

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة باجي مختار عنابة

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA



Année : 2019

Faculté : Sciences de  
L'Ingénierat Département  
: Génie mécanique

## MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de :  
**MASTER**

**Contribution à l'étude des déplacements résiduels générés par  
le soudage par friction malaxage de 2 plaques en alliages  
d'aluminium 2024 T3**

Domaine : Sciences et  
Technologie Filière :  
Génie mécanique Spécialité  
: Génie des matériaux  
Par : Souilah med cherif

DEVANT LE JURY

<b>Président :</b>	<b>Pr Chaoui Kamel</b>	<b>U.B.M. Annaba</b>
<b>Directeur de mémoire :</b>	<b>Ma Bounamous Boubaker</b>	<b>U.B.M. Annaba</b>
<b>Co-encadreur :</b>	<b>Pr Amirat Abdelaziz</b>	<b>U.B.M. Annaba</b>
<b>Examineur :</b>	<b>Pr Hamadech Hamid</b>	<b>U.B.M. Annaba</b>





## Résumé

Les problèmes inhérents aux procédés de soudage par fusion d'alliages d'aluminium à haute résistance comme les fissures, la porosité ainsi que la diminution de résistance de la zone affectée thermiquement (ZAT) ne sont pas rencontrés dans le soudage par friction malaxage.

Cependant comme tout procédé de fabrication, le soudage par friction malaxage induit des contraintes résiduelles qui génèrent des déformations résiduelles. Ces déformations ne sont pas désirées et constituent une problématique à résoudre. La compréhension du comportement du soudage par friction par rapport aux contraintes résiduelles et d'une importance capitale.

Dans ce présent travail, une étude sur le comportement des déformations résiduelles générées par FSW a été réalisée sur deux plaques soudées en alliage d'aluminium 2024 T3. Dans un premier temps une analyse micrographique du cordon de soudure obtenu par FSW montre que le malaxage a changé le sens des fibres des plaques en aluminium et les a orienté dans le sens de rotation du pion. En deuxième temps, un profile de la dureté montre l'effet du FSW sur la résistance du matériau. L'analyse des déformations résiduelles montre que les déplacements résiduels peuvent être caractérisés par des modèles mathématiques en fonction des dimensions des plaques et de la localisation des sections de mesures. La relaxation des déplacements résiduels montre que les déformations résiduels suivent une loi de comportement de second degré et que plus la plaque est réduite, plus les déformations sont réduites. Une compréhension du comportement des plaques par rapport au développement des déplacement résiduels a été réalisée sous le Logici Abaqus.

Mots clés : FSW, aluminuim, déplacementrésiduels Abaqus



# Remerciements

Avant tout je tiens à remercier Le Seigneur Dieu tout puissant qui m'a donné la faculté, le courage et la force d'atteindre ce niveau.

Mes sincères remerciements s'adresse à mon aimable encadreur Pr Amirat Abdelaziz enseignant à l'université d'Annaba qui, par son expérience et son efficacité n'a ménagé aucun effort pour mener à bien ce travail avec moi.

Mes remerciements s'adressent également à tous mes enseignants qui ont pris part dans ma formation, je remercie aussi mes camarades du groupe pour leur soutien moral.

Ainsi pour cette occasion je tiens à remercier l'école nationale des arts et métiers Paris Tech du centre de Metz en France qui nous ont légué la plaque en Aluminium et un soutien infailible afin de mener à bien notre travail.

Remercîment

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

INTRODUCTION .....1

Chapitre I

**I.1.** Généralités sur le soudage .....5

**I.1.1.** Définition de soudage .....5

**I.1.2.** Définitions et classification des procédés de soudage.....6

**I.1.3.** Procédé de soudage .....8

**I.1.4.** Principaux procédés du soudage .....9

**I.2.** Soudage par friction (malaxage).....9

**I.2.1.** Procédé de soudage par friction et malaxage .....9

**I.2.2.** Phénomènes physiques observés dans le procédé.....15

➤ Mécanique .....15

➤ Thermique .....15

➤ Métallurgie .....16

**I.2.3.** Paramètres du procédé .....17

➤ Vitesse de rotation et vitesse d’avance .....18

➤ Angle d’inclinaison de l’outil .....18

➤ Efforts appliqués.....19

➤ Avantages et limitations du procédé FSW .....19

➤ Mise en œuvre du procédé .....20

**I.3.** Généralité sur l’Aluminium .....22

**I.3.1.** Les alliages d’Aluminium .....24

**I.3.2.** Classification des alliages d’Aluminium.....24

**I.3.3.** Caractéristique de l’aluminium 2024 T3 .....26

<b>I.4.</b>	Les contraintes résiduelles .....	29
<b>I.4.1.</b>	Introduction .....	29
<b>I.4.2.</b>	Définition .....	29
<b>I.4.3.</b>	Origine des contraintes résiduelles .....	30
<b>I.4.4.</b>	Procédé de fabrication et contraintes résiduelles .....	30
<b>II</b>	Chapitre II	
<b>II.1.1.</b>	Choix des matériaux .....	32
	➤ Modélisation .....	32
	➤ Les indices de performance .....	32
<b>II.2.</b>	Présentation du système de soudage par FSW .....	32
	➤ Le procédé de FSW .....	33
	➤ Le cordon de soudage .....	34
<b>II.3.</b>	Etude métallographique .....	35
<b>II.3.1.</b>	L'enrobage a froid .....	36
<b>II.3.2.</b>	Polissage .....	36
<b>II.3.3.</b>	Polissage de finition .....	35
<b>II.3.4.</b>	Attaque chimique .....	35
<b>II.4.</b>	Essais de micro-durté .....	37
<b>II.5.</b>	Analyse des déformations résiduelles générées par le FSW.....	38
<b>II.6.</b>	Mesure des deformation sure une plaque reduit .....	39



## Chapitre III

### III Méthodologie d'analyse par élément finis

	.....	41
<b>III.2</b>	Model numérique (solidworks)	41
<b>III.3</b>	Methode element fini (abaqus )	41
1.	Modul part	41
2.	Modul propriety.....	42
3.	Modul assembly	43
4.	Modul step	44
5.	Modul load	44
6.	Modul mesh	45
7.	Modul job	45
8.	Modul visualization.....	45

## CHAPITRE 4

IV.1	Choix des matériaux.....	47
IV.2	Etude métallographie .....	49
IV.3	Mesure des déformation résiduelles .....	51
IV.4	Mesure des déplacement résiduelles .....	54
IV.5	Relaxation des déplacements résiduelles .....	56
IV.6	Micro-dureté .....	57

## **Introduction**

Le soudage par friction malaxage (FSW) est considéré comme une technique moderne de fabrication, permettant d'assembler des alliages difficilement soudables par des procédés de soudages classiques. Ce procédé a été inventé en 1992 par l'Institut de Soudage (The Welding Institute). Le FSW est un procédé, du soudage à l'état solide est classé parmi les procédés de soudage basés sur l'échauffement de la matière, qui consiste à lier deux pièces en les amenant dans un état pâteux grâce à un pion en rotation. Lors du soudage par friction malaxage, un outil rotatif constitué d'un pion profilé et d'un épaulement est enfoncé dans la matière jusqu'à ce que l'épaulement touche la surface du matériau à souder. La matière est donc chauffée par friction à des températures où elle est facilement déformable. Lorsque l'outil avance, la matière s'écoule de l'avant vers l'arrière du pion pour former le joint soudé, performant est nécessaire pour obtenir des joints de qualité.

Les problèmes inhérents aux procédés de soudage par fusion d'alliages d'aluminium à haute résistance comme les fissures, la porosité ainsi que la diminution de résistance de la zone affectée thermiquement (ZAT) ne sont pas rencontrés dans le soudage par friction malaxage[1].

Cependant comme tout procédé de fabrication, le soudage par friction malaxage induit des contraintes résiduelles qui génèrent des déformations résiduelles. Ces déformations ne sont pas désirées et constituent une problématique à résoudre. La compréhension du comportement du soudage par friction par rapport aux contraintes résiduelles et d'une importance capitale.

Dans ce travail nous nous sommes intéressés au soudage de deux plaques en alliage d'aluminium afin d'étudier les déformations résiduelles.

Le mémoire est composé de 4 chapitres.

Le premier chapitre est dédié à l'étude bibliographique qui intègre les différents types d'assemblage de tôles par soudage en reportant les avantages et les inconvénients. L'axe est ensuite orienté vers le soudage par friction malaxage connu sous l'appellation anglaise 'Friction Stir Welding' (FSW). Puis il est nécessaire de

présenter les caractéristiques mécaniques et le comportement des alliages d'aluminium au soudage par FSW. Et enfin, une partie sur les contraintes résiduelles, leur génération et leur importance est donnée en fin de ce chapitre.

Le deuxième chapitre introduit la procédure expérimentale divisée en « parties principales :

1. Choix du matériau et des formes des pièces à souder, le choix du pion de soudage
2. Présentation du système de soudage par FSW (conduit au niveau du laboratoire de conception-fabrication et commande de l'école nationale des arts et métiers Paris Tech du centre de Metz en France).
3. Préparation des échantillons pour l'analyse du cordon de soudure et de la mesure de profile de dureté
4. Analyse des déformations résiduelles générées par le FSW

Le troisième chapitre présente la méthodologie d'analyse par élément finis du comportement des contraintes résiduelles sous le logiciel Abaqus

Le quatrième chapitre présente les résultats d'analyse métallographiques, de mesure de dureté et l'analyse des déformations résiduelles et leur effet sur une structure mécano-soudée en alliage d'aluminium.

Le mémoire est clôturé par les conclusions correspondantes et une liste de recherche bibliographique.

# Chapitre 1

Le soudage est une technique d'assemblage permanent qui établit une continuité de nature entre les pièces soudées. Le terme soudure est utilisé pour désigner l'alliage reliant les pièces à assembler formé par la fusion des bords à assembler, avec ou sans adjonction d'un produit d'apport. La soudure peut donc être le résultat du seul mélange des matériaux de base (les matériaux à souder) ou du mélange des matériaux de base et d'un produit d'apport. En ce qui concerne les métaux, beaucoup sont soudables moyennant les études préalables requises pour la mise au point du mode opératoire ; citons les aciers (dits soudables), le cuivre, l'aluminium, le nickel et leurs alliages. Lors du soudage, il y a fusion locale des éléments à assembler, contrairement à ce qui se passe dans le cas du brasage où il n'y a jamais fusion des matériaux à assembler. En ce qui concerne les métaux on distingue trois types de soudures:

- La soudure homogène, dans laquelle les métaux de base et le métal d'apport éventuel sont tous de même nature.
- La soudure hétérogène de type « A » qui associe des métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature.
- La soudure hétérogène de type « B » où les métaux de base et le métal d'apport sont tous trois de natures différentes [1].

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.

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 et soudage. Jusqu'au milieu du XIX<sup>e</sup> 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 XIX<sup>e</sup> siècle : mise en œuvre de nouveaux procédés : Le soudageoxyacétylénique

Le soudage

aluminothermique Le

soudage à l'arc électrique

Le soudage par résistance

Tous ces procédés connaîtront leur essor industriel vers 1920

### **III.1. Généralités sur le soudage**

#### ***III.1.1. Définition desoudage***

La soudure est un assemblage permanent de deux pièces métallique, caractérisé par l'effacement des contours primitifs des bords à assembler.la soudure peuvent s'effectuer :

- Sans pression extérieure, les bords étant portés à la température de fusion, et nécessitant Le plus souvent l'introduction dans le joint d'un complément de métal (métal d'apport) déposé en une ou plusieurspièces.

#### ***III.1.2. Définitions et classification des procédés de soudage***

Dans sa définition la plus générale, le soudage consiste à réunir de façon permanente deux ou plusieurs éléments, en assurant la continuité de la matière des parties assemblées soit par chauffage, soit par pression, soit par combinaison de l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un matériau d'apport. L'utilisation d'un métal d'apport répond à deux besoins : il permet d'une part de combler le jeu entre les pièces assemblées, et d'autre part de changer la composition chimique et la structure cristalline de la zone fondue afin d'obtenir les performances recherchées. De manière générale, le terme « soudage»

désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour la réalisation d'un assemblage, et celui de « soudure » désigne le joint formé,

Le champ d'application du soudage ne se limite pas aux matériaux métalliques puisque l'on soude du verre, des céramiques ou des matières plastiques. Dans le cas le plus courant des matériaux métalliques, on peut distinguer le soudage autogène (assemblage de deux matériaux de base de même composition sans métal d'apport), le soudage homogène (les deux matériaux de base et le métal d'apport sont de même nature), et le soudage hétérogène (l'un au moins des trois matériaux, d'apport ou de base, est différent des autres) On associe aussi souvent au soudage deux autres techniques d'assemblage voisines, faisant appel à des mécanismes physiques de liaison de natures différentes:

- **Le brasage** consiste à lier les surfaces de deux pièces métalliques dans un joint à recouvrement avec jeu contrôlé (inférieur à 0,5 mm) par capillarité d'un métal d'apport fondu. Le métal d'apport utilisé doit avoir un point de fusion inférieur à celui des métaux de base, qui ne fondent pas pendant l'opération;
- **le Soudo-brasage** se rapproche du soudage par son mode opératoire (le joint est réalisé en position bout à bout ou en angle), et du brasage par l'utilisation d'un métal d'apport dont la température de fusion est plus basse que celle de l'un au moins des métaux de base. il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. La classification de ces différents procédés peut s'effectuer selon le mode d'apport de l'énergie nécessaire pour réaliser la jonction.

Pour certains, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, sans action mécanique volontaire, en utilisant une source de chaleur telle qu'une flamme ou un arc électrique. Pour d'autres, la continuité métallique est obtenue par une action mécanique (frottement, pression), éventuellement associée à une fusion ou un échauffement localisé.

➤ ***Soudage par pression***

Cette catégorie regroupe tous les procédés de soudage dans lesquels on obtient une soudure, en général sans métal d'apport, par l'application d'une pression ou d'une friction

suivie d'une pression, suffisante pour provoquer une déformation plastique à froid ou à chaud, assurant la continuité atomique entre les bords de la soudure.

➤ **Soudage par pression et fusion**

On retrouve dans cette catégorie le procédé de soudage par étincelage, qui consiste à fondre les surfaces à assembler à l'aide d'une décharge électrique avant d'appliquer une pression de contact, et surtout les procédés de soudage par résistance, pour lesquels le contact électrique entre les pièces est assuré par l'application d'une pression à l'aide d'électrodes de géométries variables, qui permettent ensuite de faire passer un courant de forte intensité à l'endroit du contact entre les pièces, entraînant par effet joule leur fusion. Soudage par fusion sans pression : La technique de soudage par fusion, la plus courante, consiste à fondre les bords des pièces à assembler, sans application de pression volontaire, à l'aide d'une source d'énergie produite par une flamme, un arc électrique ou un faisceau de particules. Le métal des deux pièces se mélange alors à l'état liquide, et constitue après solidification la soudure. Cette famille comprend un grand nombre de procédés, Parmi lesquels les procédés de soudage à l'arc, qui sont les plus utilisés

