

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 de structures

Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du Diplôme de Master en  
Fabrication Mécanique et Productique

Effet du procédé de soudage FSW sur les aciers inoxydables

Proposé et encadré par :  
M.Temmar

Réalisé par :  
A.Ammour  
M.O.Hamida

Année universitaire 2019/2020

# REMERCIEMENT

En premier lieu, nous remercions **ALLAH**, le tout grand puissant de nous avoir donné la force, la puissance, la volonté pour faire ce modeste travail.

Ensuite, nous adressons nos remerciements à nos précieux parents pour leurs encouragements durant nos études.

Au terme de ce projet, on tient à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre respectueux professeur M. Temmar d'avoir accepté de nous encadrer pour notre projet de fin d'étude, ainsi que pour ses soutiens, ses remarques pertinentes, ses orientations et sa grande disponibilité.

# **DEDICACE**

Nous avons l'honneur de dédier ce travail, à nos chers parents pour leurs soutiens et leurs encouragements à chaque instant de notre vie scolaire et universitaire.

A nos chers frères et nos chères sœurs pour leurs encouragements et leurs aides.

A tous(tes) nos amis(es) et tous.

# RESUME

Soudage par friction malaxage est un procédé de soudage à l'état solide de deux pièces à un état pâteux.

Ce procédé est utilisé pour assembler des alliages d'aluminium. Le but de ce travail est l'application du procédé de soudage par friction malaxage (FSW) sur les aciers inoxydables malgré leur difficulté de soudages.

Cependant certains paramètres comme l'avance et la vitesse de rotation peuvent influencer sur la qualité de la soudure.

Les aciers inoxydables présentent une grande variété de structures et donc de propriétés physiques, mécaniques et surtout chimiques. La principale propriété de ces aciers est leur résistance à la corrosion.

D'après la recherche bibliographique, le soudage de ces aciers est relativement vaste et les difficultés rencontrées pour souder de l'acier inoxydable ne sont pas les mêmes que celles rencontrées pour souder de l'acier tendre.

Les conditions les plus sévères possibles ont été atteintes lors du soudage de ce matériau.

Afin de réaliser la soudure FSW, deux plaques en acier 304 ont été désignées et assemblées avec soudure à l'aide de logiciel SolidWorks et basée sur la résistance à la rupture en traction (XX) et en flexion (YY).

Le résultat obtenu est une bonne qualité de la soudure selon la simulation. Le cordon est homogène.

# ABSTRACT

Friction stir welding is a solid-state welding process of two pieces in a pasty state.

This process is used to join aluminum alloys. The aim of this work is the application of the friction stir welding (FSW) process on stainless steels despite their difficulty of welding.

However, certain parameters such as feed rate and rotation speed can influence the quality of the weld.

Stainless steels have a wide variety of structures and therefore physical, mechanical and above all chemical properties. The main property of these steels is their resistance to corrosion.

According to literature research, welding of these steels is relatively extensive and the difficulties encountered in welding stainless steel are not the same as those encountered in welding soft steel.

The most severe conditions possible were reached when welding this material.

In order to achieve the FSW weld, two 304 steel plates were designated and assembled with welding using SolidWorks software and based on tensile (XX) and bending (YY) tensile strength.

The result obtained is a good quality of the weld according to the simulation. The bead is homogeneous.

## ملخص

لحام الدمج الاحتكاكي هو عملية لحام صلبة تتكون من قطعتين في حالة عجينة.

تستخدم هذه العملية للانضمام إلى سبائك الألومنيوم. الهدف من هذا العمل هو تطبيق عملية لحام الدمج الاحتكاكي (FSW) على الفولاذ المقاوم للصدأ على الرغم من صعوبة اللحام.

ومع ذلك ، يمكن أن تؤثر بعض المعلمات مثل معدل التغذية وسرعة الدوران على جودة اللحام.

يحتوي الفولاذ المقاوم للصدأ على مجموعة متنوعة من الهياكل وبالتالي الخصائص الفيزيائية والميكانيكية وقبل كل شيء الكيميائية. الخاصية الرئيسية لهذا الفولاذ هو مقاومته للتآكل.

وفقاً لأبحاث الأدبيات ، فإن لحام هذا الفولاذ واسع نسبياً والصعوبات التي تواجهها في لحام الفولاذ المقاوم للصدأ ليست هي نفسها تلك التي تواجهها في لحام الفولاذ اللين. تم الوصول إلى أسمى الظروف الممكنة عند لحام هذه المادة.

من أجل تحقيق اللحام FSW ، تم تخصيص صفحتين من الفولاذ 304 وتجميعهما مع اللحام باستخدام برنامج SolidWorks وبناءً على قوة الشد (XX) والانحناء (YY).

النتيجة التي تم الحصول عليها هي نوعية جيدة من اللحام وفقاً للمحاكاة. حبل متجانس.

## TABLE DES MATIERE

<b>CHAPITRE I LES PROCEDES DE SOUDAGE</b> .....	9
<b>I.1 INTRODUCTION</b> .....	10
<b>I.2.1 LES DEFFIRENTS TYPES DE SOUDAGE</b> .....	11
<b>I.2.2 DESCRIPTION DU PROCEDE DE SOUDAGE</b> .....	12
<b>I.2.3 PRINCIPAUX DEFAUTS DE SOUDAGE</b> .....	14
<b>CHAPITRE II LE SOUDAGE FRICTION MALAXAGE (FSW)</b> .....	16
<b>II.1 INTRODUCTION</b> .....	17
<b>II.2 LE SOUDAGE PAR FRICTION</b> .....	18
<b>II.3.1 EXPERIENCE 1</b> .....	20
<b>II.3.2 EXPERIENCE 2</b> .....	21
<b>II.4.1 LE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE</b> .....	25
<b>II.4.2 Outil de soudage</b> .....	27
<b>II.4.2.1 LE PION ET L'EPAULEMENT</b> .....	28
<b>II.4.2.2 L'EPAULEMENT</b> .....	28
<b>II.4.2.3 PION</b> .....	30
<b>II.4.2.3.2 PION AJUSTABLE</b> .....	31
<b>II.4.3.1 PARAMETRES DU PROCEDE</b> .....	32
<b>II.4.3.2 VITESSE DE ROTATION ET VITESSE D'AVANCE</b> .....	33
<b>II.4.4.1 PRINCIPE GENERAL DU SOUDAGE FRICTION MALAXAGE</b> .....	33
<b>II.4.4.2 CARACTERISATION METALURGIQUE DE LA ZONE SOUDEE PAR FSW</b> ...39	
<b>II.4.4.3 DOMAINE D'UTILISATION</b> .....	41
<b>II.4.5.1 CONFIGURATION DU SOUDAGE</b> .....	45
<b>II.4.5.2 LES MATERIAUX CONSIDERES</b> .....	46
<b>II.4.5.3 LES AVANTAGES DU SOUDAGE SFW</b> .....	46
<b>CHAPITRE III LES ACIERS INNOXYDABLES</b> .....	47
<b>III.1 INTRODUCTION</b> .....	48
<b>III.2.1 DEFINITION DE L'ACIER</b> .....	49
<b>III.2.2 CLASSIFICATION DES ACIERS</b> .....	49
<b>III.3.1 PROPRIETES ET APPLICATIONS</b> .....	49
<b>III.3.2 COMPOSITION ET STRICTURE DES ACIERS</b> .....	51
<b>III.3.3 FABRICATION DES ACIERS INNOXYDABLES</b> .....	51
<b>III.3.4 CLASSIFICATIONS DES ACIERS INNOXYDABLES</b> .....	51
<b>III.3.5 L'EFFET DES ELEMENTS PRINCIPAUX DANS LES ACIERS INOXYDABLES</b> .....	53
<b>III.3.6 LES CAPACITES ET LES AVANTAGES ETONNANTS DE L'ACIER INOXYDABLE</b> .....	54
<b>III.3.7 LES AVANTAGES DE CHOISIR DES MATERIAUX EN ACIER INOXYDABLE</b> .....	54
<b>III.3.8 UTILISATION COMMERCIALE DE MATERIAUX EN ACIER INOXYDABLE</b> .....	55
<b>III.4.1 DIFFERENTS TYPES DE MATERIAUX EN ACIER INOXYDABLE</b> .....	55
<b>III.4.2 INOX 304 ET L'INOX 316</b> .....	55
<b>III.4.3 DIFFERENCES ENTRE L'ACIER 304 ET 316</b> .....	56
<b>III.4.4 L'ACIER INOXYDABLE 304</b> .....	56
<b>CHAPITRE IV SIMULATION</b> .....	58
<b>IV.1 SOLIDWORKS</b> .....	59

<b>IV.2.1</b>	<b>PARAMETRES PROPOSES</b>	<b>59</b>
<b>IV.2.2</b>	<b>LE DESSIN ASSOCIE PAR ORDINATEUR</b>	<b>60</b>
<b>IV.2.3</b>	<b>LA SIMULATION</b>	<b>62</b>
<b>IV.2.4</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>72</b>
<b>REFERENCES</b>		<b>73</b>



# **CHAPITRE I**

## **LES PROCEDES DE SOUDAGE**

## I.1 INTRODUCTION

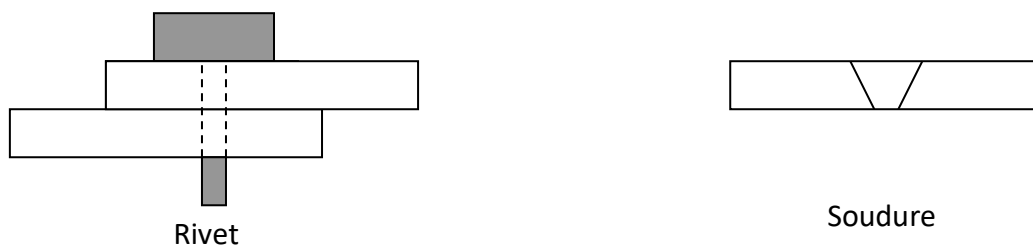
Contrairement aux idées reçues, les techniques de soudage sont en pleine évolution, pour ne pas dire en révolution. Si les premières réalisations soudées ou brasées remontent à l'âge du bronze, ce n'est que depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle que la maîtrise d'un arc électrique permet de réaliser la fusion puis la solidification des matériaux pour constituer un assemblage dit par soudage.

Il faut pourtant attendre la fin de la seconde guerre mondiale pour que des constructions soudées soient utilisées dans la réalisation de structures ou bâtis.

On commence alors à parler de mécano-soudage. Or, les seuls procédés industrialisés de façon importante sont la soudure oxyacétylénique et la soudure à l'arc à l'électrode enrobée. Au fur et à mesure de la maîtrise des sources thermiques (arc électrique, laser, plasma d'arc, faisceau d'électrons) et des systèmes automatisés, des différents procédés ont gagné en fiabilité et en qualité de réalisation. Les ensembles mécano-soudés sont maintenant devenus irremplaçables dans de nombreuses applications.


En fabrication mécanique et dans les différents domaines industriels comme le cas des assemblages aéronautiques, le rivetage et le boulonnage représentent les principaux systèmes d'assemblages. Lors de leur utilisation, ces procédés présentent des discontinuités physiques ou chimiques, et alors le procédé de soudage devient une technique d'assemblage concurrente.

Ce changement de procédé constitue un enjeu financier important car en entraînant la réduction considérable de masse (figure I.1), donc de consommation de carburant, il diminue le coût d'exploitation.



**Figure I.1** — Schéma simplifié du gain de masse rivet et soudure

Avec :

 = Masse supplémentaire

Le système vis/écrou utilisé pour les fixations des structures d'avions par exemple dont les contraintes sont en cisaillement.

## **I.2.1 LES DIFFÉRENTS TYPES DE SOUDAGE**

Une solution constructive d'assemblage a pour fonction de lier des pièces les unes aux autres, en utilisant différents moyens d'assemblage :

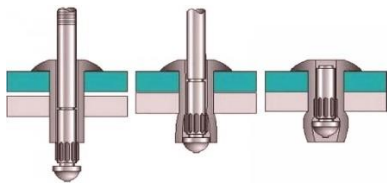
- Par organes filetés,
- Par collage,
- Par soudage,
- Etc...

En fabrication mécanique et dans le domaine des assemblages, les fixations doivent remplir certaines fonctions principales comme :

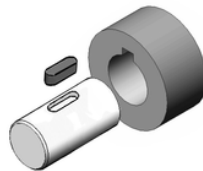
- Transmettre des sollicitations mécaniques,
- Maintenir l'intégrité de l'assemblage vis-à-vis de la corrosion,
- Assurer l'étanchéité en zone de réservoir,
- Rendre la maintenance aussi aisée que possible.

Chaque moyen d'assemblage peut être défini par cinq critères :

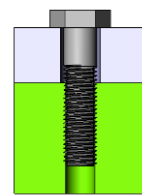
- Assemblage complet ou partiel,
- Assemblage démontable ou non démontable (permanant),
- Assemblage élastique (ressort, caoutchouc) ou rigide,
- Assemblage par obstacle (un élément fait obstacle au mouvement entre deux pièces) ou par adhérence  
(L'assemblage est obtenu par le phénomène d'adhérence du au frottement entre les pièces),
- Assemblage direct ou in direct.



Rivets [1]



clavette [2]



assemblage filtré

**Figure I.2** — Quelques types d'assemblage

## I.2.2 DESCRIPTION DU PROCEDE DE SOUDAGE

Le soudage est une opération qui assemble deux éléments métalliques, par fusion et re-solidification. Il permet d'assurer la continuité mécanique entre les parties à assembler avec ou sans l'aide d'un produit d'apport réalisant 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 à celle des matériaux à assembler et une température de fusion du même ordre de grandeur que ces matériaux.

Les avantages de ces assemblages sont :

- ✓ Une excellente rigidité de liaison obtenue par des joints peu encombrants et économiques.
- ✓ Une étanchéité parfaite et permanente.

Ce diagram nous montre les différents type de soudage :

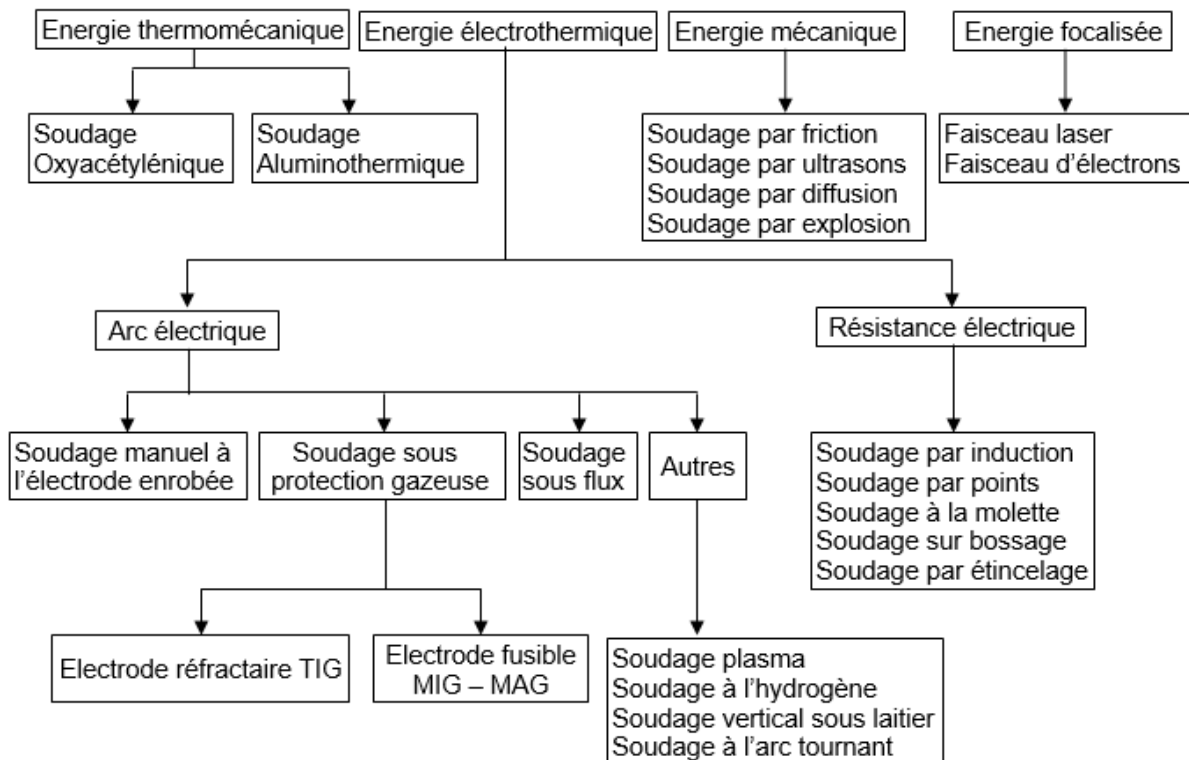


Figure I.3 — Diagram des différents type de soudage

Le soudage permet d'assembler de façon permanente deux ou plusieurs éléments, tout en assurant entre eux la continuité de la matière.

