

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Laboratoire des structures

Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du Diplôme de Master en  
Construction Mécanique

**Thème :**  
***Modélisation numérique des phénomènes physiques du cordon***  
***de soudure des alliages d'aluminium 2024AA soudés par***  
***le procédé de soudage par friction malaxage***

Proposé et encadré par :  
Mr Temmar Mustapha

Réalisé par :  
YAHIAOUI Imene

Année universitaire 2019/2020

## **Remerciement :**

*Je veux d'abord remercier "ALLAH" qui me donne le courage et la force d'étudier et de résoudre tous les problèmes. Je tiens à remercier Mr. TEMMAR, mon superviseur de mémoire trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour m'avoir aidé à mener à bien ce travail, sa grande disponibilité, les connaissances qu'ils ont partagées et son esprit d'entreprise m'ont été très utiles.*

*Je le remercie sincèrement d'avoir veillé à ce que ces mois et ces jours de travail se déroulent dans les meilleures conditions scientifiques et humaines.*

*Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé avec leurs informations, leurs conseils et leurs encouragements pour mener à bien cette thèse d'étude.*

*Je tiens également à remercier les enseignants du Département de génie mécanique.*

## *Dédicace :*

*Avec un grand honneur et un grand plaisir que je tiens*

*à dédier ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents pour tout dévouement et*

*bienveillance durant mes années d'études.*

*Mes chères frères et soeurs qui m'ont encouragé toutes*

*ces années d'études.*

*Mes chères amies ; m'ont porté de l'aide ainsi que toute*

*ma promotion.*

*A tous ceux qui m'ont porté de l'aide, conseils et de*

*bonheur de près ou de loin durant toutes ces longues*

*années*

## Résumé :

Le but de ce travail d'étude est de simuler numériquement le procédé de soudage par friction (FSW) à l'aide du logiciel multi-physique ANSYS en tenant compte de l'influence de certains paramètres de soudage comme la vitesse de rotation de la soudure. Outil, vitesse d'avance (outil / ou pièce), force appliquée à l'outil et coefficient de frottement de l'épaulement / matériau à collecter dans la plage de température et flux thermique généré. La modélisation du transfert thermique produit par le procédé de soudage FSW est réalisée, une simulation numérique 3D est réalisée. Le système de coordonnées mobile est supposé être lié à l'instrument. Les résultats obtenus montrent une bonne approximation du phénomène.

**Mots-clefs :** FSW, Température, Flux de chaleur, méthode des éléments finis, ANSYS.

## Abstract :

The aim of this study is to digitally simulate the friction welding process (FSW) using the multi-physics software ANSYS taking into account the influence of certain welding parameters such as the speed of rotation of the welding. Tool, feed rate (tool / or part), force applied to the tool and coefficient of friction of the shoulder / material to be collected in the temperature range and heat flux generated. The modeling of the heat transfer produced by the FSW welding process is carried out, a 3D digital simulation is carried out. The moving coordinate system is assumed to be linked to the instrument. The results obtained show a good approximation of the phenomenon.

**Keywords:** FSW, Temperature, Heat flux, finite element method, ANSYS .

## ملخص:

الهدف من هذه الدراسة هو المحاكاة الرقمية لعملية اللحام بالاحتكاك (FSW) باستخدام برنامج الفيزياء المتعددة ANSYS مع مراعاة تأثير بعض معاملات اللحام مثل سرعة دوران اللحام. اللحام. الأداة، معدل التغذية (الأداة / أو الجزء)، القوة المطبقة على الأداة ومعامل الاحتكاك للكثف / المادة التي سيتم جمعها في نطاق درجة الحرارة وتدفق الحرارة المتولد. يتم تنفيذ نمذجة نقل الحرارة الناتج عن عملية اللحام FSW ، ويتم إجراء محاكاة رقمية ثلاثية الأبعاد. يُفترض أن يكون نظام الإحداثيات المتحركة مرتبطاً بالأداة. النتائج التي تم الحصول عليها تظهر تقريب جيد للظاهرة.

**كلمات البحث:** درجة الحرارة، التدفق، عناصر المحدودة، انسيب

## *Liste des figures :*

<b>Figure I.1 :</b> Tôle aluminium 2024 T3 1250 x 2500mm 16/10mm.....	3
<b>Figure I.2 :</b> Diagramme binaire aluminium-cuivre.....	8
<b>Figure II.1:</b> principaux types d'assemblage .....	13
<b>Figure II.2:</b> coupe transversale d'un assemblage .....	14
<b>Figure II.3:</b> Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW).....	15
<b>Figure II.4:</b> Principe de fonctionnement du procédé (GMAW).....	16
<b>Figure II.5:</b> Soudage avec fil fourré et gaz de protection .....	18
<b>Figure II.6:</b> Comparaison des taux de dépôts obtenus pour différents .....	18
<b>Figure II.7:</b> Principe du procédé (GTAW).....	19
<b>Figure II.8:</b> Mécanisme du soudage par point. ....	21
<b>Figure II.9:</b> Principe du soudage par molette .....	21
<b>Figure II.10:</b> Principe du soudage oxygaz. ....	22
<b>Figure II.11:</b> principe du soudage par faisceau d'électrons.....	23
<b>Figure II.12:</b> principe du soudage laser.....	23
<b>Figure II.13:</b> Soudage par friction-malaxage. ....	24
<b>Figure III.1:</b> Machines de soudage FSW de l'Institut de Soudure (Metz) (a)- Machine ESAB. (b)- Machine MTS.....	29
<b>Figure III.2:</b> Représentation schématique du principe de soudage par friction-malaxage. ....	29
<b>Figure III.3:</b> Génération du cordon de soudure de proche en proche .....	30
<b>Figure III.4:</b> Présentation du soudage par friction-malaxage. ....	31
<b>Figure III.5.a :</b> Phase de plongée .....	31
<b>Figure III.6.b :</b> Phase de soudage .....	32
<b>Figure III.7.c :</b> Retrait de l'outil.....	32
<b>Figure III.8 :</b> Localisation de l' <b>advancing side (AS)</b> et de la <b>retreating side(RS)</b> .....	33
<b>Figure III.9 :</b> Coupe transversale schématique d'une soudure.....	34
<b>Figure III.10 :</b> Présentation du joint bout à bout .....	34
<b>Figure III.11 :</b> Différents types de joints soudés par recouvrement, (a) soudure entre un raidisseur et une tôle, (b) soudure entre deux plaques.....	35
<b>Figure III.12 :</b> Présence de fissures dans un joint par recouvrement .....	36
<b>Figure III.13 :</b> Outils de soudage FSW .....	40

<b>Figure III.14</b> : Exemple d'outil FSW développé par TWI .....	41
<b>Figure III.15</b> : Outil de soudage .....	43
<b>Figure III.16</b> : Les différentes technologies de soudage .....	44
<b>Figure III.17</b> : Outil conventionnel .....	44
<b>Figure III.18</b> : Outil conventionnel.....	45
<b>Figure III.19</b> : "Bobbin Tool" ou "Self Reacting Tool".....	46
<b>Figure IV.1</b> : condition aux limites du modèle pour le soudage FSW .....	56
<b>Figure IV.2</b> : Transferts thermiques induits par le procédé FSW .....	61
<b>Figure V.1</b> : Le maillage structuré des plaques .....	64
<b>Figure V.2</b> : La distribution de la température sur les plaques soudées.....	65
<b>Figure V.3</b> : La déformée mécanique appliquées sur la géométrie.....	66
<b>Figure V.4</b> : La déformée thermique appliquées sur la géométrie.....	66
<b>Figure V.5</b> : Déplacement total de la géométrie dus aux dilations thermiques.....	67
<b>Figure V.6</b> : Les contraintes appliquées sur la géométrie.....	67

# **Liste des tableaux :**

## **Chapitre I : Alliages d'aluminium 2024 AA**

<b>Tab I.1</b> : Familles d'alliages d'aluminium .....	4
<b>Tab I.2</b> : Désignation des états métallurgiques .....	4
<b>Tab I.3</b> : Désignation des différents traitements thermomécaniques correspondant à l'état T.....	5
<b>Tab I.4</b> : Signification du premier chiffre de la désignation internationale .....	6
<b>Tab I.5</b> : Modifications successives de l'alliage 2024.....	7
<b>Tab I.6</b> : Composition chimique en % massique de notre alliage2024.....	8
<b>Tab I.7</b> : Composition mécanique notre alliage2024.....	9
<b>Tab I.8</b> : propriété physique notre alliage2024 .....	9

## **Chapitre II : Généralité sur le Procédé de soudage**

<b>Tab II.1</b> : Récapitulatif des procédés de soudage. ....	27
---	----

## **Chapitre III : le Procédé *de soudage par friction et malaxage (Friction Stir Welding FSW)***

<b>Tab III.1</b> : Synthèse des différents matériaux d'outil couramment utilisés.....	47
---	----

## ***Liste des abréviations :***

SMAW : Soudage à l'arc à l'électrode enrobée.

GMAW : Soudage sous protection gazeuse actif à électrode fusible MAG.

GMAW : Soudage sous protection gazeuse inerte à électrode fusible MIG.

FCAW : Soudage fil fourré sans gaz.

GTAW : Soudage sous protection gazeuse à électrode réfractaire (TIG).

PAW : Soudage plasma.

RSW : Soudage par résistance par point.

FSW : Soudage par friction-malaxage.

EBW : Soudage par faisceau d'électrodes.

## ***Tableau des symboles :***

<b>E</b>	<b>Module d'élasticité</b>	<b>MPa</b>
<b>G</b>	<b>Module de rigidité</b>	<b>MPa</b>
<b><math>\nu</math></b>	<b>Coefficient de poisson</b>	
<b>T<sub>sol</sub></b>	<b>Température de solidité</b>	<b>°C</b>
<b>T<sub>liq</sub></b>	<b>Température de fusion</b>	<b>°C</b>
<b>C<sub>p</sub></b>	<b>Chaleur spécifique</b>	<b>JK<sub>g</sub><sup>-1</sup>k<sup>-1</sup></b>
<b><math>\alpha</math></b>	<b>Coefficient de dilatation thermique</b>	<b><math>\mu\text{m m}^{-1}\text{k}^{-1}</math></b>
<b><math>\rho</math></b>	<b>Densité</b>	<b>Kg<sub>m</sub><sup>-3</sup></b>
<b><math>\rho_{el}</math></b>	<b>Résistance</b>	<b>nΩ m</b>
<b><math>\lambda</math></b>	<b>Conductivité thermique</b>	<b>W m<sup>-1</sup> k<sup>-1</sup></b>
<b>EC</b>	<b>Conductivité élastique</b>	<b>%IACS</b>

# *Sommaire :*

Dédicaces

Remerciements

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Tableau des symboles

Introduction générale.....1

## Chapitre I : Alliage d'aluminium 2024 AA

I.1/- Introduction .....2

I.2/- Généralités sur les alliages d'aluminium .....2

I.3 /- Les familles d'alliages d'aluminium .....3

I.3.1/- Les Séries 2000 (alliage de Cu) .....5

I.3.2 /-Le système de désignation internationale à 4 chiffres .....6

I.4/- L'alliage 2024 .....7

I.5/-Propriétés spécifiques d'alliage 2024AA. ....8

I.5.1 /- composition chimique.....8

I.5.2/-Caractéristiques mécaniques .....9

I.5.3/- Propriétés physiques et élastiques.....9

## Chapitre II : Généralité sur le procédé de soudage

II.1/- Introduction.....11

II.2/- Généralités sur le soudage. ....11

II. 2.1/- Définitions de base.....11

II. 2.2/- Désignation.....11

II. 2.3/- Histoire de Soudage .....12

II.3/- Définition d'opération soudage.....13

II.4/- les types de procédés de soudage.....14

II.4.1/- Soudage à l'arc..... 14

II.4.1.1/- soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW).....14

II. 4.1.2/- Soudage MIG/MAG fil plein(GMAW).....16

II.4.1.3/- Soudage MAG fil fourré (FCAW).....17

II. 4.1.4/- Soudage TIG (GTAW).....19

II.4.2/-Le Soudage par point (RSW).....20

II. 4.3/- Soudage oxygaz.....22

II.4.4/- Autres procédés.....	23
-------------------------------	----

### Chapitre III : le procédé de soudage par friction malaxage

III.1/- Introduction.....	28
III.2/- Description du procédé.....	28
III.3/-Principe du soudage par friction malaxage (friction stir welding).....	29
III.4/-Distinction des zones de soudage.....	33
III.4.1/-Joint soudé bout à bout.....	34
III.4.2/-Joint soudé par recouvrement.....	35
III.5/-Paramètres du procédé.....	36
III.5.1/-Géométrie de l'outil.....	37
III.5.1.1/-Pion.....	37
III.5.1. 2/-Épaulement.....	40
III.5.1.3/-Différents types d'outils.....	41
III.5.1.4/-Matériau de l'outil.....	44
III.5.2/-Vitesse de rotation et vitesse d'avance.....	46
III.5.3/-Angle d'inclinaison de l'outil.....	46
III.5.3.1/-Efforts appliqués.....	46
III.6 /- Avantages et inconvénients du procédé.....	48

### Chapitre IV : Modélisation et simulation numérique des phénomènes physiques du cordon de soudure par FSW

IV.1 /-introduction.....	51
IV.2 /-Objectif.....	52
IV.3 /-Approche numérique.....	52
IV.4 /-Modélisation Mathématique.....	53
IV. 4.1/- Hypothèses simplificatrices.....	53
IV.4.2 /-Équation du transfert de chaleur dans la pièce à souder.....	53
IV.4.3 /-Modèle de source de chaleur.....	54
IV.4.4 /-Conditions aux limites.....	55
IV.5 /-Programme de simulation de l'écoulement thermique lors du Soudage par friction malaxage sous ANSYS.....	57
IV.6 /-Etapes de résolution et d'analyse sous ANSYS.....	58
IV.7/-Procédure globale de résolution par nos programmes.....	59
IV.8/-phénomènes physiques se produisant lors du soudage par friction malaxage.....	60
IV.8.1/-Mécanique.....	60
IV.8.2/- Thermique.....	60
IV.8. 3/- Métallurgie.....	61

## **Chapitre V : Résultats et interprétions**

<b>V.1 /-Introduction.....</b>	<b>63</b>
<b>V.2 /-Le maillage.....</b>	<b>63</b>
<b>V.3 /- Répartition de la température au contact Outil/Pièce .....</b>	<b>63</b>
<b>V.4 /-Déformation.....</b>	<b>64</b>
<b>V.5 /-Déplacement.....</b>	<b>66</b>
<b>V.6 /-Les contraintes.....</b>	<b>66</b>
<b>Conclusion generale .....</b>	<b>68</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>69</b>

# ***Introduction générale***

## Introduction Générale

Le soudage par friction malaxage, appelé aussi friction stirwelding (FSW) est une technique de soudure inventée au début des années 90 qui permet d'assembler des alliages (tels que les alliages d'aluminium, de cuivre et de titane...) réputés difficilement soudables par les techniques de soudage conventionnels (TIG, MIG-MAG ...). Il convient particulièrement bien aux alliages à bas point de fusion et malléables à chaud. Ces types d'alliages sont principalement utilisés dans le cadre de l'allègement des structures dans les domaines des transports aéronautique, spatiale, terrestre et navale. La modélisation numérique du procédé de soudage par friction malaxage permet de traiter uniquement l'aspect thermique ou thermomécanique. Alors que des études théoriques et expérimentales permettent de comprendre les phénomènes de transfert thermique et l'écoulement de la matière pendant le processus FSW.

Notre travail, Modélisation numérique des phénomènes physiques du cordon de soudure des alliages d'aluminium 2024AA soudés par le procédé de soudage malaxage, va nous permettre de prendre un exemple d'une des opérations de soudage et de la simuler par la suite.

Notre travail se divise en cinq chapitres :

Dans le chapitre I, une recherche bibliographique introduira les notions nécessaires sur les alliages d'aluminium en général et sur l'alliage 2024AA en particulier.

Le chapitre II sera consacré au soudage, les différents procédés de soudage, leurs principes, leurs applications ...etc

Dans le chapitre III, une recherche bibliographique introduira le Principe du soudage par friction malaxage .Nous exposerons par la suite ces avantages et ces inconvénients.

Le chapitre IV sera consacré à la modélisation et la simulation numérique des phénomènes physiques du cordon de soudure afin d'étudier la propagation de la chaleur sur une plaque en aluminium lors du soudage par friction malaxage, le logiciel Ansys sera utilisé dans cette partie pour la conception graphique.

Dans le chapitre V, ayant pris connaissance à travers les chapitres précédents des différents phénomènes liés au procédé de soudage, nous nous intéresserons à la simulation numérique de l'opération soudage FSW, l'interprétation et la discussion des résultats.

*Chapitre I :*  
*Alliages d'aluminium*  
**2024 AA**

## ***1.1/- Introduction :***

Ce chapitre est un rappel sur quelques notions générales sur les alliages d'aluminium et alliage 2024 AA, ses propriétés mécaniques, les traitements thermiques et l'utilisation de ces alliages dans l'industrie.

L'aluminium et ses alliages jouent un rôle dans l'industrie. L'aluminium commercial contient généralement 0.5% d'impuretés, dont les principales sont le fer et le silicium. L'Al obtenu par raffinage électrolytique ( $Al > 99.99\%$ ) [1]. Cet élément est classé en deuxième place dans la construction de différentes pièces après le fer. Cette importance est due sur tout à leur faible densité. Et Grâce aussi sa bonne conductivité électrique. Depuis longtemps, les métallurgistes ont montré qu'en ajoutant certains éléments à l'aluminium, ses propriétés changent et que certaines additions ont l'intérêt d'augmenter par différents processus leurs propriétés mécaniques, électriques et thermodynamiques.

## ***1.2/- Généralités sur les alliage d'aluminium :***

L'aluminium est peu utilisé à l'état pur, sauf en miroiterie, du fait de sa faible résistance mécanique (au maximum  $20 \text{ kg/mm}^2$ ), d'où son utilisation sou forme d'alliages, En effet, l'addition contrôlée des éléments d'alliages tels que ; le cuivre, le silicium, le magnésium, le manganèse, le titane, le chrome, le zinc, le cobalt améliorent les propriétés mécaniques [2.3].

Le durcissement structural de l'aluminium est obtenu par l'ajout d'éléments d'addition ; ces derniers peuvent être soit en solution solide soit sous forme de précipités.

Les alliages d'aluminium sont divisés en deux grandes catégories : **les alliages de fonderie**, qui sont élaborés en tenant compte de leurs propriétés à l'état liquide afin de produire des pièces de fonderie saines, et **les alliages de corroyage** élaborés en tenant compte plus particulièrement de leur capacité à être mis en forme à l'état solide. Pour différencier un alliage d'un autre, il est important d'avoir un système normalisé.

L'aluminium et ses alliages sont utilisés dans tous les domaines de l'industrie et de la vie quotidienne : constructions aéronautique et automobile, l'industrie ferroviaire et navale (superstructures et équipements), dans le bâtiment (toitures, façades, aménagement intérieur), dans l'industrie électrique (conducteurs électriques et appareillages), pour la fabrication d'appareils ménagers, l'emballage et la décoration [4 ,5], et enfin l'utilisation des alliages d'aluminium pour les composants du groupe moto propulseur, en particulier les alliages à durcissement structural Al-Si-Mg-Cu pour les culasses Diesel [6].



**Figure I-2 :** Tôle aluminium 2024 T3 1250 x 2500mm 16/10mm

### ***I.3 /- Les familles d'alliages d'aluminium : [2]***

Les huit familles d'alliages d'aluminium se divisent en deux groupes bien distincts en relation avec leur mode de durcissement (**Tableau 1**).

Le premier groupe est constitué des alliages à durcissement par écrouissage. Ce sont les familles 1000, 3000, 5000 et 8000. Les propriétés mécaniques de ces alliages sont déterminées par le durcissement plastique qui correspond à une modification structurale du métal.

Le second groupe est constitué des alliages à durcissement structural. Ce sont les familles 2000, 4000, 6000 et 7000. Les propriétés mécaniques de ces alliages sont déterminées par le traitement thermique, généralement effectué à la fin de la gamme de transformation, en trois étapes : mise en solution, trempe et revenu (ou maturation). Le phénomène de durcissement résulte de la précipitation provoquée et contrôlée de certaines phases à l'intérieur de la matrice d'aluminium qui vont produire une augmentation des propriétés mécaniques. Dans cette étude, deux alliages à durcissement structural : l'alliage

2024 appartenant à la famille 2000 et l'alliage 7075 appartenant à la famille 7000 ont été étudiés.

Séries	Durcissement par écrouissage				Durcissement structural			
	1000	3000	5000	8000	2000	4000	6000	7000
Éléments d'alliage principaux	Al	Mn	Mg	Si + Fe	Cu	Si	Mg + Si	Zn + Mg
Etendue de la teneur (% mass.) des éléments d'alliage principaux	Al ~99%	0,5-1,5	0,5-5	Si : 0,3-1 Fe : 0,6-2	2-6	0,8-1,7	Mg : 0,5-1,5 Si : 0,5-1,5	Zn : 5-7 Mg : 1-2
Éléments d'addition complémentaires	Cu	Mg, Cu	Mn, Cu	Autres (Cu, Mn, Si, Mg, Zn)	Si, Mg		Cu, Cr	Cu
Résistance mécanique moyenne (MPa)	50-160	100-240	100-340	130-190	300-480	150-400	200-320	310-600

**Tab. I.1:** Familles d'alliages d'aluminium.

Cinq états métallurgiques fondamentaux sont définis et symbolisés par des lettres données dans le **Tableau 2** [7, 8].

Designation	Etat métallurgique
<b>F</b>	Etat brut
<b>O</b>	Etat recuit
<b>H</b>	Etat ecroui
<b>W</b>	Etat trempé non stable
<b>T</b>	Etat durci par traitement thermique

**Tab. I.2:** Désignation des états métallurgiques.

Etat **F** - les produits sont fabriqués par déformation plastique, sans que soient maîtrisés les taux d'adoucissement ou de durcissement par déformation ou traitement thermique.

Etat **O** – les produits sont dans l'état le plus ductile, obtenu par traitement de recuit.

Etat **H** – les produits sont durcis par déformation, avec ou sans maintien ultérieur à une température suffisante pour provoquer un adoucissement partiel.

Etat **W** – les produits sont soumis à une mise en solution et une trempe ; ils continuent d'évoluer à la température ambiante. Cet état est un état métallurgique instable.

Etat **T** - les produits sont soumis à un traitement thermique partiel ou complet, avec application éventuelle de déformation plastique.

Dans le **Tab. I.3** sont présentés les symboles des différents traitements pour l'état durci par traitement thermique (T) qui est l'état naturel des alliages à durcissement structural et le plus utilisé dans l'industrie [9].

<b>Symbole</b>	<b>Traitement thermique</b>
<b>T1</b>	Refroidissement contrôlé après démoulage et maturation naturelle
<b>T3</b>	Mise en solution, trempe, écrouissage contrôlé et maturation naturelle
<b>T4</b>	Mise en solution, trempe et maturation naturelle
<b>T5</b>	Refroidissement contrôlé après démoulage et revenu ou sur-revenu
<b>T6</b>	Mise en solution, trempe et revenu au pic
<b>T7</b>	Mise en solution, trempe et sur-revenu (stabilisation)
<b>T8</b>	Mise en solution, trempe, écroui et revenu

**Tab. I.3:** Désignation des différents traitements thermomécaniques correspondant à l'état T.

### ***1.3.1/- Les Séries 2000 (alliage de Cu) :***

Ces alliages peuvent être traités thermiquement .la résistance à la traction vraie de 186 à 427N/mm<sup>2</sup>.

Ces alliages sont des alliages aluminium (0.7\_6.8) % Cu à résistance élevée, souvent utilisés dans l'industrie aéronautique et spatiale. Certains de ces alliages sont considérés comme non soudables (fissuration à chaud et sensibilité à la corrosion sous tension).

D'autre peut 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 silicium ou aluminium et cuivre) en fonction de l'application [10].

### ***I.3.2 /-Le système de désignation internationale à 4 chiffres :***

#### **➤ Le 1er chiffre :**

Le 1er des 4 chiffres représente le groupe auquel l'alliage appartient. Ainsi, le premier « 7 » de 7075 indique que cet alliage fait partie de la famille dont le principal élément est le Zinc. Si plusieurs éléments d'un même alliage occupent la première position en pourcentage, l'appartenance à une famille d'alliage est établie selon l'ordre suivant : cuivre, manganèse, silicium, magnésium, la combinaison magnésium-silicium, zinc et autres. Le Tableau 1 présente les familles d'alliages par rapport à l'élément d'addition le plus important :

<b>Chiffre</b>	<b>Signification</b>
<b>1</b>	Désigne les aluminiums dont le pourcentage en aluminium est égal ou supérieur à 99,00 %
<b>2</b>	Désigne les alliages dont le principal élément d'addition est le <b>CUIVRE</b>
<b>3</b>	Désigne les alliages dont le principal élément d'addition est le <b>MANGANÈSE</b>
<b>4</b>	Désigne les alliages dont le principal élément d'addition est le <b>SILICIUM</b>
<b>5</b>	Désigne les alliages dont le principal élément d'addition est le <b>MAGNÉSIUM</b>
<b>6</b>	Désigne les alliages dont le principal élément d'addition est le <b>MAGNÉSIUM et SILICIUM*</b>
<b>7</b>	Désigne les alliages dont le principal élément d'addition est le <b>ZINC</b>
<b>8</b>	Désigne les autres alliages d'aluminium

**Tab. I.4 :** Signification du premier chiffre de la désignation internationale

\* Le magnésium et le silicium forment le composé intermétallique  $Mg_2Si$  qui est traité comme un élément d'alliage simple.

