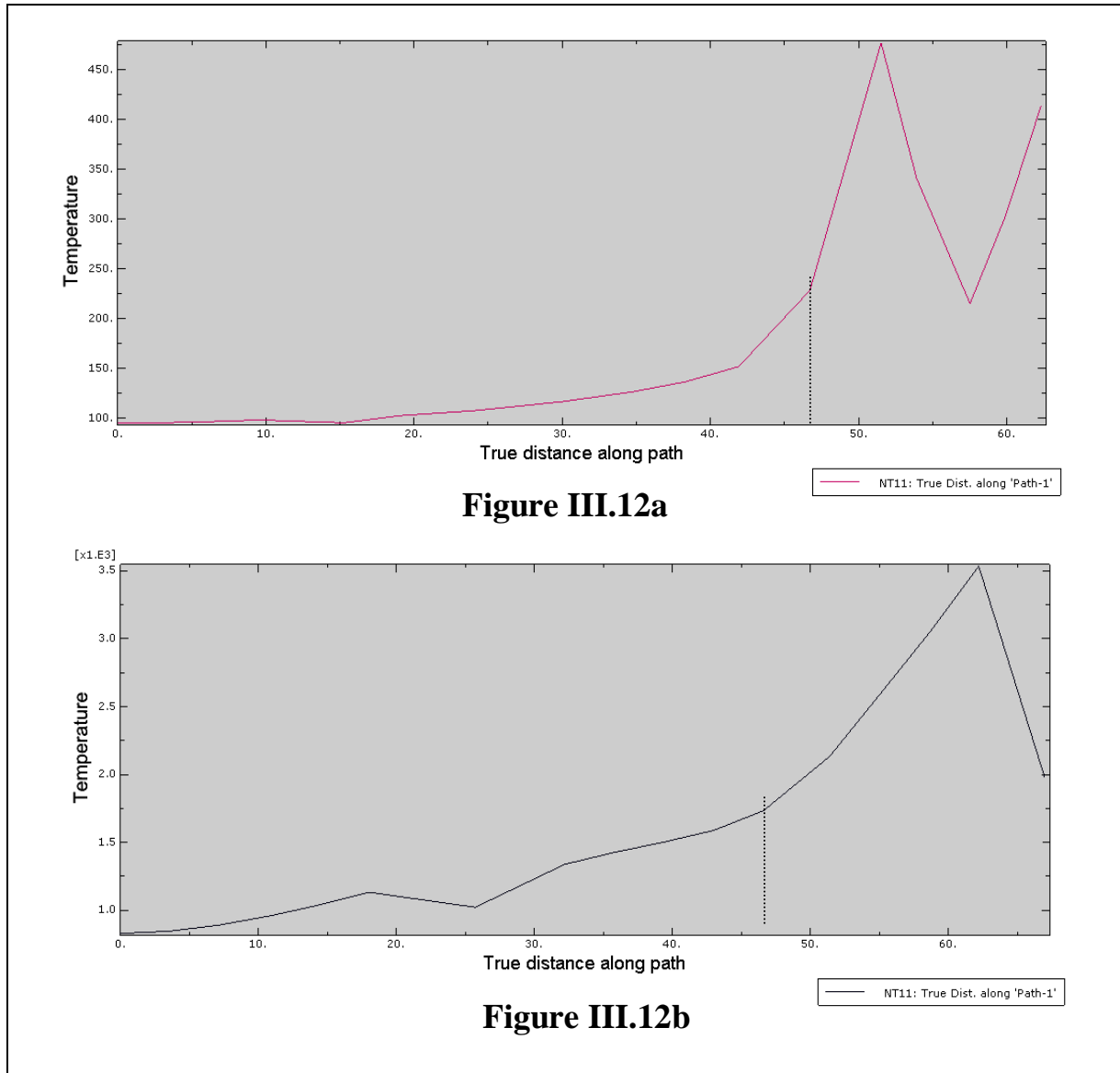


Figure III.12 : Influence de la vitesse de rotation du pion sur l'opération de soudage par friction.

Tableau III-3: Températures maximales de NT11 pour deux vitesses différentes.

ω (tr.min)	10	50
T_{\max} (°C)	475	$1.5*1.e^3$

Il est bien remarqué que NT11 (**Figure III.12.a**) avec une vitesse de rotation du pion de 10 rd/s augmente progressivement jusqu'à une distance (path) de 45mm en faisant par la suite un pic de température ($T_{\max} = 475$ °C) à une distance de 50mm. Après cette distance le gradient de température est instable.