On distingue le soudage autogène et le brasage ou soudo-brasage :

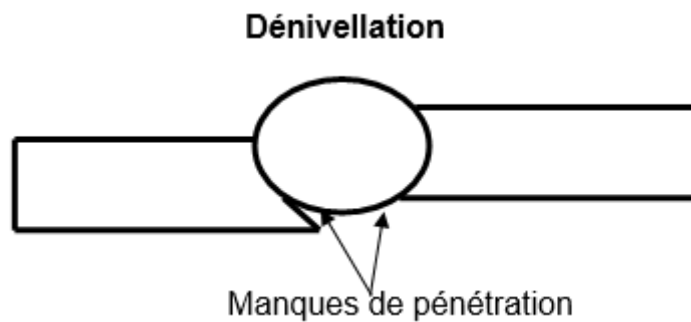
- ❖ **Soudage autogène** : les pièces à assembler, de même nature ou de composition voisine, participent à la constitution du joint ou de cordon de soudure. L'assemblage est dit homogène, c'est à dire « fait du même métal ».
  
- ❖ **Brasage et soudo-brasage** : l'assemblage est hétérogène ; la formation du joint ou cordon est assurée par la seule intervention du métal d'apport qui agit comme une colle. Après la préparation des éléments à assembler et l'utilisation du soudage, on obtient après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base (soudage autogène) ou un joint hétérogène dans le cas des métaux différents (brasage ou soudo-brasage).

### I.2.3 PRINCIPAUX DEFAUTS DE SOUDAGE

En utilisant le procédé de soudage, on peut rencontrer plusieurs défauts.

Ces défauts peuvent être classés en deux catégories. La première d'origine purement opératoire regroupe :

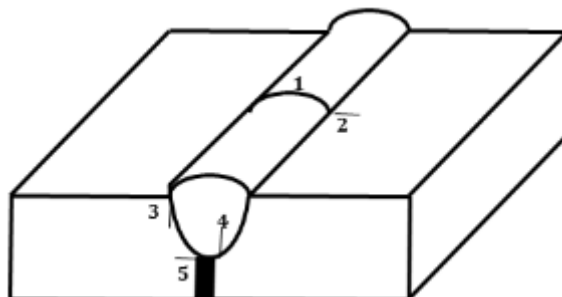
- Les caniveaux (internes ou externes),
- Le manque et l'excès de pénétration,
- Le manque de fusion (collage),
- Le défaut d'alignement,
- La déformation angulaire,
- etc....,



**Figure I.4** — Exemple de manques de pénétration

La seconde regroupe les défauts internes :

- Les différentes fissures (à chaud, à froid, au réchauffage),
- Les porosités.



**Figure I.5** — Exemple de fissure à froid

Avec :

1 = Fissures transversales dans la zone fondue

2 = Fissures transversales dans la zone affectée thermiquement

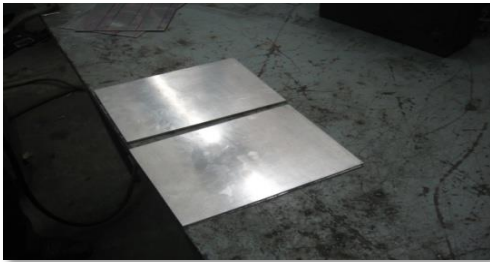
3 = Fissures dans la zone de liaison

4 = Fissures dans la zone fondue

5 = Fissures à la racine

Exemple pratique de soudage :

- Soudage TIG des alliages d'aluminium 7075 T6



Avant soudage



Après soudage

**Figure I.6** — Deux plaques d'aluminium avant et après le soudage

En utilisant le procédé de soudage, on peut rencontrer plusieurs défauts. La norme NF EN 26520, correspondant à la classification des défauts dans les soudures par fusion des métaux, permet d'énumérer et de classer les défauts en fonction de leur géométrie, de leur position dans la soudure et de leur origine.

Ces défauts peuvent être classés en deux catégories.



La première d'origine purement opératoire regroupe : Les caniveaux (internes ou externes), le manque et l'excès de pénétration, le manque de fusion (collage), le défaut d'alignement, la déformation angulaire, etc...

❑ **Contrôle avant le soudage :**

- Le matériel de soudage,
- La préparation des pièces à souder,
- Le mode opératoire de soudage.

❑ **Contrôle pendant le soudage :**

- Le réglage du matériel de soudage,
- Les séquences et cycles de soudage,
- L'état du joint à réaliser,
- Les déformations.

❑ **Contrôle après le soudage :**

- Le **contrôle destructif**: Essai de dureté, essai de traction, essai de résilience,
- Le **contrôle non destructif**: Contrôle visuel (manque d'épaisseur, manque de pénétration,...).



**Figure I.7** — Apparition de fissures (visuel / Microscope)

## **CHAPITRE II**

### **LE SOUDAGE FRICTION MALAXAGE (FSW)**

## II.1 INTRODUCTION

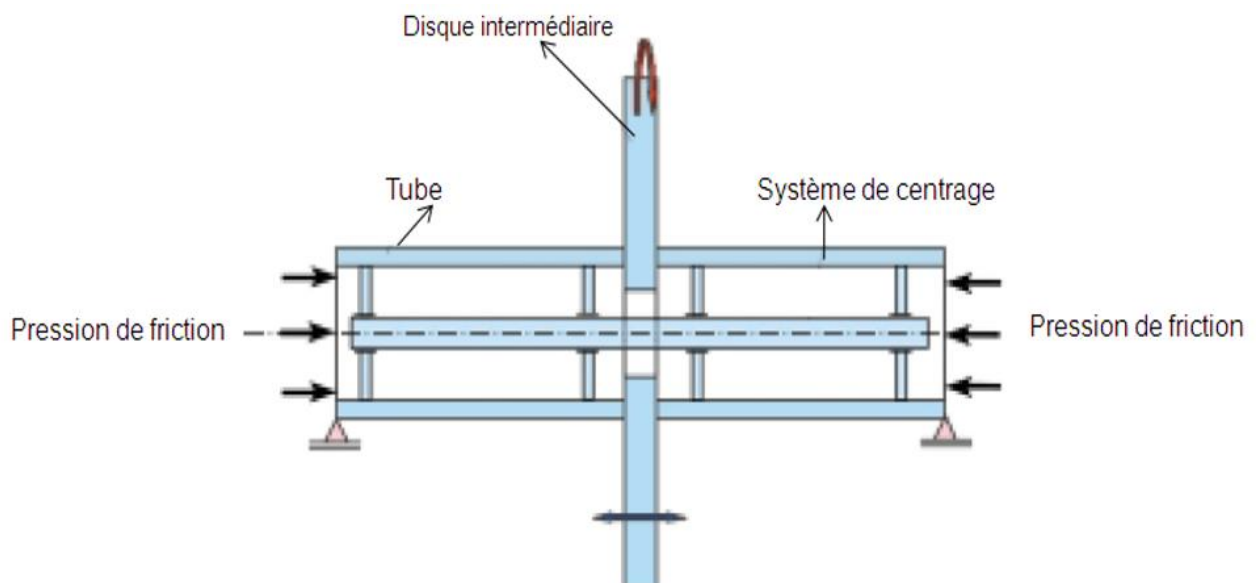
Depuis sa création au début des années 1990, le soudage par frottement-malaxage est devenu attrayant pour plusieurs entreprises. En conséquence, il a été abondamment étudié dans plusieurs départements de sciences appliquées et d'ingénierie dans les universités du monde entier. Dans les années 1990, le cœur des travaux a porté sur la faisabilité du soudage à l'aide de ce procédé et l'exploration des possibilités de ce dernier : soudage de différentes configurations de joint, soudage de deux alliages différents, soudage de composites à matrice Métallique, utilisation de différentes formes d'outils, etc. Ces travaux ont permis de connaître suffisamment le procédé pour qu'il soit utilisé industriellement, surtout pour le soudage des alliages d'aluminium dans les industries navales et ferroviaires.

Ces recherches initiales ont permis de mettre en lumière un aspect fondamental dont il faut tenir compte dans l'étude du FSW. En effet, les corrélations entre paramètres de soudage et propriétés du joint sont difficilement généralisables, puisque cette corrélation passe par un troisième élément, la microstructure résultante du joint. Or, la réponse microstructurale d'un matériau soumis au FSW peut varier considérablement d'un alliage à l'autre, et ce même pour des alliages d'une même famille. De nombreux travaux ont ainsi été réalisés afin d'établir les liens entre les paramètres de soudage et les propriétés du joint. Cette approche permet d'optimiser une configuration géométrie-matériau donnée, mais a peu d'impact sur l'avancement de la connaissance fondamentale de ce procédé. Depuis quelques années toutefois, les phénomènes physiques entrant en jeu lors du FSW sont davantage étudiés. La microstructure des joints est souvent caractérisée et la modélisation numérique est utilisée pour réaliser des calculs qui permettent de mieux comprendre le procédé FSW.

## II.2 LE SOUDAGE PAR FRICTION

Le soudage par friction utilise la déformation relative des deux pièces à souder pour produire des interfaces non-contaminées. En même temps, l'énergie dissipée par frottement chauffe les interfaces pour faciliter leurs cisaillements. Pour des géométries cylindriques, le mouvement est en général fait par une rotation ce qui permet de garder pendant tout le cycle de soudage un alignement précis.

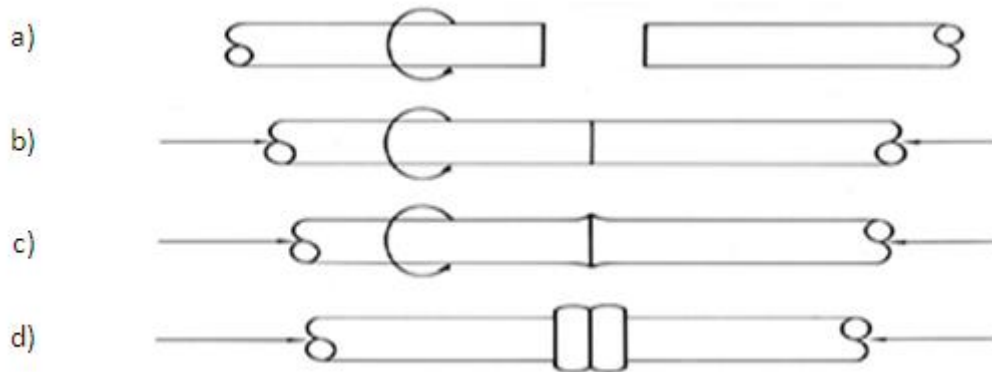
Les deux pièces sont pressées l'une contre l'autre de manière que le mouvement relatif produise de la chaleur par frottement. Ensuite, la rotation est arrêtée et la pression est augmentée. Cela produit un joint forgé par déformation coordonnée.



**Figure II.1** — Schéma de principe d'une variante du procédé de soudage par friction

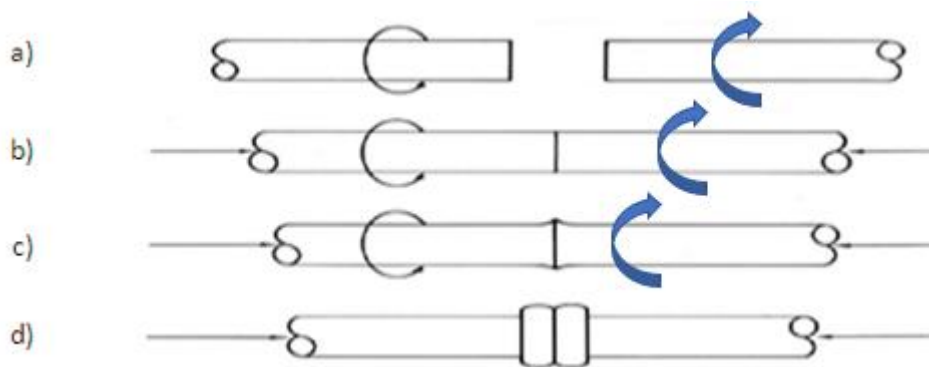
Il existe plusieurs façons pour réaliser ce mouvement relatif :

- Une partie tourne, l'autre est fixée,
- Les deux pièces tournent en sens opposé,
- Les deux pièces tournent avec la même vitesse et une troisième pièce placée au centre reste immobile (sorte de métal d'apport).



**Figure II.2** — Différentes phases du procédé de soudage par friction

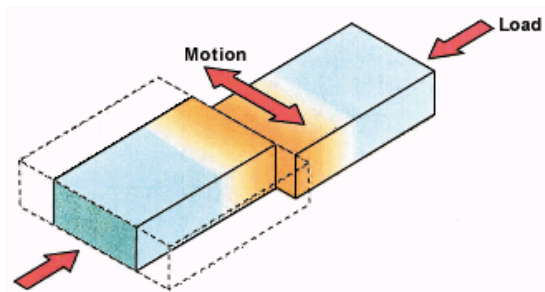
- a) phase d'accostage des pièces      b) phase de frottement  
 c) phase de pression élevée          d) phase de joint forgé



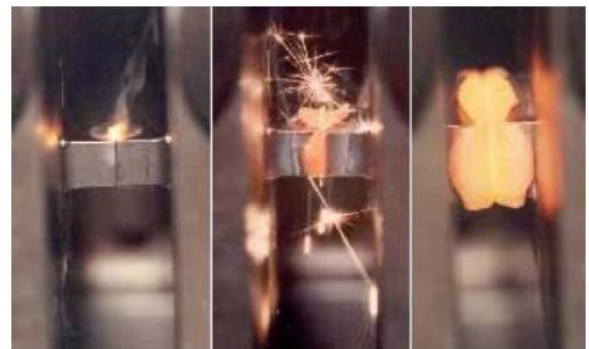
**Figure II.3** — Différentes phases du procédé de soudage par friction (les deux pièces tournent en sens opposé)

### II.3.1 EXPERIENCE 1

Pour le cas de friction avec cisaillement on peut voir l'expérience qui a été faite par le chercheur Philip Thread Gill ou 2 pièces en titanium vont être assembler lune a l'autre, ces deux figures vont expliquer le phénomène [3] :



**Figure II.4** — Friction par cisaillement



**Figure II.5** — Photo réelle durant le soudage-friction par cisaillement du titanium a l'atmosphère normale

### **Conclusion de cette expérience :**

Le soudage par friction linéaire a des avantages importants :

- ✓ Un procédé à l'état solide (sans arcs) qui donne des soudures reproductibles et de haute qualité.
- ✓ Pas de fumée ni d'éclaboussures.
- ✓ Aucun fil d'apport ou gaz de protection requis.
- ✓ Moins de perte de matière.

### **II.3.2 EXPERIENCE 2**

Une autre expérience qui a été faite à l'institut de soudage a Belgian par le membre Koen Faes[4].

#### **Description :**

Le principe du soudage par friction est présenté à la figure II.6 et suivantes. Supposons que deux axes ou deux tubes doivent être soudés bout à bout.

Une des pièces est bloquée, tandis que l'autre est mise en rotation contre l'autre à une vitesse constante à l'aide d'un moteur (soudage par friction en continu).

Quand les deux pièces sont mises en contact l'une de l'autre, les forces de friction provoquent un couple de résistance.

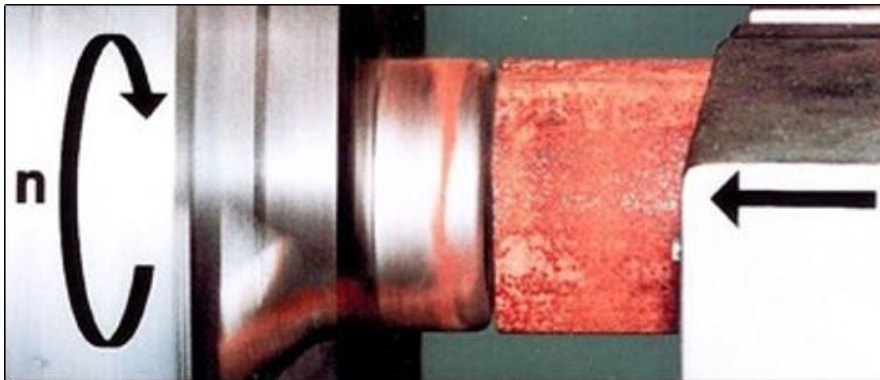
L'énergie qui en résulte, est transformée en chaleur dans la surface de contact.