#### **➤ Le 2<sup>e</sup> chiffre :**

Dans la famille « 1 », le 2<sup>e</sup> chiffre identifie les nuances dans lesquelles certaines impuretés ont des teneurs contrôlées. En effet, à travers le processus de production de l'aluminium, certains éléments se retrouvent « naturellement » en petites quantités dans l'aluminium, ce sont ces éléments que l'on appelle « impuretés ». À cette position, le « 0 », comme dans l'alliage 1050, indique justement que les quantités d'impuretés sont dans les limites jugées « naturelles » à la sortie des cuves. Les chiffres de 1 à 9, à cette position, comme pour les alliages 1100 ou 1350, indiquent que la teneur d'une impureté ou d'un élément d'alliage a fait l'objet d'un contrôle spécial.

## Chapitre I : Alliages d'aluminium 2024 AA

Dans les familles 2 à 8, le 2<sup>e</sup> chiffre de la nomenclature est réservé aux modifications successives de la composition chimique de l'alliage pour en améliorer les propriétés. Par exemple, la composition de l'alliage 2024 a été enregistrée en 1954, l'alliage modifié 2124 en 1970, l'alliage 2224 en 1978 et ainsi de suite, chaque altération restant dans les limites permises par la norme.

No	Date	Silicium (Si)	Fer (Fe)	Cuivre (Cu)	Manganèse (Mn)	Magnésium (Mg)	Chrome (Cr)	Nickel (Ni)	Zinc (Zn)	Titane (Ti)	Autres		Aluminium minimum
											Chaque	Total	
2024	1954	0,50	0,50	3,8-4,9	0,30-0,9	1,2-1,8	0,10		0,25	0,15	0,05	0,15	reste
2124	1970	0,20	0,30	3,8-4,9	0,30-0,9	1,2-1,8	0,10		0,25	0,15	0,05	0,15	reste
2224	1978	0,12	0,15	3,8-4,4	0,30-0,9	1,2-1,8	0,10		0,25	0,15	0,05	0,15	reste
2324	1978	0,10	0,12	3,8-4,4	0,30-0,9	1,2-1,8	0,10		0,25	0,15	0,05	0,15	reste
2424	1994	0,10	0,12	3,8-4,4	0,30-0,6	1,2-1,6			0,20	0,10	0,05	0,15	reste
2524	1995	0,06	0,12	4,0-4,5	0,45-0,7	1,2-1,6	0,05		0,15	0,10	0,05	0,15	reste

**Tab. I.5 :** Modifications successives de l'alliage 2024.

### ➤ **Les 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> chiffres :**

Dans la famille « 1 », les 2 derniers chiffres indiquent le pourcentage en aluminium au-delà de 99 %. Ainsi, l'alliage 1050 est un alliage qui contient au moins 99,50 % d'aluminium dans sa composition. Dans les familles 2 à 8, les 2 derniers chiffres n'ont aucune signification particulière et servent seulement à identifier les différents alliages dans leur groupe. [11]

## ***I.4/- L'alliage 2024 :***

Ancienne dénomination AFNOR : AU4G1

Normes européennes : EN AW-2024 [Al Cu4Mg1]

L'alliage 2024 est un alliage d'aluminium, de cuivre et de magnésium. On peut noter la présence quasi inéluctable d'impuretés telles que le fer. Il fait partie des alliages de la série 2000 à haute teneur en cuivre, de l'ordre de 4% en masse, utilisés pour leurs bonnes propriétés mécaniques. Il a remplacé le 2017 ou « Duralumin » pour les applications aéronautiques, pour lesquelles il a été l'un des premiers matériaux de structure. [9]

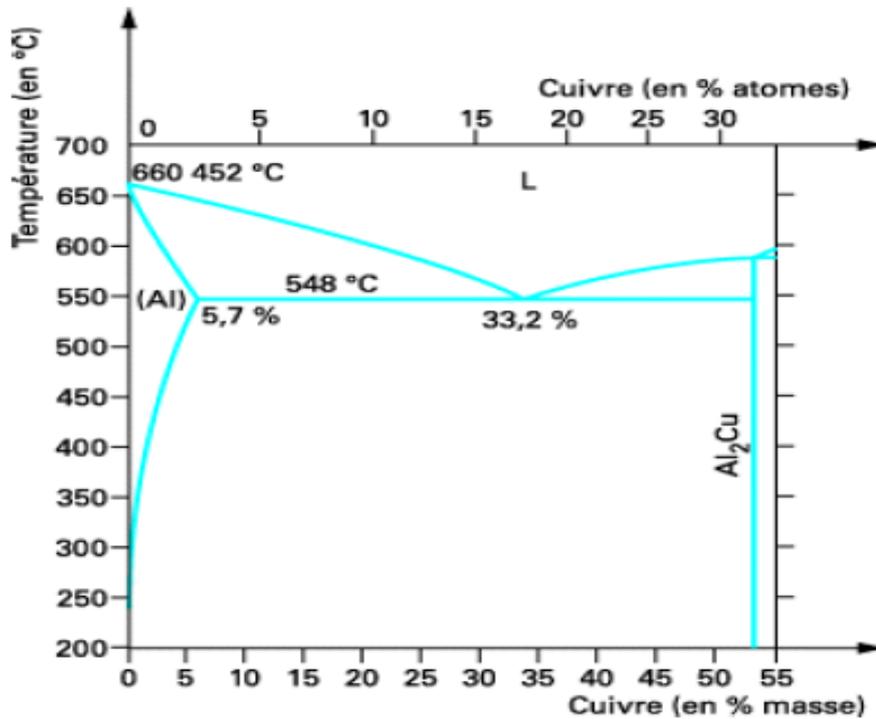


Figure I-3 : Diagramme binaire aluminium-cuivre

## I.5/-Propriétés spécifiques d'alliage 2024AA :

### I.5.1 /- composition chimique : (Selon norme EN 573-1)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Autres		Al
								chaque	total	
0.5	0.5	3.8 - 4.9	0.30 - 0.9	1.2 - 1.8	0.1	0.25	0.15	0.05	0.15	reste

Tab. I.6: Composition chimique en % massique de notre alliage2024

**I.5.2/-Caracteristiques mécaniques : Toles (selon norme EN 485-2)**

Etat	Epaisseur Spécifiée (mm)		Rm (MPa)		Rp0.2(MPa)		A % mini		Rayon de pliage		Durete HBS
	Supérieur à	Jusqu'à	Min	Max	Min	Max	A50	A	180°	90°	
0	>0.4	1.5		220		140	12		0.5 e	0 e	55
	1.5	3.0		220		140	13		2.0 e	1.0 e	55
	3.0	6.0		220		140	13		3.0 e	1.5 e	55
	6.0	9.0		220		140	13			2.5 e	55
	9.0	12.5	-	220	-	140	13			4.0 e	55
	12.5	25.0		220		140		11			55

Tab. I.7: Composition mécanique notre alliage2024

**I.5.3/- Propriétés physiques et élastiques :**

Etat	Elastique			Physique							
	E	G	$\nu$	T <sub>sol</sub>	T <sub>liq</sub>	C <sub>p</sub>	$\alpha$	$\rho$	$\rho_{el}$	$\lambda$	EC
	MPa	MPa	-	°C	°C	$\text{JK}_g^{-1}\text{k}^{-1}$	$\frac{\mu\text{m}}{\text{m}^1\text{k}^{-1}}$	$\text{Kg}\text{m}^{-3}$	$\text{n}\Omega \text{ m}$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^{-1}\text{k}^{-1}}$	% IACS
0	73000	27400	0.33	500	640	874	23.1	2790	34	193	50.5

Tab. I.8 : propriété physique notre alliage2024

***Chapitre II :***  
***Procédé de soudage***

## **II.1/- Introduction :**

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie, car il permet d'adapter au mieux, les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service. [12].

Les experts en usinage de matériaux des différents instituts de recherche sont en train de développer des technologies d'usinage à haute performance et à vitesse élevée pour réduire les coûts et améliorer la production de pièces usinées destinées à l'industrie comme par exemple l'industrie aérospatiale. Les technologies qui font actuellement l'objet d'études comprennent notamment le meulage super-abrasif, l'usinage par laser et par vibration, l'usinage à sec et à la lubrification minimale et le soudage.

## **II.2/- Généralités sur le soudage :**

### **II. 2.1/- Définitions de base :**

- **Soudage** : C'est l'opération de réunir de façon permanente deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage soit par chauffage, soit par pression, soit par la combinaison de l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport.

- **Soudure** : C'est le résultat de l'opération de soudage.

- **Soudage homogène** : les deux parties à assembler sont de même constitution physico-chimique ou lorsque le métal d'apport est de constitution physico-chimique semblable à celle du matériau de base.
- **Soudage hétérogène** : le métal d'apport présente une constitution physico-chimique différente de celle du matériau de base ou les métaux assemblés sans métal d'apport sont de nature différente.
- **Soudage autogène** : signifie la participation des bords des pièces assemblées à la composition du joint.

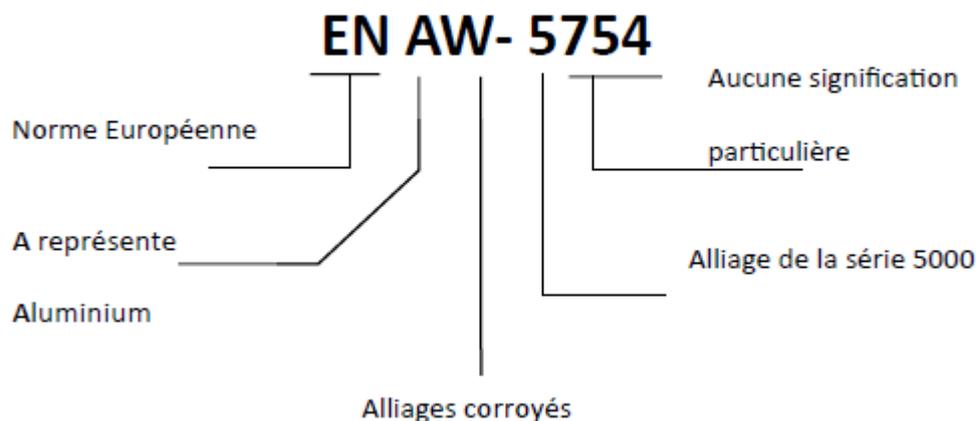
### **II. 2.2/- Désignation :**

La norme ISO 857 définit les procédés de soudage. La norme ISO 4063 définit la nomenclature et la numérotation des procédés. Le tableau 1.1 donne des exemples de numérotation des procédés de soudage. Les désignations numériques figurent sur les dessins (norme ISO 2553) ou les qualifications des modes opératoires de soudage (QMOS) (norme EN ISO 15614-1). [13]

Les normes applicables sur les critères d'acceptation des défauts sont les suivantes :

- ISO 5817 pour les aciers
- ISO 10042 pour les aluminiums

**Alliage série 2000 à 7000:**



### ***II. 2.3/- Histoire de Soudage :***

L'origine du soudage remonte à l'âge des métaux :

- à l'âge de bronze on soudait à la poche.
- à l'âge de fer on soudait à la forge.

L'exemple le plus ancien consiste en des petites boîtes circulaires en or datant de l'âge du bronze Et assemblées par chauffage et martelage d'un joint constitué de deux surfaces se recouvrant. Il a été estimé que ces boîtes ont été fabriquées il y a plus de 2000 ans. Pendant l'âge du bronze, Les Égyptiens et les peuples de l'est méditerranéen ont appris à assembler par soudage des Pièces en fer. Plusieurs outils datant approximativement de 3000 ans ont été retrouvés.

Pendant le Moyen Âge, l'art des chaudronniers et forgerons s'est développé et plusieurs objets en fer ont été produits en utilisant la technique du martelage / soudage. Jusqu'au milieu du XIXe siècle, les procédés de soudage évoluent peu, c'est vers 1850 qu'on commence à se servir du gaz pour chauffer les métaux à souder.

Fin XIXe siècle : mise en oeuvre de nouveaux procédés :

- Le soudage oxyacétylénique.
- Le soudage aluminothermique.
- Le soudage à l'arc électrique.
- Le soudage par résistance.

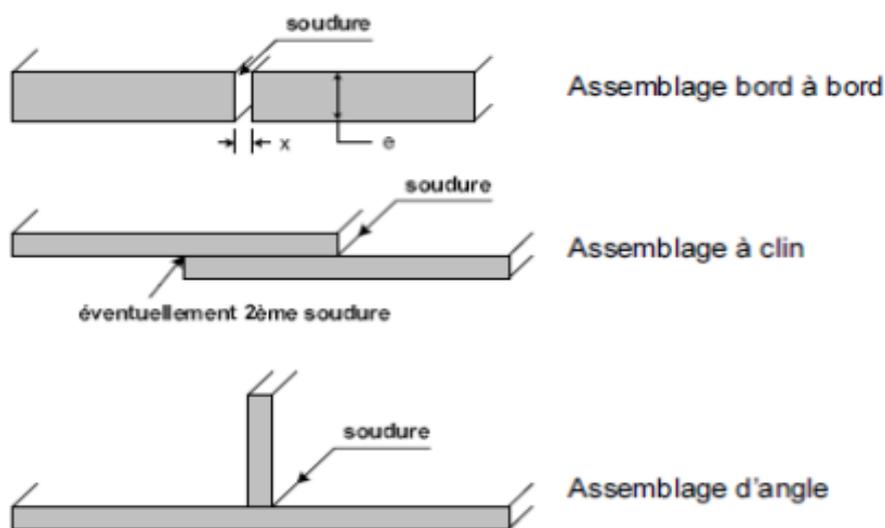
Tous ces procédés connaîtront leur essor industriel vers 1920. [14]

### **II.3/- Définition d'opération soudage :**

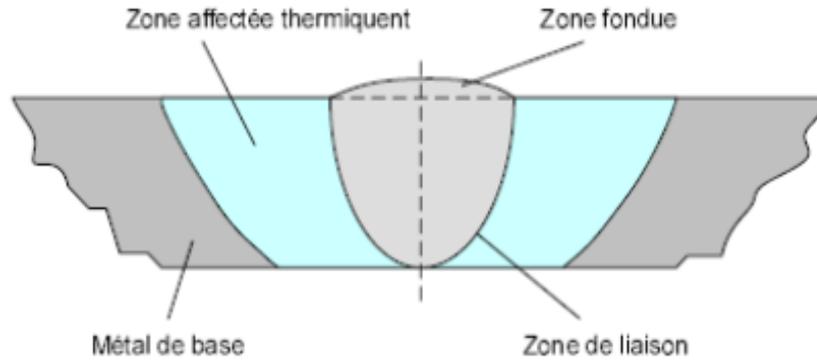
Le soudage est une opération consistante à assembler deux éléments métalliques, par fusion et re solidification. En d'autres termes, il s'agit d'assurer la continuité mécanique entre les parties à assembler avec ou sans l'aide d'un produit d'apport permettant un meilleur lien entre les pièces. Dans le cas de l'utilisation d'un métal d'apport, ce composé doit avoir des propriétés au moins égales et une température de fusion du même ordre de grandeur que celle des matériaux à assembler. Différents types d'assemblage peuvent être rencontrés en fonction des contraintes appliquées à la structure réalisée, de la nature et des dimensions de l'élément à assembler (**Figure II.1**).

Durant la phase de soudage, le métal d'apport ainsi que le métal de base (c'est-à-dire les éléments à assembler) sont portés à la température de fusion permettant ainsi un mélange des éléments (**Figure II.2**). L'utilisation du métal d'apport répond à deux besoins : tout d'abord, il est nécessaire d'apporter de la matière afin de combler une préparation de joint (chanfrein)assurant une section efficace entre les deux parties à assembler et d'autre part, il est aussi nécessaire de changer la composition métallographique de la zone fondue afin de lui donner des caractéristiques mécaniques voulues.

La zone fondue ou cordon de soudage est constituée du mélange des deux métaux de base et dans la plupart des cas d'un métal d'apport. De part et d'autre de cette zone fondue, les éléments à assembler, appelés métaux de base ont subi, des transformations de leur structure.



**Figure II.1:** principaux types d'assemblage



**Figure II.2:** coupe transversale d'un assemblage

Cristalline dues à l'élévation de température et cette région proche du cordon de soudage est appelée zone thermiquement affectée. Enfin, la surface de séparation entre la zone fondu et la zone thermiquement affectée porte le nom de zone de liaison. En fonction de l'épaisseur des éléments à assembler et de la densité d'énergie fournie par la source, il est possible de faire varier la profondeur de la zone fondu, on parle alors de niveau de pénétration. [15].

## ***II.4/- les types de procédés de soudage :***

Il y a plusieurs moyens pour obtenir la continuité métallique. Dans la majorité des cas, elle est obtenue par fusion locale. Elle peut aussi être obtenus par diffusion, déformation, ... Les procédés de soudage sont nombreux et peuvent être classés suivant la façon de transférer l'énergie.

### ***II.4.1/- Soudage à l'arc :***

C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur est produite par un arc électrique, formé entre le métal de base et l'électrode, ou entre deux ou plusieurs électrodes. Le contact puis le léger éloignement de l'électrode par rapport aux pièces provoque l'arc électrique. L'électrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches du métal des deux pièces à souder.

Le soudage à l'arc électrique comprend plusieurs techniques :

#### ***II.4.1.1/- soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) :***

##### **a-définition :**

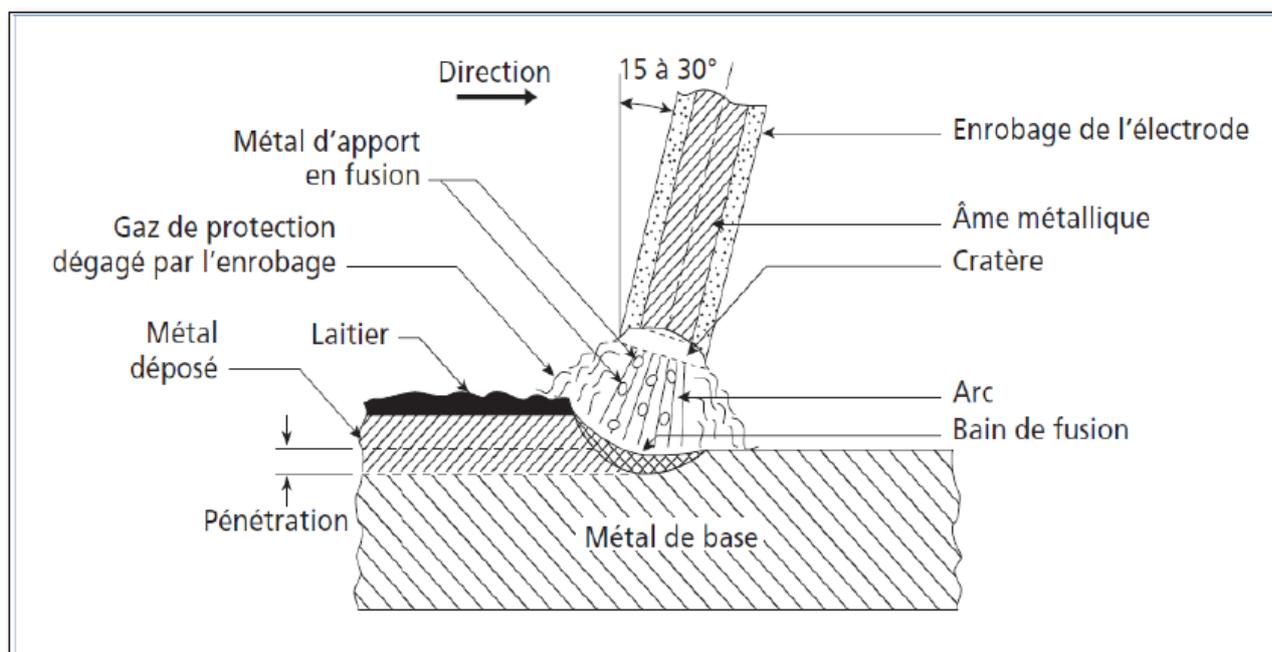
Le soudage à l'arc avec électrode enrobée est le procédé de soudage le plus couramment employé pour les travaux d'entretien et de réparation. Dans ce procédé, on fait jaillir un arc électrique entre le bout de l'électrode et le métal à souder. L'électrode est constituée d'une âme

métallique, recouverte de flux ou d'un revêtement (enrobage). L'électrode fond au fur et à mesure de l'opération de soudage.

Le flux protège de l'air ambiant les ions métalliques de l'arc et assure ainsi la stabilité de l'arc. A mesure que le flux fond, il dégage des fumées et dépose un laitier protecteur sur le métal en fusion.

Ce type de soudage est utilisé pour les travaux d'entretien et de réparation effectués sur l'acier doux, l'acier inoxydable, l'aluminium et les métaux non ferreux. Dans les ateliers de soudage, ce type de soudage est peu utilisé.

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée tend à être remplacé par le soudage MIG MAG.



**Figure II.3:** Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW). [15]

### **b-Avantages et inconvénients :**

Le soudage SMAW s'exécute dans toutes les positions, permet une grande autonomie et l'équipement requis est peu dispendieux.

Le coefficient de transmission thermique du procédé (c'est-à-dire la quantité de chaleur transmise à la pièce) varie entre 50 et 85 %. Comme la profondeur de pénétration de la soudure augmente en fonction de ce coefficient, le SMAW peut atteindre une bonne pénétration. Cependant, la chaleur au centre de l'arc est plus intense et cela peut causer une déformation angulaire.

Pour l'amorçage de l'arc avec les procédés manuels (particulièrement avec les électrodes à enrobage basique pour le SMAW), il faut que la tension à vide soit assez élevée, généralement d'une valeur minimum de 70 V.

### c-Applications :

Le procédé de soudage SMAW est très populaire, entre autres dans certaines tâches spécialisées telles que, par exemple, des récipients et des tuyaux sous pression, des réservoirs de stockage, des ponts et des bâtiments ou des navires et des wagons.

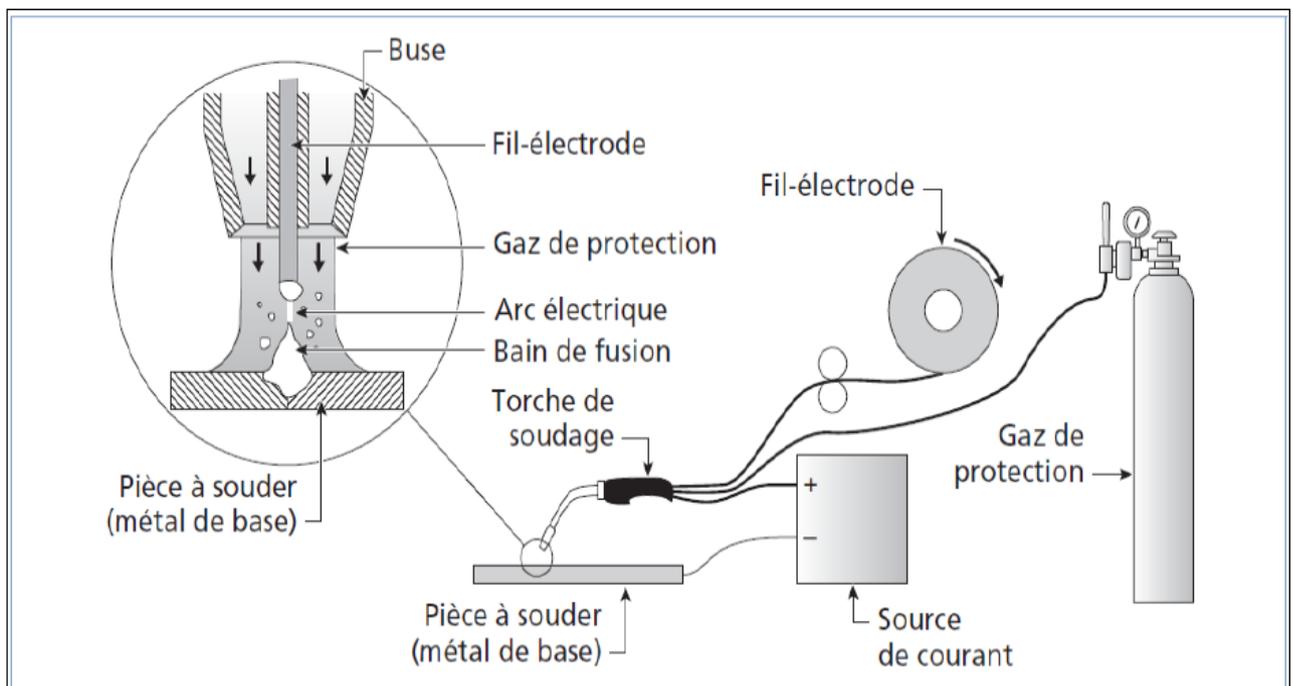
Il offre une bonne mobilité et la possibilité de souder à l'extérieur sans précaution particulière, notamment pour effectuer des réparations ou du travail sur un chantier. [16].

### II. 4.1.2/- Soudage MIG/MAG fil plein(GMAW) :

#### a-Définition :

Le soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein utilise un fil-électrode, continu et fusible, qui sert à créer l'arc de soudage avec le métal de base, ou est utilisé comme métal d'apport (figure 02).

La chaleur dégagée par l'arc de soudage provoque la fusion de l'extrémité du fil-électrode et du métal de base. Le fil-électrode est continuellement amené à l'arc de soudage, à travers la torche, par un mécanisme de dévidage. Ce procédé est donc semi-automatisé. Comme pour le GTAW, le bain de fusion est protégé par un gaz de protection.



**Figure II.4:** Principe de fonctionnement du procédé (GMAW). [15]

Le fil-électrode est alimenté dans la torche par un dévidoir. Il peut être poussé ou tiré. Les dévidoirs sont à vitesse fixe ou variable.

On distingue deux catégories de GMAW, en fonction de la nature du gaz de protection utilisé :

1. Le procédé MIG (Métal Inert Gas) qui utilise un gaz de protection neutre ou inerte (par exemple, l'argon ou l'hélium) ;
2. Le procédé MAG (Métal Active Gas) qui utilise un gaz actif ou un mélange de gaz incluant au moins un gaz actif.

