

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
جامعة سعد دحلب البلدية 1
Université SAAD DAHLEB BLIDA1
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Génie Mécanique



Mémoire de fin d'étude

*En vue de l'obtention d'un diplôme de **Master** en Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique*

Theme :

**« Soudage par friction malaxage de deux plaques
aluminium hétérogène série 2000 et 7000 »**

- Encadreur : MR. HAMEL RACHID
- Co- Encadreur : MR. SALHI MEROUANE

Présenté par :

- SIAR Amine
- LEHEMDI Fares Abdelhakim

Année universitaire : 2020 / 2021.

Remerciements

Nous tenons à remercier tout d'abord Dieu le tout puissant qui nous a donné l'aide, la patience et le courage pour accomplir ce modeste projet.

Nous voudrions également exprimer toute notre reconnaissance aux

Membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail

Nous exprimons nos profonds remerciements et notre reconnaissance à Mes Monsieur SALHI MEROUANE, MIMOUNI OUSSAMA et HAMEL RACHID pour avoir encadré et dirigé ce travail avec une grande rigueur scientifique. Sa disponibilité, ses conseils et la confiance qu'ils nous ont permis de réaliser ce travail.

Nous tenons aussi à remercier tous nos enseignants pour leurs participations à notre formation, qu'ils trouvent ici l'expression de nos sentiments les plus respectueux et notre profonde gratitude pour leurs gentillesse, disponibilités et soutiens durant les années de notre formation.

Enfin, nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail

Dédicace

A mon père Mohamed,

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et ma formation.

A ma très chère mère,

Votre prière et votre bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Vous avez fait plus qu'un père puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver et vous accorder santé, longue vie et bonheur.

A mes frères ET Sœurs,

Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité. Je vous exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.

Je remercie l'ensemble mes camarade et mes amis pour leur soutien. Merci pour votre affection et tous ces merveilleux souvenirs ! Je vous aime.

AMINE

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A ceux que j'aime beaucoup et qui m'ont soutenue tout au long de ce projet : Mes sœurs Míma et Yasmíne sans oublier mon grand-père. A toute la famille LEHEMDI, et mes amis. Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

FARES ABDELHAKIM

Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Sommaire	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralités sur le Soudage par friction malaxage	
I.1.1 Introduction.....	2
1.1.2 Procédé de soudage par friction malaxage.....	2
1.1.3 Principe du procédé de soudage FSW.....	3
1.1.4 Outils de soudage	5
1.1.5 Différents types de soudage FSW.....	6
1.1.6 Principaux paramètres caractéristiques du procédé FSW.....	7
1.1.7 Avantages et limitations du procédé FSW.....	7
1.1.8 Domaines d'application.....	9
1.2 Généralités sur l'aluminium.....	10
I.2.1 Historique.....	10
1.2.2 Présentation générale de l'aluminium	10
1.2.3 Les alliages d'aluminium	11
1.2.4 Désignation des alliages d'aluminium	11
1.2.5 Propriétés des alliages d'aluminium	13
1.2.6 Les catégories d'alliage d'aluminium	14
1.2.7 les familles d'alliage d'aluminium	14
1.2.8 Principaux traitements thermiques des alliages aluminium	16
1.2.9 Durcissement structural des alliages d'aluminium	17
1.3 Etude d'alliage d'aluminium série 2000 et 7000.....	19
1.4 L'analyse mécanique dynamique DMA	20
Chapitre 2 : simulation du soudage par friction malaxage	
2.1 Introduction	24
2.2 Formulation des méthodes utilisé	24
2.2.1 Formulation Lagrangienne	24
2.2.2 Formulation Eulérienne	25
2.2.3 Formulation ALE	26
2.2.4 Method VOF (Volume of Fluid)	27
2.3 Equation utilisé dans la simulation	27
2.5 Logiciel CFD	29
2.5.1 Principes des codes CFD	29
2.5.2 Présentation de gambit et de fluent.....	29

22.6	Les fonctions UDF's.....	32
2.6.2	But des UDF's.....	33
2.6.3	Programme C++ pour crée UDF de outille (pion) motion.....	34
2.7	Etapas de la simulation dans gambit.....	35
2.7.1	Création de la géométrie sous le Logiciel gambit.....	35
2.7.2	Choix des types de zone et de frontière dans gambit	36
2.7.3	Choix de la stratégie de maillage	37
2.8	Etapas de la simulation dans fluent	38

CHAPITRE 3 : Résultats numérique et discussion

3.1	Introduction	44
3.2	Résultats numérique des pressions.....	44
3.3	Résultats numérique des températures.....	45
3.4	Résultats numérique des phases	46
3.5	Résultats numérique des vitesses.....	48
	Conclusion générale	49
	Bibliographie.....	50

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Machines de soudage FSW de l'Institut de Soudure de Metz(a) Machine ESAB 2D, (b) Machine MTS 3D

Figure I.2: Principe de soudage par friction malaxage

Figure I.3 : Formation de la soudure

Figure I.4 : Coupe schématique d'une soudure

Figure I.5 : Quelques exemples de designs de pions

Figure I.6 : Étapes du procédé de soudage FSW par point.

Figure I.7 : Configurations de soudage effectuées par FSW (Cazes 2003).

Figure I.8 : Traitement thermique de durcissement structural des alliages d'aluminium : diagramme d'équilibre schématique, température de mise en solution et microstructure initiale (température ambiante) et microstructure de l'état mis en solution.

Figure I.9 : échantillon de l'aluminium 7075

Figure I.10 : après l'application DMA sur l'échantillon

Figure I.11 : Appareil de l'analyse Mécanique Dynamique DMA

Figure I.12 : Viscosité dynamique de l'alliage d'aluminium 7075 obtenue du test DMA (Dynamical Mechanical Analysis).

Figure I.13 : Viscosité dynamique de l'alliage d'aluminium 2017A obtenue du test DMA (Dynamical Mechanical Analysis).

Figure II.1 : Formulation lagrangienne à deux instants successifs

Figure II.2 : Formulation eulérienne à deux instants successifs

Figure II.3 : Plan du premier modèle fluent

Figure II.4 : Animation de l'action de l'outil FSW sur l'écoulement de matière au travers de la
Visualisation des lignes de courant avec la méthode eulérienne

Figure II.5 : Animation de l'action de l'outil FSW sur l'écoulement de matière au travers de la
Visualisation des lignes de courant avec la méthode lagrangienne

Figure II.6 : Plan d'esquisse de la simulation

Figure II.7 : Illustration de de la fonction substract

Figure II.8 : Illustration de la création des walls

Figure II.9 : Illustration de la création des interfaces

Figure II.10 : Illustration de la création des grilles

Figure II.11 : Illustration de la création du maillage

Figure II.12 : Méthode d'enregistrement des matériaux

Figure II.13 : Choix de l'interprétation du model la simulation

Figure II.14 : Création des régions

Figure II.15 : Choix des équations utilisé dans la simulation

Figure II.16 : Création du dynamique MeSH

Figure II.17 : Configuration des conditions des parois

Figure II.18 : Création des animations

Figure III.1 : Pression statique en (Pa) pour différentes géométries de pion

Figure III.2 : Distribution des températures pour différentes formes de pion

Figure III.3 : Phase de la zone de malaxage de l'outil en forme de cercle

Figure III.4 : Phase de la zone de malaxage de l'outil en forme de triangle

Figure III.5 : Phase de la zone de malaxage de l'outil en forme de carre

Figure III.6 : Champ de vitesse d'écoulement pour différentes géométries de pion

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Différents groupes de l'aluminium et ses alliages

Tableau I.2: Propriétés mécaniques d'aluminium pur

Tableau I.3 : Désignation des alliages d'aluminium (Aluminium Association).

Tableau I.4: Familles d'alliage d'aluminium Durcissement par écrouissage

Tableau I.5 : Conditions de traitements thermiques des alliages d'aluminium

Tableau I.6: Traitements thermiques des alliages d'aluminium

Tableau II.1 : Les différentes formes de maillage des faces.

Tableau II.2: Description des types de maillages des faces

Introduction Générale

La maîtrise des comportements des structures et des assemblages est une nécessité croissante pour les différents secteurs ; aéronautique ; automobile ; marin ; transport pétrolier ; agroalimentaire...etc. La connaissance approfondie des phénomènes intervenant dans le matériau utilisé, et les facteurs influençant son comportement permet de prévenir des anomalies, et choisir des conditions adoptées à son utilisation.

Le soudage est un domaine de construction mécanique très vaste où les spécialistes, techniciens, ingénieurs et chercheurs continuent de faire des progrès très importants en vue d'améliorer son efficacité.

Parmi les procédés de soudage utilisés : le soudage par friction malaxage. Pour ce procédé,

L'objectif de ce travail traite la problématique de la variation température, vitesse, pression et le mélange des phases

Ce mémoire est structuré comme suit :

- Le premier chapitre est une synthèse des Généralités sur le Soudage par friction malaxage et des données existantes sur les caractéristiques et les propriétés sur des alliages aluminium et les divers procédés le soudage FSW
- Le deuxième chapitre contient la simulation du soudage par friction malaxage avec la formulation ALE, la méthode VOF et leurs fonctionnements sur le LOGICIEL CFD (gambit et fluent) et la Définition du problème sous le logiciel FLUENT
- Le troisième chapitre contient les Résultats numériques et les discussions des résultats de la pression, des phases, de températures, et des vitesses et la différence entre l'utilisation des différents modèles de pion (carré, triangle, cercle)
- En fin, nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I : Généralités sur le Soudage par friction malaxage

1.1.1 Introduction

Le soudage par friction-malaxage 1 (FSW) est un procédé récent de soudage breveté en 1991 par « The Welding Institute (TWI) » (institut de soudure anglais). Ce procédé se distingue des autres procédés de soudage par sa capacité de souder la matière à l'état visqueux, sans passer par le point de fusion. L'industrie aéronautique s'est tout de suite intéressée à ce procédé car il rend possible le soudage des alliages d'aluminium de la famille des 2XXX et des 7XXX, alliages d'aluminium réputés insoudables par d'autres procédés. Sur les avions, ces alliages sont assemblés par rivetage. Le remplacement du rivetage par le soudage permet surtout une diminution du coût d'obtention de la structure, un gain de masse et l'élimination des phénomènes de corrosion et de fretting fatigue autour des rivets.

Le soudage par friction-malaxage étant un procédé récent, il demeure encore un sujet de recherches actif, pour mieux appréhender certains points comme l'écoulement de la matière, l'influence de la forme de l'outil, la simulation de la microstructure.

Ce dernier point est particulièrement important pour les alliages 2XXX et 7XXX. En effet, ce sont des alliages d'aluminium à durcissement structural, c'est-à-dire que leurs propriétés mécaniques dépendent étroitement de leur état de précipitation. Par ailleurs, le FSW se distingue des autres procédés de soudage par la présence d'une zone affectée thermiquement et mécaniquement. [15]

1.1.2 Procédé de soudage par friction malaxage (Friction Stir Welding FSW)

Le procédé de soudage par friction malaxage FSW « Friction Stir Welding » fut inventé pour répondre aux besoins technologiques du transport aérien, naval et ferroviaire. Il est classé parmi les procédés d'assemblage les plus récents et il est considéré comme une nouvelle technique du 21^{ème} siècle. Ce procédé induit des modifications microstructurales, des contraintes résiduelles au niveau du joint et des distorsions difficiles à maîtriser. Néanmoins, il est considéré comme un procédé prometteur des techniques de l'assemblage. Son évolution lui a permis d'être bien placé pour remplacer le soudage à l'arc pour les alliages d'aluminium 5000 et 6000 et le rivetage pour les alliages à durcissement structural tels que les séries 2000 et 7000. Les équipements du procédé FSW permettent de souder en deux ou trois dimensions et peuvent appliquer des efforts axiaux atteignant jusqu'à 90 KN.

La rigidité globale de ces machines assure une bonne précision du suivi de joint. De plus, les actionneurs et systèmes de guidage sont conçus pour supporter des efforts importants. Ceci permet de

souder une large gamme de matériaux et d'épaisseurs. Les figures I.1a et 1b représentent les deux machines de soudage par FSW de l'Institut de Soudure de Metz. La machine ESAB (figure I.1 (a)) permet de réaliser des soudures en 2D et la machine MTS (figure I.1(b)) de type portique à cinq axes permet d'effectuer des soudures en 3D. Les valeurs maximales des caractéristiques des deux machines sont : 89 KN pour l'effort de plongée, 2000 tr/min pour la vitesse de rotation, 2000 mm/min pour la vitesse d'avance et 2 m pour la longueur de soudure. [4]



(a)



(b)

Figure I.1: Machines de soudage FSW de l'Institut de Soudure de Metz

(a) Machine ESAB 2D, (b) Machine MTS 3D [1]

1.1.3 Principe du procédé de soudage FSW

Le principe du soudage par friction-malaxage que nous nommerons ici pour simplifier FSW est représenté sur la figure I.2.

Il met en œuvre un mandrin tournant qui reçoit l'outil de soudage proprement dit lequel se présente sous la forme d'un cylindre de révolution en acier à haute résistance comportant un épaulement

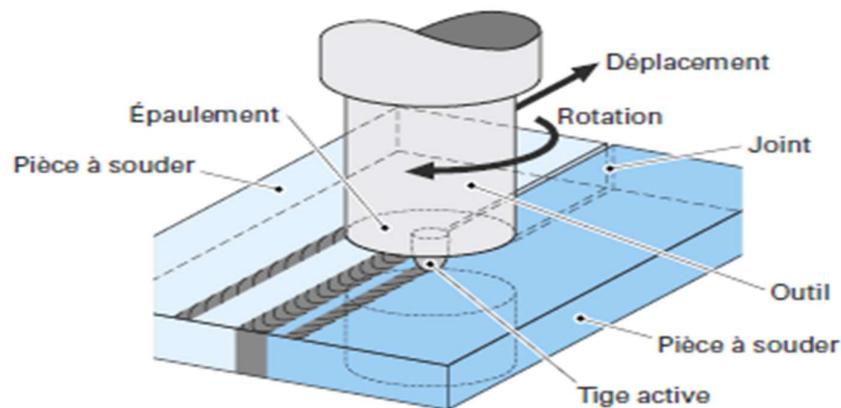


Figure I.2: Principe de soudage par friction malaxage [29]

(Shoulder) prolongé par une tige ou pointe (pin) coaxiale active, elle-même cylindrique ou tronconique, et comportant en surface diverses sortes de reliefs.

La tête de soudage ainsi constituée est fixée sur un support qui présente l'outil en rotation sur le joint des deux tôles à souder fixées elles-mêmes sur un montage d'appui et le met ensuite en contact avec elles. [1]

La chaleur engendrée par la friction porte la matière environnante à l'état pâteux (figure I.3) et permet à la tige d'y pénétrer jusqu'à l'épaulement. On commande ensuite le déplacement de l'outil le long du joint. Le métal pâteux, malaxé par la rotation de l'outil sous l'effet des reliefs qu'il comporte, flue de part et d'autre de celui-ci de façon quelque peu dissymétrique de l'avant vers l'arrière en formant la liaison des deux bords puis la soudure proprement dite après refroidissement.

L'épaulement, outre qu'il limite la pénétration, a aussi pour rôle d'empêcher le métal de fluer vers le haut.

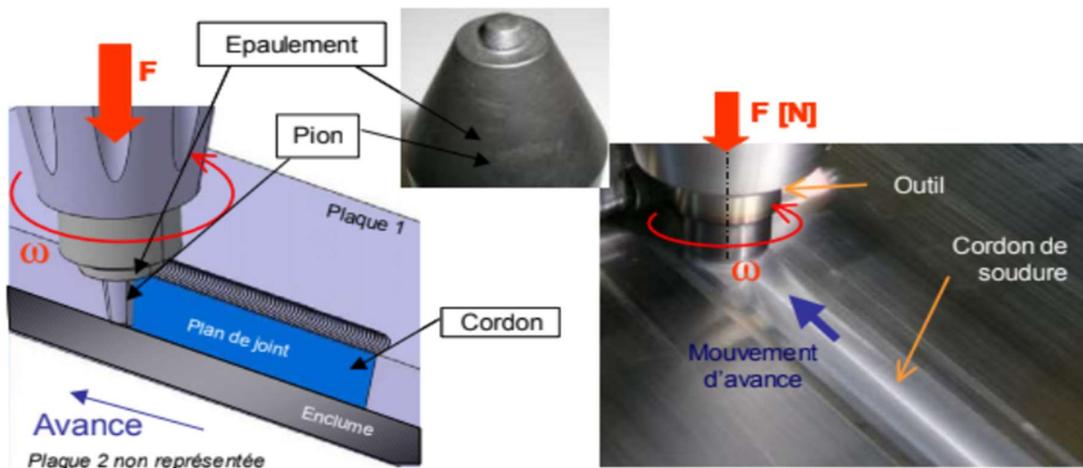


Figure I.3 : Formation de la soudure[1]

Les phénomènes de friction et de malaxage qui se développent sont physiquement stables, les températures atteintes traduisant l'existence d'un état permanent se conservant le long du joint.

Rappelons en effet que la valeur du couple nécessaire à l'entraînement de l'outil, qui en combinaison avec sa vitesse détermine la puissance délivrée, résulte directement du coefficient de viscosité de la matière et donc de sa température. [1]

Si, pour une raison quelconque, les températures devaient s'accroître, la matière affectée deviendrait moins visqueuse conduisant à une diminution du couple donc de la puissance développée.

Les températures diminueraient alors pour reprendre leurs valeurs initiales.

La soudure prend place en phase solide et l'absence de fusion en fait le principal intérêt.

La texture du cordon conserve les propriétés principales du matériau de base et la soudabilité métallurgique s'étend à de nombreux métaux difficilement soudables ou dissemblables.

Pour obtenir une liaison complète, la tige doit avoir une longueur quasiment égale, de préférence, à l'épaisseur des tôles à souder et le soudage s'exécute en une passe, voire deux passes opposées pour les épaisseurs élevées.

La retenue du métal pâteux par l'épaulement d'un côté et par l'appui arrière de l'autre élimine les surépaisseurs endroit/envers des cordons classiques et exécute une manière de forgeage.

Les défauts internes des procédés par fusion, tels le manque de compacité, les soufflures, les criques, n'apparaissent pas et l'affinement du grain qui en résulte améliore les propriétés mécaniques du cordon.