La chaleur générée augmente la température en un court laps de temps jusqu'à la température de soudage (Température de forgeage).

La pièce en rotation est ensuite détachée du mandrin, freinée jusqu'à l'arrêt total.

Une force de forgeage axiale est exercée afin de réaliser une soudure entre les deux pièces.

Durant la phase d'échauffement et la phase de soudage, une quantité de métal plastique est refoulée, sous l'action de la force de pression axiale de telle sorte que l'ébarbure caractéristique du soudage par friction se forme (voir figure II.8).

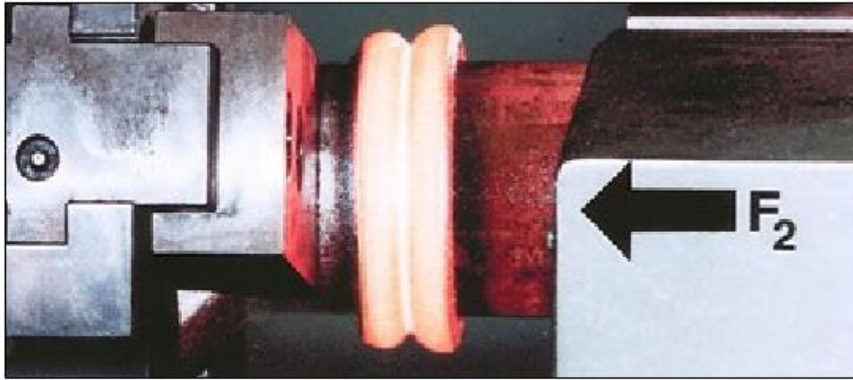


**Figure II.6** — Les deux pièces sont clamées et une des pièces est mise en rotation



**Figure II.7** — Les pièces sont mises en contact l'une de l'autre avec la force de friction  $F_1$  : la température augmente dans la surface de contact





**Figure II.8** — La partie en rotation est freinée et la force de forgeage  $F_2$  est exercée

#### Applications :

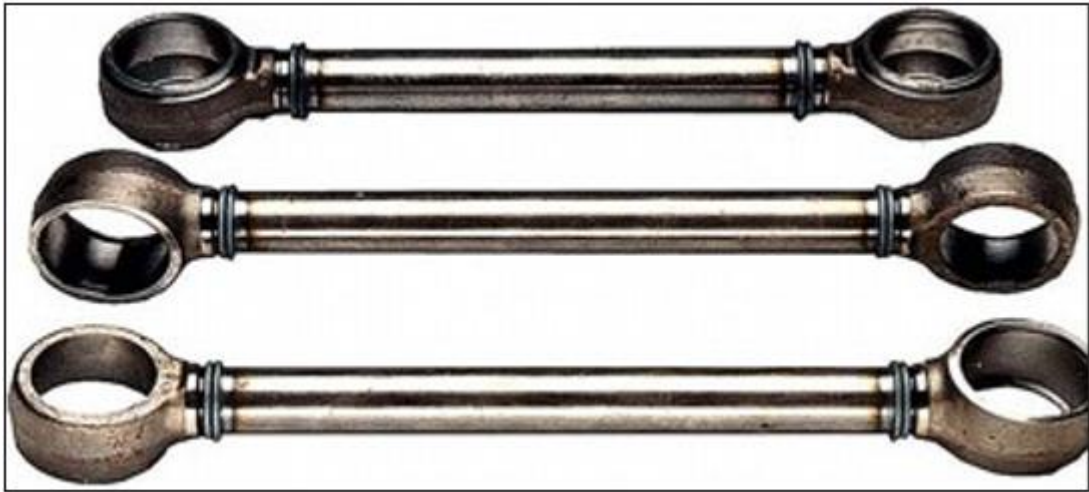
En raison de ses larges possibilités d'applications, il n'est pas étonnant que le soudage par friction soit souvent utilisé dans des secteurs divergents. Les domaines d'application sont entre autres l'industrie aéronautique et la pétrochimie (soudage de brides ou de tubes de forage).

Le soudage par friction est fortement utilisé lors de la production de pièces pour camions.

Une nette économie peut être réalisée en remplaçant des pièces complètement forgées par de plus petites pièces forgées soudées à des produits standard comme des barres ou des tubes.

Le soudage par friction est également utilisé pour la production de pièces dans l'industrie automobile comme des stabilisateurs, des engrenages (figure II.8), des soupapes, des arbres de transmission, ... Le grand avantage de cette technique de soudage réside dans le fait que certaines combinaisons de matériaux peuvent être soudées, alors qu'elles ne le sont pas avec des techniques de soudage traditionnelles.

Exemples : assemblage aluminium-acier (figure II.12) ou titane-cuivre. Cette possibilité permet de faire des économies en ayant une conception judicieuse de telles pièces. Un exemple est la conception d'une soupape de moteur à combustion. La tête en matériau réfractaire est soudée à la tige en matériau résistant à l'usure.

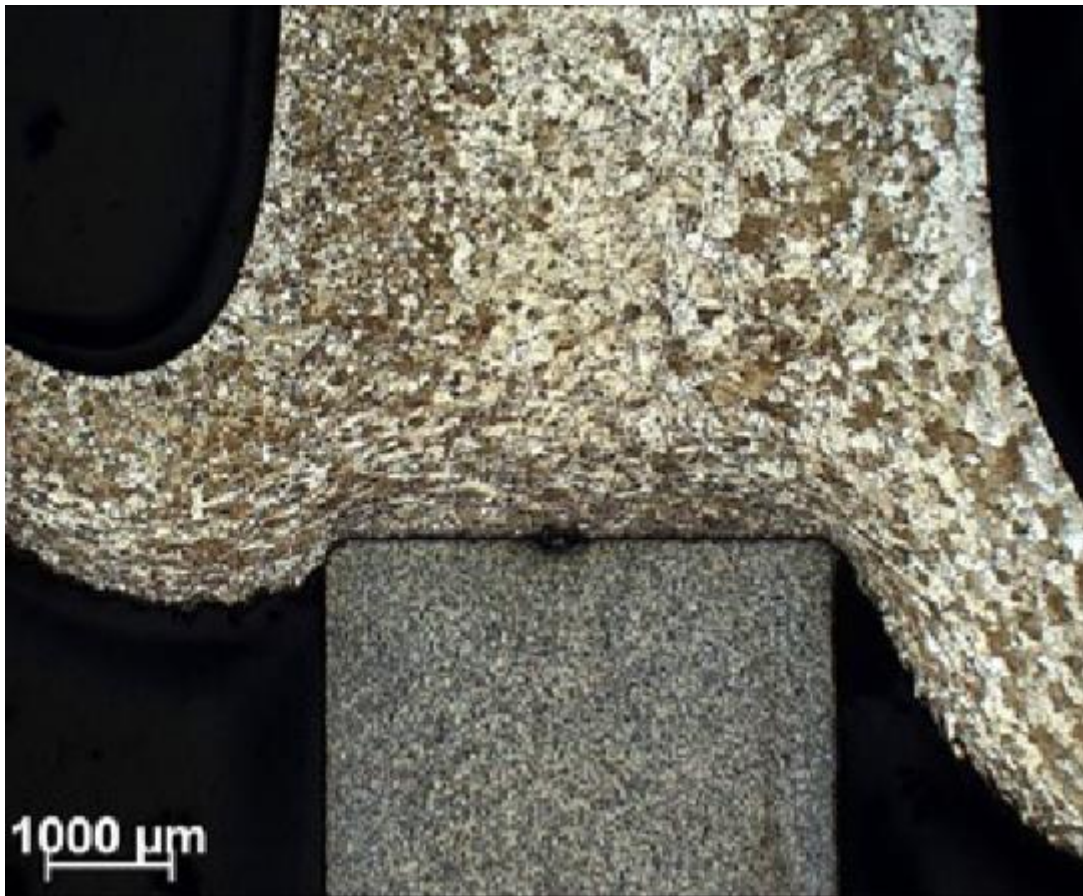


**Figure II.9** — Arbres de transmission soudés par friction



**Figure II.10** — Engrenage soudé par friction

**Figure II.11** — Soudage de tiges de piston



**Figure II.12** — Assemblage aluminium-acier

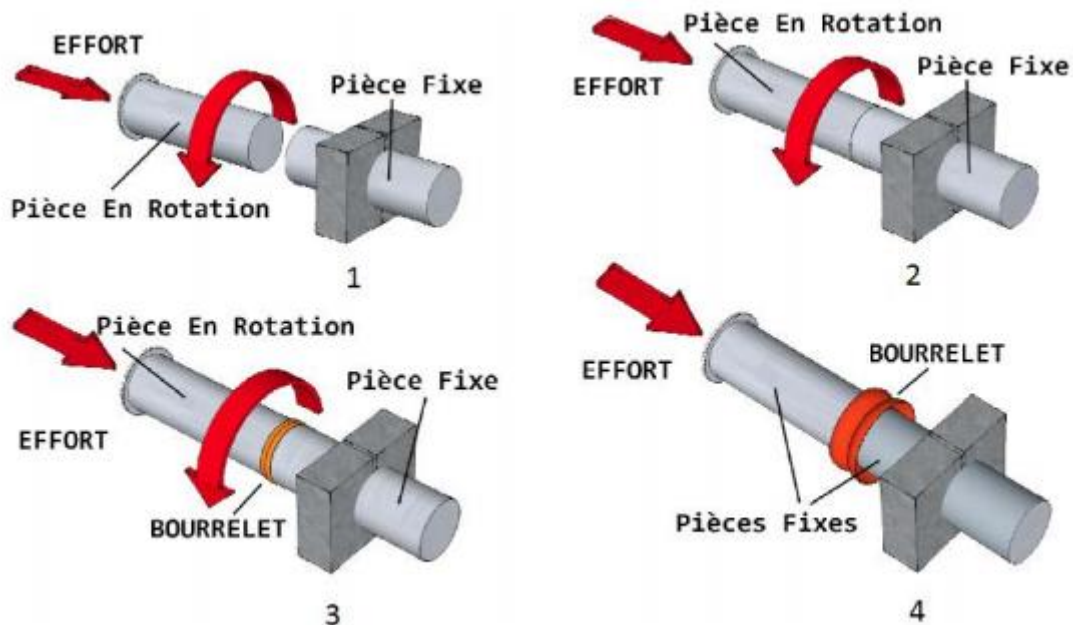


Figure II.13 — Le principe utilisé dans l'expérience

#### II.4.1 LE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE

Les procédés d'assemblages permanents entrent dans la fabrication de 80% des produits manufacturés. Le soudage représente une grande majorité de ces procédés.

Il permet l'obtention d'une liaison complète entre deux pièces. Les procédés de soudage les plus répandus utilisent l'arc électrique comme source de chaleur.

Les matériaux sont localement mis en fusion par cette chaleur et après refroidissement la liaison entre les pièces à assembler est complète.

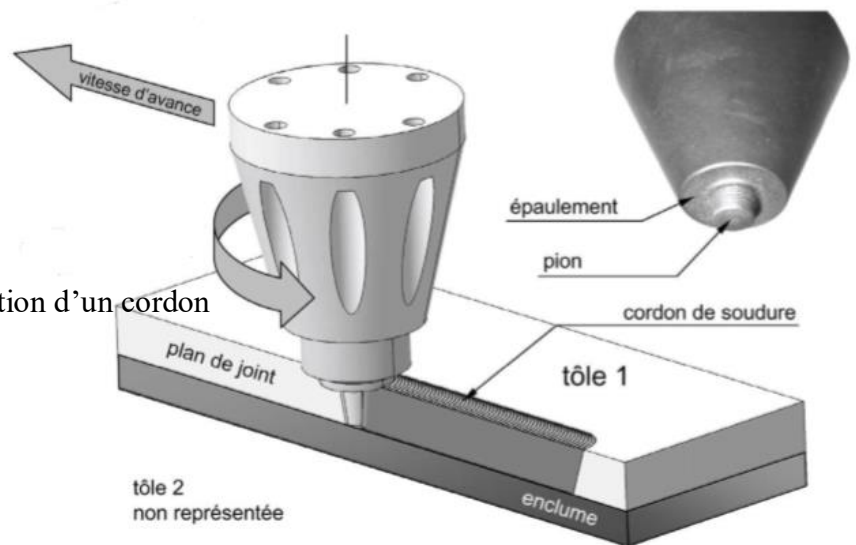
Dans ce cas, les matériaux doivent être compatibles pour que la solidification produise un cordon résistant. Une solution alternative est le soudage par friction-malaxage, le Friction Stir Welding (FSW), qui met en œuvre la dissipation énergétique par frottement comme source de

chaleur. Ce procédé a l'avantage de pouvoir assembler des matériaux qui ne sont pas compatibles pour réaliser un assemblage par fusion : aluminium / acier, acier / titane par exemple.

Développé depuis 1991, le soudage par friction malaxage a de nombreuses applications dans le secteur aéronautique. Citons par exemple, l'avion Eclipse pour lequel les assemblages par rivetage ont été remplacés à hauteur de 70 % par des joints soudés diminuant ainsi le coût de fabrication. Il offre alors au concepteur de nouvelles possibilités pour des produits innovants.

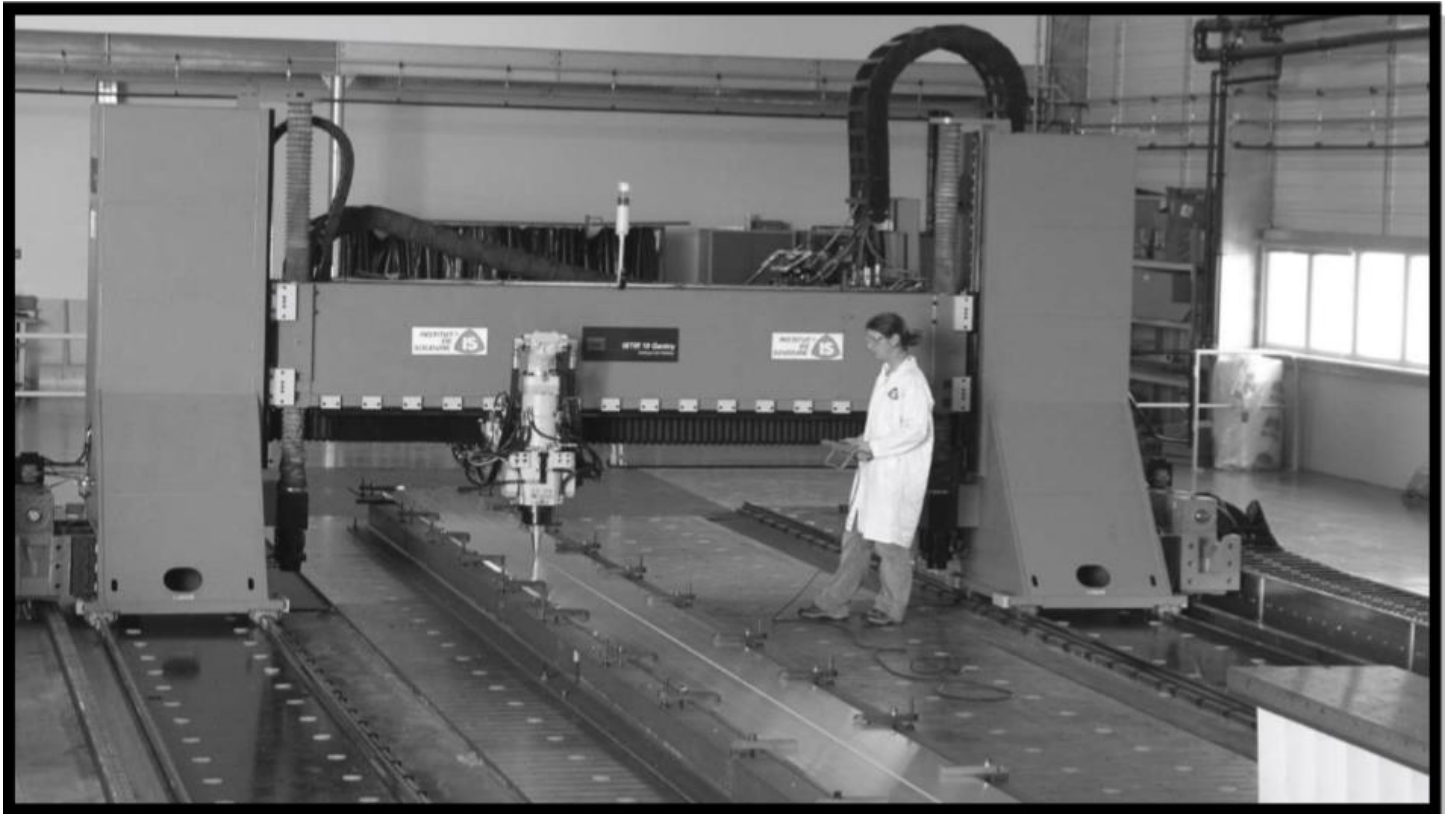
Le frottement généré par la rotation d'un outil sur les pièces à souder dégage de la chaleur.