#### **b-Avantages et inconvénients :**

Le procédé de soudage GMAW soude aisément la plupart des types de métaux, incluant l'aluminium (où il tend à remplacer de plus en plus le GTAW) et les aciers inoxydables. On l'emploie aussi de plus en plus pour le soudage d'aciers au carbone ou faiblement alliés.

Comme il s'utilise avec de fortes intensités de courant, il procure un taux de dépôt élevé. Par ailleurs, il offre une grande rapidité d'exécution. Il n'exige pas de changement d'électrode, ce qui permet de souder de plus longues distances d'un seul coup.

Le nettoyage post-soudage des pièces est simple puisque le procédé n'utilise pas de laitier.

La pénétration obtenue peut être profonde ; ceci se traduit par une préparation des joints plus rapprochée (à angles plus étroits, soit moins d'ouverture), donc une économie en terme de quantité de métal déposée. La qualité des soudures est bonne et la teneur en hydrogène est faible.

Il faut s'assurer que la vitesse de dévidage soit appropriée à la procédure de soudage, sinon le fil-électrode risque de fondre dans le tube-contact ou de se figer dans le bain de fusion, ce qui occasionne des pertes de temps et d'énergie considérables. [16]

#### **c-Applications :**

Le soudage GMAW est très répandu dans pratiquement tous les domaines de la fabrication. Généralement, toutes les entreprises qui ont souvent recours au soudage possèdent un ou plusieurs postes permettant l'utilisation de ce procédé [16].

#### **II.4.1.3/- Soudage MAG fil fourré (FCAW):**

##### **a-Définition :**

Le soudage à l'arc avec fil fourré de flux (MAG fil fourré) est appelé également soudage FCAW. Dans ce procédé, la tête de soudage d'un pistolet à souder déroule à vitesse constante un fil constitué d'un tube en métal fourré de flux.

Le flux aide à amorcer l'arc, forme un laitier et comprend des adjuvants destinés à renforcer la soudure. Le gaz de protection (CO<sub>2</sub>, mélange Argon – CO<sub>2</sub>) dépend du fil fourré utilisé (possibilité d'une autoprotection par dégagement du gaz protecteur suite à la décomposition du flux) Ce type de soudage est utilisé surtout pour les travaux d'assemblage mécanique (charpente) ou de maintenance générale. Ce procédé est principalement utilisé pour les aciers au carbone et aciers inoxydables. [16]

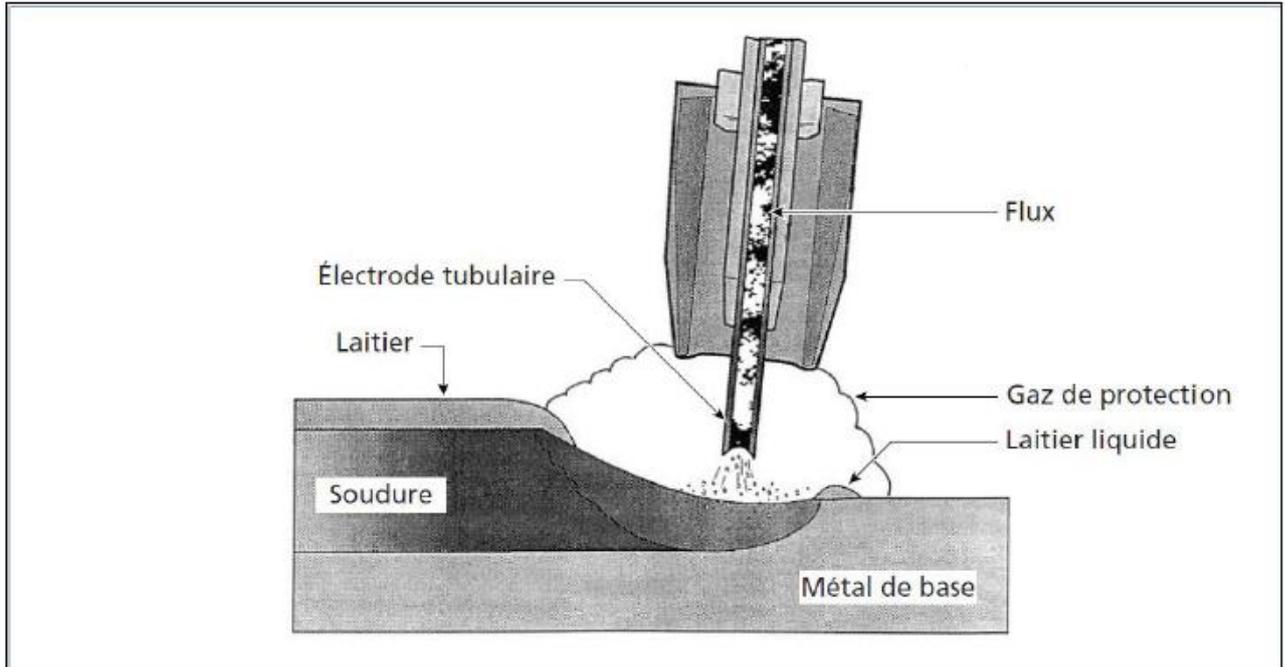


Figure II.5: Soudage avec fil fourré et gaz de protection. [15]

**b-Avantages et inconvénients :**

Ces procédés de soudage connaissent un essor certain, dû notamment à leur taux de dépôt supérieur aux autres procédés en fonction de l'intensité de courant utilisé (figure I-04).

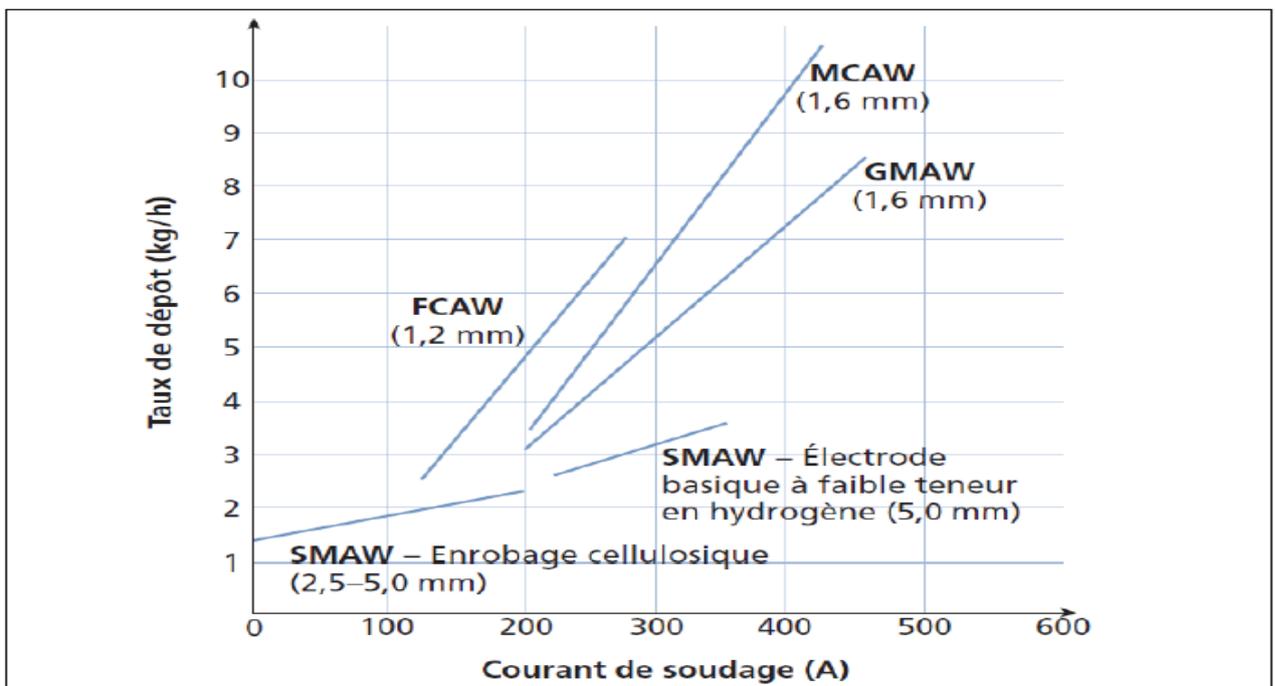


Figure II.6: Comparaison des taux de dépôts obtenus pour différents Procédés. [15]

On emploie les procédés FCAW pour le soudage de l'acier doux ou faiblement allié ainsi que pour l'acier inoxydable. Ces procédés procurent une pénétration profonde et sont appropriés pour le soudage de fortes épaisseurs de métal (variant le plus souvent entre 5 et 50 mm).

**c-Applications :**

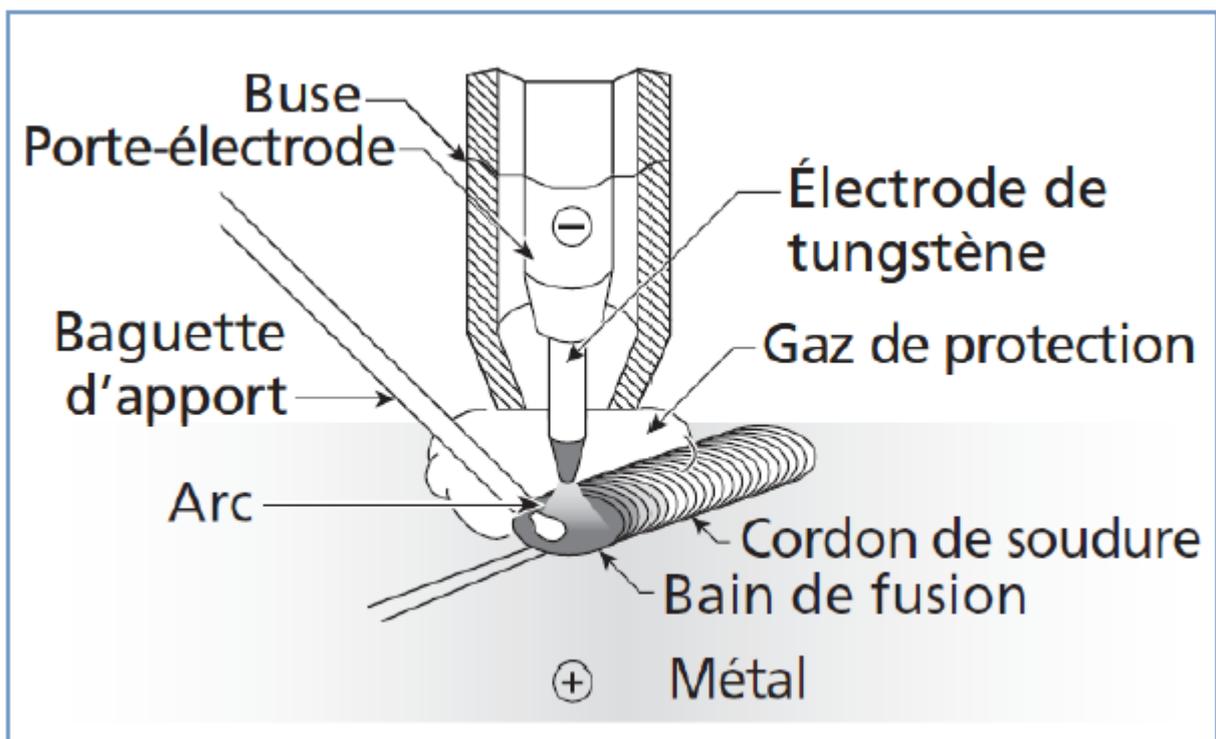
Ces procédés sont particulièrement utilisés dans l'industrie de la fabrication de ponts, de réservoirs, de turbines, de matériel agricole et de châssis de camions, de même que dans la construction navale, la chaudronnerie-tuyauterie, les travaux d'entretien, le rechargement, etc. [16]

**II. 4.1.4/- SOUDAGE TIG (GTAW):**

**a- Définition :**

Pour le soudage à l'électrode de tungstène (TIG), un arc électrique est amorcé entre la pièce à souder et l'électrode de tungstène. L'électrode demeure réfractaire à la fusion. La protection de l'arc est assurée par un débit continu de gaz, habituellement de l'Argon (ou aussi de l'Hélium ou encore un mélange Argon – Hélium). Cette protection empêche les gaz atmosphériques de pénétrer dans la zone de soudage. L'arc peut fusionner deux pièces de métal sans métal d'apport. En cas d'apport de métal, celui-ci est introduit sous forme de baguette.

Le soudage TIG sert couramment dans les travaux de soudage d'aluminium (soudage métaux nobles). Il peut également servir à souder les pièces en acier doux ou en acier inoxydable.



**Figure II.7:** Principe du procédé (GTAW). [17]

**b-Avantages et inconvénients :**

Ce procédé de soudage est particulièrement approprié pour souder les métaux à faible soudabilité, incluant l'acier inoxydable et les métaux non-ferreux (dont l'aluminium, le magnésium, le cuivre, le titane, le nickel de même que leurs alliages).

Ce procédé ne transfère qu'une faible quantité de chaleur au métal et le dépôt de métal d'apport se fait à l'extérieur de l'arc électrique. Par conséquent, le métal d'apport n'est pas surchauffé et cela donne à l'arc une plus grande stabilité, résultant en une soudure sans soufflures. De plus, le procédé ne cause pas de projections et la chaleur est bien dirigée. Le bain de fusion est étroit mais la vitesse de soudage est réduite.

La soudure est précise, ce qui limite les déformations. Le dépôt de soudure est dense et procure une soudure de grande qualité. Le soudage s'exécute dans toutes les positions et n'emploie pas de laitier, ce qui rend le nettoyage aisé.

Comme le taux de transfert de chaleur est assez faible comparé aux autres procédés, le procédé s'applique bien au soudage de plaques minces mais convient moins aux pièces épaisses, à moins qu'on ne veuille souder certains alliages particulièrement difficiles à souder, exigeant une grande qualité de soudure ou un cordon de pénétration dans un tuyau.

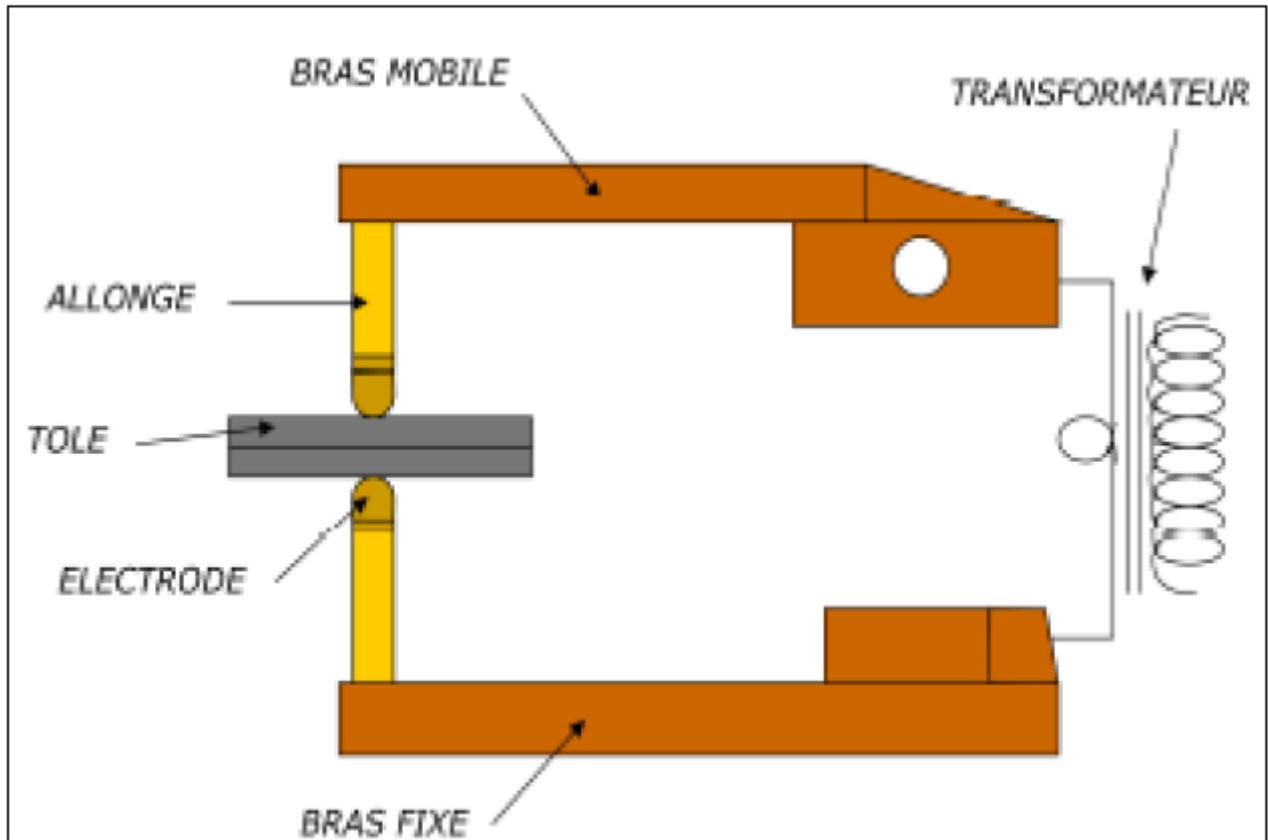
***c-Applications :***

On l'utilise surtout dans les secteurs de la construction aéronautique, pour le matériel de restauration, les blocs-moteur, les citernes, les carrosseries, les téléphériques, dans les industries alimentaires et chimiques (échangeurs d'air), les décorations et pour la fabrication ou la réparation de petites pièces. [16]

***II.4.2/-Le Soudage par point (RSW) :***

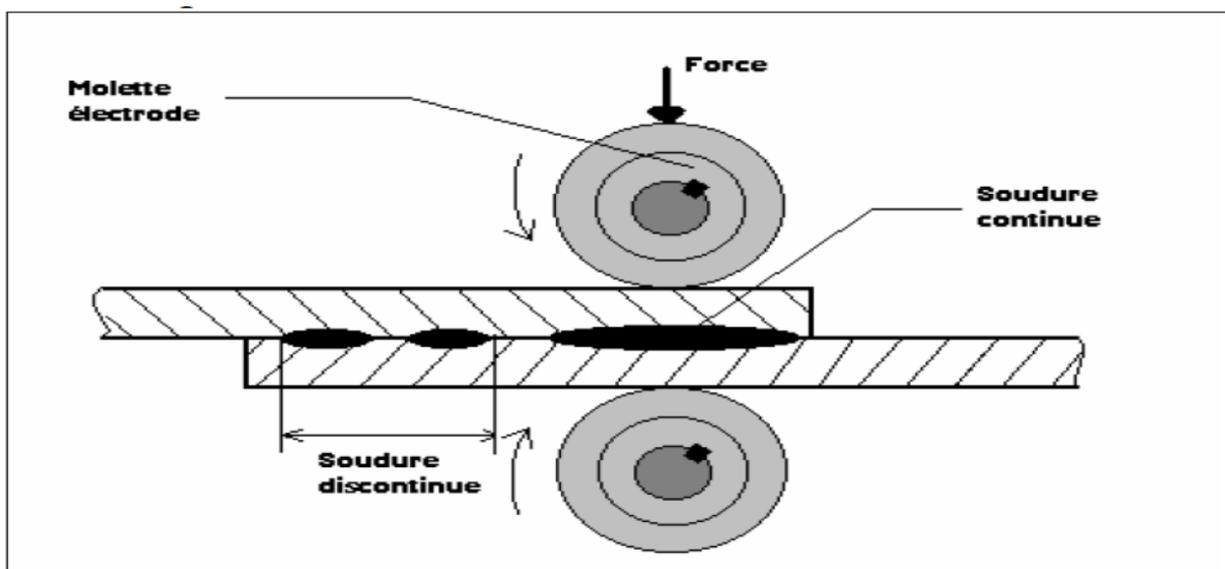
***a-Définition :***

Dans ce procédé, la soudure résulte à la fois de la chaleur générée par le passage d'un courant électrique (effet Joule) et de la pression exercée aux points de contact des électrodes. Ces électrodes sont en général constituées de cuivre ou d'un alliage de cuivre et de béryllium. Aucun métal d'apport ou flux n'est utilisé.



**Figure II.8:** Mécanisme du soudage par point. [18]

Il existe de nombreuses variantes à cette technique de soudage tel que le soudage par molette qui est une variante du précédent, ici les électrodes sont remplacées par des molettes tournantes ce qui permet un soudage continu ou discontinu très rapide.



**Figure II.9:** Principe du soudage par molette. [15]

**b-Applications :**

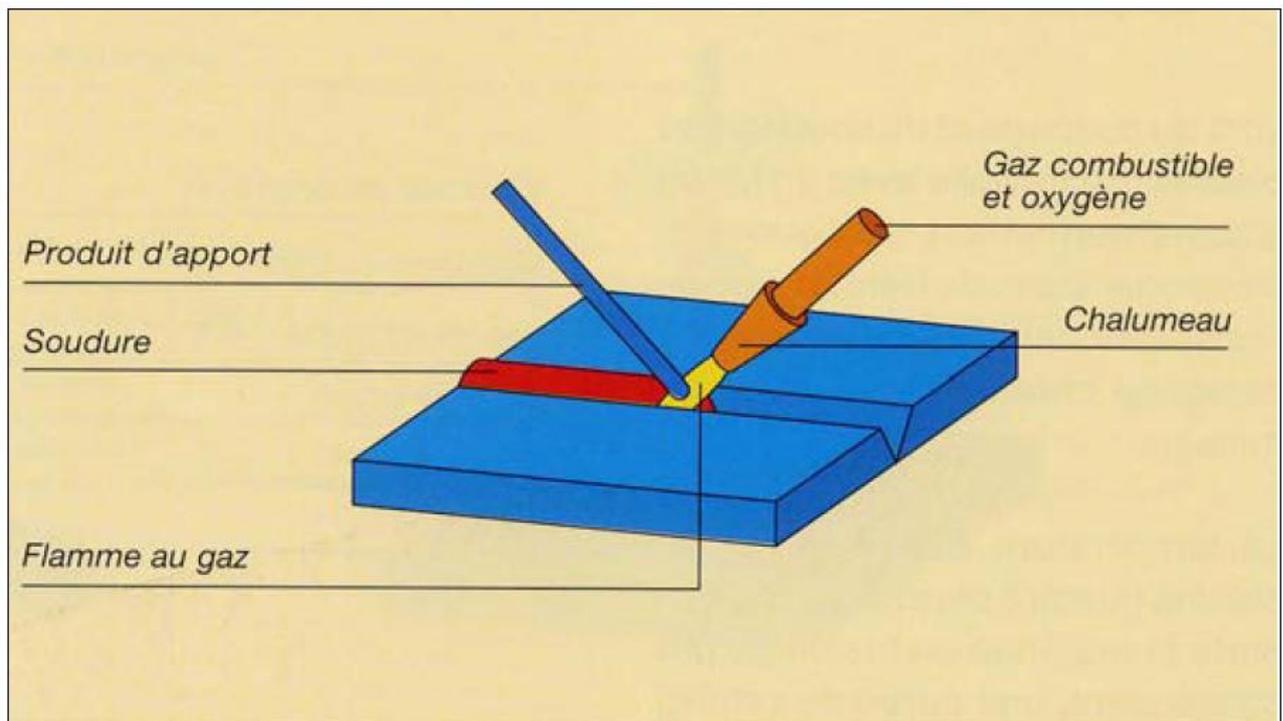
Ce procédé est très utilisé en grande et petite série, il est aussi très rapide. Il est utilisé dans de très nombreux domaines : l'industrie automobile, aéronautique, aérospatiale, nucléaire, électrique et électronique, les appareils ménagers, le mobilier métallique, les armatures en fils, le soudage en bout de barre, de profilés, de pièces tubulaires, de tôles, etc... [16]

**II. 4.3/- Soudage oxygaz :**

**a-Définition :**

Dans ce procédé, le soudage utilise la chaleur de combustion d'un gaz combustible (principalement acétylène ou propane) mélangé dans certaines proportions à un gaz comburant (O<sub>2</sub>).

Le poste de soudage à la flamme comporte des bouteilles de gaz, des détendeurs, des tuyaux flexibles, chalumeau et l'électrode d'appoint introduite à la main.



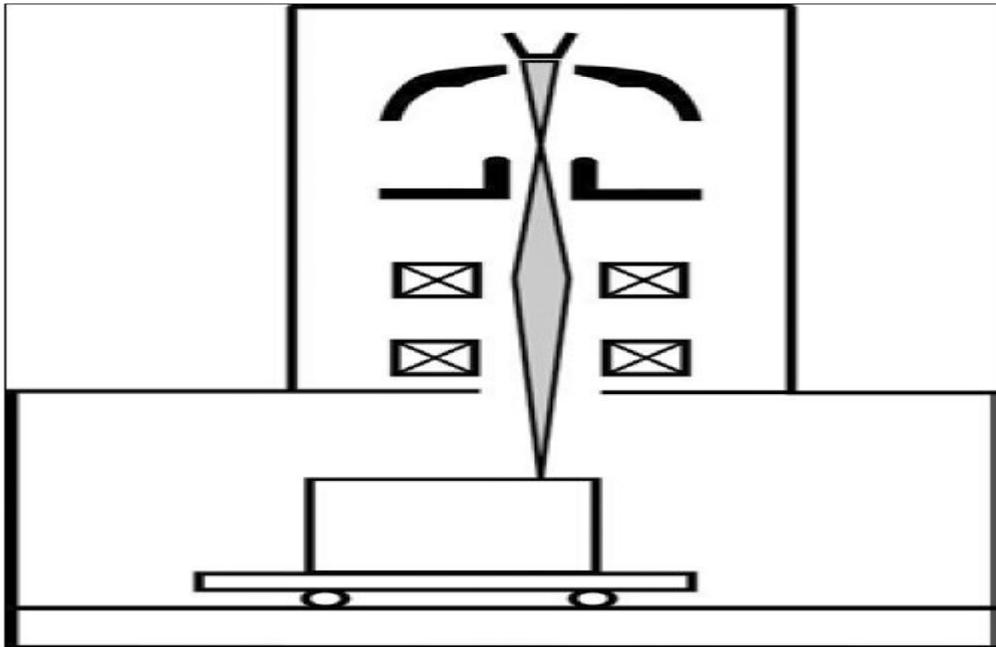
**Figure II.10:** Principe du soudage oxygaz. [15]

**b-Application :**

Travaux de réparation ou pour souder de la tôle légère.