La figure 3 illustre schématiquement la coupe transversale d'une soudure typique sur laquelle on relève les différentes zones suivantes :

- **A** : métal de base non affecté par la soudure
- **B** : zone affectée thermiquement (ZAT). Dans cette zone, le métal a subi une élévation de température pouvant avoir affecté la microstructure et (ou) les propriétés mécaniques. Il n'y a pas, par contre, de déformation ;
- **C** : zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM). Le métal a subi une déformation plastique et est également affecté thermiquement [30]

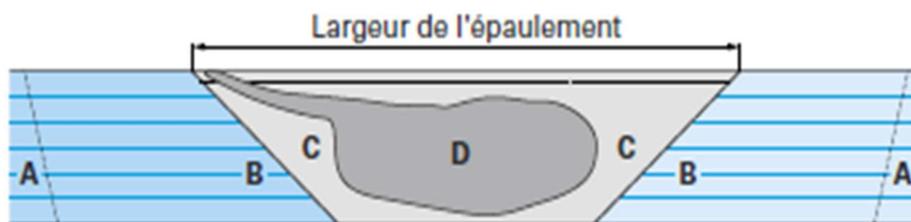


Figure I.4 : Coupe schématique d'une soudure [30]

1.1.4 Outils de soudage

Bien que ne s'agissant pas d'un paramètre de soudage au sens strict du terme, l'outil de soudage est au cœur du procédé. Son design et ses dimensions doivent être parfaitement adaptés au cas de soudage. Depuis l'invention du procédé, les outils de soudage ont considérablement évolué, principalement de manière empirique et parfois avec le support de travaux de modélisation. Constitué d'un pion et d'un épaulement, l'outil de FSW joue trois rôles essentiels :

- générer suffisamment de chaleur pour rendre le matériau pâteux,

- déformer plastiquement ou malaxer la matière sur toute l'épaisseur de la tôle,
- consolider le joint à l'arrière de l'outil sans perte de matière. [3]

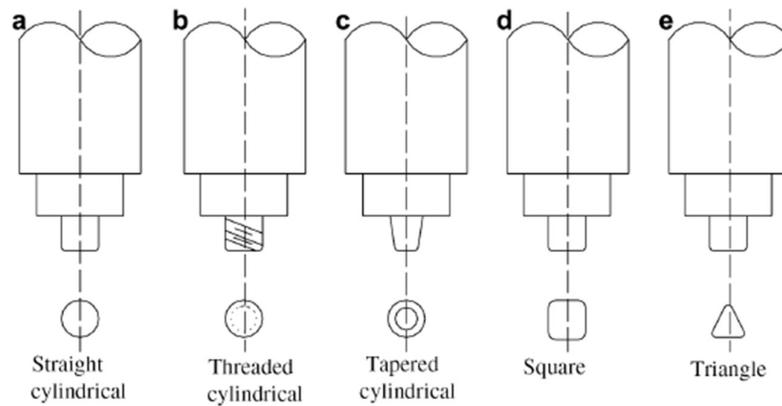


Figure 1.5 : Quelques exemples de designs de pions [31]

1.1.5 Différents types de soudage FSW

Depuis son invention, le procédé FSW ne cesse d'évoluer dans le domaine de la soudure pour répondre à la productivité industrielle. Trois types de soudures peuvent être réalisés grâce au procédé FSW.

1.1.5.1 Soudage bout à bout

Le soudage bout à bout consiste à assembler deux pièces mises en contact et généralement immobilisées par bridage pour éviter leurs écartements. Il permet de réaliser des cordons de soudures linéaires (Figure I.6).

1.1.5.2 Soudage par recouvrement

La procédure du soudage par recouvrement est semblable à celle d'une soudure bout à bout qui diffère sur 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 de processus tels que la pression de l'outil et sa géométrie ainsi que l'isostatisme des tôles jouent un rôle très important dans la qualité de la soudure. Plusieurs recherches sont effectuées pour désigner ce type de soudage, dans le but de remplacer le rivetage principalement dans le domaine aéronautique.

1.1.5.3 Soudage par points

Le procédé de soudage par friction malaxage permet non seulement de réaliser des cordons de soudures longitudinaux, mais également d'effectuer des soudures par points.

La figure I.5 décrit les différentes étapes du soudage par points. Le principe physique de l'opération reste le même que celui décrit précédemment. Il est notamment utilisé pour le soudage des tôles par recouvrement. L'outil composé d'un pion et d'un épaulement entre progressivement dans la matière. Une fois l'épaulement en contact avec la surface de la pièce supérieure, l'outil en rotation reste sur place pendant un instant appelé « temps de maintien » ou « Dwell time ». Cette phase permet à l'outil de malaxer et de forger la matière, formant une liaison mécanique à l'interface des deux tôles. L'opération de soudage s'achève par la sortie de l'outil. Le pion laisse alors son empreinte dans les pièces. Il est également possible de ne souder par points des matériaux dissemblables tels que l'aluminium et le cuivre ou l'acier. [5]

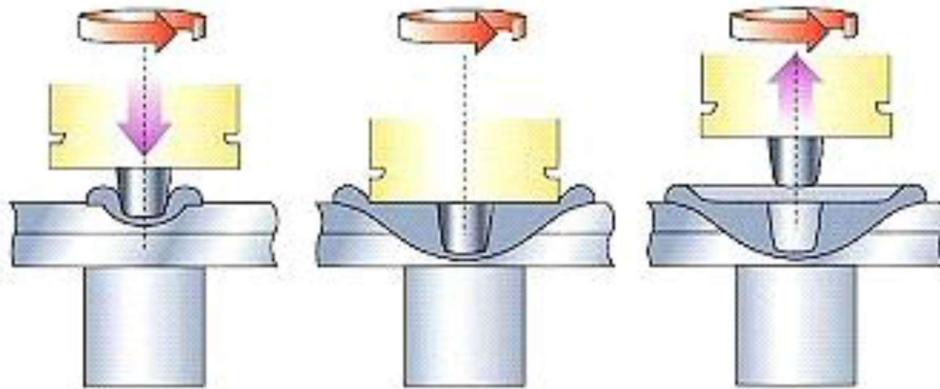


Figure I.6 : Étapes du procédé de soudage FSW par point. [5]

1.1.6 Principaux paramètres caractéristiques du procédé FSW

Les paramètres qui gouvernent le procédé de soudage FSW sont notamment :

- La géométrie des plaques et leurs caractéristiques thermomécaniques,
- Le matériau et la géométrie de l'outil,
- La vitesse de rotation de l'outil $\omega = \pi N/30$ en (rad/s) avec N en (tr/mn), la vitesse d'avance V_a (mm/mn), la pression de contact P (N/m²) et la force axiale F_z (N).
- Le mode de bridage des plaques.

Il faut noter par ailleurs que les premières études entreprises sur le procédé FSW introduisent l'inclinaison de l'outil (de 2° à 3°) par rapport à la normale de la surface de contact en tant que paramètre déterminant dans la consolidation de la soudure. [5]

1.1.7 Avantages et limitations du procédé FSW

Par rapport au procédé de soudage classique, le procédé FSW présente les avantages suivants :

1.1.7.1 Avantages liés au procédé

- Souder en une seule passe sur toute l'épaisseur, ou souder en deux passes opposées sur une grosse épaisseur.

- Préparer la surface des pièces à assembler par usinage.
- Aucun décapage chimique n'est nécessaire avant le soudage des alliages légers.
- Large gamme d'épaisseurs soudables
- Peut être soudé dans toutes les directions.
- Pas besoin de finition après soudage.
- Le processus de soudage peut être réalisé sans introduire de matériaux.
- Le processus lui-même est la source d'énergie.
- Différents matériaux peuvent être soudés.

1.1.7.2 Avantages du soudage

- Très large gamme de matériaux. -Peut souder des alliages difficiles à souder avec la technologie traditionnelle.
- Soudage à l'état solide : pas de solidification dans le bain de fusion (pas de défauts de porosité, pas de fissures à chaud).
- Bonnes propriétés mécaniques.
- L'influence des contraintes résiduelles est limitée.

1.1.7.3 Bénéfices économiques et environnementaux

- Pas de processus de pollution, pas d'injection de gaz nocif ni d'émission de fumée. -Technologie d'économie d'énergie.
- Il n'y a pas de circulation d'eau de refroidissement.
- Pas besoin de finition après soudure (sauf pour les soudures rondes).
- Bonne efficacité énergétique.

1.1.7.4 Avantages liés aux équipements

- Le processus est facile à automatiser, il est contrôlé par des instructions numériques.
- Équipement mécanique et électrique avec une conception simple de machine-outil.
- Pas de protection thermique.
- Les consommables sont limités aux outils et à l'électricité.
- Les paramètres peuvent être contrôlés en ligne.

Ces avantages prouvent que le procédé est adapté aux alliages d'aluminium.

Le Soudage Principalement sur des pièces de bout à bout minces, mais d'autres pièces sont également acceptées Configuration de joint, telle que le soudage d'angle ou le soudage en "T" ou le soudage par points couvrir. Les différentes configurations possibles pour le soudage FSW sont Comme la montre

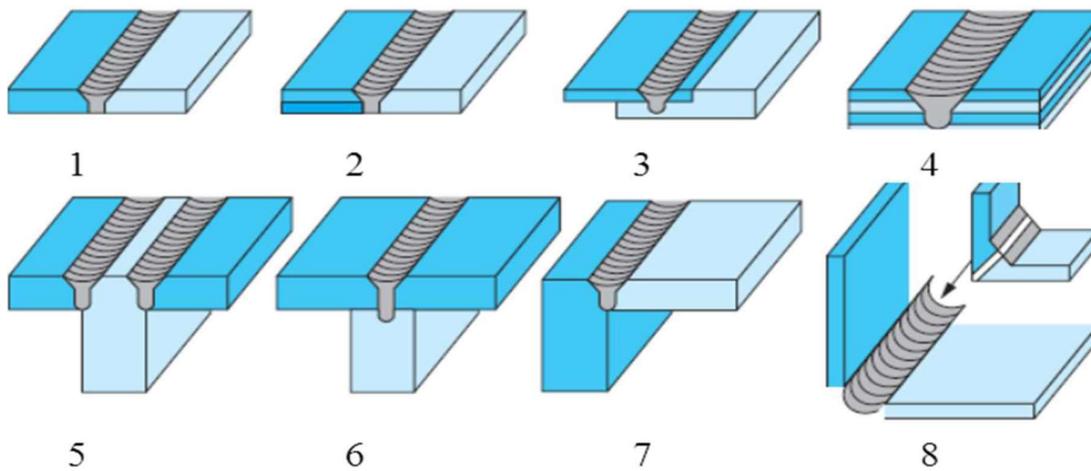


Figure I.7 : Configurations de soudage effectuées par FSW (Cazes 2003). [29]

Toutefois, au vu des forces appliquées lors du soudage, un bridage rigide ainsi qu'un support envers sont nécessaires. Le régime stationnaire n'est pas atteint immédiatement et en fin de soudage la sortie de l'outil forme un trou. Ces deux conditions font qu'il est nécessaire de découper les extrémités après soudage. Cependant, des outils rétractables se développent en vue de pallier cet inconvénient. Néanmoins, les soudures possibles aujourd'hui restent limitées à des géométries simples, bord à bord, une tôle sur une autre ou encore soudure en T... etc.

De plus, les vitesses de soudage utilisées par ce procédé sont plus faibles que par soudage laser.

1.1.8 Domaines d'application

Pour des exigences élevées en termes de qualité du joint de soudure, le FSW présente un recours efficace puisqu'il permet d'avoir des qualités de joints de soudures proche des caractéristiques mécaniques du métal de base dans certaines configurations, ce qui est difficile à atteindre avec des procédés de soudage classique. Le procédé de FSW trouve un domaine d'application plus vaste avec son potentiel pour souder des matériaux difficiles à assembler par fusion. Il permet des progrès pour le soudage des alliages d'aluminium. Pour ces nombreux avantages, l'industrie et la recherche s'investissent pour étendre son domaine d'application à des matériaux de résistance mécanique plus élevée ou pour l'assemblage des matériaux différents (exemple assemblage titane-acier). Durant la dernière décennie, le soudage par friction malaxage a été exploré par plusieurs industries tel que l'aérospatial, l'automobile, la marine, l'armement.

1.2 Généralités sur l'aluminium

1.2.1 Historique

La première apparition de l'aluminium était en 1854 lors d'une présentation à l'académie des sciences par le chimiste français Sainte-Claire Deville, sous la forme d'un lingot. Cette pièce avait été obtenue par voie chimique. En 1886 il y'a eu l'invention du procédé d'électrolyse l'aluminium par Paul Héroult (France) et Charles Martin Hall (USA).

Depuis, l'aluminium a connu un développement très important grâce notamment à son utilisation dans les industries ayant attiré au transport : aviation, automobile, marine. Il est aussi employé dans l'emballage, le bâtiment, l'électricité, la mécanique... [7]

1.2.2 Présentation générale de l'aluminium

Avec une consommation annuelle de l'ordre de 25 millions de tonnes, l'aluminium est le métal non ferreux le plus utilisé, en particulier dans les secteurs du transport, du bâtiment, de l'emballage, et de l'industrie électrique et aéronautique. Son utilisation est donc particulièrement privilégiée du fait de :

- sa légèreté : avec une masse volumique de 2700 kg.m^{-3} , l'aluminium est l'un des métaux les plus légers. A titre de comparaison, il est trois fois plus léger que le cuivre qui lui possède une masse volumique de 8940 kg.m^{-3} .
- sa conductivité thermique de $237 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (à 20°C), contre $390 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (à 20°C) pour le cuivre, le rend sur cet aspect, le plus performant des métaux usuels.
- sa bonne conductibilité électrique, de l'ordre de 65% IACS (International Annealed Copper Standard), c'est-à-dire 65% par rapport au cuivre recuit standard considéré comme ayant une conductibilité électrique égale à 100%.
- sa tenue à la corrosion liée à l'existence à sa surface d'un film passif d'oxyde ou d'hydroxyde d'aluminium protecteur et stable sur une large gamme de pH compris entre 4 et 9.
- son aptitude à être soumis à des traitements de surface visant à améliorer ses propriétés de surface.
- sa relative facilité de mise en œuvre.
- son aptitude à être recyclé.

Toutefois, malgré l'ensemble des propriétés intéressantes citées précédemment, l'aluminium pur ne peut généralement pas être utilisé pour certaines applications spécifiques nécessitant des propriétés mécaniques élevées, une bonne aptitude à la mise en forme et à la soudabilité. Afin de pallier ces faiblesses, des éléments d'addition sont donc incorporés à l'aluminium. [8]

1.2.3 Les alliages d'aluminium

Parmi ces familles d'alliage d'aluminium, on distingue deux catégories :

- les alliages non trempant (pour les séries 1xxx, 3xxx et 5xxx).
- les alliages à durcissement structural (pour les séries 2xxx, 6xxx et 7xxx).

Afin d'améliorer la résistance mécanique de ces alliages, des traitements thermiques et/ou mécaniques sont effectués. Pour les alliages non trempant, l'écrouissage est le seul traitement permettant de les durcir. La déformation plastique s'accompagne de la formation de dislocations qui vont interagir entre elles et avec les interfaces (joints de grains par exemple).

Pour les alliages à durcissement structural, une série de traitements thermomécaniques permet de faire précipiter des phases durcissant. Ces phases vont perturber le mouvement des dislocations et ainsi permettre l'amélioration de propriétés mécaniques de l'alliage. [9]

1.2.4 Désignation des alliages d'aluminium

1.2.4.1 : La désignation AFNOR :

La désignation AFNOR est composée de deux parties : la première partie comporte la lettre A suivie éventuellement du chiffre représentant le titre (exemple A5), la deuxième partie est formée d'un groupe de lettre symbolisant les éléments d'addition, rangés par ordre de teneur. Un chiffre placé dans le groupe des lettres précise la teneur de l'élément symbolisé par des lettres dont les principales lettres utilisées sont : [10]

- Cuivre U
- Manganèse M
- Magnésium G
- Zinc Z
- Nickel N
- Silicium S
- Titane T

1.2.4.2 : Désignation numérique :

Elle est définie par norme NFA 02-104 (novembre 1970). Elle s'applique à l'aluminium et aux alliages corroyés uniquement. Son emploi est obligatoire en France depuis Janvier 1976. Le principe de cette désignation repose sur l'emploi de quatre chiffres. Cette norme présente de grandes analogies avec la norme américaine. A.S.T.M. Le premier chiffre de 1 à 8 indique la famille d'alliages. Il détermine l'élément principal de l'alliage sauf le cas de la série 1xxx (Tableau I.1).

Elément(s) d'alliage(s)	Numéro de série
Aluminium pur à 99.xx%	1xxx
Cu	2xxx
Mn	3xxx
Si	4xxx
Mg	5xxx
Mg, Si	6xxx
Zn, Mg	7xxx
Autres	8xxx

Tableau I.1 : Différents groupes de l'aluminium et ses alliages [11]

1xxx, sans élément, pour l'aluminium non allié, les alliages correspondent à différents niveaux de pureté, Fe et Si étant les principales impuretés de l'aluminium.

2xxx Cu, pour les alliages Al – C u, avec une sous-famille Al-Cu-Mg.

3xxx Mn, pour les alliages Al – M n.

4xxx Si, pour les alliages Al- S i.

5xxx Mg, pour les alliages Al-M g.

6xxx Mg + Si, pour les alliages Al- M g -Si.

7xxx Zn, pour les alliages Al- Z n- Mg, avec une sous-famille Al -Z n-Mg- Cu.

8xxx divers, pour les autres alliages

Les deux derniers chiffres sont des numéros d'ordre et servent à identifier l'alliage.

La seule exception est la série 1000, dont ces deux chiffres indiquant le pourcentage d'aluminium.

1.2.4.3 Désignation symbolique (Norme européenne)

La désignation de l'aluminium non allié destiné au corroyage est constituée du symbole chimique du métal (Al) suivi d'un espace et du pourcentage de pureté exprimé avec une ou deux décimales.

Exemples : EN AW-1199 [Al 99,99] ou EN AW-1070A [Al 99,7].

Pour les alliages d'aluminium corroyés alliés, la désignation est constituée du symbole Al suivi d'un espace et du symbole des éléments d'addition respectivement suivi de leur teneur par ordre décroissant.