Les matériaux à souder deviennent alors semi-solides (point d'équilibre entre le solidus et le liquidus), mais n'entrent pas dans le domaine liquide, avantage de cette technologie. L'outil possède un épaulement pour augmenter la surface de frottement (voir figure II.14). Le déplacement du pion dans les matériaux à l'état semi-solide crée alors un cordon de soudure



**Figure II.14** — Principe de réalisation d'un cordon

de soudure par FSW



**Figure II.15** — Machine de soudage FSW

La machine de soudage « FSW » génère la rotation de l'outil et son déplacement.

Le sujet propose l'étude d'une machine de soudage « FSW » implantée dans un centre de recherche et de transfert de technologies.

Cette installation assure la réalisation d'essais de soudage, de pièces « tests » pour l'aéronautique, mais aussi la production de pièces pour l'industrie.

Une machine de soudage « FSW » est composée essentiellement :

- D'un portique qui assure les mobilités en translation de la tête par rapport au bâti,
- D'une tête de soudage qui assure les mobilités complémentaires nécessaires à l'outil de soudage.
- La mise en rotation de l'outil est assurée par cette tête.
- D'un outil, souvent composé d'un pion et d'un épaulement.  
Le frottement généré par le pion et l'épaulement permet le dégagement de chaleur. Sa mise en rotation permet un malaxage des deux matériaux et donc la création d'une zone soudée.

- D'une plateforme de soudage sur laquelle sont mises en position les pièces à assembler grâce à un montage.

Contrairement aux autres procédés de soudage, le montage de soudage doit assurer non seulement la mise en position de chacune des pièces avant assemblage mais doit également compenser l'effort de pression verticale exercé par l'outil sur les tôles. [5]

## II.4.2 Outil de soudage

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.

L'outil utilisé pour les joints de recouvrement est différent de celui utilisé pour le soudage bout à bout afin qu'il puisse malaxer les deux matériaux.

La figure II.16 représente un outil de soudage.



**Figure II.16** — Outil du soudage FSW

A l'origine du procédé, l'outil comporte essentiellement un épaulement associé à un pion coaxial l'un et l'autre de révolution. Il est apparu intéressant, sinon primordial, d'affecter le pion de reliefs sous forme de nervures circulaires ou hélicoïdales dans le but d'augmenter l'effet de malaxage du métal et, par la suite, de rendre plus facile la formation de la soudure.

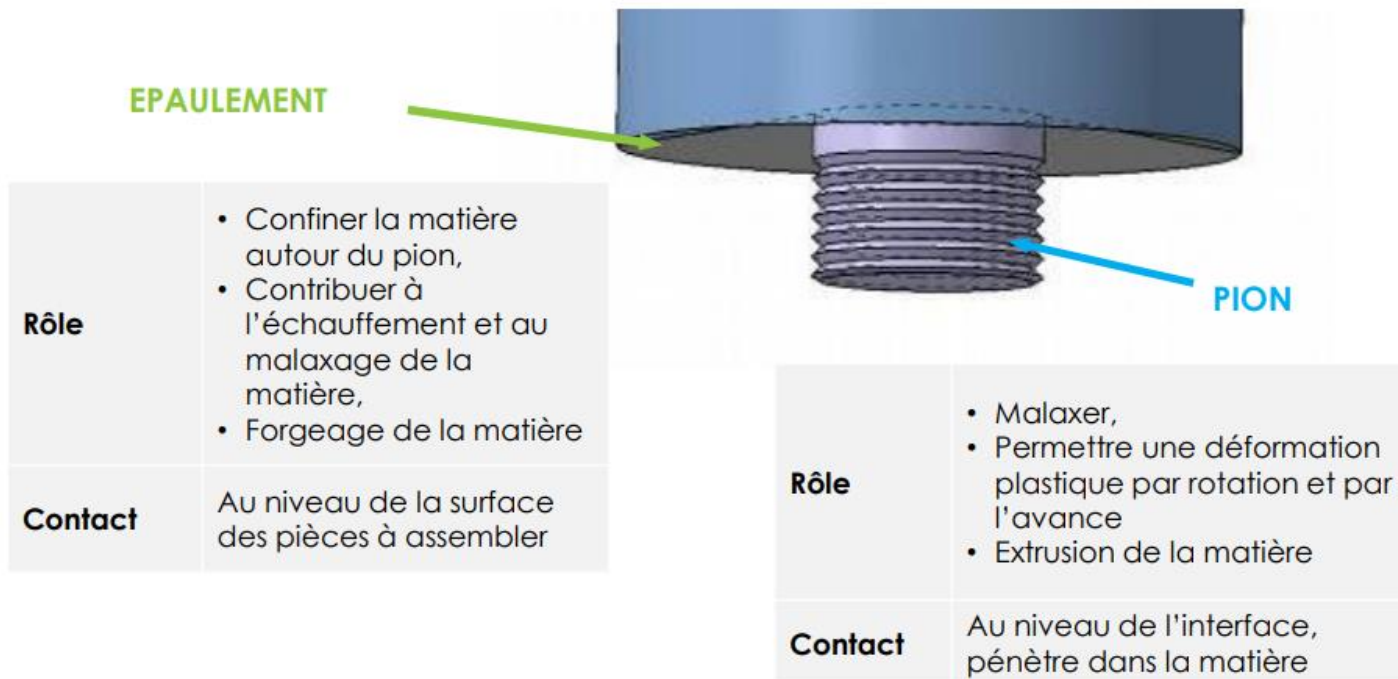
Les matériaux utilisés pour les outils sont principalement des aciers résistant à haute température et ayant un bon comportement à l'usure du fait que lors du fonctionnement, la température de l'outil peut s'élever de 300 à 400 ° C.

Les effets de l'outil sur la formation de la soudure combinent, la plupart du temps, celui de l'épaulement et celui du pion, indissociables dans le fonctionnement du système.



### II.4.2.1 LE PION ET L'EPAULEMENT

La figure suivante montre les différents rôles et contact des deux parties :

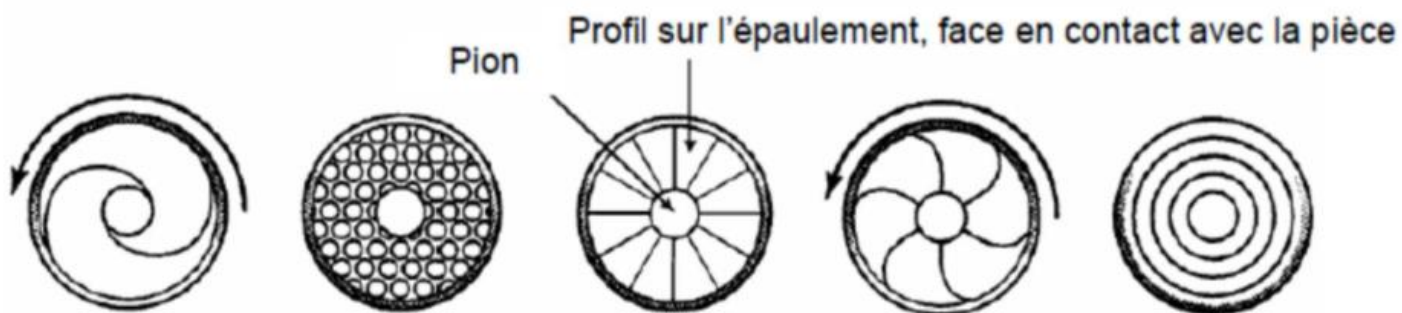


**Figure II.17** — Les rôles/contact du pion et l'épaulement [6]

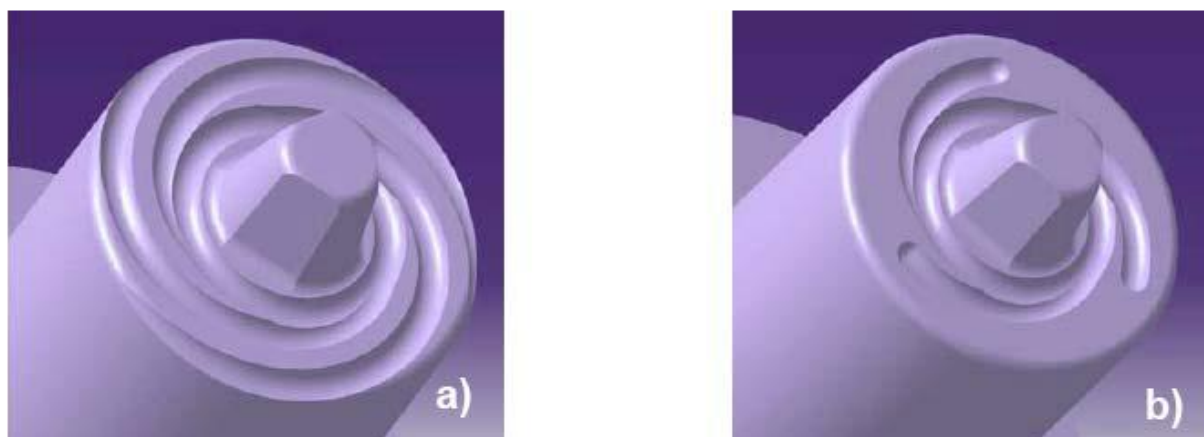
### II.4.2.2 L'EPAULEMENT

Le rôle de l'épaulement est de fournir une butée déterminant la pénétration du pion 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 du pion afin de couvrir totalement la zone affectée.

L'épaulement joue un autre rôle : il sert au confinement du matériau. En effet, le matériau mou cherche à sortir de la zone du joint soudé s'il n'est pas retenu. Le choix de la géométrie de l'épaulement dépend de la configuration du joint à souder. Il peut être plat, convexe ou concave.



**Figure II.18** — Formes d'épaulement [7]



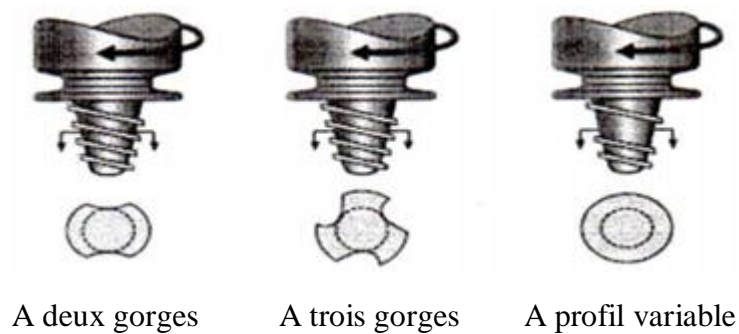
**Figure II.19** — Type d'épaulement a) Rainures complètes ; b) Rainures partielles

### II.4.2.3 PION

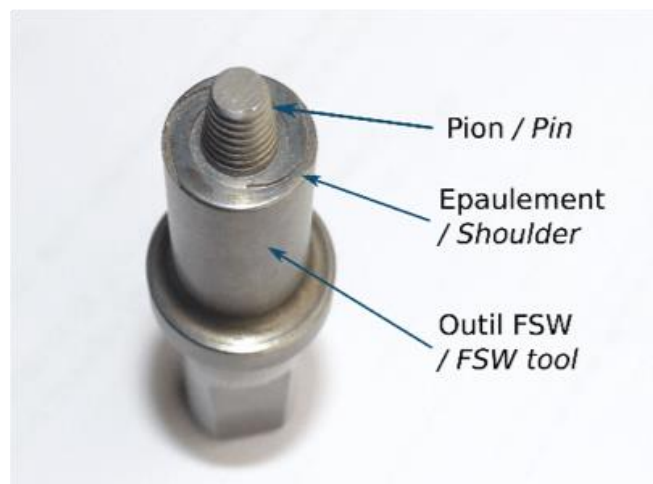
Le pion a des dimensions appropriées à la nature des matériaux et à l'épaisseur à souder. Sa longueur est adaptée à la pénétration et ne doit pas excéder l'épaisseur des tôles à souder. Ainsi, et d'après la figure II.7, le pion peut prendre diverses formes simples ou sophistiquées.

Il est généralement tronconique et (ou) prismatique, avec évidement ou collets hélicoïdaux subtilement répartis. Certains profils intéressants ont fait l'objet de marques déposées.

Et sont deux types **pion fixe** et **pion réglable (ajustable)**.



**Figure II.20** — Types classiques d'outils



**Figure II.21** — Pion fixe

### II.4.2.3.2 PION AJUSTABLE

Outil dont la longueur du pion, la vitesse de rotation et le sens de rotation du pion sont réglables, et qui peuvent être différentes de ceux de l'épaulement pendant le soudage

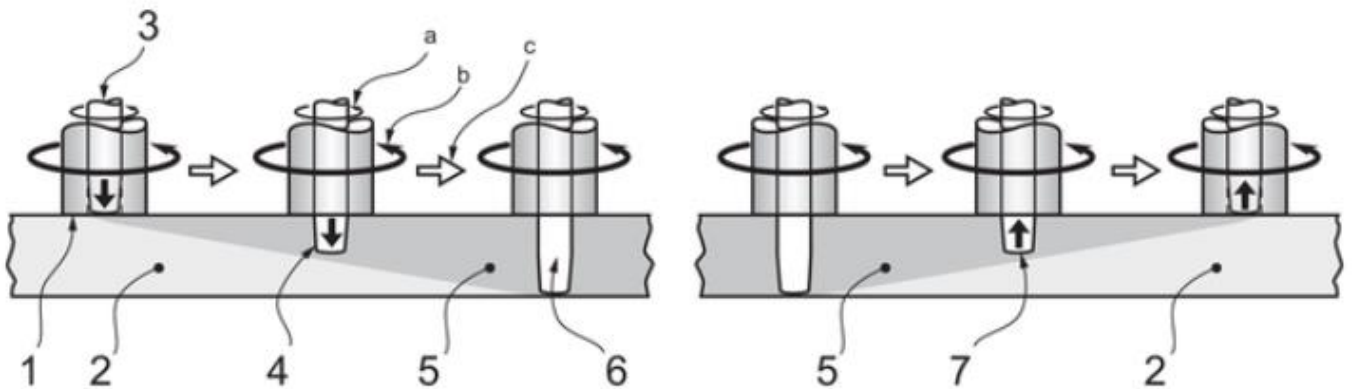


Figure II.22 — Pion ajustable

Avec :

- 1 Epaulement.
- 2 Pièce à Souder.
- 3 Pion.
- 4 Pion se déplaçant vers le bas.
- 5 Pièce a souder.
- 6 Pion en position requise de soudage.
- 7 Pion se déplaçant vers le haut.

<sup>a</sup> : Sens de rotation du pion.

<sup>b</sup> : Sens de rotation de l'épaulement.

<sup>c</sup> : Sens du soudage. [8]

### **II.4.3.1 PARAMETRES DU PROCEDE**

De nombreux paramètres ont un rôle non négligeable sur la qualité d'un assemblage comme :

- La vitesse d'avance de l'outil,
- La vitesse de rotation.
- L'effort axial  $F_z$  appliqué sur l'outil suivant son axe de rotation, afin de compenser la pression formée dans la zone de soudure,
- La profondeur de plongée de l'outil,
- Les dimensions de l'outil : diamètres de l'épaulement et du pion et la longueur du pion,
- L'angle d'inclinaison de l'outil dénommé angle de déplacement,
- La localisation de la plongée de l'outil (ce paramètre donne l'endroit où est introduit l'outil dans les plaques en fonction des bords des plaques),
- La durée de stabilisation de l'outil (temps s'écoulant entre la fin de la phase de plongée de l'outil et le début de la phase d'avancement).

Ces paramètres sont à régler selon : les matériaux, l'épaisseur soudée et la géométrie de l'outil. L'ensemble conditionne l'apport d'énergie, le flux de matière, la formation du cordon, les propriétés mécaniques de l'assemblage et les efforts générés.