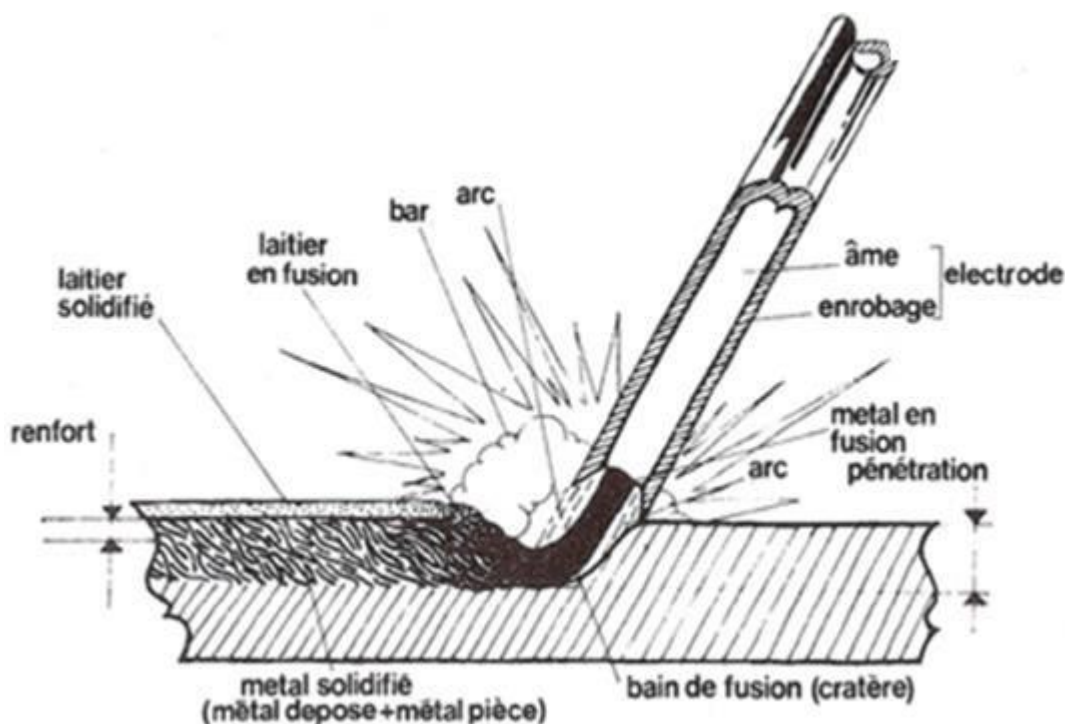
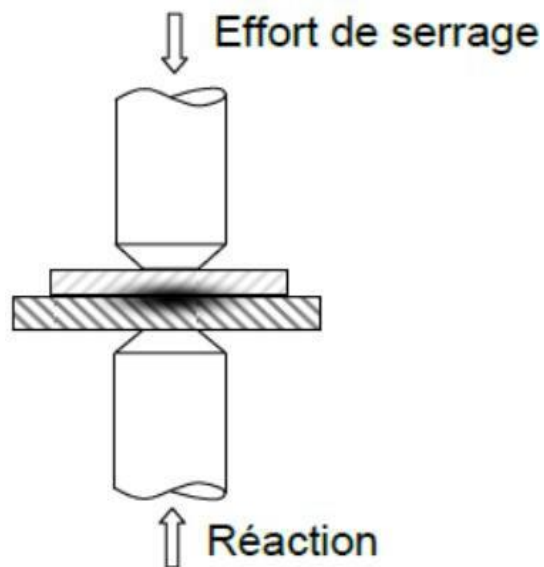


Figure I.1 Soudage sans pression

-Avec pression extérieure une température qui peut atteindre également la fusion





**Figure I.2** Soudage avec pression

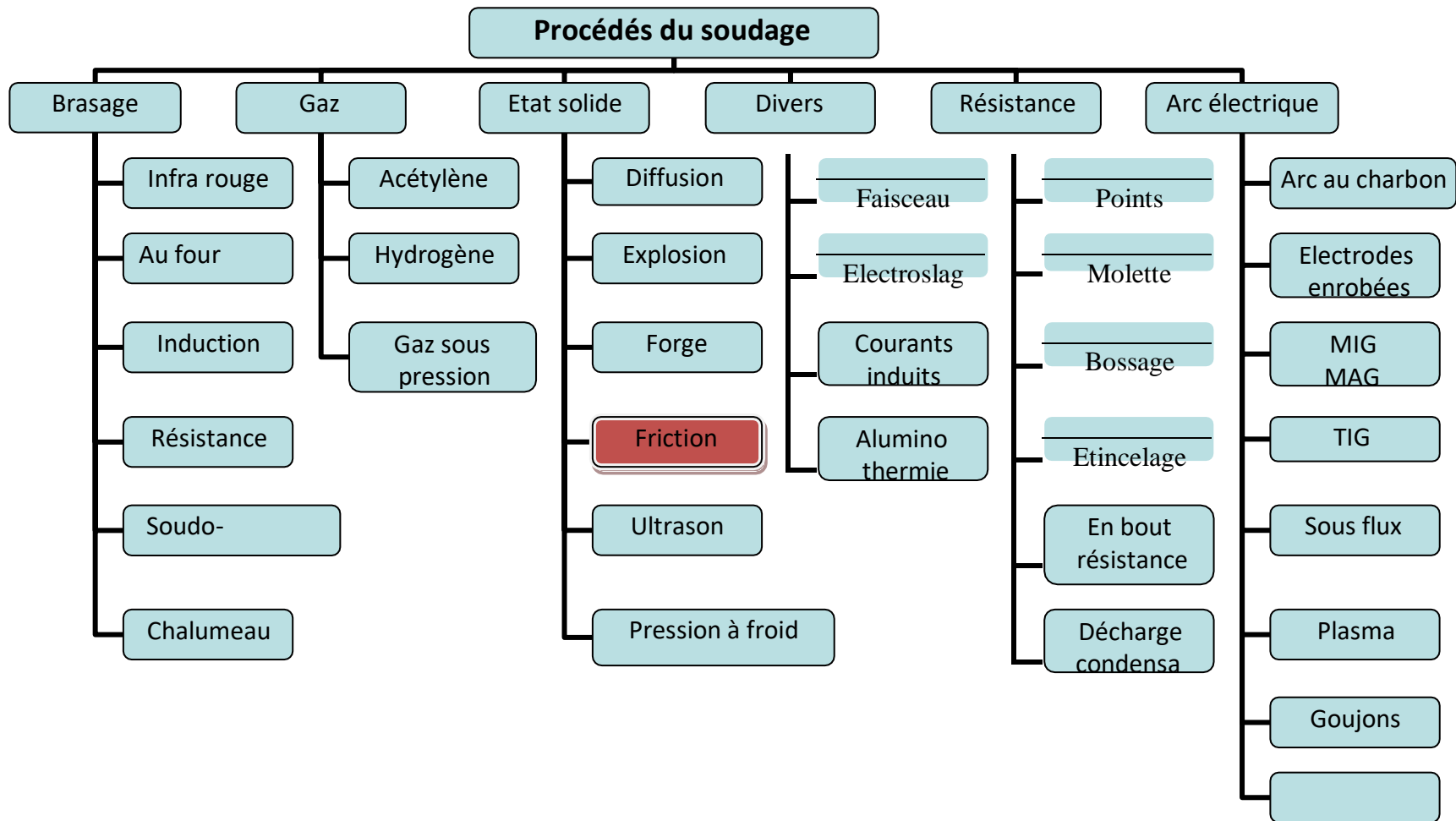
Le métal de base forme les parties à assembler de même nature ou de nature différentes. Le métal d'apport, identique ou différent du métal de base, peut intervenir dans l'élaboration du joint. Le métal du joint. Comprenant le métal déposé et les fondus qui sont dilués certains éléments peuvent diffuser dans les parties.

Une zone plus ou moins étendue et adjacente de plus au-delà du joint peut être thermiquement affectée et subir des modifications de structure [2].

### **III.1.3. Procédé 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 obtenue par diffusion déformation,...ext.

Les procédés de soudage sont nombreux et peuvent être classés suivant la façon de transférer l'énergie [3].



Organigramme de procédés du soudage

### III.1.4. Principaux procédés du soudage

Procédé	ISO 4063	AWS A3-0
Soudage Oxyacétylénique	311	OXW
Soudage à l'arc à l'électrode enrobée	111	SMAW
Soudage à l'arc submergé	114	SAW
Soudage sous protection gazeuse actif à électrode fusible (MAG)	135	GMAW
Soudage sous protection gazeuse inerte à électrode fusible(MIG)	131	GMAW
Soudage fil fourré sansgaz	114	FCAW
Soudage sous protection gazeuse à électrode réfractaire (TIG)	141	GTAW
Soudage plasma	15	PAW
Soudage par résistance par point	21	RSW
Soudage par friction-malaxage	42	FSW
Soudage par faisceau d'électrode	76	EBW

**Tableau I.1** Principaux procédé du soudage

## I.2. Soudage par friction (malaxage)

### I.2.1. Procédé de soudage par friction etmalaxage

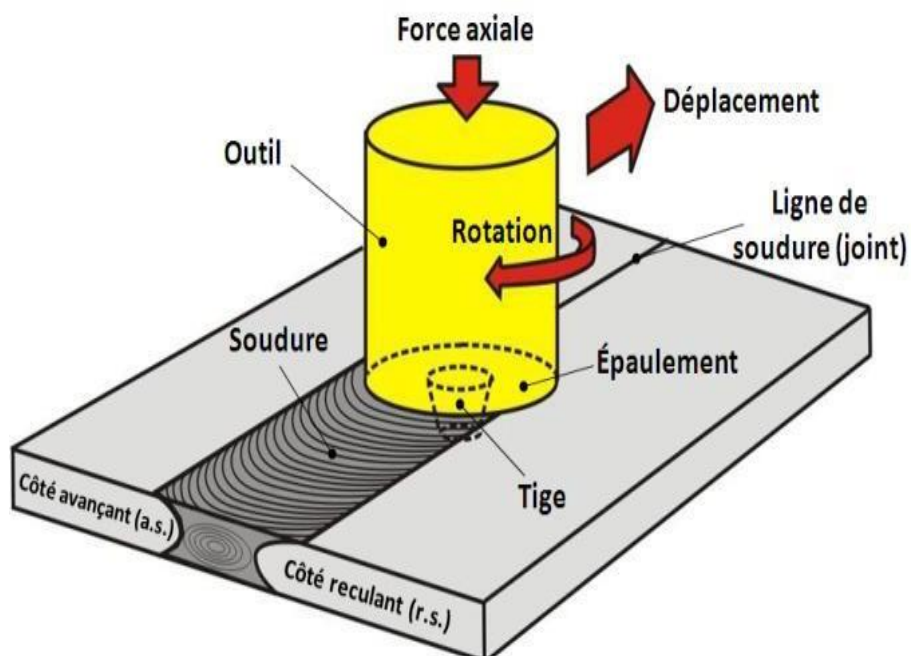
Le soudage par friction et malaxage est un procédé inventé en1991 par l'institut britannique de soudage (The Welding Institute). Les équipements du procédé FSW permettent de souder en deux ou trois dimensions et peuvent appliquer des efforts axiaux allant jusqu'à 90KN. La rigidité globale de ces machines 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 3-a présente la machine ESAB permettant de réaliser des soudures en deux dimensions et dont les caractéristiques sont : 89KNpour l'effort de plongée maximal, 2000tr/min pour la vitesse de rotation maximale2000mm/min pour la vitesse d'avance maximale, 2m pour la longueur de soudure maximale. La figure 3-b présente la machine MTS de type portique à cinq axes permettant de réaliser des soudures en trois dimensions et dont les caractéristiques sont : 89KN pour l'effort de plongée maximal,

2000tr/min pour la vitesse de rotation maximale, 2000mm/min pour la vitesse d'avance maximale, 2m pour la longueur de soudure maximale, mesure des efforts possibles.



(a) (b)  
**Figure I.3** Machines de soudage FSW de l'Institut de Soudure (Metz) (a)- Machine ESAB. (b)- Machine MTS [9]

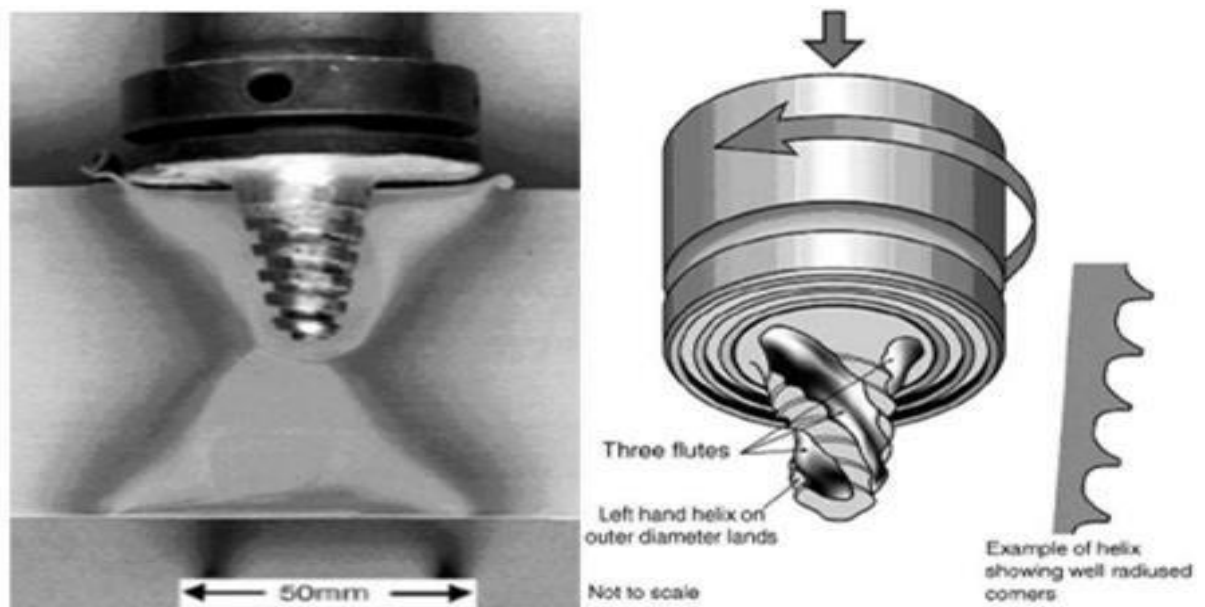
Dans ce procédé, la chaleur est générée, d'une part, par le frottement entre un outil métallique entraîné par une vitesse de rotation et une vitesse de translation et les deux plaques à souder, et d'autre part, par la dissipation plastique voir (figure 4)



**Figure I.4** Illustration du procédé de soudage par friction et malaxage [9]

Le procédé de soudage par friction et malaxage utilise un outil à haute résistance mécanique et thermique qui est constitué d'un épaulement (shoulder) prolongé par un pion (pin) coaxial qui réalise le malaxage (voir figure 5). Les tôles à souder sont fixées soigneusement sur un montage d'appui. La chaleur, générée par le frottement de l'épaulement et celle du pion, transforme la matière à l'état pâteux au voisinage de l'outil (figure 6) et facilite la pénétration et le déplacement de l'outil le long du joint à souder pour former la soudure après refroidissement. Les matériaux, utilisés pour les outils de soudage des tôles à base d'aluminium, sont, principalement, des aciers résistants aux hautes températures. La géométrie de l'outil est très importante dans le développement du procédé. Elle joue un rôle essentiel dans le malaxage de la matière et la génération de la chaleur. Le choix des dimensions et du profil du pion dépend de la nature des matériaux constituant les tôles à souder et de leur épaisseur.

La forme du pion est généralement tronconique et ou prismatique ou hélicoïdale et peut contenir des reliefs variés dans le but d'augmenter l'effet du malaxage du métal (figure 5) et, par suite, de rendre plus facile la formation de la soudure (figure 6). Dans certaines applications, le pion est excentré par rapport à son axe de rotation dans le but d'amplifier le malaxage. Plusieurs recherches sont orientées vers l'optimisation de la géométrie du pion.



**Figure I.5** Exemple de géométrie d'outil [9]

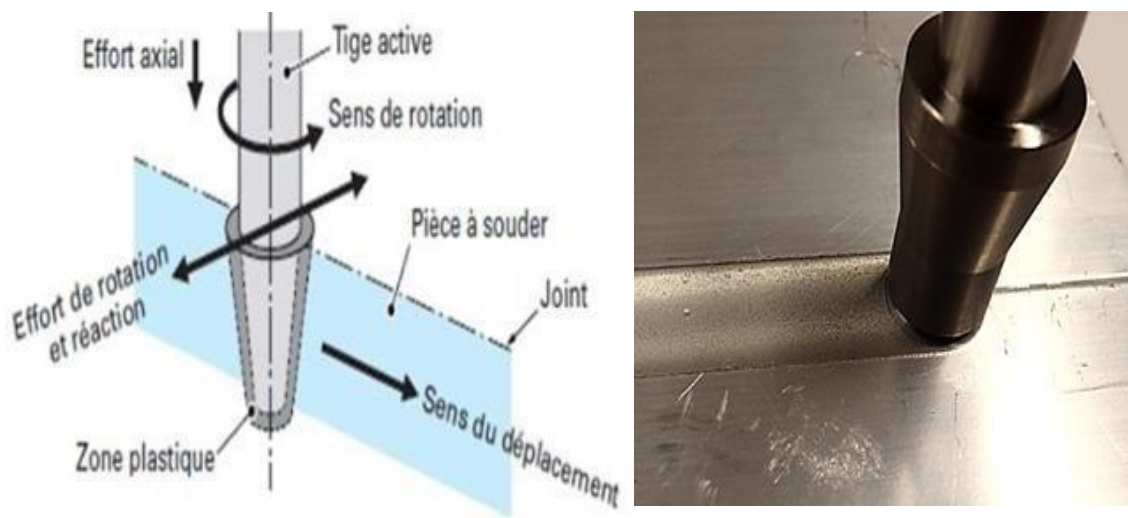


Figure I.6 formation de la soudure [9]

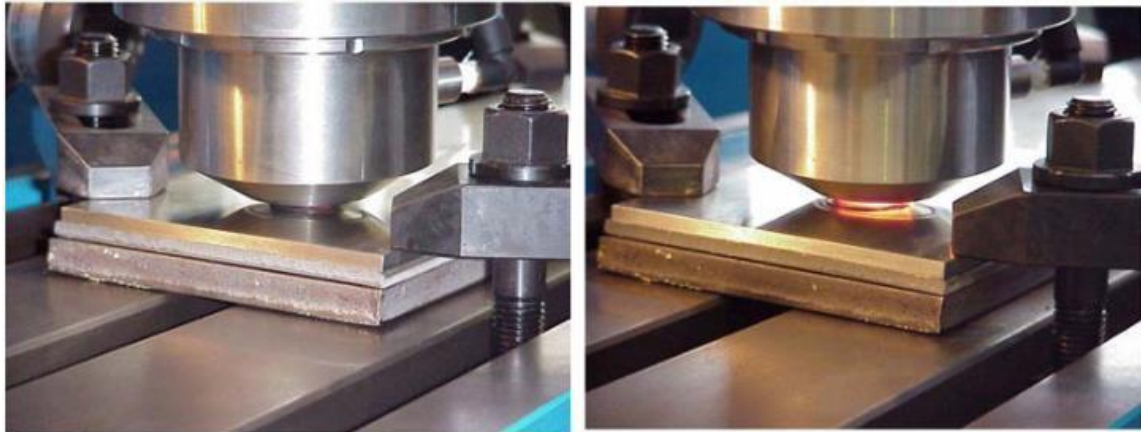
L'épaulement est globalement plan, ses dimensions transversales restent suffisamment grandes soit environ cinq fois le diamètre du pion afin de couvrir totalement la zone affectée par le soudage. Il joue ainsi deux rôles principaux ; d'une part, il empêche le métal malaxé de fluer vers le haut et, d'autre part, il chauffe la matière par frottement. Le soudage s'effectue selon les étapes suivantes:

➤ **Phase de pénétration de l'outil (figure 7-a):**

Dans cette étape, on réalise la pénétration du pion sous l'effet d'un effort vertical variant de 15 KN jusqu'à une trentaine de KN. En effet, le pion pénètre progressivement à l'intérieur du joint, à l'aide de la vitesse de rotation, jusqu'à ce que l'épaulement soit en contact avec les plaques à souder.