Exemples : EN AW-6061 [Al Mg1SiCu] ou EN AW-2014 [Al Cu4siMg]. [11]

1.2.5 Propriétés des alliages d'aluminium

Les principales caractéristiques des alliages d'aluminium sont :

a. Résistance à chaud : La résistance à chaud des alliages d'aluminium au-delà de 150°C est assez faible.

b. Résistance aux basses températures : Les alliages d'aluminium ont un réseau cristallin CFC, par conséquent, ils ne sont pas fragiles d'où leur application en cryogénie.

c. Résistance à la fatigue : De manière générale, le coefficient d'endurance R_m est de l'ordre de 0,5 pour les alliages non trempant et de (0,25 à 0,30) pour les alliages trempant.

d. Résistance à la corrosion : Comme pour l'aluminium pur ; les alliages d'aluminium sont protégés contre la corrosion grâce à la formation d'une pellicule de Al_2O_3 . La protection anticorrosion peut être améliorée par anodisation. Les risques de corrosion à craindre dépendent des éléments d'addition. En effet, le fer favorise la Corrosion galvanique alors que Cu, Mn, (Mg + Si) et (Mg + Z n) encouragent la Corrosion inter granulaire et la corrosion sous tension.

e. Mise en forme : Les alliages d'aluminium sont faciles à laminier et emboutir. Les alliages les plus appropriés au filage à chaud sont les alliages Al -Mg. Sont très appropriés au filage à chaud. [10]

f. Soudage

Le soudage est facile si l'on tient compte de la présence de la couche protectrice d'alumine. Les procédés sont donc des procédés sous gaz protecteur (TIG, MIG) ou sous vide (faisceaux d'électrons). Mais s'il n'y a pas de difficulté pour les alliages non trempant, par contre des problèmes peuvent exister pour les alliages trempant ayant une vitesse de trempe élevée (série 2000 ou Al-Cu).

[7]

g. Propriétés mécaniques

L'aluminium commercialement pur possède, à l'état recuit, des propriétés mécaniques faibles. On peut toutefois améliorer considérablement ces propriétés par écrouissage, addition d'éléments d'alliage ou traitements thermiques, selon les cas. L'aluminium et ses alliages ont une structure cristalline cubique à faces centrées. Ils font donc preuve, à l'état recuit, d'une excellente ductilité à toute température.

Etat du métal	Charge de rupture à la traction	Allongements de rupture à traction
Coulé	5 à 9Kg/mm ²	0 à 5 %
Laminé et recuit	8 à 10 Kg/mm ²	30 à 40 %
Laminé et écroui	20 à 25 Kg/mm ²	2 à 5 %

Tableau I.2: Propriétés mécaniques d'aluminium pur [7]

h. Ténacité

La ténacité ou résistance statique résiduelle à la propagation d'une fissure est une notion très importante en particulier dans le cas des alliages à haute résistance car elle conditionne la fiabilité et la sécurité des structures. [7]

1.2.6 Les catégories d'alliage d'aluminium

Les deux grandes catégories d'alliages d'aluminium sont les alliages de corroyage et les alliages de fonderie. Ces deux catégories peuvent être différenciées par la désignation numérique standard (Aluminium Association) : trois chiffres et une décimale pour les alliages de fonderie, et quatre chiffres pour les alliages corroyés. [12]

1.a) Alliages de fonderie

Série	Alliage
100.0	Al commercial pur
200.0	Al-Cu
300.0	Al-Si-Mg et Al-Si-Cu
400.0	Al-Si
500.0	Al-Mg
700.0	Al-Zn
800.0	Al-Sn
900.0	Al et autres éléments

1.b) Alliages corroyés

Série	Alliage
1000.0	Al \geq 99%
2000.0	Al-Cu-Mg
3000.0	Al-Mn
4000.0	Al-Si
5000.0	Al-Mg
6000.0	Al-Mg-Si
7000.0	Al-Zn-Mg et Al-Zn-Mg-Cu
8000.0	Al et autres éléments

Tableau I.3 : Désignation des alliages d'aluminium (Aluminium Association). [12]

1.2.7 les familles d'alliage d'aluminium

Les huit familles d'alliages d'aluminium se divisent en deux groupes bien distincts en relation avec leur mode de durcissement (Tableau I.4) [7]

1.2.7.1 Alliages corroyés

En métallurgie, les familles d'alliages d'aluminium de corroyage se divisent en deux groupes très distincts tant par la gamme de fabrication que par certaines propriétés comme : les alliages à durcissement structural, et les alliages sans durcissement structural.

♦ Alliage durcissement par écrouissage :

L'écrouissage se traduit par une augmentation de la résistance mécanique de la dureté et par perte de ductilité

◆ **Alliage durcissement structural :**

Les caractéristiques mécaniques maximales de ces alliages sont obtenues par un traitement en trois étapes : chauffage, refroidissement et maintien.

Famille	Elément d'alliage	%en masse	Additions possibles
1000	Aucun		Cuivre
3000	Manganèse	0.5 – 1.5	Magnésium-Cuivre
5000	Magnésium	0.5 – 5	Manganèse-Chrome
8000	Fer et silicium	Si : 0.3 – 1 Fe : 0.6 - 2	Nickel

Tableau (I.4): Familles d'alliage d'aluminium Durcissement par écrouissage [35]

Famille	Elément d'alliage	%en masse	Additions possibles
6000	Magnésium et silicium	Mg : 0.5 – 1.5 Si : 0.5 – 1.5	Silicium – Magnésium - Manganèse
2000	Manganèse	0.5 – 1.5	
7000	Zinc et magnésium	Zn : 5 – 7 Mg : 1 – 2	Cuivre

Tableau I.4: Familles d'alliage d'aluminium Durcissement structural [35]

Les principales propriétés requises de ces alliages sont, selon les applications :

- Résistance mécanique
- Ductilité
- Résistance à la propagation des fissures
- Résistance à la fatigue (efforts alternés)
- Résistance aux multiples formes de corrosion
- Conductibilité électrique [34]

1.2.7.2 Alliages de fonderie

On distingue les alliages de première fusion, élaborés à partir de l'aluminium primaire issu de l'électrolyse et de seconde fusion (appelé aussi alliages d'affinage). Ils sont élaborés par refusions des déchets récupérés. Ils sont surtout utilisés pour la fabrication des pièces d'automobile [7]

1.2.8 Principaux traitements thermiques des alliages aluminium

Nous pouvons diviser les traitements des alliages aluminium en trois types :

- Les traitements d'homogénéisation
- Les traitements d'adoucissement
- Les traitements de trempe structurale [13]

1.2.8.1 Traitements thermiques de durcissement structural

Les bonnes caractéristiques mécaniques de ces alliages sont obtenues par un traitement de durcissement structural se composant de trois étapes successives :

- une montée en température supérieure à la température de solvus et un maintien suffisamment long à cette température afin d'atteindre l'équilibre thermodynamique et la mise en solution totale des atomes de soluté. On parle de traitement de mise en solution ou d'homogénéisation.
- un refroidissement suffisamment rapide de l'alliage, appelé trempe, ayant pour but d'empêcher la décomposition de la solution solide et la formation des précipités d'équilibre grossiers ne conduisant pas au durcissement de l'alliage.

Immédiatement après la trempe, on obtient donc une solution solide sursaturée en atomes de soluté et en lacunes.

- un maintien à température ambiante au cours duquel a lieu la décomposition de la solution solide métastable sursaturée en éléments d'addition. Cette phase de maturation ou de vieillissement naturel peut être suivie si besoin d'un revenu à température modérée afin d'accentuer la décomposition de la solution solide par précipitation de phases durcissantes selon des séquences de précipitation bien spécifiques à chaque alliage. [8]

ALLIAGE			ETAT	Mise en solution (°C)	Trempe	Maturation	Revenu	
Classe	Série	Nom						
Corroyés	2000	2011	T6 – T8	510 ±5	Eau ≤ 40 °C	≥ 4 jours ≥ 4 jours ≥ 4 jours	14 h/160 °C	
		2014	T6	505 ±5	Eau ≤ 40 °C		20 h/160 °C ou 10 h/175 °C	
		2017A	T4	500 ±5	Eau ≤ 40 °C			
		2024	T3 – T4	495 ±5	Eau ≤ 40 °C			
		2030	T3 – T4	490 ±5	Eau ≤ 40 °C			
		2618A	T6	530 ±5	Eau ≤ 80 °C		20 h/200 °C	
	6000	6005A	T6	530 ±5	Eau ≤ 40 °C		8 h/175 °C ou 6 h/185 °C	
		6060	T5 – T6	530 ±5	Eau ou air soufflé		8 h/175 °C ou 6 h/185 °C	
		6061	T6	535 ±5	Eau ± 40 °C		8 h/175 °C ou 6 h/185 °C	
		6082	T6	535 ±5	Eau ± 40 °C		16 h/165 °C	
		6106	T5 – T6	530 ±5	Eau ou brouillard		8 h/175 °C 6 h/185 °C	
		7020	T6	450 ±10	Eau ou air soufflé		5 h /100 °C + 25 h /140 °C	
		7000	7049A	T6	465 ±5		Eau ≤ 40 °C	12 h/135 °C
				T73	465 ±5		Eau ≤ 40 °C	24 h/120 °C + 12 h/165 °C
			7075	T6	465 ±5		Eau ≤ 50 °C	12 h/135 °C
		T73	465 ±5	Eau ≤ 40 °C	7 h/108 °C + 10 h/175 °C			

Tableau I.5 : Conditions de traitements thermiques des alliages d'aluminium [13]

1.2.9 Durcissement structural des alliages d'aluminium

Le durcissement structural des alliages d'aluminium, appelé aussi durcissement par précipitation, provient de la formation contrôlée dans l'alliage d'une seconde phase de module de cisaillement supérieur à celui de la matrice. Les particules précipitées offrent donc par nature une meilleure résistance au déplacement des dislocations, mais au-delà de leur caractéristique cristallographique, leur taille et leur distribution dans la matrice jouent un rôle fondamental dans le durcissement.

La précipitation résulte d'une séquence de traitement thermique. Seuls les alliages d'aluminium des séries 2000 (AlCu), 6000 (AlMgSi) et 7000 (AlMgZn) ont la capacité de durcir par précipitation. En relation avec leur diagramme d'équilibre, les alliages sont biphasés à l'état de livraison. La solubilité des éléments d'alliages, quels qu'ils soient, étant très limitée à température ambiante dans l'aluminium, les alliages sont constitués d'une solution solide en aluminium quasi pur (phase α) et d'une seconde phase, sous forme de précipités grossiers préférentiellement localisés le long des joints de grains (phase β). [13]

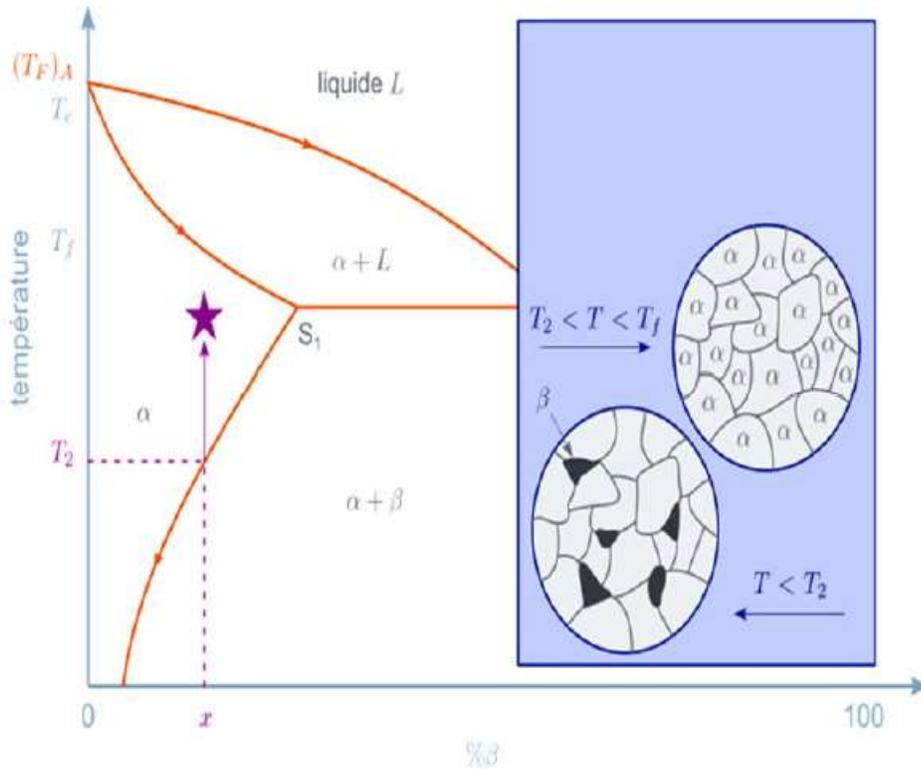


Figure I.8 : Traitement thermique de durcissement structural des alliages d'aluminium : diagramme d'équilibre schématique, température de mise en solution et microstructure initiale (température ambiante) et microstructure de l'état mis en solution. [32]

Les alliages à durcissement structural sont désignés par la lettre T suivie par des chiffres (entre 1 et 5 chiffres). Le *Tableau I.8* explicite la signification du premier chiffre qui renseigne sur le traitement thermique subi par les alliages d'aluminium lors de leur élaboration. [8]

Désignation	Descriptif du traitement
T1	Pas de mise en solution, maturation
T2, T6	Mise en solution, trempe, revenu
T3	Mise de mise en solution trempe, écrouissage, maturation
T4	Mise en solution, trempe, maturation
T5	Pas de mise en solution, revenu
T7	Mise en solution, trempe, sur revenu
T8	Mise en solution, trempe, écrouissage, revenu
T9	Mise en solution, trempe, revenu, écrouissage

Tableau I.6: Traitements thermiques des alliages d'aluminium

1.3 Etude d'alliage d'aluminium série 2000 et 7000

1.3.1 Série de 2000 (alliage de Cu)

Ces alliages peuvent être traités thermiquement. La résistance à la traction varie de 186 à 427 N/mm². Ce sont des alliages d'aluminium-cuivre (0.7-6.8%) à résistance élevée, souvent utilisés dans l'industrie aéronautique et spatiale. Certains de ces alliages sont considérés comme non soudables (fissurations à chaud et sensibilité à la corrosion sous tension). D'autres peuvent être soudés avec des procédés de soudage à l'arc quand on suit une procédure de soudage correcte. Comme métal d'apport, on utilise la série 2000 (si on exige la même résistance) ou la série 4000 (avec du silicium ou aluminium et cuivre) en fonction de l'application.

Certains alliages "non soudables" sont soudés avec succès avec le procédé friction stir.

Les alliages de la série 2000, à durcissement structural, forment une gamme importante d'alliages se caractérisant par :

- Une résistance mécanique moyenne à l'état trempé mûri mais relativement élevée à l'état trempé revenu ;
- Une bonne tenue à chaud ;
- Une aptitude au soudage généralement mauvaise selon les procédés traditionnels ;
- Une résistance à la corrosion relativement faible en atmosphère corrosive.[14]

Série 7000 (alliage de Zn)

Ce sont des alliages d'aluminium-zinc (0.8-12% Zn) susceptibles de durcissement par traitement thermique avec une résistance variant de 220 à 605 N/mm². Ils appartiennent aux alliages d'aluminium ayant la résistance la plus élevée comme pour la série 2000, certains sont considérés comme non soudables avec des procédés de soudage à l'arc, les autres bien. Les alliages soudables, comme par exemple les alliages 7000, peuvent être soudés avec des métaux d'apport de la série 5000.
[14]

1.4 L'analyse mécanique dynamique DMA :

L'analyse mécanique dynamique est une technique utilisée pour caractériser les matériaux, en particulier polymères. Elle applique une force à un échantillon et mesure la réponse du matériau dans un environnement à température contrôlée.

Les conditions de test d'analyse mécanique dynamique peuvent être conçues pour étudier les propriétés mécaniques globales des polymères organiques afin de faciliter la détermination du comportement fonctionnel. Clé liée à :

L'élasticité : Résistance des polymères à la déformation permanente due à l'élasticité de la structure (récupération et rigidité) ;

La réponse visqueuse : Déformation sans rupture due à la dissipation d'énergie par frottement interne (amortissement).

Les tests DMA impliquent la sélection des conditions appropriées de temps, de température de déplacement et de fréquence pour étudier les propriétés d'intérêt. Selon la gamme de températures considérée, dont dépend la viscosité du polymère et les dimensions de l'échantillon, différents modes de sollicitation sont utilisés : flexion, contrainte longitudinale, torsion, cisaillement, traction, ...etc.

L'enregistrement des composantes élastiques et anélastique, par rapport à la contrainte, en fonction de la température (fréquence fixe) ou de la fréquence (température fixe), donne accès aux modules mécaniques de conservation en cisaillement (G') et en elongation (E'), aux modules de perte correspondants (G'' , E''), ainsi qu'à l'angle de perte $\tan \delta = G''/G'$ (ou E''/E'). [16]



Figure I.9 : après l'application DMA sur l'échantillon

Figure I.10 : échantillon de l'aluminium 7075



Figure I.11 : Appareil de l'analyse Mécanique Dynamique DMA

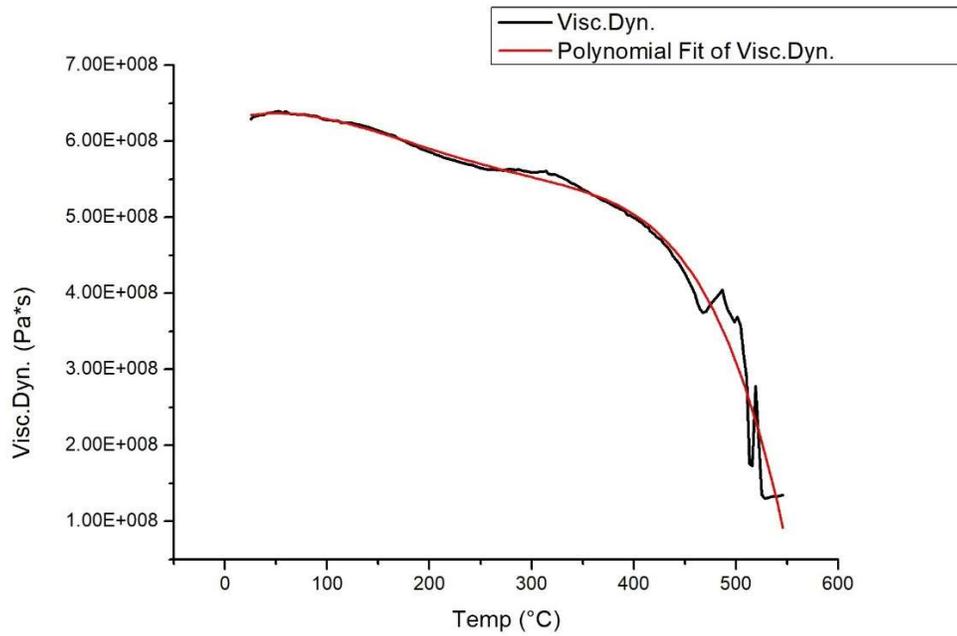


Figure I.12 : Viscosité dynamique de l’alliage d’aluminium 7075 obtenue du test DMA (Dynamical Mechanical Analysis).

