

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ BLIDA I
INSTITUT D'AÉRONAUTIQUE ET DES ETUDES SPATIALES



Mémoire de la fin d'étude pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Aéronautique

Spécialité : Structure Aéronautique

Etudié et présenté par : GHOUL Nihel

Thème :

**« Modélisation du transfert de chaleur lors du soudage
hétérogène des alliages de Magnésium / Aluminium par le
procédé FSW (Friction Stir Welding) »**

Proposé et encadré par :

Dr AISSANI Mouloud (Maître de Recherche - A au CRTI)

Dr BOUKRAA Moustafa (Maître de Recherche B au CRTI)

Mémoire soutenue le 10/11/2020, devant le jury composé de :

M. SETTOUF

Président

M. GHERROUS

Examineur

Année universitaire 2019/2020

Résumé :

Une étude du transfert de chaleur lors du soudage hétérogène par un procédé relativement récent connus par : le soudage par friction malaxage (*friction stir welding*), est envisagée dans ce travail.

L'assemblage des pièces est réalisé en phase solide (état pâteux) grâce à l'outil de soudage spécifique constitué d'un épaulement et d'un pion. Ces derniers ont pour rôle de convertir l'énergie mécanique par frottement en énergie thermique.

L'étude numérique envisagé concerne les alliages de Magnésium / Aluminium utilisés fréquemment dans les domaines automobile et aérospatial. La simulation s'effectue par le code Comsol en utilisant la méthode des éléments finis (MEF). Le model de simulation lors de cette étude, a permis de prédire les champs thermiques à l'état quasi-stationnaire et quelques cycles thermiques ainsi une comparaison entre différent dispositions des deux tôles a été effectué.

Mots clés :

Soudage FSW, modélisation, source de chaleur, Magnésium/Aluminium.

Abstract:

A study of heat transfer during heterogeneous welding by a recent process known by: *friction stir welding*, is considered in this work. The assembly of different parts during this process is done in a solid phase using a welding tool composed of a shoulder and a pin that allow the conversion of mechanical energy into thermal energy by friction.

The requested digital study concerns Magnesium/ Aluminium alloys used frequently in the automotive and aerospace fields. The simulation is performed by the Comsol code using the finite element method (MEF). The model simulated in this study has allowed to predict the thermal fields in the quasi-stationary state and some thermal cycles, thus a comparison between different arrangements of the two sheets was carried out.

Key words:

FSW (Friction Stir Welding), modeling, heat source, Magnesium/ Aluminium.

ملخص:

في هذا العمل نقوم بدراسة انتقال الحرارة أثناء اللحام بواسطة عملية حديثة تعرف ب: التلحيم الاحتكاكي الخلطي. تتم عملية تجميع الاجزاء خلال المرحلة الصلبة بواسطة أداة تتكون من كتف ودبوس. هذه الأخيرة تسمح بتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة حرارية عن طريق الاحتكاك.

تتعلق الدراسة الرقمية المطلوبة بسبائك الماغنسيوم/الألومنيوم المستخدمة بشكل مُتَكَرِّر في مجال السيارات والفضاء. يتم إجراء المحاكاة بواسطة برنامج Comsol باستخدام طريقة العناصر المحدودة (MEF).

سيسمح النموذج الذي تمت محاكاته في هذه الدراسة بتوقع الحقول و الدورات الحرارية في حالة شبه الثبات ، وهكذا تم إجراء مقارنة بين ترتيبات موضعية مختلفة للورقتين المعدنيتين.

الكلمات المفتاحية:

التلحيم بالاحتكاكي الخلطي، مصدر الحرارة ،النمذجة الرقمية ،الماغنسيوم/الألومنيوم.

Remerciement :

Mes remerciements vont d'abord au Créateur de l'univers qui nous a doté d'intelligence, et nous a maintenu en santé pour mener à bien cette année d'étude.

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance au directeur de ce mémoire, Monsieur ASSANI Mouloud pour m'avoir confié ce travail et encadré tout au long de sa réalisation. Je le remercie pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je désire aussi remercier les professeurs et toute l'équipe pédagogique de l'institut d'aéronautique et des études spatiales de Blida, qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études.

Je remercie profondément toute ma famille qui m'a toujours soutenu et encouragé es universitaires, et tout particulièrement à ma mère qui m'a toujours soutenus et poussés à donner le meilleur de moi même.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Enfin, je salue ici toutes personnes dont je n'ai pas cité le nom et qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

Table des matières :

RESUME

TABLE DES MATIERES

LISTES DES FIGURES

Introduction générale	1
Chapitre I : Recherches bibliographiques.....	3
Introduction	3
I. Rappel sur le soudage	3
I.1.Définition du soudage	3
I.2.Classification des procédés de soudage	3
I.2.1.Procédés faisant intervenir la fusion locale sans action mécanique	4
➤ <i>Soudage à la flamme (au chalumeau)</i>	4
➤ <i>Soudage à l'arc</i>	4
➤ <i>Soudage aluminothermique</i>	4
➤ <i>Soudage par faisceau à haute densité d'énergie</i>	4
I.2.2.Procédés faisant intervenir la fusion locale avec action mécanique	5
➤ <i>Soudage par point</i>	5
➤ <i>Soudage à la molette</i>	5
➤ <i>Soudage par bossage</i>	5
➤ <i>Soudage en bout par étincelage</i>	5
I.2.3.Procédés faisant intervenir un chauffage sans fusion avec action mécanique	5
➤ <i>Soudage par diffusion</i>	6
➤ <i>Soudage par friction</i>	6
I.2.4.Procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage	6
➤ <i>Soudage par ultrason</i>	6
➤ <i>Soudage par explosion</i>	6
II. Procédé de soudage par friction malaxage (FSW)	7
II.1.Définition et principe	7
II.2.Paramètres du soudage par friction malaxage	8
II.3.Variantes des composants de l'outil de soudage FSW	10
II.3.1.L'épaulement	10
II.3.2.le pion	11
II.4.Différents outils de soudage par FSW	12
II.4.1.L'outil conventionnel	12
II.4.2.L'outil à pion rétractable	12
II.4.3.L'outil à double épaulement « bobine tool » ou « self reacting tool »	13
II.5.Structure métallurgique générale des assemblages obtenus par le soudage FSW	13
➤ <i>Métal de base</i>	14
➤ <i>Zone affectée thermiquement (ZAT)</i>	14
➤ <i>Zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM)</i>	14
➤ <i>Noyau de la soudure (ou nugget)</i>	14
II.6.Différentes configurations de soudage par friction malaxage	14
II.6.1.Soudage bout à bout	15

➤ Phase de pénétration et prés rotation	15
➤ Phase de soudage	15
➤ Phase de retrait	15
II.6.2.Soudage par recouvrement	16
II.6.3.Soudage par point	16
II.7.Equipements	17
II.8.Avantages et inconvénients	18
II.9.Domaines d'application	18
III. Présentation des matériaux utilisés	19
III.1.Magénium et ses alliages	19
III.1.1.Définition	19
III.1.2.Principales caractéristiques	20
1. <i>Caractéristiques physico-chimiques</i>	20
2. <i>Caractéristiques thermiques</i>	20
3. <i>Caractéristique mécanique</i>	21
III.1.3.Alliages du Magnésium	21
III.1.4.Magnésium à utiliser : AZ31	21
III.2.Aluminium et ses alliages	22
III.2.1.Définition	22
III.2.2.Principaux caractéristiques	22
1. <i>Caractéristiques physico-chimique</i>	22
2. <i>Caractéristiques mécaniques</i>	22
III.2.3.Alliages d'Aluminium	23
III.2.4.Aluminium à utiliser : série 2024	24
<i>Comparaison</i>	24
Chapitre II : Modélisation mathématique.....	25
Introduction	25
I. Développement mathématique	25
I.1.Hypothèses générales	26
I.2.Equation du transfert de chaleur dans les pièces à souder	26
I.3.Modèle de source de chaleur	26
I.4.Conditions initiales et aux limites	27
Chapitre III : Simulation numérique.....	29
Introduction	29
I. Principe d'utilisation	29
II. Principe de modélisation	30
II.1.Choisir le type d'étude	30
II.2.Définir la géométrie	32
II.3.Définir les sources de chaleur	33
II.4.Définir les conditions initiales et aux limites	33
II.5.Définir les matériaux	35
<i>Principaux propriétés de l'acier H13</i>	36
<i>Principaux propriétés de l'alliage d'Aluminium 2024-T6</i>	36
<i>Principaux propriétés de l'alliage de Magnésium AZ31B</i>	37
II.6.Définir le maillage	37
II.7.Solution	37

II.8.Convergence	38
Chapitre IV : Interprétation des résultats.....	39
Introduction	39
I. Soudage homogène	39
I.1.Champ thermique	39
➤ Aluminium-Aluminium	39
➤ Magnésium-Magnésium	40
I.2.Contours isothermes	41
➤ Aluminium-Aluminium	41
➤ Magnésium-Magnésium	41
II. Soudage hétérogène	41
II.1.Champs thermique	41
➤ Aluminium-Magnésium	42
➤ Magnésium- Aluminium	42
II.2.Contours isothermes	43
➤ Aluminium- Magnésium	43
➤ Magnésium- Aluminium	44
Conclusion générale.....	45
Perceptives	46
Références	47

Liste des figures

Chapitre I

Figure I-1 : Organigramme des procédés de soudage selon les énergies misent en jeu.

Figure I-2 : procédure du FSW.

Figure I-3 : les paramètres du FSW.

Figure I-4 : image correspondantes à l'alliage AZ31 soudé par FSW avec plusieurs vitesses : a) $V_a=100\text{mm/mn}$ et $V=400\text{ tr/min}$, b) $V_a=100\text{mm/mn}$ et $V=700\text{ tr/min}$, c) $V_a=100\text{mm/mn}$ et $V=900\text{ tr/min}$, d) $V_a=400\text{mm/mn}$ et $V=1600\text{ tr/min}$, e) $V_a=600\text{ mm/mn}$ et $V=1600\text{ tr/min}$, f) $V_a=1000\text{ mm/mn}$ et $V=1600\text{ tr/min}$.

Figure I-5 : joint soudé par FSW pour différents efforts axiaux : a) $V_r=1500\text{ tr/min}$, $V_a=90\text{ mm/min}$ et $F_z=1470\text{ N}$; b) $V_r=1500\text{ tr/min}$, $V_a=90\text{ mm/min}$ et $F_z=1800\text{ N}$

Figure I-6 : Des exemples de profils (de type rainures ou spirales).

Figure I-7 : Différentes géométries du pion de l'outil FSW.

Figure I-8 : l'outil du FSW.

Figure I-9 : les différentes configurations de l'outil du FSW.

Figure I-10 : Macrographie d'une soudure FSW d'un alliage d'aluminium.

Figure I-11 : les côtés du joint de soudure.

Figure I-12 : les phases du FSW.

Figure I-13 : Configurations d'assemblage montrant le positionnement de l'outil et les forces de maintien des pièces.

Figure I-14 : (a) Équipement de soudage conçu pour le FSW, (b) Robot doté d'une tête de soudage pour le FSW.

Figure I-15 : Soudage d'un réservoir cryogénique (NASA).

Figure I-16 : Les applications de magnésium industriel actuel.

Figure I. 17 : Propriétés physiques de l'Aluminium et du Magnésium, comparées à celles du Cuivre et du Fer.

Chapitre II

Figure II-1 : Schéma montrant les conditions initiales et aux limites du soudage FSW.

Chapitre III

Figure III-1 : interface du logiciel COMSOL (fenêtre et menu de commande).

Figure III-2 : étape 1.

Figure III-3 : étape 2.

Figure III-4 : étape 3.

Figure III-5 : étape 4.

Figure III-6 : étape 5.

Figure III-7 : étape 6.

Figure III-8 : étape 7.

Figure III-9 : la géométrie complète.

Figure III-10 : étape 11.

Figure III-11 : étape 12.

Figure III-12 : étape 13.

Figure III-13 : étape 14.

Figure III-14 : étape 15.

Figure III-15 : étape 16.

Figure III-16 : étape 17.

Figure III-17 : étape 18.

Figure III-18 : étape 19.

Figure III-19 : (a) la chaleur spécifique à pression constante C_p \neg [J/(kg*K)] en fonction de la température [K], (b) la conductivité thermique k [J/(kg*K)] en fonction de la température [K].

Figure III-20 : (a) la chaleur spécifique à pression constante C_p \neg [J/(kg*K)] en fonction de la température [K], (b) la conductivité thermique k [J/(kg*K)] en fonction de la température [K].

Figure III-21 : (a) la chaleur spécifique à pression constante C_p \neg [J/(kg*K)] en fonction de la température [K], (b) la conductivité thermique k [J/(kg*K)] en fonction de la température [K].

Figure III-22 : étape 20.

Figure III-23 : étape 21.

Figure III-24 : courbe d'évolution de la convergence en fonction des itérations.

Chapitre IV

Figure IV-1 : (a) distribution de la température dans le plan xz, (b) distribution de la température lors du soudage pour Al-Al.

Figure IV-2 : (a) distribution de la température dans le plan (x,z), (b) distribution de la température lors du soudage Mg-Mg.

Figure IV-3 : distribution des contours isothermes pour Al-Al.

Figure IV-4 : distribution des contours isothermes pour Mg-Mg.

Figure IV-5 : (a) distribution de la température dans le plan xz, (b) distribution de la température lors du soudage pour Al-Mg.

Figure IV-6 : (a) distribution de la température dans le plan xz, (b) distribution de la température lors du soudage pour Mg-Al.

Figure IV-7 : distribution des contours isothermes pour Al-Mg.

Figure IV-8 : distribution des contours isothermes pour Mg-Al.

Introduction générale

Le soudage est l'un des moyens d'assemblage des structures métalliques les plus répandues et les plus utilisés et sans lequel plusieurs applications industrielles n'auraient pas été possibles. C'est pourquoi les procédés de soudage sont en constant développement depuis le XIX^e siècle passant par le soudage au chalumeau puis le soudage à l'arc jusqu'au soudage laser. L'un des procédés développés et relativement récents est le soudage par friction malaxage communément connu par FSW «Friction Stir Welding», qui présente de nombreux avantages particulièrement dans les secteurs aéronautique et spatiale. Ces secteurs industriels exigent un poids minimal dans les structures, des propriétés mécaniques adéquates, facilité de mise en œuvre et fiabilités des assemblages.

Le procédé FSW a été breveté au début des années 90 par TWI (The Welding Institut) en grande Bretagne et consiste à assembler des matériaux en phase solide (dans le domaine pâteux) grâce à un outil cylindrique spécifique mis en rotation. Ce dernier est constitué d'un épaulement qui sert à générer la chaleur par frottement et d'un pion qui a pour rôle de malaxer la matière plastifiée pour former le cordon de soudure. Le pion pénètre dans la pièce jusqu'à ce que l'épaulement soit en contact avec la face de la pièce à souder puis l'outil commence son avancée le long d'une ligne de soudure tout en gardant la température du matériau inférieure à son point de fusion. Cette technologie présente de nombreux avantages par rapport aux procédés conventionnels. En effet, l'absence de fusion signifie l'absence de problèmes de solidification et de recristallisation, il y a moins de distorsion de la matière et donc moins de contraintes résiduelles. Ce procédé permet aussi l'assemblage des alliages difficilement soudables par les techniques conventionnelles et représente une alternative de soudage.

Plusieurs travaux de recherche ont été menés par la communauté scientifique pour mieux comprendre les caractéristiques et les paramètres influents sur le soudage FSW, ces recherches se sont principalement focalisées entre autres sur : l'étude de la microstructure et des propriétés du joint de soudure, la visualisation des flux de matière, le soudage des matériaux à haute température de fusion, le développement d'outil FSW (pion et épaulement) permettant d'obtenir une bonne qualité de soudure. Par contre dans ce travail, on s'intéresse à un autre aspect du soudage FSW qui est l'hétérogénéité du soudage car ce procédé permet de surmonter les difficultés rencontrées lors de l'assemblage de matériaux présentant des caractéristiques physiques différentes tels que la conductivité et la dilatation thermique.

Le but de ce travail est de prédire les champs thermiques à l'état quasi-stationnaire et cycles thermiques lors du soudage hétérogène des alliages les plus utilisés en aéronautique, qui sont l'Aluminium (2024-T4) et le Magnésium (AZ31) par le procédé FSW. Afin d'y arriver, on a subdivisé le travail par quatre chapitres :

➤ Le premier chapitre expose une recherche bibliographique portant sur les procédés de soudage en générales, puis on s'intéresse principalement au soudage FSW. on a commencé par une présentation du procédé, ses paramètres passant par les différents types d'outils, la microstructure du joint de soudure jusqu'à arriver aux avantages et inconvénient et domaines d'application.

➤ Le deuxième chapitre porte sur la modélisation mathématique du phénomène de transfert de chaleur lors du soudage. On établit les hypothèses et les équations de notre modèle thermique, l'équation régissant le phénomène et les conditions aux limites et initiales.

➤ Le troisième chapitre est consacré au développement de la simulation numérique sous le code « COMSOL Multiphysics » pour objectifs d'avoir le champ thermique et les contours isothermiques des pièces à souder.

➤ Le quatrième chapitre est dédié à la présentation des résultats obtenus selon différents cas de soudage et leurs interprétations et à les comparer entre elles pour déduire les paramètres et les positions optimales pour un meilleur soudage FSW hétérogène.

Une conclusion générale clôtura ce travail de simulation est présentée avec quelques perspectives pour futurs travaux.

Chapitre I : Recherches bibliographiques

Introduction :

Dans ce chapitre, on présente par la première partie quelques notions et généralités sur le soudage et ses différents procédés ; puis on se concentre sur un procédé relativement récent dite FSW (friction Stir Welding). On montre sa définition, son principe, les différentes zones métallurgiques générées par ce procédé, ces paramètres opératoires et quelques notions sur son outil et ses variantes. Dans la seconde partie, on présente les matériaux légers à souder et leurs caractéristiques.

I. Rappel sur le souage :

I.1. Définition du soudage :

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler [1], sous l'action d'une énergie calorifique ou mécanique générée par divers procédés mis en œuvre (combustion de gaz, arc électriques, pression...). Il existe deux cas de soudage :

- La soudure Autogène : Le métal qui compose le joint est de même nature que les pièces à souder.
- La soudure Hétérogène : Le métal qui compose le joint est de nature différente des pièces à souder [2], .ce qui nous intéresse dans ce projet.

On utilise le terme " soudure " pour désigner le résultat de l'opération du soudage.

I.2. Classification des procédés de soudage :

Il existe plusieurs procédés de soudage dont les principes ayant la mise en œuvre est très différente. 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. Les sources d'énergies utilisées dans le domaine du soudage sont de type chimique, électrique ou mécanique [3].

Ces procédés sont classés ici selon les aspects suivants [4] :

- Les procédés faisant intervenir la fusion locale sans une action mécanique.
- Les procédés faisant intervenir la fusion locale avec une action mécanique.
- Les procédés faisant intervenir un chauffage sans fusion avec une action mécanique.
- Les procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage.

1.2.1.Procédés faisant intervenir la fusion locale sans action mécanique :

La fusion locale des pièces à assembler peut être décrite en distinguant le mode de chauffage utilisé et le moyen de protection du métal fondu contre l'action chimique de l'atmosphère ambiante. On en cite :

- Le soudage à la flamme (au chalumeau) (procédé 311 selon l'ISO 4063) :

Il est connu par le soudage oxyacétylénique (OA). Ce type est réalisé à partir de combustion d'un mélange de comburant (l'oxygène O₂) et un gaz combustible (généralement l'acétylène C₂H₂), en créant une flamme qui peut atteindre une température située entre 2850°C et 3200 °C à l'extrémité d'un chalumeau lorsque ce mélange est correctement équilibré [5]. Le métal d'apport (baguette de fil dressé de 0,8 à 4 mm de diamètre et 500mm de longueur) est amené manuellement dans le bord de fusion.

- Soudage à l'arc :

La soudure à l'arc est utilisée pour l'assemblage des pièces en acier, en fer, en inox ou même en fonte ayant une épaisseur supérieure à 1,5mm. La formation du bain de métal fondu est assuré par un arc électrique fonctionnant en courant continu ou alternative qui provoque la fusion d'une électrode de métal d'apport dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont proches du métal de base des deux pièces à souder ,cette fusion assure la liaison et la continuité après le refroidissement des éléments entre eux.

Ce procédé regroupe les types de soudages qui utilisent l'arc électrique comme source de fusion comme : Le soudage avec électrode enrobées, électrode réfractaire TIG, sous protection gazeuse : MIG ou MAG, ou soudage vertical sous laitier.

- Soudage aluminothermique (procédé 71 selon l'ISO 4063) :

Le procédé est largement utilisé dans le domaine de soudage des rails de chemins de fer, il consiste à couler le métal d'apport liquide dans un moule étanche construit en matière réfractaire autour des deux pièces à assembler placées face à face à une certain distance. Le soudage est le résultat d'une réaction chimique exothermique entre l'aluminium en poudre et des grains d'oxydes de fer.

- Soudage par faisceau à haute densité d'énergie :

Les procédés de soudage par faisceau à haute densité d'énergie (FHDE) sont caractérisés par la focalisation d'une densité d'énergie très importante au point d'impact sur le joint des pièces à assembler. Le soudage est assisté de façon automatique par des grandes classes de machines ce qui permet la rapidité, la précision et l'assemblage des pièces de

différent matériaux et dans des géométries complexes, donc la qualité de la soudure est excellente, on en cite :

- Soudage par faisceau d'électrons.
- Soudage par faisceau laser.

I. 2.2. Procédés faisant intervenir la fusion locale avec action mécanique :

Dans ces procédés, la chaleur utilisée pour former le bain du métal fondu est assurée par la combinaison entre l'effet Joule d'un courant électrique alternatif à haute intensité et une pression ponctuelle, donc passage du courant et serrage des tôles ou pièces.

Ces procédés ne nécessitent pas d'apport extérieur (Soudage autogène) car la résistance de contact entre les surfaces des deux pièces à assembler permet la localisation de la fusion dans ce plan. Ces procédés sont :

- Soudage par point (procédé 21 selon l'ISO 4063) : discontinu par recouvrement
- Soudage à la molette (procédé 22 selon l'ISO 4063) :

Dans ce procédé les électrodes classiques sont remplacées par des disques en cuivre, ou molettes, qui par rotation permettent de faire des soudures par recouvrement, continues et étanches.

- Soudage par bossage (procédé 23 selon l'ISO 4063) :

Le procédé de soudage par bossage est directement dérivé du soudage par points. Les électrodes du soudage par points étant dans ce cas remplacées par des plateaux avec saillies appelées "Bossages" préparés sur une des pièces à assembler, en réalisant ainsi une concentration de courant nécessaire à leur fusion [6]. Ces bossages assurent une bonne régularité des conditions de contact des pièces et favorisent ainsi la régularité de la quantité d'énergie dégagée à l'endroit du joint à réaliser.