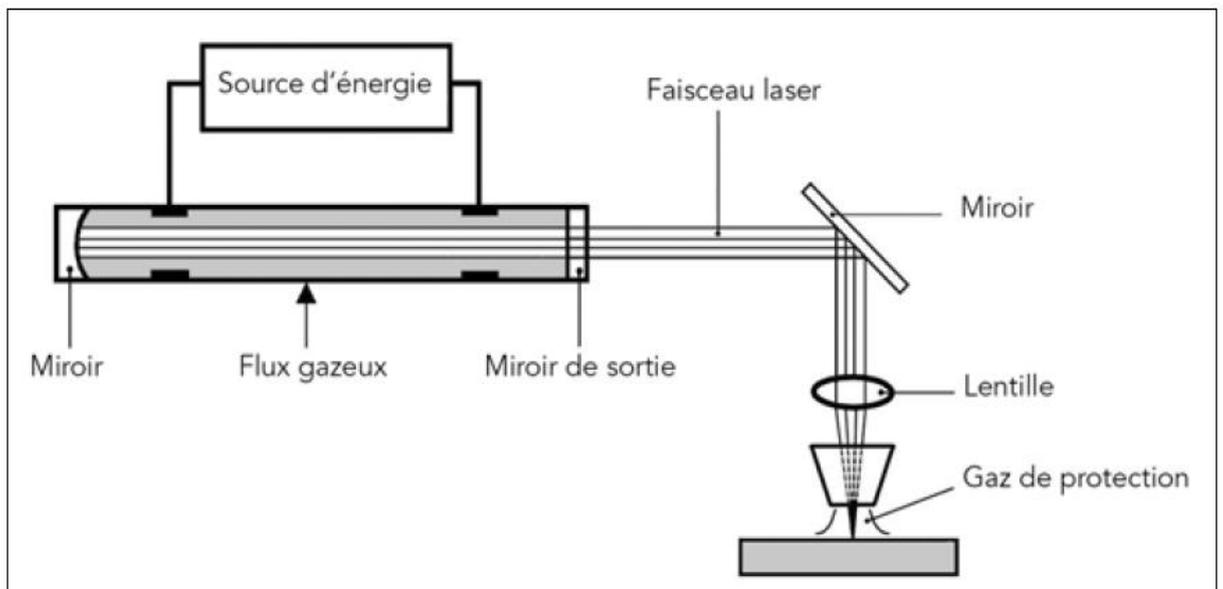
### II.4.4/- Autres procédés :

a- Le soudage par faisceau d'électrons (soudage FE) apparait en 1958 (**Figure II.11**).



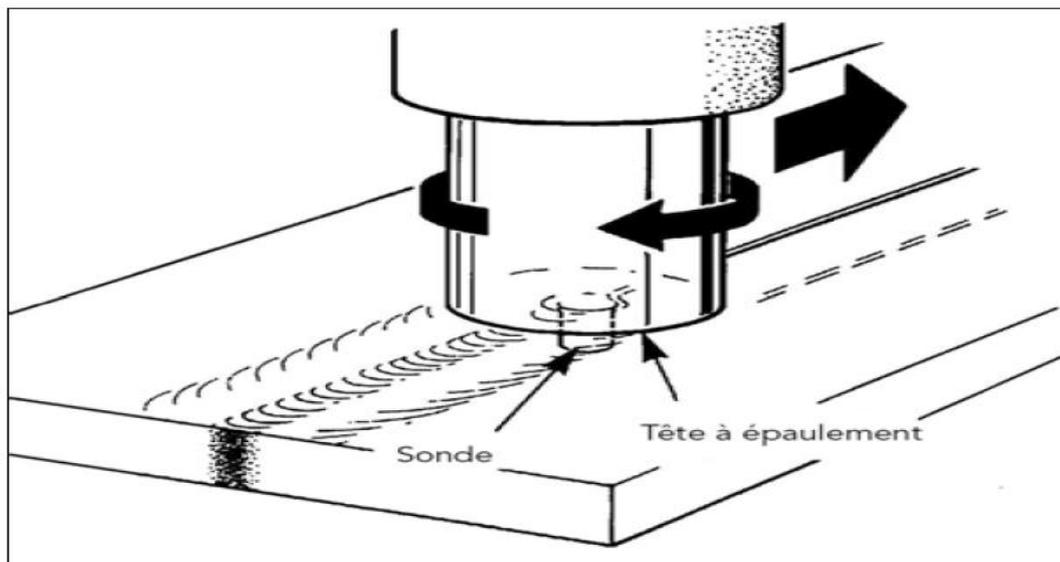
**Figure II.11:** principe du soudage par faisceau d'électrons. [15]

b- Le soudage (et le coupage) laser ont des caractéristiques idéales a plus d'un titre (**Figure II.12**)



**Figure II.12:** principe du soudage laser. [15]

c-Le soudage par friction-malaxage a été brevété par TWI en 1992 (**Figure II.13**)



**Figure II.13:** Soudage par friction-malaxage. [15]



No	SIGLE	DÉSIGNATION FRANÇAISE	DÉSIGNATION ANGLAISE
<b>111</b>	ARC E.E. / SMAW / MMA	Soudage à l'arc avec électrodes enrobées	Shielding Metal Arc Welding or Metal Manual Arc
<b>114</b>	FIL FOURRE SANS GAZ / INnersHIELD	Soudage à l'arc avec fil électrode fourré sans gaz	Flux Cored Arc Welding without gas
<b>121</b>	A.S.F./ SAW	Soudage à l'arc submergé sous flux en poudre avec fil électrode	Submerged Arc Welding
<b>122</b>	A.S.F./ SAW	Soudage à l'arc submergé sous flux en poudre avec feuillard	Submerged Arc Welding
<b>131</b>	MIG / GMAW	Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec fil électrode fusible	Metal Inert gas or Gas Metal Arc Welding
<b>135</b>	MAG / GMAW	Soudage à l'arc en atmosphère active avec fil électrode fusible	Metal Active gas or Gas Metal Arc Welding
<b>136</b>	FIL FOURRE AVEC GAZ / FCAW	Soudage à l'arc en atmosphère active avec fil électrode fourré	Metal Active gas or Flux Cored Arc Welding with gas
<b>141</b>	TIG / GTAW	Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène	Gaz Tungsten Arc Welding
<b>141 orbital</b>	TIG ORBITAL / GTAW	Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène orbital	Gaz Tungsten Arc Welding
<b>15</b>	PLASMA / PAW	Soudage à l'arc électrique au plasma	Plasma Arc Welding
<b>21</b>	POINT / RSW	Soudage par résistance par point	Resistance Spot Welding
<b>22</b>	MOLETTE / RSEW	Soudage par résistance à la molette	Resistance Seam Welding
<b>23</b>	BOSSAGE /	Soudage par résistance par bossage	
<b>24</b>	ÉTINCELAGE / FW	Soudage en bout par étincelage	Flash Welding
<b>311</b>	OXYA / OAW	Soudage au chalumeau avec flamme oxyacétylénique	Oxy-Acetylen Welding
<b>441</b>	EXPLOSION / EXW	Soudage par explosion	Explosion Welding
<b>45</b>	DIFFUSION / DBW	Soudage par diffusion	Diffusion Bonding Welding
<b>71</b>	ALUMINOTHERMIE / TW	Soudage aluminothermique	Alumino-Thermic Welding
<b>72</b>	VERTICAL SOUS LAITIER / ESW	Soudage vertical sous laitier	Electroslag Welding
<b>73</b>	VERTICAL SOUS GAZ / EGW	Soudage vertical sous gaz de protection	Electrogas Welding
<b>52</b>	LASER / LBW	Soudage par faisceau laser	Laser Beam Welding
<b>51</b>	FAISCEAU ELECTRONS / EBW	Soudage par faisceau d'électrons	Electron Beam Welding
<b>781</b>	GOUJON / SW	Soudage à l'arc de goujons	Stud Arc Welding

**Tab II.1:** Récapitulatif des procédés de soudage. [19]

***Chapitre III :***  
***Procédé de soudage Fraction***  
***malaxage***

### **III.1/- Introduction :**

Dans ce chapitre, nous donnons une description plus ou moins détaillée sur le procédé récent de soudage par friction et malaxage (FSW), considéré en tant que nouvelle technique du 21<sup>ème</sup> siècle, qui permet de souder des alliages difficilement soudables par des procédés de soudages classiques. Les différents paramètres, mis en jeu dans le procédé FSW, sont rappelés dans ce chapitre. Nous présentons également quelques travaux de recherche réalisés pour modéliser l'évolution thermique et mécanique de la matière lors du soudage et nous mettons en lumière les difficultés rencontrées par les auteurs de ces travaux. [20].

### **III.2/- Description du procédé :**

Le soudage par friction et malaxage est un procédé inventé en 1991 par l'institut britannique de soudage (The Welding Institute). Les équipements du procédé FSW permettent de souder en deux ou trois dimensions et peuvent appliquer des efforts axiaux allant jusqu'à 90KN.

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 accuser des efforts importants. Ceci permet de souder une large gamme de matériaux et d'épaisseurs.

**La figure III.1-a** présente la machine ESAB permettant de réaliser des soudures en deux dimensions et dont les caractéristiques sont :

L'effort de plongée maximal = 89KN ;

La vitesse de rotation maximale = 2000tr=min ;

La vitesse d'avance maximale = 2000mm=min ;

La longueur de soudure maximale = 2m.

**La figure III.1-b** présente la machine MTS de type portique à cinq axes permettant de réaliser des soudures en trois dimensions et dont les caractéristiques sont :

L'effort de plongée maximal = 89KN ;

La vitesse de rotation maximale = 2000tr=min ;

La vitesse d'avance maximale = 2000mm=min ;

La longueur de soudure maximale = 2m.

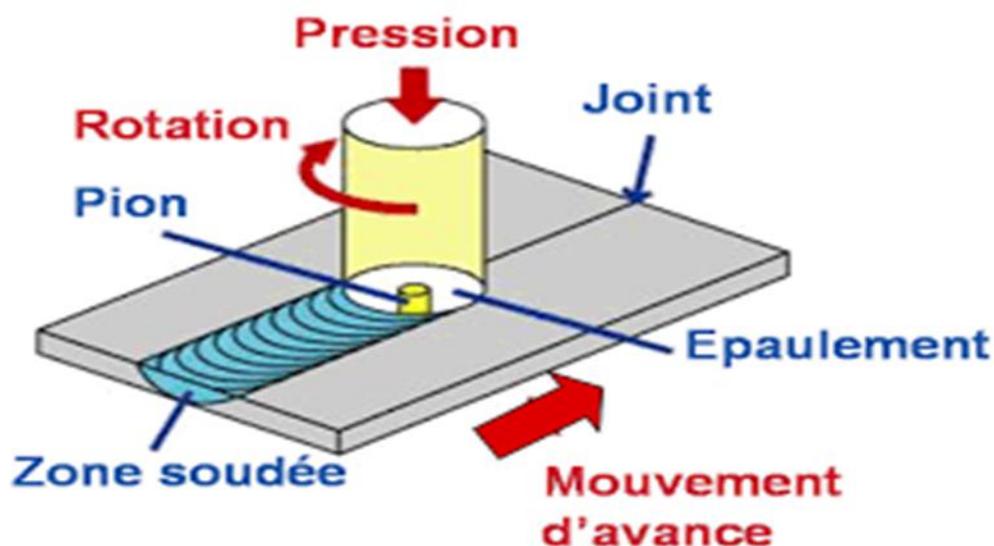
mesure des efforts possibles.[20]



**Figure III.1:** Machines de soudage FSW de l'Institut de Soudure (Metz) (a)- Machine ESAB. (b)- Machine MTS.

### ***III.3/-Principe du soudage par friction malaxage (friction stir welding) :***

Le principe de soudage par friction malaxage consiste à mettre en contact deux pièces à souder qui seront solidement bridées sur une machine. Un outil fixé à la machine qui est formé d'un pion et d'un épaulement est mis préalablement en rotation (400 à 1200 tr/mn) [21]. Au contact du pion avec les pièces à souder, une chaleur est engendrée et porte localement les bords en contact des pièces à l'état pâteux, ce qui facilite la plongée du pion dans la, **Figure III.2**



**Figure III.2:** Représentation schématique du principe de soudage par friction-malaxage.[22]

Chapitre III : le Procédé de soudage par friction et malaxage (Friction Stir Welding FSW)

Le rôle joué par l'épaulement qui s'appuie avec une force importante sur la surface des pièces à assembler est d'abord d'empêcher le métal brassé d'être expulsé et produit un effet de forgeage à l'arrière sur la partie qui vient d'être brassée et déformée, ensuite de la chaleur engendrée au contact de l'épaulement avec les pièces à souder **Figure III.3.**

L'outil en place est maintenu en rotation pendant quelques secondes (phase d'attente) puis est soumis à un mouvement de translation dans le sens du joint de soudage (phase d'avance) à une vitesse définie (jusqu'à 2m/min) [21]. Lors du soudage le matériau est soumis, à des variations de températures dues aux frottements du pion et de l'épaulement avec les pièces à assembler et à des déformations plastiques intenses dues au malaxage.

Pour un mécanisme combiné d'extrusions par le pion et de forgeage par l'épaulement, le cordon est réalisé de proche en proche et une nouvelle structure métallurgique commune aux deux matériaux est formée grâce à des phénomènes de restauration –recristallisation.

Une liaison métallique est ainsi réalisée sans atteindre la température de fusion du métal de base des pièces à assembler ce qui permet de s'affranchir des problèmes liés à la solidification qui apparaissent dans les procédés du soudage classique tels que porosités, soufflures, fissuration à chaud, etc.. Et avoir pour les pièces à souder des caractéristiques mécaniques d'assemblage supérieur au soudage traditionnel **Figure III.3.**

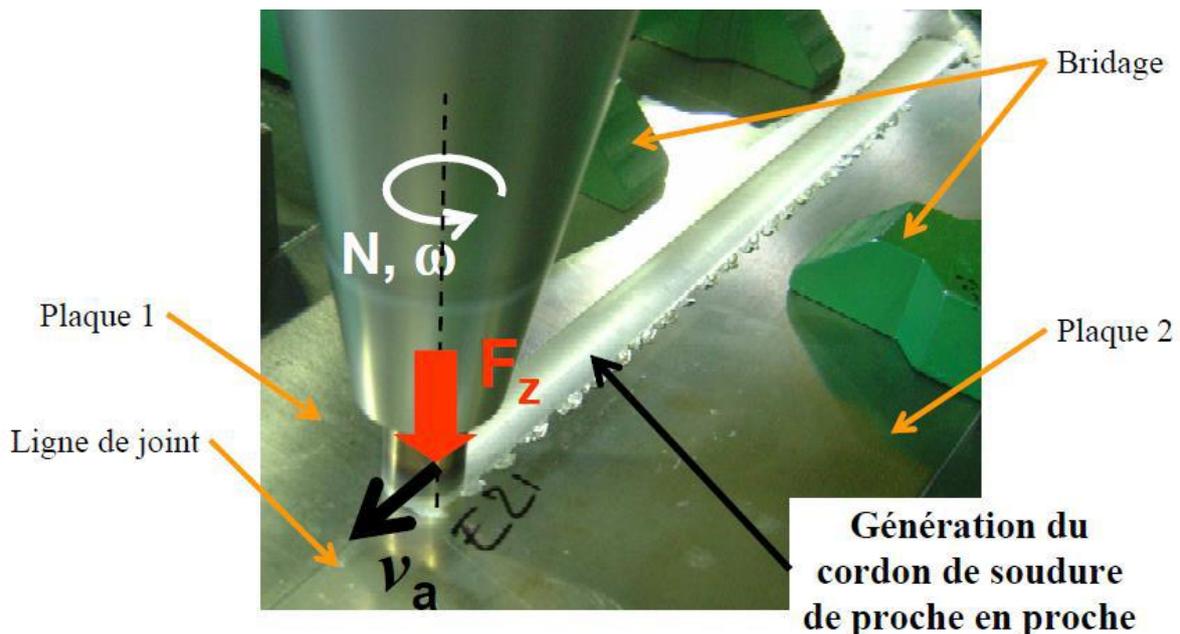


Figure III.3 : Génération du cordon de soudure de proche en proche .[23]

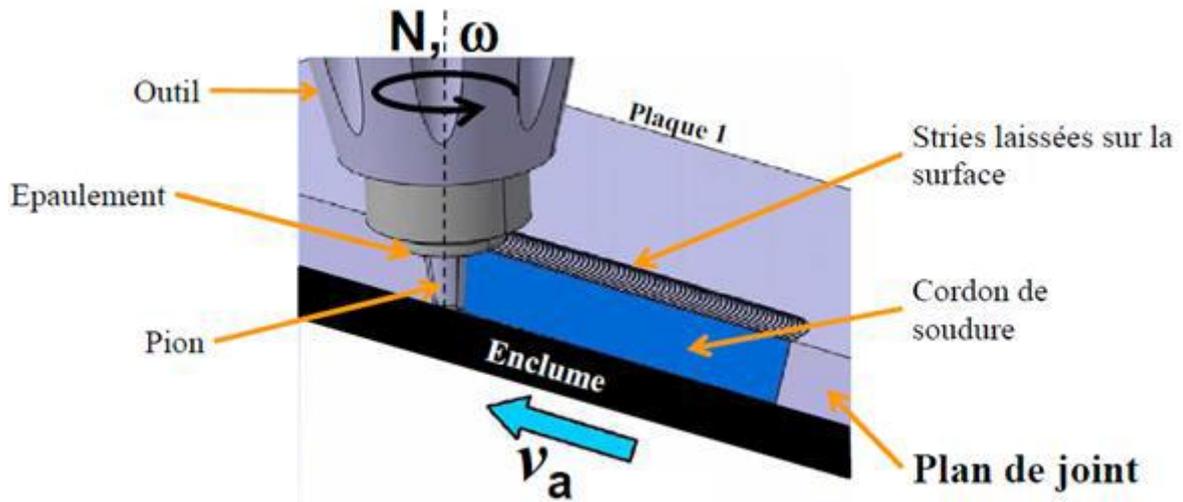


Figure III.4 : Présentation du soudage par friction-malaxage.[23]

Les trois principales phases opératoires de soudage par friction malaxage sont schématisées sur les Figure III.4.a, b, c.[23]

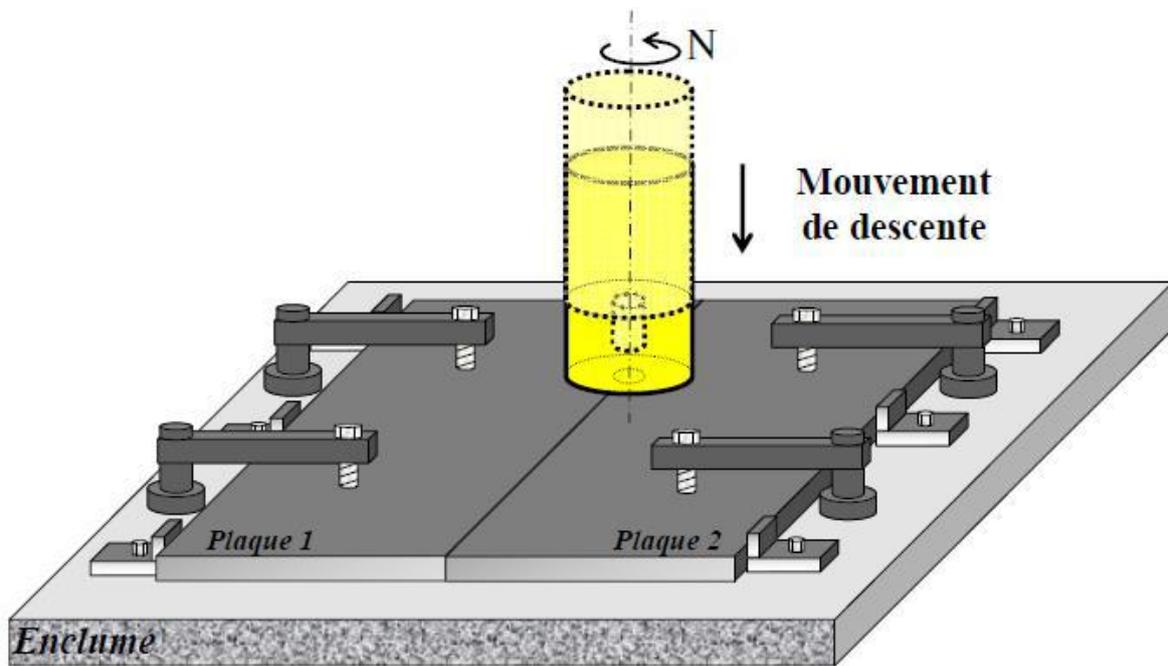


Figure III.5.a : Phase de plongée

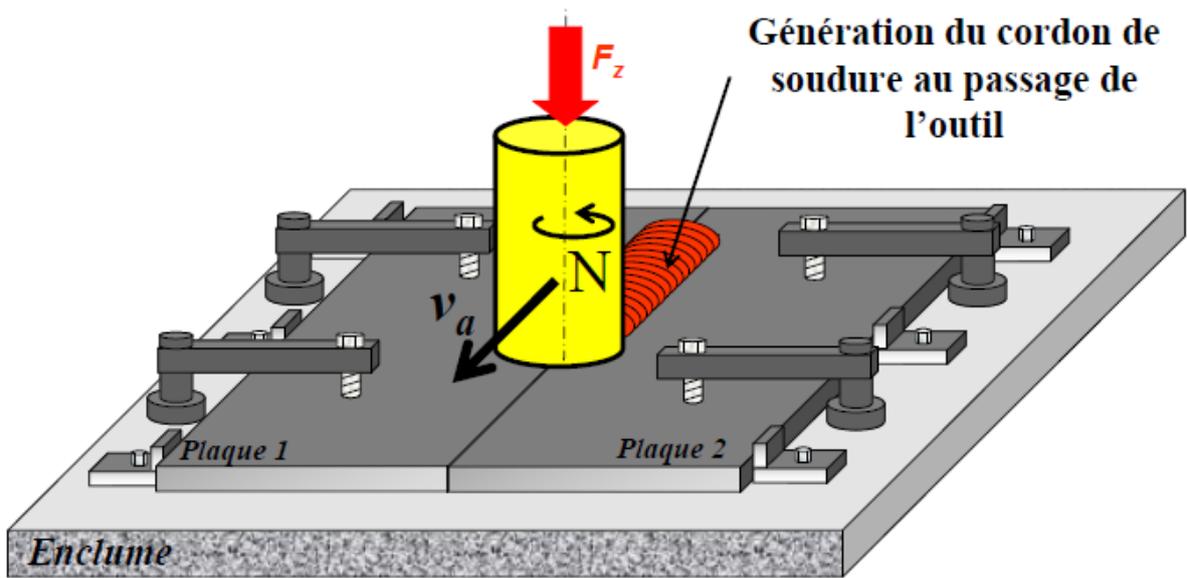


Figure III.6.b : Phase de soudage

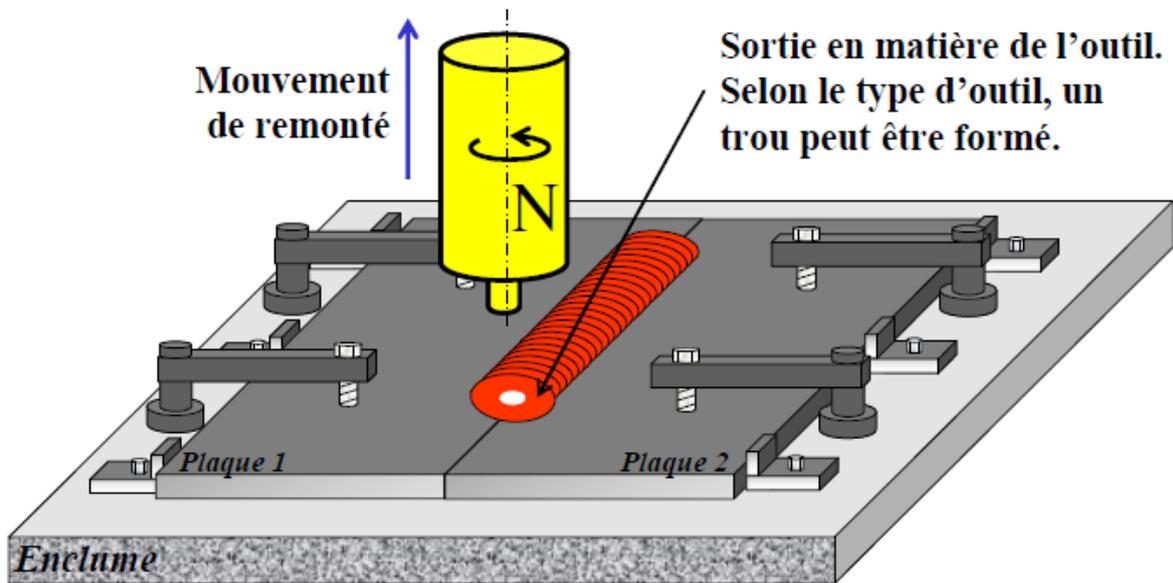
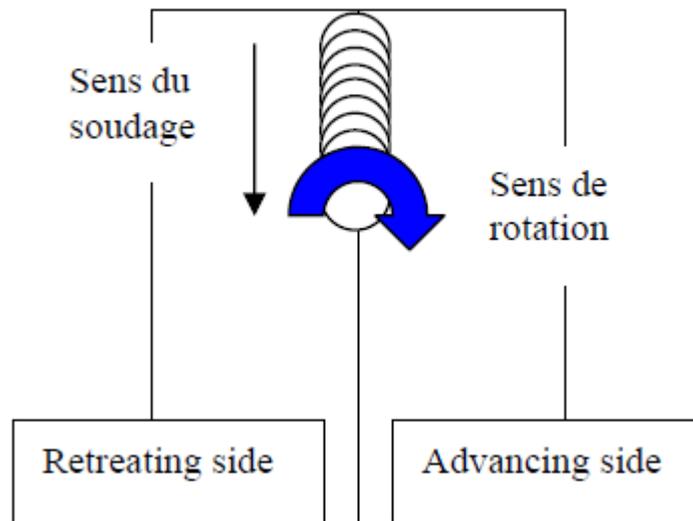


Figure III.7.c : Retrait de l'outil.