La masse volumique est de 2810 kg/m³. Les valeurs de la chaleur spécifique (C_p) et la conductivité thermique (λ) à différentes températures sont indiquées dans les équations :

$$\lambda = 131.40 + 0.13113T$$

$$C_p = 777.36 + 1.7566T - 0.00298T^2$$

La viscosité en fonction de la température peut être exprimé sous forme polynomiale comme suit :

$$\mu \text{ (Pa.s)} = 6,27819E8 + 364562,67027T - 3913,8761T^2 + 1,62224T^3 - 0,03172T^4 - 5,46576E-5 T^5$$

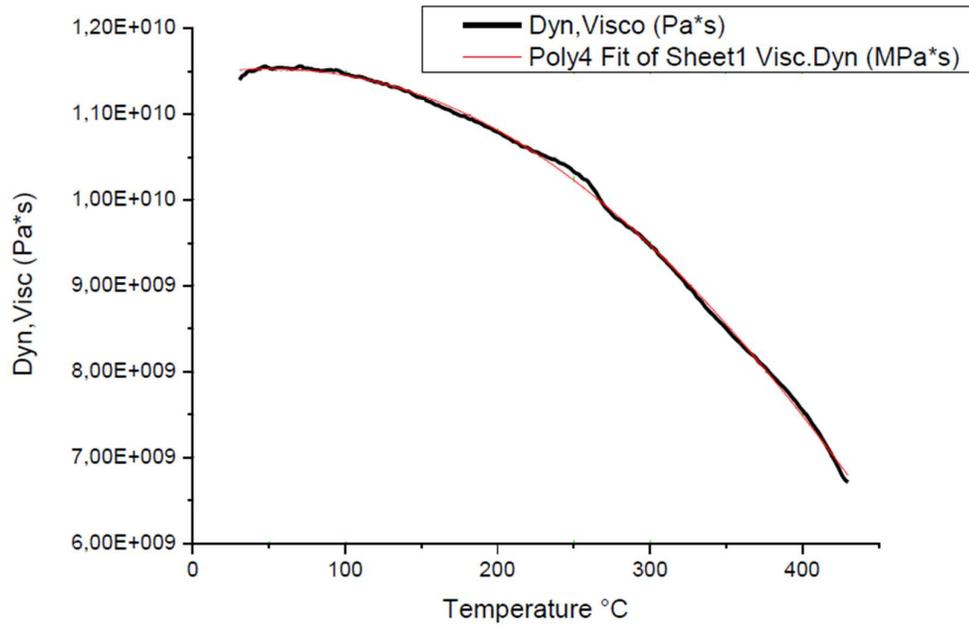


Figure I.13 : Viscosité dynamique de l'alliage d'aluminium 2017A obtenue du test DMA (Dynamical Mechanical Analysis). [19]

La masse volumique est de 2790 kg/m³. Les valeurs de la chaleur spécifique (C_p) et la conductivité thermique (λ) à différentes températures sont indiquées dans les équations. :

$$\lambda = 103.264 + 0.241T$$

$$C_p = 754.08 + 0.3729T + 0.0012T^2$$

La viscosité en fonction de la température peut être exprimé sous forme polynomiale comme suit : [18]

$$\mu \text{ (Pa.s)} = 1,14632 \cdot 10^{+10} + 2,4884 \cdot 10^{+6} T - 22117,33216 T^2 - 43,29134 T^3 + 0,05236 T^4$$

Chapitre 2 : Simulation du soudage par friction malaxage

2.1 Introduction

La modélisation du transfert chaleur et des écoulements de la matière ont été réalisés grâce aux approches eulériennes, lagrangiennes, VOF ou arbitraire. Alors que plusieurs méthodes ont été élaborées pour effectuer la simulation de ces phénomènes tels que la méthode des différences finies (FDM), la méthode des éléments finis (FEM), la méthode des volumes finis (FVM) et la méthode des particules. Les résultats de ces modèles sont validés par les résultats expérimentaux. Le transfert de chaleur et la répartition de la température dans le pin sont asymétriques en raison de l'asymétrie de la vitesse de déformation et de la dissipation visqueuse. L'écoulement de la matière dépend du contact des plaques à souder avec le pin. Dans ce chapitre on va :

- expliquer la méthode utilisée pour effectuer une simulation de ce phénomène
- exposer les équations utilisées pour étudier le modèle fluide du phénomène
- exposer le logiciel de simulation utilisé (fluent)
- exposer les différents types de maillage utilisés qui sont conformes à l'étude
- montrer les étapes de la simulation du phénomène

2.2 Formulations des méthodes utilisées

2.2.1 Formulation lagrangienne

Dans une formulation lagrangienne, le maillage évolue et se déplace en suivant les déformations de la matière. La vitesse de maillage est égale à celle de la matière. La représentation de l'évolution des surfaces libres est précise et le suivi des variables d'histoire du matériau immédiat. C'est pourquoi cette formulation est classiquement adoptée en mécanique des solides. Toutefois, le maillage subit les mêmes déformations que la matière. La qualité des éléments se dégrade progressivement, finissant par nécessiter un remaillage et donc un transport des informations d'un maillage sur l'autre. Cela peut devenir coûteux en temps de calcul pour simuler des grandes déformations. [18]

La description lagrangienne d'un mouvement de matière implique que chaque particule est définie à partir de sa configuration initiale. Dans le cas de la méthode du lagrangien réactualisé, la configuration initiale est réactualisée à chaque pas de temps. Nous distinguons deux domaines, le domaine matériel représentant l'ensemble des particules du matériau et le maillage contenant l'ensemble des nœuds, qui est un sous-ensemble du premier. Le maillage se déplace avec le domaine matériel au cours du temps, c'est-à-dire que, entre deux remaillages, chacun de ses nœuds est associé à une unique particule tout au long de la simulation. [19]

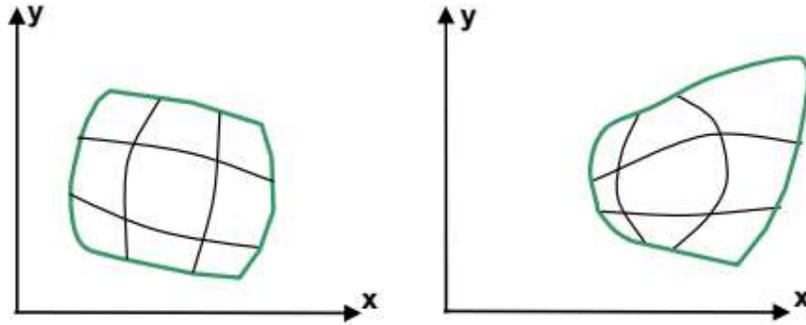


Figure II.1 : Formulation lagrangienne à deux instants successifs[18]

2.2.2 Formulation eulérienne

Dans une formulation eulérienne, le maillage reste fixe et voit passer la matière. La vitesse de maillage est donc nulle. La précision du calcul n'est pas altérée au cours du temps puisque la qualité des éléments reste constante. De grandes distorsions matérielles peuvent être modélisées, sans utiliser de remaillage. De ce fait, elle est largement utilisée en mécanique des fluides ou en mise en forme de matériaux pour l'étude de processus stationnaires.

L'inconvénient d'une formulation eulérienne est qu'il faut résoudre des équations de transport à chaque instant avec des méthodes d'autant plus perfectionnées que la vitesse convective est importante. Enfin, le maillage fixe définit un volume de contrôle invariable au cours du temps. Lorsque les frontières du corps étudié évoluent au cours du temps, elles ne coïncident généralement pas avec le bord d'un élément. Il en résulte des difficultés à suivre précisément les frontières matérielles. Des procédures spécifiques ont dû être mises en place pour suivre l'évolution de la surface libre : techniques de pseudo-concentrations, lignes de courant, levé sets, ect [18]

L'approche Eulérienne EF présente donc des avantages pour la simulation du flux de matière, qui sont très importants et complexes en FSW. En raison de son faible coût de calcul, elle peut facilement être couplée à des modèles numériques microstructuraux permettant alors de prédire les performances mécaniques du joint soudé. Cependant elle présente des difficultés pour modéliser précisément le contact et les surfaces libres (dont le pourcentage de l'épaulement effectivement en contact). De plus elle n'est pas adaptée pour considérer géométriquement des outils de géométries complexes telles que la présence de filets, de « Canaux » (Ribs) ou des pions non circulaires. C'est pourquoi certains auteurs ont développé des méthodes numériques particulières, se rapprochant des méthodes ALE (Arbitrairement Lagrangiennes Eulériennes) [20]

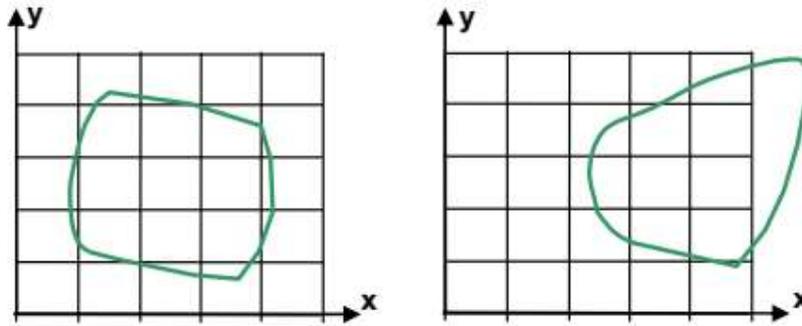


Figure II.2 : Formulation eulérienne à deux instants successifs [18]

2.2.3 Formulation ALE

Nous avons jusqu'à présent considéré que le fluide s'écoulait dans un domaine borné qui ne subissait aucune déformation. Dans ce cadre, nous avons utilisé une formulation eulérienne du fluide : nous nous sommes intéressés à l'instant t aux particules se trouvant dans un volume fixe V quelconque qui restait inchangé au cours du temps. La particule se trouvant en un point M quelconque de V à l'instant t sont repérées grâce aux coordonnées eulériennes z qui représentent les coordonnées d'un point du domaine en considérant le laboratoire comme référentiel. Ainsi, à deux instants différents, le volume de contrôle V ne contient pas les mêmes particules. Cette formulation convient bien à l'observation d'un écoulement dans un domaine fixe mais trouve ses limites en cas de domaines déformables et en particulier le long de l'interface fluide-structure dans le cas d'une structure mobile. Il vaut mieux, dans ce cas, utiliser une formulation lagrangienne, beaucoup plus efficace près de cette interface. Avec cette formulation, plutôt que de nous intéresser au volume fixe V , nous allons suivre au cours du temps les particules contenues dans un volume V_t qui va donc évoluer au cours du temps. Ce volume est appelé volume matériel et les particules qu'il contient sont repérées grâce à des coordonnées matérielles notées a . En utilisant cette formulation, il nous sera facile de contrôler le fluide près de l'interface fluide-structure mobile. Cette formulation pose néanmoins deux problèmes : premièrement, on ne peut suivre correctement le fluide sur des temps très longs. Deuxièmement, dans le cas d'écoulements complexes, tracer la trajectoire des particules devient problématique. Considérons maintenant un maillage mobile, dans la vitesse vaut w . Dans le cas d'une description purement eulérienne, w est nul alors que pour une approche lagrangienne, est égale à la vitesse du fluide. Le but de la formulation ALE (Arbitraire Lagrange Eulérien) est de proposer une approche qui permet de passer de l'une à l'autre des formulations décrites ci-dessus de façon arbitraire et continue. [26]

2.2.4 Method VOF (volume of fluid)

La méthode VOF est une méthode puissante pour un fluide à deux ou plusieurs phases non miscibles (par exemple : liquide et gaz), utilisant le remplissage des cellules de calcul pour déterminer l'évolution temporelle du fluide dans un domaine maillé. Cette méthode a été développée par Hirt et Nichols dans les années 80. Elle résolve un ensemble simple d'équations de quantité de mouvement en dépistant la fraction volumique de chacun des fluides dans tout le domaine. Les applications typiques incluent la prévision de la rupture du jet, grand mouvement des bulles dans un liquide, mouvement du liquide après une interruption d'un réservoir, et du cheminement régulier ou passager de n'importe quelle interface liquide-gaz. Les limites de ce modèle sont :

- Aucune cellule ne doit être vide (présence obligatoire d'une ou plusieurs phases combinées).
- Une seule phase seulement peut être compressible mais pas les deux.
- Les écoulements périodiques ne peuvent être simulés lorsqu'on active le modèle VOF (incompatibilité).
- Ce modèle ne prend pas en compte actuellement ni mélange ni réaction.

Le code de calcul FLUENT dispose de quatre schémas numériques pour localiser l'interface (liquide-air par exemple) : Euler Explicite, implicite, reconstruction géométrique (géométrique-reconstruction), donneur accepteur (donor-acceptor). En régime transitoire, l'utilisation des méthodes VOF implique la donnée du nombre de Courant. C'est un nombre sans dimension qui compare le pas de temps de calcul (Δt) au temps caractéristique durant lequel un élément fluide transite à travers le volume de contrôle [21]

2.3 Equation utilisé dans la simulation

On utilise la formulation eulérienne en mécanique des fluides elle consiste à observer les particules qui passe successivement en un point et à expliciter leurs propriétés caractéristiques lors de leur passage en fonction de la position et du temps.

Dans cette formulation trois équation de conservation permettent d'assurer l'équilibre du système thermomécanique. Tous d'abord, il doit y avoir conservation de la masse. Ceci se traduit par :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0$$

La quantité de mouvement doit être conserve :

$$\frac{D(\rho \mathbf{v})}{Dt} = -\text{grad}(p) + \text{div}(\boldsymbol{\tau}) + \rho \mathbf{f}$$

$$\text{Ou } \frac{D(\rho v)}{Dt} = \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} \mathbf{grad}(\rho v)$$

\mathbf{v} Est la dérivée particulaire de la quantité de mouvement, p la pression, τ la contrainte visqueuse et ρf les forces massiques

Cette équation correspond à l'équilibre mécanique. Elle est proche de l'équation, $\text{div}(\sigma) + fv = \rho \gamma$ écrite en formulation lagrangienne. Pour s'en rapprocher, les différents termes peuvent être regroupés différemment :

$$-\mathbf{grad}(p) + \mathbf{div}(\tau) + \rho f = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{grad}(v) \right)$$

$-\mathbf{grad}(p) + \mathbf{div}(\tau)$ correspond à $\text{div}(\sigma)$, ρf aux forces volumiques et $\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{grad}(v)$ au terme d'accélération.

Il faut ajouter à ces équations, une loi de comportement qui exprime la contrainte tangentielle τ en fonction du taux de déformation D et de la viscosité μ :

$$\tau = 2\mu D$$

μ peut dépendre de la vitesse de déformation et de la température. Dans ce dernier cas, comme pour la formulation lagrangienne, un couplage thermomécanique est présent.

La dernière quantité à conserver est l'énergie. L'équation de la chaleur est la même que l'équation $\rho C_p \frac{dT}{dt} = \mathbf{div}(\lambda \mathbf{grad}(T)) + Q$ en exprimant la dérivée particulaire :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{v} \cdot \mathbf{grad}(T) = \mathbf{div}(\lambda \mathbf{grad}(T)) + Q$$

Comme pour la formulation lagrangienne, le terme source volumique Q dépend des champs mécaniques puisqu'il s'agit des dissipations visqueuses : $Q = \tau : D$ où $:$ est le produit doublement contracté. Dans cette équation, un couplage thermomécanique apparaît donc. De ce fait, comme pour la formulation lagrangienne, des couplages thermomécaniques lient les équilibres mécaniques et thermiques par l'intermédiaire d'une loi de comportement dépendant du temps et une source de chaleur dépend de l'état mécanique du fluide.[22]

Il faut ajouter à ces équations sur le volume des conditions aux limites comme dans le cas de la formulation lagrangienne. Cette fois-ci, elles sont exprimées sous la forme :

- d'une vitesse imposée,

- d'une pression imposée,
- d'une température imposée,
- d'un flux de chaleur imposé

2.5 Logiciel CFD :

2.5.1 Principes des codes CFD :

Les logiciels de simulation numérique des écoulements basés sur la méthode des volumes finis peuvent maintenant être considérés comme de véritables « expériences numériques », lorsqu'elles sont faites avec soin. L'avantage des « méthodes numériques » est que toutes les quantités physiques liées à l'écoulement (champ de vitesse, champ de pression, contraintes etc.), sont immédiatement disponibles en tout point de l'écoulement.

Dans une expérimentation, l'obtention de ces quantités physiques en tout point du champ est souvent impossible ou très difficile en pratique. Cependant, la simulation numérique directe des équations de Navier-Stokes est encore limitée à des nombres de Reynolds modérés.

Les méthodes CFD (Computational Fluid Dynamics) ont l'avantage de mettre en œuvre les équations générales de la mécanique des fluides avec un minimum des hypothèses. Elles résolvent notamment les équations non-linéaires instationnaires et compressibles.