- Soudage en bout par étincelage (procédé 24 selon l'ISO 4063) :

Ce procédé permet les assemblages bout à bout en T de profilés ou de fils, à savoir les constructions tubulaires, les armatures pour béton, encadrements de porte et de fenêtre, les maillons de chaîne, etc C'est un arc électrique qui porte les extrémités à température de fusion par l'effet Joule, ensuite les pièces sont rapprochées (forgeage).

I. 2.3. Procédés faisant intervenir un chauffage sans fusion avec action mécanique :

Le chauffage peut être effectué par apport extérieur de chaleur ou par action mécanique (frottement). Les efforts appliqués doivent être soigneusement pilotés.

Ces procédés exigent donc des équipements très spécifiques et elles regroupent :

- Le soudage par diffusion.
- Le soudage par friction.
- Soudage par diffusion (procédé 45 selon l'ISO 4063) :

Le procédé de soudage par diffusion consiste à assembler deux pièces en état solide en provoquant une diffusion réciproque des atomes de part et d'autre de la surface de contact. Cette diffusion s'effectue sous vide avec application de chaleur et de pression maintenues pendant une durée appropriée [7].

- Soudage par friction :

C'est le sujet de notre travail et on va le détailler par la suite (voir figure I.1).

I.2.4.Procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage :

Pour ces procédés d'assemblage des pièces se fait par recouvrement et seulement par une action mécanique (pression) à la mise en œuvre des outils particuliers, et elles contiennent :

- Le soudage par ultrason (procédé 41 selon l'ISO 4063) :

Un procédé voisin du soudage par friction, d'où les pièces à souder sont généralement de 2mm d'épaisseur qui sont placées en recouvrement sous une pression modérée entre une enclume et une sonotrode qui transmet à l'une d'elles des vibrations ultrasonores à haute fréquence (de 20 à 100 kHz) parallèles à la surface de contact. Il se produit donc, des micro-glissements suffisants pour expulser les matières étrangères et permettre une liaison parfaite entre les pièces sans aucune fusion. La transformation de l'énergie électrique en énergie vibratoire est assurée par un transducteur à Magnétostriction

- Le soudage par explosion (procédé 441 selon l'ISO 4063) :

Ce procédé est utilisé pour réaliser des assemblages par recouvrement par une collision de haute énergie de deux surfaces superposées ou inclinées l'une par rapport à l'autre. l'explosif est placé sur une plaque ou une tôle supérieure (métal de recouvrement) qui est elle-même placée à une certaine distance de la pièce de base sur laquelle la tôle va être soudée, lors de l'explosion (commandée par un détenteur) l'onde de choc se propage à travers la tôle et provoque une injection violente de métal de recouvrement ce qui permet d'établir la liaison dans toute la surface entre ces deux pièces.

On récapitule ces différents procédés par l'organigramme suivant (voir figure I.1) :

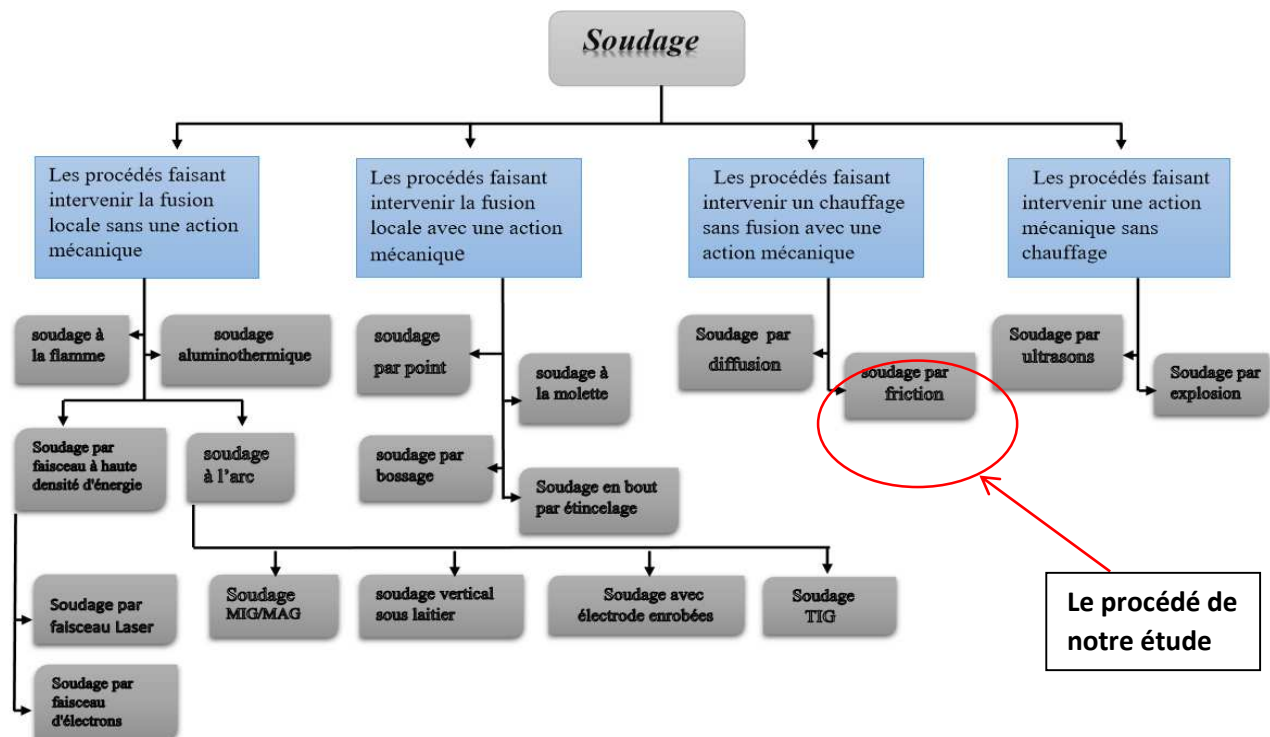


Figure I-1 : Organigramme des procédés de soudage selon les énergies mises en jeu [8]

II. Procédé de soudage par friction malaxage (FSW) :

II.1. Définition et principe :

Le soudage par friction malaxage « Friction Stir Welding » est un procédé d'assemblage de pièces en phase solide qui facilite le soudage des alliages réputés de mauvaise soudabilité avec les procédés conventionnels par fusion (TIG, GMAW...) en raison de divers problèmes associés à leur microstructure de solidification. Les premières applications ont concerné principalement les alliages à base d'aluminium, magnésium, plomb ou de cuivre [9] caractérisés par leur température de fusion modérée. Cependant, il est aujourd'hui possible d'appliquer le FSW aux alliages de titane, de cuivre, de nickel, de magnésium, les thermoplastiques, les MMCs (Composite à matrice métallique). Le grand défi actuellement, est son application aux aciers et aciers inox [10]. Ce procédé exige des propriétés thermomécaniques de l'outil de soudage largement supérieures à celles des pièces à assembler et ne requiert que très peu d'énergie, seulement 2.5% de l'énergie nécessaire au soudage par laser [11].

A l'origine, ce procédé de soudage a été inventé et breveté en 1991 par l'équipe de TWI (The Welding Institut) [12]. Actuellement, les travaux récents s'orientent vers plusieurs axes parmi lesquels on peut citer :

- Choix du matériau et de la géométrie de l'outil qui permettent d'obtenir une bonne qualité de soudure.
- soudage d'alliages caractérisés par une haute température de fusion comme l'acier.
- soudage hétérogène.

- automatisation du procédé par l'utilisation de robot.

Le soudage par friction malaxage utilise le principe de la conversion de l'énergie mécanique produite par la pression et la rotation de l'outil en énergie thermique par frottement de ce dernier avec les pièces à assembler. Donc, son principe consiste à enfoncer un outil spécifique rotatif de forme spéciale, entre les faces de bout en bout des pièces à assembler (voir figure I.2). La chaleur générée engendre des transformations localisées où la matière passe d'un comportement élasto-viscoplastique à haute résistance mécanique à un comportement viscoplastique à faible résistance favorisant la formation de la jonction. L'assemblage est par la suite réalisé en l'absence de métal d'apport et sans atteindre la température de fusion du matériau (70-90% du point de fusion) [13].

Les pièces à souder sont maintenues rigidement pour éviter tout écartement du joint pendant l'opération de soudage (voir figure I.2). Ce bridage particulièrement important peut générer des problèmes de contraintes résiduelles après le refroidissement du cordon.

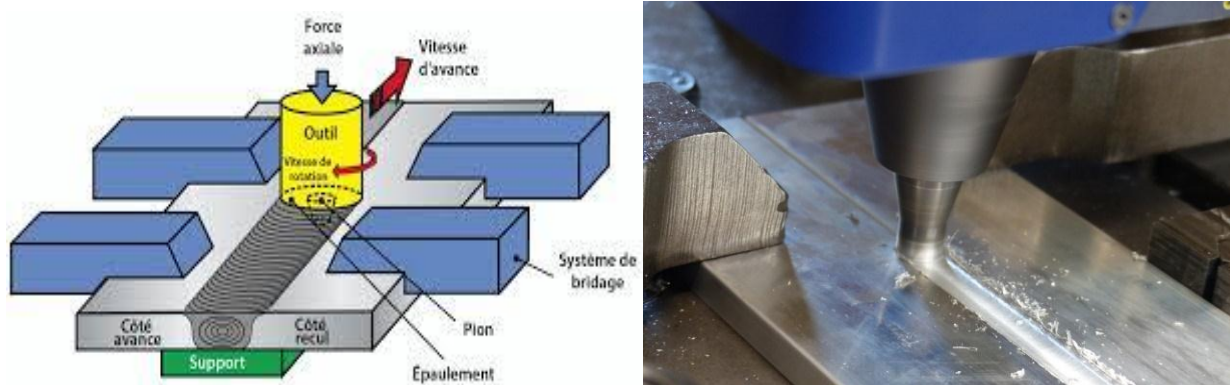


Figure I-2 : procédure du FSW

II.2.Paramètres du soudage par friction malaxage :

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

- La géométrie de l'outil : diamètre du cylindre et du pion, longueur du pion(en mm) et son angle de tiltage (inclinaison de l'outil par rapport à la vertical).
- La vitesse de rotation de l'outil (de 100 à 4000 tr/min).
- La vitesse d'avance de l'outil –soudage- (de quelques cm/min à quelques m/min).
- L'effort de soudage –force de plongée- (de quelque centaines de kg à plusieurs tonnes).

Ces paramètres sont les plus influents sur la qualité de la soudure obtenus, on peut citer d'autres paramètres :

- Forme et matière de l'outil.
- Montage du bridage.
- Mode d'asservissement de la machine (position ou effort).

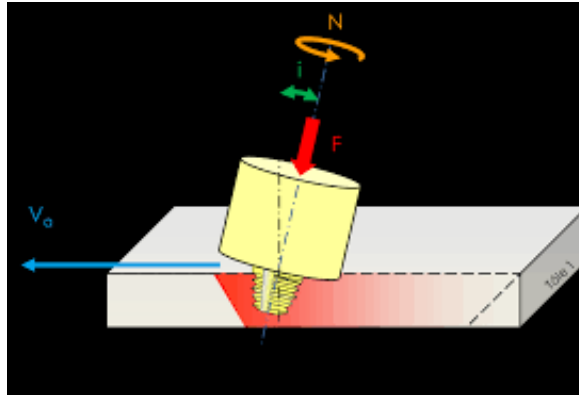


Figure I-3 : les paramètres du FSW

La figure I-4 montre l'influence des vitesses rotation-avance sur la qualité du cordon FSW, nous remarquons que la qualité du cordon s'améliore en augmentant ce couple de vitesses.

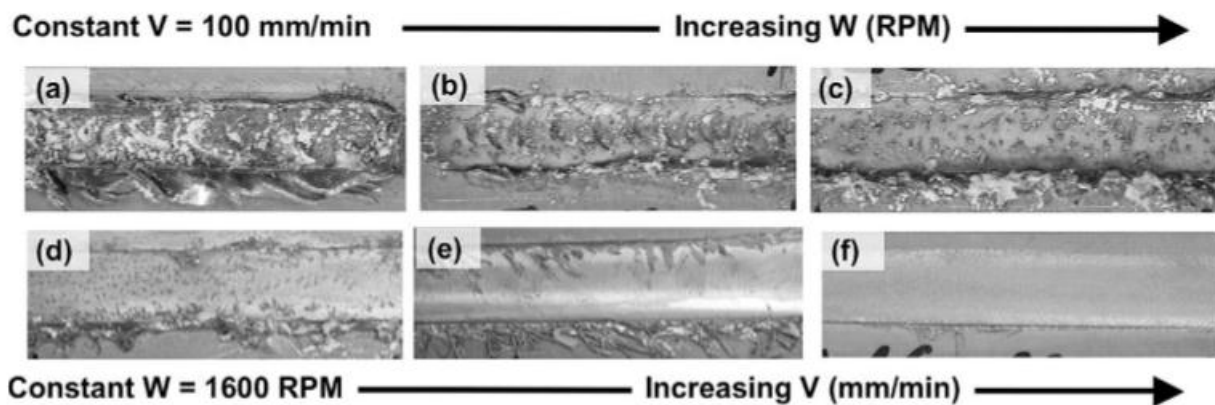


Figure I-4 : image correspondantes à l'alliage AZ31 soudé par FSW avec plusieurs vitesses :

- a) $V_a=100\text{mm /mn}$ et $V=400\text{ tr/min}$, b) $V_a=100\text{mm /mn}$ et $V=700\text{ tr/min}$, c) $V_a=100\text{mm /mn}$ et $V=900\text{ tr/min}$, d) $V_a=400\text{mm /mn}$ et $V=1600\text{ tr/min}$, e) $V_a=600\text{ mm /mn}$ et $V=1600\text{ tr/min}$, f) $V_a=1000\text{ mm /mn}$ et $V=1600\text{ tr/min}$ [14, 15].

La figure I-5 montre l'influence de l'effort axial sur la qualité de la soudure. L'augmentation de cette force en gardant les mêmes vitesses entraînent la formation des bavures latérales.



Figure I-5 : joint soudé par FSW pour différents efforts axiaux : a) $V_r = 1500$ tr/min, $V_a = 90$ mm/min et $F_z = 1470$ N ; b) $V_r = 1500$ tr/min, $V_a = 90$ mm/min et $F_z = 1800$ N [16].

II.3. Variantes des composants de l'outil de soudage FSW :

II.3.1.L' épaulement :

L'épaulement est en contact direct avec les pièces à assembler. Il applique une pression à la surface des pièces assemblées. Son premier rôle est de chauffer la matière par frottement. Celui-ci constitue la source principale de chaleur. De ce fait, la taille relative de L'épaulement doit être environs cinq fois supérieur à celle du pion. Afin d'augmenter l'efficacité du frottement (sans augmenter le diamètre de l'épaulement), on peut sculpter des profils sur la surface de l'épaulement en contact avec la pièce. Des exemples de profils (de type rainures ou spirales) sont présentés sur la figure I-6.

Ces profils usinés sur la surface de frottement permettent d'entraîner la matière vers le centre. Ceci permet de confiner un maximum de matière sous l'épaulement diminuant ainsi les bavures. Ce type d'épaulement est particulièrement efficace lorsqu'il est perpendiculaire aux surfaces soudées, car la surface de contact est maximale.

L'épaulement peut également être de forme conique ou concave. L'opération de soudage est alors réalisée en inclinant l'outil d'un angle compris entre 2 et 3 degrés dans la direction opposée à celle de la direction d'avance, pour accentuer le phénomène de forgeage en surface de la matière située derrière le pion. Cela permet des vitesses de soudage plus élevés. Le degré d'inclinaison dépend du type d'outil, et plus particulièrement de la géométrie de l'épaulement. L'épaulement de l'outil joue un rôle d'entraînement de la matière.

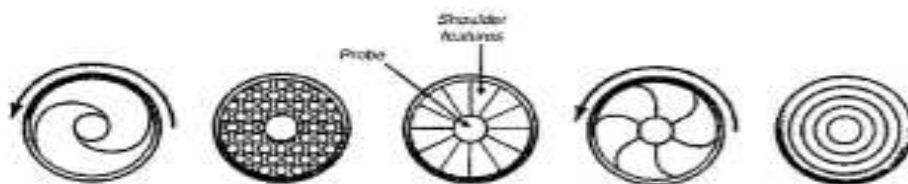


Figure I-6 : Des exemples de profils (de type rainures ou spirales). [17]

II.3.2. Le pion :

Le pion a pour rôle de malaxer la matière plastifiée afin de former le cordon. La géométrie du pion est également un facteur important en soudage par FSW. Le flux de matière, ainsi que les efforts générés au niveau du pion sont directement liés à sa géométrie qui conditionne de ce fait la microstructure, l'homogénéité du joint et les propriétés mécaniques de l'assemblage.

Les dimensions du pion sont calibrées, sa longueur détermine la pénétration de la soudure visée (l'épaisseur du cordon). Suivant les machines de soudage utilisées et selon le matériau soudé, la pénétration peut varier de 1.6 mm à 50 mm en une seule passe et sans apport de matière.

Des études sont menées sur la géométrie du pion, pour optimiser l'opération de soudage et la qualité de la soudure. Les formes de pions sont de plus en plus complexes. La géométrie des outils « Wholer™ » et « MX-Triflute™ » développé par TWI (l'institut de soudure britannique) en sont de bons exemples. Ces deux types d'outils sont représentés sur la figure ainsi qu'un outil de géométrie plus simple « Teiverx™ ». Le pion « Triverx™ » se compose de trois faces convexes avec ou sans filets. Cette configuration d'outil sans filets est communément utilisée pour la modélisation numérique du soudage par FSW.

Ces types d'outil présenteraient un certain nombre d'avantage par rapport à un outil conventionnel de forme cylindrique :

- Ils permettent de diminuer les efforts nécessaires pour avancer dans le matériau plastifié (et ainsi le risque de rupture du pion diminue).
- Ils permettent d'augmenter la vitesse d'avance.
- Ils réduisent l'asymétrie du cordon de soudure.
- Ils facilitent la pénétration de l'outil dans la matière.

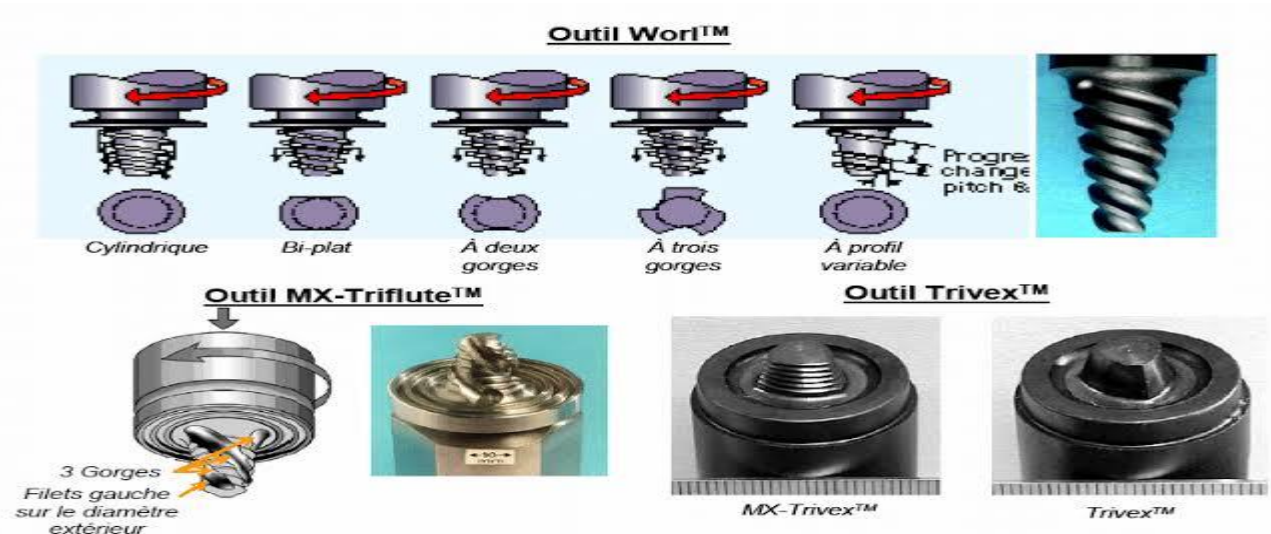


Figure I-7 : Différentes géométries du pion de l'outil FSW

II.4. Différents outils de soudage par FSW :

L'outil de soudage en FSW a un rôle primordial. Il existe trois configurations d'outil possibles. Les trois technologies d'outil utilisées pour le soudage par friction malaxage (FSW) sont : l'outil conventionnel, l'outil à pion rétractable et l'outil à double épaulement appelé « bobbin tool » ou « self reacting tool ».

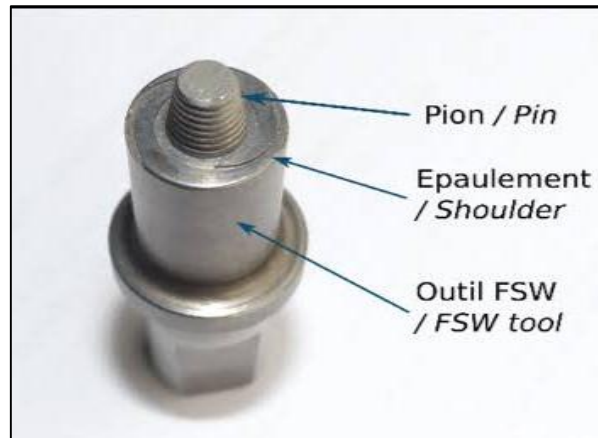


Figure I-8 : l'outil du FSW

II.4.1.L'outil conventionnel :

Se présente en un seul bloc (le pion et l'épaulement sont solidaires), il n'y a pas donc de mouvement relatif possible entre le pion et l'épaulement. Cette technologie présente quelques inconvénients :

- Un pion est calibré pour souder une épaisseur donnée, ainsi, si l'on modifie l'épaisseur à souder, il faudra changer d'outil pour adapter la longueur du pion et le diamètre de l'épaulement aussi.
- En cas de rupture du pion, il faut changer tout l'outil (pion + épaulement).
- A la fin de l'opération de soudage, la sortie de l'outil génère la formation d'un trou (empreinte du pion dans la matière).

Le risque de manquer de liaison en racine subsiste (pénétration du pion insuffisante). Dans ce cas, le cordon formé n'est pas égal à l'épaisseur des tôles assemblées. Ce défaut, également appelé « *kissing bond* », peut fortement affecter la tenue mécanique des joints soudés (notamment en fatigue). Le meilleur moyen de mettre en évidence ce défaut est l'essai de pliage à l'envers (la racine de la soudure étant en traction).