Il faut noter que le procédé n'est pas symétrique de part et d'autre de la ligne de soudure. On nomme l'**advancing side (AS)** le côté où les deux vecteurs vitesses (rotation et translation) ont le même sens. Le **retreating side (RS)** est le côté où ces deux vecteurs sont opposés (Fig.I.5).



**Figure III.8 :** Localisation de l'**advancing side (AS)** et de la **retreating side(RS)**

Trois paramètres importants sont à contrôler, la vitesse de rotation, la vitesse de soudage et la force appliquée selon l'axe z sur l'outil. Leurs valeurs optimales varient selon l'alliage et les capacités de la machine. En contrôlant ces paramètres, on contrôle la microstructure et donc les propriétés mécaniques du joint soudé par le biais du cycle thermomécanique qu'il engendre. [24]

Le soudage par friction malaxage soulève de très intéressantes questions car il combine étroitement les flux de chaleur, la déformation plastique et l'évolution microstructurale. [25]

### ***III.4/-Distinction des zones de soudage :***

La **Figure III.9** illustre la topographie de la coupe transversale au niveau du joint de soudage. Dans cette coupe, on distingue quatre zones : zone A, zone B, zone C et zone D. Dans la zone A, le métal de base n'est pas affecté par le soudage. Les propriétés mécaniques et la microstructure restent inchangées au cours du procédé. Dans la zone B, la matière est affectée thermiquement. Les propriétés mécaniques et la microstructure sont modifiées thermiquement par la source de chaleur effective. La zone C est affectée thermo-mécaniquement. Les propriétés mécaniques et la microstructure sont modifiées par la chaleur et par les grandes déformations dues à la rotation de l'outil. La zone D est le noyau de la soudure qui représente le lieu des déformations plus importantes par rapport à la zone C

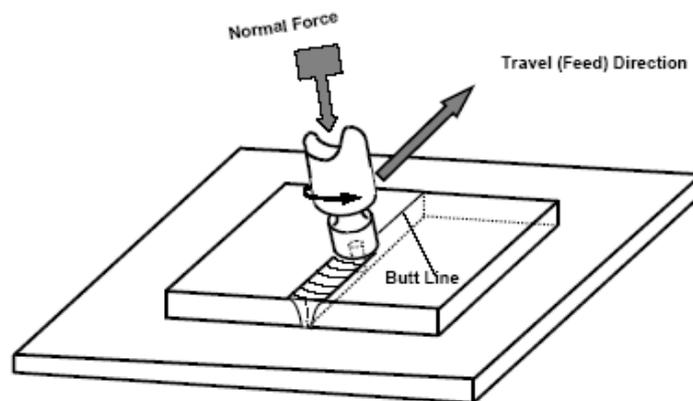
et où la température maximale est comprise entre 400°C et 500°C pour les alliages d'aluminium pendant le soudage [26]. La forme du noyau dépend étroitement de l'alliage et des paramètres du procédé [27]. Elle peut être soit en forme de cuvette soit en forme d'ellipsoïde (voir figure 3.8).



**Figure III.9 :** Coupe transversale schématique d'une soudure.

#### **III.4.1/-Joint soudé bout à bout :**

Les joints bout à bout réunissent deux plaques en métal adjacentes, dans l'exact prolongement l'une de l'autre. Lors du soudage, les deux plaques sont habituellement supportées par une plaque épaisse pour éviter qu'elles ne se déforment sous la pression de l'outil (**Figure III.10**) et solidement bridées en place pour éviter tout déplacement. Pour une pièce dont la géométrie est complexe, un gabarit spécial est nécessaire pour assurer le support et le bridage. L'outil est normalement placé au centre du joint, l'épaulement de l'outil exerce une pression sur les deux côtés de l'assemblage. Le pion de l'outil doit atteindre une profondeur assez proche de la face inférieure des plaques afin d'assurer une liaison à travers l'épaisseur.



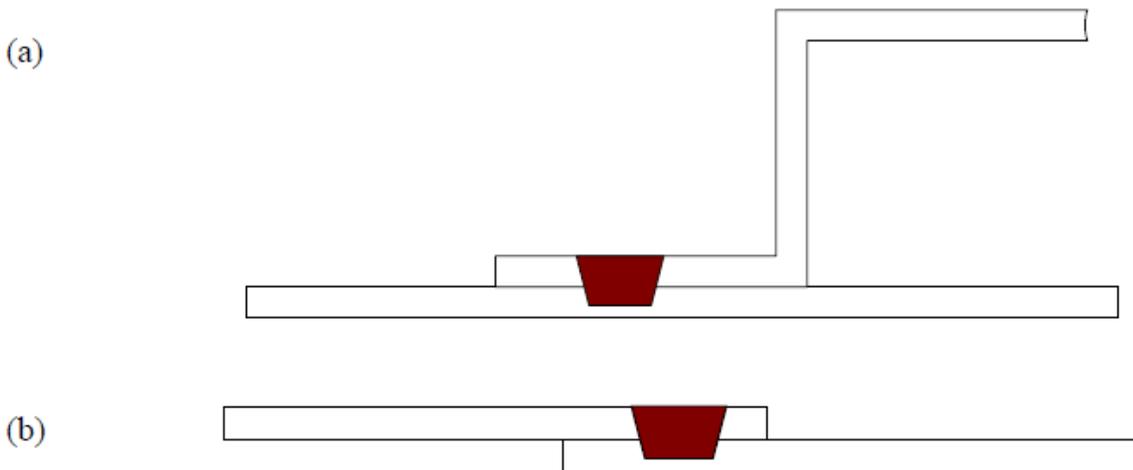
**Figure III.10 :** Présentation du joint bout à bout [28]

Au début du soudage, il est nécessaire que l'outil soit temporairement immobile par rapport au joint afin que la rotation de l'outil génère assez de chaleur localement, permettant d'atteindre une température adéquate pour assurer la qualité de soudure et éviter de briser l'outil [28]. Le cordon de soudure se forme alors que l'outil se déplace transversalement et que la matière est malaxée autour du pion.

### **III.4.2/-Joint soudé par recouvrement :**

Il existe deux types de joints par recouvrement : une plaque soudée à un raidisseur (figure 3-2(a)) ou deux plaques qui se chevauchent (**Figure III.11** (b)). Ces types de joints sont destinés à remplacer l'assemblage par rivetage. Les principes opérationnels sont les mêmes que pour les joints bout à bout. Cependant, un joint par recouvrement ne dispose pas de séparation entre les deux pièces à souder.

L'outil doit passer complètement à travers la plaque supérieure et l'interface entre les deux parties de l'assemblage et pénétrer dans la plaque inférieure. Les couches d'oxydes qui se trouvent à l'interface de ce type de joint sont plus difficiles à briser et à disperser dans la matrice que celles qui se trouvent sur les faces verticales d'un joint bout à bout [29].



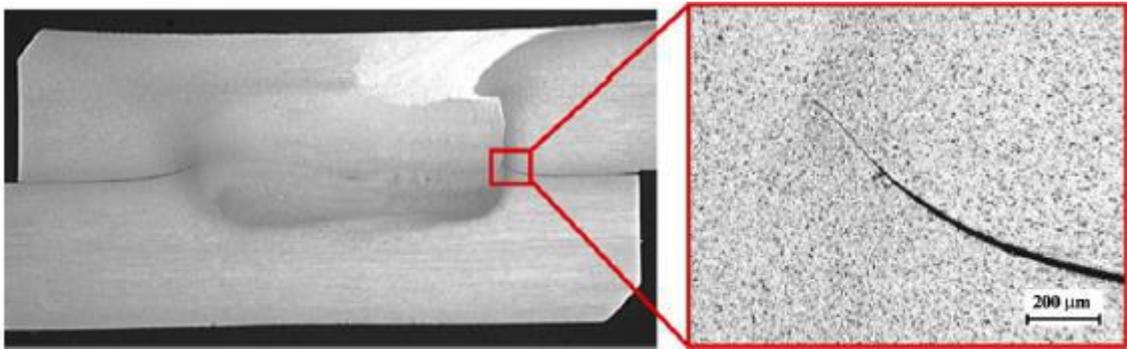
**Figure III.11 :** Différents types de joints soudés par recouvrement, (a) soudure entre un raidisseur et une tôle, (b) soudure entre deux plaques.

Sur la surface du joint, l'outil entraîne le métal ramolli du côté sortant vers le côté entrant ce qui cause un amincissement du côté sortant du joint [30]. À l'interface entre les deux plaques,

### Chapitre III : le Procédé de soudage par friction et malaxage (Friction Stir Welding FSW)

l'écoulement du métal déplacé est contrôlé par la géométrie du pion et le sens de rotation de l'outil. Dans les cas où la combinaison de géométrie du pion et du sens de rotation crée un écoulement de métal principalement ascendant, l'interface entre les deux plaques est dévié vers le haut (dans la direction de l'épaulement). Le soulèvement de l'interface de chaque côté du joint réduit l'épaisseur effective de la plaque supérieure et laisse une fissure de chaque côté du joint (**Figure III.12**) [33 .30] Ce phénomène est communément appelé «hooking » ou hameçon. L'angle du soulèvement peut atteindre 90 degrés [30].

La présence de ces fissures réduit la résistance en fatigue du joint. L'emplacement des fissures entre les deux parties du joint rend leur détection pratiquement impossible autrement que par rayons X ou rayons gamma, augmentant ainsi les frais d'exploitation. Un contrôle accru des paramètres du procédé assurera la bonne qualité du joint et les coûts d'inspection.



**Figure III.12** :Présence de fissures dans un joint par recouvrement [32].

#### ***III.5/-Paramètres du procédé :***

Pour un assemblage donné, la faisabilité du soudage dépend de la nature du ou des matériaux à joindre, de l'épaisseur des pièces à assembler et de la configuration du joint. En outre, l'utilisation d'une technologie d'assemblage telle que le FSW dans une application industrielle nécessite une connaissance adéquate des paramètres d'opération qui définissent les conditions dans lesquelles le soudage entre deux pièces est réalisé. Ces paramètres influencent l'apport de chaleur fourni au matériau et par conséquent l'ampleur des changements subis par la microstructure de ce dernier.

Les principaux paramètres opératoires du FSW sont la géométrie de l'outil, la vitesse de rotation de l'outil, la vitesse d'avance lors du soudage, de même que l'inclinaison de l'outil. Le soudage peut être réalisé en contrôlant la force verticale appliquée par l'outil ou la position verticale de l'outil [33].

### **III.5.1/-Géométrie de l'outil :**

La forme de l'outil de soudage constitue la base du procédé car il ouvre son potentiel d'applications en termes de matériaux, d'épaisseurs soudables et de performances techniques et économiques.

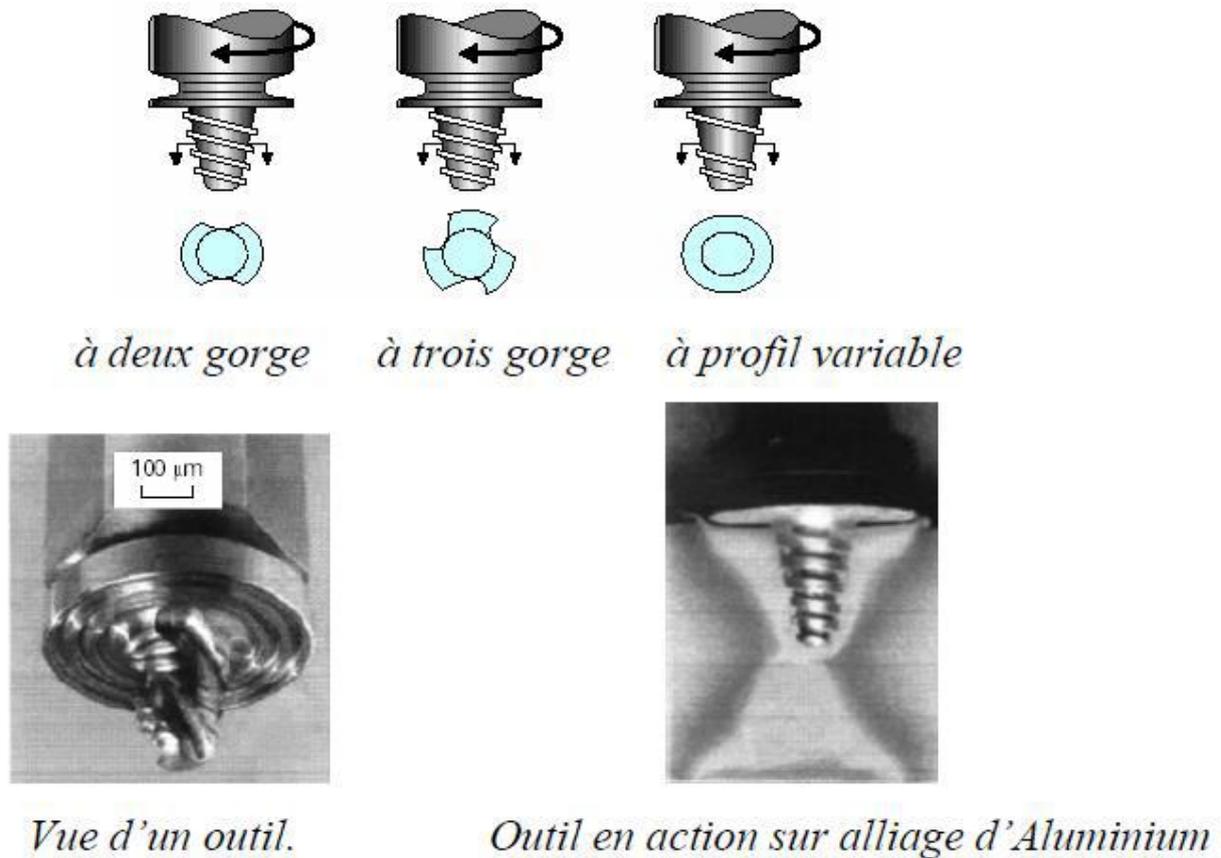
À l'origine du procédé, l'outil comportait simplement un épaulement associé à une tige ou pointe coaxiale l'un et l'autre de révolution. Il est apparu intéressant, sinon primordial, d'affecter la tige de reliefs sous forme de nervures circulaires ou hélicoïdales dans le but d'augmenter l'effet de malaxage du métal et, par suite, de rendre plus facile la formation de la soudure [34].

Les matériaux utilisés pour les outils sont principalement des aciers résistant à haute température et ayant un bon comportement à l'usure, car en fonctionnement, la température de l'outil s'élève à 300/400°C environ. Du fait de ces possibilités nouvelles en regard des procédés classiques, de nombreux développements et brevets ont été réalisés à ce niveau, entourés souvent de confidentialité, tout particulièrement chez les utilisateurs ayant en main leurs propres développements.

C'est pourquoi les informations concernant les outils et les paramètres utilisés dans certaines applications sont difficiles sinon impossibles à obtenir. Les effets de l'outil sur la formation de la soudure combinent, la plupart du temps, celui de l'épaulement et celui de la tige, indissociables dans le fonctionnement du système [34].

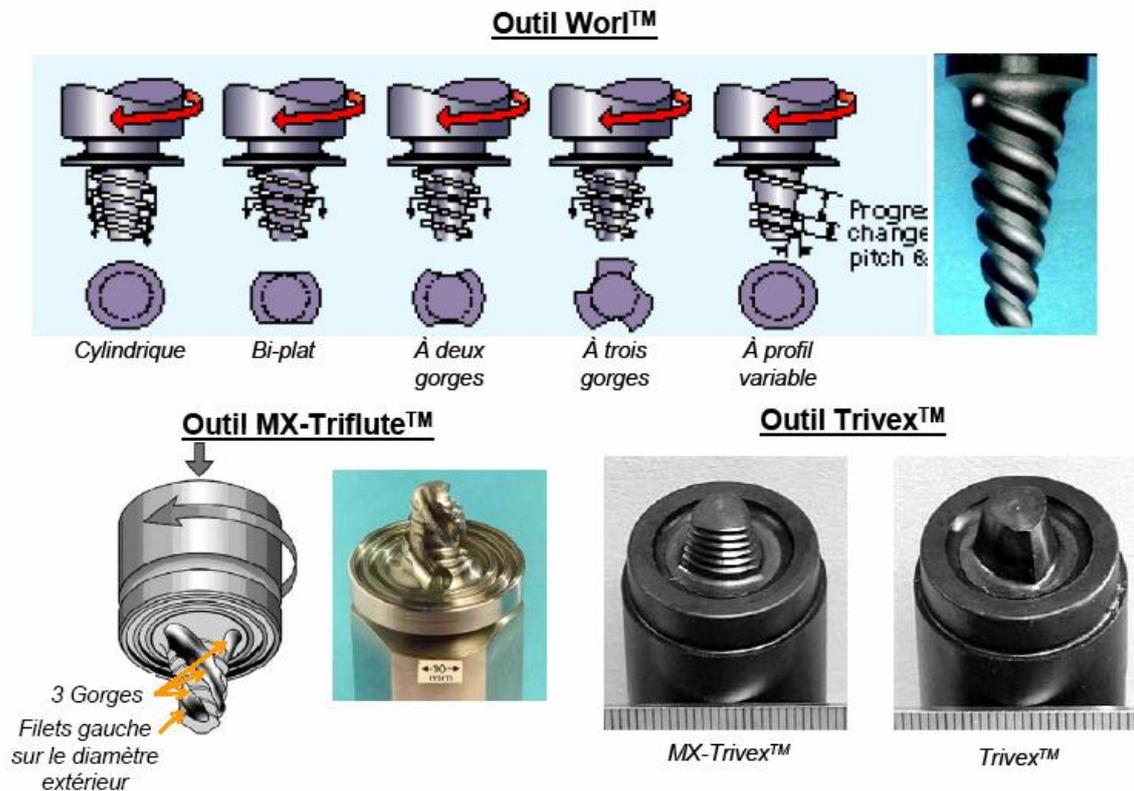
#### **III.5.1.1/-Pion :**

La tige (ou pointe) proprement dite est de dimensions appropriées à la nature des matériaux et à l'épaisseur à souder. Sa longueur est adaptée à la pénétration, qui est nécessairement complète en principe, et elle ne doit pas excéder l'épaisseur des tôles à souder. Comme on peut le voir sur **la Figure III.13**, la tige peut prendre diverses formes simples ou sophistiquées. Elle est généralement tronconique et (ou) prismatique avec évidements ou collets hélicoïdaux subtilement répartis. Certains profils intéressants ont fait l'objet de marques déposées. Dans certaines applications, on a excentré la tige par rapport à son axe de rotation, ce qui est un autre moyen d'amplifier le malaxage. Les dispositions peuvent varier à l'infini, amenant chacune d'elle à un résultat particulier. Mais il faut prendre garde qu'une trop grande liberté dans ce domaine peut conduire à masquer certains effets importants et, de là, conduire à l'échec et au rejet du procédé [34].



**Figure III.13 :** Outils de soudage FSW. [35]

Des études sont menées sur la géométrie du pion, pour optimiser l'opération de soudage et la qualité de la soudure. Les formes de pions sont de plus en plus complexes. Les géométries des outils « WhorlTM » et « MX-TrifluteTM » développées par TWI [36] (l'institut de soudure britannique) en sont de bons exemples. Ces deux types d'outils sont représentés sur la **Figure III.14** ainsi qu'un outil de géométrie plus simple, « TrivexTM ». Le pion « TrivexTM » se compose de trois faces convexes avec ou sans filets. Cette configuration d'outil sans filets est communément utilisée pour la modélisation numérique du soudage par FSW.



**Figure III.14 :** Exemple d'outil FSW développé par TWI [37]

Les outils « Triflute™ » et « Worl™ » ont la forme d'un tronc de cône. La dénomination « MX » signifie qu'il y a des filets à la surface du pion.

Selon le recueil de publications de Mishra et Ma [38], ces types d'outils présenteraient un certain nombre d'avantages par rapport à un outil conventionnel de forme cylindrique :

- ils permettent de diminuer les efforts nécessaires pour avancer dans le matériau plastifié (et ainsi le risque de rupture du pion diminue),
- ils permettent d'augmenter la vitesse d'avance,
- ils réduisent l'asymétrie du cordon de soudure,
- ils réduisent la quantité de matière déplacée lors de la formation du joint (environ 60% de moins pour l'outil Worl™ et environ 70% de moins pour l'outil Triflute™) en confinant la matière autour du pion,
- ils augmentent l'interface entre le pion et la matière malaxée, ce qui favorise l'élévation de température par friction,

### Chapitre III : le Procédé de soudage par friction et malaxage (Friction Stir Welding FSW)

- ils améliorent le flux de matière (l'entraînement de la matière de l'avant vers l'arrière du pion et de haut en bas) .
- ils facilitent la pénétration de l'outil dans la matière.

Des essais effectués avec ces deux outils ont montré qu'il était possible de souder bout à bout des tôles d'aluminium d'une épaisseur de 35 mm voire 50 mm en une passe [37].

L'avantage majeur des outils « WorITM » et « TrifluteTM » par rapport à un outil classique de forme cylindrique est d'avoir un meilleur rapport (ratio) entre le volume du pion et le volume de matière déplacée (rapport entre volume statique et volume dynamique). Par exemple, le rapport établi entre deux outils similaires, c'est-à-dire de même diamètre et de même longueur, lors du soudage d'une plaque d'aluminium, serait de 1.1 :1 pour un outil cylindrique, de 1.8 :1 pour 1 outil de type « WorITM » et de 2.6 :1 pour un outil de type « MX-TrifluteTM ».

#### **III.5.1. 2/-Épaulement :**

Le rôle de l'épaulement est de fournir une butée déterminant la pénétration de la tige ainsi que de bloquer le reflux de la matière vers le haut.

Sa forme est globalement plane et perpendiculaire à l'axe de rotation, ses dimensions transversales restant suffisamment grandes et de cinq fois environ le diamètre de la tige afin de couvrir totalement la zone affectée. Différentes dispositions ont été expérimentées dans lesquelles l'épaulement a un léger dégagement intérieur et sa portée ne s'exerce alors que sur la périphérie en formant des stries caractéristiques ; ou encore comporte des ondulations concentriques dont l'effet de friction permet de mieux contrôler la surface de la soudure.

On a également cherché à contrôler la pression de l'épaulement par des galets latéraux prenant appui et roulant sur la surface des tôles [34] .

L'outil FSW a une forme enveloppe relativement simple. Il est schématisé sur la Figure (1.5). Il a trois fonctions principales [36.39] .

- chauffer les pièces par frottement et par déformation plastique [36.40],
- malaxer les matériaux pour former le joint [36],
- contenir le flux de matière sous l'épaulement et autour du pion [36]

Selon Fuller [40], pour assurer ces fonctions l'outil doit être non consommable.

L'épaulement a pour rôle d'amener de la chaleur par frottement et de confiner la matière malaxée sous l'outil [38-41]. Le pion, lui, a pour fonction de malaxer le matériau [40]. Toutefois, c'est l'action combinée de ces deux éléments qui assure l'apport de chaleur et le flux de matière nécessaire à la formation du joint. La Figure III.15 présente différentes géométries d'outils. Les formes du pion et de l'épaulement ainsi que la présence de filets, de gorges, de rainures, etc. conditionnent le flux de matière et la génération de température [41-38]. L'ensemble influence la microstructure du cordon formé [38] et donc ses propriétés mécaniques. C'est pourquoi, la géométrie de l'outil a fait l'objet de différents développements.