La discrétisation des équations de Navier-Stokes et de conservation de la masse est faite sur des éléments quadrilatéraux ou triangulaires, réguliers ou non selon la complexité de la géométrie. Elle conduit à un système d'équations non-linéaires couplées. Ce système est résolu de manière itérative. Le premier travail à accomplir dans la réalisation d'une simulation numérique est la définition d'un maillage adapté à la nature de l'écoulement. En particulier, le maillage doit être fin dans les zones où l'on atteint des gradients physiques très importants. Une connaissance à priori du champ de vitesse tiré d'expériences sur des écoulements similaires est donc utile pour l'établissement du maillage. Le maillage peut être raffiné à partir des résultats obtenus en identifiant les zones de l'écoulement dans lesquelles le calcul ne converge pas parfaitement (par exemple les éléments dans lesquels la condition d'incompressibilité n'est pas complètement satisfaite). [24]

2.5.2 Présentation de gambit et de fluent

La résolution par le logiciel de simulation numérique des écoulements FLUENT nécessite la présentation de logiciel GAMBIT.

2.5.2.1 Gambit

GAMBIT est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage.

Gambit est un logiciel qui permet de réaliser des géométries en 2D ou 3D et de construire le maillage.

Largement répandus dans l'industrie (automobile, aéronautique, spatiale, ...etc.) en raison de son interface graphique puissante, il permet aussi de réaliser tout type de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs. [24]

2.5.2.2 Choix du maillage

Le choix du maillage est un point essentiel dans la précision et l'exactitude des résultats numériques. Pour ce faire, on doit déterminer les paramètres optimaux et choisir une stratégie de maillage qui répond à nos objectifs, Parmi ces paramètres, on peut citer :

- le nombre de mailles ;
- la distance entre les mailles (concentration des mailles) ;
- la forme de la maille ;
- les paramètres de déformation pour le cas du maillage déformable. [24]

Les différentes formes de maillage des faces montrés dans le tableau II-1:

Type des cellules en 2D La forme de maillage Exemple

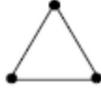
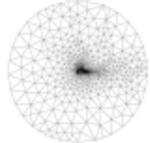
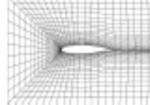
Type des cellules en 2D	La forme de maillage	Exemple
Triangulaire		
Quadrilatérale		

Tableau II.1 : Les différentes formes de maillage des faces.

Aussi il permet de choisir le type de maillage des faces selon les options suivantes :

Option	Description
Map	Crée une grille régulière et structurée des éléments du maillage.
Submap	Divise une face en plusieurs régions de façon à ce qu'on puisse leur appliquer Map.
Pave	Crée une grille non structurée des éléments du maillage.
Tri primitive	Divise une face en trois régions quadrilatérales et crée un maillage dans chaque région de la face.

Tableau II.2: Description des types de maillages des faces

2.5.2.3 Fluent

FLUENT est un code de calcul pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles non structurées, qui peuvent être produites pour des géométries complexes, avec une relative facilité. Les types de mailles supportées sont :

- Des mailles en 2D, triangulaires ou quadrilatérales ;
- Des mailles en 3D tétraédriques/hexaédriques/pyramidales ;
- Des mailles (hybrides) mixtes. [25]

FLUENT est écrit en langage de programmation C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offerte par ce langage (par exemple allocation de la mémoire dynamique). En outre, il utilise une architecture qui lui permet d'exécuter plusieurs processus simultanément sur le même poste de travail ou sur des postes séparés pour une exécution plus efficace. FLUENT s'utilise à travers une interface graphique, l'utilisateur avancé peut adapter ou augmenter aux besoins l'interface en écrivant des macros et des fonctions de menu, afin d'automatiser certaines procédures.

Ainsi, à titre non exhaustif, FLUENT permet les capacités de modélisation suivantes :

- Ecoulements 2D ou 3D ;
- Ecoulement stationnaire ou instationnaire ;
- Ecoulements incompressibles ou compressibles (subsoniques, transsoniques, supersoniques ou hypersoniques) ;
- Ecoulements non visqueux, laminaires ou turbulents ;
- Fluide Newtonien ou non ;
- Transfert de chaleur forcé, par conduction, par convection ou les deux (conjugue) ou radiatif ;
- Ecoulements avec changements de phases ;
- Ecoulements en milieu poreux.

Fluent emploie la méthode des volumes finis comme procédé de discrétisation des équations qui gouvernent l'écoulement, telle que l'équation de continuité et quantité de mouvement et de l'énergie. En utilisant cette technique basée sur l'intégration des équations sur un volume de contrôle, "Fluent" passe par les étapes suivantes :

- Division du domaine en volumes de contrôle discrets en utilisant une grille (maillage) de calcul.
- Intégration des équations gouvernantes sur les volumes de contrôle individuels, afin de construire les équations algébriques pour les variables discrètes dépendantes, les inconnues telles que : vitesses, pressions et températures.

-Linéarisation des équations discrétisées et solution du système d'équations linéaires résultant, pour tenir compte des effets turbulents, le logiciel de calcul offre la possibilité de choisir un des modèles de turbulence suivants :

Le modèle à une équation de Spalart Allmaras ;

Le modèle à deux équations $k - \varepsilon$;

Le modèle à deux équations $k - \omega$;

Modèle de contrainte de Reynolds (Reynolds stress model).

Le choix entre ces modèles se base principalement sur les résultats que donne chacun des modèles suivant les conditions aux limites prédéfinies. Il est vrai qu'un modèle peut donner de meilleurs résultats par rapport à un autre, mais ceci est dû principalement à la nature des cas étudiés et à la correspondance du modèle de turbulence avec les conditions aux limites [25]

2.6 Les fonctions UDF's

2.6.1 Définition

Une fonction ou procédure UDF (User Defined Function) est un programme de l'utilisateur qui peut être chargé dynamiquement par le code FLUENT pour enrichir les paramètres standard du code. Par exemple, nous pouvons employer un UDF pour définir les conditions aux limites propres à l'utilisateur, les propriétés matérielles et limites de source pour le régime d'écoulement, comme on peut spécifier les paramètres modèles adaptés aux besoins de l'utilisateur et initialiser une solution, etc. [23]

Les UDF's sont écrites en langage de programmation « C », il est permis aux UDF d'accéder aux données en utilisant des macros et fonctions définies par sa propre bibliothèque. Elles sont interprétées ou compilées par le compilateur de FULENT puis liées au code FLUENT par l'intermédiaire des commandes figurants sur le Menu d'interface graphique.

Chaque UDF doit contenir la directive d'inclusion de dossier « **udf.h** » ("#include udf.h"), au début du dossier de code source, qui laisse les définitions des macros prédéfinis et ceux fournis par FLUENT et des fonctions à inclure pendant le processus de compilation. Notez que des valeurs qui sont passées à un solveur par un UDF ou retournées par le solveur à un UDF sont spécifiées dans les unités du système internationale.

Des fichiers source contenant UDF peuvent être interprétés ou compilés dans Fluent. Pour un UDF interprété, des fichiers source sont interprétés et chargés directement au temps d'exécution, dans un processus à pas unique. Pour un UDF compilé, le processus implique deux étapes séparées. Une bibliothèque partagée de code d'objet est d'abord construite et alors elle est chargée dans Fluent. Une fois qu'interprété ou compilé, l'UDF deviendra évidente et sélectionnable dans les panneaux

de graphiques Fluent, et peut être accroché à un solveur en choisissant le nom de fonction dans le panneau approprié.[23]

2.6.2 But des UDF's

Les UDF's permettent à l'utilisateur de FLUENT d'adapter pour ses besoins les modélisations particulières. Ils peuvent être employés pour une série d'applications :

- ♣ La personnalisation des conditions aux limites, des définitions de propriétés matérielles, et des taux de surface et de volume de réaction, etc.
- ♣ Ajustement des valeurs calculées sur une base d'une fois-par-itération.
- ♣ Initialisation d'une solution.
- ♣ Exécution lors du chargement d'une bibliothèque compilée d'UDF.
- ♣ Perfectionnement du solveur.
- ♣ Perfectionnement des modèles Fluent existants (multi phases, VOF, etc.)[23]

2.6.3 Programme C++ pour crée UDF d'outilte (pion) motion

```
#include <stdio.h>

#include "udf.h"

#include "dynamesh_tools.h"

#define PI 3.141592654

0DEFINE_CG_MOTION(osc_vert, dt, v_cg, omega, time, dtime)
{
    Thread *t;

    real omega_t=104.7;

    NV_S(v_cg, =, 0.0);

    NV_S(omega, =, 0.0); /*initialisation des vitesses*/

    t=DT_THREAD(dt);

    omega[2]= omega_t;

    v_cg[0]= -0.00233;

    Message("time:%f vx_cg:%f vy_cg:%f omegaz:%f\n",time,v_cg[0],v_cg[1],omega[2]);

}
```

2.7 Etapes de la simulation dans gambit

Cette section est une revue de toutes les options sélectionnées dans « Fluent » de sorte qu'un lecteur attentif ne devrait avoir aucun problème à reproduire les résultats. Toutes les autres options qui ne sont pas présentées sont les valeurs par défaut proposées par le logiciel. Par ailleurs, cette section donne plusieurs informations qui ne sont pas données dans les manuels.

2.7.1 Création de la géométrie

Dessiner les traits comme il est montré ci-dessous dans la figure

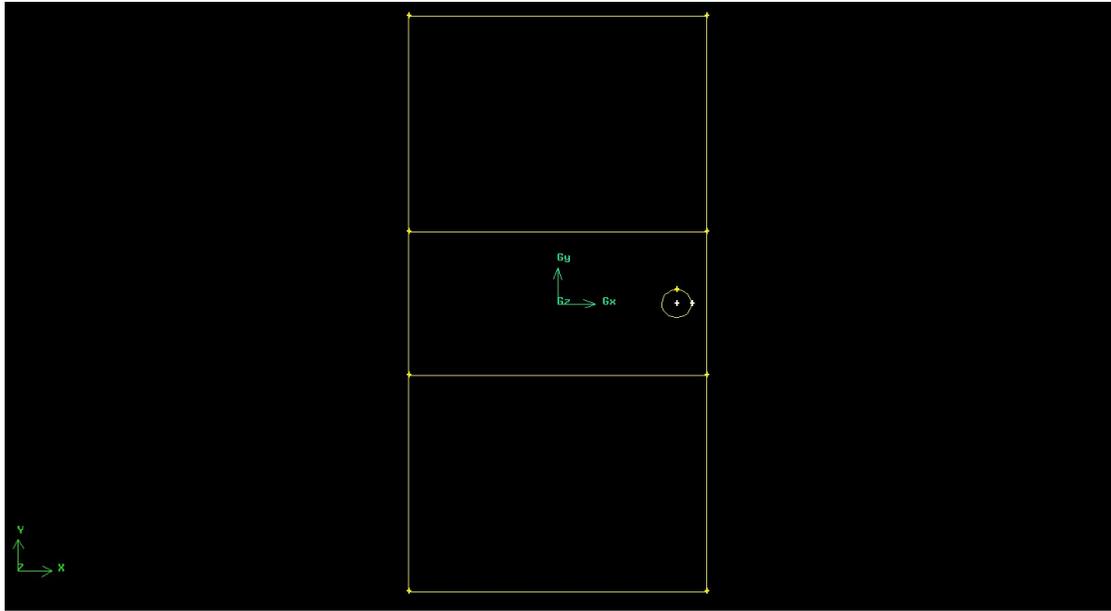


Figure II.6 : Plan d'esquisse de la simulation

Créer les faces des deux rectangles supérieure et inférieure qui définissent la partie qui va rester solide des deux plaques, le rectangle au centre qui est la zone que l'épaulement de l'outil de malaxage va chauffer grâce à son frottement avec les deux plaques et le cercle qui fait référence au pion de l'outil de malaxage.

Après avoir créé toutes les faces, on doit utiliser la fonction « subtract » qui va nous permettre d'enlever la face du pion de la zone de malaxage pour créer un Wall.

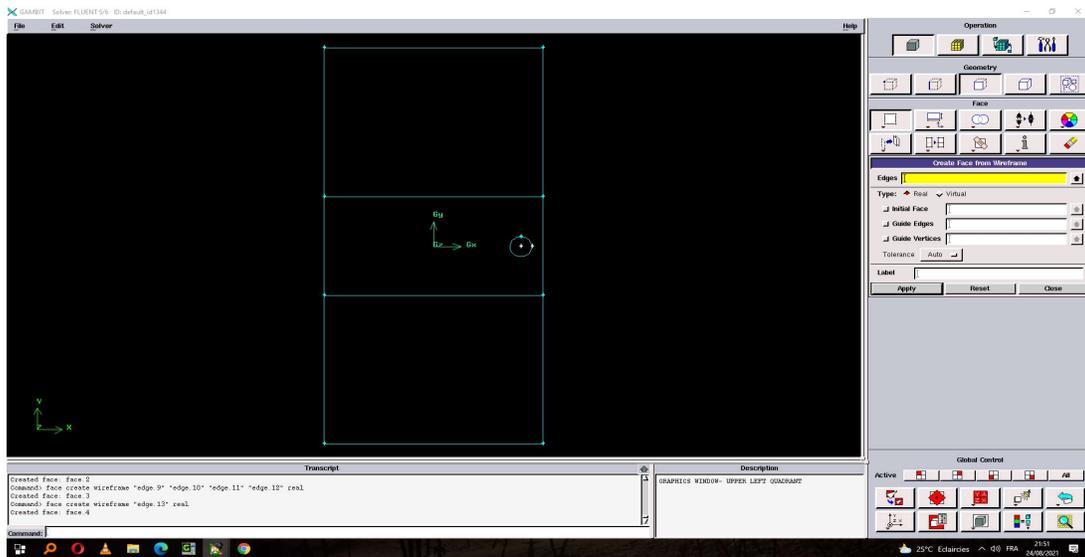


Figure II.7 : Illustration de de la fonction subtract

2.7.2 Choix des types de zone et de frontière dans gambit

Créer les Wall des rectangles qui vont définir les limites de propagation du phénomène et créer le Wall du pion qui vas simuler la dimension du pion.

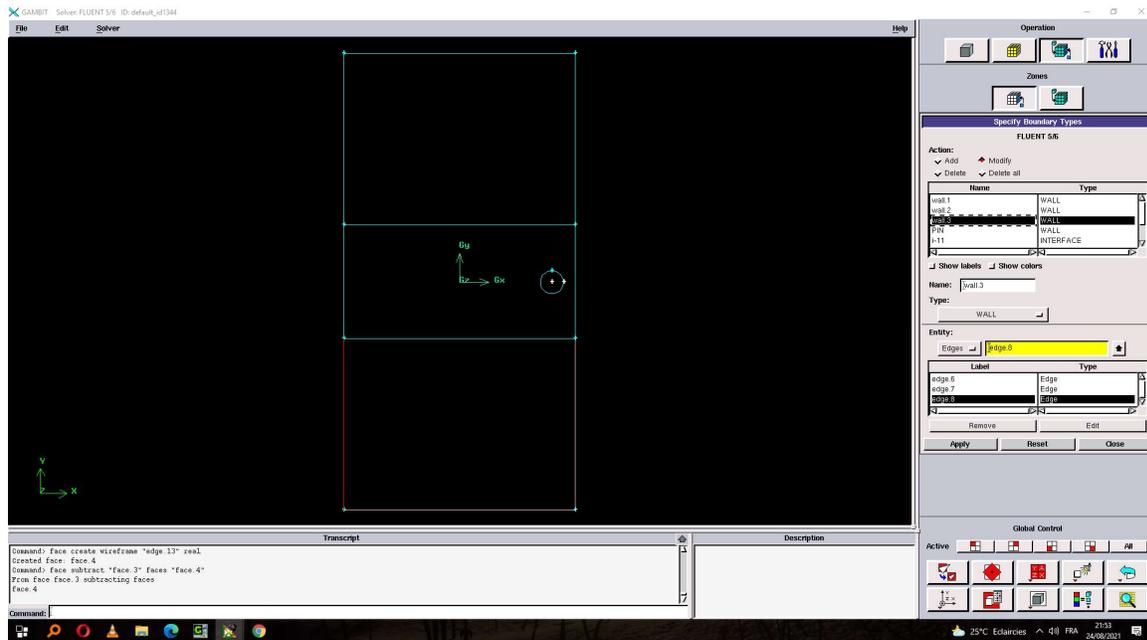


Figure II.8 : Illustration de la création des walls

Créer les interface i-11 et i-12 qui superposer sur eux même

Créer les interface i-21 et i-22 qui superposer sur eux même

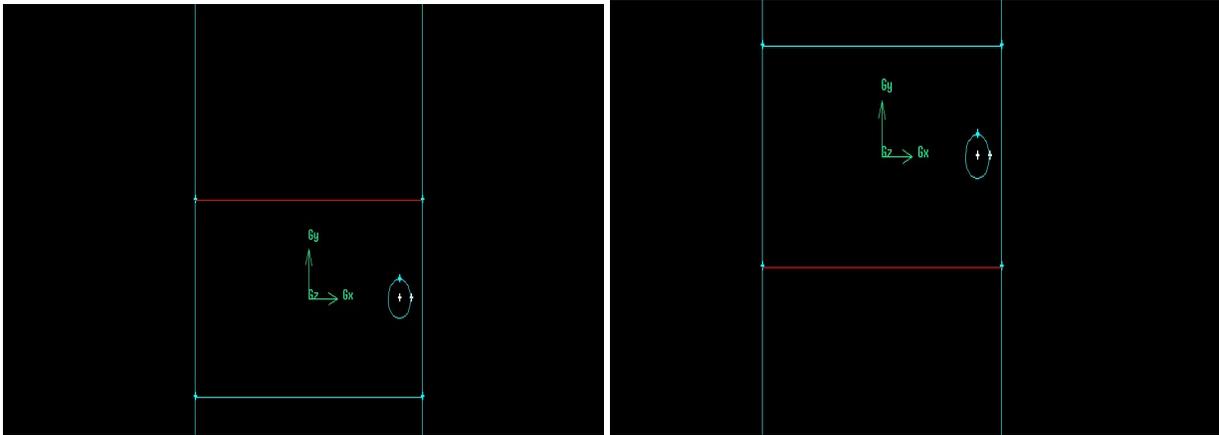


Figure II.9 : Illustration de la création des interfaces

Définir le type des trois faces crée comme ci-dessous :

- face 1 en solide car c'est la première zone qui ne va pas subir de transformation physique
- face 2 en solide car c'est la deuxième zone qui ne va pas subir de transformation physique
- face 3 en fluide car cette zone va se passer de l'Etat solide a l'Etat pâteux qui est le plus proche du fluide