En changeant la vitesse de rotation du pion à une valeur de 50 rd/s, on constate que NT11 (**Figure III.12.b**) augmente d'une manière similaire par rapport à la première simulation mais avec des résultats différents : la courbe augmente plus progressivement puis rapidement à partir d'une distance de 47 mm pour atteindre un pic de température de 1500 °C (c'est juste une valeur numérique qui ne reflète pas le cas réel parce qu'elle est très élevée et elle dépasse la température de fusion du métal considéré).

HFL (Heat flux load) : Flux de chaleur par unité de surface quittant la surface esclave.

Les **Figures III.13a** et **III.13b** représentent successivement la variation du paramètre HFL pour deux vitesses de rotation différentes du pion (10 et 50 rd/s).

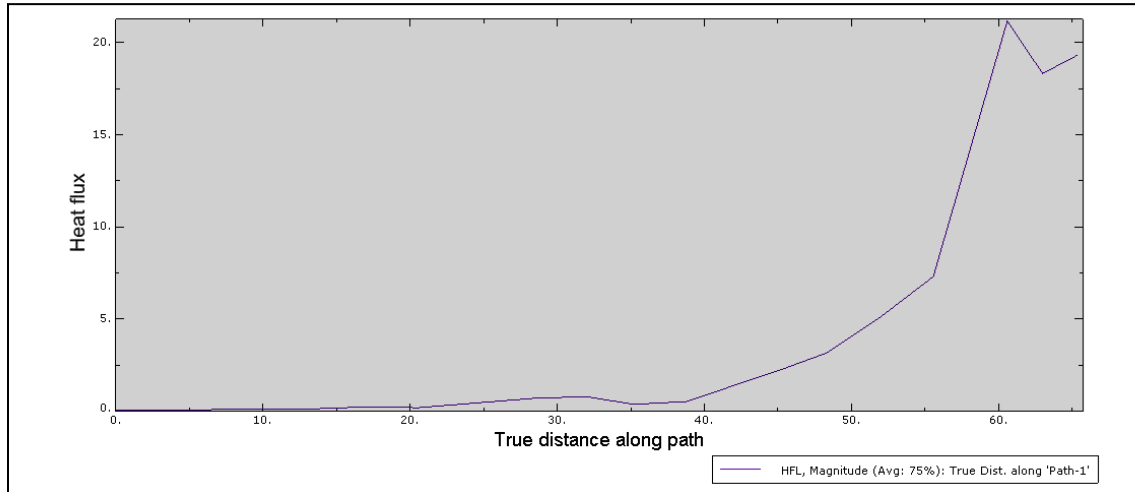


Figure III.13a

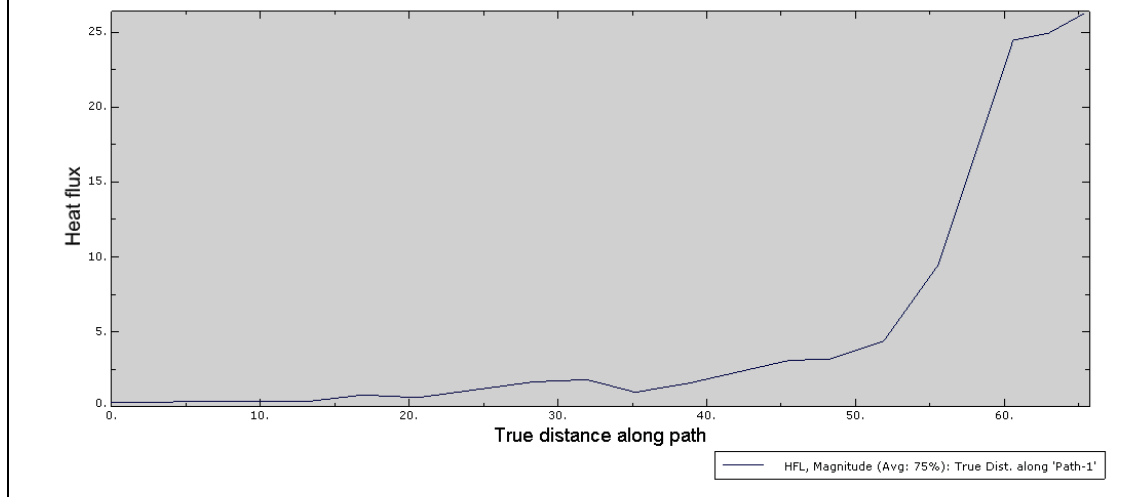


Figure III.13b

Figure III.13 : Influence vitesse de rotation du pion sur HFL

Tableau III-3: Flux de chaleur maximales pour les différentes vitesses de rotation considérées HFL