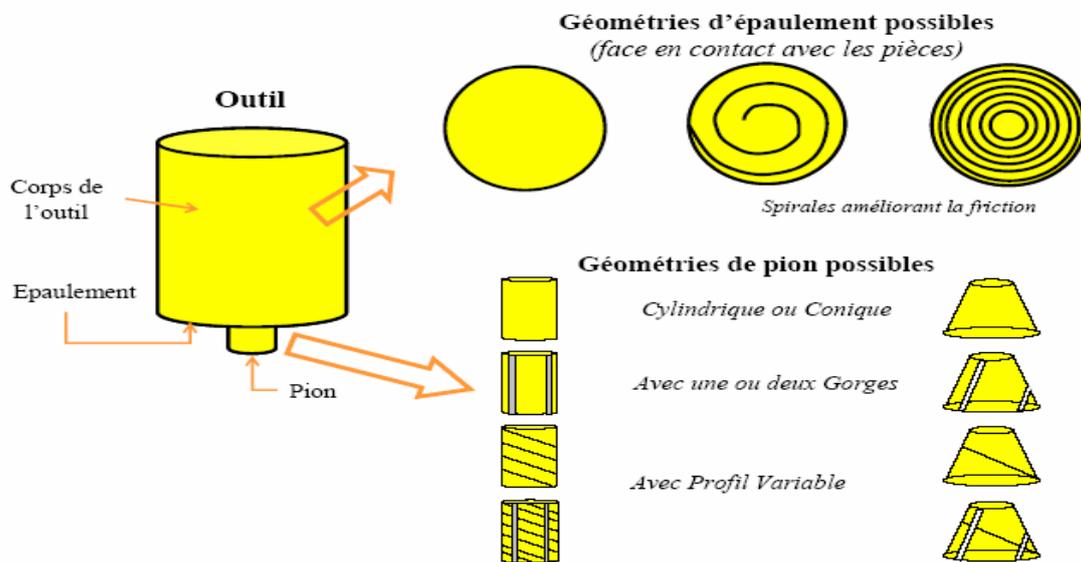
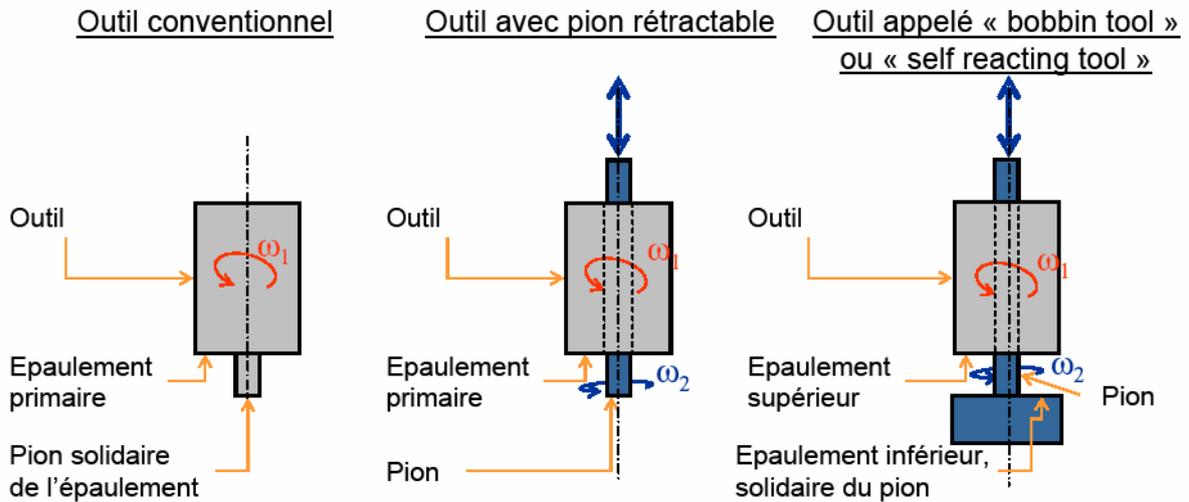


Figure III.15 : Outil de soudage [34].

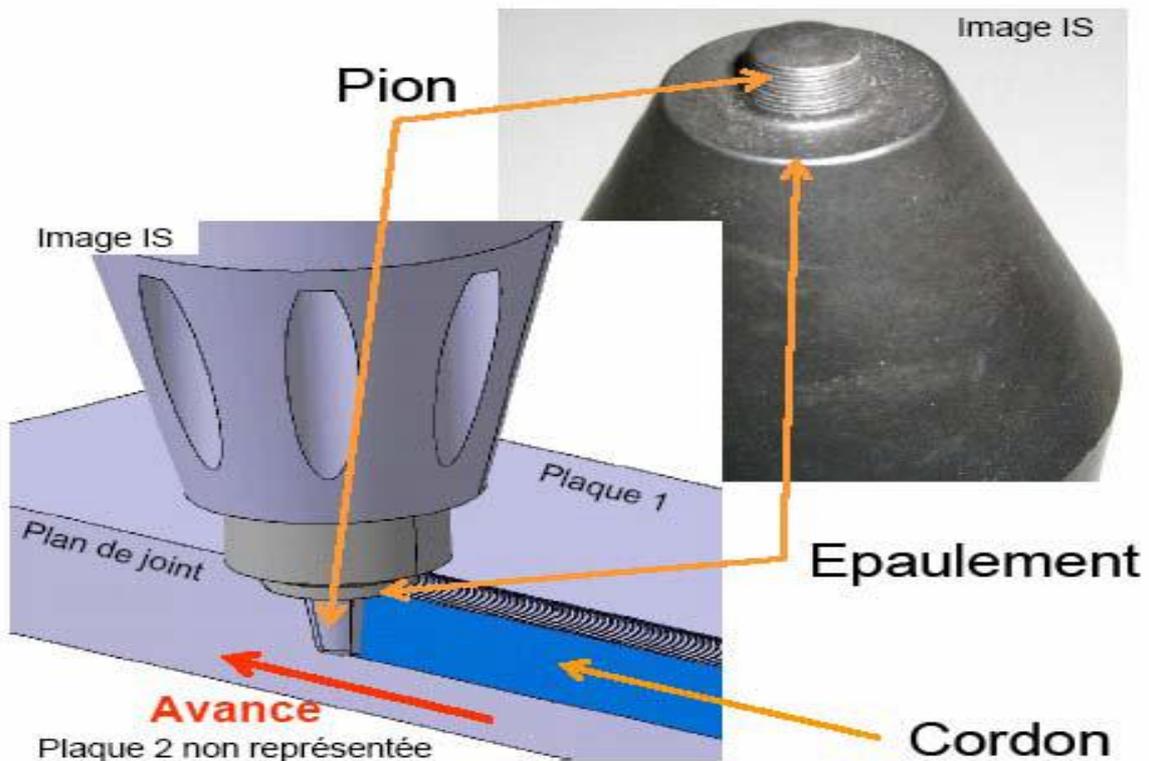
### III.5.1.3/-Différents types d'outils :

L'outil de soudage en FSW a un rôle primordial. Il comporte deux parties : un épaulement et un pion. Il existe trois configurations d'outil possibles qui sont utilisées pour le soudage par friction malaxage (FSW). Ceux sont, l'outil conventionnel, l'outil à pion rétractable et l'outil à double épaulements appelé «bobbin tool» ou «self reacting tool». Ces trois types d'outil sont schématisés sur la Figure III.16.



**Figure III.16 :** Les différentes technologies de soudage [42-43]

- ✓ *L'outil conventionnel* (Figure III.17) se présente en un seul bloc (le pion et l'épaulement sont solidaires). Il n'y a donc pas de mouvement relatif possible entre le pion et l'épaulement. Le soudage s'effectue avec appui et frottement de l'épaulement sur une seule face. C'est la configuration d'outil la plus simple.



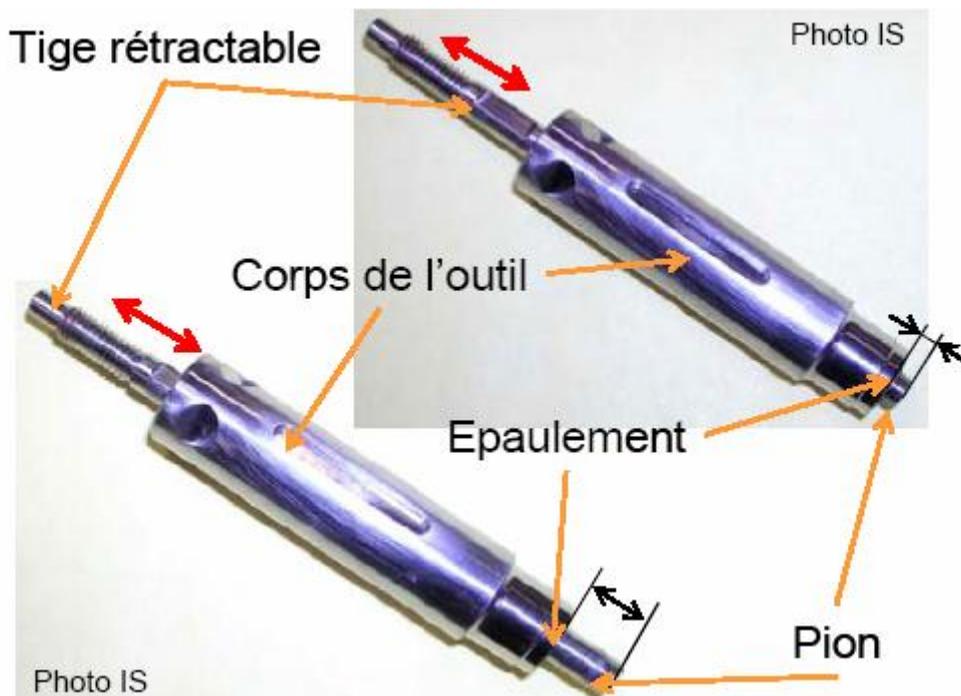
**Figure III.17 :** Outil conventionnel [43]

### Chapitre III : le Procédé de soudage par friction et malaxage (Friction Stir Welding FSW)

Cette technologie possède quelques inconvénients :

- Un pion est calibré pour souder une épaisseur donnée. Ainsi, si l'on modifie l'épaisseur soudée, il faudra changer d'outil afin d'adapter la longueur du pion et éventuellement le diamètre de l'épaulement.
- En cas de rupture du pion, il faut changer tout l'outil (pion + épaulement).
- A la fin de l'opération de soudage, la sortie de l'outil génère la formation d'un trou (empreinte du pion dans la matière).
- Le risque de manque de liaison en racine subsiste (pénétration du pion insuffisante). Dans ce cas, le cordon formé n'est pas égal à l'épaisseur des tôles assemblées. Ce défaut, également appelé « kissing bond », peut fortement affecter la tenue mécanique des joints soudés (notamment en fatigue). Le meilleur moyen de mettre en évidence ce défaut est l'essai de pliage à l'envers (la racine de la soudure étant en traction).

- ✓ *L'outil à pion rétractable* (Figure III.18 ) a la particularité de fonctionner avec un épaulement et un pion actionné par deux axes machine indépendants l'un de l'autre (possibilité de mouvement relatif).



**Figure III.18 : Outil conventionnel [43]**

### Chapitre III : le Procédé de soudage par friction et malaxage (Friction Stir Welding FSW)

L'avantage de cet outil est de permettre la réalisation d'assemblages dont les épaisseurs varient le long du joint soudé, et de permettre d'éviter la formation d'un trou à la fin de l'opération de soudage (par retrait progressif du pion tout en conservant l'épaulement en contact avec les tôles). Le soudage s'effectue, tout comme pour l'outil conventionnel, sur une seule face. Une machine plus complexe est néanmoins nécessaire pour pouvoir piloter le pion et l'épaulement de manière indépendante.

- ✓ **L'outil à double épaulement**, « *bobbin tool* » ou « *self reacting tool* » (Figure III.19) possède deux épaulements positionnés côtés endroit et envers des pièces à souder. L'apport de chaleur s'effectue par frottement des épaulements sur les deux faces des pièces. La distribution de température est alors symétrique à l'intérieur du joint. La soudure obtenue est verticalement symétrique et le risque de manque de liaison (défaut de pénétration) est éliminé [43].

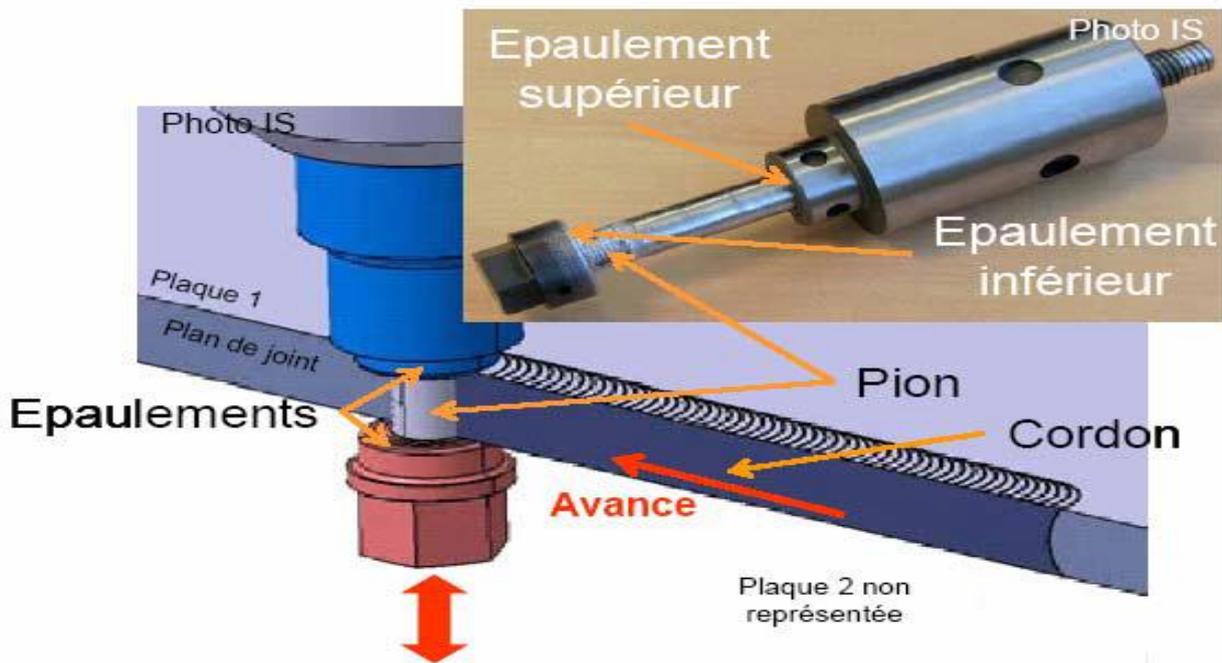


Figure III.19 : "Bobbin Tool" ou "Self Reacting Tool" [43]

#### **III.5.1.4/-Matériau de l'outil :**

Le matériau de l'outil doit résister aux contraintes et aux températures générées lors du soudage FSW [40]. D'autres critères rentrent également en ligne de compte, tels que la résistance à l'usure, la

Chapitre III : le Procédé de soudage par friction et malaxage (Friction Stir Welding FSW)

non diffusivité vers le matériau soudé, ses capacités à être usiné, etc. [40]. Ainsi, le matériau de l'outil sera choisi d'après le matériau soudé et l'épaisseur soudée, comme présenté sur le Tableau 1.

Alliage	Epaisseur	Matériau Outil
Alliages d'aluminium	< 12 mm	Acier à outil, WC-Co
	< 26 mm	MP159
Alliage de Magnésium	< 6 mm	Acier à outil, WC
Cuivre et ses alliages	< 50 mm	Alliage de nickel, PCBN*, alliage de tungstène
	< 11 mm	Acier à outil
Alliage de titane	< 6 mm	Alliage de tungstène
Acier Inoxydable	< 6 mm	PCBN*, alliage de tungstène
Acier faiblement allié	< 10 mm	WC, PCBN*
Alliage de Nickel	< 6 mm	PCBN*, alliage de tungstène

*\*PCBN: Polycrystalline cubic boron nitride*

Tab II.2: Synthèse des différents matériaux d'outil couramment utilisés. [40].

### **III.5.2 /-Vitesse de rotation et vitesse d'avance :**

La vitesse de rotation et la vitesse d'avance de l'outil dépendent de la nature de l'alliage à assembler et des dimensions des plaques. Le couple maximal résistant permet d'optimiser le coût énergétique du procédé. Dans les applications connues, la vitesse de rotation est de l'ordre de 200 à 500tr/min et la vitesse de soudage reste limitée et généralement inférieure à 1m/mn. En effet, la progression de l'outil doit permettre à la matière de s'écouler correctement de l'avant vers l'arrière de l'outil.

Les deux vitesses sont liées par le rapport  $\frac{\text{vitesse d'avance}}{\text{Rayon du pion vitesse de rotation}}$  Pour qualifier le

Soudage. Si ce rapport est faible, on dit que le soudage est chaud car le malaxage et la chaleur dissipée par frottement seront élevés et engendreront de fortes températures. Par contre, si ce rapport est grand, on dit que le soudage est froid car la chaleur dissipée par frottement entre l'outil et les plaques ainsi que le malaxage de la matière n'induisant pas des températures très élevées dans les pièces.

### **III.5.3/-Angle d'inclinaison de l'outil :**

L'angle d'inclinaison de l'outil par rapport à la surface des plaques à souder est un paramètre important à prendre en considération dans l'optimisation du procédé car son choix approprié permet à la matière de passer efficacement de l'avant vers l'arrière du pion.

#### **III.5.3.1/-Efforts appliqués :**

Les efforts appliqués sont de trois types :

**a/-Effort appliqué en phase de pénétration :** Pour permettre à l'outil de progresser dans le joint à souder, un effort axial est imposé. Grâce à l'action de l'effort axial et au changement de comportement du matériau à l'état pâteux (les déformations plastiques et les frottements mis en jeu entre le pion et les deux plaques provoquent une montée progressive de la température), le pion s'enfonce

progressivement entre les deux plaques à souder en extrudant la matière malaxée. Il pénètre dans la matière jusqu'à ce que l'épaulement soit en contact avec la surface des deux plaques à souder. Cette phase initie les conditions thermomécaniques dans lesquelles l'opération de soudage va débiter, en effet, elle est peu étudiée dans la littérature comme le montre Gerlich et al [44].

**b/-Effort appliqué en phase transitoire d'échauffement :** L'effort apparaît dans la phase transitoire d'échauffement lorsque l'épaulement entre en contact avec la surface des plaques à souder. Zaeh et al [45] montrent que l'usinage d'un pré-trou permet de réduire les efforts appliqués en fin de pénétration.

**c/-Effort appliqué en phase de soudage :** La formation du joint soudé exige que l'épaulement de l'outil soit dans une position par rapport à la surface des tôles qui permet d'assurer l'apport d'énergie par frottement et de contenir le matériau malaxé [54]. Une mauvaise position de l'outil peut entraîner la formation de défauts [59]. Elle peut se contrôler de deux manières, soit par le pilotage de la position verticale de l'outil, soit par le contrôle de l'effort vertical appliqué sur l'outil au cours de la phase de soudage. La minimisation de l'effort appliqué améliore l'efficacité énergétique du procédé. Cet effort doit être optimal pour obtenir une bonne qualité du joint. Zhang et al. [116] ont montré, à travers la simulation numérique, qu'un effort trop faible entraînait la formation d'un défaut tunnel à l'arrière du pion à cause d'une déformation plastique du matériau insuffisante. Cependant, un effort trop grand implique un enfoncement de l'outil dans la matière à cause d'une déformation plastique et d'une température du matériau trop importantes. Parmi les solutions retenues qui permettent d'améliorer le malaxage, on trouve l'utilisation d'outils filetés et/ou vrillés car ces derniers engendrent un mouvement vertical du métal déplacé, ce qui mène à une meilleure intégrité du joint. A l'inverse, un outil lisse peut mener à un joint montrant des cavités internes. Cela conduit à une réduction importante de la résistance du joint en traction.

### **III.6 -/ Avantages et inconvénients du procédé :**

Par rapport aux procédés de soudage classiques, le procédé FSW possède des avantages qui peuvent être classés comme suit :

➤ **Avantages liés au procédé,**

- Large gamme d'épaisseurs soudables,
- Préparation des surfaces des pièces à assembler par usinage mécanique,
- Pas de décapage chimique avant soudure pour alliages légers,
- Possibilité de souder des matériaux différents,
- Soudure en une seule passe sur toute l'épaisseur, ou en deux passes opposées sur épaisseurs fortes,
- Pas de finition après soudage,
- Procédé sans apport de matière pour la réalisation de la soudure,
- Possibilité de soudure dans toutes les orientations.

➤ **Avantages liés à la soudure par FSW :**

- Gamme de matériaux très étendue,
- Possibilité de soudure des alliages qui sont difficiles à souder par les procédés classiques,
- Soudage à l'état solide : pas de solidification du bain de fusion (pas de défaut de porosité, pas de fissuration à chaud,
- Propriétés mécaniques bonnes,
- Effets limités des contraintes résiduelles,
- Faible distorsion.

➤ **Avantages économiques et environnementaux :**

- Procédé non polluant; pas de projections de gaz nuisibles ni d'émanations de fumées.
- Procédé économique en énergie.
- Pas de circulation d'eau de refroidissement,
- Pas de finition après soudage (sauf pour les soudures circulaires),
- Bon rendement énergétique,

➤ **Avantages liés à l'équipement :**

- Automaticité aisée du procédé ; contrôle par commande numérique,
- Equipement électromécanique de conception simple de type machine-outil,
- Pas de protection thermique,
- Consommables limités à l'outil et à l'énergie électrique,
- Possibilité d'un contrôle en ligne des paramètres,

✓ **Inconvénients:**

Dans ce procédé, et contrairement aux procédés continus conventionnels, la soudure s'effectue en « aveugle », du fait que, l'épaulement et l'appui masquent complètement les phénomènes dont la soudure résulte. L'impossibilité visuelle directe est un handicap dans la recherche de paramètres et dans la surveillance du soudage en cours ; s'impose ainsi la nécessité de disposer d'un système de surveillance et de contrôle des paramètres en temps réel. De plus, en fin de cordon, le retrait de l'outil laisse un trou qu'il n'est pas possible de combler de façon simple par FSW. Pour des soudures linéaires ouvertes, cela implique la mise en œuvre de taquets à éliminer en début et en fin de cordon [46].

***Chapitre IV :***  
***Modélisation numérique des***  
***phénomènes physiques du***  
***cordon de soudure***

## ***IV.1 /-introduction :***

Le procédé FSW permet d'assembler des alliages (tels que les alliages d'aluminium, de cuivre et de titane...) réputés difficilement soudables par les techniques de soudage conventionnels par fusion (TIG, MIG-MAG...). Il est notamment introduit dans divers domaines favorisant l'utilisation de l'aluminium tels que l'aviation, l'automobile, le nucléaire et bien d'autres. Cela est grâce à sa meilleure résistance mécanique et une longue durée de vie en fatigue de ses joints de soudure.

La maîtrise de cette technique nécessite la connaissance des phénomènes intervenants et l'effet des différents paramètres du procédé. Dans ce cadre, plusieurs auteurs ont étudié par la simulation numérique ce procédé, en considérant l'aspect thermique ou thermomécanique [48-49].

Des études théoriques et expérimentales ont permis de mettre en évidence les phénomènes de transfert de chaleur et l'écoulement de la matière pendant ce processus FSW. Tang et al. [48] ont déterminé le champ thermique qui règne dans les pièces soudées par ce procédé FSW. Ils ont montré que la distribution de la température est symétrique par rapport à la ligne de soudure, et la valeur maximale de la température au centre de la plaque (Al 2024 AA) a été estimée d'environ 450°C.

Chao et Qi [50] ont déterminé expérimentalement que le coefficient de frottement a un impact direct et plus important sur la quantité de chaleur engendrée et donc sur la température maximale atteinte dans le joint. Cependant, l'analyse des transferts de chaleur, lors du procédé, réalisée par Chao et al [49], a permis de quantifier la quantité d'énergie fournie à l'outil et à la plaque. En effet, des mesures de température par des thermocouples ont été effectuées à l'intérieur de l'outil et dans l'épaisseur de la plaque. Une méthode numérique inverse est employée pour optimiser les flux de chaleur allant vers l'outil et vers la plaque, en se basant sur ces mesures expérimentales. Ils ont déduit que la quantité de chaleur transmise à l'outil constitue environ 5 % de l'énergie totale dépensée.

Song M. et al. [51.52] ont effectué une étude numérique tridimensionnelle, en utilisant un système de coordonnées mobile lié au déplacement de l'outil, afin de simplifier la difficulté de la modélisation. Les équations du modèle sont résolues par la Méthode des Différences Finis MDF. Ils ont indiqué que les résultats obtenus sont en bon accord avec leurs mesures expérimentales. Ils ont conclu aussi que le préchauffage de la pièce est bénéfique pour le FSW.

Dans un autre travail, Song M. and Kovacevic R. [53] ont étudié expérimentalement et numériquement le phénomène de transfert de chaleur transitoire dans la même configuration. Ils ont détaillé l'étude de la structure dynamique et thermique entre la phase de pénétration et la phase de retrait de l'outil.

Ils ont considéré que, la chaleur créée par le frottement entre l'épaulement et les pièces à souder comme une source surfacique, d'une part. D'autre part, la chaleur apportée par le pion est modélisée comme une source de chaleur volumique uniforme engendrée par la déformation plastique de la matière près et adjacente de pion. Les résultats obtenus montrent un accord raisonnable avec les données expérimentales.

Dans ce travail, on va étudier le comportement thermique des joints soudés par une technique récente FSW, en utilisant dans la simulation le modèle de source de chaleur proposé par Colegrove [54]. Le système de coordonnées adopté dans notre cas est lié à l'outil de soudage. La méthode des éléments finis tridimensionnels MEF est adoptée aussi dans la présente simulation. On présente par cette simulation les résultats de l'alliage Al 2024 AA .

## ***IV.2 /-Objectif :***

Les objectifs de cette partie de travail peuvent être résumés comme suit :

\_ approche expérimentale par une étude de la propagation de la chaleur sur une plaque en aluminium lors du soudage par friction malaxage à travers un système de mesure utilisant des thermocouples positionner dans différents points de la plaque et connecter à un enregistreur mesurant en temps réel la température et déduite sur la plaque lors du passage de l'outil.

\_Une modélisation à l'aide du logiciel ANSYS pour reproduire le phénomène de manière numérique puis compare au essais expérimentaux afin de mieux comprendre phénomène de transfert de chaleur lors du procédé de soudage par friction malaxage.

## ***IV.3 /-Approche numérique :***

Dans notre étude ,le logiciel pour l'analyse numérique ANSYS 17.0 a été utilisé pour la simulation numérique du procédé de soudage par friction- malaxage ,c'est l'un des outils numérique utilisé pour obtenir des solutions approximatives à une grande variété de problème d'ingénierie .le logiciel ANSYS dispose de nombreuses fonctionnalités d'analyse par élément finis, allant d'une analyse simple, linéaire et statique à une analyse dynamique complexe non linéaire et transitoire .les réponses thermiques du matériau au cours du processus de soudage par friction-malaxage sont étudiées par simulations par élément finis.