➤ **Phase transitoire d'échauffement par frottement (figure 7-b) :**

Cette étape transitoire consiste à entraîner localement l'épaulement dans un mouvement de rotation pour transformer la matière à l'état pâteux. Cette étape de pré-soudage dure une à trois secondes avant le passage à l'étape de soudage.



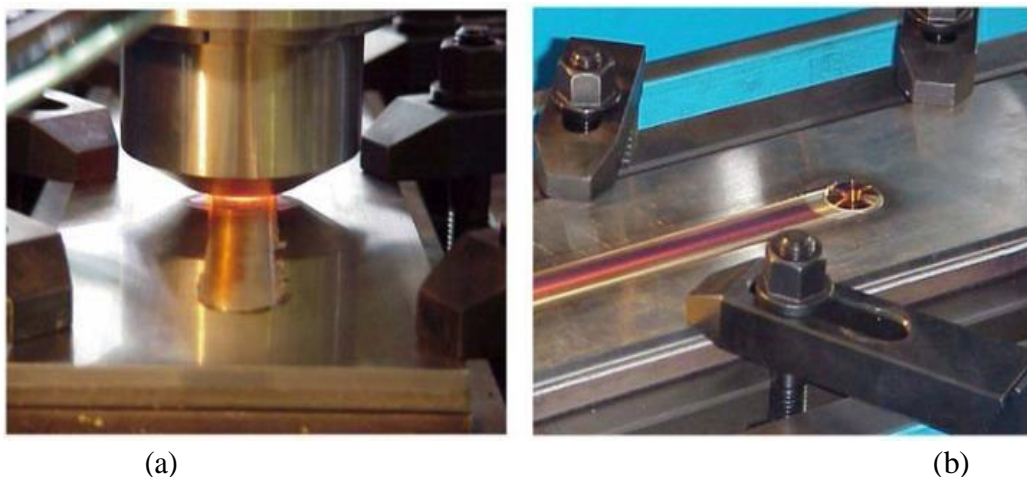
**Figure I.7** (a)- Fin de phase de pénétration (b)- Phase de chauffage [9]

➤ ***Phase de soudage (figure 8-a):***

Dans cette étape, l'outil est animé d'un mouvement de translation dans la direction du joint représentant l'interface des deux plaques à souder.

➤ ***Phase de retrait de l'outil (figure 8-b):***

A la fin du soudage, l'outil est retiré des deux plaques à souder. Ce retrait laisse un trou difficile à remplir de façon simple. Ce problème peut être résolu dans le cas des soudures linéaires ouvertes par l'élimination des défauts au début et à la fin du joint soudé. Dans le cas des soudures circulaires fermées, la fin du joint soudé au niveau du recouvrement peut être résolue de façon particulière, par exemple par fusion. De plus, le trou peut être contourné par l'utilisation d'un outil à pion rétractable.

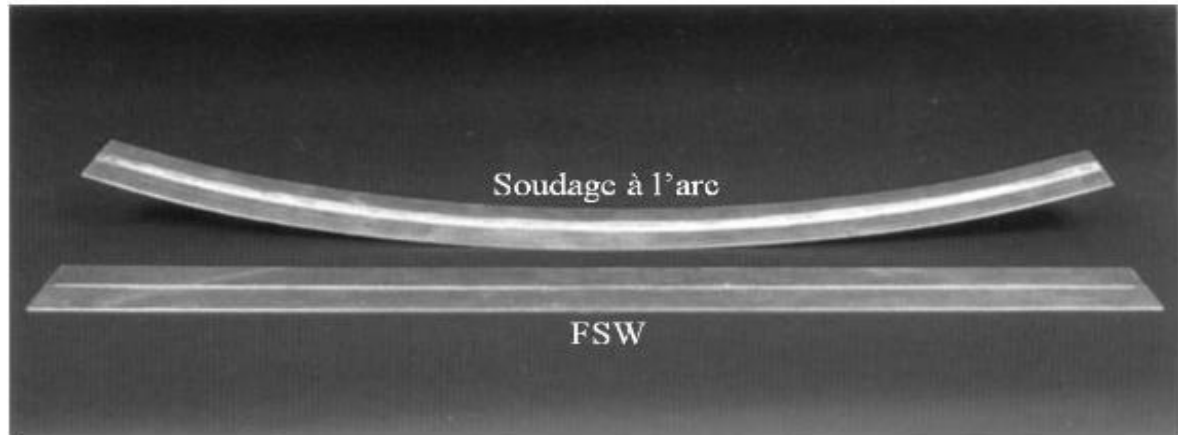


(a)

(b)

**Figure I.8** (a) phase de translation - (b) trou à la fin de soudure [9].

La figure 9 montre une comparaison de la distorsion entre le soudage FSW et le soudage à l'arc sur de l'aluminium de 5mm d'épaisseur, ce qui permet d'observer que le joint soudé est soumis à de faibles distorsions dans le cas de FSW.



**Figure I.9** Comparaison de la distorsion entre le soudage FSW et le soudage à l'arc [9]

### ***1.2.2. Phénomènes physiques observés dans le procédé***

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

#### ***1.2.2.1. 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.

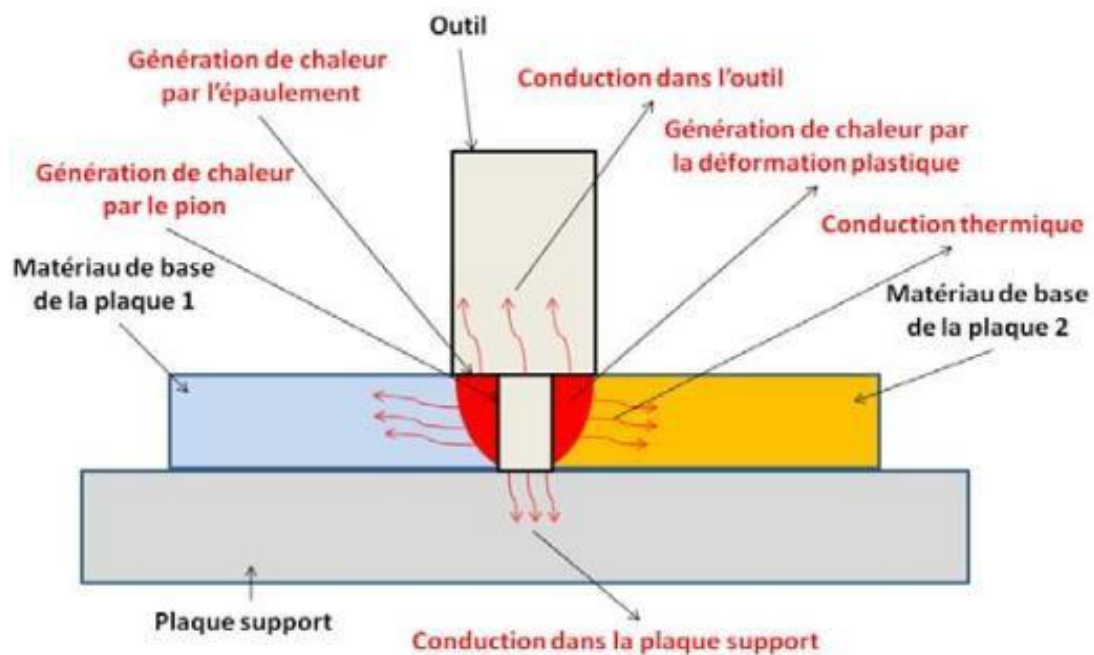
#### ***1.2.2.2. Thermique***

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 (voir figure 10).

Finalement, la chaleur est évacuée aussi par convection entre l'outil, les deux plaques à souder, la plaque support avec le milieu extérieur(ambient).



**Figure I.10** Transferts thermiques induits par le procédé FSW [9]

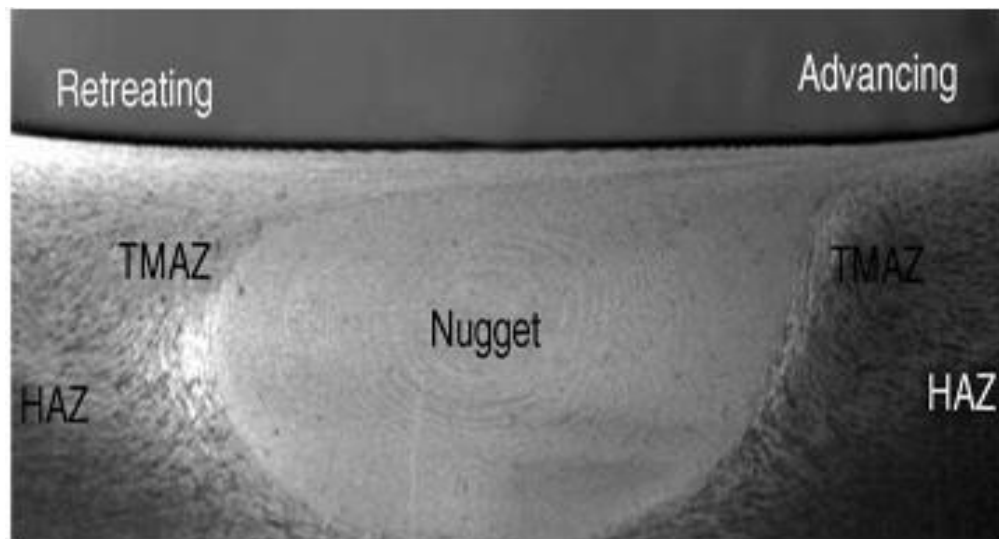
### 1.2.2.3. *Métallurgie*

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) (Voir figure 11). Chaque zone dépend de la température atteinte, des modifications métallurgiques et des déformations subies au cours du procédé de soudage.



**Figure I.11** coupe d'une soudure sur un alliage d'aluminium

### ***1.2.3. Paramètres du procédé***

Dans ce paragraphe, on cite quelques facteurs majeurs dans le procédé FSW à savoir : la vitesse de rotation de l'outil (tr/min), la vitesse d'avance de l'outil (mm/min) le long de la ligne de joint, l'angle d'inclinaison de l'outil et l'effort de plongée de l'outil dans la matière à souder.

### ➤ *Vitesse de rotation et vitessed'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 500 tr/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 [vitesse d'avance/ (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.

### ➤ *Angle d'inclinaison del'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.

### ➤ *Efforts appliqués*

Les efforts appliqués sont de trois types :

- *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'épaule 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][4].

- ***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 [10] montrent que l'usinage d'un pré-trou permet de réduire les efforts appliqués en fin de pénétration.

- ***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 [5]. Une mauvaise position de l'outil peut entraîner la formation de défauts [6]. 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 [9] 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 importante.

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.

➤ ***Avantages et limitations du procédé FSW***

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

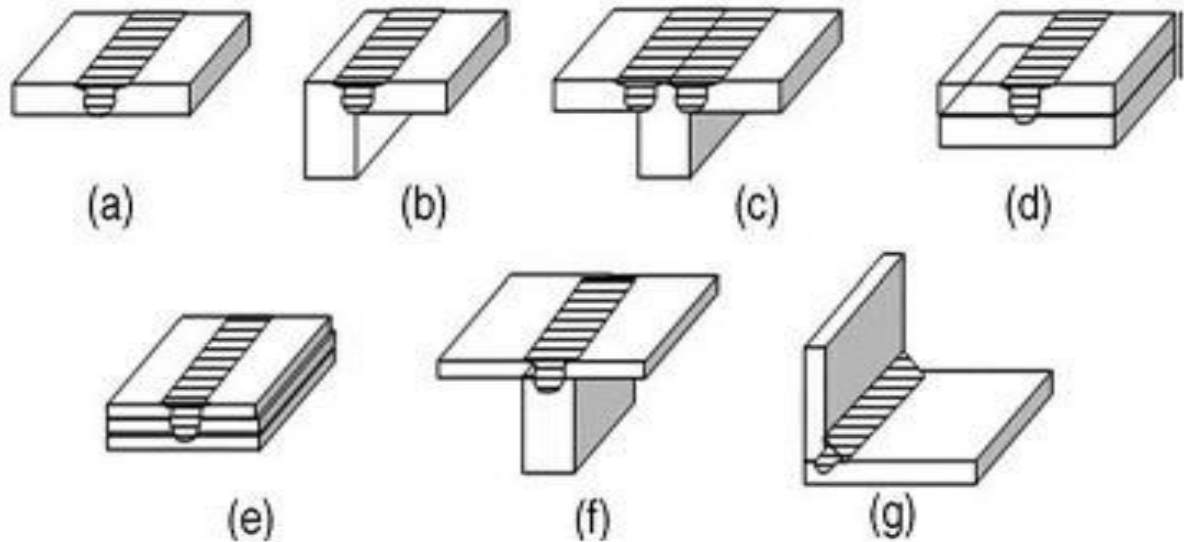
- ***Avantages liés au procédé***
  - Large gamme d'épaisseurs soudables.
  - Préparation des surfaces des pièces à assembler par usinage mécanique.
  - Pas de décapage chimique avant soudure pour alliages légers.
  - Possibilité de souder des matériaux différents.

- 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.
- Ce procédé est lui-même la source d'énergie.
- 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 (figure9).
    - **Avantages économiques et environnementaux:**
    - Procédé non polluant ; pas de projections de gaz nuisibles ni d'émanation 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.

Ces avantages justifient l'adaptation de ce procédé aux alliages d'aluminium.

Le soudage se réalise essentiellement sur des pièces minces bout à bout, mais accepte d'autres configurations de joints tels que le soudage d'angle ou en "T" ou le soudage par superposition.

Les différentes configurations possibles pour le soudage FSW sont présentées sur la (figure 12).



**Figure I.12** Les différentes configurations de soudage effectuées par FSW : (a) bout à bout, (b) en coin, (c) en T, (d) transparence, (e) transparence multiple, (f) T par transparence, et (g) angle [7]

Les limitations du procédé de soudage FSW peuvent être résumées comme suit :

- Bridage très important dû aux grands efforts mis en jeu.
- La présence d'un trou après retrait du pion à la fin de la soudure qui peut être contournée par l'utilisation d'un outil à pion rétractable.

### ***1.2.3.2. Mise en œuvre du procédé***

#### **a) Préparation des pièces à souder**

Dans ce procédé, il n'y a ni perturbation ni incidence éventuelle sur la qualité géométrique et mécanique de l'assemblage. En particulier, pour des alliages d'aluminium, il n'est pas nécessaire de décaper les pièces avant de les souder et, de plus les oxydes sont broyés mécaniquement et se diluent dans le joint soudé .

En principe l'outil entre en contact avec la matière des deux pièces à souder et sa vitesse de rotation et l'effort appliqué conduisent naturellement à sa plongée. Cependant, dans le cas des matériaux durs ou de tôles de forte épaisseur, on peut faciliter sa plongée en pratiquant un perçage préalable qui se comble ensuite par la soudure.