De ces paramètres, les plus influents sont : l'outil de soudage, le couple vitesse de rotation et d'avance.

### **II.4.3.2 VITESSE DE ROTATION ET VITESSE D'AVANCE**

Les vitesses de rotation et vitesses d'avances de l'outil varient en fonction de la nature de l'alliage à assembler et les dimensions des pièces. Ces paramètres devront donc être adaptés afin que le réchauffement et le brassage de la matière soient optimaux tout en assurant une bonne cadence de soudage. La vitesse de rotation est généralement exprimée en tour par minute et la vitesse d'avance en mm par seconde. Le choix de la valeur de ces deux vitesses est lié.

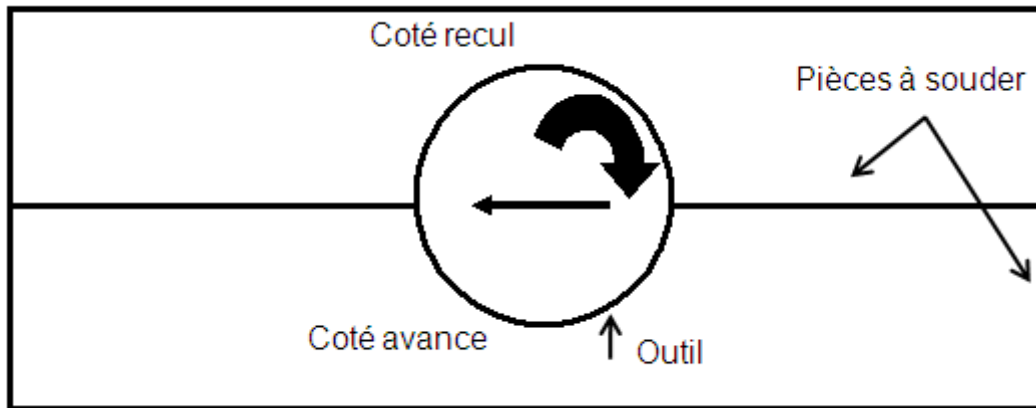
### **II.4.4.1 PRINCIPE GENERAL DU SOUDAGE FRICTION MALAXAGE**

Contrairement au procédé de soudage par friction classique, les pièces à assembler n'ont pas de mouvement relatif l'une par rapport à l'autre. Ceci lui offre un plus large choix de configurations de joints soudables.

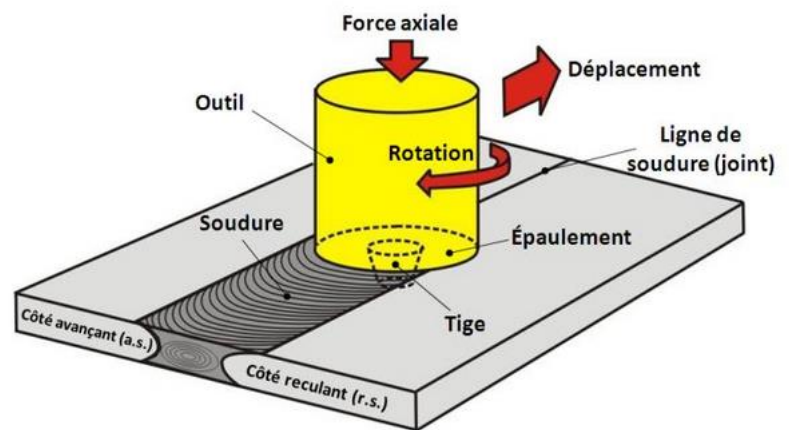
Ce procédé, innovant, permet de souder à l'état solide, c'est-à-dire sans atteindre la température de fusion. Ceci lui permet, en théorie, de souder tous les métaux, même ceux réputés difficilement soudables par fusion à cause de problèmes de fissurations à chaud, de soufflures, ou d'abatement trop important des propriétés mécaniques.

Ses caractéristiques offrent à ce procédé de réels potentiels de développements industriels, surtout pour les métaux malléables à chauds et à bas point de fusion tels que l'aluminium ou le cuivre.

Le principe de soudage est simple : les deux tôles à souder sont mises en contact et solidement bridées. L'outil en rotation (400 à plusieurs tr/min) pénètre la matière puis se déplace le long du joint à souder (jusqu' à 1000mm/min).



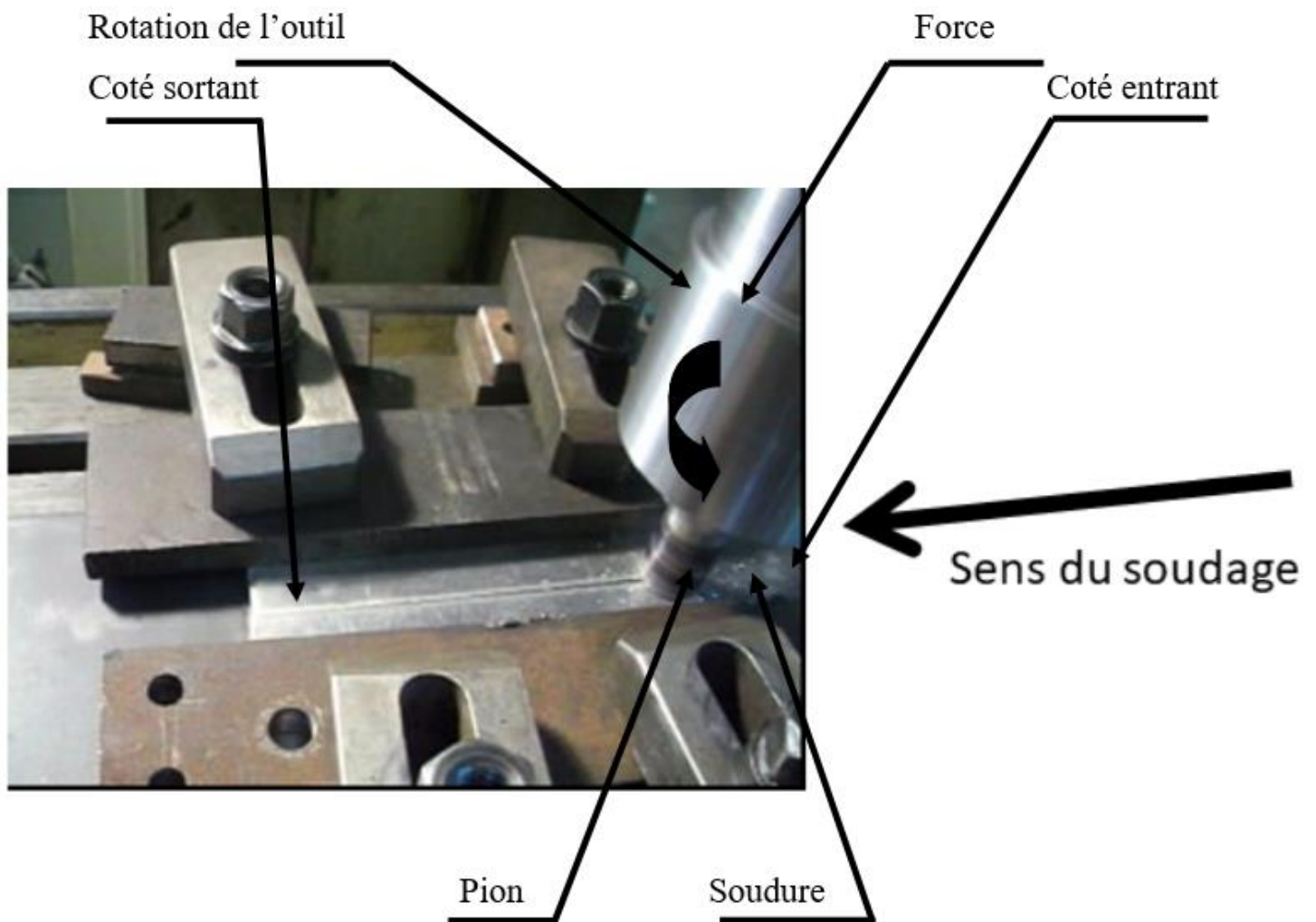
**Figure II.23** — Schématisation du côté avance et recul lors du soudage FSW



**Figure II 24** — Le procédé de soudage FSW

[9]

Ce procédé est de réaliser une soudure de proche en proche en malaxant localement la matière des deux pièces à assembler. La liaison métallurgique est obtenue à chaud, mais en dessous de la température de fusion des matériaux.



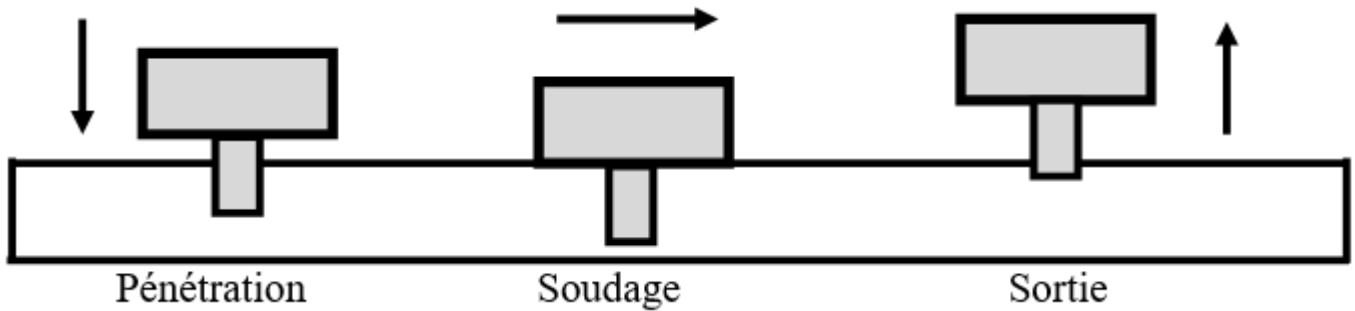
**Figure II.25** — Principe général du procédé de soudage par friction malaxage

Les alliages d'aluminium d'épaisseurs moyennes sont particulièrement bien soudés par le procédé FSW et de nombreux essais ont été conduits pour développer les conditions d'application de ce procédé à ces matériaux industriellement utilisés, là où, dans certains cas, les procédés par fusion rencontrent des limites technologiques et, en tout cas, impliquent des mesures de mise en œuvre plus contraignantes.

La simplicité de ce procédé de nature purement mécanique en fait l'un des principaux intérêts.



Le procédé de soudage par friction malaxage peut être décomposé en 4 étapes :



**Figure II.26** — Les étapes du procédé de FSW

### **1<sup>ère</sup> étape : Pénétration de l'outil**

L'outil composé d'un pion de géométrie plus ou moins complexe et d'un épaulement de diamètre de 2 à 2.5 fois supérieur au pion est mis en rotation rapide (100 tr/min). Sous un effort défini, le pion entre en contact avec la surface des tôles à assembler. La chaleur générée par le frottement pion-matière provoque un ramollissement local de la matière et permet la pénétration du pion jusqu'à ce que l'épaulement entre en contact avec la surface des pièces.

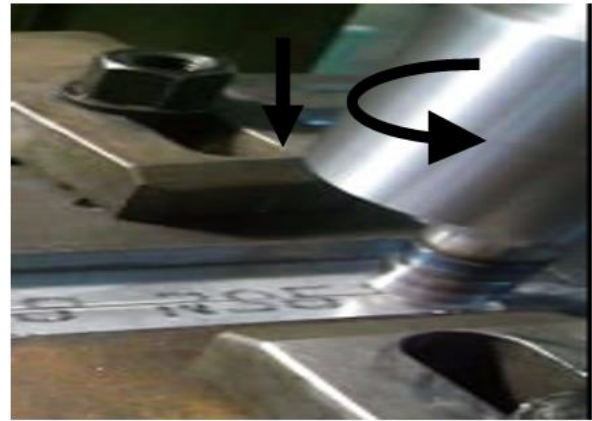
Cette phase de pénétration est représentée dans la figure suivante :

**Figure II.27** — Phase de Pénétration de l'outil

### **2<sup>ème</sup> étape : Temps de préchauffage**

Afin de générer l'apport de chaleur nécessaire pour obtenir un volume de matière à l'état pâteux suffisant au voisinage de l'outil, celui-ci est maintenu en rotation pendant un temps appelé Dwell-time ou temps de préchauffage (Dt). Cet intervalle de temps dépend des matériaux à assembler (il faut au moins atteindre des températures de forgeabilité des matériaux de base), des épaisseurs et des configurations d'assemblage. L'échauffement est provoqué par le frottement de l'outil sur les pièces.

Cette phase de temps de préchauffage est représentée dans la figure suivante :

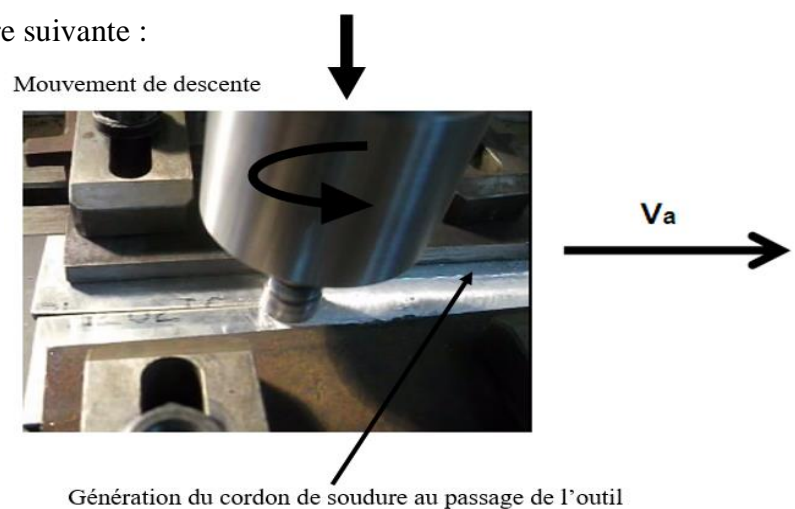


**Figure II.28** — Phase de Préchauffage

### 3<sup>ème</sup> étape : Soudage

Après préchauffage, l'outil en rotation se déplace le long du joint à une vitesse définie (jusqu'à 2 m/min). Par un mécanisme combiné d'extrusion par le pion et de forgeage par l'épaulement, le cordon est réalisé de proche en proche. Une nouvelle structure métallurgique commune aux deux matériaux est formée grâce à des phénomènes de restauration-recristallisation. La liaison métallique est ainsi assurée sans atteindre la température de fusion des matériaux de base, ce qui permet de s'affranchir de problèmes liés à la solidification qui apparaissent en utilisant les procédés de soudage classiques (porosités, soufflures, fissuration à chaud, ...).