ω (rd/s)	10	50
$\Phi_{q,max}$ (W/mm ²)	21	26

Pour une vitesse $VR1 = 10$ rd/s, il est bien remarqué que HFL augmente progressivement jusqu'à atteindre un pic ($HFL=21$ W/mm²) une distance de 61mm après la variation devient instable, (**Figure III.13a**).

Pour une vitesse $VR2=50$ rd/s, on constate que HFL (**Figure III.13b**) augmente d'une manière similaire de la simulation précédente mais avec des résultats différents. Une instabilité légère a été observée au-delà du pic.

III.10 Influence de la vitesse d'avance des de plaques

De la même façon on peut prévoir l'influence de la vitesse d'avance des plaques sur les paramètres NT11 et HFL. Une variation significative des deux paramètres a été observée lors de changement de vitesse d'avance des plaques. Toujours des pics apparaissent pour une distance donnée mais avec des valeurs différentes qui dépendent de la valeur de la vitesse V_a . Les **tableau III.4** et **III.5** regroupe successivement les valeurs enregistrées pendant la simulation (NT11 et HFL). La même chose pour les instabilités à la fin de la simulation.

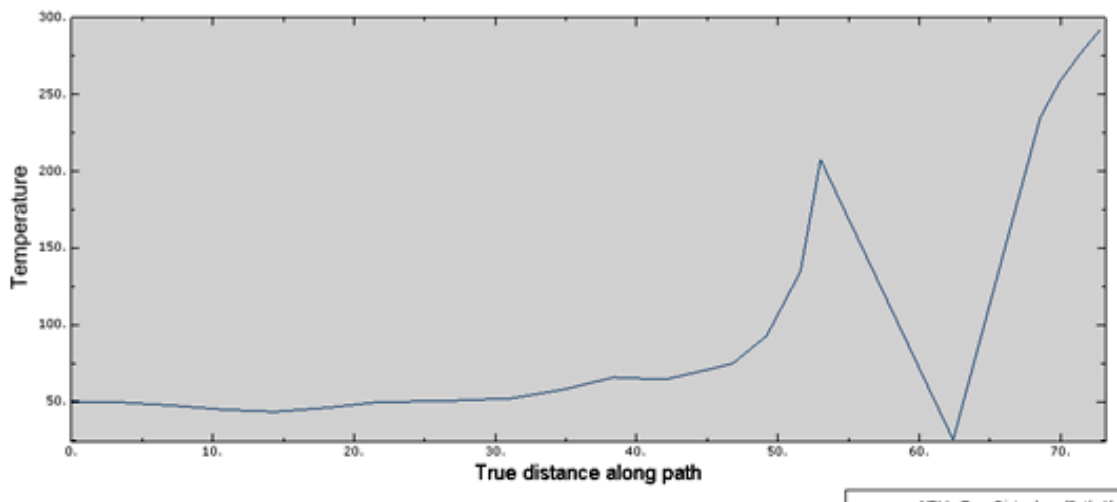


Figure III.14a

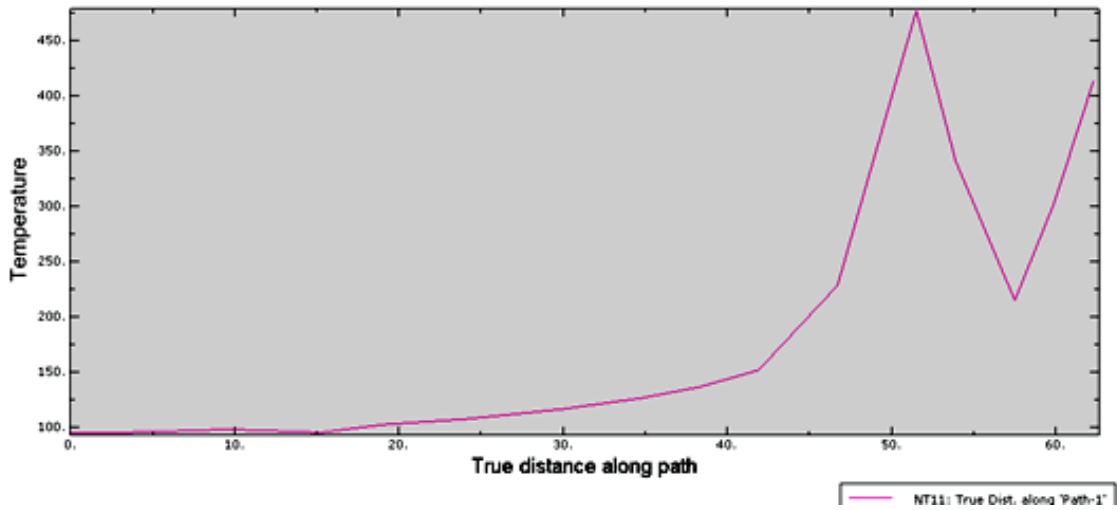


Figure III.14b

Figure III.14 : Influence de la vitesse d’avance des deux plaques sur NT11.

Tableau III.4: Températures maximales pour les deux vitesses d’avance considérées