#### ***b) Matériaux***

Le procédé de soudage FSW est bien adapté, particulièrement, aux alliages d'aluminium d'épaisseurs moyennes (6 à 10mm). Pour développer les conditions d'application du procédé à ces matériaux industriels, de nombreuses recherches sont menées. Les autres procédés de soudage par fusion rencontrent des limites technologiques et impliquent des mesures de mise en œuvre plus contraignantes, ce qui permet de distinguer le procédé FSW par sa simplicité.

L'application du procédé de soudage FSW aux autres matériaux réputés soudables comme le cuivre et ses alliages, le plomb, le titane et ses alliages, les alliages de magnésium, le zinc, les aciers doux et les matières plastiques, fait actuellement l'objet des études de recherche. Pour les aciers, la difficulté principale réside dans le choix du matériau de l'outil et sa géométrie.

#### ***c) Epaisseurs***

Le procédé FSW a été développé dans le cadre d'épaisseurs moyennes. Aujourd'hui, il est envisagé dans le cadre de tôles minces, soit bout à bout, soit par superposition, telles sont les configurations les plus utilisées dans la construction automobile.

#### ***d) Positions de soudage***

Notons aussi qu'au cours du procédé de soudage par friction et malaxage, il y a la possibilité de déplacer soit la pièce soit l'outil. de plus, la gravité n'a pas d'influence sur le métal en phase viscoplastique, donc le soudage peut être réalisé sous différentes positions (horizontale, verticale, au plafond et orbitale) des plaques à souder.

### I. 3 Généralités sur l'aluminium

La découverte de l'aluminium remonte à 1825. Il s'agit de l'élément métallique le plus abondant sur terre. La production annuelle mondiale d'aluminium est de l'ordre de 25 millions de tonnes, ce qui le place en première position des métaux non ferreux. La caractéristique principale de l'aluminium est sa légèreté (masse volumique de  $2,7 \text{ g/cm}^3$ ) ce qui rend ce matériau très apprécié des industries automobile et aéronautique. Par ailleurs, sa conductivité, électrique et thermique, est très intéressante puisque elle est environ égale à 60% de celle du cuivre. De plus, à l'heure où les critères écologiques deviennent de plus en plus importants, il s'avère que l'aluminium est facilement recyclable, à près de 85% actuellement. Enfin, l'aluminium possède une résistance élevée à la corrosion entre pH 4 et 9, domaine de pH correspondant à un environnement atmosphérique (cf diagramme de Pourbaix de la Figure 1).

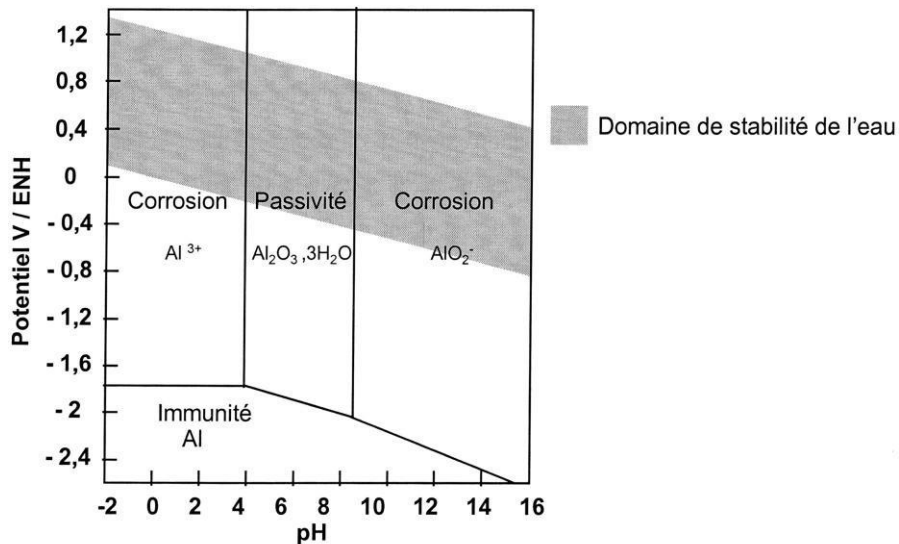


Figure I.11 : Diagramme de Pourbaix de l'aluminium dans l'eau à 25°C

Pour des pH acides, l'aluminium s'oxyde pour former l'espèce ionique  $\text{Al}^{3+}$ . Pour des pH alcalins supérieurs à 9, l'aluminium au contact de l'eau s'oxyde pour former l'ion aluminate  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  ou  $\text{AlO}_2^-$  et de l'hydrogène (domaine de corrosion). Pour un domaine de pH compris entre 4 et 9, l'aluminium en milieu aqueux se recouvre d'un film plus ou moins passif d' $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ . La stabilité de ce film est relativement faible, mais il est possible par

vieillessement de favoriser la formation successive de boehmite  $\text{AlOOH} \cdot x\text{H}_2\text{O}$ , puis de bayérite  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (ou noté  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  de structure cristalline hexagonale) et enfin d'hydrargillite également trihydratée (structure monoclinique). Les films de passivité ainsi développés sont de plus en plus stables et donc de moins en moins solubles dans des solutions



acides ou basiques, ce qui confère à l'aluminium des vertus intéressantes contre la corrosion. Cependant, les propriétés mécaniques de l'aluminium sont faibles comme le montre le Tableau 1, ce qui limite l'usage de l'aluminium pur dans l'industrie.

Pureté (%)	Limite d'élasticité Re <sub>0,2%</sub> (Mpa)	Limite à la rupture Rm (Mpa)	Dureté Brinell
99,99	10	45	12-16
99,8	20	60	19
99,6	30	70	18-25

**Tableau I.2** : Propriétés mécaniques de l'aluminium à température ambiante

L'addition d'autres métaux pour former des alliages permet d'améliorer considérablement les propriétés mécaniques et permet l'utilisation de ces alliages en tant que matériaux de structure.

Toutefois, ces modifications apportées à la composition chimique s'effectue souvent au détriment de leur résistance à la corrosion. Il est alors indispensable d'adopter un compromis entre les différentes propriétés recherchées.

### I.3.1 Les alliages d'Aluminium

### I.3.2 Classification des alliages d'aluminium

La désignation des alliages d'aluminium sont régies par un institut américain, the American National Standards Institute (ANSI) . Les alliages d'aluminium sont classés selon un nombre composé de 4 chiffres. Le premier chiffre indique la série de l'alliage propre à l'élément d'addition majoritaire (Tableau 2). Il est à noter que la nomenclature adoptée pour la famille 1XXX (aluminium seul) diffère de celle des alliages et a pour principal but de renseigner sur la pureté de l'aluminium. Dans les familles 2 à 8, le 2<sup>ème</sup> chiffre de la nomenclature est réservé aux modifications successives de la composition chimique de l'alliage permettant d'améliorer certaines propriétés. Par exemple, la composition de l'alliage

2024 a été enregistrée en 1954, l'alliage modifié 2124 breveté en 1970, l'alliage 2224 en 1978 et ainsi de suite, chaque modification restant dans les limites permises par la norme. Enfin, les deux derniers chiffres permettent d'identifier l'alliage au sein de la série.

Série d'alliages	Éléments d'alliages principaux	Domaine de composition (% massique)
1XXX	—	Al > 99%
2XXX	Cuivre	2-6
3XXX	Manganèse	0,5-1,5
4XXX	Silicium	0,8-1,7
5XXX	Magnésium	0,5-5
6XXX	Magnésium + Silicium	Mg : 0,2 – 1,5 Si : 0,2 – 1,5
7XXX	Zinc + Magnésium	Zn : 5 – 7 Mg : 1 -2
8XXX	Silicium + Fer	Si : 0,3 – 1 Fe : 0,6 -2

Tableau I.3: Principaux éléments d'alliages en fonction de la série et domaine de composition massique

Dans cette classification, les séries 1XXX, 3XXX et 5XXX correspondent à des alliages non trempants, c'est-à-dire sans durcissement structural et les séries 2XXX, 6XXX et 7XXX à des alliages trempants à durcissement structural.

Dans ce travail on a utilisé l'aluminium 2024 T3

## I.4 Caractéristique de l'aluminium 2024 T3

- **Compositions chimique de AA 2024 T3 :**

Component	Wt. %	Component	Wt. %	Component	Wt. %
<b>Al</b>	90.7 - 94.7	<b>Mg</b>	1.2 - 1.8	<b>Si</b>	Max 0.5
<b>Cr</b>	Max 0.1	<b>Mn</b>	0.3 - 0.9	<b>Ti</b>	Max 0.15
<b>Cu</b>	3.8 - 4.9	<b>Other, each</b>	Max 0.05	<b>Zn</b>	Max 0.25
<b>Fe</b>	Max 0.5	<b>Other, total</b>	Max 0.15		

Tableau I.4 composition chimique de matériaux AA 2024 T3

➤ **Les caractéristique et l'utilisations general pour AA 2024:**

- Bonne capacités d'usinabilité
- Bonne finition de surface.
- Un matériau a haute résistance.
- Facile à travailler.

Pour cette raison le AA 2024 a largement remplace le AA 2017 pour les applications structurelles

**Utilisations:**

Raccords, engrenages et arbres, boulons, pièces d'horloge, pièces d'ordinateur, accouplements, pièces de fusible, corps de vannes hydrauliques, pièces de missiles, écrous, pistons, pièces de redressement, engrenages à vis sans fin, dispositifs de fixation, équipement vétérinaire et orthopédique, structures

➤ **Les propriétés physiques, mécaniques et thermiques de AA2024 T3**

<b>Physical Properties</b>	
Densité	2.78 g/cc
<b>Mechanical Properties</b>	
Dureté, Brinell	120
Dureté, Knoop	150
Dureté, Rockwell A	46.8
Dureté, Rockwell B	75
Dureté, Vickers	137
Résistance à la traction ultime	483 MPa
Résistance à la traction	345 MPa
Allongement à la rupture	18 %
Module d'élasticité	73.1 GPa
limite d'élasticité	524 MPa
Coefficient de poisson	0.33
Resistance a la fatigue	138 MPa
Usinabilité	70 %
Module de cisaillement	28 GPa
Resistance au cisaillement	283 MPa
<b>les propriétés thermiques :</b>	
Point fusion	502 - 638 °C
<b>les propriétés de traitements thermiques :</b>	
Recuit Temperature	413 °C
Solution Temperature	256 °C

Tableau I.5 propriétés mécaniques et physiques du 2024 T3

## I.4 Les contraintes résiduelles

### I.4.1 Introduction

Les **contraintes résiduelles**  $\sigma_R$  sont des contraintes multiaxiales statiques autoéquilibrées existant dans un système isolé de température uniforme et en l'absence de tout chargement extérieur. Dans une section, la répartition des contraintes résiduelles résulte de l'équilibre mécanique entre la zone occupée par la source des contraintes résiduelles caractérisée par une fonction de distribution bien définie et le reste de la section déformée élastiquement. Dans le cas des traitements de précontrainte dont il est question dans cet article, les sources de contraintes résiduelles sont toujours localisées dans les couches superficielles du matériau

### I.4.2 Définition

Les contraintes résiduelles sont une des caractéristiques des procédés de fabrication introduisent et/ou modifient les contraintes résiduelles

Contraintes multiaxiales statiques auto-équilibrées existant dans un système isolé de température et en l'absence de tout chargement extérieur

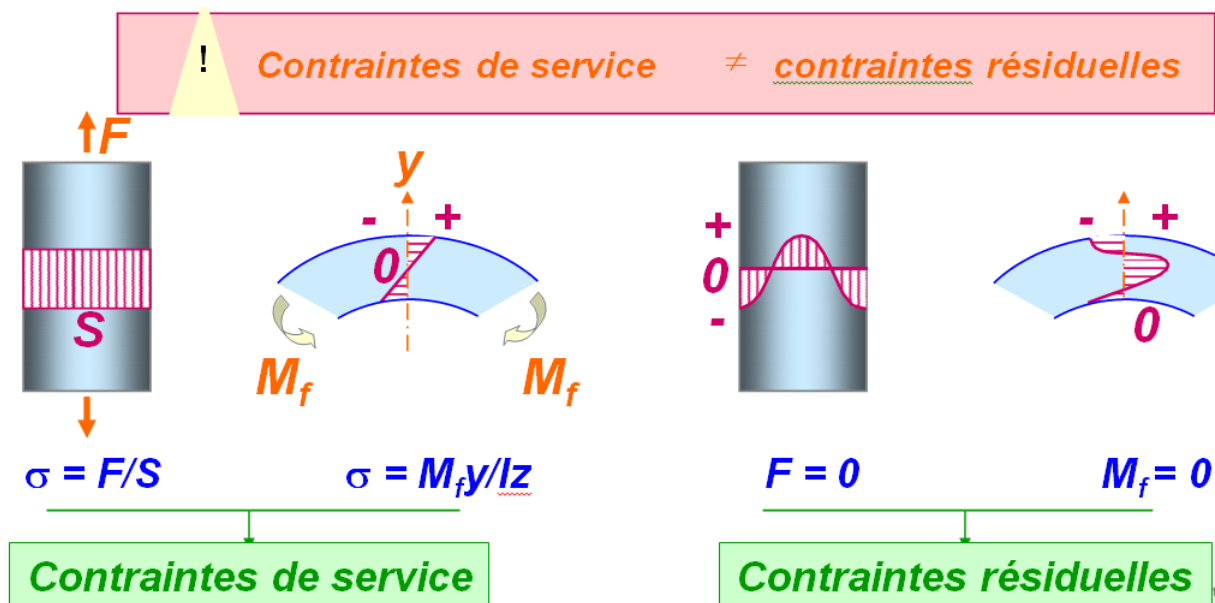


Figure I.13 Contraintes de services et contraintes résiduelles

### I.4.3 Origine des contraintes résiduelles :

Les origines des contraintes résiduelles peuvent être séparées en 3 grandes catégories

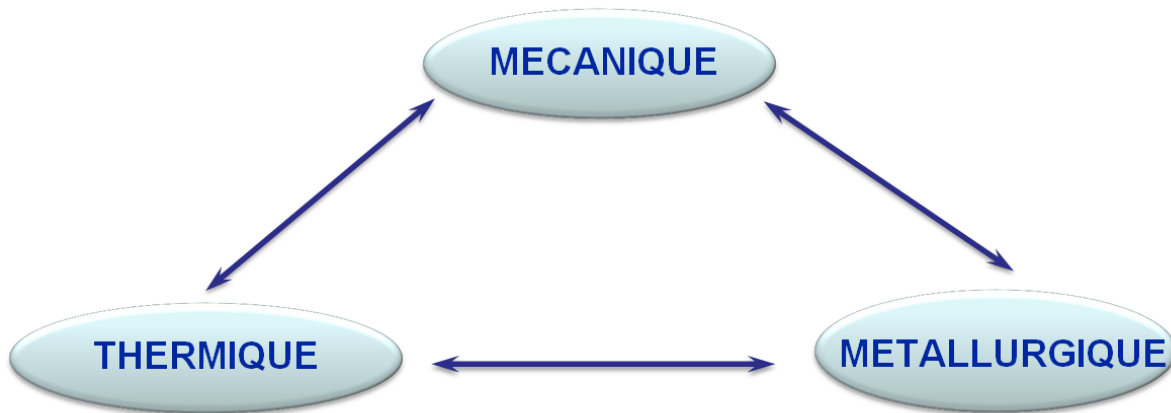


Figure I.14 : origines des contraintes résiduelles

### I.4.5 Procédés de fabrication et contraintes résiduelles

- Opérations d'usinage
- Opérations de soudage
- Traitements de détensionnement : Thermique, vibrations
- Traitements mécaniques de surface : Grenaillage, galetage, martelage
- Dépôts et revêtements : Nickelage, chromage, stellite ...
- Traitements thermo-chimiques : Nitruration, carbonitruration, cémentation
- Nettoyage par grenaillage (« sablage »)

# Chapitre 2

## II.4.5 Choix des matériaux

### ➤ *Modélisation :*

D'un point de vue mécanique un joint de soudage par malaxage doit résister à l'usure et qu'il soit résistant aussi à une grande température pour pouvoir souder les matériaux en état pâteux

### ➤ *Les indices de performance*

- 1- résistance à l'usure

On prend le diagramme n° 16 ce diagramme donne une vue d'ensemble de la façon dont les matériaux techniques usuels se comportent

- 2- températures

On prend le diagramme n° 13 résistance-température

Fonction	Percé, donne une température
Objective	Température de fusion haute, grande résistance à l'usure
Contrainte	A température de fusion spécifique B grande dureté

- Présentation du système de soudage par FSW :