Cette phase est représentée dans la figure suivante :



**Figure II.29** — Phase de soudage

#### 4<sup>ème</sup> étape : Rétraction de l'outil

Lorsque la longueur soudée est réalisée, l'outil en rotation est retiré de la matière et laissant une empreinte. Cette phase de retrait est représentée dans la figure suivante :

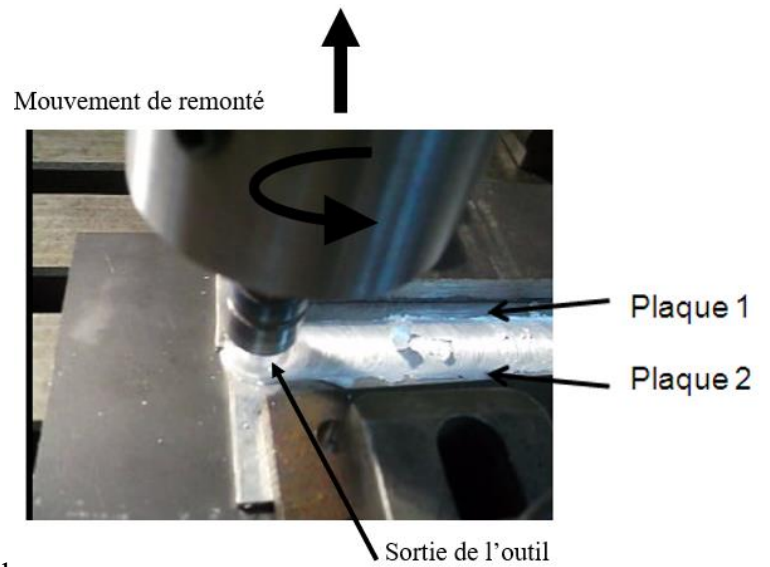


Figure II.30 — Phase de retrait de l'outil

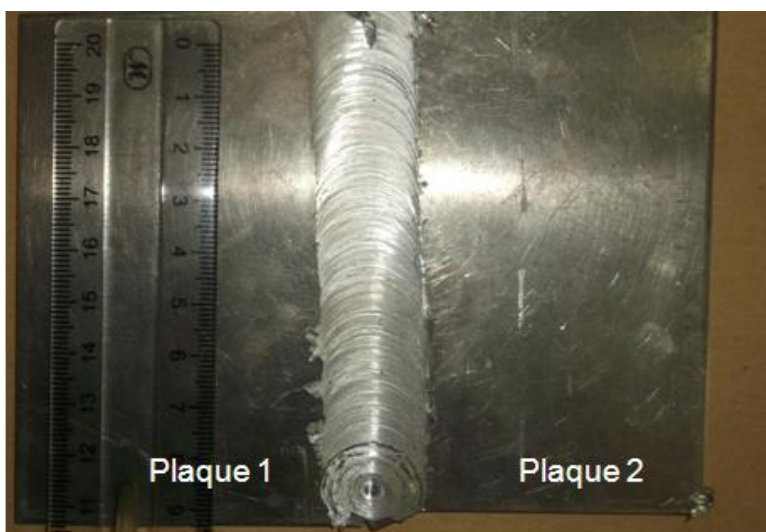
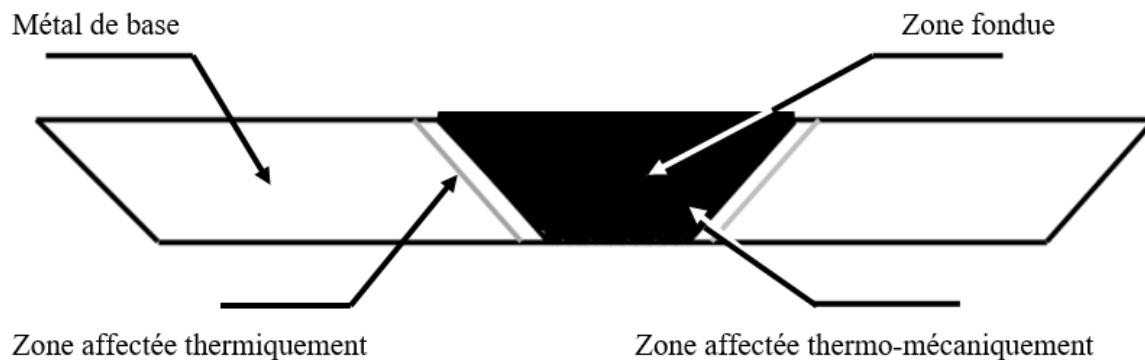


Figure II.31 — Cordon de soudure FSW d'un alliage d'aluminium 2024 T3

## II.4.4.2 CARACTERISATION METALURGIQUE DE LA ZONE SOUDEE PAR FSW

Les zones principales et une coupe transversale d'un cordon de soudure par FSW sont représentées dans la figure suivante :



**Figure II.32** — Zones principales d'un cordon de soudure par FSW

- **Métal de base (MB) :**

Ainsi, au loin du cordon, le métal de base (MB) ne subit ni déformation, ni d'échauffement suffisant pour modifier sa structure.

Il s'agit de la partie la plus éloignée du centre de la soudure. Dans cette zone, le matériau n'est pas déformé.

- **Zone affectée thermiquement (ZAT) :**

Dans cette zone plus proche du centre de la soudure, le métal a subi un cycle thermique, dont la température maximum dépasserait 250 °C, modifiant ainsi la microstructure ou les propriétés mécaniques. Cependant aucune déformation notable (observable à l'échelle de la microscopie optique notamment) n'a lieu dans cette région. La forme des grains est identique à celle rencontrée dans le métal de base.

- **Zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM) :**

Cette zone, se trouvant autour du noyau, est propre au FSW. Elle est à la fois déformée plastiquement et affectée thermiquement. La frontière entre la zone centrale de la soudure et la ZATM est généralement très marquée, souvent plus du côté « advancing side ». Une recristallisation partielle est également observée le long de cette frontière. L'évolution de la précipitation se traduit dans la ZATM par une dissolution partielle des précipités durcissant et par une précipitation hétérogène des précipités non durcissant. Dans le cas des alliages d'aluminium, les températures atteintes dans cette région s'échelonnent entre 300 °C et 400°C.

- **Zone fondue :**

La zone au centre de la soudure est habituellement appelée zone fondue. Elle correspond aux maximums de déformation et de température. Les mesures de température dans cette région sont délicates et sont estimées à partir de la microstructure finale du joint. Dans le cas des alliages d'aluminium, la température maximum serait comprise entre 425 °C et 500 °C. La forme du noyau est très variable et dépend étroitement de l'alliage et des paramètres du procédé.

- **Dureté en travers du joint :**

L'allure du profil de dureté à travers les soudures FSW dépend de la nature du durcissement du matériau, selon qu'il soit par écrouissage ou par précipitation.

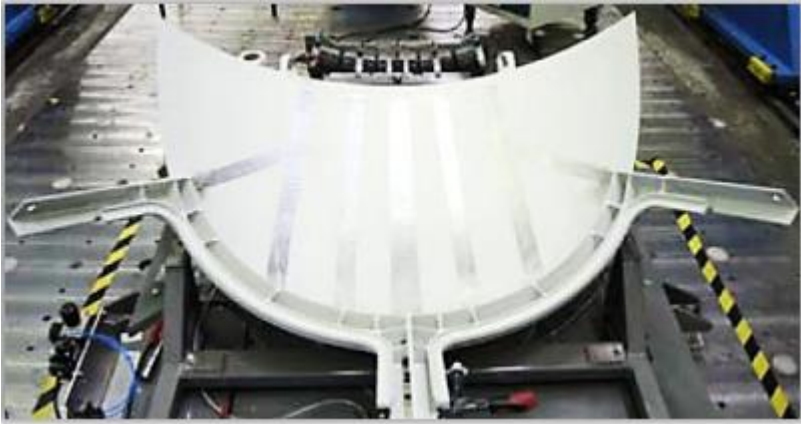
### II.4.4.3 DOMAINE D'UTILISATION

Il est principalement utilisé dans l'industrie de la construction et du transport, telle que l'industrie spatiale, aéronautique, ferroviaire, automobile, maritime comme par exemple :

- **Industrie Aéronautique** : soudage de tôles en remplacement du rivetage pour les ailes, le fuselage, soudage de réservoirs cryogéniques, réservoirs de kérosène, corps de missiles.



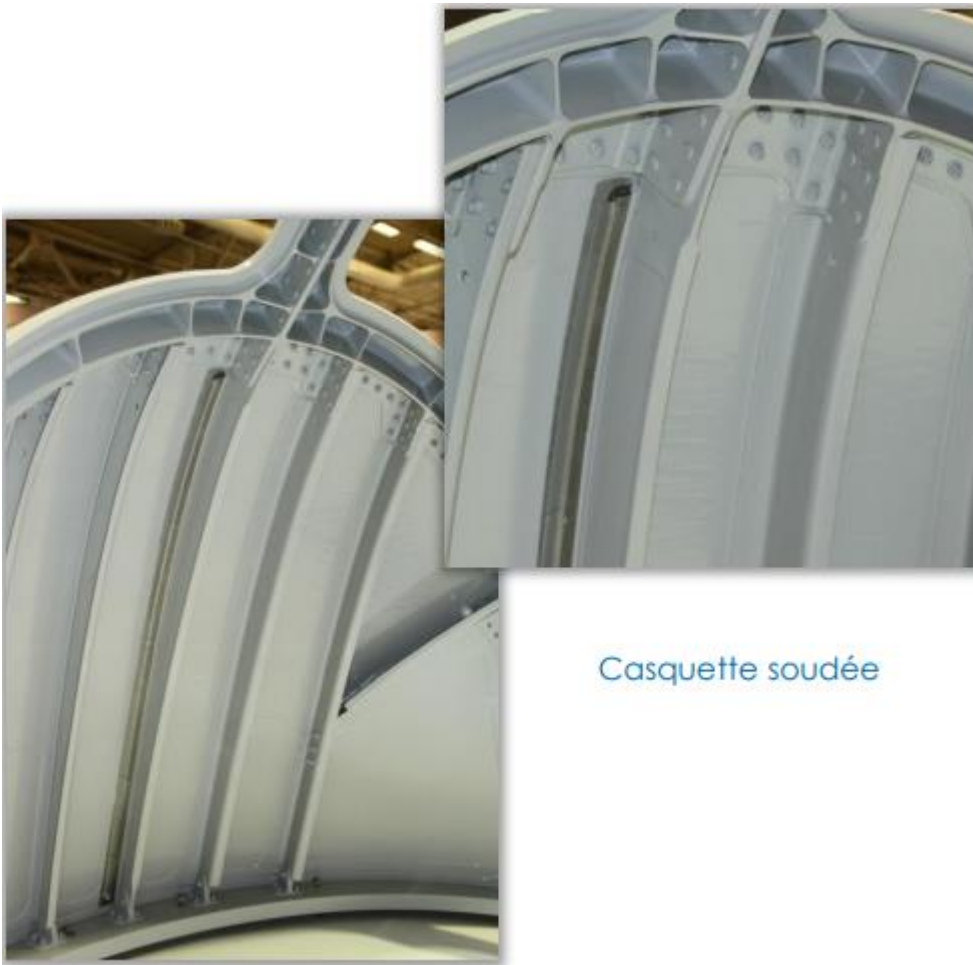
**Figure II.33** — Assemblage d'une casquette d'avion avec le procédé de FSW



**Figure II.34** — Montage de la casquette d'avion



**Figure II.35**  
— Soudage de la casquette (FSW)



Casquette soudée

**Figure II.36** —  
La casquette  
après le  
soudage (pièces  
soudées)

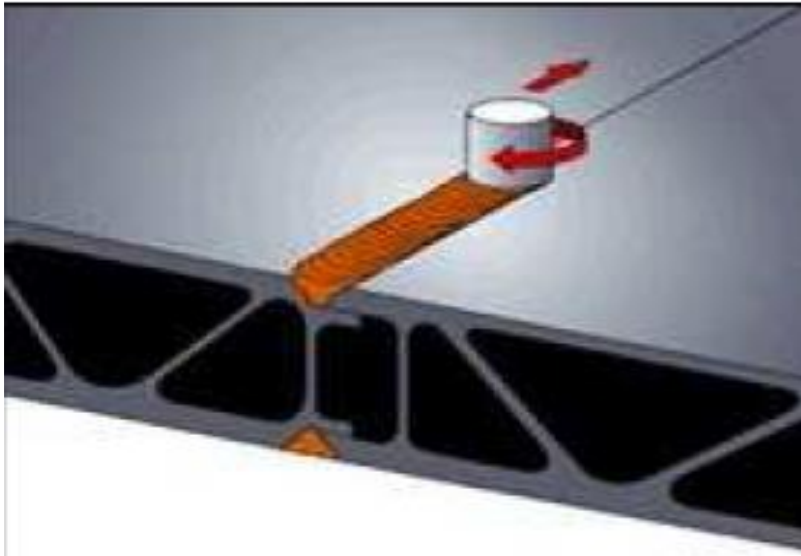
- **Construction navale** : pont, plate-forme d'atterrissage d'hélicoptères, coque de bateau.



**Figure II.37** — FSW dans le domaine  
naval

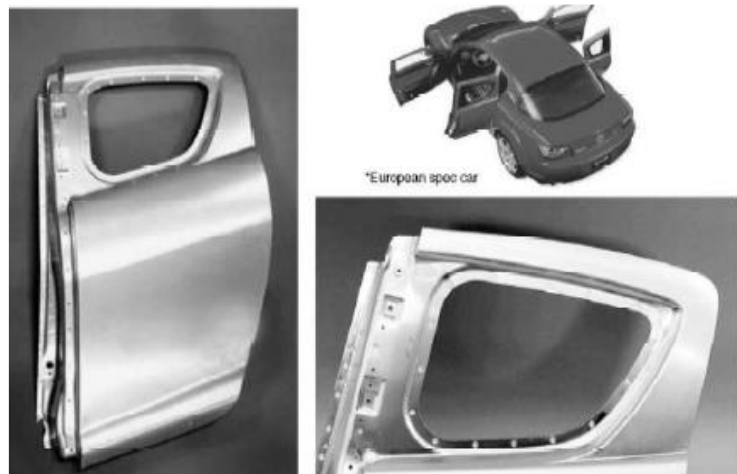


- **Transport ferroviaire** : planchers de voitures, corps de container.



**Figure II.38** — Technique de soudage des carrosseries des trains Hitachi

- **Automobile** : réservoir d'essence, carter de moteur électrique, jantes.



**Figure II.39** — Application du procédé de FSW par points dans l'industrie automobile

## II.4.5.1 CONFIGURATION DU SOUDAGE

Le soudage FSW accepte plusieurs configurations parmi ses configurations on note :

- ✓ Soudage bout à bout (1)
- ✓ Soudage bout à bout avec deux plaques l'une sur l'autre (2)
- ✓ Soudage par recouvrement (3)
- ✓ Soudage par recouvrement multicouches (4)
- ✓ Soudure en T (5) et (6)
- ✓ Soudure en L (7) et (8)
- ✓ Soudage à clin (9)

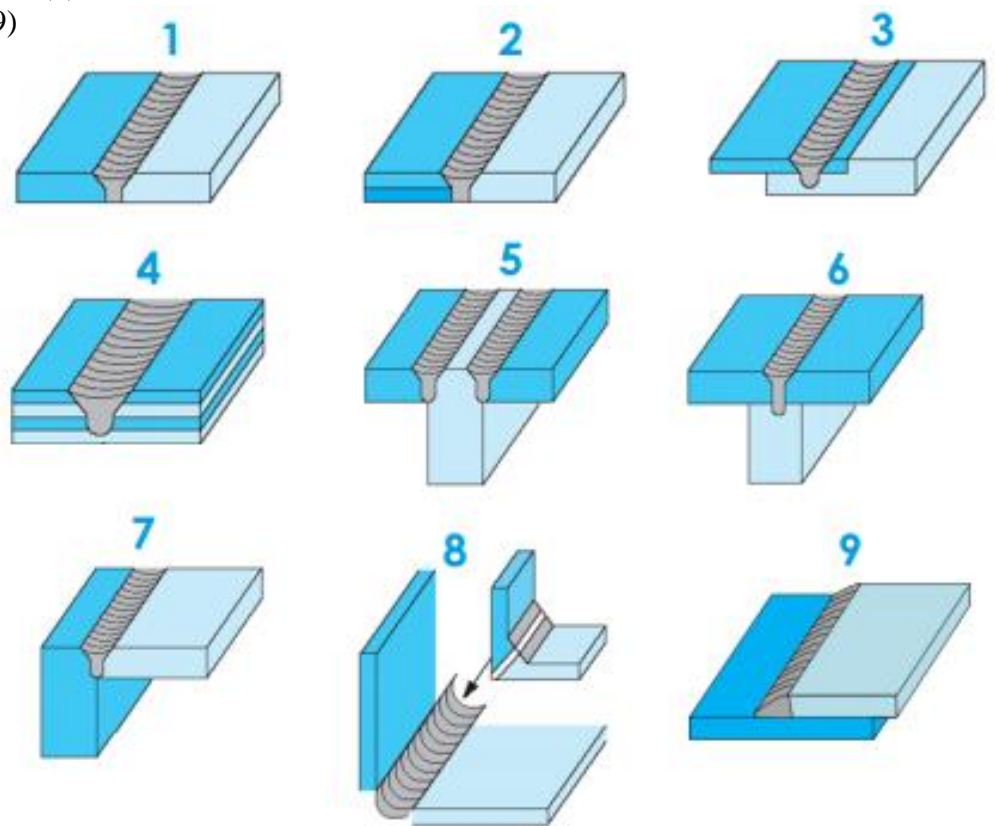


Figure II.40 — Schématisation de différentes configurations du soudage FSW [7]

## **II.4.5.2 LES MATERIAUX CONSIDERES**

Matériaux soudables par FSW :

- Les alliages d'aluminium : permet de souder toutes les nuances d'aluminium
- Le cuivre et ses alliages
- Le magnésium et ses alliages
- Les aciers
- Le titane et ses alliages
- Les polymères

Possibilité d'assemblage hétérogènes :

- Différents alliages d'aluminium
- Aluminium / Acier

## **II.4.5.3 LES AVANTAGES DU SOUDAGE SFW**

Parmi ses avantages, on peut citer :

- Ecologique : pas de métal d'apport ni de gaz.
- Absence de discontinuité.
- Economique : temps de cycle court.
- Reproductible.
- Automatisable.
- Absence de fumées et de projection.
- Absence de métal d'apport permet de réaliser des joints chimiquement homogènes.
- Défauts internes des procédés par fusion, tels le manque de compacité, les soufflures, les criques n'apparaissent pas, il ne génère pas de fissure à chaud.
- Remplacement du rivetage par le soudage permet surtout une diminution du coût d'obtention de la structure, un gain de masse et l'élimination des phénomènes de corrosion autour des rivets.
- Permet de réaliser des soudures hétérogènes.
- .....