2.7.3 Choix de la stratégie de maillage

Créer der des grilles de maille avec la dimension comme ci-dessous :

- Les grille du côté droit et gauche de la face 1 et face 2 avec un intervalle size de 1.5
- Les grille supérieur et inferieure DE la face 1 et face 2 avec une intervalle size de 2
- Les gris centrale de la face 1 et face 2 avec une intervalle size de 1

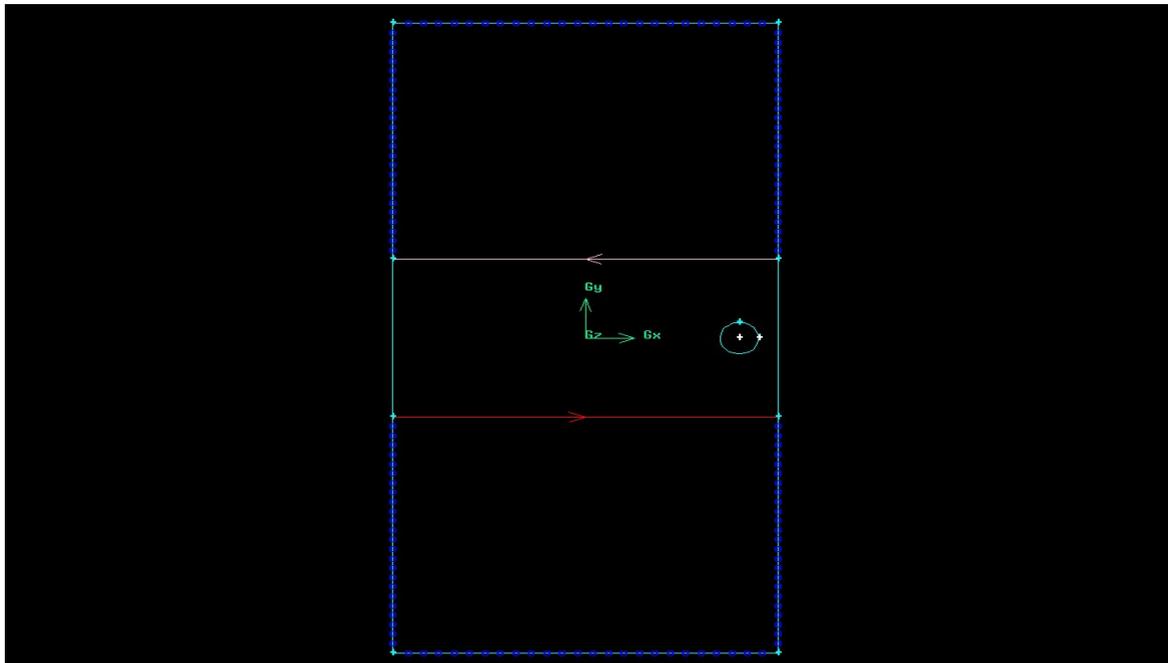


Figure II.10 : Illustration de la création des grilles

Crée les MeSH faces avec les tailles ci-dessous :

Face 1 et face 2 avec un intervalle size de 2

Face 3 avec un intervalle size de 0.4

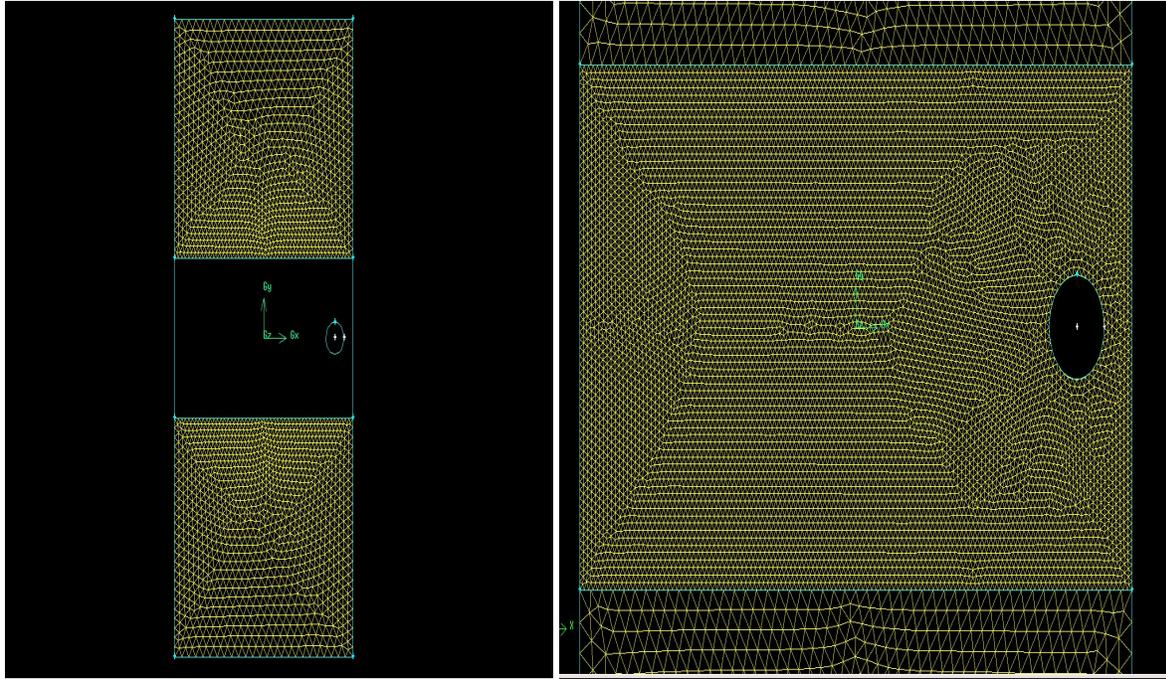


Figure II.11 : Illustration de la création du maillage

2.8 Etapes de la simulation dans fluent

Le choix des matériaux permet de personnaliser les équations différentielles dans le sens où les constantes sont spécifiées. Créer les matériaux ci-dessous :

Solide : -al2000

-al7000

Fluide : -al2000

-al7000

Enregistrer les matériaux car c'est celui qui se rapproche le plus de l'outil du soudage FSW

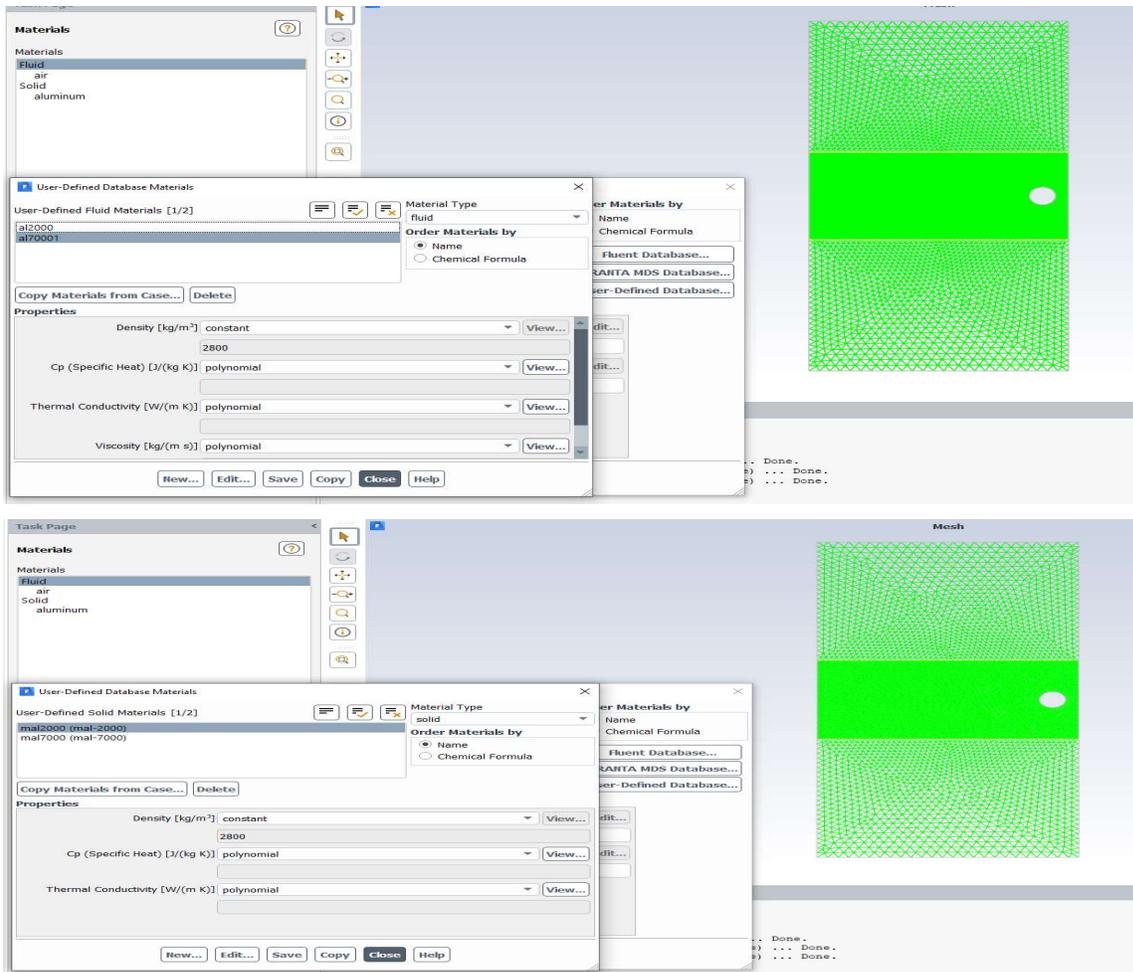


Figure II.12 : Méthode d'enregistrement des matériaux

Un nombre impressionnant de UDF peut être utilisé afin d'améliorer les options déjà existantes. Plusieurs UDF sont reliées à des modèles particuliers tandis que d'autres peuvent être utilisées dans n'importe quelle modélisation. Cette section présente et explique les UDF utilisés dans la section 3 du présent mémoire. Pour plus d'informations, il faut consulter le manuel sur les UDF de « Fluent ». C'est l'aide la plus claire provenant avec le logiciel. « Fluent » accepte le langage C et il faut donc programmer les UDF en C. Il faut ensuite compiler ou interpréter les fonctions dans « Fluent ». Introduire UDF dans fluent et crée une bibliothèque pour cette Udf et le charge pour qu'il soit utilisable dans la simulation [27]

Choisir le modèle de simulation VOF et sélectionne les deux phases de fluide al2000 et al-7000

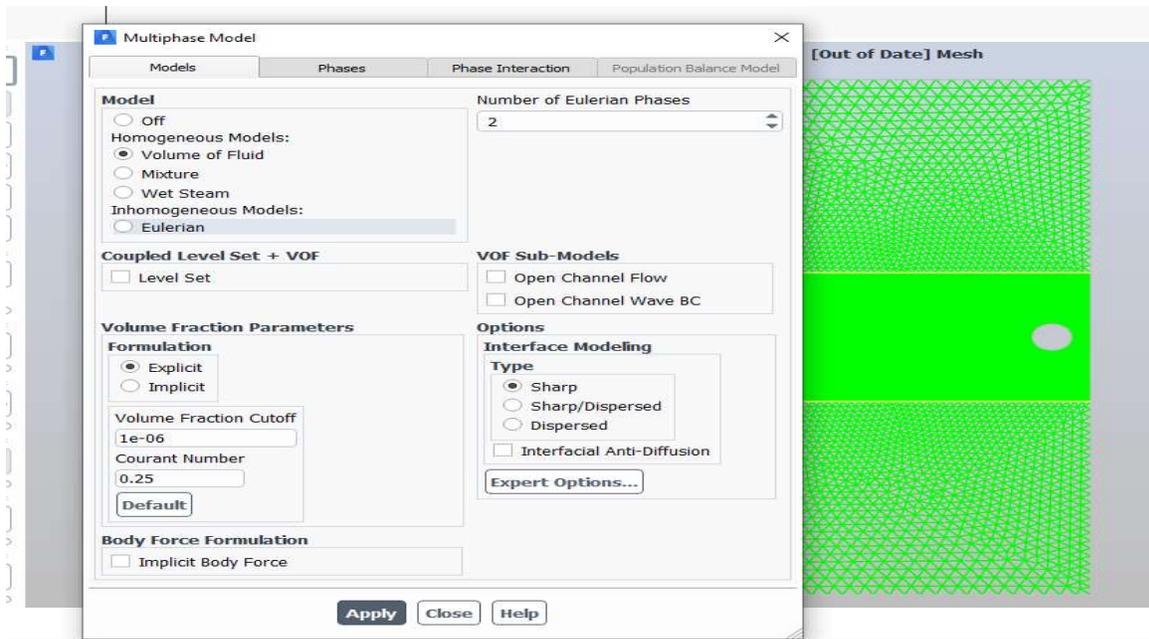


Figure II.13 : Choix de l'interprétation du model la simulation

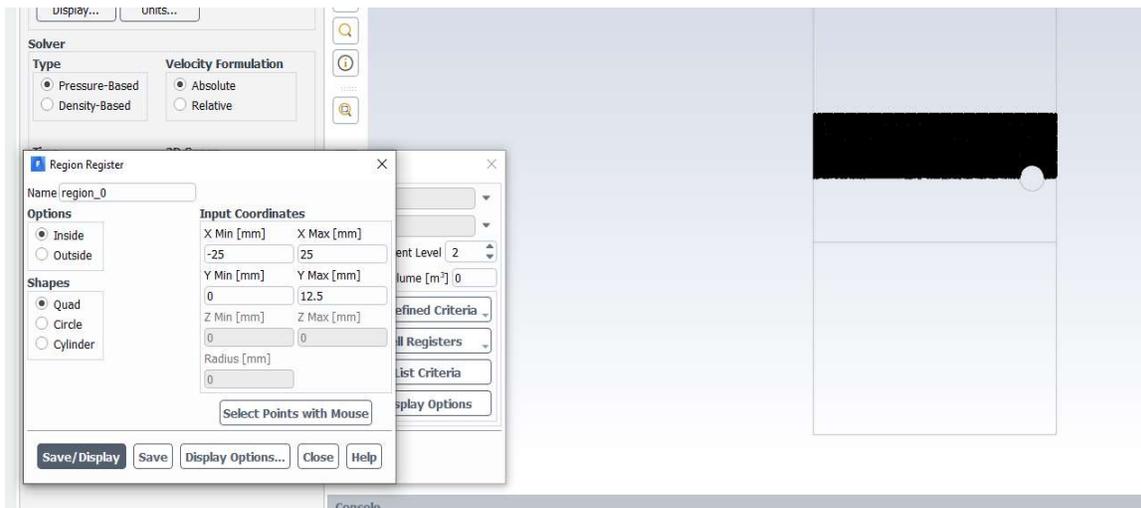


Figure II.14 : Création des régions

Pour tous les problèmes étudiés, « Fluent » solutionne automatiquement les équations de continuité et de quantités de mouvement. Il est impossible d'étudier séparément ces équations à moins de les programmer avec les « User-defined scalar » UDS. La raison est que le logiciel est optimisé de manière à solutionner les problèmes de la mécanique des fluides. Il ne solutionne pas en principe n'importe quelles équations différentielles. Une des premières options à choisir dans les modèles est

celle de l'énergie. Activer les équations d'énergie et choisir le domaine laminaire car c'est un système visqueux [28]

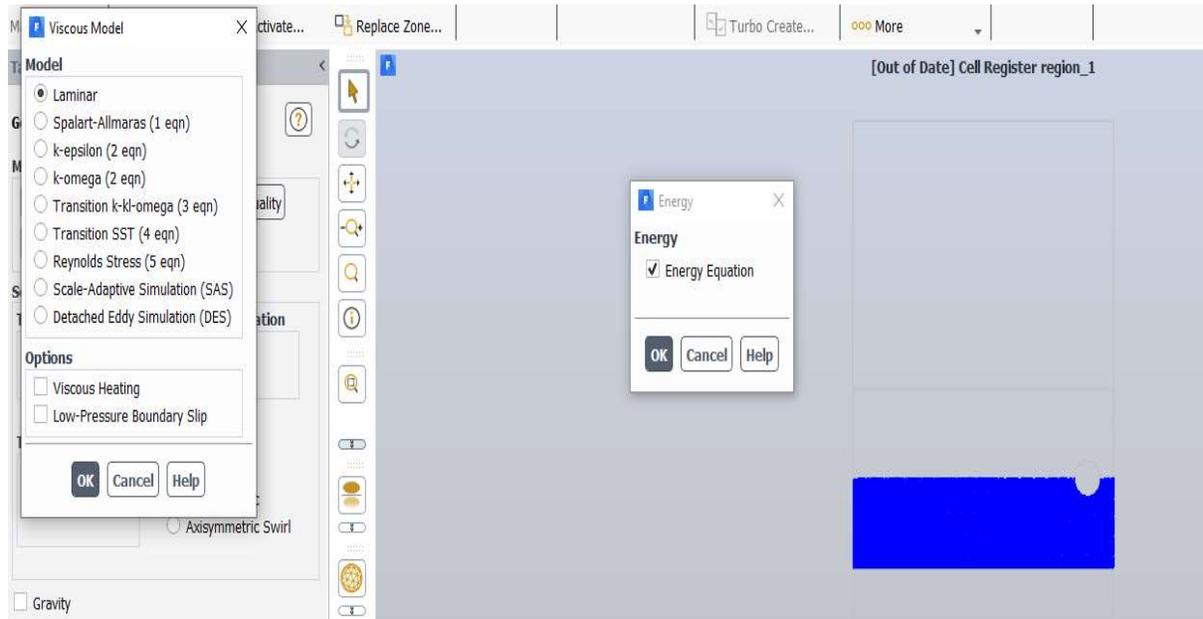


Figure II.15 : Choix des équations utilisé dans la simulation

Après avoir charger UDF on va activer dynamique MeSH et créer les deux dynamique MeSH ci-dessous :

-pin qui vas simule outils ou lui action rigid body et mettre en place les mouvements de UDF introduit