D'après le laboratoire de conception-fabrication et commande de l'école nationale des arts et métiers Paris Tech du centre de Metz en France

Soudage par friction malaxage =FSW= Friction StirWelding (Procédé breveté en 1991)  
Brevet dans le domaine public en novembre 2015

### ► Particularités :

- Soudage de proche en proche à l'« état solide »

- $\hat{I}$  Soudage <  $\hat{I}^\circ$  Fusion des matériaux assemblés

Permet d'assembler tous les alliages d'aluminium

- Permet de souder des pièces de formes complexes
- Permet de souder des assemblages dissimilaires



- Le procédé de FSW
  - La phase de soudage(1/2)
    - L'outil a un mouvement d'avance ( $v$  vitesse de soudage) le long du plan de joint
    - Le cordon se forme derrière le passage de l'outil

- Paramètres de conduite principaux :  $N$ [tr/min],  $v_a$  [mm/min],  $F_2$ [kN]

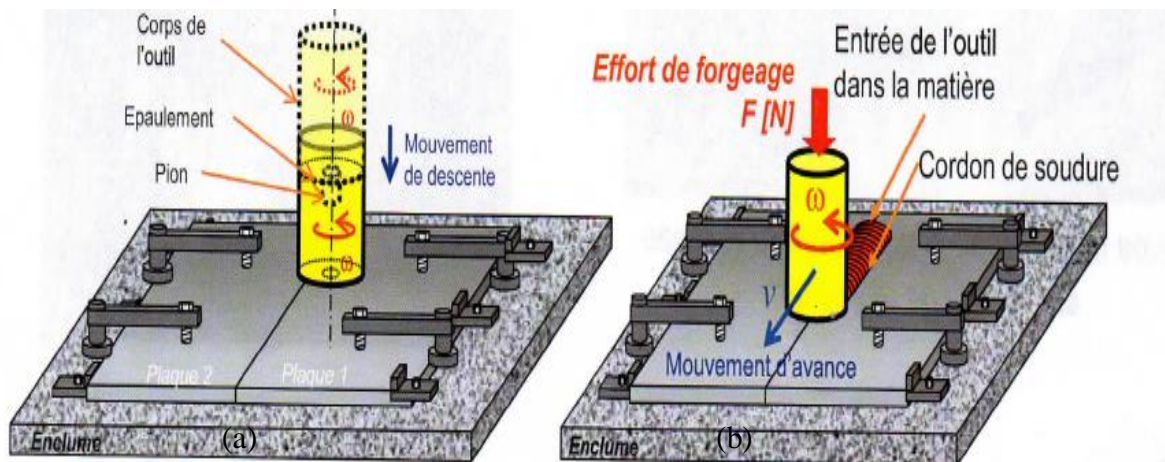


Figure II.1 (a) phase de plongée, (b) phase de soudage

- La phase de soudage(2/2)
  - La matière est entraînée par la rotation du pion de l'avant vers l'arrière
  - Confinée sous l'épaule, elle subit un mouvement combiné de forgeage (par l'épaule) et d'extrusion (par le pion)

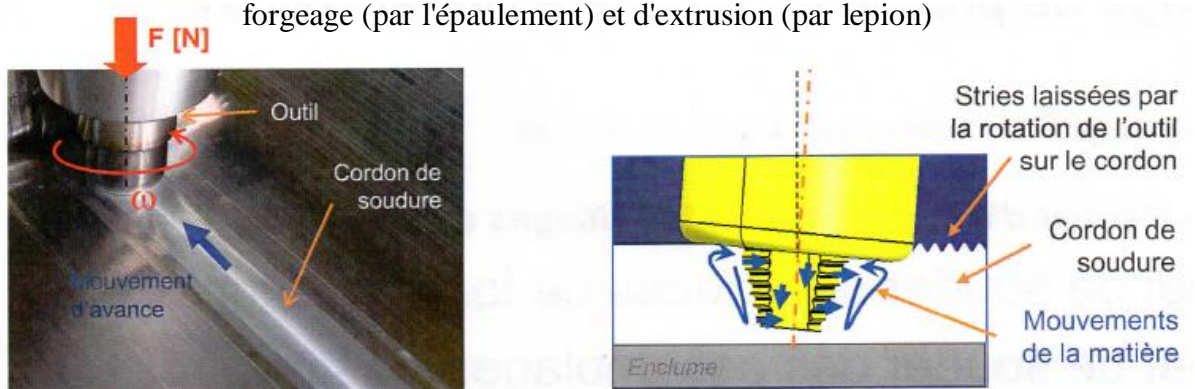


Figure II.2 Phase de soudage

- **Le cordon de soudage**

Aspects d'une soudure bout à bout

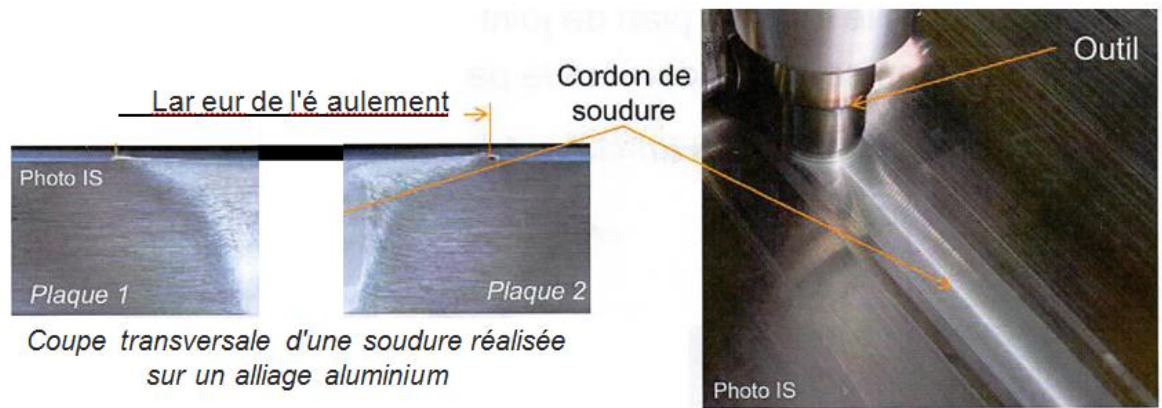


Figure II. 3 Coupe transversale d'une soudure réalisée sur un alliage d'aluminium

L'étude métallographique est un moyen de contrôler essentiellement la structure micrographique des matériaux métalliques. Elle consiste à définir leurs structures avec précision, à déterminer qualitativement la nature, la forme et la répartition des constituants microstructuraux. Elle permet aussi de mesurer les dimensions et de comprendre l'arrangement des particules, grains ou inclusions qui constituent ces matériaux.

Pour mettre en évidence la microstructure des différents échantillons, nous avons effectué une analyse métallographique des surfaces moyennant un microscope optique équipé d'une caméra vidéo. Il est possible de visualiser tout type de substrat avec un grossissement pouvant aller jusqu'à 1200 fois.

Pour notre étude on a utilisé un microscope métallographique optique universel de type ( Numérique ) permet l'observation des échantillons, avec un agrandissement qui varie de  $50\mu\text{m}$  à  $400\mu\text{m}$ .

Assisté par un ordinateur et équipé d'une caméra numérique.

L'avantage de la microscopie optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée.

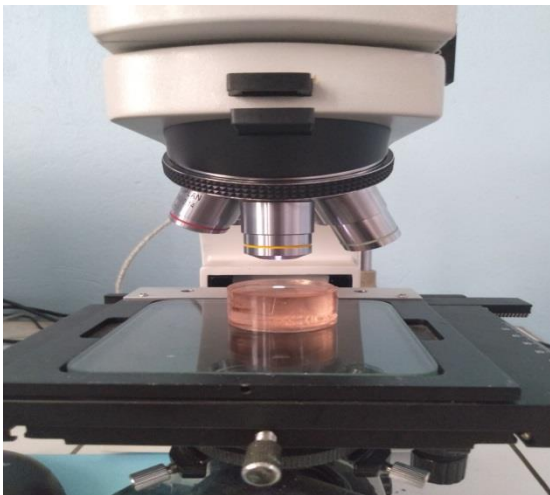


Figure II. 4 microscope optique ( optika ) a grande grossissement

### **II.3.1 L'enrobage à froid :**

#### **III.3.1**

On fait l'enrobage pour faciliter le polissage des échantillons et pour assurer seulement le contact de surface de métal avec la solution dans le cas des électrodes de corrosion, et pour cela on utilise une résine avec un durcisseur

### **II.3.2 Polissage :**

Le but du polissage est de réaliser, sur une coupe de l'échantillon, une surface plane spéculaire afin d'obtenir une image représentative de sa structure. Le principe de base est de polir l'échantillon avec des abrasifs de granulométrie de plus en plus fine.



Figure II. 5 papier abrasive

### **II.3.3 Polissage de finition**

Cette opération consiste à faire disparaître les raies laissées par l'opération précédente et permet d'obtenir une surface comparable au miroir. Elle est effectuée sur une polisseuse de type Minitech 233 (figure 5) équipée d'un disque recouvert et d'une solutionpate diamanté.



Figure II. 6 Polisseuse Minitech 233

### **II.3.4 Attaque chimique**

Pour cela les échantillons sont rincés dans une solution d'attaque chimique de HF à 0.5% pendant quelques secondes. La solution utilisée est composée de 95 % d'eau distillé et 5 % d'acide Fluorhydrique (HF).

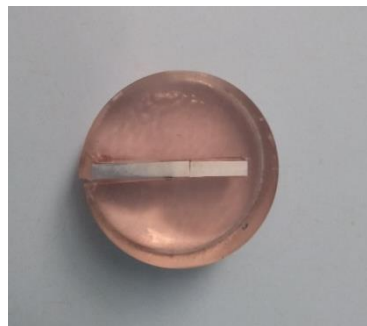
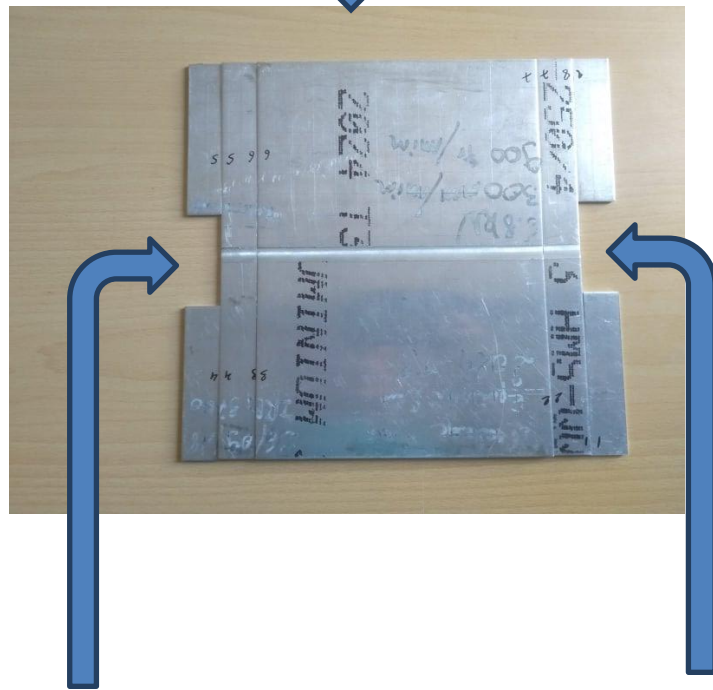
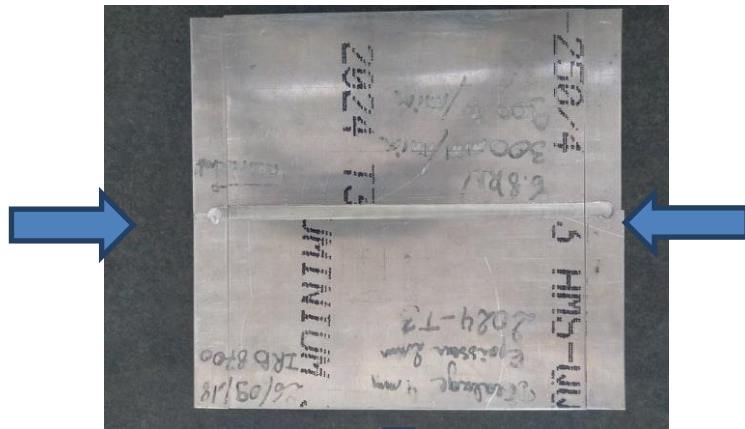


Figure II. 7 prélèvement des échantillons

#### **II.4. Essais de micro-dureté**

La mesure de la micro-dureté est employée généralement pour caractériser un matériau. Il s'agit de s'assurer de sa résistance mécanique et de vérifier l'absence de fragilité à la suite des traitements mécaniques ou thermiques subis.

Nous avons utilisé pour les mesures de la Vickers une machine Microduromètre Vickers, L'essai consiste à appliquer sur une pièce à mesurer un pénétrateur ou indentateur, de forme et de résistance appropriées (sphère, pyramide, cône...) est appliqué progressivement sous l'action d'une force  $F$  sur la surface et maintenu pendant un temps précis. Si le matériau est plastiquement déformable, une empreinte de surface latérale  $S$  et de profondeur  $e$  subsiste après retrait de la charge.



Figure II. 8 Essai de micro durezza

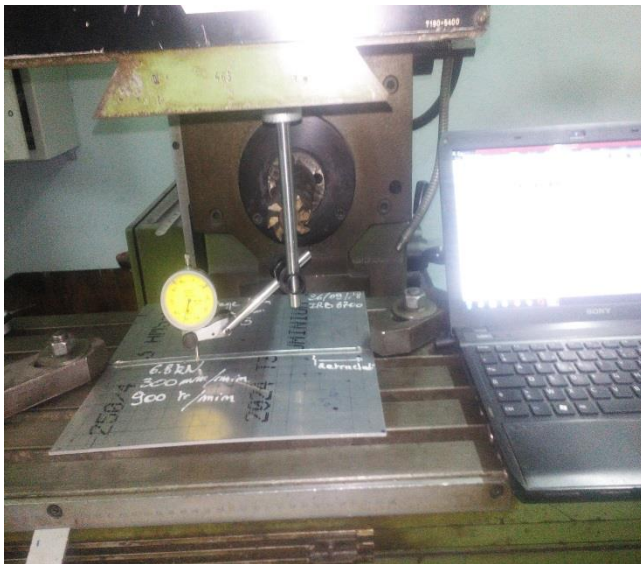
## II.5. Analyse des déformations résiduelles générées par le FSW

L'analyse des déformations résiduelles est une technique pour calculer les contraintes résiduelles qu'on a

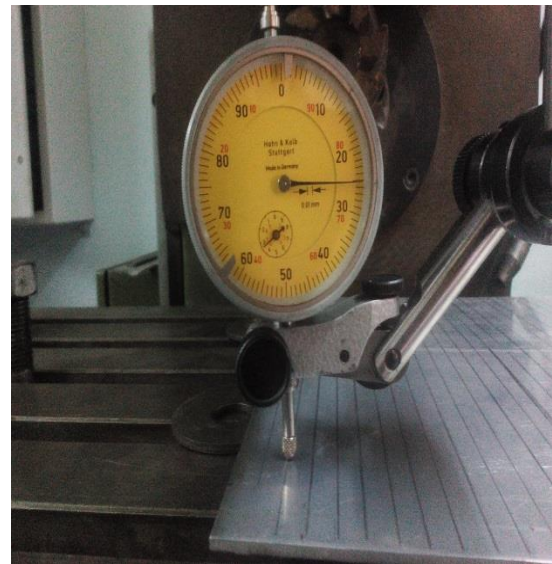
Il y a plusieurs méthode pour les calculer, dans notre travaille on a choisit qu'on mesure les déformations résiduelles après on applique des charge jusqu'à ou la déformation résiduelle diminue ver le 0

### 1 ; mesure les déformations résiduelles

On a les mesuré par un comparateur et une table de fraiseuse



(a)



(b)

Figure II.9 'a) plaque d'aluminium posé sure une table d'une fraiseuse universelle , (b) comparateur



## II.1 mesure des déformation sure une plaque réduit

On a réduit la plaque de 25 mm sur les deux bout En suite on mesuré les déformation avec la même 1 er méthode