II.4.2. L'outil à pion rétractable :

As la particularité de fonctionner avec un épaulement et un pion actionnés par deux axes machine indépendants l'un de l'autre (possibilité de mouvement relatif). L'avantage de cet outil est de permettre la réalisation d'assemblage dont les épaisseurs varient le long du joint soudé, et de permettre d'éviter la formation d'un trou à la fin de l'opération de soudage (par retrait progressif du pion tout en conservant l'épaulement en contact avec

les tôles). Le soudage s'effectue, tout comme pour l'outil conventionnel, sur une seule face. Une machine plus complexe est néanmoins nécessaire pour pouvoir piloter le pion et l'épaulement de manière indépendante.

II.4.3. L'outil à double épaulements « bobine tool » ou « self reacting tool » :

Possède deux épaulements positionnés cotés endroit et envers des pièces à souder. L'apport de chaleur s'effectue par frottement des épaulements sur les deux faces des pièces. La distribution de température est alors symétrique à l'intérieur du joint. Pour une épaisseur identique, les efforts de soudage sont plus faibles que ceux nécessaires pour les deux technologies d'outil citées ci-dessus. La soudure obtenue est verticalement symétrique et le risque de manque de liaison (défaut de pénétration) est éliminé.

Afin de pouvoir mettre en position cet outil, il faut au préalable percer un trou de passage dans la tôle pour y insérer le pion. Une fois le pion et l'épaulement supérieur en place, l'épaulement inférieur est ensuite vissé sur le pion. La géométrie de l'assemblage doit par conséquent permettre un accès sur le côté envers des pièces pour mettre en place l'épaulement inférieur. Par ailleurs, l'outil laissera également un trou en fin de séquence.

Comme pour l'outil avec pion rétractable, le pion et l'épaulement inférieur ne sont pas solidaires de l'épaulement supérieur. Les deux ensembles sont pilotés de manière indépendante par deux actionneurs (Figure I-9).

Toutefois, la présence de l'épaulement secondaire limite encore plus les géométries possibles des joints.

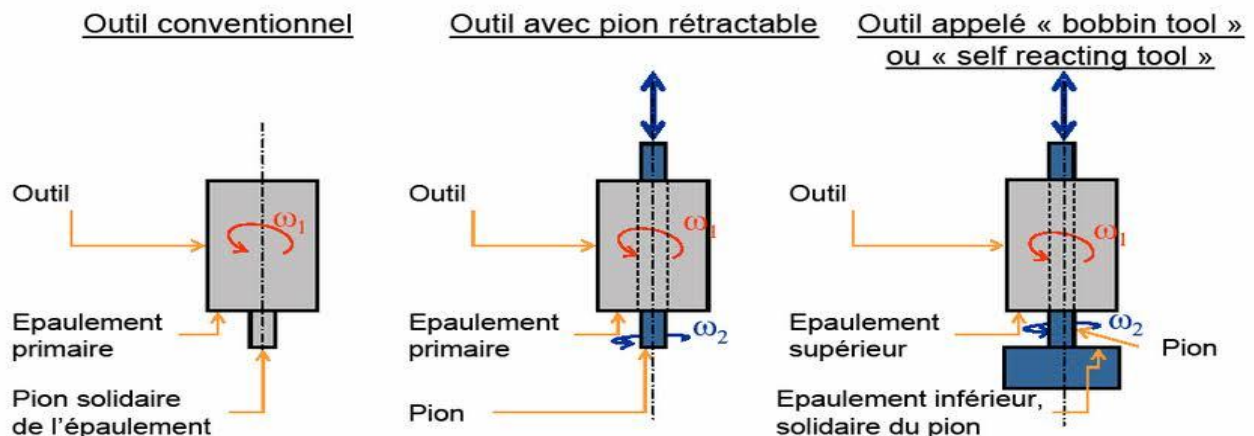


Figure I-9 : les différentes configurations de l'outil du FSW

II.5. Structure métallurgique générale des assemblages obtenus par le soudage FSW

La microstructure d'un joint de soudure obtenue par friction malaxage comporte quatre zones principales présentant des structures et des propriétés différentes :

✓ métal de base : les caractéristiques mécaniques et métallurgiques de cette zone restent invariantes après le soudage.

✓ Zone affectée thermiquement (ZAT) : siège de modification métallurgique du métal de base. Dans cette zone, le matériau n'a pas subi de déformation plastique, mais il a subi un changement microstructural du à l'élévation de la température. Cette zone est généralement une zone critique au niveau des propriétés mécaniques, elle marque la zone de rupture pour la plupart des essais de traction d'un cordon FSW d'un alliage d'aluminium.

✓ Zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM) : cette zone est à la fois affectés par la température et par la déformation plastique du au mouvement de l'outil. La combinaison du mouvement d'avance et de rotation provoque une légère asymétrie de cette zone par rapport à son axe. Les grains de la structure subissent un allongement dans des directions spécifique marquant ainsi les directions d'écoulement de la matière autour de l'outil.

✓ Noyau de la soudure (ou nugget) : subit la plus grande déformation plastique et la température atteint ses valeurs maximales. Le noyau subit une recristallisation dynamique. La structure cristalline du métal de base est complètement régénérée pour obtenir une structure plus fine (diamètre des grains de quelques micromètres). Elle se caractérise également par la présence d'ellipses concentrique dite *onion rings* (figure I.10). Cette zone occupe le centre de la soudure ainsi que la partie supérieure de la zone d'attaque. Nous pouvons aussi observer une zone dite *flow arm*, qui se situe au-dessus du noyau dans la partie supérieure du joint (figure I.10). Elle se forme quand l'épaulement vient forger la matière et sa microstructure est entièrement recristallisée.

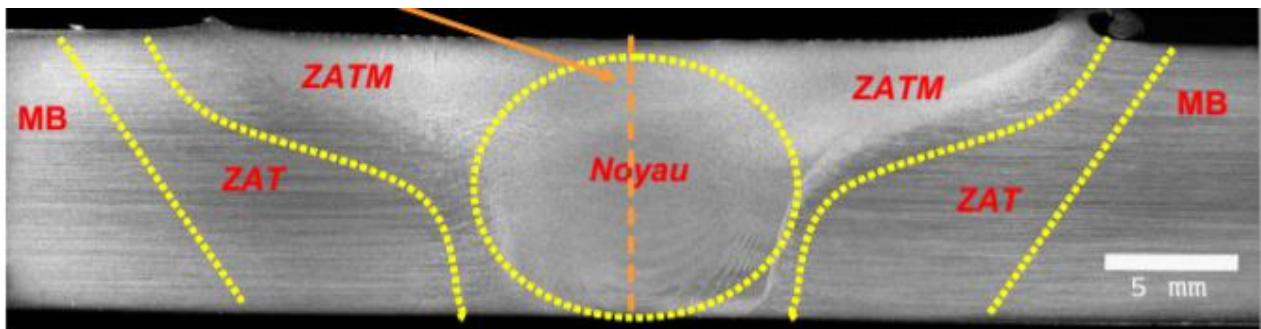


Figure I-10 : Macrographie d'une soudure FSW d'un alliage d'aluminium

II.6. Différentes configurations de soudage par friction malaxage :

Le processus du FSW peut être classifié en trois configurations principales : le soudage bout à bout, le soudage par recouvrement et le soudage par point :

II.6.1. Soudage bout à bout :

Consiste à assembler deux pièces mise en contact et généralement immobilisées par bridage pour éviter leurs écartements. Il permet de réaliser des cordons de soudures linéaires. La soudure est effectuée principalement en trois étapes successives (figure I.12) :

➤ Phase de pénétration et prés rotation : le pion pénètre progressivement dans le plan du joint des deux pièces à souder, une force normale est appliquée jusqu'à ce que l'épaulement soit en contact avec les pièces. L'outil reste dans cette position pendant un temps de maintien appelé (dwell time) pour créer la quantité de chaleur suffisante pour ramollir la matière.

➤ Phase de soudage : une fois la température du soudage atteinte, le pion tournant commence à avancer le long de la ligne du joint (autre configuration possible : déplacement de la table), ainsi le malaxage de la matière entre les deux pièces est assuré. Un effort appelé effort de forgeage est appliqué sur l'outil est maintenu pendant cette phase. La matière malaxée est déformée plastiquement et constitue le cordon de soudure. Le cordon obtenu n'est pas symétrique [18].

En effet, le mouvement combiné de rotation et d'avance donne naissance à deux côtés :

- un coté avançant (advancing side) : le coté ou les deux vecteurs vitesses (rotation et translation) ont le même sens.
- Un coté reculant (retreating side) : le coté ou les deux vecteurs vitesses sont opposés.

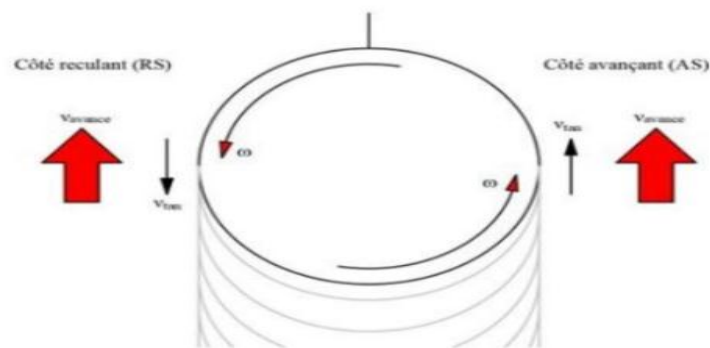


Figure I-11 : les côtés du joint de soudure

Lors de son passage, l'outil forme des stries le long du cordon, origine du frottement épaulement/matière ainsi que des bavures aux bords.

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

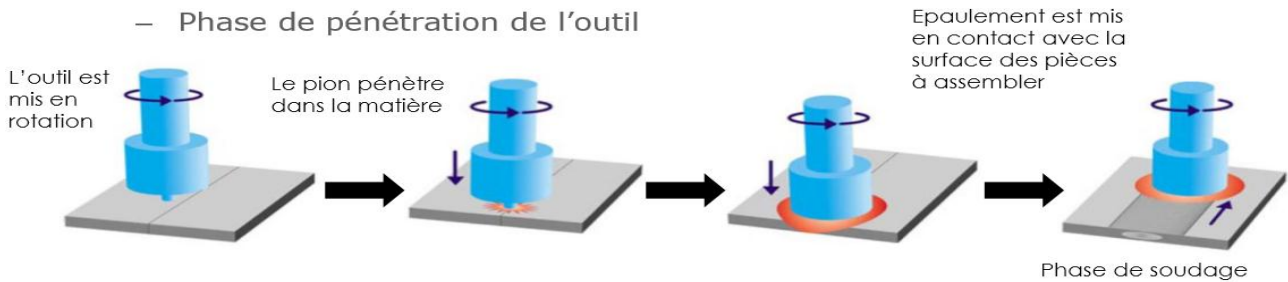


Figure I-12 : les phases du FSW

II.6.2 Soudage par recouvrement :

La procédure du soudage FSW par recouvrement est semblable à celle d'une soudure bout à bout avec pour seule différence la disposition des pièces à souder. Par conséquent, il y a une complexité additionnelle liée au transfert thermique réel entre les deux pièces. L'outil utilisé pour les joints de recouvrement est différent de celui utilisé pour le soudage bout à bout afin qu'il puisse malaxer les deux matériaux. Les paramètres du processus tels que la pression de l'outil et sa géométrie ainsi que l'iso-statisme des tôles joue un rôle très important dans la qualité de la soudure. Plusieurs recherches sont effectuées pour qualifier ce type de soudage, dans le but de remplacer le rivetage principalement dans le domaine aéronautique.

II.6.3 Soudage par point :

Le soudage par point par friction malaxage est un processus relativement récent permettant un assemblage par point de différents alliages. Le malaxage de la matière de deux pièces généralement superposées crée un point de soudure. L'outil tournant pénètre progressivement jusqu'à 80% environ de l'épaisseur des plaques à souder avec une force normale. A la différence des autres types de soudage par friction malaxage, l'outil ne se déplace pas dans la direction transversale pour former un cordon continu. Une fois la phase de plongée finie, l'outil est maintenu dans sa position avec une force stable pendant un temps approprié pour produire la quantité de chaleur suffisante pour déformer et malaxer les deux matériaux. La phase finale est le retrait de l'outil. Le développement d'un outil escamotable a permis d'améliorer la qualité de ce type de soudage. En effet, lors de la phase de retrait seulement le pion est retiré de la matière. L'épaule est maintenue pour emprisonner la matière dans le point de soudure. Le soudage FSW par point est mis en œuvre par l'industrie de l'automobile vu ses aspects rentables et productifs. Ce procédé est semblable dans son concept et son aspect au soudage par points par résistance électrique.

On peut voir dans la figure I-13 d'autres configurations d'assemblages possibles. Les configurations en angles nécessitent des machines de soudages adaptés comme des robots industriels vu la complexité de leur géométrie.

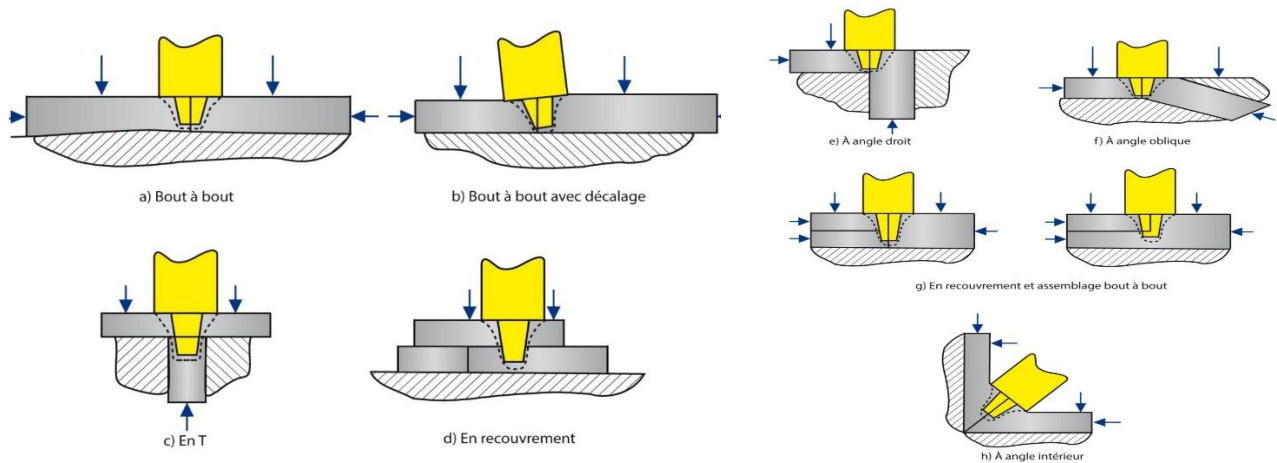


Figure I-13 : Configurations d'assemblage montrant le positionnement de l'outil et les forces de maintien des pièces. [19]

II.7. Équipements :

Tous les appareils dotés d'un mandrin rotatif pourraient servir à faire du soudage par friction malaxage. Il requiert toutefois que celui-ci puisse fournir une force axiale assez importante pour réussir les soudures. Même si ce paramètre est rarement contrôlé, l'appareil doit être en mesure d'insérer l'outil dans le métal et de maintenir sa position. Ainsi, les machines d'usinage à commande numérique et les robots industriels sont aussi efficaces que les véritables machines conçues strictement pour ce procédé tel que le «ESAB SuperStir machine » utilisé par « The Welding Institute » (TWI) [20].

Par contre ces machines dédiées représentent un grand investissement c'est pour ça que généralement des fraiseuses sont modifiées et adaptées pour ce type de soudage. Les figures ci-dessus présentent des exemples de machines de soudage FSW :

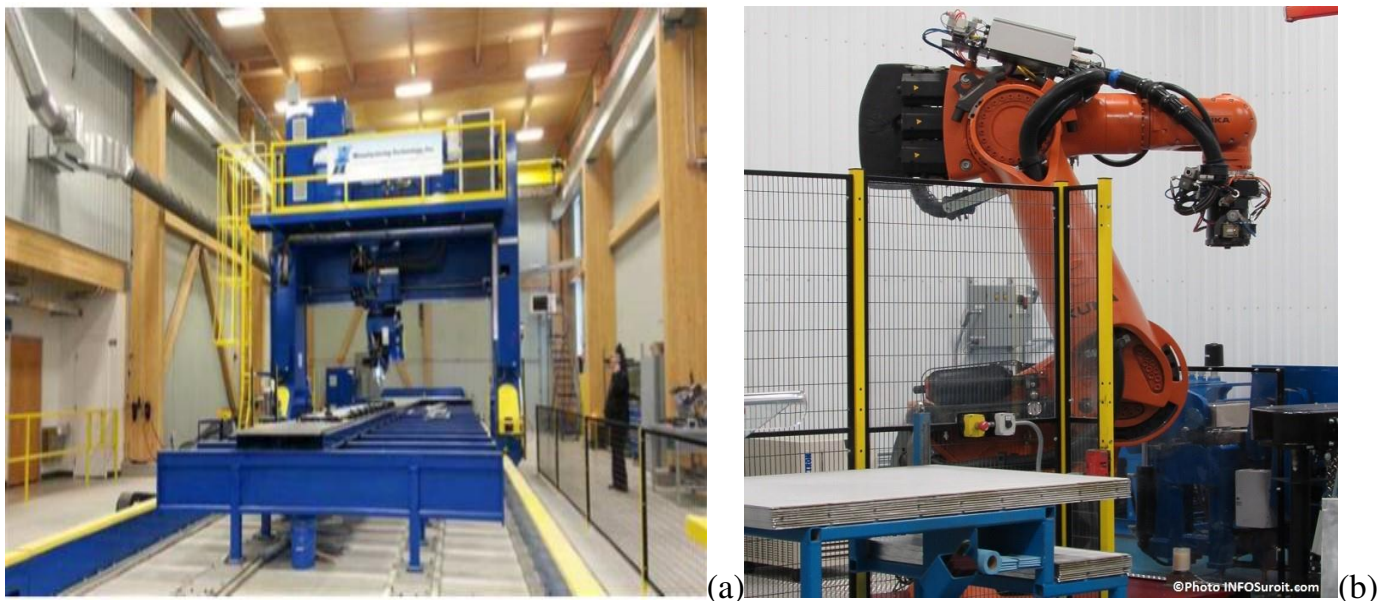


Figure I-14 : (a) Équipement de soudage conçu pour le FSW [21], (b) Robot doté d'une tête de soudage pour le FSW. [22]

II.8. Avantages et inconvénients :

On peut citer plusieurs avantages de ce procédé dont :

1. L'absence de gaz de protection et de fumé, la propreté et la possibilité d'automatisation.
2. L'absence de métal d'apport qui évite la formation de phases dures et fragilisantes.
3. La bonne adaptation aux alliages d'aluminium difficilement soudables par fusion.
4. L'élimination des problèmes de fissuration à chaud et de crique avec des propriétés mécaniques généralement supérieures à celle obtenues avec des procédés conventionnels par fusion.
5. Le très faible besoin en énergie (seulement 2.5% de l'énergie nécessaire au soudage laser).
6. possibilité de l'hétérogénéité de l'assemblage (deux matériaux différent) [23].
7. La possibilité de souder des épaisseurs de 1.6 à 50 mm avec une pénétration complète et sans porosité ou vides internes [24].
8. L'homogénéité chimique du joint, qui constitue un avantage du point de vue de la corrosion.
9. La simplicité de l'équipement utilisé exigeant ainsi peu de maintenance et peu de qualification pour le manipuler.
10. L'économisassions au niveau des couts et du temps.

Bien que son utilisation demande une licence du TWI, les limitations du FSW sont en train de diminuer vu le développement rapide de ce procédé, tout de même on peut citer quelques inconvénients comme :

1. Représente un investissement important.
2. Nécessite un maintien rigide des pièces à souder contrairement à d'autres procédés de soudage (génération des contraintes).
3. Besoin d'un dispositif d'appui (enclume ou support adapté).
4. Ne convient pas aux matériaux à haute résistance [25].

II.9. Domaines d'application :

Pour les domaines ayant des exigences élevées en termes de qualité du joint de soudure, le FSW présente un recours efficace puisqu'il permet d'avoir des joints de soudures avec des caractéristiques mécaniques proche des celles du métal de base dans certaines configuration, ce qui est difficile à atteindre avec des procédés de soudage traditionnels. C'est pourquoi le soudage FSW est exploité par plusieurs industries telles que l'aéronautique, l'automobile (rabotage de tout type de tôles), la marine (coque de bateaux), transport ferroviaire et l'armement. L'utilisation de cette technique dans ces différents domaines industriels a permis d'alléger les structures de manière significative et donc de réduire les couts de fabrications.

Parmi les entreprises qui utilisent ce procédé on peut citer : La société norvégienne « Marine Aluminium » qui a été le premier fabricant à utiliser ce procédé en 1995 pour souder des profils extrudés dans des échangeurs de chaleur à paroi creuse.

Dans les domaines aéronautique et spatiale, Boeing réalise les réservoirs cryogéniques des fusées Delta (exploiter par la NASA et l'US Air Force) par FSW depuis 1999. A la clé, une réduction des coûts supérieure à 65 % et un temps de cycle tombé de 23 à 6 jours.

Les constructeurs automobiles ont utilisés le FSW pour diverses applications surtout pour remplacer le rivetage comme pour les portes arrière de la Mazda Mx-15. Le constructeur Ford utilise le FSW pour l'assemblage des éléments de suspension et des ouvrants comme le capot ou les portes.



Figure I-15 : Soudage d'un réservoir cryogénique.

III. Présentation des matériaux utilisés :

III.1. Magnésium et ses alliages :

III.1.1 Définition :

C'est le plus léger des métaux structuraux (fabrication de bâtis, carters, pièces de structure...), classé dans la catégorie des alliages légers avec l'aluminium. Le magnésium est rarement utilisé à l'état pur. Il occupe la huitième place du point de vue abondance de la croûte terrestre, Il existe dans la nature sous forme de sels dans la mer ou sous forme de saumure et de minéraux sur terre et roches.

Sa productivité mondiale est d'environ 380000 tonnes (1998). C'est un métal d'un aspect blanc argenté, malléable. Il représente une faible résistance à la corrosion [26] ce qui empêche son utilisation dans le domaine électrique. Lorsqu'il est chauffé, il devient très malléable et ductile, cela facilite sa mise en œuvre.