-créer la zone de maillage qui se déformera comme montre dans la figure

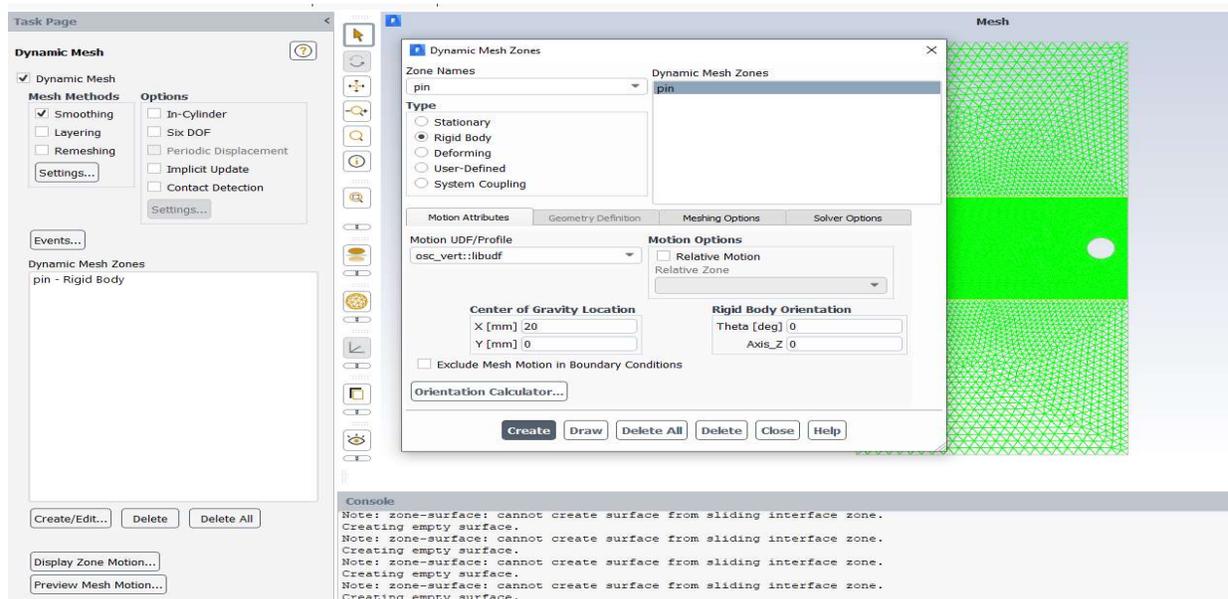


Figure II.16 : Création du dynamique MeSH

Une condition frontière qu'il est aussi nécessaire de formuler est la température en cas où il y aurait un retour de fluide 1. Physiquement parlant, le flux de chaleur ne peut pas sortir si le flux à l'intérieur de la zone de malaxage est plus petit que le flux à la sortie. Lorsque cette situation survient, il y a un retour de fluide et « Fluent » est optimisé afin que la frontière agisse comme si c'était une propagation normale du flux. Il faut donc spécifier une température afin que « Fluent » calcule une masse qui entre dans le système. À noter qu'en travaillant sur différents problèmes, il est possible de remarquer que lorsque cette situation survient, le système se stabilise puisque la température est fixée. [28]

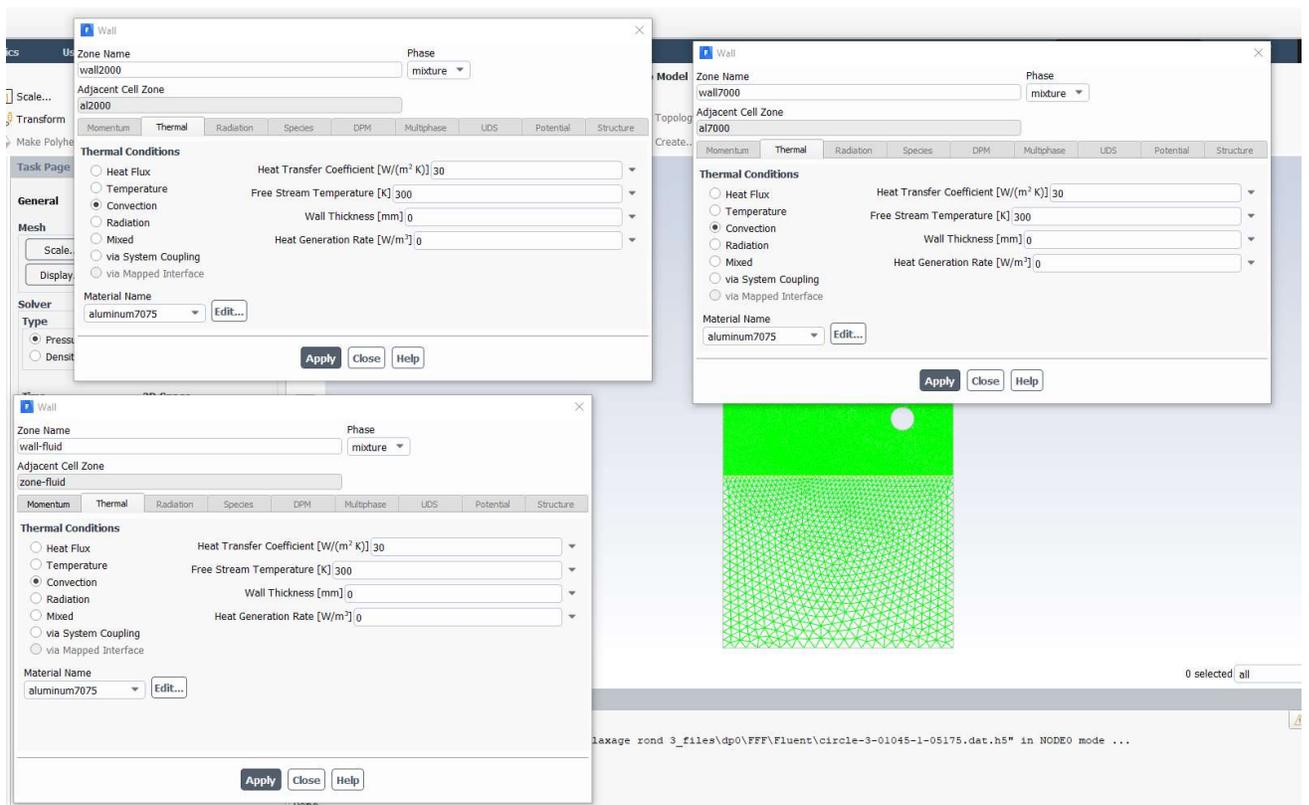


Figure II.17 : Configuration des conditions des parois

Créer l'animation enregistrée après chaque time-Step qu'on configure dans la simulation à partir des résultats dont on a besoin pour effectuer notre étude.

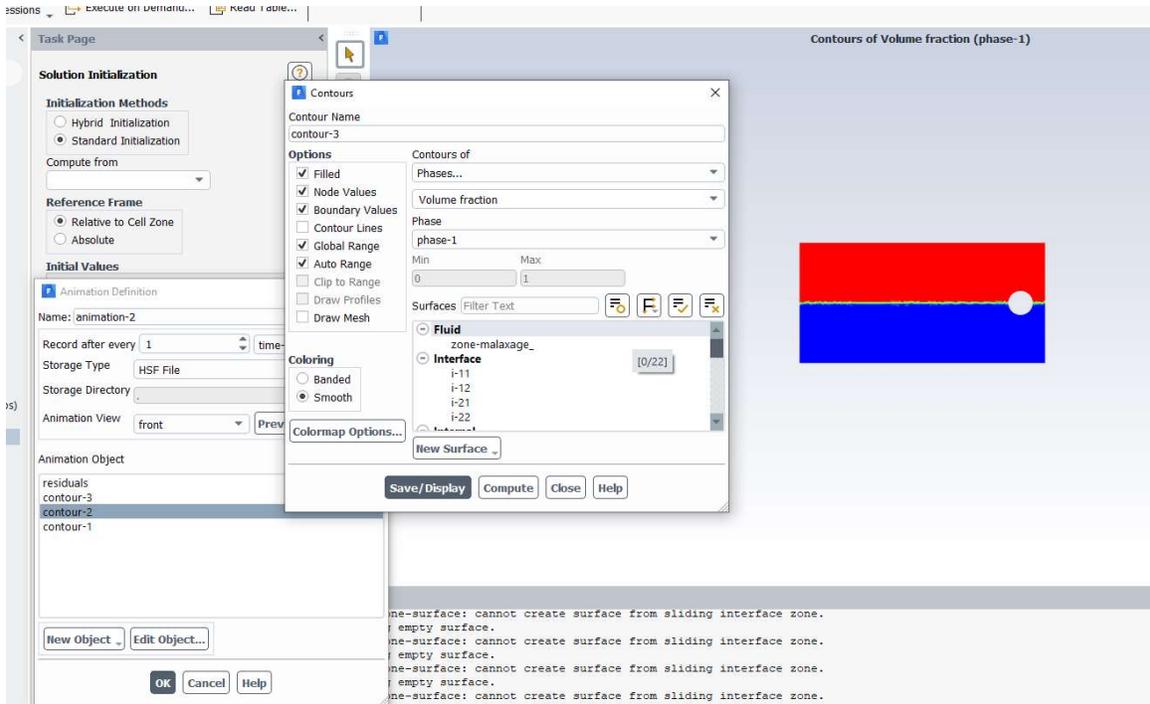


Figure II.18 : Création des animations

CHAPITRE 3 : Résultats numérique et discussion

3.1 Introduction

Cette étude décrit l'utilisation du code dynamique des fluides, FLUENT, afin de modéliser le mélange de deux métaux, en l'occurrence aluminium 2017A et aluminium 7075, autour du pion de l'outil de soudage (FSW). L'objectif principal est d'acquérir une meilleure compréhension du flux de matière autour d'un outil. Le modèle utilisé a démontré un grand nombre de phénomènes identiques à ceux du processus réel. Le modèle a également généré une quantité suffisante de chaleur, ce qui conduit à une bonne estimation de la température de soudure.

3.2 Résultats numérique des pressions

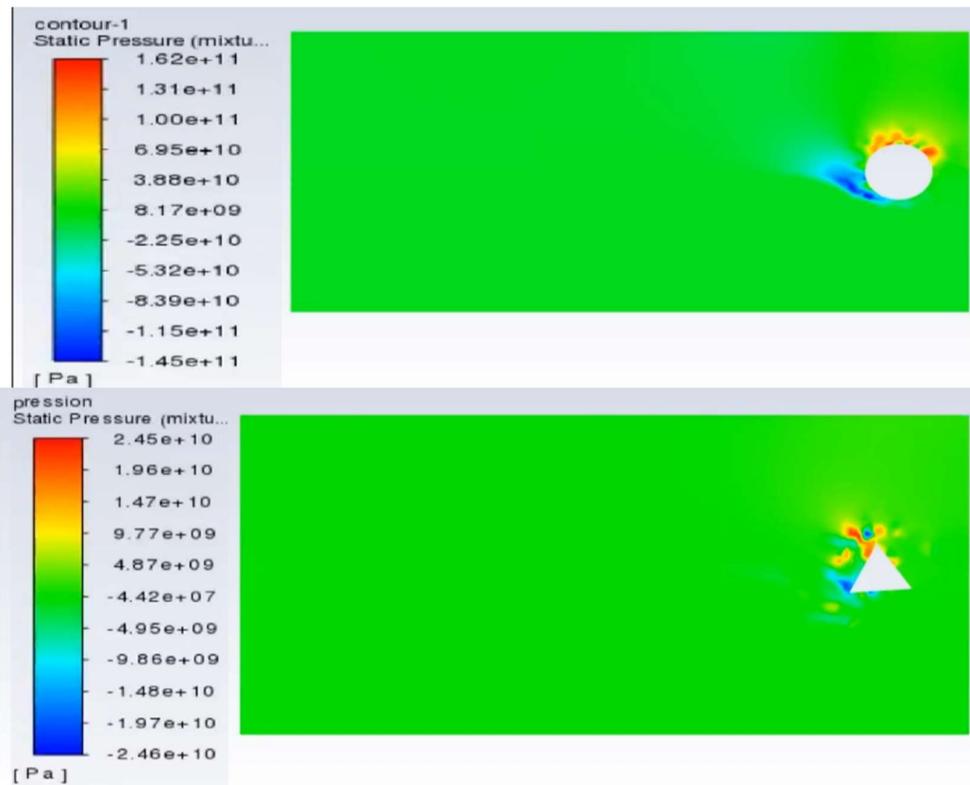
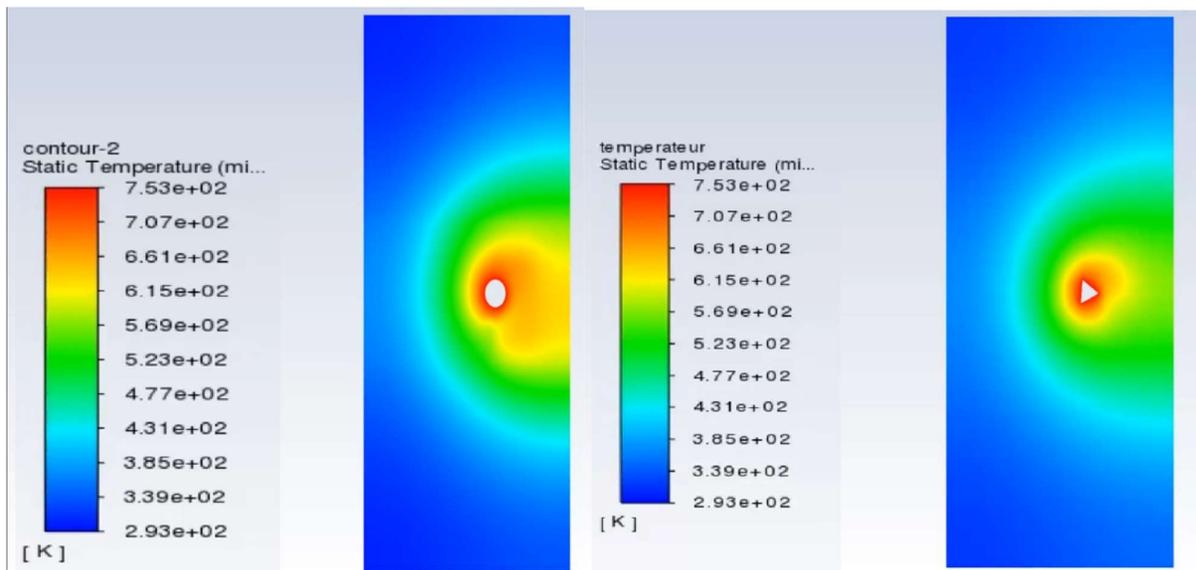




Figure III.1 Pression statique en (Pa) pour différentes géométries de pion

La figure montre trois images enregistrées de la pression a $t = 0.5$ s dans la simulation du soudage FSW de trois outils différent. On remarque que l'application de la pression sur les outils est différente, la pression est en forme circulaire dans l'outils en forme de cercle contrairement aux outils en forme de carrée et de triangle dans les quelle l'application des pressions est soumise principalement dans ces angles. On peut donc déduire que la forme de outils à un effet sur l'application des pressions sur les outils.

3.3 Résultats numérique des températures



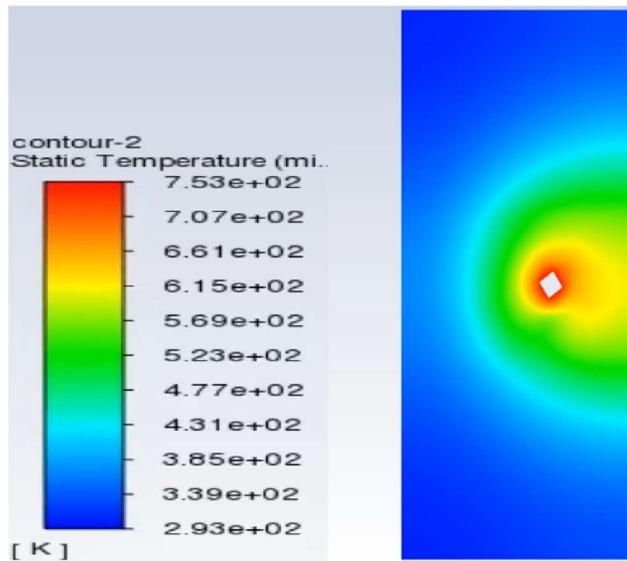


Figure III.2 Distribution des températures pour différentes formes de pion

La figure montre la distribution des températures dans la simulation du soudage FSW sur les deux différents matériaux a soudé. On remarque que le flux de chaleur dégagé par l'outil en forme de cercle est supérieur aux deux autres. La forme circulaire de l'outil en forme de cercle a le plus grand flux de chaleur dégagé car tout le périmètre de l'outil est considéré comme zone de malaxage, alors que dans les deux autres outils, les zones de malaxage sont les angles, c'est pour ça que l'outil en forme de carré dégage plus de flux de chaleur que l'outil en forme de triangle car l'outil en forme de carré a plus de zone de malaxage que l'outil en forme de triangle.