Va (mm.s)	10	50
T _{max} (°C)	300	475
Path (mm)	55	50

Figure III.12a

Figure III.12a

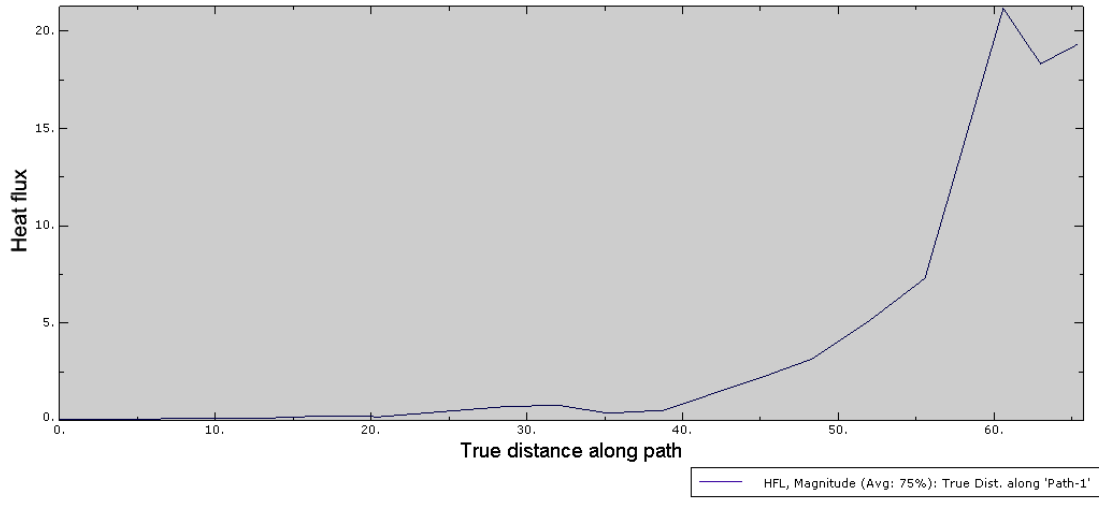


Figure III.15a

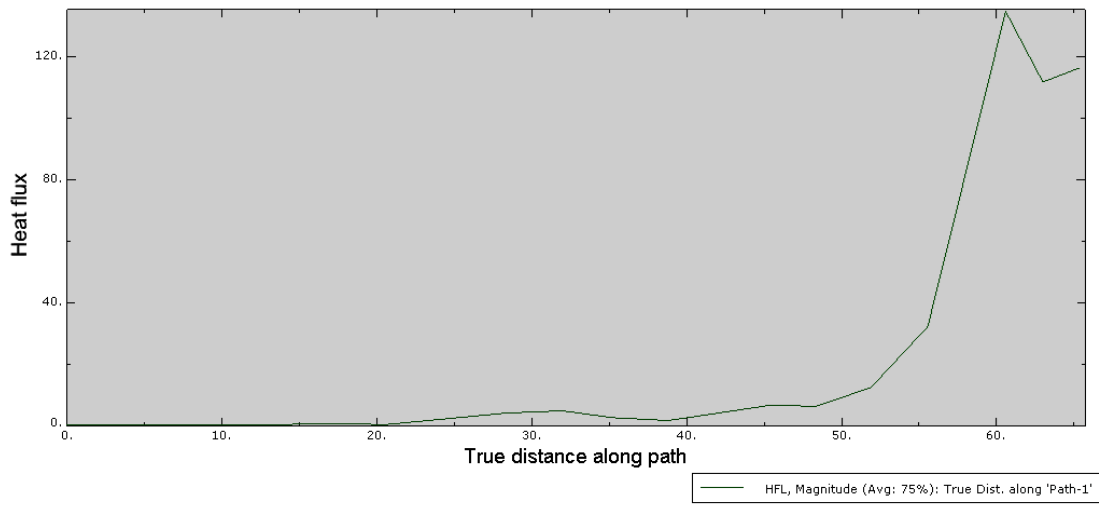


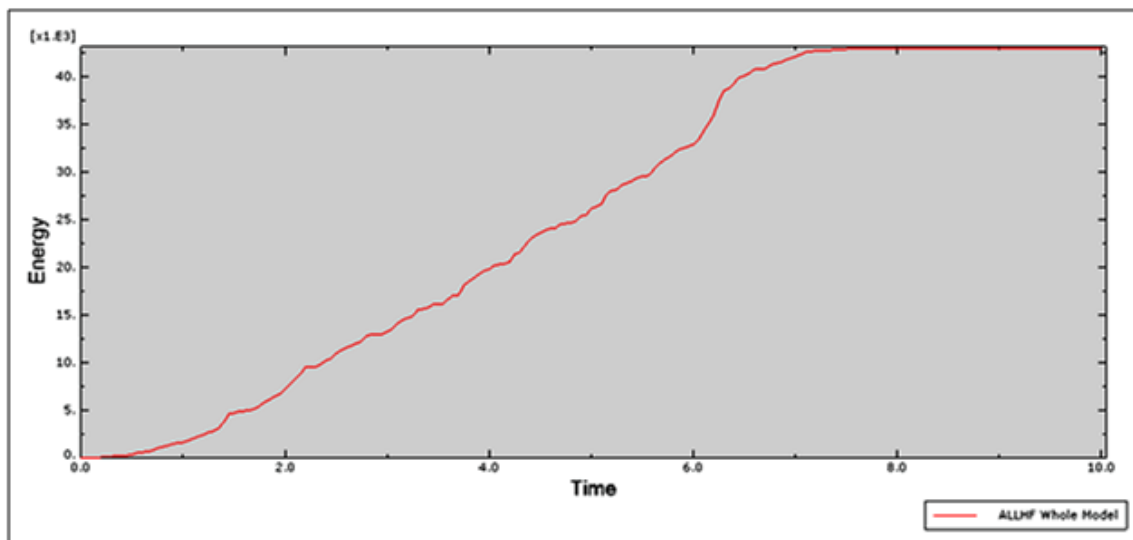
Figure III.15b

Figure III.15 : Influence de la vitesse d'avance des deux plaques par HFL

Tableau III.3: Flux de chaleur maximales pour les différentes vitesses d'avance considérées HFL

ω (tr.min)	10	50
ϕ_q (W/mm ²)	21	140
Path (mm)	60	60

La présente simulation nous a permis d'extraire pas mal de résultats dépendant surtout de la température de soudage par friction-malaxage. La **Figure III.16** par exemple montre la variation de l'énergie dissipée durant le temps présumé de soudage.

**Figure III.16 :** Evolution de l'énergie dissipée au cours du temps présumé de soudage

III Conclusion Générale

Le soudage par friction est rapidement devenu la méthode préférée par rapport au reste des procédés de soudage, en particulier le processus de soudage par friction malaxage.

Il est capable de former des soudures de haute précision avec d'excellents débits.