Les applications de magnésium industrielles actuelles sont présentées par la figure I-16 :

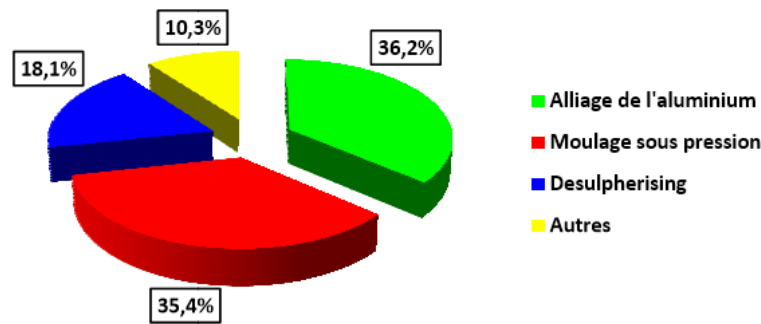


Figure I-16 : Les applications de magnésium industriel actuel [27]

III.1.2 Principales caractéristiques :

1. Caractéristiques physico-chimiques :

De tous les matériaux industriels utilisés pour les applications structurales, le magnésium possède la plus faible densité (2/3 de la densité de l'aluminium) tout en ayant des caractéristiques mécaniques satisfaisantes (voir les tableaux suivants) :

Propriété	Valeur/information
Réseau cristallin	Hexagonal compact
Masse volumique à température ambiante (g/cm ³)	1.74
Température de fusion (°C)	650
Température d'ébullition (°C)	1107
Résistance à la corrosion (MPa)	240
Le rapport résistance à la traction/densité	Entre 8 est 15

- Réaction avec l'air : le magnésium réagit au contact de l'atmosphère en donnant de l'oxyde de magnésium et de nitrures.
- Réaction avec l'eau : le magnésium avec la vapeur d'eau dès la température ordinaire, il se forme une pellicule grise de Mg (OH)₂.

2. Caractéristiques thermiques :

Sa conductivité thermique est relativement élevée, elle vient après l'argent, le cuivre et l'aluminium. Notons que ses alliages conservent cette valeur, ce qui permet leur utilisation à chaud :

Propriété	magnésium
Conductivité thermique à température ambiante (w/m.k)	155
Capacité thermique à température ambiante (j/kg.k)	1020
Chaleur latente de fusion (j/g)	355
Chaleur latente de vaporisation (j/g)	5440
Coefficient de dilatation linéique à température ambiante (1/k)	28.10 ⁻⁶

3. Caractéristique mécanique :

Le magnésium est très malléable, ductile, mais peu tenace. Sa résistance à la déformation par choc étant supérieure à celle d'autres métaux. Le magnésium et certains de ses alliages présentent une capacité d'amortissement élevée, par exemple pour le Mg pur et les deux alliages Mg-0.6Zr, Mg-0.1Si on a une capacité supérieure à 50 %. Sa cristallisation en système hexagonal compact limite fortement sa mise en œuvre à température ambiante. L'anisotropie du monocristal étant importante et les plans de glissement peu nombreux, les variations de section seront faibles. Elles ont ainsi limitées le domaine des larges déformations plastiques se situe à des températures supérieures à 200°C. Sa coulabilité est bonne, son grain plutôt fin et relativement libre de toute impureté. On constate de manière générale une bonne santé métallurgique (Absence de microporosité) avec des pièces moulées présentant un bon aspect de surface et des caractéristiques mécaniques relativement homogènes [28].

Propriété	magnésium
Module d'élasticité (GPa)	45.5
Module de rigidité (GPa)	16.7
Allongement à la rupture	15%
Coefficient de poisson	0.35
dureté Vickers Hv	45
la résistance à la traction (MPa)	200
une tension de fluage (MPa)	80

III.1.3. Alliages du Magnésium :

Il existe deux familles d'alliages, ceux avec zirconium et ceux sans [29]. L'addition d'aluminium améliore la résistance à la rupture et la fluidité à chaud, le zinc favorise la plasticité et l'aptitude au moulage, le thorium (Th) augmente les propriétés à température élevée, le zirconium (Zr) permet un meilleur allongement à la rupture (en traction), le manganèse apporte une bonne résistance à la corrosion et le lithium allège l'alliage d'une manière appréciable par comparaison à l'ajout de l'aluminium [30].

La société Américaine qui teste les matériaux a développé une méthode pour désigner les alliages de magnésium. Les deux premières lettres indiquent les principaux éléments d'alliage par ordre de décroissance en poids, suivie par deux chiffres qui représentent le pourcentage en poids (Wt %) des éléments arrondi au nombre entier le plus proche [31].

Exemple :

AZ91 : qui est équivalent à Mg-9Al-1Zn, Alliage de magnésium comprenant 9% d'aluminium et 1% de zinc.

III.1.4. Magnésium à utiliser : AZ31

L'alliage AZ31 est l'un des alliages de magnésium les plus populaires et choisi pour notre étude. Ceci est en raison de sa faible densité massique et ses bonnes propriétés mécaniques : sa résistance spécifique élevée, sa bonne coulabilité ainsi que sa bonne

aptitude à la déformation [32]. Ce matériau offre un potentiel considérable pour les constructions à des fins d'allègement structural.

III.2.Aluminium et ses alliages :

III.2.1.Définition :

Fabriqué industriellement depuis 1886 à partir des bauxites (l'Alumine Al_2O_3 et l'hydroxyde d'aluminium $Al(OH)_3$) et de la cryolithe, ce métal est le plus utilisé juste après les fontes et les aciers. L'aluminium est l'élément métallique naturel le plus abondant de l'écorce terrestre dont il est le 3e élément constitutif le plus important, il représente environ 8% [33]. Les aluminums et alliages, avec les magnésiums, sont classés dans la catégorie des alliages légers et font partie des métaux dits structuraux (utilisés pour fabriquer des bâtis...). Principales applications : transports (aéronautique, automobile...), génie civil, génie électrique, containers, emballages, composants mécaniques (fonderie...), etc. Par exemple, près de 70% de la masse d'un avion de ligne est constitué d'aluminium.

III.2.2.Principaux caractéristiques :

1. Caractéristiques physico-chimique :

L'aluminium est un excellent conducteur de chaleur et d'électricité. C'est un métal blanc brillant, Il est assez mou et malléable. C'est entre 100 et 150°C qu'il se laisse le mieux travailler, ce qui permet de confectionner avec facilités pièces de profilés les plus variées et très compliquées. L'aluminium est pratiquement inaltérable à l'air car il est recouvert d'une fine couche protectrice d'alumine. L'eau distillée, l'eau de pluie et la vapeur d'eau n'ont aucune action sensible sur l'aluminium. En revanche, l'eau de mer l'attaque. Les acides ont peu d'action sur l'aluminium de même que l'eau oxygénée. Par contre, la soude en solution, le carbonate de soude, le chlorure de magnésium et le chlorure de calcium l'attaquent fortement.

Propriété	Aluminium
Réseau cristallin	Cubique à face centrées
Masse volumique (g/cm^3)	2.7
Température de fusion °C	660
Température d'ébullition °C	2056
Conductivité thermique (w/m.k)	220
Capacité thermique (j/kg.k)	9102
Coefficient de dilatation (1/k)	24.10-6
Allongement à la rupture	40%

2. Caractéristiques mécaniques :

La dureté de l'aluminium est accrue par la présence d'impuretés (cuivre, nickel, argent, phosphore, etc.). Le défaut de l'aluminium est donc sa faible résistance mécanique, ce qui

ne permet pas de l'utiliser pour la réalisation d'éléments porteurs dans la construction. Cependant, les qualités mécaniques de l'aluminium sont fortement améliorées lorsqu'on lui ajoute du cuivre, du manganèse et du magnésium. Il présente un bon rapport résistance/poids, ce qui explique les nombreuses applications dans le domaine des transports.

Propriété	Aluminium
Module d'élasticité (GPa)	67
Module de rigidité (GPa)	27
Coefficient de poisson	0.34
La résistance à la rupture (MPa)	80 pour l'AL ordinaire et 60 pour l'extra-pur

III.2.3. Alliages d'Aluminium :

L'aluminium produit est utilisé en grande partie (85 à 90 %) pour la fabrication d'alliages (Alpax, Duralumin) [34]. Certains éléments d'alliage augmentent la résistance mécanique ou la résistance à la corrosion. D'autres améliorent l'aptitude à l'usinage, la malléabilité, la soudabilité et la résistance aux températures élevées. Par exemple : l'aluminium augmenté de magnésium et de silicium a une résistance améliorée à la corrosion, ce qui en fait un matériau apprécié pour les portes et les cadres de fenêtres et pour les bateaux de plaisance, l'ajout de cuivre et de zinc à l'aluminium produit des alliages d'une résistance mécanique remarquable, l'ajout de chrome, de manganèse et de titane à l'aluminium modifie la dimension des grains du métal.

La famille d'alliages la plus utilisée est les alliages corroyés qui comprend tous les produits laminés d'usinage courant : barres, profilés, tôles, plaques, bandes ; les produits filés et étirés ; les fils ; les produits forgés ou destinés à la forge, etc.

Les alliages d'aluminium pour corroyage sont référencés par une désignation de 4 chiffres. Cette désignation est conforme aux directives de l'Aluminium Association, ce qui donne par exemple : 7075. Les quatre chiffres sont parfois précédés par les lettres AA (exemple : AA 6061), acronyme de « Aluminum Association ». Les quatre chiffres sont parfois suivis par une lettre qui indique une variante nationale d'une composition existante.

Cette désignation a été reprise en Europe par la norme EN 573-3 en ajoutant les préfixe EN, A (aluminium) et W (wrought : mot anglais signifiant corroyage). Ce qui donne EN AW-7075. Dans les faits, très souvent, seuls les quatre chiffres sont utilisés.

Le premier chiffre indique l'élément d'addition principal de l'alliage :

- 1XXX (série des 1000) : alliage comportant au minimum 99 % d'aluminium (exemple : 1050)
- 2XXX (série des 2000) : cuivre (exemple 2024)

- 3XXX (série des 3000) : Manganèse (exemple : 3003)
- 4XXX (série des 4000) : silicium (exemple : 4006)
- 5XXX (série des 5000) : magnésium (exemple : 5083)
- 6XXX (série des 6000) : magnésium, silicium (exemple : 6061)
- 7XXX (série des 7000) : zinc (exemple : 7020)
- 8XXX (série des 8000) : autres éléments.

Le deuxième chiffre indique une variante (*exemple : 7075* comporte 0,50 % de fer et le 7175 plus pur comporte 0,20 % de fer). Les troisième et quatrième chiffres sont des numéros d'ordre et servent à identifier l'alliage.

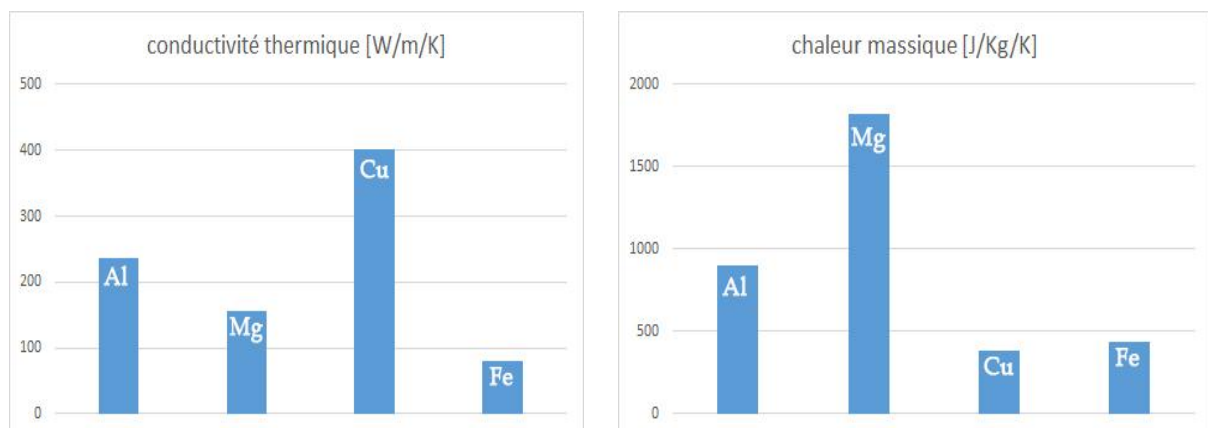
La seule exception est la série 1000, ces deux derniers chiffres y indiquant le pourcentage d'aluminium (*exemple : 1050* qui comporte au minimum 99,50 % d'aluminium) [35].

III.2.4. Aluminium à utiliser série 2024 :

Les alliages de cette famille nommés alliages à hautes résistances, présentent des caractéristiques mécaniques élevées. Ils sont très utilisés dans l'aéronautique et l'armement. Leurs propriétés mécaniques sont obtenues au détriment de leur résistance à la corrosion et leur ténacité. Cependant, des traitements de revenu sont mis au point pour diminuer cette sensibilité à la corrosion et la faible ténacité.

Comparaison :

Dans la figure I.17 ci-dessous, une comparaison type *Engineering* entre l'Aluminium/Magnésium et le Fer/Cuivre, sur les fameuses propriétés physiques. Le Fer étant l'élément principal dans la composition des aciers, utilisé dans divers applications industrielles de structures. Le Cuivre étant l'élément souvent utilisé dans les applications industrielles thermiques et électriques [36].



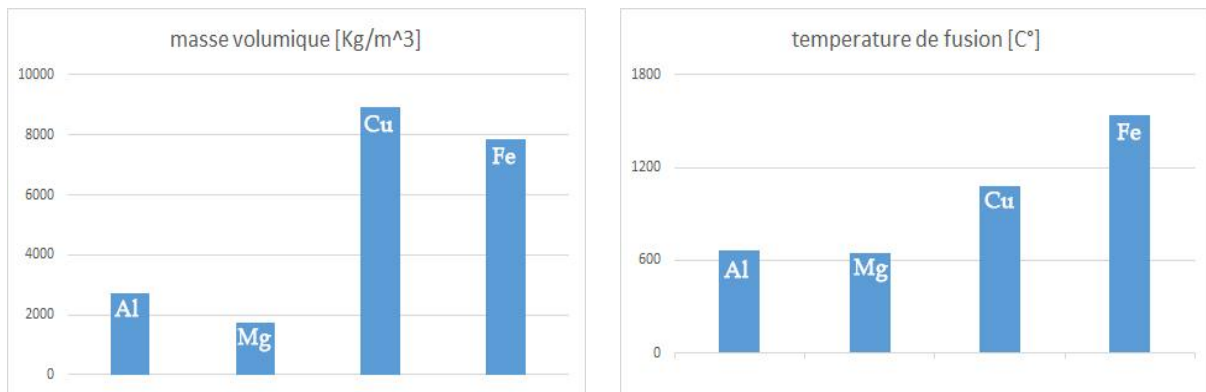


Figure I. 17 : Propriétés physiques de l'Aluminium et du Magnésium, comparées à celles du Cuivre et du Fer [36].

Chapitre II : Modélisation mathématique

Introduction :

Le but de notre étude est de prédire les cycles thermiques et la répartition de la température dans les pièces à souder et cela par la résolution des équations mathématiques du problème thermique. Ce qui va servir ensuite comme données pour l'étude mécanique du soudage FSW et permettra par la suite de juger la qualité de la soudure.

Pour obtenir ces résultats, il faut étudier le transfert de chaleur qui se produit lors du soudage FSW sachant que la quantité de chaleur apportée à la matière est due principalement à deux phénomènes physiques : le frottement et la déformation plastique à l'interface outil/pièce à souder. Le premier est dû à la force de frottement et la vitesse tangentielle de l'outil par rapport à la pièce, le deuxième est le produit de la contrainte de cisaillement et de l'écoulement de la matière de la pièce à souder autour de l'outil lors de son déplacement. Selon quelques références, 95% de la chaleur générée par la friction est transférée dans la pièce, les 5% restantes sont transmises à l'outil [37].

Divers modèles mathématiques ont été développés pour clarifier l'effet des paramètres de soudage et la distribution de chaleur lors du soudage FSW. Cependant, beaucoup d'hypothèses ont été supposées pour réduire la complexité des phénomènes et pouvoir résoudre les problèmes thermiques numériquement. Parmi les difficultés principales qui rendent ce problème assez complexe sont : la modélisation adéquate de la source de chaleur, les différentes pertes thermiques et l'évolution des propriétés des matériaux en fonction de la température qu'il faut prendre en compte lors de la résolution de l'équation de conservation de l'énergie.

Dans le cadre de notre travail, on a choisi un modèle mathématique convenable issue de la bibliographie de *Colegrove* (2000) permettant la résolution numérique de notre problème.

I. Développement mathématique :

Pour résoudre le problème thermique du soudage par FSW, il est principalement nécessaire de connaître l'amplitude du flux absorbé par les pièces à souder. La modélisation thermique basée sur les deux sources thermiques du soudage FSW (le frottement et les déformations plastiques au niveau des interfaces outil/pièce) a fait l'objet de plusieurs études. Elle présente une étape essentielle pour la compréhension du transfert de la chaleur, l'écoulement de la matière autour de l'outil et de la modification microstructurale de la soudure.

L'ensemble des travaux de modélisation thermique en FSW sont basés sur la résolution de l'équation de conduction thermique complétée par les conditions aux limites, initiales appropriées et le modèle de la source thermique [38].

Dans notre cas, on a choisi le modèle thermique de Colegrove [39, 40] pour la résolution du problème du soudage par friction malaxage.

I.1. Hypothèses générales :

Le problème thermique considéré est géré par l'équation générale du transfert de chaleur en 3D. On considère donc les hypothèses simplificatrices suivantes [41] :

- Le système de coordonnées considéré est tridimensionnelles (o, x, y, z) et supposé mobile et lié à l'axe de l'outil, la description physique est donc en configuration Eulérienne et le régime devient quasi-stationnaire de type (conduction/convection).
- Le pion de l'outil est supposé cylindrique.
- Les pertes par conduction aux surfaces de contact entre la pièce à souder avec le support inférieur sont supposées sous un mode de transfert par convection ayant un coefficient de transfert de chaleur spécifique \bar{h} .
- Les pertes sur les autres surfaces de la pièce sont supposées uniquement par convection naturelle où le coefficient d'échange est h_∞ (de l'air ambiant).
- La chaleur due à la déformation plastique de la matière à souder par l'effet de l'outil FSW, est supposée négligeable, en comparant avec la chaleur générée par frottement.
- La température locale ne peut pas dépasser la température de fusion T_f .
- Le transfert de chaleur par radiation est négligeable.

I.2. Equation du transfert de chaleur dans les pièces à souder :

Considérant les hypothèses précédentes, l'équation de transfert de chaleur dans la pièce à souder avec l'axe ox positif comme direction de soudage, est [41] :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + v \frac{\partial}{\partial x}(\rho c T) \quad (1)$$

Où : ρ est la densité du matériau, $K(x, y, z)$ est la conductivité thermique dans les différentes directions, 'c' est la capacité thermique, v est la vitesse d'avance de l'outil dans la pièce et T la température.

I.3. Modèle de source de chaleur :

Selon la bibliographie, il existe deux grandes sources de chaleur : la chaleur à l'interface du pion / pièce à souder et la chaleur à l'interface épaulement/ pièce à souder.

La chaleur générée localement entre l'épaulement et la surface de la pièce dans un élément surfacique avec une distance R_i peut être calculée comme suit [42] :

$$q_s = 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot F_n \cdot R_i \cdot \omega / (60 \cdot A_s) \quad (2)$$

Où μ est le coefficient de frottement qui varie avec la T durant le procédé du FSW, pour ce modèle initialement μ est supposé =0.4, F_n est la force normale, R_i est la distance entre l'axe de rotation de l'outil en un point 'i' à l'interface au-dessous de l'épaulement, ω est la vitesse de rotation de l'outil (tr/min), A_s est la surface de friction de l'épaulement.

La chaleur générée localement à l'interface pion/pièce consiste de 3 parties : (a) chaleur générée par le cisaillement de la matière, (b) la chaleur générée par le frottement sur la surface de filetage du pion, (c) la chaleur engendrée par le frottement sur la surface basse du pion.

Dans ce travail, nous négligeant la première et la troisième parties (a et c) par rapport à la partie (b). Colegrove a donné le modèle suivant de cette source de chaleur [38] :

$$Q_p = 2\pi r_p H k \bar{Y} \frac{V_m}{\sqrt{3}} + \frac{2\mu \bar{Y} \pi r_p H V_{rp}}{\sqrt{3(1+\mu^2)}} + \frac{4 F_n \mu V_m \cos\theta}{\pi} \quad (3)$$

Et donc l'équation (3) devient :

$$q_p = \frac{2 \cdot \mu \cdot \bar{Y} \cdot \pi \cdot r_p \cdot H \cdot V_r}{\sqrt{3(1+\mu^2)}} \quad (4)$$

Avec : \bar{Y} est la contrainte de cisaillement moyenne du matériau, r_p est le rayon du pion de l'outil, H est l'épaisseur de la pièce à souder, μ est le coefficient de frottement, F_n est la force de translation durant le soudage.

I.4. Conditions initiales et aux limites :

Pour résoudre l'équation du transfert de chaleur numériquement ou analytiquement il faut tout d'abord poser correctement les conditions initiales et aux limites [38].

- Condition initiale de calcul : la température à l'état initiale de l'outil et des pièces à souder est :

$$T(x, y, z, t) = T_0 = 300K \quad (5)$$

- Les conditions limites aux interfaces épaulement / pièce à souder et pion / pièce à souder sont respectivement :

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = q_s \quad (6) \quad \text{Et} \quad k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = q_{\square} \quad (7)$$

Où q_{\square} et q_{\square} sont les flux de chaleur générées aux interfaces épaulement / pièce à souder et pion / pièce à souder.

- Le transfert de chaleur à l'interface de contact de la pièce à souder avec le support inférieur est donné par :

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = \bar{h}(T - T_0) \quad (8)$$

- Le type d'échange thermique entre la pièce à souder et son milieu ambiant est convectif, il est modélisé par un coefficient de convection thermique h_{∞} :

$$k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = h_{\infty} (T - T_0) \quad (9)$$

- Due à la symétrie des deux pièces à souder de part et d'autre du plan vertical du soudage (parallèle au cordon de soudure), on peut supposer que le gradient de température selon la direction transversale au soudage est nul le long de ce plan :

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{x \text{ sym}} = 0 \quad (10)$$

Cette condition n'est pas applicable pour le cas du soudage hétérogène.

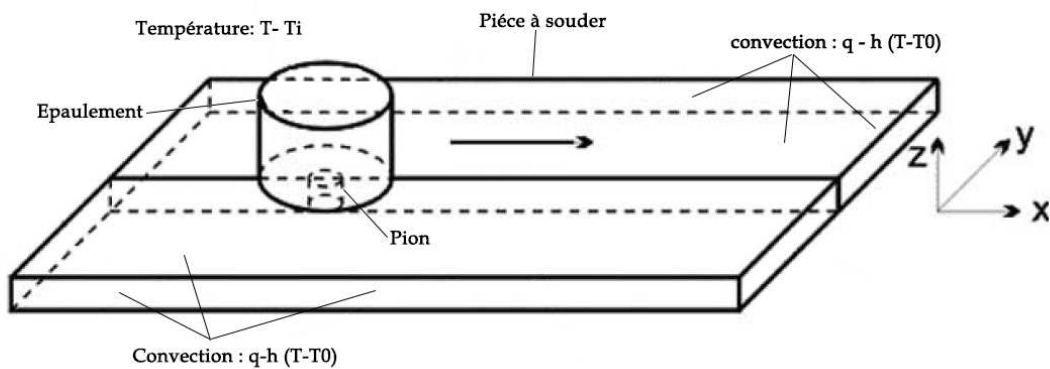


Figure II-1 : Schéma montrant les conditions initiales et aux limites du soudage FSW [38].