Dans cette étude ,un modèle thermique est développé pour l'analyse .tout d'abord ,l'élément en brique est SOLIDE70,homogène ;un modèle de transfert de chaleur tridimensionnel linéaire et transitoire est développé pour déterminer les champs de température ,indépendamment de la

vitesse.les modèles d'éléments finis sont construits de manière paramétrique à l'aide d'APDL(ANSYS Parametric Design Language)fourni par ANSYS [106].les modèles sont ensuite validés en comparant les résultats avec les données de matériau établies.

#### ***IV.4 /-Modélisation Mathématique :***

La modélisation du phénomène thermique du procédé FSW est basée sur la résolution de l'équation de conduction thermique, dans le joint de soudure, complétée avec un modèle de source convenable. Cette source représente l'effet thermique de l'outil de soudage dans les plaques à assembler.

Ce qui nécessite la connaissance du flux thermique absorbé par ces plaques à souder. Le système d'équations mathématiques est clôturé avec les équations des conditions aux limites et initiales appropriées.

##### ***IV. 4.1/- Hypothèses simplificatrices :***

Le système de coordonnées (o, x, y, z) est supposé mobile et lié à l'axe de l'outil. Le problème de transfert de chaleur traité devient quasi-stationnaire avec un système d'équations Eulérien. La température maximale de la pièce pendant le soudage reste toujours inférieure à la température de fusion  $T_f$  du matériau.

- L'échange thermique entre la pièce à souder et l'environnement est supposé mener uniquement par le mode de convection naturelle avec un coefficient d'échange  $h\infty$ .
- La chaleur due à la déformation plastique de la matière, induit par l'outil FSW, est supposée négligeable, en le comparant avec la chaleur générée par frottement.

##### ***IV.4.2 /-Équation du transfert de chaleur dans la pièce à souder :***

Dans un système de coordonnées mobile et selon les hypothèses précédentes, l'équation de transfert de chaleur dans la pièce à souder est donnée comme suit :

$$\frac{\partial(C\rho T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + v_m \frac{\partial(C\rho T)}{\partial x} + S \quad (1)$$

Où : C est la capacité thermique,

$\rho$  est la densité,

$k_x, k_y, k_z$  sont les composantes de la conductivité thermique.  $v_w$  est la vitesse de soudage,

S est la source de chaleur volumique dans la pièce et elle est négligée par rapport à la source de chaleur principale issue par frottement aux frontières. Donc on a :

$$S = 0$$

Cette dernière chaleur principale ( $q_s$  et  $q_p$ ) est considérée à travers les conditions aux limites et elle déterminée par le modèle suivant.

#### **IV.4.3 /-Modèle de source de chaleur :**

Dans le procédé FSW, il existe deux grandes sources d'apport d'énergie : la chaleur engendrée à l'interface du pion/ pièce à souder  $q_p$  et la chaleur engendrée par le frottement à l'interface épaulement /pièce à souder  $q_s$  . Cette dernière source de chaleur représente la contribution de la force importante de forgeage  $F_n$  , verticale aux surfaces de frottement principales (épaulement /pièce) ; tel que ce contact de frottement est géré par l'état de ces surfaces caractériser par le coefficient du frottement  $C_f$  d'une part, et d'autre part par la vitesse de rotation  $\omega$  de l'outil (tr/min). La source  $q_s$  est supposée comme suit [53,54] :

$$q_s = \frac{2\pi \cdot C_f F_n R_i \omega}{60 \cdot A_s} \quad (2)$$

Où  $R_i$  est la distance entre l'axe de rotation de l'outil et un point à l'interface au-dessous de l'épaulement.

$A_s$  est la surface de frottement de l'épaulement.

La chaleur engendrée à l'interface pion/pièce se compose par trois portions :

- (a) la chaleur générée par le cisaillement de la matière,
- (b) la chaleur générée par le frottement sur la surface de filetage du pion,
- (c) la chaleur engendrée par le frottement sur la surface verticale du pion. Dans ce travail, nous négligeons le premier et le troisième parties (a et c) par rapport la partie b. Colegrove [53] a donné le modèle suivant de cette source chaleur (la partie b) :

$$q_p = \frac{C_f \bar{Y} \cdot 2\pi r_p \omega}{60 \sqrt{3(1 + C_f^2)}} \quad (3)$$

Où  $\bar{Y}$  est la contrainte de cisaillement moyenne du matériau,  $r_p$  est le diamètre du pion d'outil,  $C_f$  est le coefficient de frottement .

Ainsi on a la chaleur totale donnée par :

$$S = Q_{\text{totale}} = q_s + q_p \quad (4)$$

#### **IV.4.4 /-Conditions aux limites :**

- Les transferts thermiques à l'interface pièces /milieu ambiant (S1) sont modélisés par une convection avec un coefficient d'échange global :  $h_{\infty} = 12.25 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ . Ce coefficient d'échange du milieu ambiant qui l'air est déduit de l'article de Song et al [51].

L'équation sur la surface (S1) est donnée par :

$$K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = h_{\infty} (T - T_0) \quad (5)$$

Les conditions aux limites sur les surfaces de frottement (S2) à l'interface :

- Le transfert de chaleur à l'interface épaulement/ pièce à souder est :

$$K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = q_s \quad (6)$$

- Le transfert de chaleur à l'interface Pion / pièce à souder est :

$$K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = q_p \quad (7)$$

Les quantités  $q_s$  et  $q_p$  sont calculées à partir des équations (2) et (3).

- Le transfert de chaleur à l'interface de contact (S3), (la pièce à souder avec le support inférieur) est :

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

Où  $\bar{h} = 6.25 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  [51].

Le contact entre la pièce à souder avec le support inférieur sont supposées donc sous un mode de transfert par convection ayant un coefficient de transfert de chaleur spécifique  $\bar{h}$ .

Puisque les deux pièces à souder sont symétriques de part et d'autre du plan vertical du soudage (parallèle au cordon de soudure) et par rapport à l'outil. Donc, on peut supposer que le gradient de température le long de ce plan selon la direction transversale au soudage, est nul :

$$K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{x \text{ sym}} = 0 \quad (9)$$

- La température à l'état initial de l'outil et de la pièce à souder est :

$$T(x,y,z,0) = T_i$$

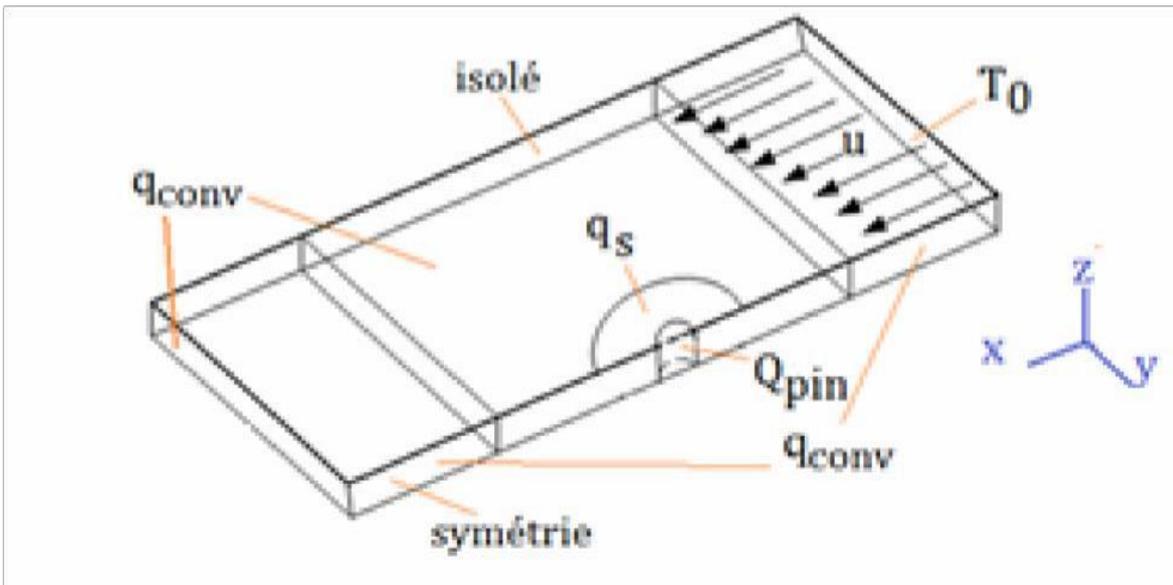
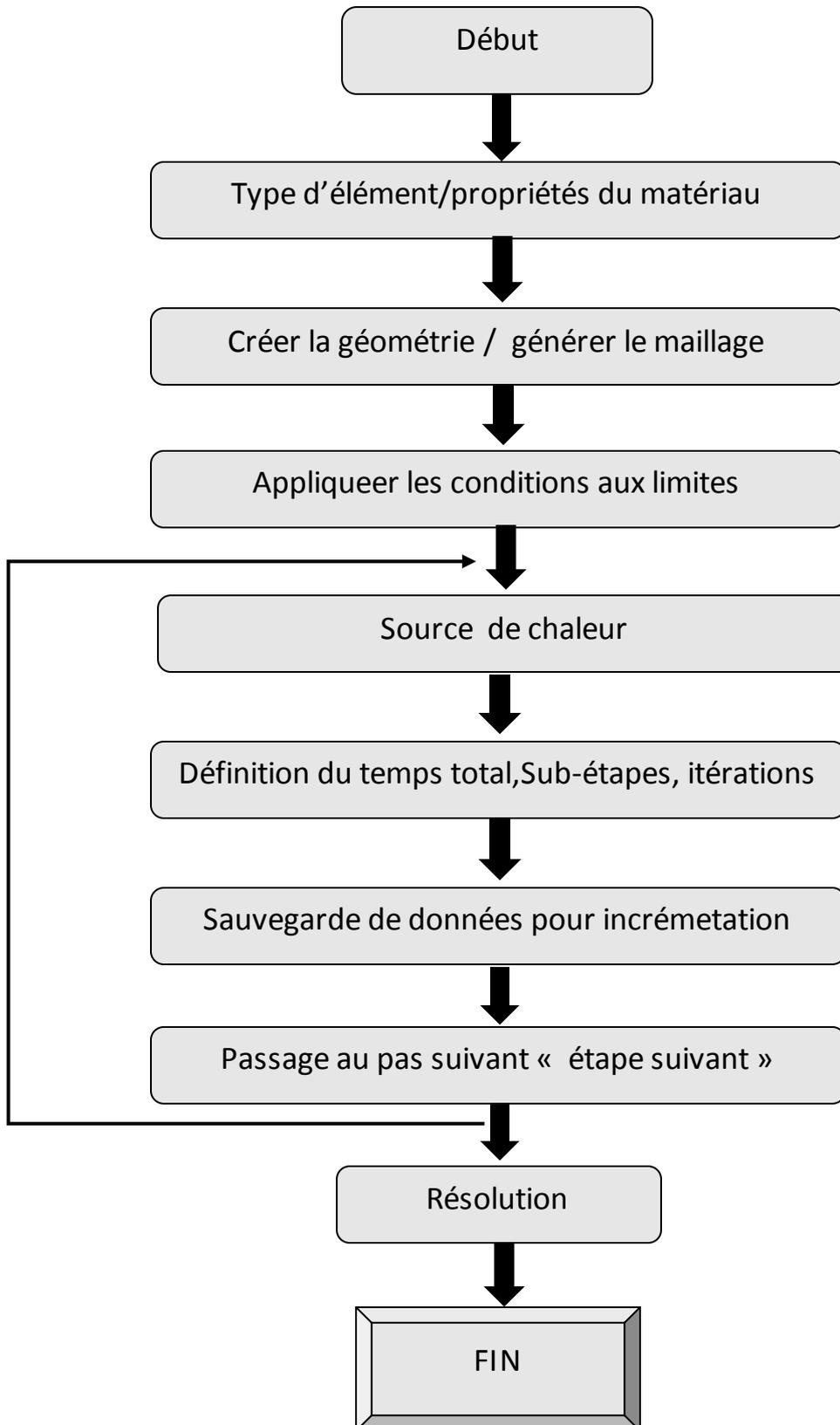


Figure IV.1 :condition aux limites du modèle pour le soudage FSW [55].

### IV.5 /-Programme de simulation de l'écoulement thermique lors du Soudage par friction malxage sous ANSYS



## ***IV.6 /-Etapas de résolution et d'analyse sous ANSYS :***

Pour la résolution d'un problème physique les principales étapes à suivre sont :

- 1-la définition du domaine d'étude et d'analyse, dans notre cas (thermique).
- 2-la création ou l'importation de la géométrie /ou du domaine de calcul.
- 3-la définition des matériaux (propriétés) /traçage des propriétés en fonction de la température
- 4-la définition et le choix du type d'éléments finis pour l'analyse (prédéfini).
- 5-la génération du maillage selon l'ordre des matériaux et les densités voulues.
- 6-l'application des conditions aux limites.
- 7-l'introduction des variables de la source thermique (remplissage des matrices ..).
- 8-l'avant résolution :
  - \*Définition du type d'analyse (stationnaire, transit, harmonique ,,,).
  - \*Examen de l'option du contrôle de la solution (cas non linéaire ou couplé).
  - \*Spécification des conditions initiales d'un calcul transitoire (taille du temps du phénomène, pas du temps, et paramètre relatifs,,) .la spécification du contrôle des outputs (paramètres de sortie des différents résultats).
- 9-l'enregistrement de toute la base de données générée par le code.
- 10-lancement de la résolution par solve ou Lssolve (résolution du système algébrique obtenu par l'un des programmes prédéfinis).
- 11-l'exploitation et traitement des résultats (post-processor).

## ***IV.7/-Procédure globale de résolution par nos programmes :***

L'explication de la procédure de résolution du problème thermique de nos programmes, d'une manière globale, est menée dans la suite conjointement avec l'organigramme globale.

En introduisant le programme établi (sous le mode commandes prédéfinie) ; L'ANSYS va lire toutes les données du fichier data (paramètre du soudage et les données géométriques), puis il passe aux calculs de quelques variables en fonction des données lues.

Puis dans la partie de modélisation, on choisit le type d'élément fini qui est plane55 sert au calcul 2D. ensuite, on lui introduit les propriétés du matériau (al 7075) en fonction de la température. Nous donnons les dimensions des tôles à souder et on donne les subdivisions selon nos variables (nnx, nny, ...) et le coefficient 'Rap' de raffinement près de la soudure. Les surface /volumes, les nœuds/ élément et la ligne de soudage seront créés dans cette partie de modélisation.

Dans la session résolution, on spécifie au début quelques options servant à la résolution. Par exemple, on spécifie que le calcul est transitoire, la méthode de résolution su système algébrique non linéaire est celle de Newton-Raphson.

Ensuite, applique les conditions aux limites, en commençant par la température initiale  $T_0$  (de 300 K sur tous les points du maillage). Puis, on sélectionne les points des facettes de frontières (NSEL) et en utilisant la commande CONV on applique les conditions aux limites de convection.

La partie qui le suit concerne une étape importante, c'est l'introduction du modèle source opte du problème thermique et son application. Donc, on déclare la matrice spécifique Q du modèle source et ses indices (x,y,z,time), en suite leurs remplissage conformément au maillage réalise et les pas du temps su soudage .

Puis, on applique les étapes de chargement de l'effet de la source, pas la commande HFLUX uniquement dans la zone où se situe la source a l'instant considéré au cours de son déplacement (dans la boucle du temps) et éventuellement aussi la boucle du temps de refroidissement. Pour chaque pas du temps, on écrit ces données à l'ANSYS dans un fichier spécifique a cet instant par la commande LSWRITE. Une fois tous les chargements sont appliqués, on entame la résolution du système matriciel non linéaire élaboré par toutes les données introduites, en utilisant l'algorithme de Newton-Raphson prédéfini dans l'ANSYS et sélectionné précédemment. Le lancement de la boucle de résolution pour tous les instants de chargement (load steps) se fait par la commande LSSOLVE qui

lut tous les fichiers spécifiques définis précédemment. Puis, on registre toute la base de données générée.

L'étape suivante concerne la session de Post-traitement des résultats obtenus. Une fois la résolution converge et termine (qui nécessite assez du temps), on vérifie au premier lieu le sens physique des résultats. Puis, on trace le maillage élaboré. On affiche le champ de la température pour différentes positions choisies et on compare avec d'autres résultats numériques pour vérifier la qualité du maillage utilisé. Une fois il est acceptable (pas de changement significatif dans les valeurs obtenues), on affiche les cycles thermiques des nœuds correspondants aux coordonnées de quelques cycles expérimentaux pour la validation du modèle et ses paramètres optés, sinon, on change les paramètres du modèle et on refait les calculs à chaque fois.

## ***IV.8/-phénomènes physiques se produisant lors du soudage par friction malaxage :***

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

### ***IV.7.1/- Mécanique :***

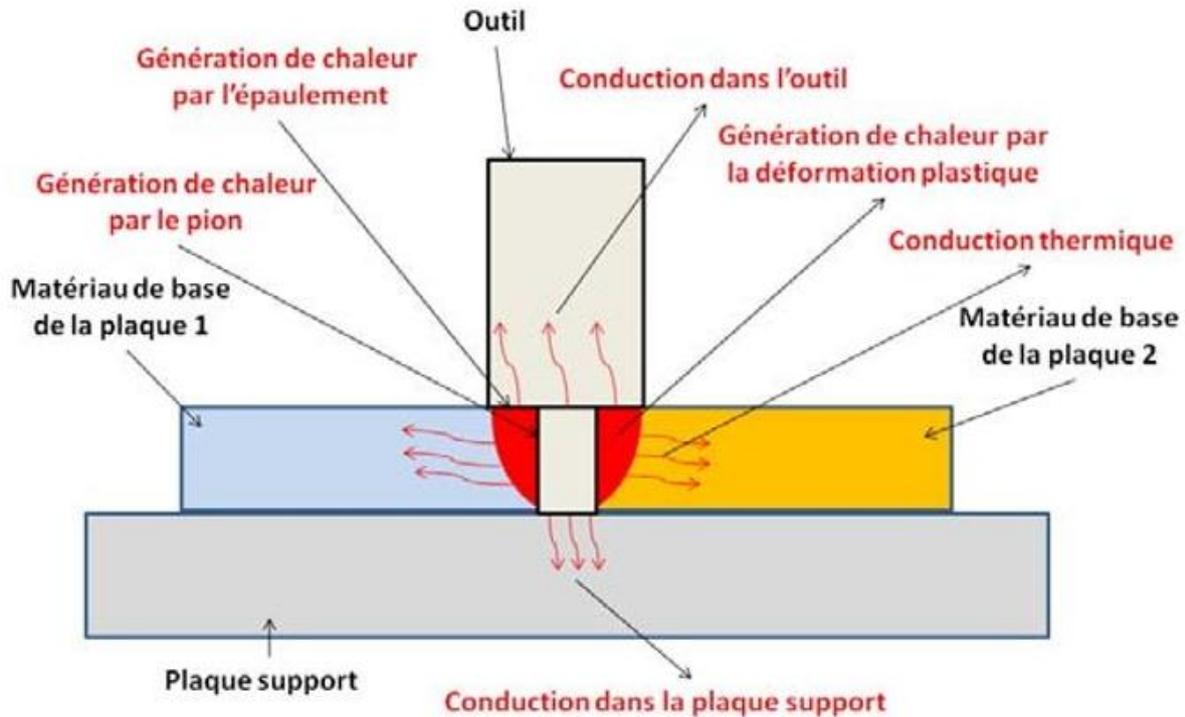
En général, les phénomènes mécaniques sont dus au frottement à l'interface entre l'outil et les pièces soudées et à la déformation plastique du matériau.

La source de frottement est le contact de l'outil en rotation avec le matériau. Le frottement est caractérisé par une contrainte de cisaillement à l'interface. La déformation plastique trouve sa source dans le mouvement du matériau en rotation sous l'effet du frottement à l'interface outil plaques et dans le malaxage dû au pion. La déformation plastique est importante dans la région située sous l'outil.

### ***IV.7.2/- Thermique :***

Les deux phénomènes thermiques principaux au cours du procédé FSW sont la génération et la conduction de la chaleur. La génération de la chaleur vient d'une source de chaleur surfacique due au frottement à l'interface et une source volumique due à la déformation plastique du matériau. La répartition de la génération de la chaleur entre ces deux sources dépend de la condition de contact entre l'outil et le matériau. En effet, pour un contact presque collant, la chaleur est principalement générée par la déformation plastique du matériau. Par contre, pour un contact glissant, la plus grande partie de la chaleur est créée par le frottement. La chaleur générée est transférée principalement par conduction. Le transfert par conduction dans les pièces soudées dépend de deux choses. Premièrement, il dépend de la conductivité thermique du matériau soudé, par exemple, l'aluminium est caractérisé par une grande conductivité thermique, ce qui contribue à évacuer rapidement la

chaleur créée. En second, il dépend de la chaleur évacuée dans la plaque support et dans l'outil c'est-à-dire la résistance des interfaces de contact aux transferts thermiques. Finalement, la chaleur est évacuée aussi par convection entre l'outil, les deux plaques à souder, la plaque support avec le milieu extérieur (ambiant).



**Figure IV.2:** Transferts thermiques induits par le procédé FSW

### **IV.7. 3/- Métallurgie :**

Les phénomènes mécaniques et thermiques, dans l'ensemble des procédés de soudage par fusion, entraînent une modification de la microstructure du matériau de base et ses propriétés mécaniques. Cet inconvénient provient des phénomènes métallurgiques qui apparaissent lors du soudage et qui représentent le lieu de concentration des contraintes dans le cas des sollicitations externes. Le premier phénomène métallurgique est la modification de l'état de précipitation du matériau. Le second est la recristallisation du matériau. Le procédé de soudage FSW permet au contraire d'obtenir des modifications métallurgiques moins importantes, par rapport aux autres procédés, causées par les différents changements de phase au cours de soudage. Une coupe transversale du joint soudé permet d'obtenir les différentes zones dans lesquelles la matière est affectée thermiquement (Heat Affected Zone HAZ) ou thermo-mécaniquement (Thermo Mechanical Affected Zone TMAZ) (Chaque zone dépend de la température atteinte, des modifications métallurgiques et des déformations subies au cours du procédé de soudage. [47]

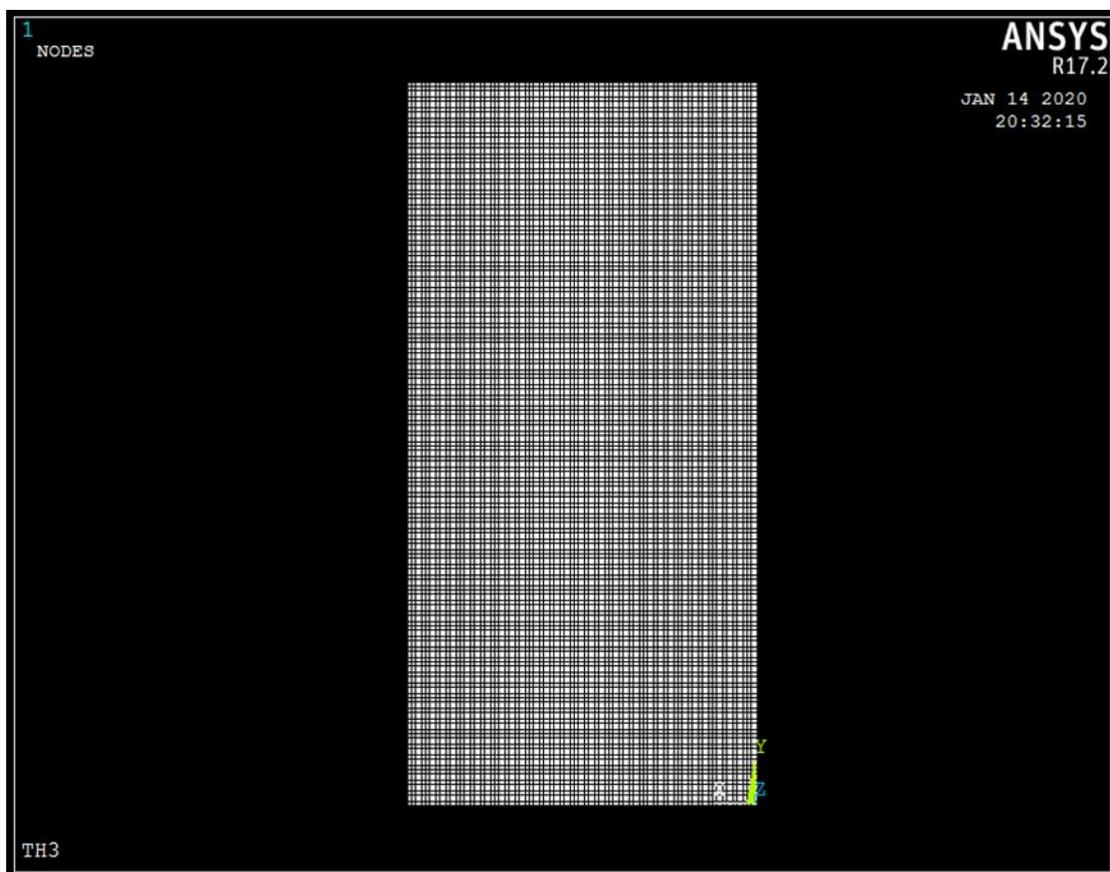
***Chapitre V :***  
***Résultats et interprétions***

## ***V.1 /-Introduction :***

Les approches expérimentale et numérique du soudage par friction malaxage ont permis de mieux comprendre les mécanismes physiques de ce procédé. Les essais expérimentaux ont révélé plusieurs aspects du malaxage des matériaux et sur les champs de températures. Ces analyses ont aussi servi à la validation du modèle numérique.