L'objectif principal de ce travail était d'utiliser le logiciel ABAQUS/CAE pour simuler numériquement le procédé de soudage par friction malaxage (FSW) des deux plaques d'aluminium. Ce document peut être considéré comme un support pratique de simulation des phénomènes dépendant au premier degré de la température et la simulation des procédés de soudage est un bon exemple d'une part introduire l'effet de la température sur des mécanismes industriels et d'autre part ce procédé est un procédé de fabrication qui fait partie de notre spécialité.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- [1] Koen Faes ir, (IBS) : soudage par friction (traduction : M.C. Ritzen-IBS.BIL), <http://www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-friction>. (6 Juin 2023 . 14 :20).
- [2] Gerard, M., thèse « Soudage-diffusion hétérogène assiste par friction malaxage cas du couple Al/Fe- ». Ecole Centrale de Nantes
- [3] Merry, G., Soudage et soudabilité métallurgique des métaux. Technique de l'ingénieur, 6 Juin 2023
- [4] Perry, N., Etude et développement des flux solides en vue d'application en soudage ATIG appliqué au titane et ses alliages ainsi qu'aux aciers inoxydables, 2000, Ecole Centrale de Nantes
- [5] Blandeau, R., procédés et applications industrielles du soudage. Hermes science publication, Paris, 2001
- [6] Centre technique des industries, m., *Mécano soudage : conception*1989, Senlis, Oise: CETIM.
- [7] ir. Koen Faes, EWE Institut Belge de la Soudure (Traduction: M.C. Ritzen - IBS-BIL) <http://www.bilibs.be/fr/soudage-par-friction> le : 2 Juin 2023 10 :15
- [8] Sciences Industrielles pour l'Ingénieur, Téléchargé de http://gelin.denis.free.fr/Cours/0_Soudage_cours.htm, le : 7 Juin 2023 20 :30
- [9] Roland, C., Soudage par friction1980: Ed. Techniques Ingénieur. Le 10 Juin 2023

- [10] ROBERT W. MESSLER,jr “ PRINCIPLES OF WELDING Processes, Physics, Chemistry,and Metallurgy, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2004.
- [11] Larry Jeffus, “Welding: Principles and Applications”, DELMAR Cengage Learning, Seventh Edition, 2012, USA.
- [12] LIBIN YANG, “ MODELLING OF THE INERTIA WELDING OF INCONEL 718”, Thèse PhD, Univeristé de Birmingham, 2010
- [13] R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia, “Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties”, Progress in Materials Science 53 (2008) 980–1023, 2003
- [14] « Soudage-Coupage » (SYMOP). <http://www.irs.fr>. (24 avril 2018).
18. Pichot, F. ; Corpace, F., Conception et fabrication des moteurs aéronautiques (27/03/2014). Groupe SAFRAN (*SNECMA*)
- [15] M. Kimura, K.SEO, M.KUSAKA et A.FUJI, “ Observation of joining in friction stage and improving friction welding method”, JSME international journal, Series A,Vo.1 46, N°3, 2003
- [16] P. Sathiya, S. Aravindan and A. N. Haq: ‘Effect of friction welding parameters on mechanical and metallurgical properties of ferritic stainless steel’, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2007, 31, (11), 1076–1082.

- [17] S. B. Jamaludin, Y. C. Keat and Z. A. Ahmad: ‘The effect of varying process parameters on the microhardness and microstructure of Cu–steel and Al–Al₂O₃ friction joints’, *J. Teknol.*, 2004, 41, (A), 85–95.
- [18] Wenya Li, Achilles Vairis, Michael Preuss & Tiejun Ma, “Linear and rotary friction welding review”, *International Materials Reviews*, 2016 . Le 16 Juin 2023
- [19] . P. Sathiya, S. Aravindan and A. N. Haq: ‘Effect of friction welding parameters on mechanical and metallurgical properties of ferritic stainless steel’, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2007, 31, (11), 1076–1082
- [20] M. B. Uday, M. N. Ahmad Fauzi, H. Zuhailawati and A. B. Ismail, “Advances in friction welding process: a review”, *Science and Technology of Welding and Joining* 2010 VOL 15 N° 7, 534-558.
- [21] ir. Koen Faes, EWE Institut Belge de la Soudure (Traduction: M.C. Ritzen - IBS-BIL) <http://www.bilibs.be/fr/soudage-par-friction> le : 17 juin 2023
- [22] Marc Blétry. Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux.2006 2007
- [23] Julien Briche. Thermomécanique .Introduction à la CAO sur le logiciel ABAQUS. E-mail : julien.briche@laposte.net 17 Juin 2023
- [24] Abaqus. Une brève introduction. ABAQUS/CAE 6.9.17 Juin 2023