Chapitre III : Simulation numérique

Introduction :

Les équations gérant le phénomène sont résolues par la méthode des éléments finis (une méthode qui discrétise les équations aux dérivées partielles en obtenant un système d'équations algébriques) puis on utilise une méthode numérique itérative pour résoudre le système et obtenir la solution du problème thermique. Pour cela on utilise le logiciel COMSOL. COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation polyvalent pour la modélisation de design, de dispositif et de procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la production et de la recherche scientifique. Il peut être utilisé seul ou enrichi de fonctionnalités issues de n'importe quelle combinaison de modules complémentaires pour simuler l'électromagnétisme, la mécanique des structures, l'acoustique, la mécanique des fluides, le transfert thermique et le génie chimique.

I. Principe d'utilisation :

L'utilisateur définit ses couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies. Les différentes étapes du processus de modélisation sont : définir la géométrie, les propriétés des matériaux, le maillage, choisir la ou les physiques, résoudre et afficher les résultats- sont intégrées dans une seule interface. Des modules d'applications optionnels offre des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non-linéaire, acoustique, écoulement, transfert de chaleur, génie chimique, géophysique, électromagnétisme basse et haute fréquence, corrosion, plasma, suivi de particules, optimisation, MEMS, ainsi qu'avec les logiciels de CAO et Matlab. Ce logiciel est multiplateformes (Windows, Mac, linux). En plus des physiques précitées, COMSOL Multiphysics autorise l'utilisateur à définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP), soit sous forme différentielle, soit sous formulation faible.

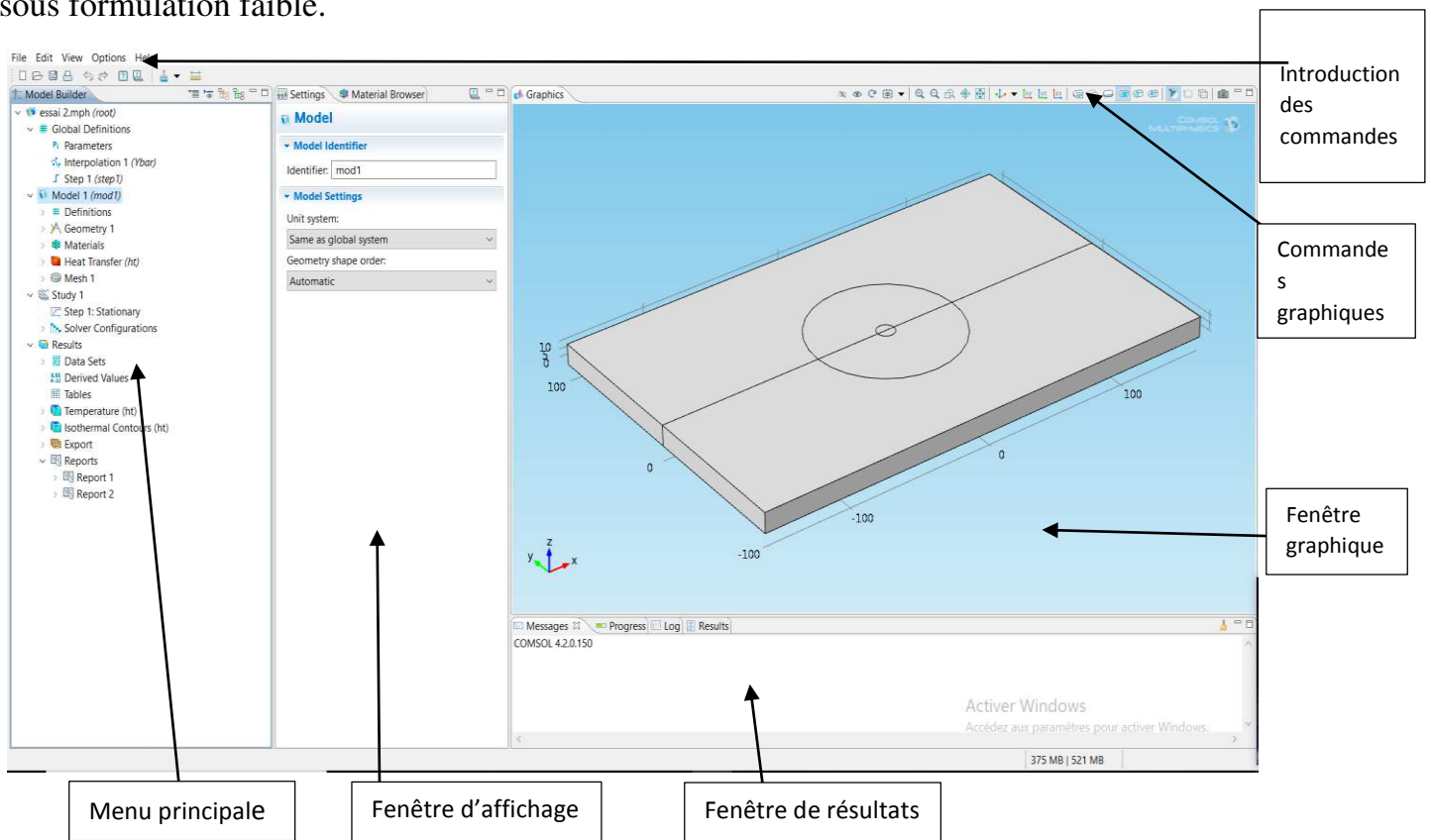


Figure III-1 : interface du logiciel COMSOL (fenêtre et menu de commande)

II. Principe de modélisation :

Dans cette partie, on présente les étapes à suivre pour modéliser le phénomène de transfert de chaleur lors du soudage FSW pour les différents cas de soudage : homogène (AL-Al/Mg-Mg) et hétérogène (Al-Mg/Mg-Al).

II.1. Choisir le type d'étude :

- Choisir les dimensions de l'espace dans lequel nous allons travailler :

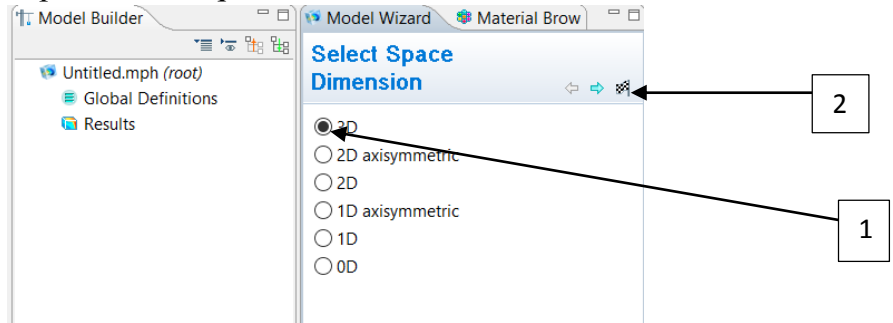


Figure III-2 : étape 1

- Choisir le type du phénomène physique étudié :

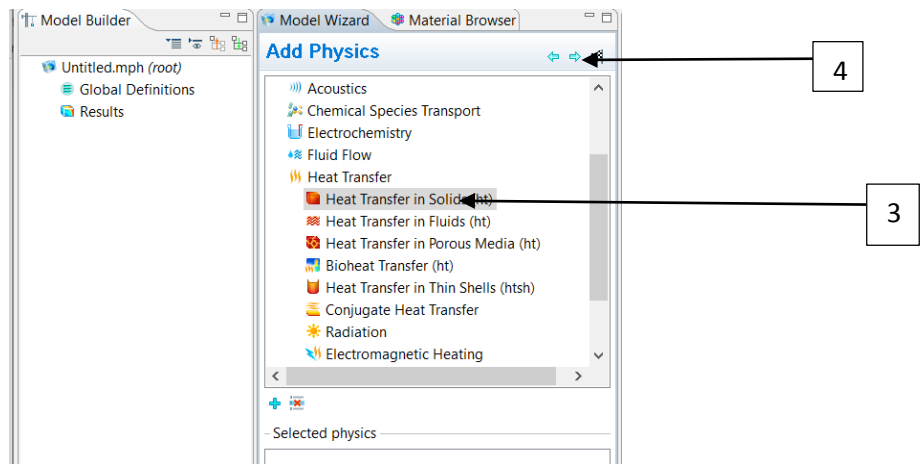


Figure III-3 : étape 2

- Choisir le type d'étude :

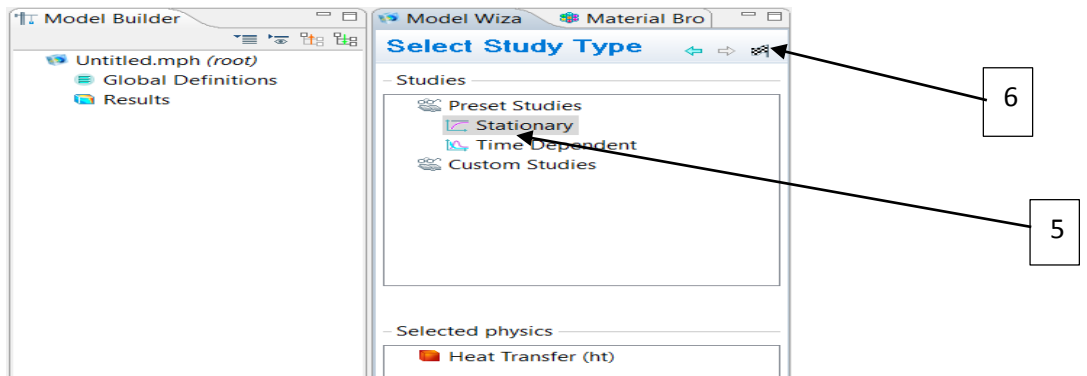


Figure III-4 : étape 3

- Introduire les paramètres du phénomène dans le programme en cliquant avec la droite sur **Global Definitions>Parameters**.

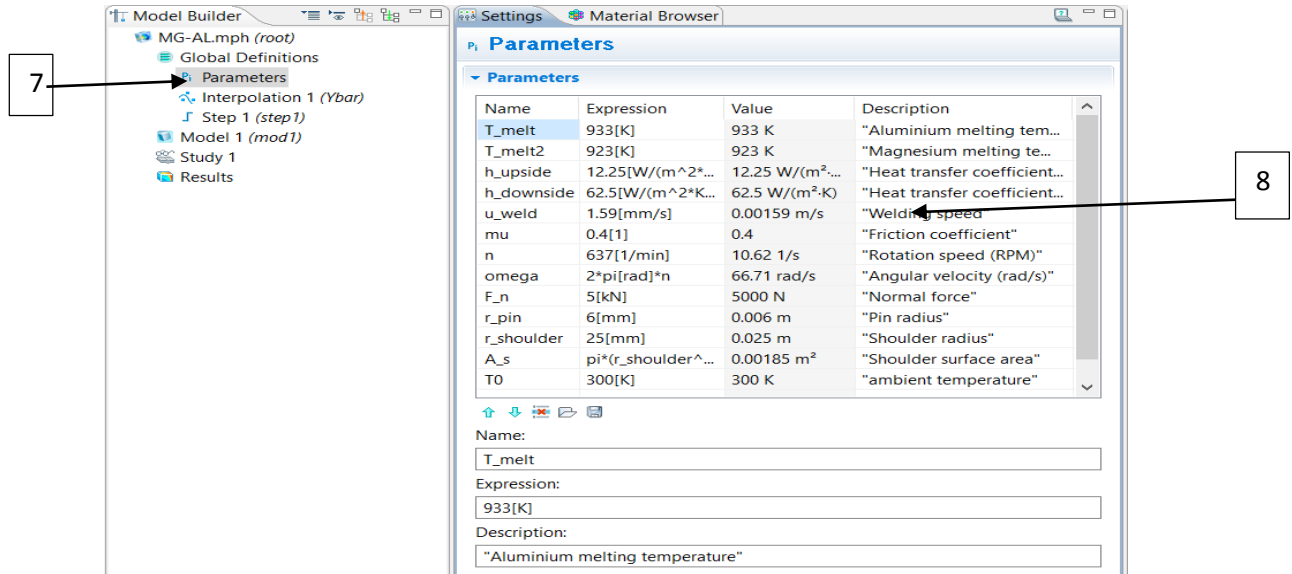


Figure III-5 : étape 4

- Introduire la fonction qui définit la variation de la contrainte de cisailement en fonction de la température en cliquant avec la droite sur **Global Definitions >Function>Interpolation**.

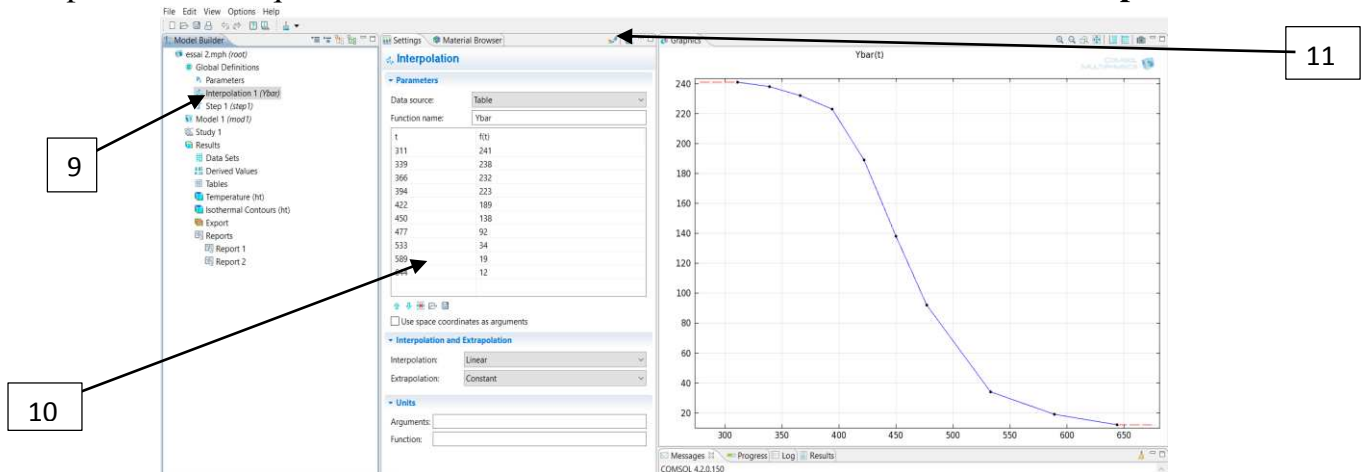


Figure III-6 : étape 5

- Définir le temps et le pas de calcul en cliquant avec la droite sur **Global Definitions >Function> Step**

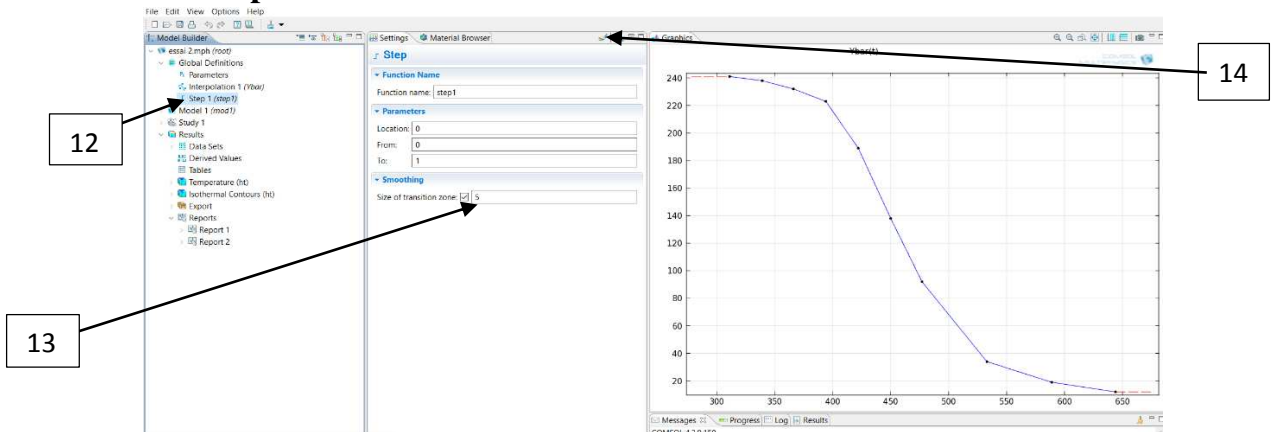


Figure III-7 : étape 6

II.2. Définir la géométrie :

La simulation numérique est réalisée sur des tôles d’alliage d’aluminium Al 2024-T4 et de Magnésium AZ31B, de 320mm de longueur, 102mm de largeur et 12.7mm d’épaisseur chacune [24], assemblées en couple, en différents cas.

L’outil est en acier H-13. La géométrie du pion est cylindrique avec une hauteur de 12 mm et un rayon de 6 mm. L’épaulement de l’outil est aussi cylindrique avec une hauteur de 30mm au-dessus des plaques à souder et un rayon de 25mm.

- pour dessiner les deux plaques à souder il faut : cliquer avec la droite sur **Geometry 1>Block** puis injecter les dimensions de chaque plaque et pour l’afficher on sélectionne **Build Selected**.

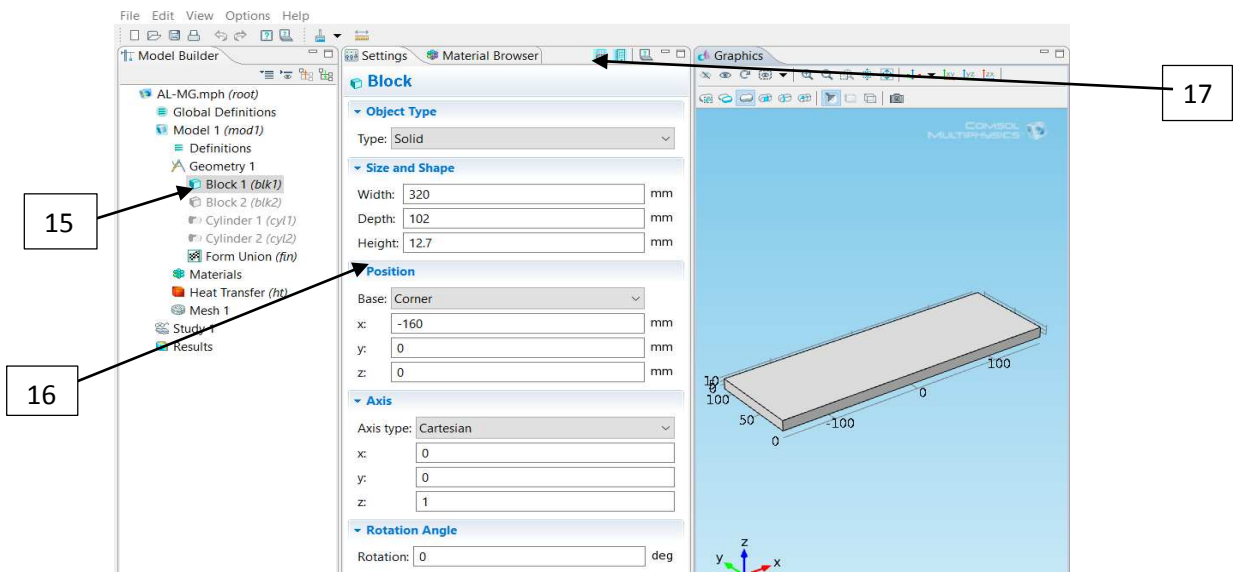


Figure III-8 : étape 7

- pour dessiner l’épaulement et le pion : de même que pour les plaques exceptés qu’on choisit **Cylinder** au lieu de **Block** puis injecter les dimensions adéquates.
- Pour compléter la géométrie il suffit de cliquer avec la droite sur **From Union** et choisir **Build Selected**.

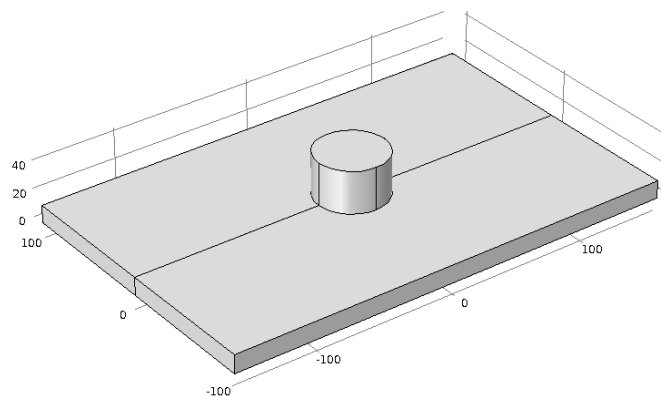


Figure III-9 : la géométrie complète

II.3. Définir les sources de chaleur :

- pour définir les équations de source de chaleur surfacique de l'épaulement et du pion il faut cliquer sur avec la droite **Definitions>Variables**, ensuite sélectionner la frontière correspondante à chaque l'équation.