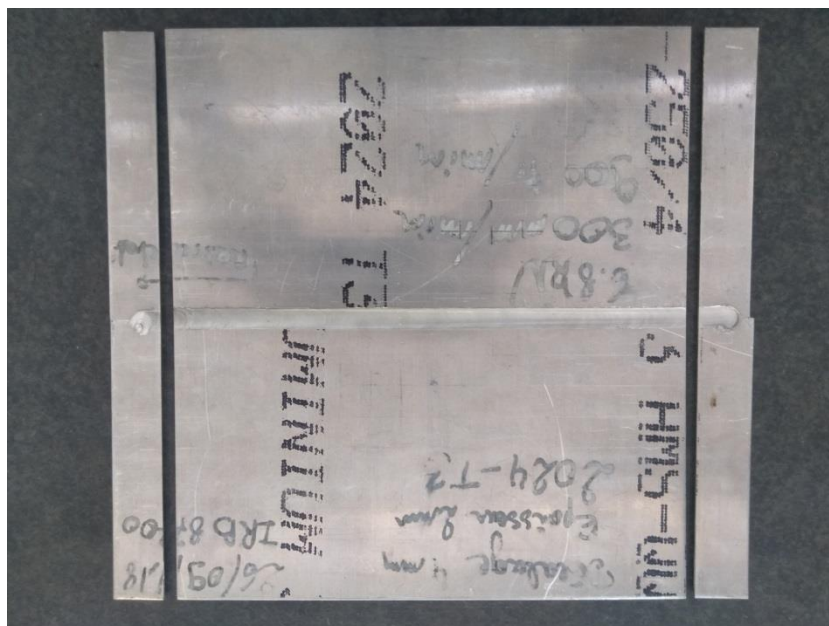


Figure II .10 plaque réduite



Figure II . 11 mesure déformation résiduelles sur une plaque réduite

# Chapitre 3

### III.1 Méthodologie d'analyse par élément finis

#### III.2 model numérique ( Solidworks )

Au début on a mesuré tous les déplacement ou bien ( les déformation ) de notre deux plaque soudé , on a utilisé un comparateur comme on a montré dans Figure II.9

En suit on a injecté les valeur de déformation trouvé dans Solidworks pour tracé un nuage des point

A la fin on a obtenu nos deux plaques soudées avec FSW telle qu'elle est avec sa déformation réelle

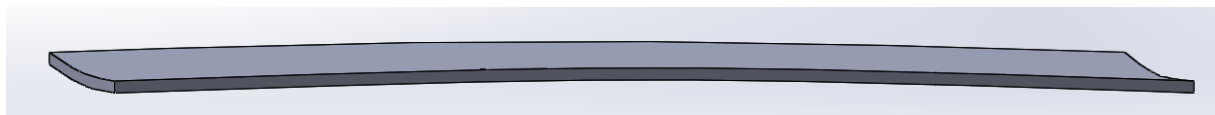


Figure III.1 DAO – Solidworks

#### III.3 Méthode élément fini ( Abaqus ) :

##### 1. module part :

Après qu'on a fini les dessin sur solidworks on a enregistré le travail sure une format tell que on peut l'ouvrier dans abaqus

Dans le module parte on a importé notre pièce comme nous la montre dans la figure Figure III.2

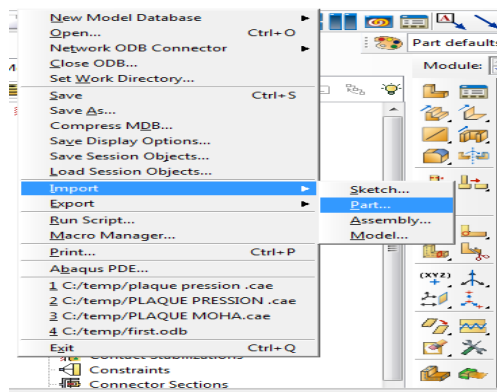


Figure III.2 importé la pièce de Solidworks ver Abaqus

En suit on considère que c une seul plaque

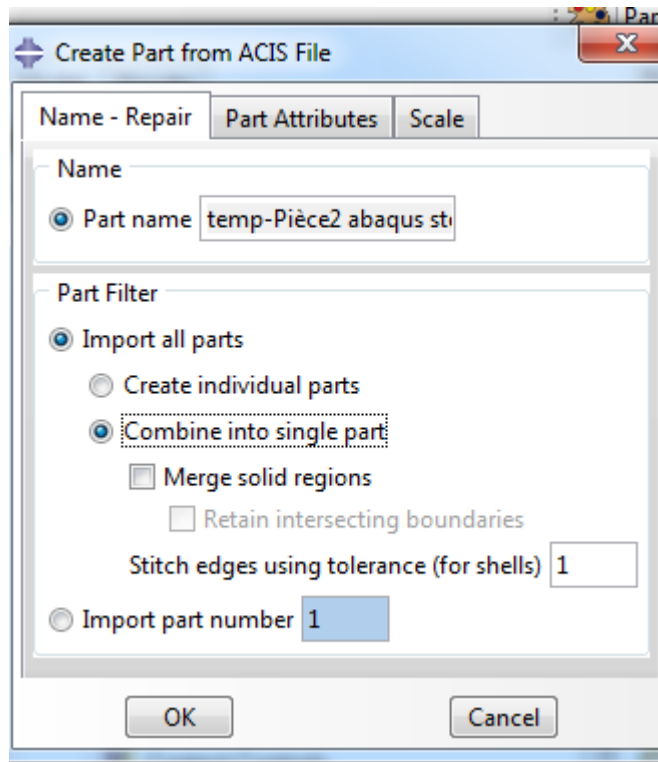


Figure III. 3 combiné les deux plaque comme une seul pièce

En suit on obtient une seule picée avec les déformation réelle qu'on les mesuré

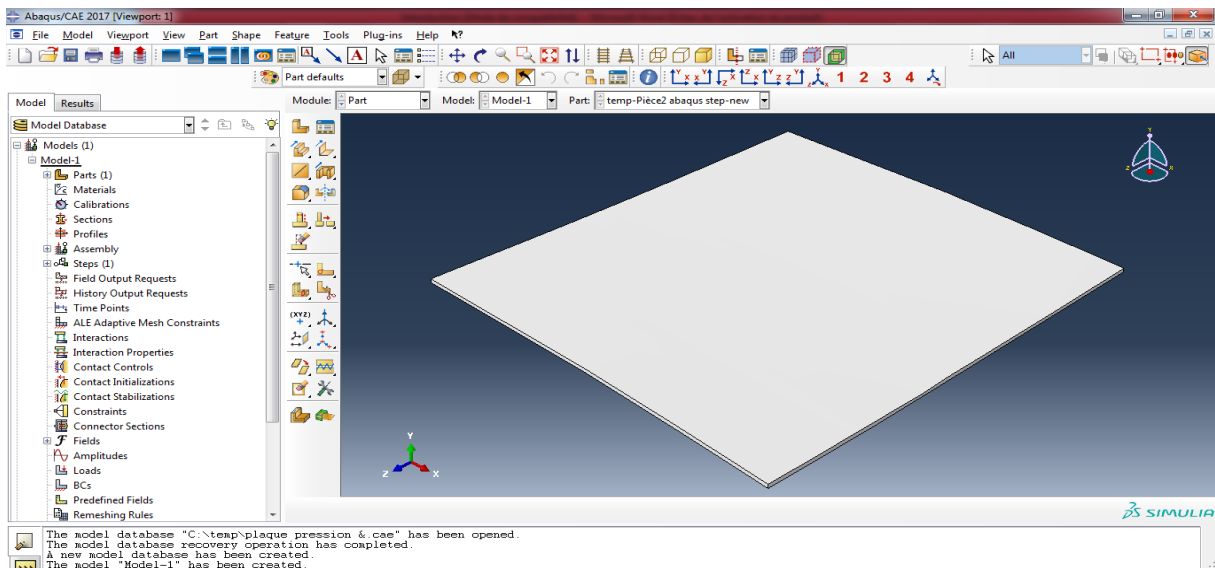


Figure III .4 module part bien terminé

## 2. Module propriety :

Dans ce module il faut choisir les différent caractéristique de notre matériaux AA2024 T3tell que le module de Young , le coefficient de poisson , et la densité

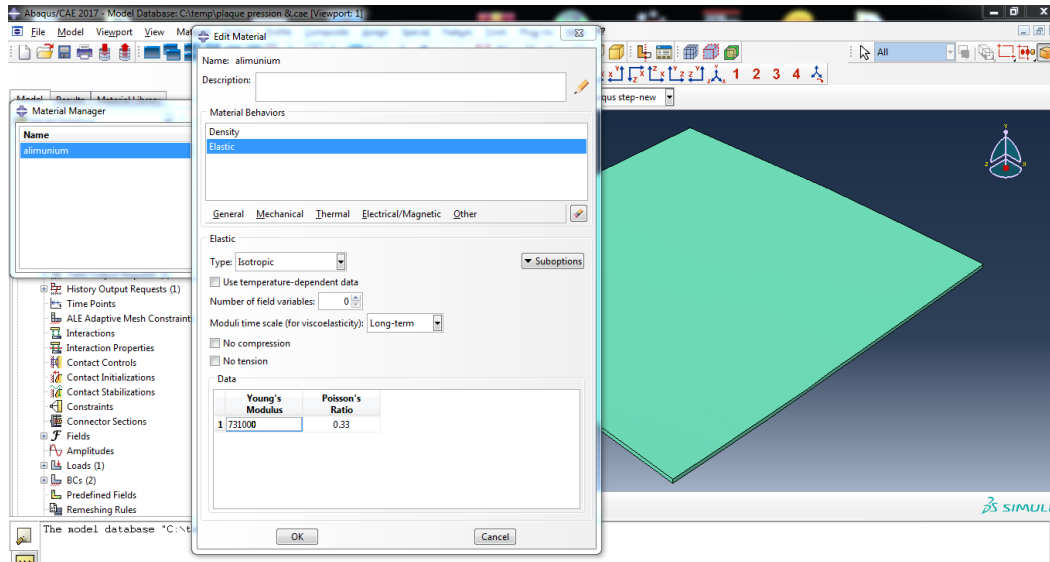


Figure III .5 propriété du matériaux

## 3. Module assembly :

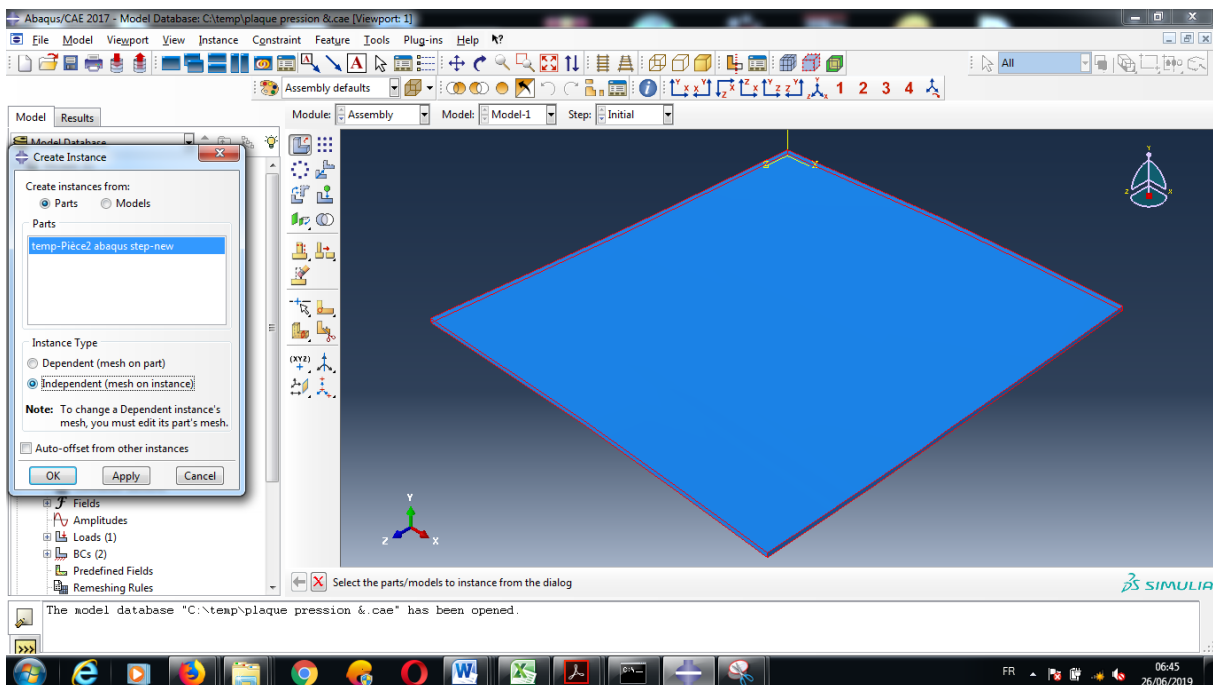


Figure III .6 module assembly

## 4. Module step :

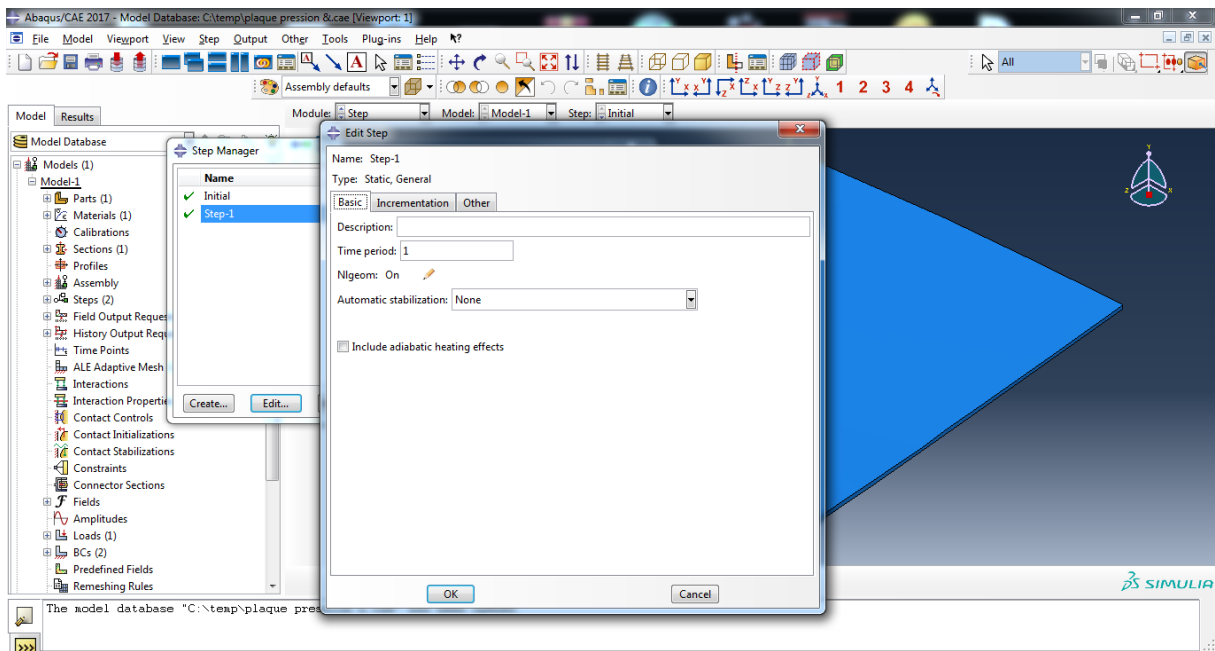


Figure III.7 modul step

## 5. Modul load :

En considère que notre plaque est encastéré de 2 coté et on applique un pression sur tout la surface