## **CHAPITRE III**

### **LES ACIERS INNOXYDABLES**

### III.1 INTRODUCTION

Les aciers ont en général une mauvaise résistance à la corrosion. De nombreux essais ont été faits pour les protéger. Ils sont de deux types : ajout d'éléments à l'acier lors de la fusion ou dépôt d'une couche protectrice sur le produit fini.

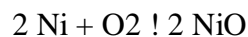
Il a fallu trois millénaires après la découverte du fer pour apprendre à le rendre inaltérable, c'est la découverte des aciers inoxydables.

Ces aciers sont rendus résistants à la corrosion par la création naturelle d'une couche dite de passivation.

Les matériaux les plus oxydables sont les plus corrodables, et les matériaux les plus corrodables sont les plus passibles.

Ainsi le chrome, plus oxydable que le fer est l'additif majeur des aciers inoxydables. Allié au fer et au nickel, il provoque la formation sur leur surface un film d'oxyde ultrafin et inerte, riche en chrome qui est capable de ralentir ou même d'arrêter totalement la corrosion.

Le chrome et le nickel s'oxydent selon les réactions suivantes :



Grace aux caractéristiques principales suivantes :

- ✓ Excellente résistance à la corrosion dans un grand nombre de milieux.
- ✓ Résistance mécanique notablement plus élevée que celle des matériaux traditionnels.
- ✓ Mise en œuvre plus aisée, en particulier grâce aux progrès réalisés dans le soudage.
- ✓ Facilité d'entretien, qui compense le surcoût des investissements initiaux.

Ces aciers ont pénétré de nombreux domaines industriels (bâtiment, industrie chimique et agroalimentaire, médical, transport, production d'énergie, etc.).

### **III.2.1 DEFINITION DE LACIER**

L'acier est un alliage de fer contenant moins de 2 % de carbone. Il peut être répertorié selon cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté maximale à l'état trempé. Un acier de haute teneur en carbone sera employé pour sa grande dureté alors qu'un acier de teneur plus faible est moins dur et plus malléable.

Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments outre le fer et le carbone, incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration.

On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage ; il est considéré alors comme un acier allié. [10]

### **III.2.2 CLASSIFICATION DES ACIERS**

Du fait du nombre élevé d'éléments ajoutés au fer et de la gamme étendue de leur teneur, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes.

On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation. L'adoption de cette dernière nous permet de recenser quatre familles d'aciers [10] :

- Les aciers au carbone d'usage général.
- Les aciers de traitements thermiques, alliés ou non.
- Les aciers à outils.
- Les aciers inoxydables.

### III.3.1 PROPRIETES ET APPLICATIONS

Les aciers inoxydables présentent une grande variété de structures et donc de propriétés physiques, mécaniques et surtout chimiques.

La principale propriété de ces aciers est leur excellente résistance à la corrosion, ce qui leur donne une durée de vie quasi exceptionnelle dans la très grande majorité des milieux.

A cette propriété fondamentale, s'ajoutent les caractéristiques mécaniques élevées à hautes comme à basses températures (résistance mécanique, ductilité, ténacité...).

En raison de leur résistance à la corrosion et de leurs finis de surface de tout premier rang, les aciers inoxydables jouent un rôle prépondérant dans l'industrie aéronautique, chimique, pharmaceutique et agroalimentaire, les cuisines professionnelles, l'architecture et même la bijouterie.

#### 1. Propriétés de mise en forme :

Les aciers inoxydables peuvent être fabriqués et transformés en utilisant un large éventail de technologies et sont entièrement « recyclables » à la fin de leur vie utile. Son usinage est beaucoup plus difficile que celui de certains matériaux, d'où un coût considérablement plus élevé.

#### 2. Propriétés physiques :

Ces aciers possèdent :

- ✓ Une masse volumique de l'ordre de 7 850 Kg/m<sup>3</sup>.
- ✓ Une capacité thermique de 0.5J/g.°C pour T = 0°C à 100°C
- ✓ Une conductivité thermique de 16.2W/m. K à 100°C
- ✓ Une conductivité thermique de 21.4W/m. K à 500°C

### 3. Propriétés mécaniques :

Les aciers inoxydables représentent les propriétés mécaniques suivantes :

- La dureté, Rockwell B est : 79HRB
- La résistance à la traction est : 558Mpa
- L'allongement à la rupture est : 50%
- Le module de Young est : 2.105Mpa

### 4. Propriétés électriques :

La résistivité électrique des aciers inoxydables est :  $7.4 \cdot 10^{-5}$  ohm.cm.

### 5. Propriétés magnétiques :

Les aciers inoxydables ferritiques et martensitiques sont ferromagnétiques « prennent à l'aimant » suite à la présence de la ferrite et de la martensite.

En revanche, les aciers inoxydables austénitiques présentent, à température ambiante, une structure austénitique qui leur permet d'être paramagnétiques (amagnétiques).

Certains aciers inoxydables austénitiques peuvent devenir légèrement ferromagnétiques après une déformation importante (frappe à froid, emboutissage). En effet, la déformation provoque une modification partielle de la structure austénitique en structure martensitique (formation de martensite d'écrouissage) et devenir ainsi un peu magnétique. [11]



### **III.3.2 COMPOSITION ET STRUCTURE DES ACIERS**

Les aciers inoxydables ont été mis au point pour résoudre les problèmes de corrosion humide posés par les alliages ferreux.

Comme les autres aciers, ce sont des alliages métalliques à base de fer (alliage : fer-carbone) à teneur en carbone variant de 0,02 à 1% (pour éviter la précipitation de carbures aux joints de grains) et qui doivent contenir au moins 10,5% de chrome et contenant éventuellement d'autres éléments d'alliage soit de type interstitiel comme le carbone ou l'azote, soit de type métallique tels que le nickel, le molybdène, le titane... [12]

### **III.3.3 FABRICATION DES ACIERS INNOXYDABLES**

La fabrication des aciers inoxydables comporte quatre étapes principales qui sont, par ordre chronologique :

- L'élaboration qui comprend elle-même une phase de fusion dans un four à arc suivie d'une opération d'affinage
- La coulée soit sous forme de lingots, soit de plus en plus par coulée continue
- La transformation à chaud le plus souvent par laminage et plus rarement par forgeage
- La transformation à froid par laminage pour les produits plats et par tréfilage pour les produits longs.

### III.3.4 CLASSIFICATIONS DES ACIERS INNOXYDABLES

Les aciers inoxydables constituent une grande famille d'alliages métalliques. Suivant leur teneur en chrome et les traitements thermiques qu'ils ont subis, ils présentent une large gamme de propriétés. Il existe quatre classes d'aciers inoxydables (de structures cristallographiques différentes), dont l'emploi dépend des propriétés recherchées, ils sont obtenus à partir des différentes zones de ces diagrammes :

- Les aciers ferritiques sont obtenus par refroidissement ;
- Les aciers austénitiques sont obtenus par trempe à partir d'une composition située dans la boucle, la phase austénitique résultante étant thermodynamiquement métastable
- Les aciers martensitiques sont obtenus de la même manière que les aciers austénitiques, à la différence que dans ce cas l'austénite obtenue est très instable à cause de la présence du carbone et se transforme en martensite

Les aciers austéno-ferritiques sont obtenus à partir d'une composition située sur la limite de la boucle.

#### 1. Aciers inoxydables ferritiques :

La proportion de chrome dans ces alliages varie de 11 à 17 % et peut atteindre jusqu'à 24 à 28 %. On parle alors d'aciers ferritiques à haute teneur en chrome ou encore d'aciers superferritiques.

Ces derniers présentent une bonne résistance à la corrosion par piqûres et par crevasses en milieux riches en chlorures.

Les aciers inoxydables ferritiques possèdent une structure cubique centrée (notée "C") et ils sont caractérisés par une remontée de la température de transition du diagramme de phase, qui fait qu'en pratique leur structure reste

ferritique dans tout l'intervalle de température c'est-à-dire il y a l'absence de transformation structurale (ils sont à l'état d'équilibre).

Pour garantir une structure ferritique aux hautes températures,

On rajoute des éléments d'alliage dits « stabilisants » (Ti, Nb, Zr) qui ont la propriété de piéger le carbone et l'azote, éléments hautement austénitisant [13].

Ces aciers ont une très bonne résistance à la corrosion mais des caractéristiques mécaniques faibles. Ils sont ainsi facilement mis en forme par emboutissage. Ils sont utilisés dans le domaine des ustensiles ménagers (cuillères, éviers...), dans le domaine alimentaire et en milieu très agressif (eau de mer).

## 2 Les aciers inoxydables martensitiques :

Ces alliages comprennent de 12 à 18% de chrome et des teneurs en carbone pouvant atteindre environ 1% et ils peuvent contenir jusqu'à 7% de nickel, et jusqu'à 3% de molybdène. Ils présentent des propriétés intéressantes en termes de limite d'élasticité, de résistance à la corrosion et de dureté. Ils possèdent une structure martensitique (carrée, notée "M") obtenue après trempe de la phase austénitique. Cette transformation homogène se produit avec une augmentation de volume, responsable de fortes contraintes de compression et qui tend à stabiliser de l'austénite résiduelle. Ces aciers sont utilisés pour leur résistance mécanique élevée.

Ils sont utilisés comme matériaux de construction, outillage à main, coutellerie.

## 3 Les aciers inoxydables austénitiques :

Les nuances les plus utilisées sont caractérisées par des teneurs en chrome et en nickel respectivement de 17 à 18 % et 8 à 14 %. L'addition de molybdène (de 2 à 3 %) leur confère une bonne tenue dans les milieux acides et ceux générateurs de piqûres ou de corrosion cavernueuse.

La forte proportion de nickel sert à donner et à conserver la structure austénitique (F) à ces aciers même à température ambiante, en plus d'augmenter leur résistance à la corrosion. Cette structure est thermodynamiquement instable à température ambiante.

Elle est obtenue grâce à des trempes depuis 1000 ou 1150 °C.

Les aciers austénitiques associent une bonne résistance à la corrosion à une résistance mécanique élevée, ils sont ductiles, résistants au choc et non magnétiques ; ils ne se trempent pas, mais peuvent acquérir une certaine dureté par déformation à froid. A l'état recuit, ils possèdent à ce moment une plus grande ductilité et une meilleure ténacité que les aciers ordinaires. Même si leur teneur en carbone est relativement faible, ces aciers sont très sensibles à la corrosion intergranulaire due à la précipitation de carbures. Ils sont utilisés dans les domaines de l'agro-alimentaire, du nucléaire, du bâtiment, des transports, de l'industrie chimique, de l'électroménager, etc.

#### 4 Les aciers inoxydables austéno-ferritiques :

Les aciers austéno-ferritiques sont des mélanges biphasés ferrite et austénite (d'où leur nom anglais de duplex), et contiennent des teneurs en chrome, molybdène et azote relativement élevées. Ils sont obtenus par trempe depuis une structure mixte austénite-ferrite. Les principales nuances contiennent 22 à 25 % de chrome et 4 à 7 % de nickel. Les incorporations de molybdène (3 ou 4 %) et d'azote (0,1 à 0,3 %) permettent de limiter les corrosions par piqûres et par crevasses. Alliant les bonnes propriétés de résistance à la corrosion des aciers ferritiques et les hautes résistances mécaniques des aciers austénitiques, ces aciers sont utilisés dans des conditions relativement agressives : industries chimiques, pétrolière et maritime.

La microstructure de base de l'acier inoxydable duplex consiste de grains d'austénite dispersés dans une matrice ferritique en plus de ces quatre principales catégories d'aciers inoxydables, on peut citer une autre famille de ces aciers, c'est les aciers inoxydables à durcissement par précipitation. [14]

#### 5 Aciers inoxydables à durcissement par précipitation :

Les caractéristiques mécaniques de cette famille d'aciers sont obtenues à l'issue d'un traitement de durcissement secondaire afin d'améliorer des propriétés de résistance. Cette seconde phase est constituée par une fine précipitation de composés intermétalliques [4].

### III.3.5 L'EFFET DES ELEMENTS PRINCIPAUX DANS LES ACIERS INOXYDABLES

Les microstructures, les propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion des aciers inoxydables dépendent de la composition chimique. Quelques effets des principaux éléments d'alliages des aciers inoxydables :

1.Le carbone : Le carbone est un élément inhérent aux aciers. Il permet d'améliorer la résistance mécanique du fer, en se plaçant dans les sites interstitiels des mailles cristallographiques. Le carbone est plus soluble dans l'austénite que dans la ferrite et par conséquent, il stabilise le domaine austénitique des aciers et est dit gammagène ( $\gamma$ -gène). Le carbone est susceptible de former des précipités de type carbures de chrome, en particulier aux joints de grains, favorisant la corrosion intergranulaire. [15]

2.Le chrome Cr : Le chrome est un élément inhérent aux aciers inoxydables puisqu'il permet la formation d'une couche de passivation qui leur confère leurs propriétés de résistance à la corrosion, en particulier à la corrosion uniforme et à la corrosion localisée. Le chrome a une structure cubique centrée (c.c.), comme la ferrite et stabilise donc cette dernière ; il est l'élément alphagène ( $\alpha$ gène) de base. La couche de passivation est d'autant plus efficace que les teneurs en chrome de l'acier inoxydable sont élevées. [16]

3.Le nickel Ni : Le nickel est l'élément  $\gamma$ -gène. Il a une structure cubique faces centrées (c.f.c.), stabilise donc fortement l'austénite et élargie domaine  $\gamma$  dans l'alliage Fe-Cr-Ni, comme visualisé sur le diagramme de phases Fe-Ni [15].

L'addition de nickel en quantité suffisante dans un acier Fe-Cr permet l'obtention d'un acier austénitique tandis que des aciers duplex peuvent être obtenus en équilibrant les proportions de chrome et de nickel. Le nickel est aussi connu pour améliorer la résistance à la corrosion caverneuse en milieu chloruré [16].

### **III.3.6 LES CAPACITES ET LES AVANTAGES ETONNANTS DE L'ACIER INOXYDABLE**

L'utilisation de l'acier inoxydable dans une grande variété de projets et d'applications présente de nombreux avantages uniques.

Malheureusement, de nombreux entrepreneurs et concepteurs négligeront ces avantages en raison du coût plus élevé de l'acier inoxydable par rapport aux autres matériaux.

Cependant, si vous recherchez un matériau qui augmentera la durée de vie de votre projet, l'acier inoxydable sera finalement la meilleure valeur à long terme.

### **III.3.7 LES AVANTAGES DE CHOISIR DES MATERIAUX EN ACIER INOXYDABLE**

Il existe différentes propriétés de résistance à la corrosion associées aux différentes qualités d'acier inoxydable. Grâce à la couche invisible d'oxyde de chrome qui protège les matériaux en acier inoxydable et les rend résistants aux taches et à la corrosion, l'acier inoxydable est également le choix idéal pour les hôpitaux et autres conditions d'hygiène.

Un autre avantage majeur de l'utilisation de matériaux en acier inoxydable est l'avantage significatif du rapport résistance-poids par rapport à d'autres options de matériaux. En raison de la capacité unique de l'acier inoxydable à résister à la corrosion, aux dommages causés par la chaleur et aux dommages chimiques, les nuances duplex à haute résistance offrent une résistance accrue, ce qui permet de réduire l'épaisseur du matériau et d'offrir un avantage sur les nuances conventionnelles d'acier inoxydable.

Jusqu'à 50 % de tout l'acier inoxydable neuf fabriqué aux États-Unis est fabriqué à partir de ferraille refondue. L'acier inoxydable est recyclable à 100 %. Dans le monde d'aujourd'hui soucieux de l'environnement, ces avantages font de l'acier inoxydable un choix bienvenu pour les projets de construction respectueux de l'environnement. Consultez votre fournisseur d'acier local au Massachusetts pour en savoir plus sur les avantages de l'utilisation de l'acier inoxydable.