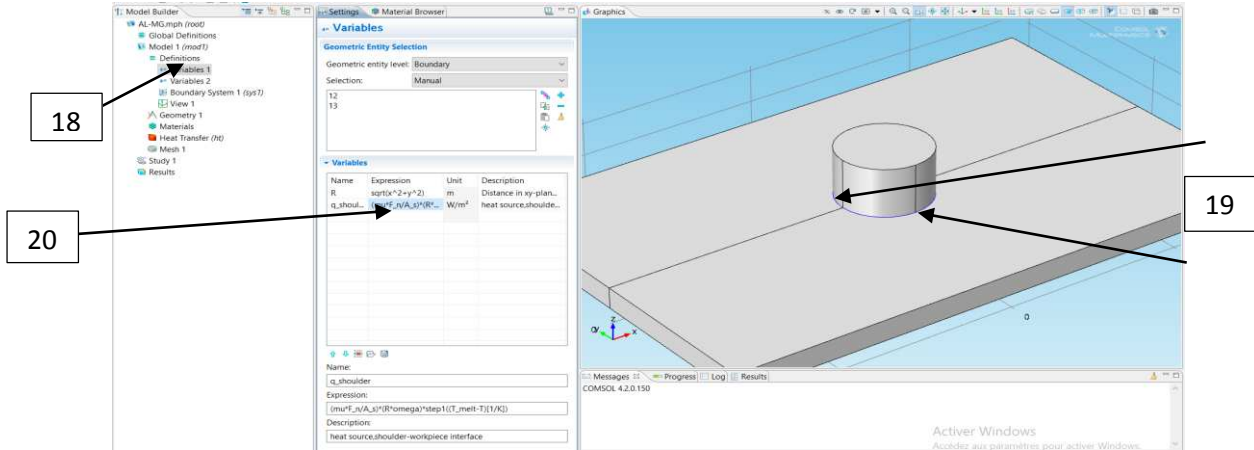


Figure III-10 : étape 11

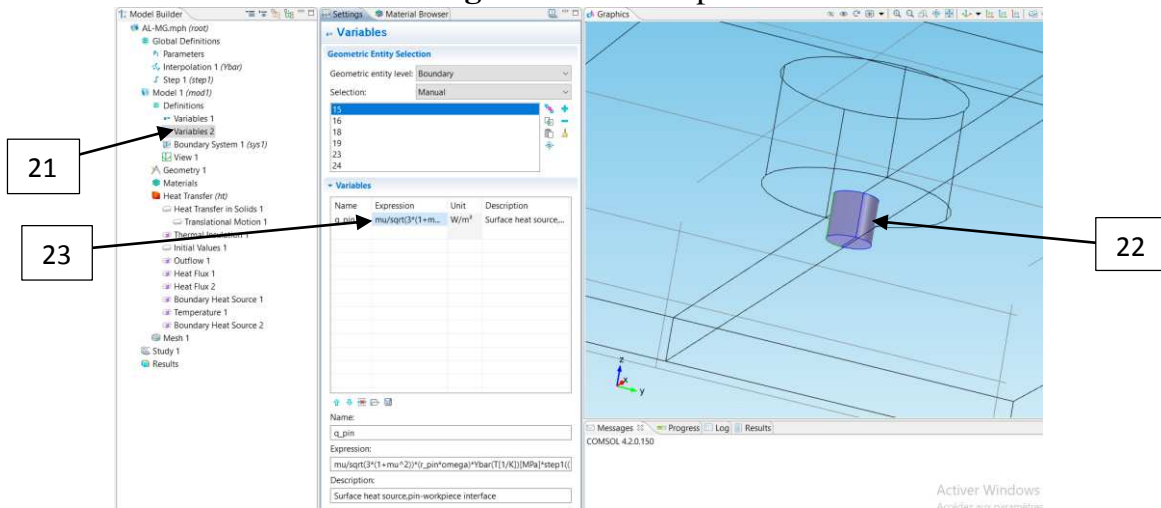


Figure III-11 : étape 12

II.4. Définir les conditions initiales et aux limites :

- Pour introduire la température initiale des pièces il faut développer la partie **Heat Transfer in Solids >Initial Values 1**.

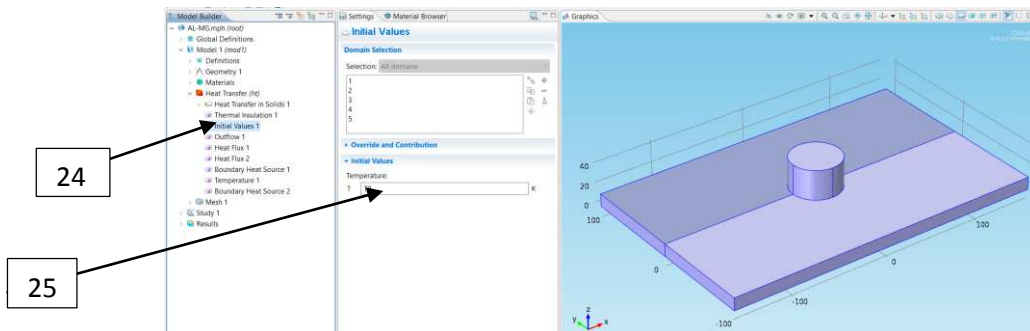


Figure III-12 : étape 13

- Pour définir la vitesse de translation : cliquer avec la droite sur **Heat Transfer in Solid 1 > Translational Motion** (pour notre cas c'est les tôles qui sont en mouvement par rapport à l'outil car nous sommes dans un repère eulérien).

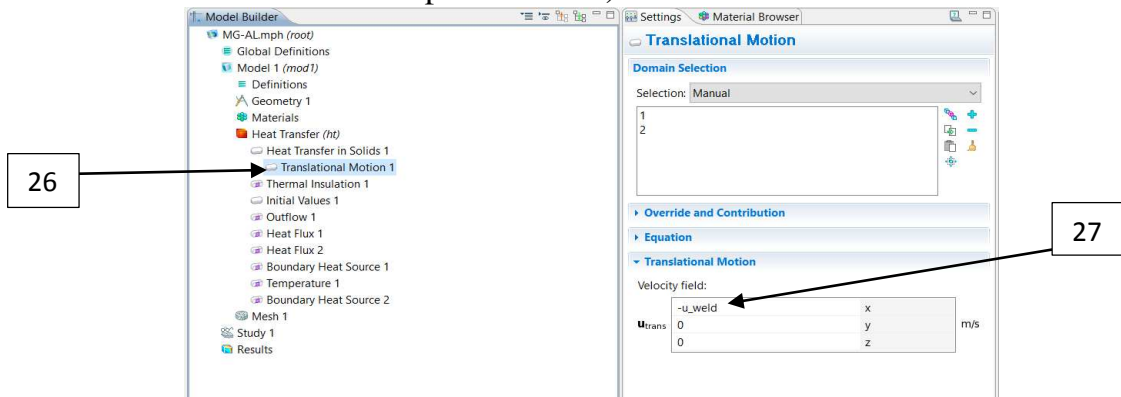


Figure III-13 : étape 14

- Pour les surfaces du dessus et de cotés ainsi que les faces de l'épaulement en contact avec l'air on a une convection dont le coefficient est **h_upside** (de l'air ambiant), on l'introduit en cliquant avec la droite sur **Heat Transfer in Solid 1 > Heat flux** ensuite sélectionner les faces correspondantes sans oublier de définir **T0** dans comme température externe.

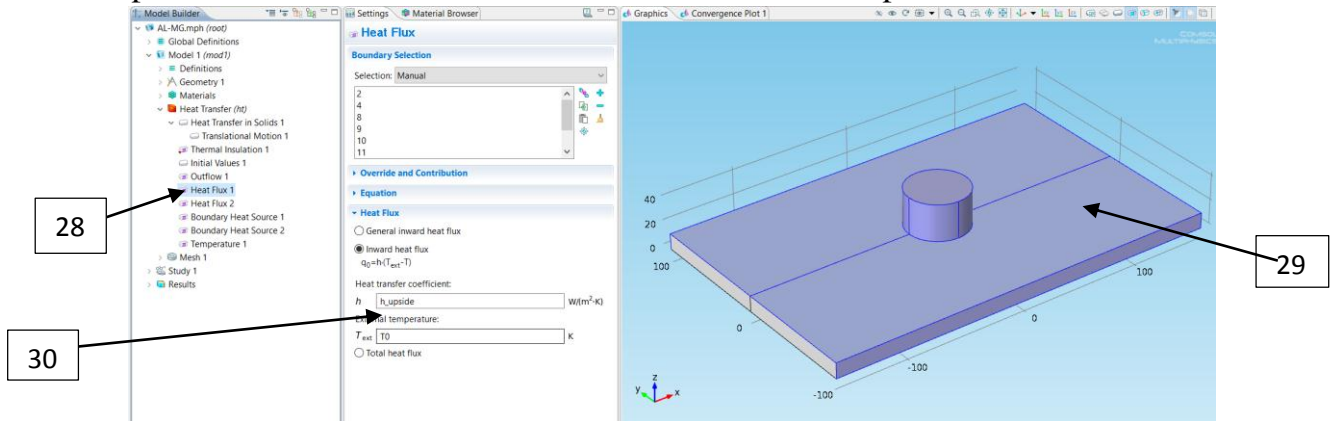


Figure III-14 : étape 15

- de même pour les faces du dessous il suffit de changer le coefficient à **h_downside** (de la table de la machine).
- Pour définir la condition limite à l'interface épaulement/pièce à souder : cliquer avec la droite sur **Heat Transfer in Solid > Boundry Heat Source** après sélectionner les faces correspondantes et on introduit la variable décrivant la source de chaleur épaulement/pièce à souder.

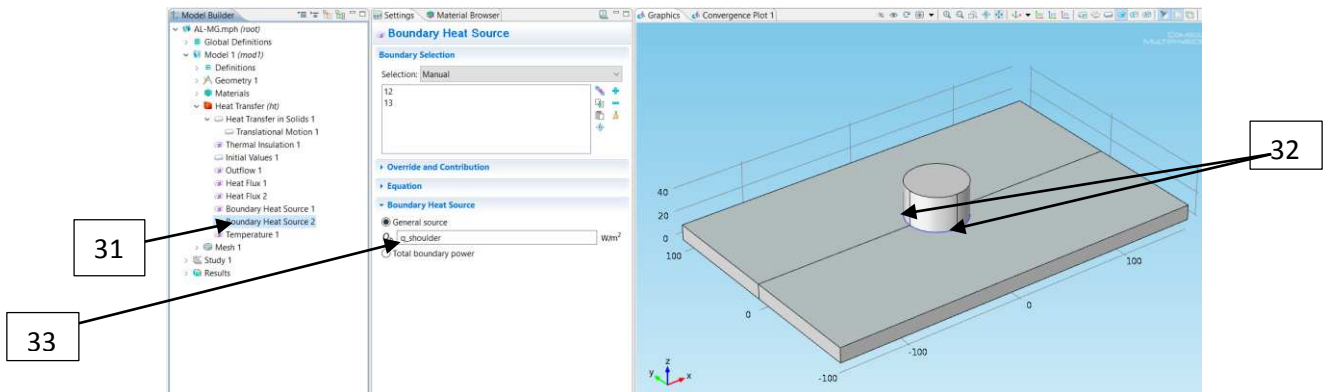


Figure III-15 : étape 16

- De même pour définir la condition limite à l'interface pion/pièce à souder.
- Pour la face transversale aval des plaques on lui impose une condition de limite en cliquant avec la droite sur **Heat Transfer in Solid>Outflow**.

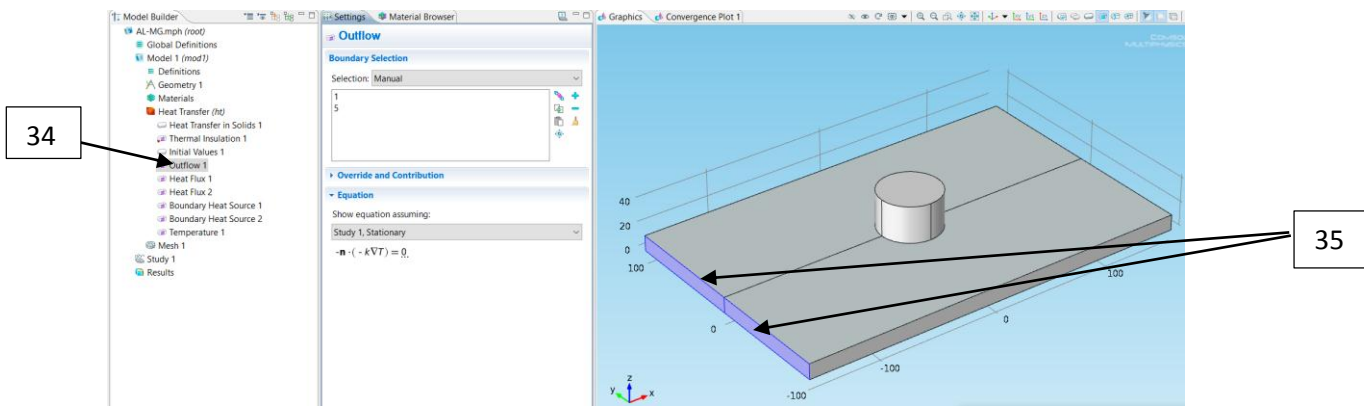


Figure III-16 : étape 17

- Pour la face transversale amont des plaques on lui impose une température initiale T0 en cliquant avec la droite sur **Heat Transfer in Solid>Temperature 1**.

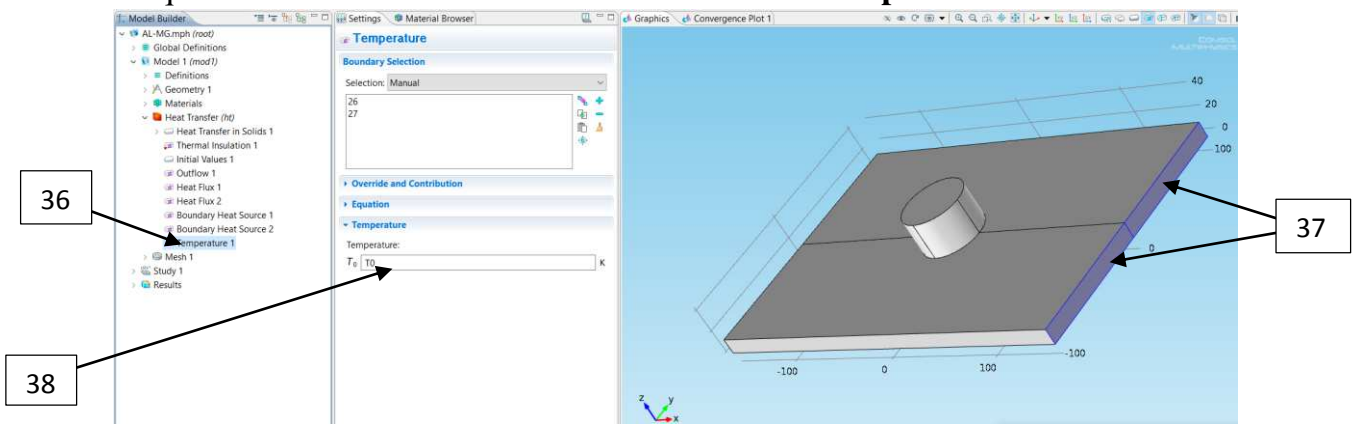


Figure III-17 : étape 18

II.5. Définir les matériaux

Pour définir le matériau de chaque pièce il faut : aller dans **Material Browser**, sélectionner le matériau voulu puis l'attribuer au domaine géométrique correspondant.

- l'outil est l'acier H13 (UNS T20813) [solid].

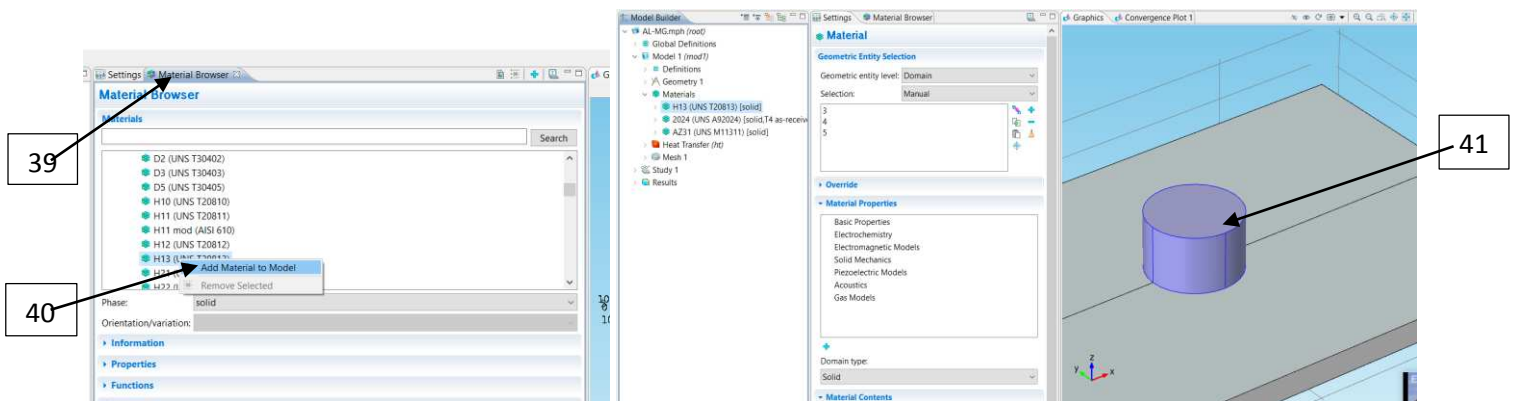


Figure III-18 : étape 19

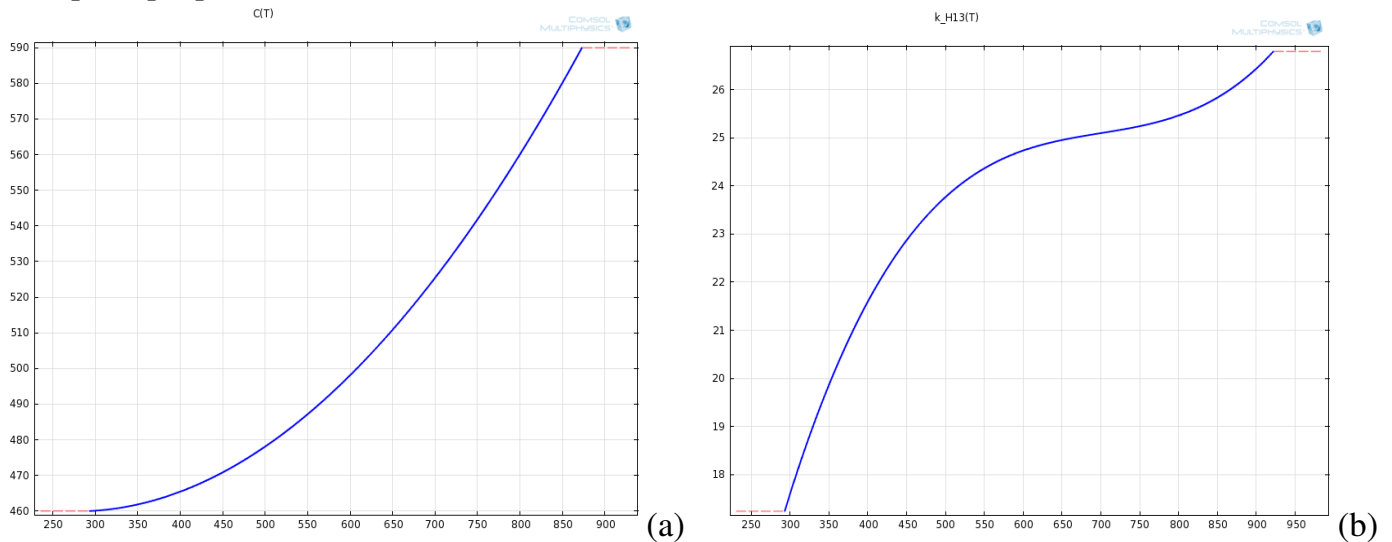
Principaux propriétés de l'acier H13 :

Figure III-19 : (a) la chaleur spécifique à pression constante C_p [J/(kg*K)] en fonction de la température [K]. (b) la conductivité thermique k [J/(kg*K)] en fonction de la température [K].

En ce qui concerne les matériaux des plaques nous avons essayés quatre configurations avec les alliages d'Aluminium 2024-T4 et de Magnésium AZ31B : deux homogènes Al-Al / Mg-Mg et deux hétérogènes Al-Mg / Mg-Al, pour les définir on répète les mêmes étapes que pour l'outil.

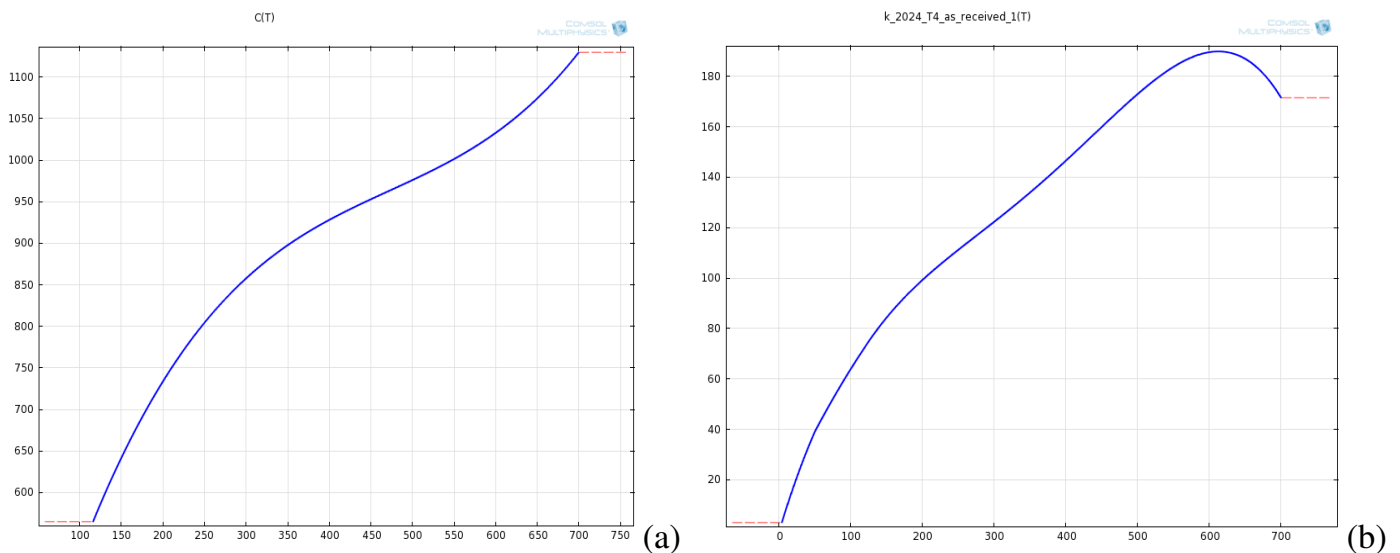
Principaux propriétés de l'alliage d'Aluminium 2024-T6 :

Figure III-20 : (a) la chaleur spécifique à pression constante C_p [J/(kg*K)] en fonction de la température [K]. (b) la conductivité thermique k [J/(kg*K)] en fonction de la température [K].