3.4 Résultats numériques des phases

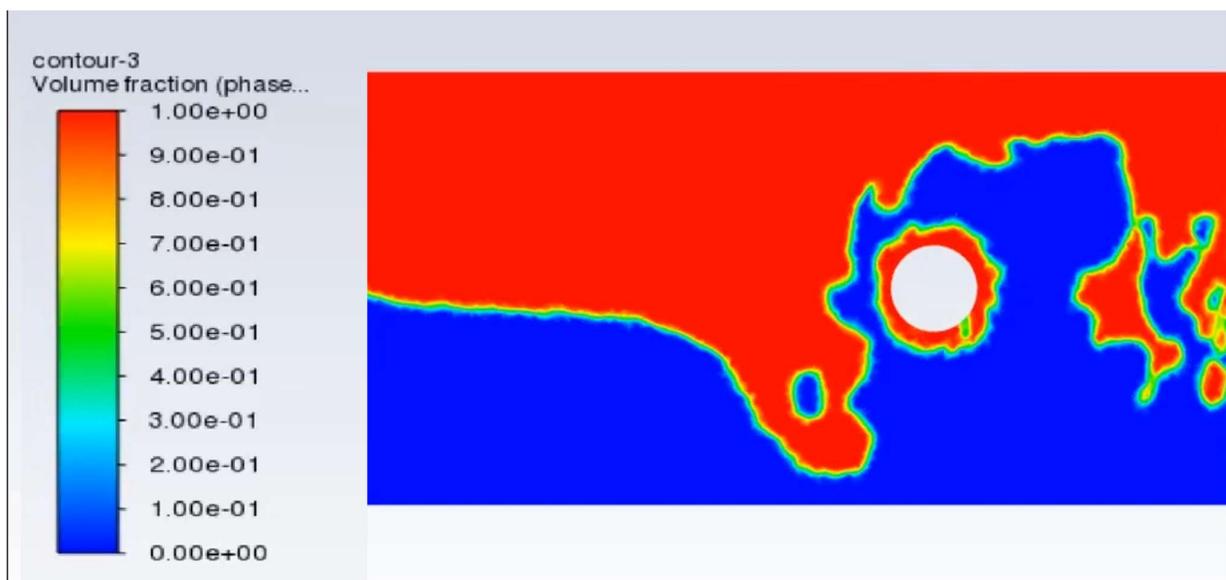


Figure III.3 Phase de la zone de malaxage de l'outil en forme de cercle

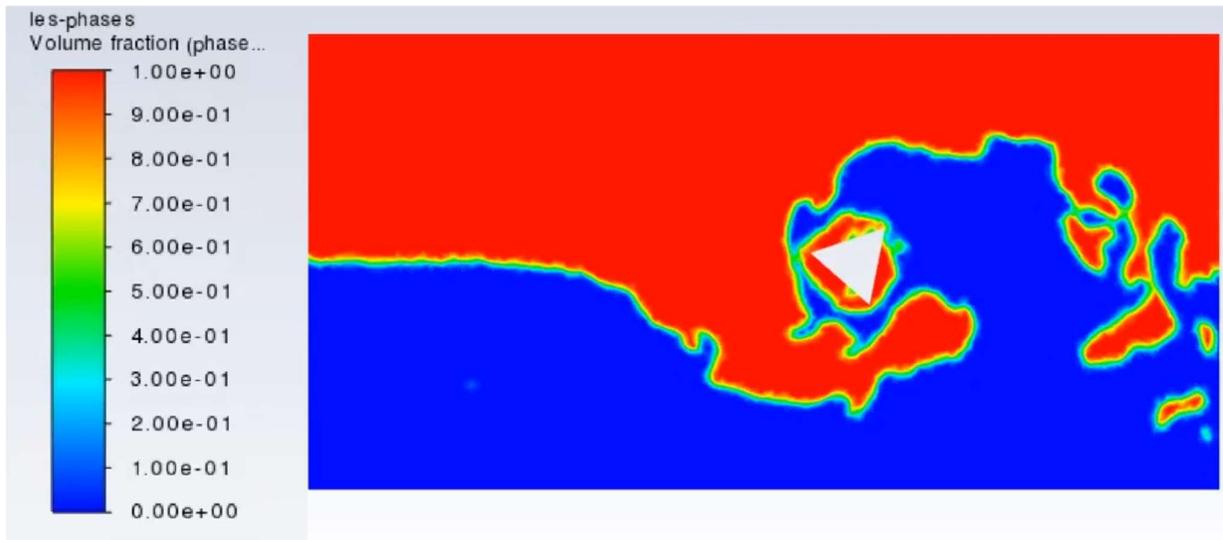


Figure III.4 Phase de la zone de malaxage de l’outil en forme de triangle

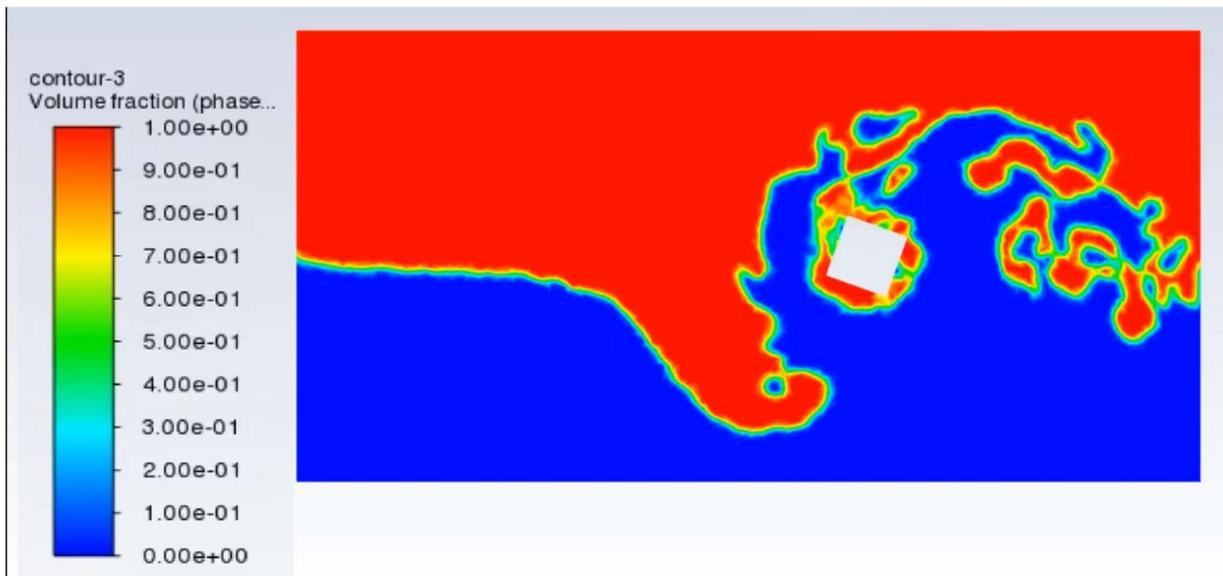


Figure III.5 Phase de la zone de malaxage de l’outil en forme de carre

La figure montre la forme des mélanges résultante du soudage FSW dans la zone qui subit une transformation de l’Etat solide a l’Etat pâteux et il est évidant que les tous mélangent sont asymétrique. On remarque que l’outil en forme de cercle est le plus efficace pour avoir le plus de mélange des deux matériaux car tous son périmètre et considérai comme zone de malaxage. Just après lui le carré est plus efficace que le triangle car il a plus de zone de malaxage qui ont comme principale responsabilité prioritaire de mélange les deux matériaux.

3.5 Résultats numérique des vitesses :

La figure montre la vitesse du fluide autour des différentes formes d'outils utilisés. On remarque que la Vitesse autour de l'outil en forme de cercle est supérieure qu' autour de l'outil en forme de carré et que la Vitesse du fluide autour de l'outil en forme du carré est supérieure qu' autour de l'outil en forme de triangle. Ce qui veut dire que la taille de la zone de malaxage influe aussi sur la vitesse du fluide autour de l'outil.

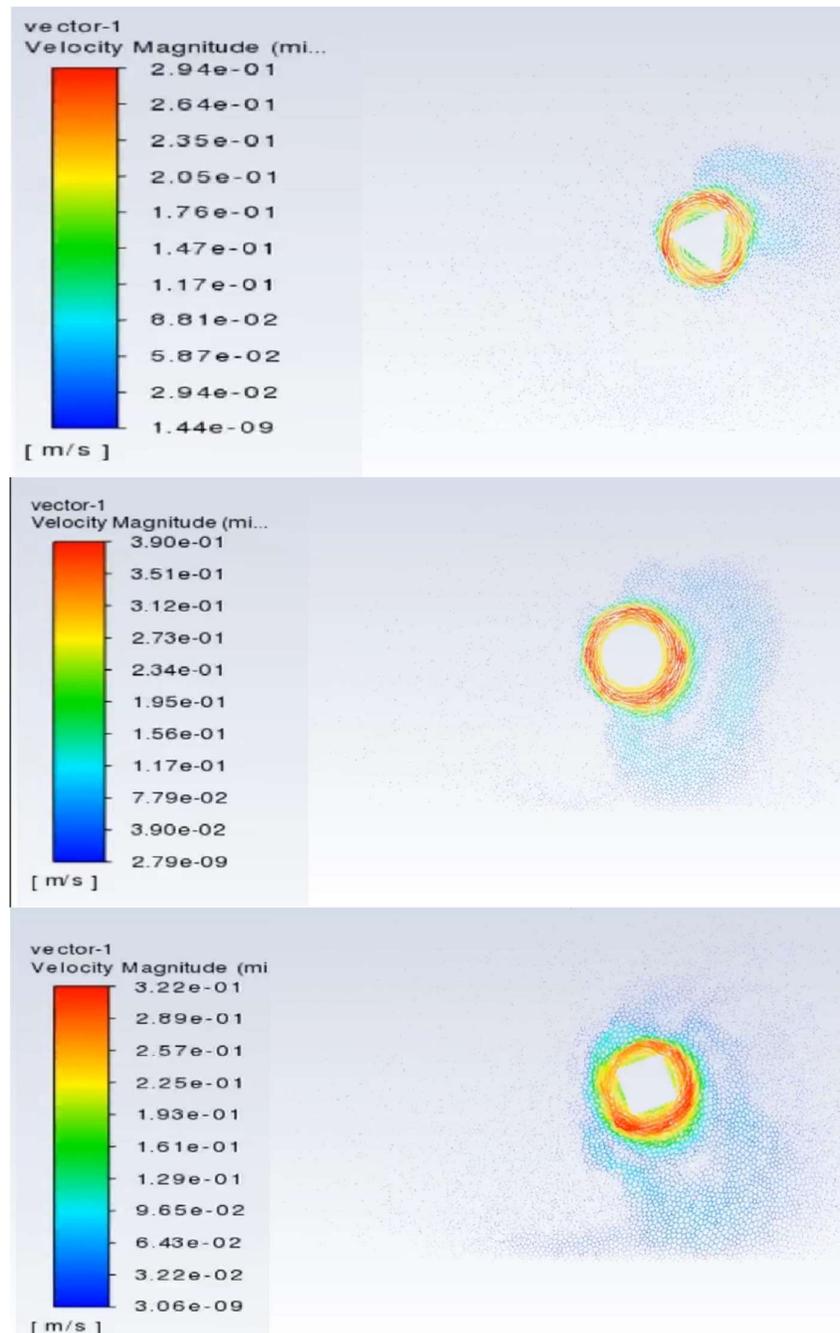


Figure III.6 Champ de vitesse d'écoulement pour différentes géométries de pion

Conclusion générale

L'objectif de ce projet est de proposer une stratégie d'optimisation par le modèle numérique 2D des phénomènes de transfert de chaleur transitoire, permettant l'amélioration de la qualité de la soudure et la prédiction des conditions de fonctionnement optimales du procédé d'assemblage FSW. Ce travail pour but de réduire le nombre des essais expérimentaux nécessaires pour prédire les meilleurs paramètres opératoires du procédé et donc de réduire le coût et le temps de développement.

D'après le résultat de la simulation on peut déduire que la forme de l'outils du soudage FSW a un impact sur la distribution de la température, l'application de la pression, la vitesse du fluide, et la qualité du mélange. Donc pour optimiser le soudage FSW il faut prendre en considération l'outils qu'on vas utiliser et pour cela il nous faut choisir la bonne forme de l'outil qui auras un maximum de zone de malaxage la taille de l'outil qui vas définir la qualité du mélange.

La cause principale de ces impacts est la taille des zones de malaxage sur l'outil. Plus la taille des zones de malaxage est grande :

- l'outil auras moins de possibilité de s'user
- la dissipation de la chaleur aura augmenté sur les deux plaques à soudé
- la qualité du mélange des deux matériaux sera meilleur

Bibliographie

- [1] Roland CAZES : Ingénieur de l'École supérieure d'électricité - Ancien directeur technique de la société Sciaky
- [2] Didier DUPRAT : Docteur ingénieur en Génie mécanique - Bureau d'études. Aérospatiale Toulouse.
- [3] THÈSE présentée par Baptiste GUERIN pour obtenir le grade de Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne Spécialité : Sciences et Génie des Matériaux SOUDAGE D'ALLIAGES D'ALUMINIUM PAR LA TECHNOLOGIE FRICTION STIR WELDING BOBBIN TOOL soutenue à Saint-Etienne, le 4 mars 2010
- [4] THÈSE Doctorat, l'Université de Lorraine, Abdelaziz Timesli, Simulation du soudage par friction et malaxage à l'aide de méthodes sans maillage 27/04/2013, à Casablanca
- [5] UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE (USTHB), THESE DE DOCTORAT EN SCIENCE, BOUKRAA Moustafa, 21/07/2019, Simulation et optimisation du transfert thermique lors du soudage par friction malaxage FSW d'un métal
- [6] MÉMOIRE DE MASTER Réalisation d'une machine de soudage par friction malaxage, REZGUI Farouk, Septembre 2020
- [7] Assma HADOUICHE Caractérisation physico-chimique des alliages d'Aluminium utilisés comme matériau de revêtement mural, Université Med Khider Biskra, Mémoire de fin d'étude en Master,2014
- [8] Adrien Laurion, Intégration des alliages d'aluminium dans le câblage électrique automobile : procédés de mise en forme, microstructure et durabilité, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), thèse doctorat,19/07/2012
- [9] Christine BLANC, Tenue en corrosion de l'alliage d'aluminium 2024 revêtu d'une couche de conversion au chrome trivalent Influence de l'état microstructural, L'UNIVERSITE DE TOULOUSE, thèse doctorat, 2018
- [10] Melle Yahy Sihem, Contribution à l'étude microstructurale des Alliages d'aluminium AlMgSi, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI -OUM EL BOUAGHI, mémoire master ,2012
- [11] DEBIH Ali, Effet du double traitement sur le comportement à la corrosion de l'alliage 6060, Université de M'sila, MASTER,2016
- [12] CHARLES MOREAU ing. Jr, EFFETS DES ELEMENTS ALLIES ET DE LA TREMPÉ LORS DES TRAITEMENTS THERMIQUES T4 ET DES VIEILLISSEMENTS ARTIFICIELS SUR LA MICROSTRUCTURE ET LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES ALLIAGES, L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI, MÉMOIRE MAÎTRISE EN INGÉNIERIE,2004 ALUMINIUM-SILICIUM DE TYPE 413
- [13] Mr. LAADJAL Djamel-Alliage d'aluminium-évolution de la microstructure et propriétés mécanique, UN IVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA, MEMOIRE DE MASTER,
- [14] OUAKAL Mohamed Islam &. REDJEM Seddik, ETUDE ET CARACTERISATION D'UN ALLIAGE D'ALUMINIUM DE SERIE 6000, Mohamed Boudiaf Université of M'sila, MASTER,2020
- [15] Emmanuel HERSENT, MODÉLISATION INTÉGRÉE DE LA PRÉCIPITATION POUR LE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE D'ALLIAGES D'ALUMINIUM À DURCISSEMENT STRUCTURAL, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, thèse doctorat,2010
- [16] Halimi R, Bezzazi B, Bouda A, ABOU, M.H.D, et MIMOUNI 2016. ETUDE et Analyse du Comportement Mécanique et viscoélastique en flexion des composites stratifiés
- [17] O Mimouni, Riad Badji, Mohamed Hadji, and Afia Kouadri-Henni, Finite volume modeling of laser assisted friction stir welding of 2017A-T451 aluminum alloy for enhanced sustainability of welded joints Citation: AIP Conference Proceedings 1769, 100014 (2016); doi: 10.1063/1.4963508 View online: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4963508>
- [18] Sabine Philippe, Développement d'une formulation arbitrairement lagrangienne eulérienne pour la simulation tridimensionnelle du laminage de produits plats, T H E S E pour obtenir le grade de Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris Spécialité « Mécanique Numérique »

- [19] MIMOUNI Oussama, RELATION MICROSTRUCTURE-PROPRIETES MECANQUES LORS DU SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE (FSW) D'ALUMINIUM AERONAUTIQUE, THESE DE DOCTORAT,25/11/2020
- [20] Sabrina Gastebois, Simulation numérique du soudage FSW a l'aide d'une formulation ALE, Doctorat Paris Tech T H È S E,9 juillet 2015
- [21] C. W Hirt, B.D. Nichols, « volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries » Journal of Computational Physics 39, 1 (1981), p201-225
- [22] Olivier Lorrain, ANALYSES EXPERIMENTALES ET NUMERIQUES DU PROCEDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE FSW, Doctorat ParisTech, 11 juin 2010
- [23] Bessanane Nabil, « simulation numérique de la combustion turbulente dans des géométries complexes » Thèse magistère en mécanique/énergétique, 29 Janvier 2008
- [24] Boudali Errebaï Farid, ETUDE HYDRODYNAMIQUE D'UN ECOULEMENT VISQUEUX A TRAVERS UNE MATRICE POREUSE, mémoire de magistère, 8 avril 2013
- [25] Baatouche Riyane, Etude numérique de l'effet de la forme des tubes sur les caractéristiques thermo-hydrauliques d'un échangeur de chaleur, Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique,20 / 06 /2021
- [26] Gilles Fourestey, Une méthode des caractéristiques d'ordre deux sur maillages mobiles pour la résolution des équations de Navier-Stokes incompressible par éléments finis, rapport de recherche, avril 2002
- [27] DAVID NOLET, MODÉLISATION PAR LA MÉTHODE DES VOLUMES FINIS DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE DANS UN HYDRURE MÉTALLIQUE ET Exemple D'APPLICATION DANS UN PROBLÈME DE FUITE DE RÉSERVOIR, MÉMOIRE, Avril 2006
- [28] Yann Guevel, Méthodes numériques adaptées à la résolution des équations de Navier-Stokes, Thèse, 15 janvier 2016
- [29] Lionel FOURMENT, Simulation numérique du soudage FSW à l'aide d'une formulation ALE, présentée et soutenue publiquement par Sabrina GASTEBOIS, l'École nationale supérieure des mines de Paris, 9 juillet 2015
- [30] LABED Mohammed Mouhieddine, MÉMOIRE DE MASTER, Réalisation d'un montage de soudage des métaux dissimilaires, 26 juin 2019
- [31] International Journal of Applied Engineering and Technology ISSN: 2277-212X (Online) An Open Access, Online International Journal Available at <http://www.cibtech.org/jet.htm> 2014 Vol. 4 (3) July-September, pp.54-69/Pasha et al.
- [32] Philippe Lours, Fabien Baillon, Au Cœur des Matériaux Cristallins " Durcissement par traitement thermique",
- [34] J. P Baillon, J.M.Dorlot. Des Matériaux, troisième édition, Montréal : Ecole Polytechnique de Montréal, 480p, 2000.
- [35] M. Sara. Mémoire magister en physique. Université de Constantine 2007.