## ***V.2 /-Le maillage :***

Le maillage est généré automatiquement par le logiciel ANSYS et un maillage raffiné au niveau du contact outil /pièce a été utilisé pour notre modèle où le nombre d'éléments atteints est de 10000



**Figure V.1 :** Le maillage structuré des plaques.

## ***V.3 /- Répartition de la température au contact Outil/Pièce :***

Les figures ci-dessous illustrent la distribution du champ de température sur la surface supérieure, au contact de l'outil avec la pièce. Le maximum de la température est atteint au niveau du contact de l'épaulement avec la pièce.

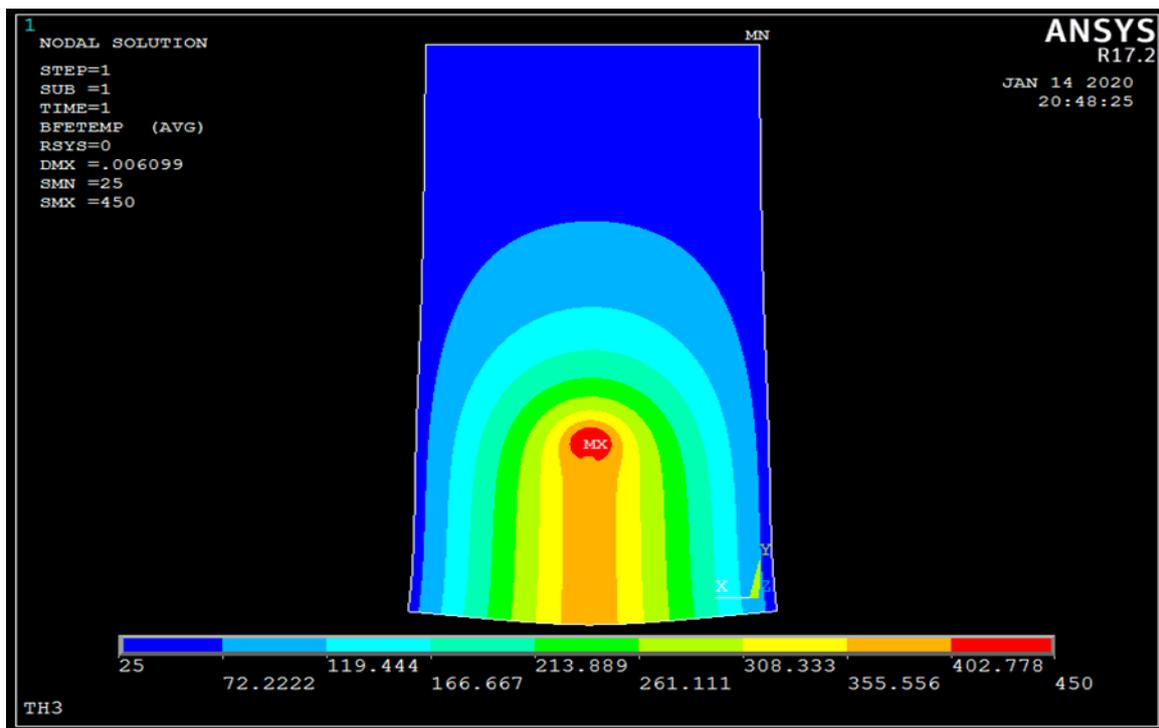


Figure V.2 : La distribution de la température sur les plaques soudées.

#### V.4 /-Déformation :

La déformation a principalement lieu dans la zone déformée au cours du soudage, la ZATM et le noyau, puis elle se localise aux frontières ZAT - ZATM. L'ensemble noyau - ZATM a subi un échauffement important durant le soudage, conduisant à la recristallisation et donc à une chute de dureté [10]. Cependant, on constate que la taille de grain est plus petite dans le noyau, ce qui conduit à une contrainte à la rupture plus importante que dans la ZATM. En conséquence, la striction va s'amorcer dans ces zones. Ces résultats sont comparables avec les résultats expérimentaux de Cécile Genevois. [40]

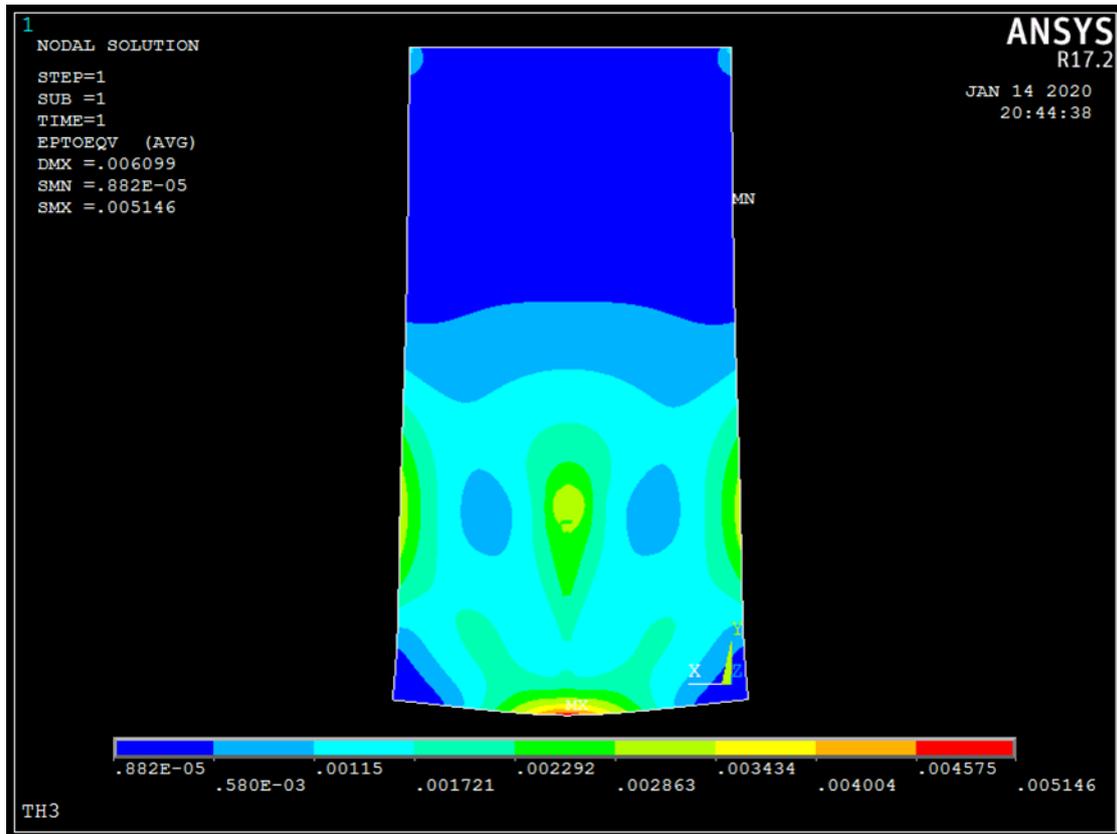


Figure V.3 : La déformée mécanique appliques sur la géométrie.

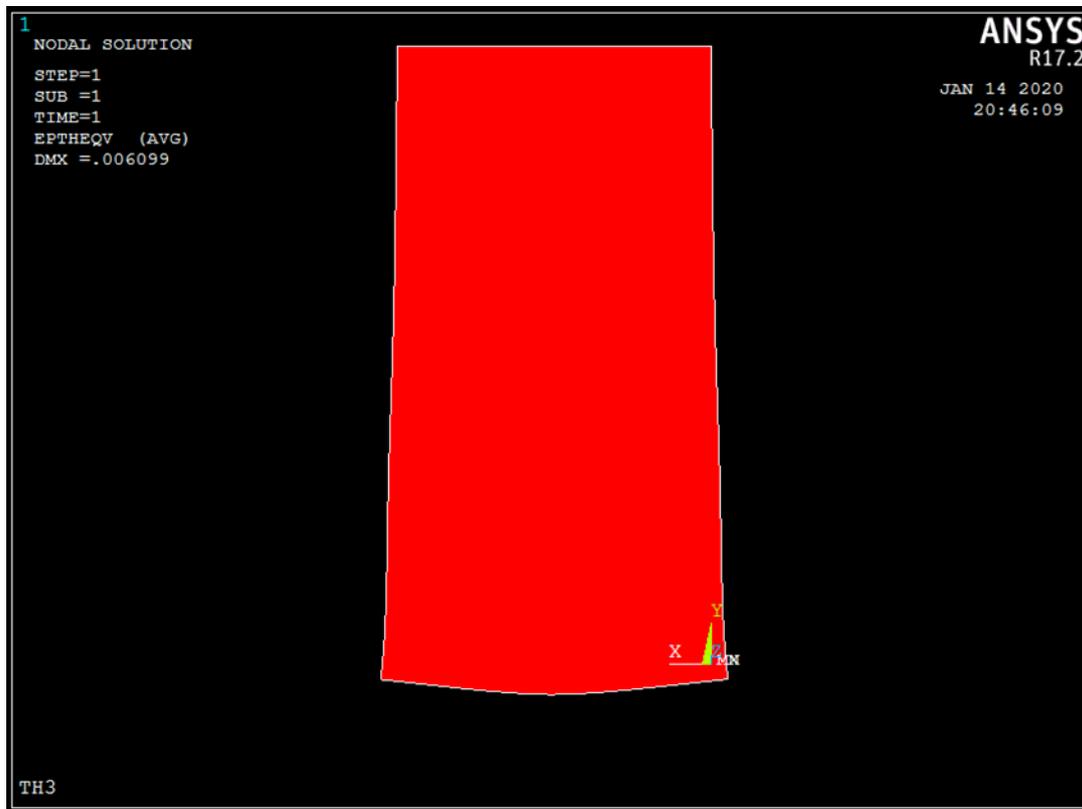


Figure V.4 : La déformée thermique appliques sur la géométrie.

### V.5 /-Déplacement :

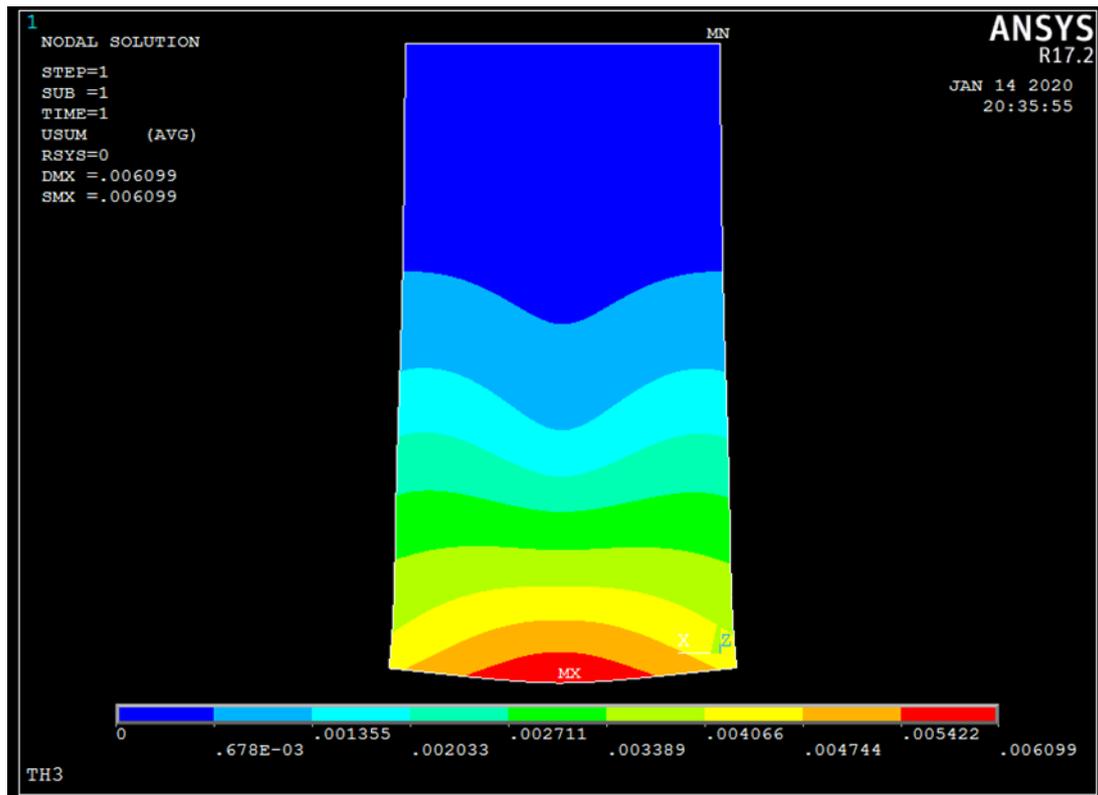


Figure V.5 : Déplacement total de la géométrie dus aux dilations thermiques.

### V.6 /-Les contraintes :

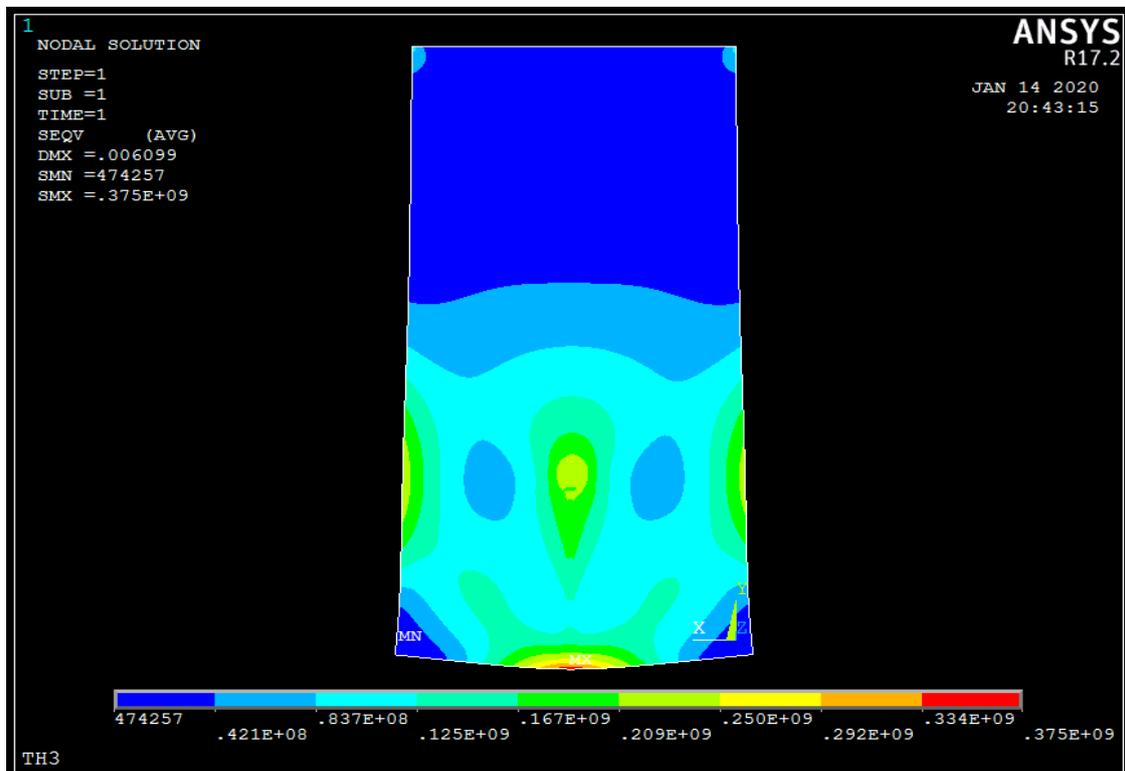


Figure V.6 : Les contraintes appliquées sur la géométrie.

# ***Conclusion générale***

## Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail était de modéliser le soudage par friction-malaxage FSW d'alliages d'aluminium 2024 AA. L'analyse utilisée est de type statique. Un système de coordonnées mobile a été utilisé dans la simulation numérique avec le logiciel ANSYS. Les résultats ainsi obtenus pour le phénomène de transfert de chaleur lors du soudage par friction par friction FSW peuvent être cités comme suit :

1. Le logiciel ANSYS nous a permis d'utiliser un système de coordonnées mobiles lié à un outil pour simuler le processus de soudage en intégrant le frottement de l'alliage d'aluminium étudié dans ce travail.
2. Le procédé de soudage par friction-fusion provoque de grandes déformations plastiques et une forte augmentation de température. Il en résulte une modification de la microstructure du matériau qui affecte ses propriétés. Il est donc nécessaire de comprendre les évolutions des propriétés mécaniques et thermiques des matériaux étudiés afin d'améliorer les paramètres de soudage et la résistance des soudures.
3. L'étude du lors du soudage par friction malaxage permet de comprendre la partie thermique de ce procédé et de valider les modèles numériques.
4. La distribution de température près de l'axe de l'outil est proche de la température de fusion du matériau soudé.
5. La distribution de température sous l'outil est constante sur toute l'épaisseur du matériau.

## ***Références Bibliographiques :***

- [1] H. Leiris, Métaux et alliages autres que les aciers et les fontes, Tome II, Masson et c<sup>ie</sup> éditeurs. pp.71-92 (1971).
- [2] L. F. Mondolfo, Aluminum Alloys, Structures and Properties, Butterworth, London, vol. 12, p. 14-18, (1976).
- [3] B. Dubost, p. Sain fort, Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques, Paris, vol. 240, p. 2-37, (1994).
- [4] R. Develay, Technique l'ingénieur, Traité de métallurgie, Paris, vol. 240, p. 11-18, (1994).
- [5] J. Idrac, Thèse de Docteur, Institut Nation Polytechnique de Toulouse, (2005).
- [6] X. Pan, J.E. Morral, and H.D. Brody, Journal of Phase Equilibria and Diffusion, vol. 10, p. 1547-7037, (2009).
- [7] R. Develay, Traitements thermiques des alliages d'aluminium, Techniques de l'ingénieur M 1290 (1986).
- [8] C. Vargel, Corrosion de l'aluminium, (1999).
- [9] Nicoleta RADUTOIU, INFLUENCE DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUR LE COMPORTEMENT EN CORROSION A L'ECHELLE LOCALE DE L'ALLIAGE D'ALUMINIUM EN AW 2024, Roumanie, 3 juillet (2013).
- [10] Chahdane Anissa, these effet de vieillissemet natural sur les propiete mecanique de deux toles AlMgSi, Constantine ,(2012).
- [11] DAVIS, J. R., et autres. *Aluminum and Aluminum Alloys*, Material Parks, Ohio, ASM International, 1993, 784 p.
- [12] R. Cazes ; Procédés de soudage : principes généraux et critères de choix, Technique de l'ingénieur, B 7700.
- [13] Klas Weman .PROCÉDÉS DE SOUDAGE. Paris, 2012
- [14] MOSTEFA Abdellatif. MEMOIRE de master Etude comparative des différents procédés de soudage sur l'effet de fissuration a froid dans la ZAT (Document réalisé par le groupe Toxicologie d'Ancey Santé au Travail Actualisé en 2009). Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen .2018.
- [15] H. Granjon ; Bases métallurgiques du soudage, Eyroles, Paris (1977).
- [16] Symap ; Guide soudage/chapitre\_1 (Les matériels de soudage et de coupage thermique les plus courants).
- [17] H.P.Lieurade, Spécial mécano soudage, CETIM Informations N°118, Septembre 1990.
- [18] F.Rossillon. "Influence des conditions de soudage sur le comportement en fatigue d'un acier THR dual phase soudé par point". Thèse de Doctorat, Université balaise pascal. 2007

- [19] H.GRANJON. Bases métallurgiques de soudage, publications de soudage et de ses applications 1995.
- [20] Dr. Abdelaziz Timesli . THÈSE Simulation du soudage par friction et malaxage à l'aide de méthodes sans maillage. Université de Lorraine. France. 2013.
- [21] M. Ericsson et R. Sandström. Influence de la vitesse de soudage sur la fatigue des soudures par friction et comparaison avec MIG et TIG. Journal international de fatigue, 25 (12): 1379\_1387, 2003.
- [22] Eric FEULVARCH, Modélisation numérique du soudage par friction malaxage. Thèse de doctorat. Décembre 2005.
- [23] Zimmer, Contribution à l'industrialisation du soudage par friction malaxage. Arts et métiers. Paris Tech. Décembre 2009.
- [24] Dr Cécile GENEVOIS . these Genèse des microstructures lors du soudage par friction malaxage d'alliages d'aluminium de la série 2000 & 5000 et comportement mécanique résultant .le 28 septembre 2004 .
- [25] Dr Alexis DESCHAMPS . T H E S E DOCTEUR DE L'INPG -Genèse des microstructures lors du soudage par friction malaxage d'alliages d'aluminium de la série 2000 & 5000 et comportement mécanique résultant -28 septembre 2004.
- [26] Threadgill P.L., Leonard A.J., Shercliff H.R., Withers P.J., ” Friction stir welding of aluminium alloys”, International Materials Reviews, volume 54,pages 93, 2009.
- [27] Mishra R.S., Ma Z.Y., ” Friction stir welding and processing”, Materials Science and Engineering R, volume 50, pages 1-78, 2005.
- [28] Khaled, T. "An Outsider Looks at Friction Stir Welding " Federal Aviation Administration, Lakewood, Ca, USA, Rapport technique, ANM-112N-05-06, 2005.
- [29] Fuller, C. "Friction Stir Tooling: Tool Materials and designs", Friction Stir Welding and Processing, Materials Park, Oh, ASM International, 2007, pp. 7-35.
- [30] Fersini, D. and A. Pironi (2007b). "Fatigue behaviour of Al2024-T3 friction stir welded lap joints." Engineering Fracture Mechanics **74**(4): 468-480.
- [31] Ericsson, M., L.-Z. Jin, et al. (2007). "Fatigue properties of friction stir overlap welds." International Journal of Fatigue **29**(1): 57-68.
- [32] Fersini, D. and A. Pironi (2007a). "Analysis and modelling of fatigue failure of friction stir welded aluminum alloy single-lap joints." Engineering Fracture Mechanics **75**(3-4): 790-803.

- [33] GEMME Frédéric .thèse MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES PHÉNOMÈNES PHYSIQUES DU SOUDAGE PAR FRICTION-MALAXAGE ET COMPORTEMENT EN FATIGUE DE JOINTS SOUDÉS EN ALUMINIUM 7075-T6 -MARS 2011.
- [34] Sandra ZIMMER. Contribution a l'industrialisation du soudage par friction malaxage. l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Spécialité "Mécanique". 2009.
- [35] Roland CAZES, soudage par friction-malaxage, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique BM 7 746.
- [36] J. Sylvanus, Friction-Stir-Welding (FSW) - Reibrührschweißen
- [37] W. J. Arbegast, 2007, Chapter 13: Application of Friction Stir Welding and Related Technologies, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International.
- [38] W. J. Arbegast, A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding. Scripta Materialia 58 (2008) p. 372–376.
- [39] F. Gratecap, G. Racineux, S. Marya, 2008, A simple methodology to define conical tool geometry and welding parameters in friction stir welding, Int J Mater Form 1:143–158, DOI 10.1007/s12289-008-0370-z
- [40] Cécile Genevois, Genèse des microstructures lors du soudage par friction malaxage d'alliages d'aluminium de la série 2000 & 5000 et comportement mécanique résultant, institut national polytechnique de Grenoble, 2004.
- [41] Daniel Swenson, Mark Jams, Kansas state university, Manhattan, kansas franc 2d/l: A Crack Propagation Simulator for Plane Layered Structures Version 1.4 User's Guide.
- [42] Lionel DEPRADEUX. Simulation Numérique Du Soudage – Acier 316l Validation Sur Cas tests de complexité croissante, thèse: l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2004.
- [43] F. Erdogan, G.C. Sih, On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, J. Basic Eng. 85 (1963) 519–527.
- [44] Gerlich A., Su P., North T.H., «Pénétration des outils lors du soudage par points par friction et agitation par friction des alliages Al et Mg», Journal of Materials Science, volume 40, pages 6473-6481, 2005.
- [45] Zaeh M.F., Eireiner D., Papadakis L., "Soudage par friction-malaxage avec des fraiseuses modernes. Exigences, approche et application », 5ème FSW internationale Symposium, Metz, France, 2004.
- [46] Abdelaziz Times li mutation du soudage par friction et malaxage à l'aide de méthodes sans maillage Université De Lorraine2013.

- [47] Self-optimization in tool wear for friction-stir welding of Al 6061\_20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MMC R.A. Prado, L.E. Murr \*, K.F. Soto, J.C. McClure. Department of Metallurgical and Materials Engineering, The University of Texas , El Paso, TX 79968-0520, USA, 2002.
- [48] Tang W, Guo X, McClure J and Murr L. (1998). Heat input and temperature distribution in friction stir welding. *J. Mater Process Manuf Sci.* 7: 163-172.
- [49] Chao Y, Qi X and Tang W. (2003). Heat transfer in friction stir welding-experimental and numerical studies. *Transactions of the ASME.* 125: 138-145.
- [50] Chao, Y. J., & Qi, X. 1998). Thermal and thermomechanical modeling of friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6. *Journal of Materials Processing & Manufacturing Science*, 7, 215-233.
- [51] Song, M. and Kovacevic, R. (2003). Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate and its validation. *Int. J. Mach. Tools & Manufacture*, 43(6), 605-615.
- [52] Song M. and Kovacevic R(2003). Numerical and experimental study of the heat transfer process in friction stir welding.
- [53] Song M. and Kovacevic R. (2003) "Heat transfer modelling for both workpiece and tool in the friction stir welding process: a coupled model". *Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 218 Part B: J. Engineering Manufacture.*
- [54] Colegrove P. (2000). 3-dimensional flow and thermal modeling of the friction stir welding process". In 2<sup>nd</sup> International Symposium on Friction Stir Welding - Proceedings, Sweden.
- [55] P. Colegrove and others, "3-dimensional flow and thermal modelling of the friction stir welding process," *Proceedings of the 2nd International Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden, 2000 .*