Principaux propriétés de l'alliage de Magnésium AZ31B :

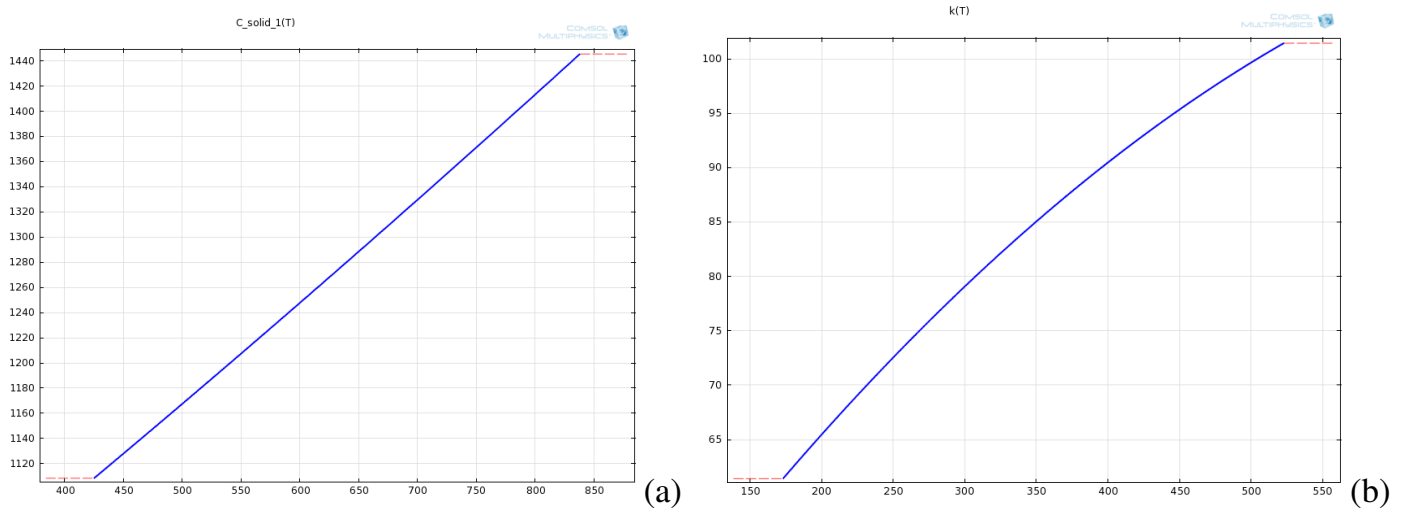


Figure III-21 : (a) la chaleur spécifique à pression constante C_p [J/(kg*K)] en fonction de la température [K]. (b) la conductivité thermique k [J/(kg*K)] en fonction de la température [K].

II.6. Définir le maillage

Pour réaliser le maillage on choisit l'option **Free Tetrahedral** dans le menu de **mesh 1**, et on choisit un dimensionnement **Extremly Fine** dans le menu **size** pour avoir un maillage plus raffiner autour de l'outil afin de mieux capter le gradient thermique dans cette zone.

Le nombre de degrés de liberté (degree of freedom to solve) obtenus est : 109749.

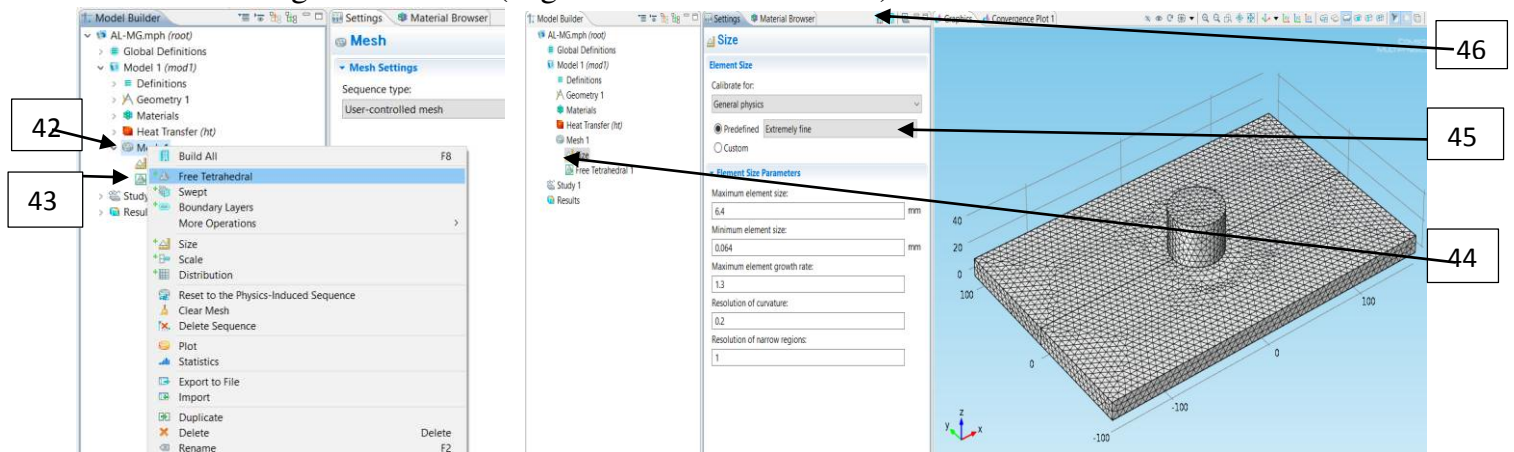


Figure III-22 : étape 20

II.7. Solution :

Comme notre problème est assez léger, la configuration du solver définit par défaut le logiciel suffit pour le résoudre.

- Pour configurer le solver il faut : étendre le menu **Study 1 > Solver Configurations > Solver 1 > Stationary Solver 1** et cliquer avec la droite sur **Direct > Enable**. Pour lancer le calcul : cliquer avec la droite sur **Study 1** et on choisit **Compute**.

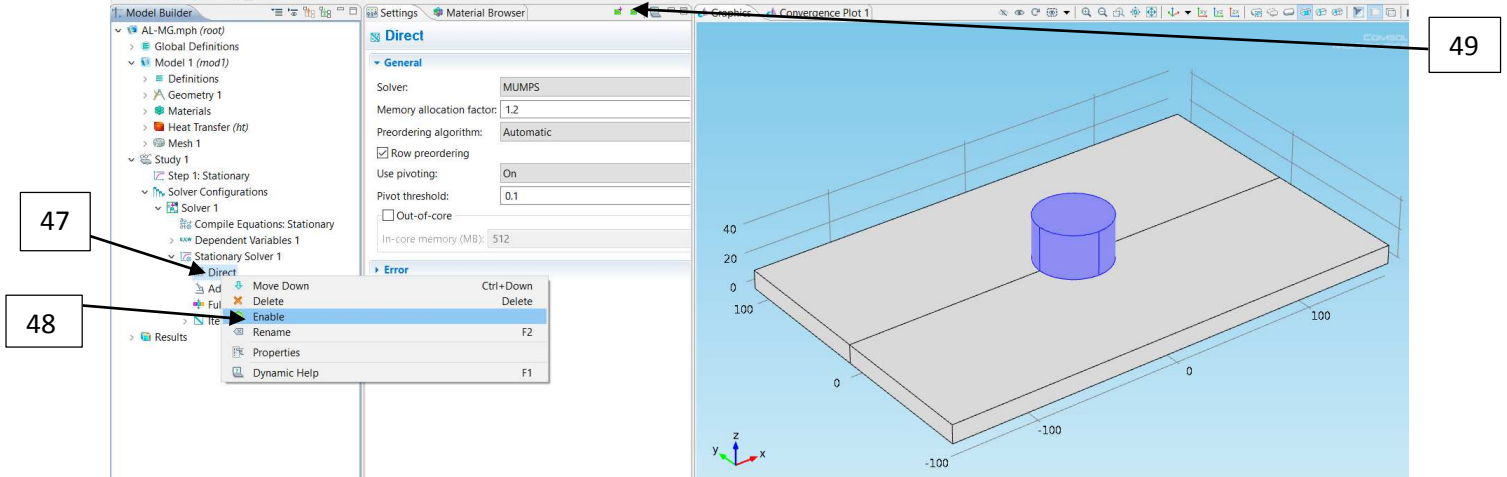


Figure III-23 : étape 21

II.8. Convergence :

La résolution du problème a pris environs 77s et a donner une courbe de convergence décroissante. La convergence est atteinte après 8 itérations avec une erreur de 10^{-5} .

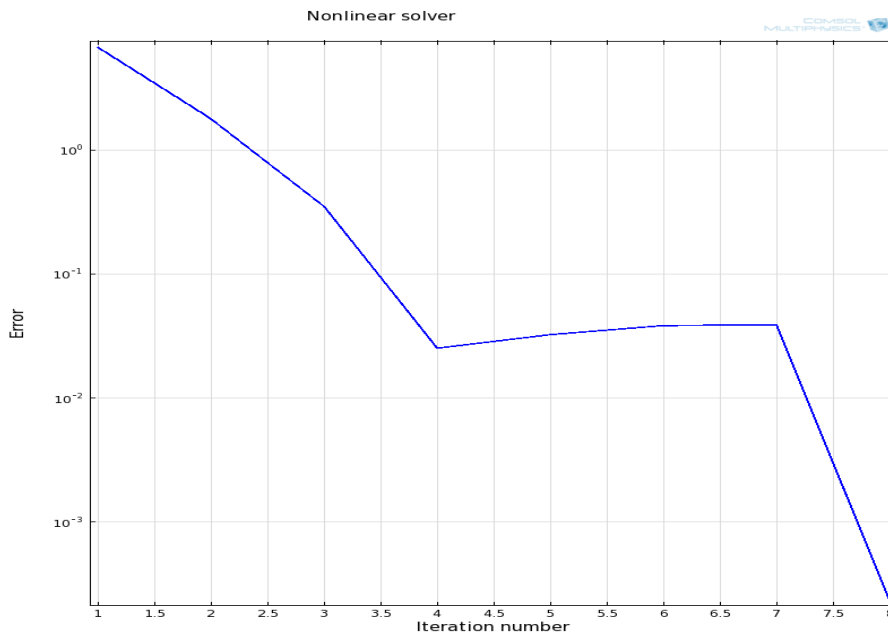


Figure III-24 : courbe d'évolution de la convergence en fonction des itérations.

Chapitre IV : Interprétation des résultats

Introduction :

Dans ce chapitre, on présente les différents résultats thermiques obtenus pour les quatre cas de configurations réalisés avec la simulation numérique :

- cas de soudage homogène : Al-Al et Mg-Mg.
- cas de soudure hétérogène : AL-Mg et Mg-Al.

I. Soudage homogène :

I.1.Champs thermique :

➤ Aluminium-Aluminium :

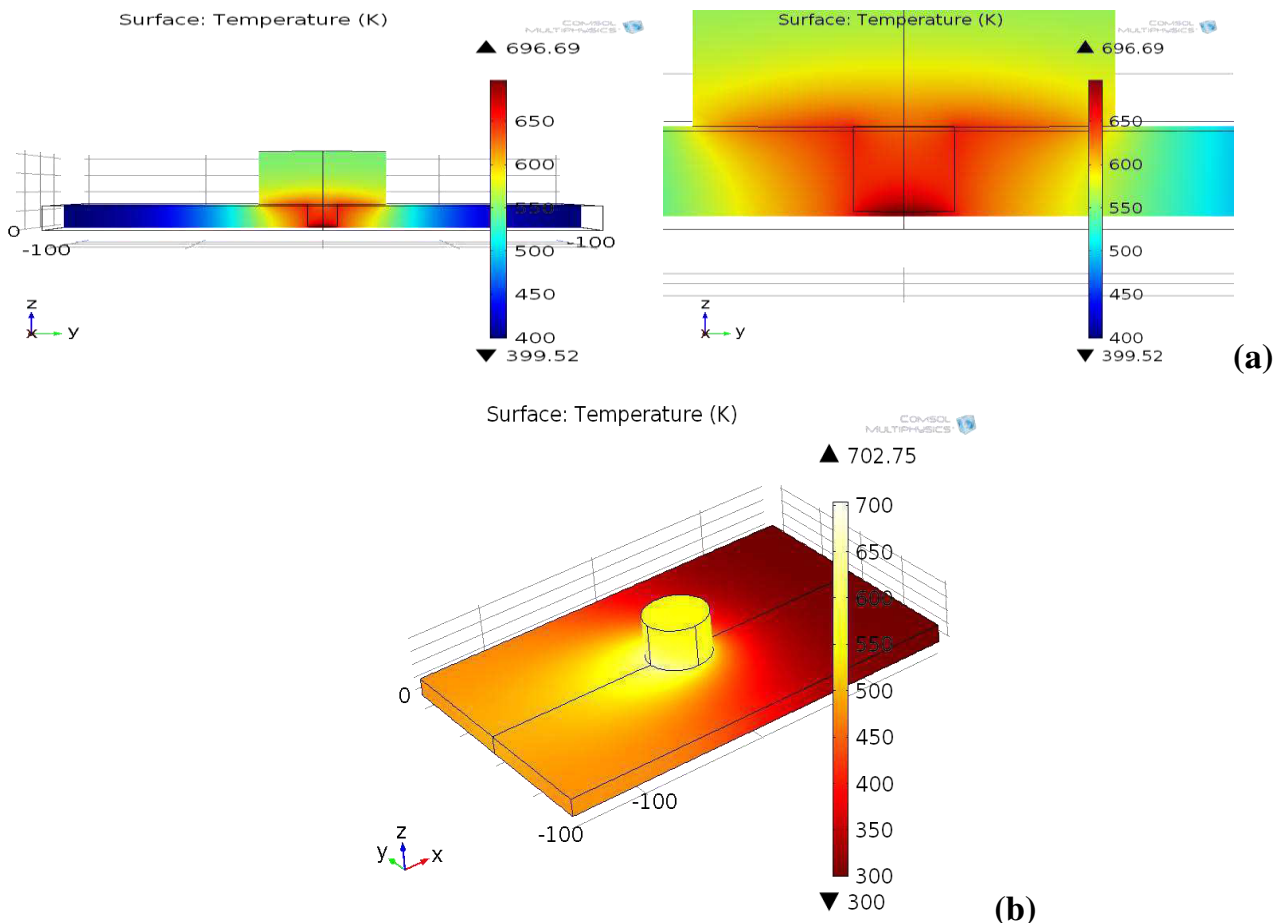


Figure IV-1 : (a) distribution de la température dans le plan xz, (b) distribution de la température lors du soudage pour Al-Al.

➤ Magnésium-Magnésium :

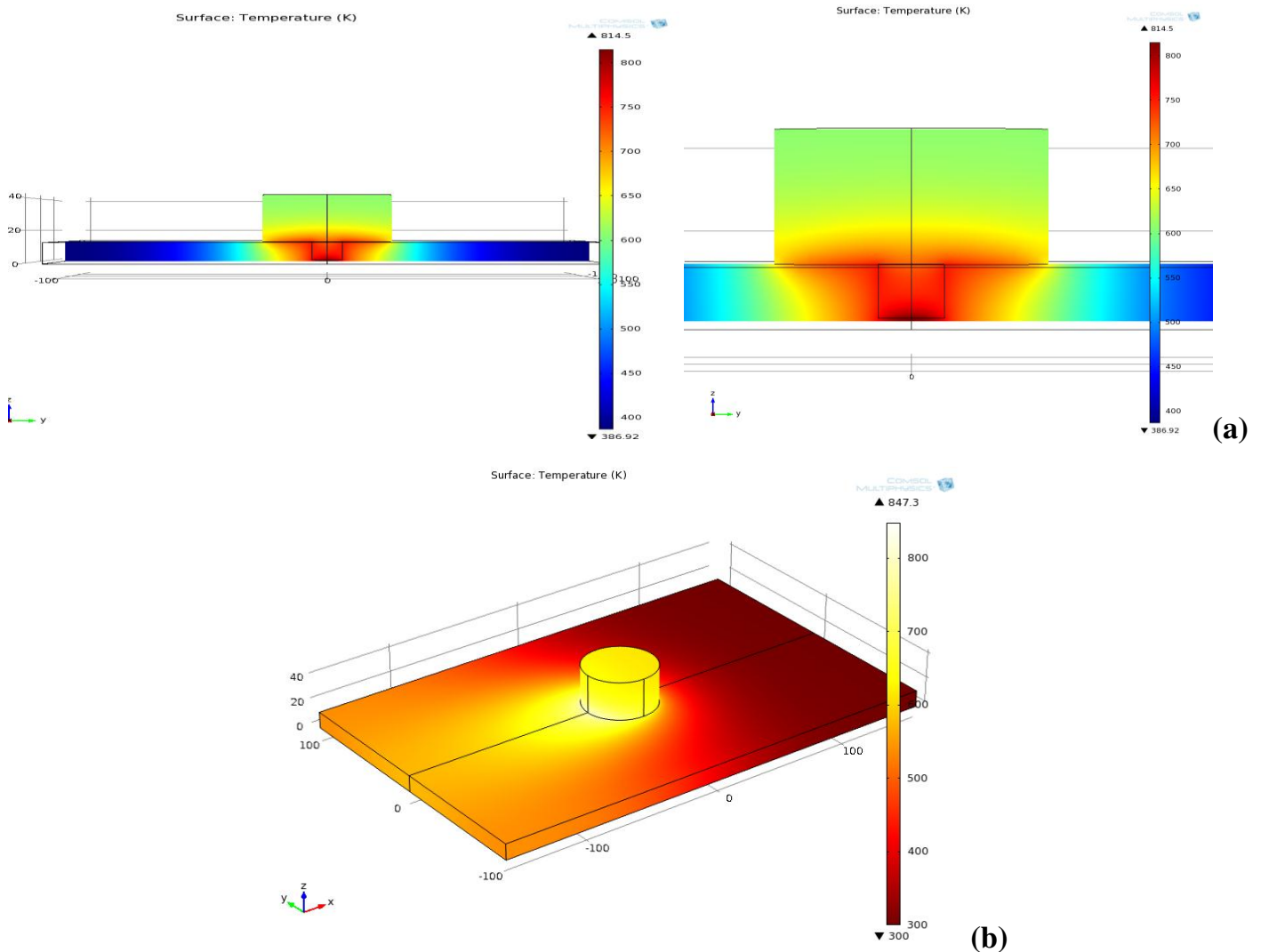


Figure IV-2 : (a) distribution de la température dans le plan (x,z), (b) distribution de la température lors du soudage Mg-Mg.

D'après les figures (V.1.b) et (V.1.b) les températures sont réparties graduellement de l'épaulement vers les frontières des pièces, on remarque que la distribution des températures est symétrique par rapport au plan du milieu (x,z). Les températures maximales calculées sont inférieures aux températures de fusion des matériaux dans les deux cas, pour le magnésium $T_{max} = 843.7K$ (environ 91% de T_f) pour l'aluminium $T_{max} = 702K$ (environ 75% de T_f). Ces températures maximales sont situées dans la zone malaxée et décaler vers l'arrière du centre de l'outil due au mouvement de translation et de rotation l'outil.

Les figures (V.1.a) et (V.2.a) montrent la répartition des températures en profondeur dans le plan (y,z) sous l'épaulement et autour du pion. Les températures maximales décroissent de l'épaulement vers la surface inférieure des plaques créant ainsi une zone maximale sous forme d'un quasi-cône inversé avec une légère dissymétrie. Cela est le résultat du mouvement de translation de l'outil et de la rotation de la matière autour du pion, ce qui génère les deux cotés d'avance AS (Advancing Side) et de retrait (Retreating Side).

I.2 Contours isothermes :

➤ Aluminium-Aluminium :

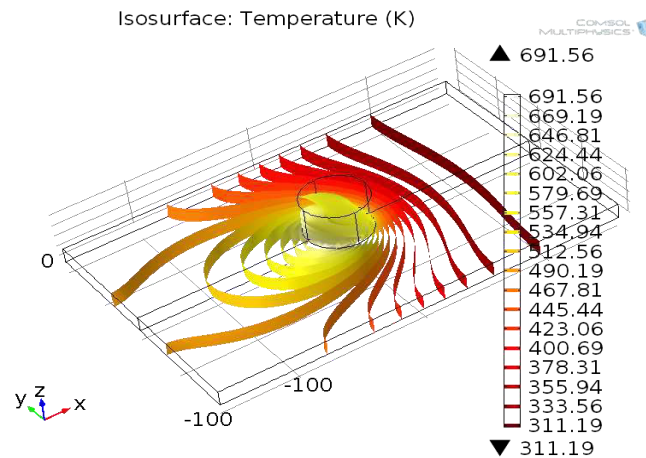


Figure IV-3 : distribution des contours isothermes pour Al-Al.

➤ Magnésium-Magnésium :

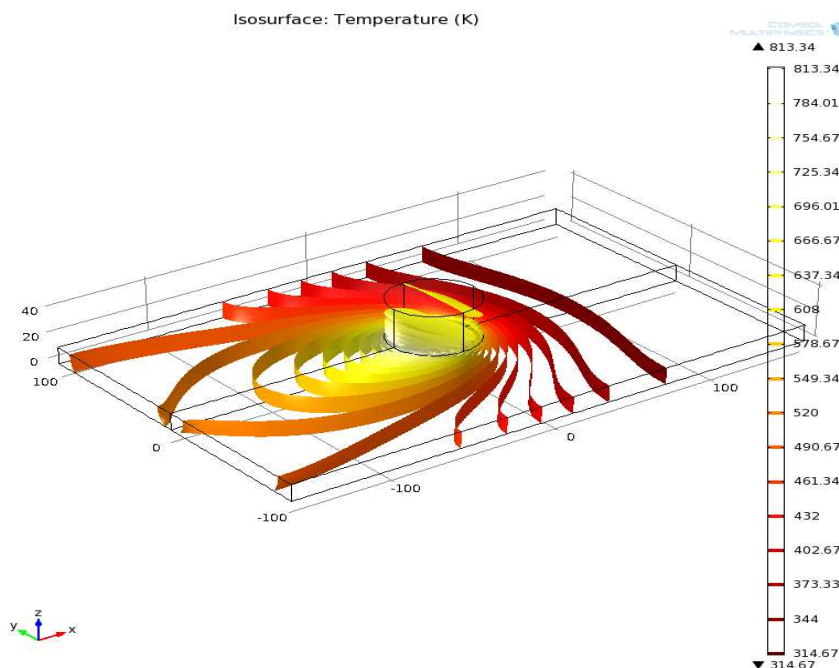


Figure IV-4 : distribution des contours isothermes pour Mg-Mg.

Les figures (V-3) et (V-4) représentent la distribution des iso-contours. On remarque que le réseau d'isothermes devient de plus en plus dense en amont en se rapprochant de la source de chaleur (l'outil) mais avec des valeurs de températures faibles comparés aux isothermes en aval qui s'élargissent entre eux et ont des valeurs de températures plus grandes. On note que la répartition est symétrique par rapport au cordon de soudure car les pièces à souder sont de même matériaux.