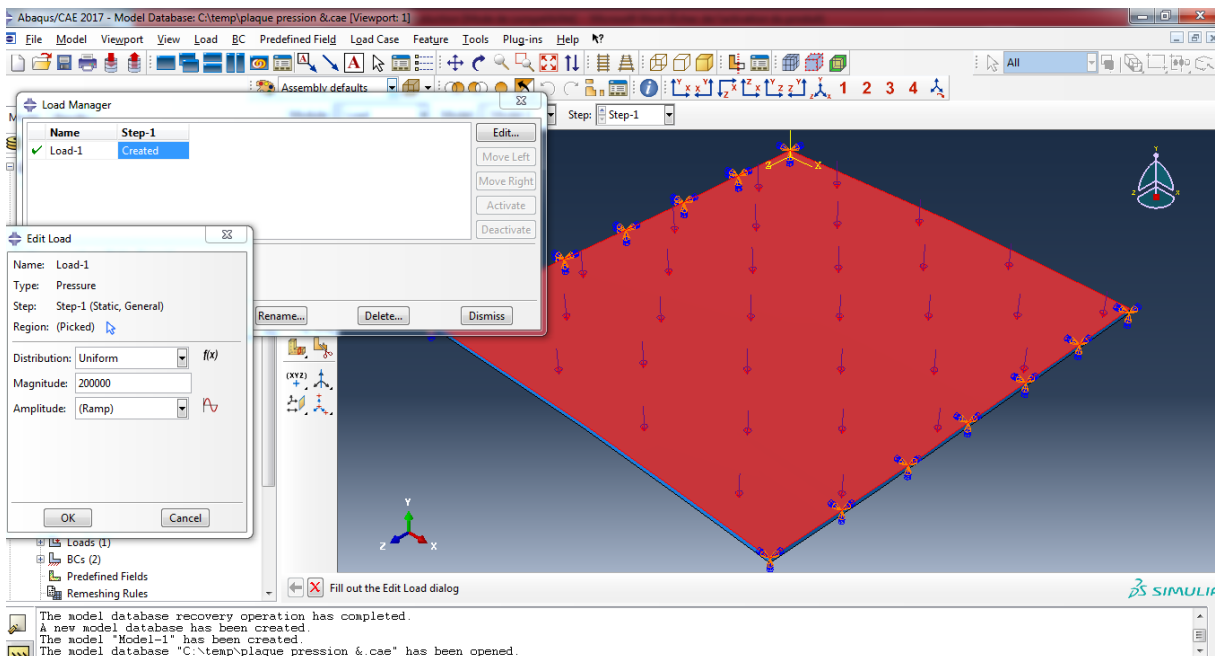


Figure III .8 les force applique sur la plaque

## 6. Module mesh :

C'est le maillage de la pièce pour donner une forme géométrique

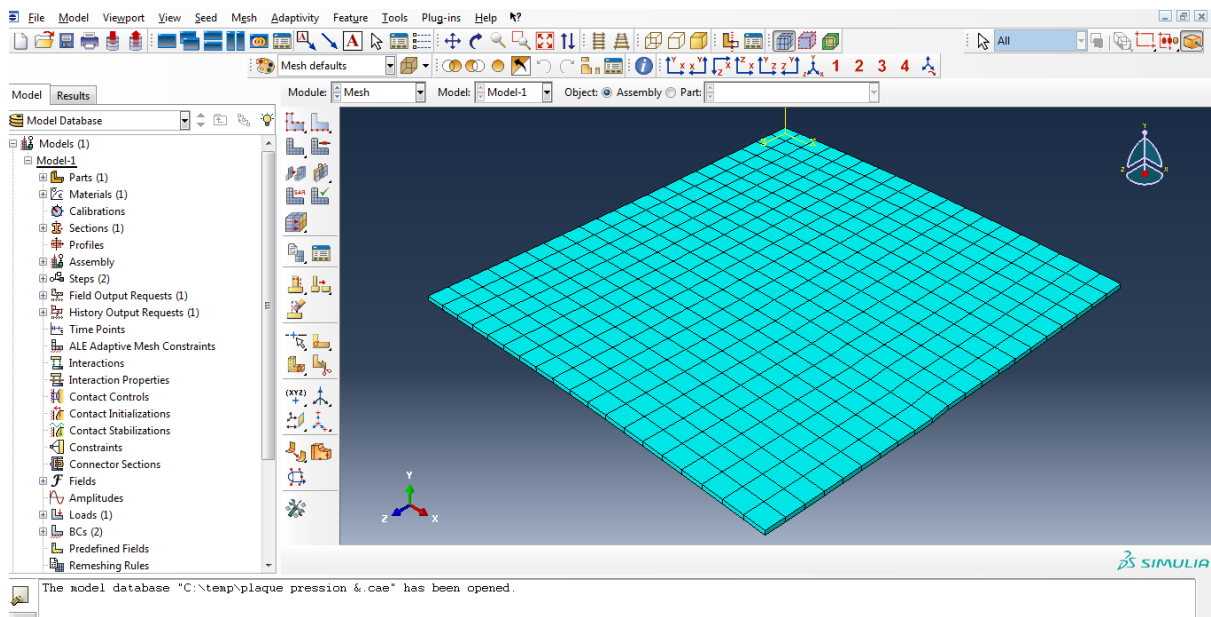


Figure III .9 le maillage de la pièce

## 7. Module job

Dans ce module on va lancer le calcul après le calcul on peut voir les résultats dans le module de visualisation

## 8. Module de visualisation :



(a)



(b)



(c)

Figure III .10 (a) plaque initial, (b) plaque après la première charge , (c) plaque après la 2ème charge



# Chapitre 4

## IV.1 Choix des matériaux

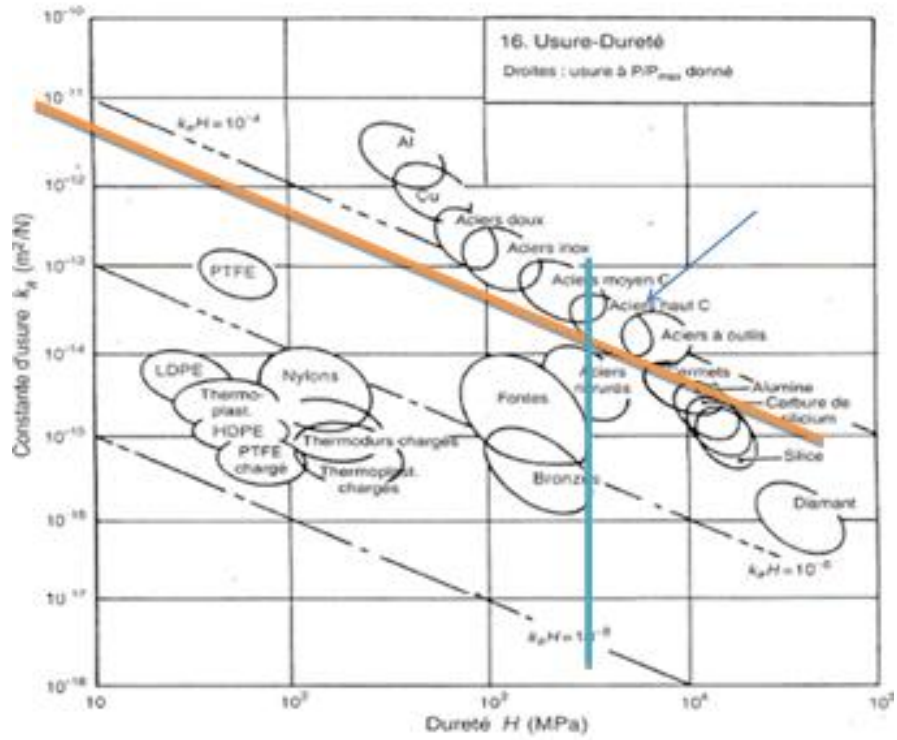


Figure IV .1 Diagramme N° 16 coefficient d'usure – dureté

On choisit dans ce diagramme les aciers à outils ( les aciers rapides ) par ce que elles sont les plus dure



## IV.2 Eude métallographie

On a réalisés avec des échantillons d'alliage d'aluminium AA 2024-T3. Les 2 plaques soudé d'environ 3 mm d'épaisseur. On a prend le début de soudage et la fin.

On a polis uniquement avec des papiers abrasifs SiC de granulométrie 1200 , 1500 et 2400 la procédure sélectionnée est détaillée dans le Tableau

Type de polissage	Durée de polissage
Papier abrasif SiC 1200	10 minutes
Papier abrasif SiC 2000	10 minutes
Papier abrasif SiC 2400	10 minutes
Pate diamantée	10 minutes



(a)



(b)

Figure IV 3 (a) vu métallographique au début de la soudure , (b) fin de soudure

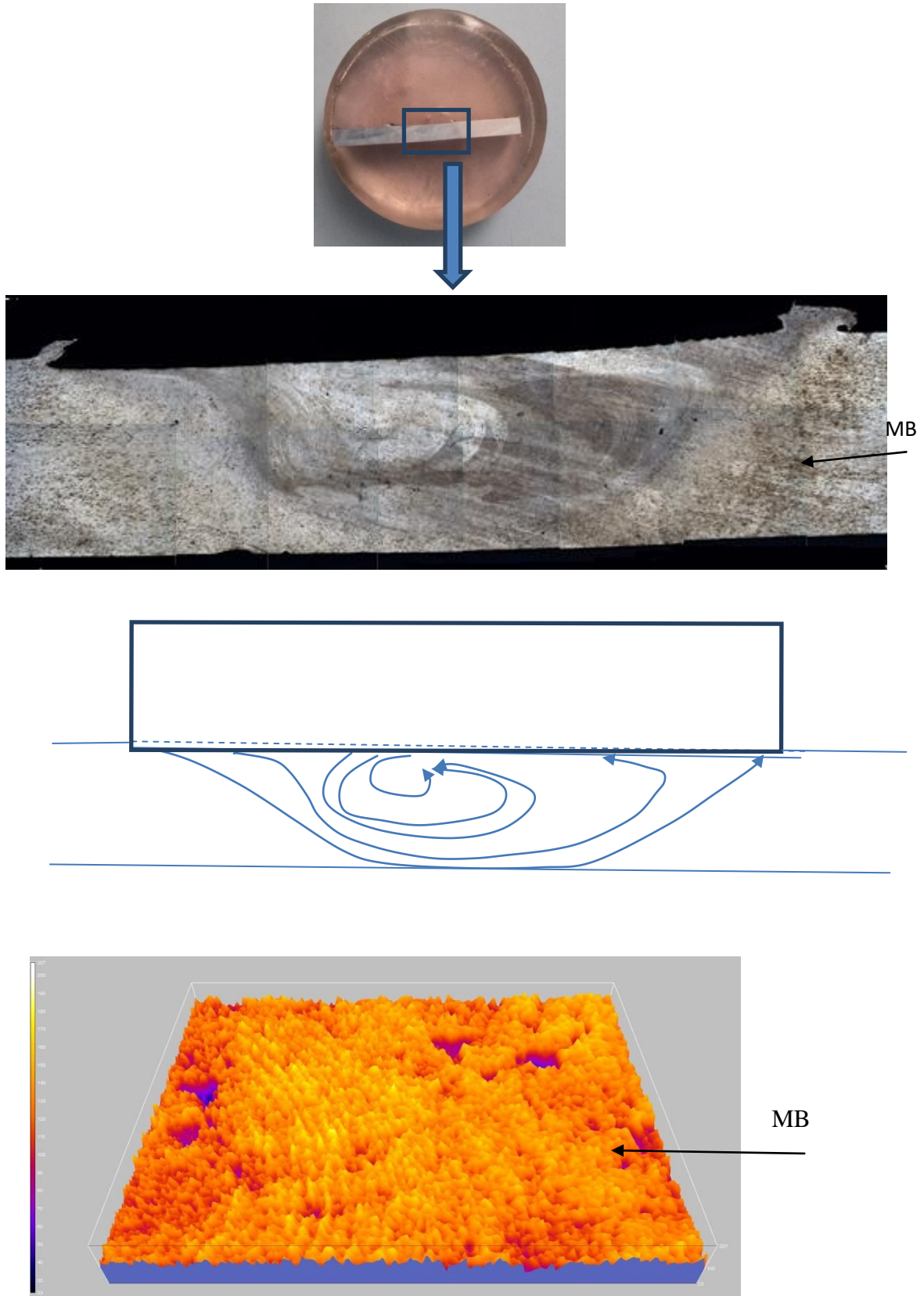


Figure IV 4 vu en 3D de direction des fibre lors de malaxage

On peut voir dans la Figure IV 4 que les fibres dans le métal de base sont alignées et dans la zone de malaxage sont tourbillonnées

### IV.3 Mesures des déformations résiduelles

Après le soudage FSW on a des déformations résiduelles on peut les voir à l'œil nu

X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0	0	1.45	0	8	1.38	0	16	1.28
11.5	0	1.87	11.5	8	1.73	11.5	16	1.51
23	0	2.24	23	8	2.11	23	16	1.99
34.5	0	2.64	34.5	8	2.49	34.5	16	2.36
46	0	3.00	46	8	2.85	46	16	2.71
57.5	0	3.36	57.5	8	3.20	57.5	16	3.06
69	0	3.71	69	8	3.54	69	16	3.39
80.5	0	4.05	80.5	8	3.86	80.5	16	3.70
92	0	4.36	92	8	4.21	92	16	3.99
103.5	0	4.62	103.5	8	4.43	103.5	16	4.25
115	0	4.87	115	8	4.65	115	16	4.47
126.5	0	5.05	126.5	8	4.88	126.5	16	4.63
138	0	5.09	138	8	4.90	138	16	4.70
149.5	0	4.95	149.5	8	4.75	149.5	16	4.56
161	0	4.76	161	8	4.56	161	16	4.37
172.5	0	4.59	172.5	8	4.39	172.5	16	4.15
184	0	4.22	184	8	4.08	184	16	3.89
195.5	0	3.97	195.5	8	3.79	195.5	16	3.60
207	0	3.66	207	8	3.47	207	16	3.30
218.5	0	3.33	218.5	8	3.08	218.5	16	2.96
230	0	2.98	230	8	2.79	230	16	2.60
241.5	0	2.61	241.5	8	2.39	241.5	16	2.23
253	0	2.32	253	8	2.00	253	16	1.88
264.5	0	1.83	264.5	8	1.70	264.5	16	1.50
272.5	0	1.54	272.8	8	1.31	272.11	16	1.11

X	Y	Z	X2	Y2	Z2
0	296	1.63	0	298	1.63
11.5	296	2.08	11.5	298	2.09
23	296	2.49	23	298	2.50
34.5	296	2.85	34.5	298	2.87
46	296	3.19	46	298	3.21
57.5	296	3.49	57.5	298	3.51
69	296	3.78	69	298	3.80
80.5	296	4.02	80.5	298	4.05
92	296	4.24	92	298	4.21
103.5	296	4.41	103.5	298	4.43
115	296	4.52	115	298	4.55
126.5	296	4.56	126.5	298	4.58
138	296	4.56	135	298	4.56
149.5	296	4.55			
161	296	4.44			
172.5	296	4.33			
184	296	4.07			
195.5	296	3.85			
207	296	3.59			
218.5	296	3.31			
230	296	3.01			
241.5	296	2.69			
253	296	2.37			
264.5	296	2.01			
272.113	296	1.76			