II. Soudage hétérogène :

II.1. Champs thermiques :

➤ Aluminium-Magnésium :

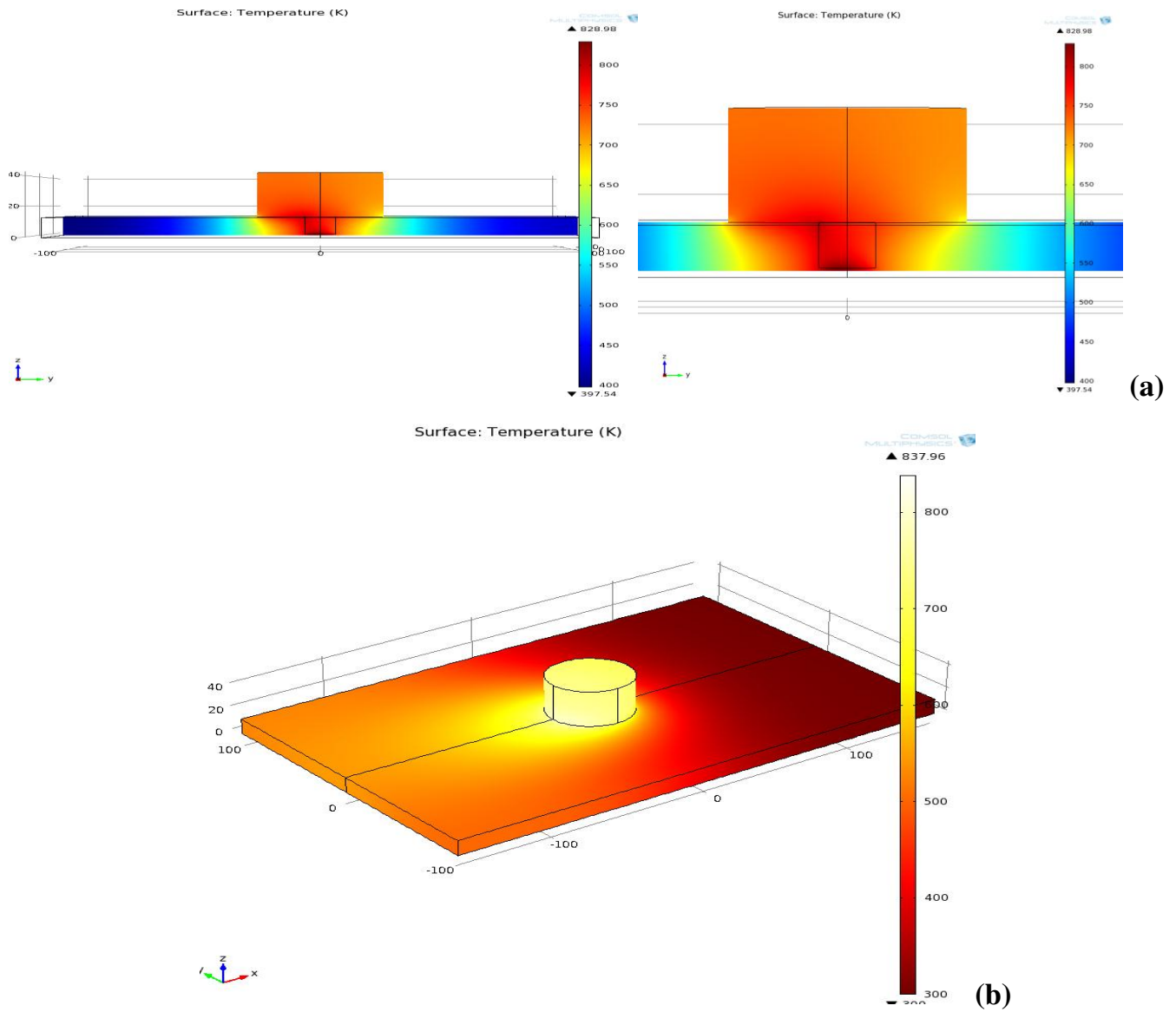
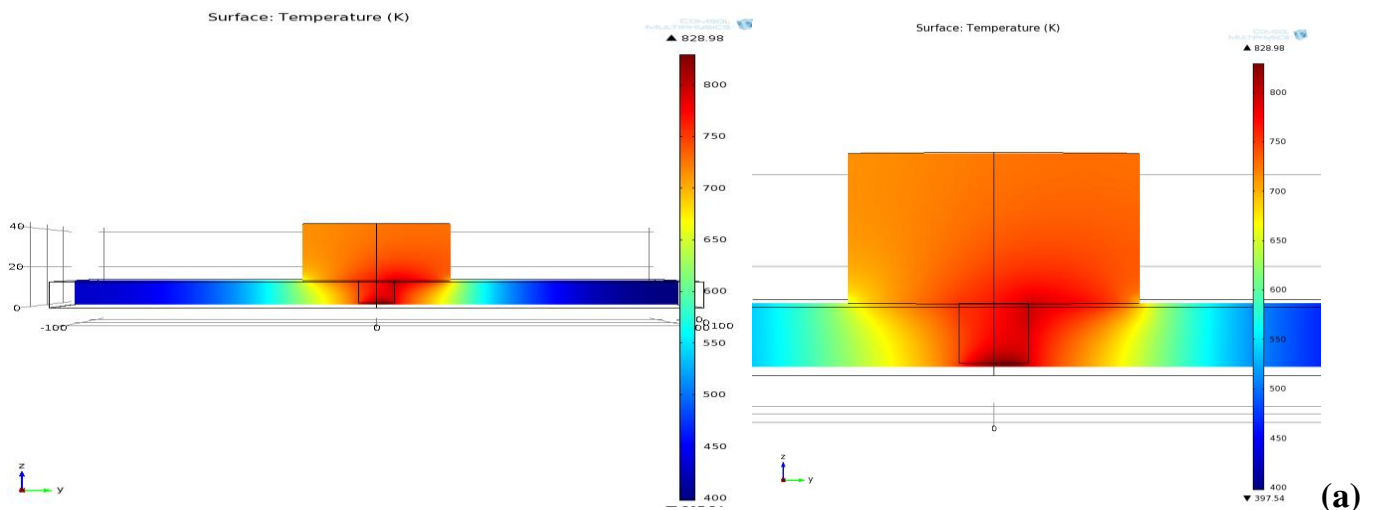


Figure IV-5 : (a) distribution de la température dans le plan xz, (b) distribution de la température lors du soudage pour Al-Mg.

➤ Magnésium –Aluminium :



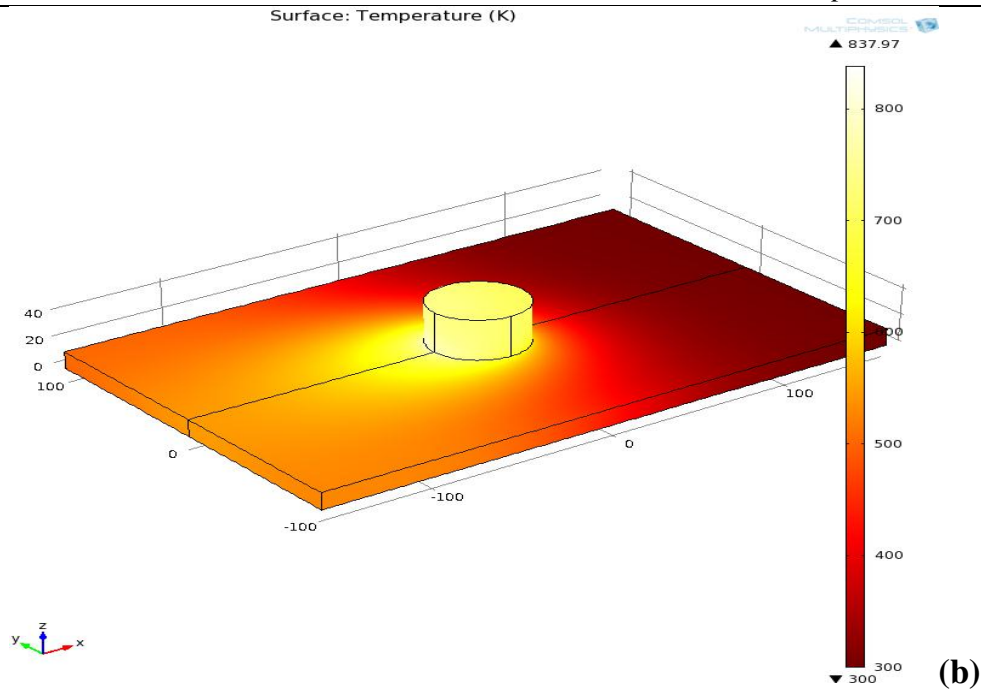


Figure IV-6 : (a) distribution de la température dans le plan xz, (b) distribution de la température lors du soudage pour Mg-Al.

D'après les figures (V-5.b) et (V-6.b) on distingue une légère dissymétrie dans la distribution des températures entre les deux tôles, cette dernière est graduelle de l'épaulement vers la frontière. On remarque que le champ des températures est plus large dans la tôle d'aluminium cela est dû à la différence des conductivités thermiques des deux matériaux sachant que celle de l'Al est de l'ordre de $134[\text{W/m}^*\text{K}]$ et donc supérieur à celle du magnésium qui est égale à $96[\text{W/m}^*\text{K}]$.

Comme pour les cas précédents la température maximale ($T_{\text{max}}=837.97 \text{ K}$) est inférieure aux températures de fusion des métaux soudés et est situées dans la zone malaxée et légèrement décalé à l'arrière du centre de l'outil du au mouvement de l'outil.

II.2.Contours isothermes :

➤ Aluminium-Magnésium :

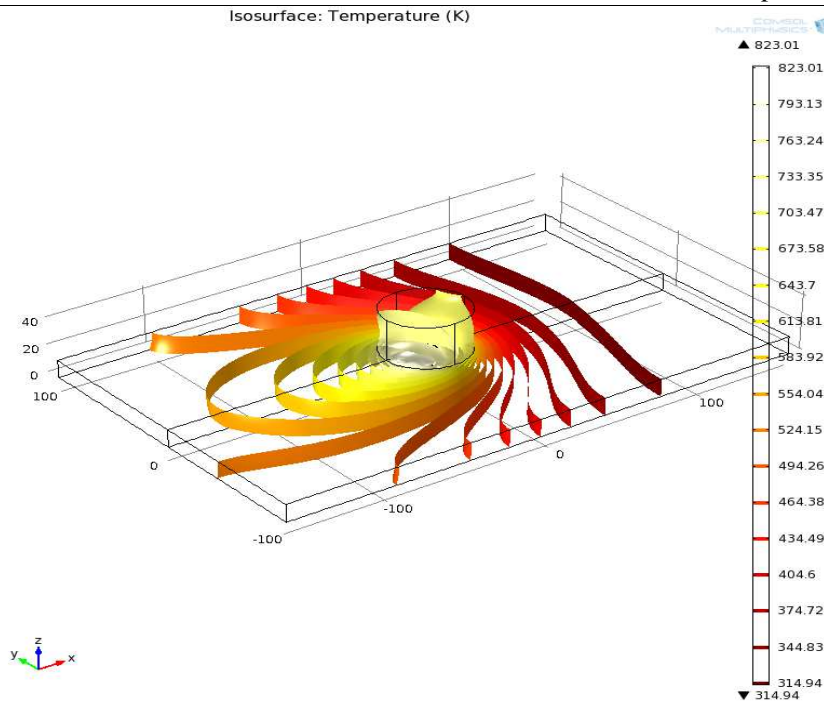


Figure IV-7 : distribution des contours isothermes pour Al-Mg.

➤ **Magnésium –Aluminium :**

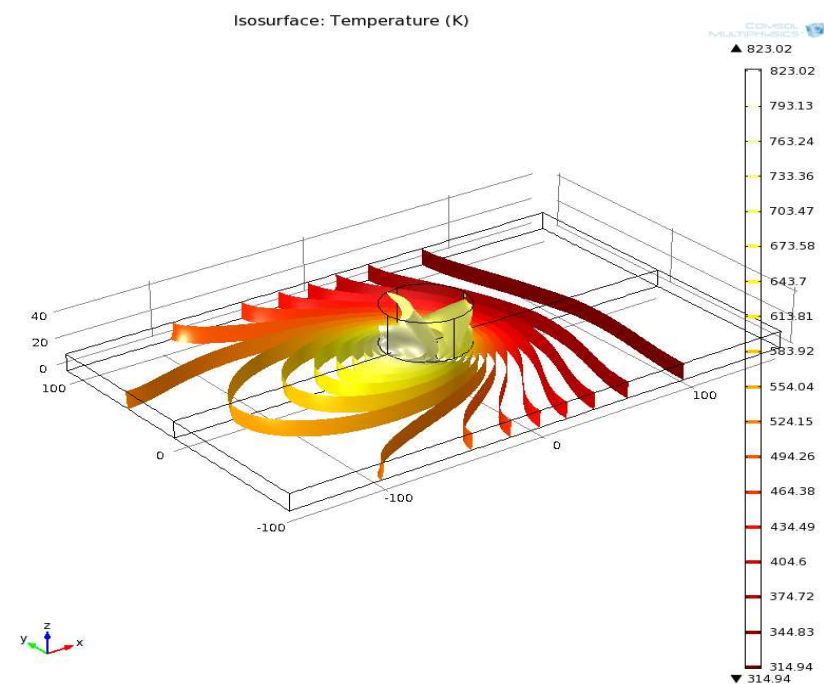


Figure IV-8 : distribution des contours isothermes pour Mg-Al.

Comme pour le cas homogène les contours isothermes sont plus denses et faibles en valeurs en amont comparé qu'en aval ou ils s'élargissent et augmentent en valeurs. Par contre, dans le cas hétérogène les écarts entre les isothermes sont plus importants dans la plaque d'Aluminium et on remarque aussi la répartition thermique aval atteinte est légèrement décalée vers cette plaque cela est due aux différentes propriétés thermiques des deux matériaux principalement la conductivité thermique.

Conclusion Générale

Le soudage hétérogène des alliages d'Aluminium aux alliages de Magnésium à l'aide des procédés de soudage TIG, MIG, FE (faisceau d'électron) ou même Laser a été le sujet de plusieurs études, par contre peu se sont intéressées à l'utilisation du soudage par friction malaxage FSW pour réaliser cette soudure. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à cette idée en étudiant le transfert de chaleur lors du soudage FSW de l'Aluminium 2024-T4 au Magnésium AZ31B, qui représente le premier pas pour l'étude de qualité des soudures.

Une recherche bibliographique a été menée pour présenter ce procédé et ses différents aspects, suivie d'une modélisation mathématique du phénomène de soudage pour établir un modèle thermique du transfert de chaleur lors du soudage. Le choix s'est posé sur le modèle de *Colegrove*, communément utilisé par les chercheurs qui considère que durant le FSW la chaleur est générée par deux grandes sources : la chaleur à l'interface épaulement/pièce à souder et la chaleur à l'interface pion/pièce à souder dus au mouvement de frottement, de translation et de rotation de l'outil. Notre modèle est complété par les conditions aux limites et initiales appropriées.

Comme l'objectif de notre étude est de prédire les champs thermiques à l'état quasi-stationnaire et quelques cycles thermiques, une simulation numérique a été menée pour résoudre le problème thermique. Cette simulation a été effectuée sur logiciel COMSOL Multiphysics®, et a été faite pour quatre cas de configurations : deux homogènes (AL/AL et Mg/Mg) et deux hétérogènes (Al/Mg et Mg/Al). Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- La répartition des températures est graduelle de l'épaulement vers les frontières des pièces, et symétrique dans le plan du milieu (x,z) au centre de l'outil. Excepté dans le cas hétérogène où une claire dissymétrie est observée. Cela est dû aux différentes propriétés thermiques des matériaux particulièrement la conductivité thermique supérieure de l'aluminium.
- Les températures maximales atteintes dans chaque cas n'ont pas dépassé les températures de fusion de ces matériaux. Ce qui correspond à l'un des avantages de ce procédé. Ces températures sont situées dans la zone malaxée sous l'épaulement et légèrement décalées à l'arrière du centre de l'outil due au mouvement de translation et de rotation de l'outil.
- Dans les deux cas homogènes du soudage, les contours isothermes sont plus denses et faibles en valeur en amont comparés qu'en aval ou ils s'élargissent et augmentent en valeur. Par contre, dans le cas hétérogène les écarts entre les isothermes sont plus importants dans la plaque d'Aluminium et on remarque aussi la répartition

thermique avale atteinte est légèrement décalée vers cette plaque cela est due aux différentes conductivités thermiques des deux matériaux.

Enfin, on conclue que le soudage par friction malaxage convient très bien au soudage dissimilaire des alliages d'Aluminium aux alliages de Magnésium et présente plusieurs avantages comparé aux procédés conventionnels.

Perspectives

Comme perspective du travail de ce mémoire, on propose de :

- Étudier l'influence des différents paramètres du soudage FSW sur l'évolution thermique des joints de soudure en alliages d'Aluminium et de Magnésium.
- Étudier la microstructure des joints du soudage FSW des alliages d'Aluminium et de Magnésium.
- Étudier thermiquement et mécaniquement le soudage FSW pour d'autres alliages et matériaux connus difficilement soudable par les procédés de fusion.

Références

- [1] Mostefa BENEDEB. “ Étude les défauts de soudage des pipelines” mémoire de MASTER, Université Mohamed Khider Biskra. pp2.
- [2] Mémoire de la fin d’étude intitulée : Analyse des défauts et étude de la fissuration par fatigue dans les soudures d’angles ; réalisé par BELABED Abdelmadjid.p3.
- [3] , [4] Régis BLONDEAU. “Métallurgie et mécanique du soudage”. Edit ion LAVOISIER, PARIS .pp23.
- [5] Principaux procédés du soudage, description, démarche d’évaluation et prévention des risques .<https://www.slideshare.net/>.
- [6] <https://www.rocdacier.com/soudage-resistance-bossage/>
- [7] Pdf; chapitre 2: procédés de soudage.p10.
- [8] Mémoire de la fin d’étude intitulée : Analyse des défauts et étude de la fissuration par fatigue dans les soudures d’angles ; réalisé par BELABED Abdelmadjid.p29.
- [9] [Mishra 2005, Rowe 2006]: [Mishra 2005] Mishra R. S., & Ma, Z. Y. "Friction stir welding and processing", Material Science and Engineering, R50, pp.1-78. 2005 [Rowe 2006] Rowe, D., & Thomas, W. M.). “Advances in tooling materials for friction stir welding”. Paper presented at the Materials Congress: Disruptive Technologies for Light Metals, London UK. April 2006.
- [10] https://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage_par_friction_malaxage
- [11] Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). "Friction stir welding and processing" Material Science and Engineering, R50, pp.1-78.
- [12] Thomas WM, Nicholas ED, Needham JC, Church MG, TemplesmithP, Dawes C. Intl. Patent Application no PCT/GB92/02203 and GB.Patent Application no. 9125978.9,1991.
- [13] [Rowe 2006] Rowe, D., & Thomas, W. M.). “Advances in tooling materials for friction stir welding”. Paper presented at the Materials Congress: Disruptive Technologies for Light Metals, London UK. April 2006.
- [14] Frigaard, Grong et O.T, Midling, Metallurgical and Mater, Transactios A, Vol.32A, pp.1189, 2001.

- [15] Lorelei Commin, Myriam Dumont, Jean-Eric Masse, Laurent Barrallier. Friction stir welding of AZ31 magnesium alloy rolled sheets: Influence of processing parameters. *Acta Materialia*, Elsevier, 2009, 57 (2), pp.326-334.
- [16] WANG Kuai-shi, SHEN Yang, YANG X-rong, WANG Xun-hong , XU Ke-wei. Evaluation of Microstructure and Mechanical Property of FSW Welded MB3 Magnesium Alloy. *Journal of iron and steel research, International*. 2006, 13(4) : 75-78.
- [17] Mishra, R.S. and Z.Y. Ma, Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2005. 50(1-2): p. 1-78.
- [18] C. Genevois, 2004, Genèse des microstructures lors du soudage par friction malaxage d'alliages d'aluminium de la série 2000 & 5000 et comportement mécanique résultant, thèse de doctorat soutenu à l'INPG, France.
- [19] Le soudage par friction malaxage : principes et applications, Lyne St-Georges, éd. : Les Presses de l'aluminium, Chicoutimi, Québec (2015).
- [20] Cazes, R., Soudage par friction-malaxage. *Techniques de l'Ingénieur*, 2003.
- [21] FSW au CFMS-UQAC https://www.youtube.com/watch?v=_XeZ_v12YPE&t=32s.
- [22] <https://www.infosuroit.com/soudures-j-m-tremblay-lance-une-nouvelle-technologie/>
- [23] N.Jamel. Qualification du domaine de soudabilité en soudage par friction malaxage. Thèse de doctorat soutenue à L'école Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, France. 2011.
- [24] [Mishra 2005, Thomas Aug 2005] Thomas, W. M., Norris, I. M., Staines, D. G., & Watts, E. R. "Friction Stir Welding - Process Developments and Variant Techniques". Paper presented at the SME Summit 2005, Oconomowoc Milwaukee USA. J. Aug 2005.
- [25] S.Gachi. Caractérisations acoustique et métallurgique des soudures, dans des alliages d'aluminium soudé par friction malaxage (FSW : friction stir welding) Thèse de doctorat soutenue à l'Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene .2012.

- [26] Caroline Juers. Corrosion et traitements de surface d'alliages de magnésium utilisés pour des applications aéronautiques. Thèse de doctorat soutenue à l'Université Henri Poincaré, Nancy, France.
- [27] King JF89 Materials science and technology 23 (2007) 1
- [28] <http://docslide.fr/documents/le-magnesium-et-alliages.html>
- [29] <http://joho.monsite.orange.fr/MAGNESIUM ET ALLIAGES.doc>
- [30] MEMOIRE intitulée Etude et caractérisation de certains alliages de magnésium. p12.
- [31] H. E. Friedrich, Barry L. Mordike, «Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications», Springer, 2006.
- [32] MadeinChina.com/<http://www.madeinchina.com/showroom/yuanlongjason/productdetailBLEsqjdsMRB/China-Magnesium-Alloy-Die-Casting.html>
- [33] SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION, Dr. GHOMARI Fouad.pdf.p1
- [34] SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION, Dr. GHOMARI Fouad.pdf.p16.
- [35] https://fr.wikipedia.org/wiki/Alliage_d%27aluminium_pour_corroyages
- [36] G. MURRY, « soudage et soudabilité métallurgique des métaux », technique d'ingénieur, traité matériaux métalliques, ref : M 715,1994.
- [37] P. Biswas, N. R. Mandal, «Effect of Tool Geometries on Thermal History of FSW of AA1100», the American Welding Society and the Welding Research Council, 2011.
- [38] M. Aissani, « Contribution à l'étude des cordons de soudure obtenus par le procédé FSW : Synthèse bibliographique / Simulation thermique », Rapport Scientifique, Division de Métallurgie et Mécanique, 2014.
- [39] P. A. Colegrove and H. R. Shercliff, «Experimental and numerical analysis of Aluminium alloy 7075-T7351 friction stir welds», Communications Ltd. Published by Maney for the Institute of Materials, Minerals and Mining, 2003.

- [40] P. Colegrove, «Three-dimensional flow and thermal modeling of the friction stir welding process», in second International Symposium on Friction Stir Welding- Proceedings, Sweden, 2000.
- [41] M. Boukraa, M. Aissani, A. H. Zitouni, « Modélisation thermique du problème de soudage par friction malaxage FSW dans un système de coordonnées mobile », Welding and NDT Research Center (CSC), BP 64 CHERAGA – ALGERIA, 2013:
- [42] [Song 2003] M. Song, R. Kovacevic. "Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation", International Journal of Machine Tools & Manufacture 43, pp 605-615. 2003
- [43] [Colegrove 2000] Colegrove P. "three dimensional flow and thermal modeling of the friction stir welding process, Proceeding of the 2nd International Symposium on Friction Stir Welding, Sweden.Aug. 2000.