Tableau IV .1 nuage des points pour la plaque initial

- Modalisation géométrique pour les 2 plaques soudées

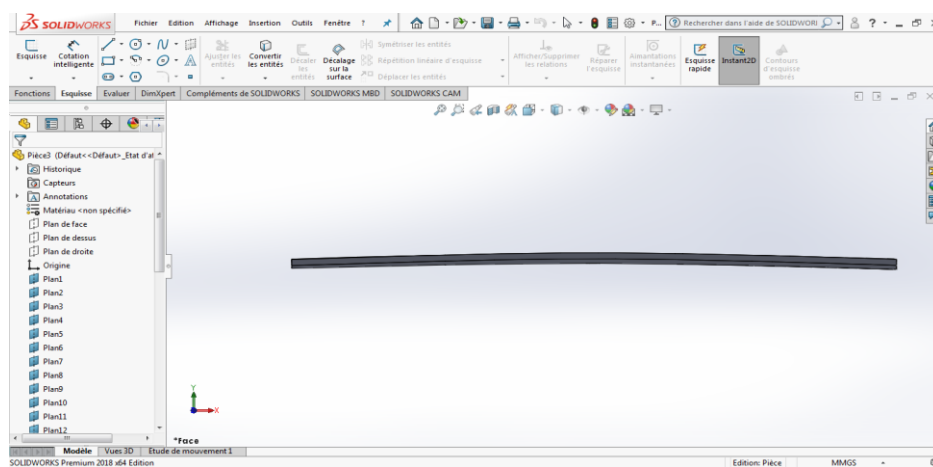


Figure IV 5 vu de face

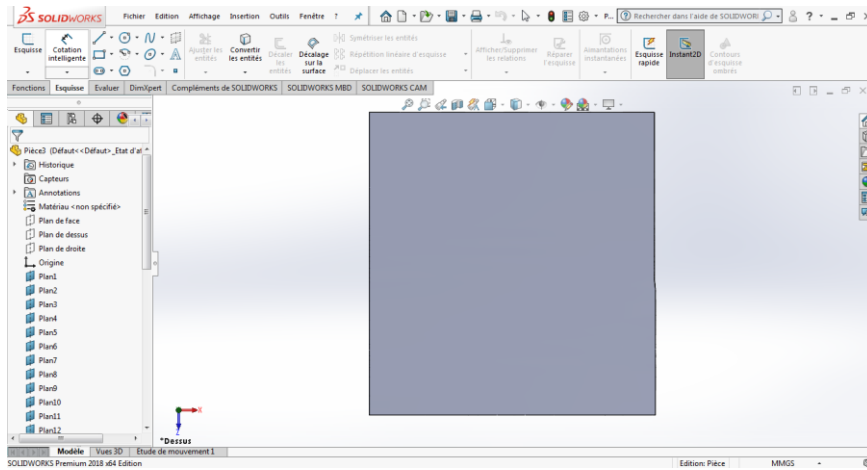


Figure IV 6 Vu de dessus

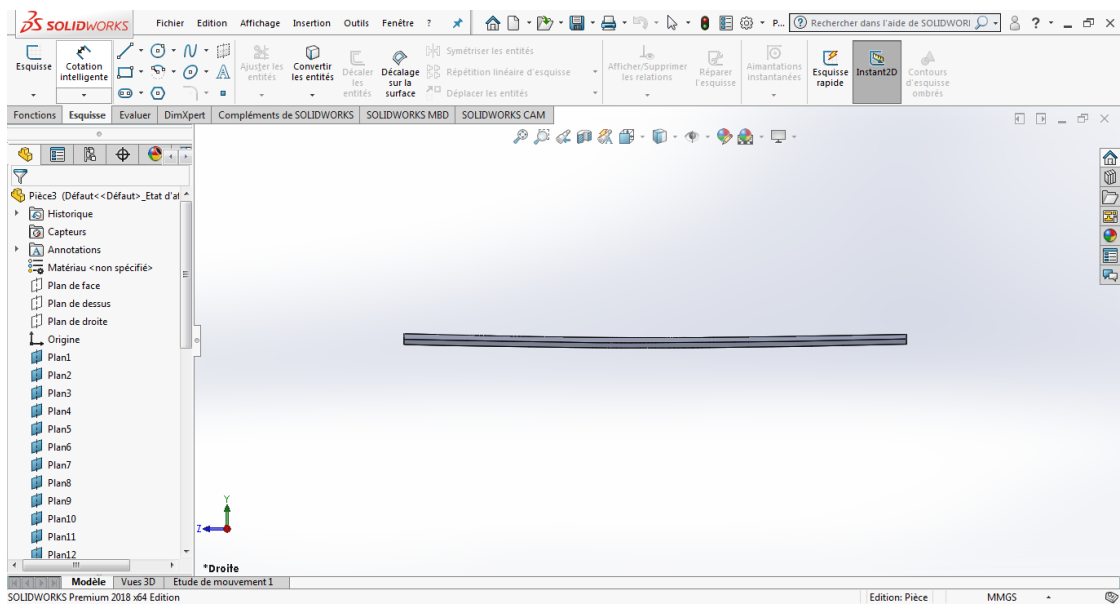


Figure IV 7 Vu de droite

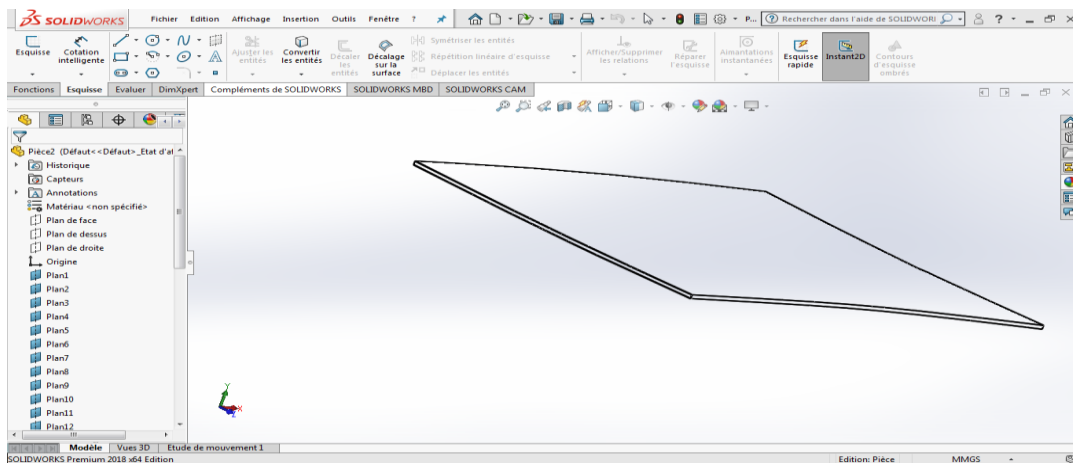


Figure IV 8 VU Générale



#### IV.4 : Mesures des déplacements résiduelles

Après soudage la plaque a subit des déplacements résiduelles dans le plan Xz et Yz. Les figures 4.1 et 4.2 montrent les résultats de mesures de ces déplacements et les modèles mathématiques déduits des courbes de tendances.

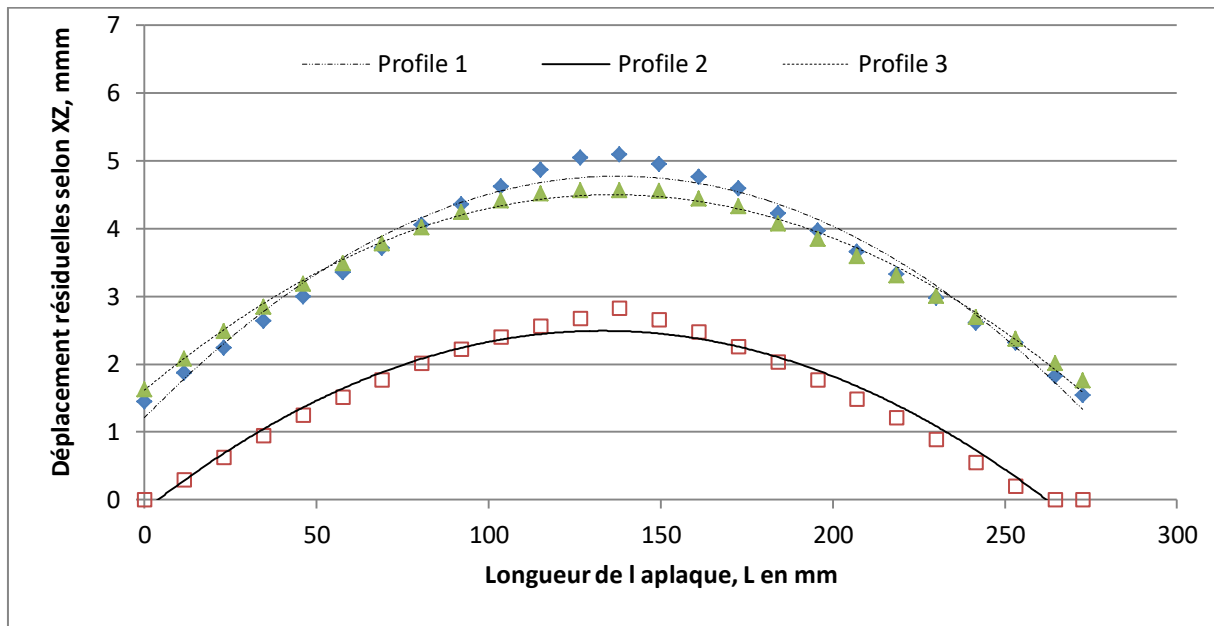


Figure IV 9 : évolution des déplacements résiduelles dans le plan XZ

Les modèles de comportement des déplacements résiduelles sont données par les cotrbes de tendances sous forme d'équations quadratiques (1), (2) et (3)de second degré.

$$\delta_{R(XZ)profile1} = -0,0002L^2 + 0,0424L + 1,6159 \quad (1)$$

$$R^2 = 0,9937$$

$$\delta_{R(XZ)profile3} = -0,0002L^2 + 0,0518L + 1,2116 \quad (2)$$

$$R^2 = 0,9781$$

$$\delta_{R(XZ)profile2} = -0,0001L^2 + 0,0398L - 0,1525 \quad (3)$$

$$R^2 = 0,9686$$

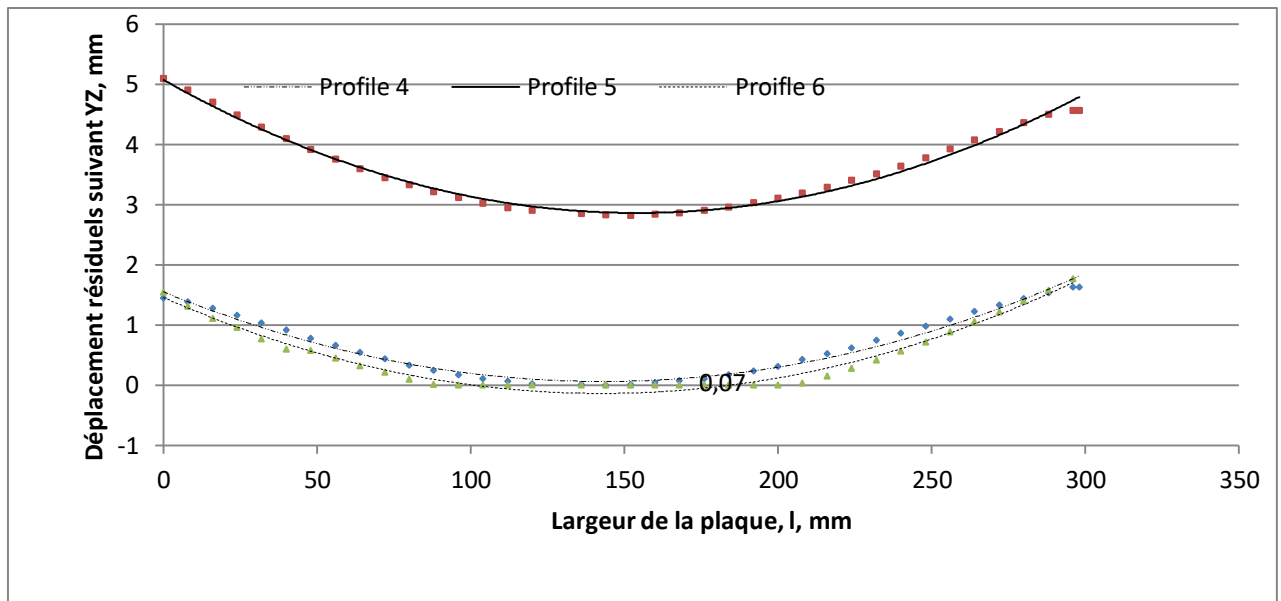


Figure IV 10 Evolution des déplacements résiduelles dans le plan YZ

$$\delta_{R(YZ)profile5} = 9E-05l^2 - 0,0287l + 5,0735 \quad (4)$$

$$R^2 = 0,9887$$

$$\delta_{R(YZ)profile4} = 7E-05l^2 - 0,0208l + 1,5522 \quad (5)$$

$$R^2 = 0,982$$

$$\delta_{R(YZ)profile6} = 8E-05l^2 - 0,0223l + 1,4577 \quad (6)$$

$$R^2 = 0,9802$$

## IV.5 Relaxation des déplacements résiduels.

Pour relaxer les déplacements résiduels, des poids ont été appliqués sur la plaque position sur un marbre. La relaxation des déplacements résiduels est réalisée par incrément de 5 à 10 N. La figure ... montre la relaxation des déplacements résiduels en fonction de la charge appliquée. Sur la plaque initiale, la relaxation des déplacements résiduels affiche une courbe dont la tendance est exprimée par une équation quadratique de second degré , Equation (...)

Quand on enlève des extrémités de la plaque des barre de 25 mm, les déplacements résiduels sont réduits et le comportement est exprimé par la courbe de tendance définie par l'équation (8), Donc plus on enlève de la matière plus on relaxe les contraintes résiduelles qui causent les déplacements résiduels générés par le FSW.

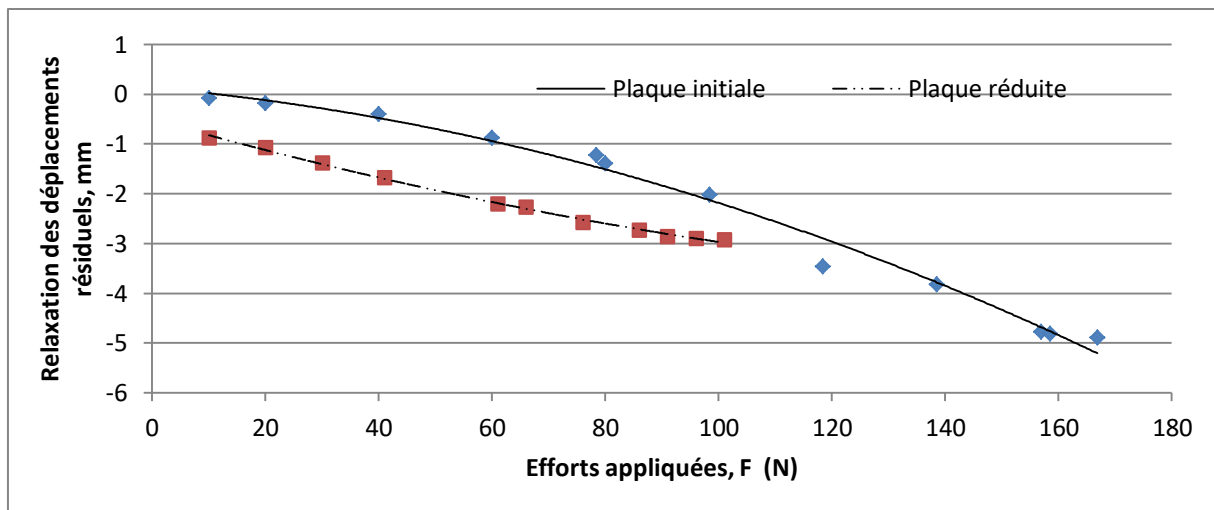


Figure IV 11 relaxation des déplacements résiduels par réduction de la matière

$$\delta_{\text{Relaxation réduite}} = 8E-05F^2 - 0,0322F - 0,5091 \quad (7)$$

$$R^2 = 0,9968$$

$$\delta_{\text{Relaxation initiale}} = -0,0001F^2 - 0,01F + 0,1299 \quad (8)$$

$$R^2 = 0,9864$$

## IV.6 Micro dureté

Pour analyser et caractérisé le cordon de soudure on a fait quelque essais de micro dureté sur un échantillon ( le début de soudage )

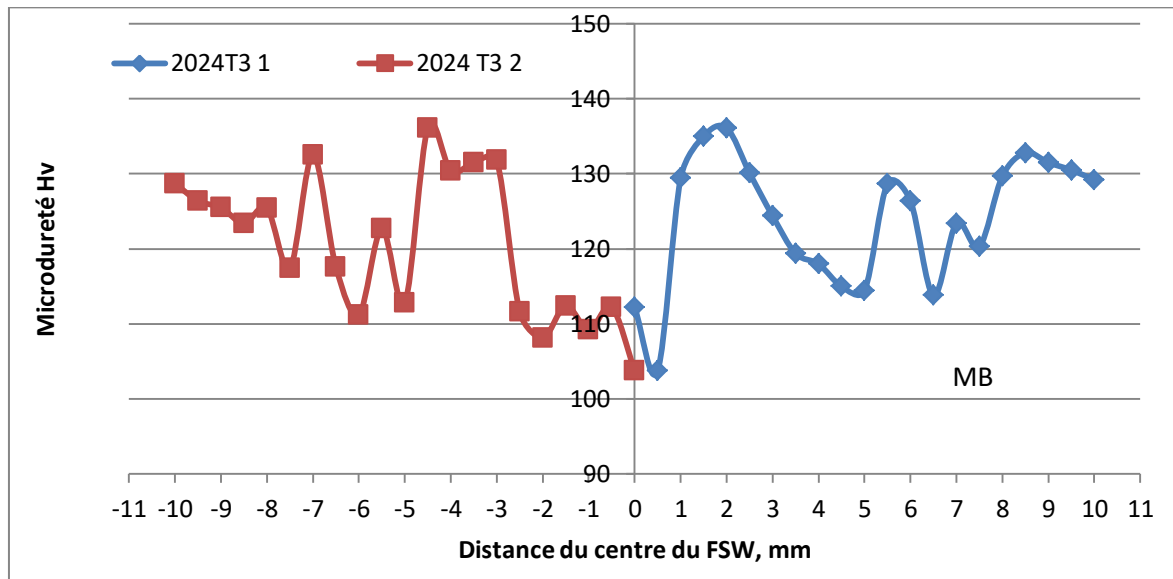


Figure IV 12 Dureté au joint de soudure , pas= 0.5 mm , charge =100g

On voit sur cette figure que la dureté dans le métal de base est supérieure à la dureté dans le cordon de soudure.

Cette différence, d'après les littératures et les chercheurs dans ce domaine, est causée par la température et le refroidissement au cœur de soudage.

## Conclusion générale

- Pour le choix des matériaux on a un interval large pour choisir donc il faut introduire le diagramme de cout pour éliminer tout les matériaux chère et non disponible
- Les observations microscopiques du cordon ont permis d'identifier le sens des fibres des plaques en aluminium et les a orienté dans le sens de rotation du pion
- La micro-dureté montre l'effet du FSW sur la résistance du matériau
- . La relaxation des déplacements résiduels montre que les déformations résiduels suivent une loi de comportement de second degré et que plus la plaque est réduite, plus les déformations sont réduites..

Dans les perspectives à venir, nous recommandons l'étude de déformation résiduelles en relation avec L'allongement  $A(\%)$ , et réduire les contrainte résiduelle avec le galetage, comparé entre deux plaque assembler par rivetage et par FSW