### **III.3.8 UTILISATION COMMERCIALE DE MATERIAUX EN ACIER INOXYDABLE**

L'acier inoxydable est un matériau qui nécessite peu d'entretien, résiste à la corrosion et a un bel aspect, ce qui est préférable dans de nombreuses utilisations commerciales. L'alliage peut être transformé en plaques, barres, fils, tôles et tubes en acier inoxydable, ce qui le rend idéal pour la fabrication d'instruments chirurgicaux, d'appareils électroménagers, de quincaillerie, d'ustensiles de cuisine et de couverts, de matériaux de construction pour grands bâtiments et gratte-ciel, de matériel industriel et beaucoup plus.

Les cuisines, les usines de transformation des aliments, les hôpitaux, les cabinets médicaux, les centres chirurgicaux et d'autres industries dépendent fortement de l'acier inoxydable pour faciliter le nettoyage et la stérilisation. L'industrie aéronautique utilise également différentes qualités d'acier inoxydable en raison de leur capacité à ajouter de la résistance sans ajouter beaucoup de poids comme les autres matériaux.

### **III.4.1 DIFFERENTS TYPES DE MATERIAUX EN ACIER INOXYDABLE**

Les nuances qui ont des alliages plus faibles résistent à la corrosion dans l'eau pure ou dans les environnements atmosphériques. Les nuances qui ont un alliage supérieur ont la capacité de résister à la corrosion dans les solutions alcalines ou acides, ainsi que dans les environnements chlorés, tels que les usines de traitement et autres installations industrielles.

Les matériaux en acier inoxydable qui ont un très haut niveau de chrome, ainsi que les qualités d'acier inoxydable qui contiennent du nickel, ont la capacité de résister au tartre.

Ce haut niveau d'alliage de nickel peut également conserver sa résistance même à des températures très élevées. Le manganèse peut également être ajouté en quantités significatives aux compositions d'acier inoxydable pour des résultats similaires à ceux des alliages de nickel, mais à un coût bien moindre.

Le carbone est ajouté à certains types de matériaux en acier inoxydable pour augmenter la dureté et la résistance. Lorsque ces matériaux sont soumis à un traitement thermique, l'acier peut être renforcé et affûté pour la fabrication d'outils, de couverts et de lames de rasoir.

Où acheter des matériaux en acier inoxydable en Nouvelle-Angleterre Pour des applications commerciales, de construction ou industrielles, votre meilleur choix pour localiser des matériaux en acier inoxydable de qualité.

### **III.4.2 INOX 304 ET L'INOX 316**

Saviez-vous que l'acier inoxydable 304 et 316 est le type d'acier inoxydable le plus populaire et le plus utilisé ?

À l'œil nu, il peut être extrêmement difficile de faire la différence entre les différentes nuances d'acier inoxydable. 304 et 316, en particulier, semblent presque identiques et les différences entre les deux sont faciles à manquer.

Quelles sont donc les différences entre l'acier inoxydable 304 et l'acier inoxydable 316 ? Ci-dessous, nous répondons à cette question et discutons des différentes applications où les grades sont utilisés.

### **III.4.3 DIFFERENCES ENTRE L'ACIER 304 ET 316**

La différence la plus fondamentale entre les nuances d'acier est la présence de molybdène dans l'acier inoxydable 316.

Le molybdène est un élément chimique utilisé pour le renforcement et le durcissement de l'acier. Sa fonction principale en inox 316 est d'aider à combattre la corrosion par les chlorures.

L'acier inoxydable 316 contient plus de nickel que l'acier inoxydable 304, tandis que le 304 contient plus de chrome que le 316. L'acier inoxydable 304 se compose généralement de 18 % de chrome et de 8 % de nickel. L'acier inoxydable 316 est composé de 16 % de chrome, 10 % de nickel et 2 % de molybdène.

Les deux nuances d'acier sont comparables en apparence, en composition chimique et en caractéristiques. Les deux aciers sont durables et offrent une excellente résistance à la corrosion et à la rouille. L'acier inoxydable 304 est l'acier inoxydable austénitique le plus polyvalent et le plus largement utilisé dans le monde, en raison de sa résistance à la corrosion.



L'acier inoxydable 304 est également moins cher que l'acier inoxydable 316, une autre raison de sa popularité et de son utilisation répandue.

L'acier inoxydable 316 est plus cher parce qu'il offre une meilleure résistance à la corrosion, en particulier contre les chlorures et les solutions chlorées. Ceci rend l'acier inoxydable 316 plus souhaitable dans les applications où l'exposition au sel est un problème. Si vous avez une application avec des corrosifs ou des chlorures puissants, le surcoût de l'inox 316 est fortement recommandé. Dans de telles applications, l'acier inoxydable 316 durera plus longtemps que l'acier inoxydable 304, vous procurant ainsi des années supplémentaires de vie et d'utilisation.

Si votre application utilise des acides plus doux ou ne contient pas d'exposition au sel, l'inox 304 est parfait. Ci-dessous, nous énumérons quelques applications courantes pour les deux nuances.

#### **III.4.4 L'ACIER INOXYDABLE 304**

L'acier inox 304 est la forme la plus courante d'acier inox utilisée autour du monde, due en grande partie à son excellente résistance à la corrosion et à sa qualité. Il contient entre 16 et 24 % de chrome et jusqu'à 35 % de nickel, ainsi que de petites quantités de carbone et manganèse. C'est l'inox le plus courant et le moins coûteux à la fabrication, il équipe les cuisines, les ustensiles alimentaires et les bâtiments. Le petit bémol est qu'il est plus sensible à la corrosion en milieu très salin, comme par exemple au bord de la mer ou il pourra s'oxyder à la longue.

- Application :

Moulures et garnitures automobiles Enjoliveurs de roues Réservoirs de stockage  
Équipement/appareils électroménagers de cuisine Coffrets électriques...

-Acier inoxydable 316 :

Aussi courant que le 304, il est néanmoins plus résistant à la corrosion. Étonnamment, sa composition en chrome est équivalente, la différence essentielle est qu'il contient environ 2 à 3 % de molybdène.

**(K)2(L)8(M)18(N)11(O)1**

Le molybdène est un métal de transition, Il améliore également la force de l'acier aux températures élevées et contribue à la trempabilité et à la dureté des aciers éteints et gâchés.

• Application :

Flotteurs en acier inoxydable Pièces marines Coffrets électriques extérieurs Équipement chimique Équipement pharmaceutique.

En résumé, l'acier 316 vaut la peine si vous avez besoin d'une résistance supérieure à la corrosion et que votre système contient de l'eau. Sinon, l'acier 304 répondra parfaitement à vos besoins.

## **CHAPITRE IV**

## **SIMULATION**

Afin de faire une simulation pour ce procédé de soudage (soudage par friction malaxage) on a proposés une méthode qui est basée d'une comparaison. Et pour réaliser ça on a utilisé un PC qui contient logiciel SolidWorks.

## IV.1 SOLIDWORKS

SolidWorks est un modéleur 3D utilisant la conception paramétrique. Créé en 1993 par l'éditeur américain éponyme, SolidWorks est racheté le 24 juin 1997 par la société Dassault Systèmes[17].

Parmi les plus grandes organisations utilisant SolidWorks, on peut citer Franckie, Équipement d'emballage MMC, AREVA, Patek Philippe, Mega Bloks, Axiome, ME2C, SACMO, Le Boulch, Robert Renaud, Lorenz Baumer, l'Opéra de Paris, Jtekt, GTT et le Ministère de l'Éducation nationale

Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base [18] :

### 1 La pièce

La pièce est l'objet 3D monobloc. La modélisation d'une telle entité dépendra de la culture de l'utilisateur. Comme de nombreux logiciels conviviaux, SolidWorks permet d'aboutir à un même résultat apparent par des voies souvent différentes.

### 2 L'assemblage

Les assemblages sont obtenus par la juxtaposition de pièces. La mise en position de pièces est définie par un ensemble de **contraintes d'assemblage** associant, deux entités respectives par une relation géométrique (coïncidence, tangence...).

### 3 La mise en plan

Les mises en plan concernent à la fois les pièces (dessin de définition) ou les assemblages (dessin d'ensemble). Pour aboutir à un plan fini d'une pièce. [19]

## IV.2.1 PARAMETRES PROPOSES

Pour réaliser l'étude du soudage par friction malaxage on a proposés une comparaison de 3 études :

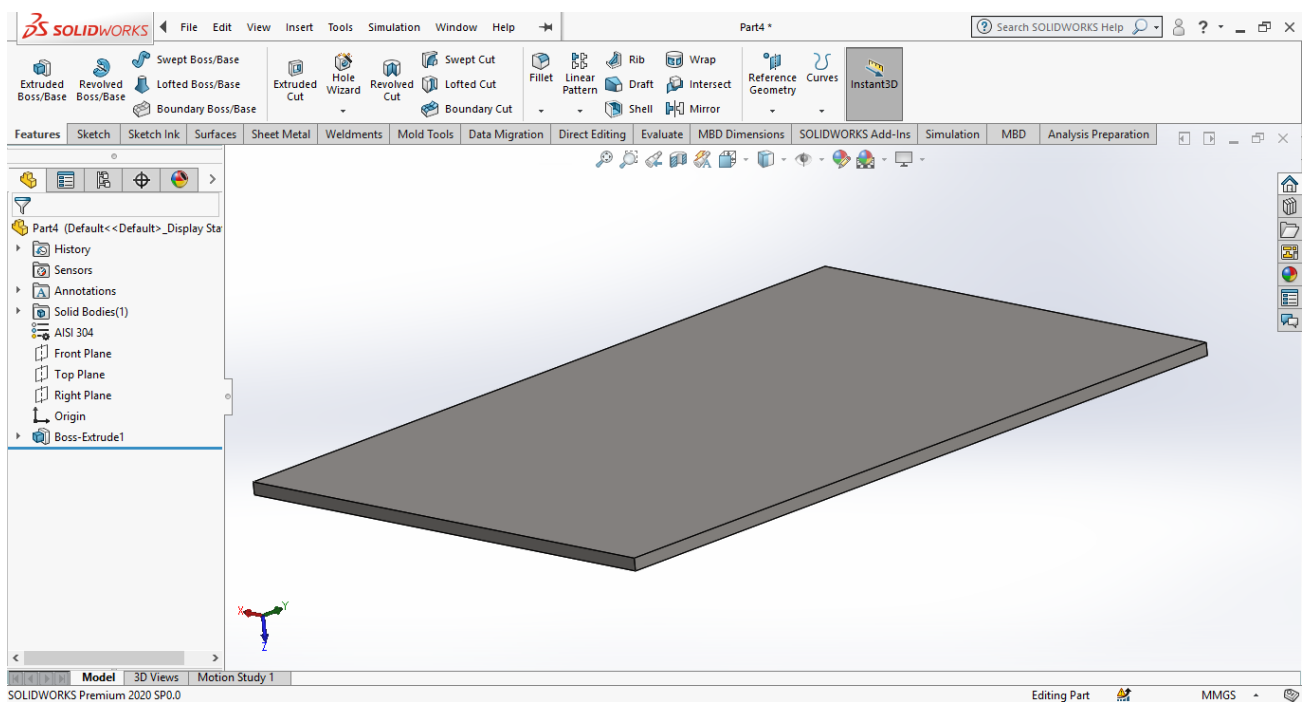
1. Crier une pièce unie à l'aide de SolidWorks, elle va être la pièce référence de notre étude.
2. Crier deux plaques soudées à l'aide de SolidWorks qui vont représenter notre étude.

## IV.2.2 LE DESSIN ASSOCIE PAR ORDINATEUR

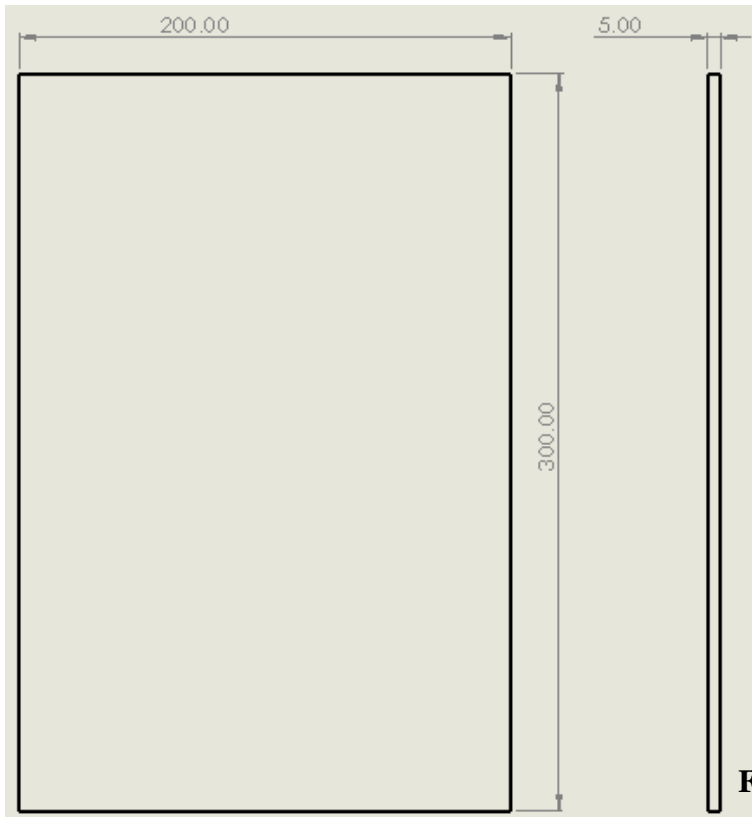
Note : Les mesures de la plaque et la configuration de la mesh ainsi les forces appliques et le matériau utilise dans les tests sont les mêmes, pour que soit la comparaisent régulière.

➤ Premier point des paramètres :

Afin de réaliser le premier cas qui a été indiqué dans les paramètres proposées, on a proposé une étude de résistances d'une plaque unie en acier 304, comme montre la figure ci-dessus :



**Figure IV.1** — La plaque référence en acier 304 sur logiciel SolidWorks



**Figure IV.2** — Les mesures utilisées dans la plaque d'essai (référence)

➤ Deuxième point des paramètres :

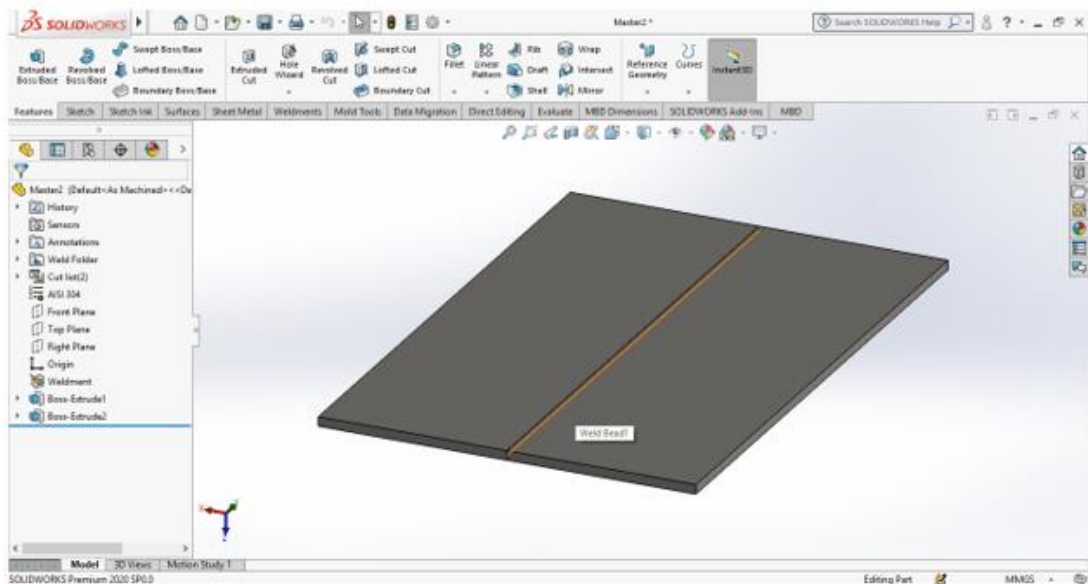
Afin de réaliser la soudure FSW on a désignés deux plaques en acier 304 et on a assemblés les deux plaques avec une soudure à l'aide de logiciel SolidWorks. Les deux figures suivantes montrent les caractéristiques d'acier utilisé et le dessin associé par ordinateur des deux plaques soudées dans notre étude (source SolidWorks 2020 Premium pour le tableau des caractéristiques du matériau) :

❖ L'acier inoxydable 304 :

$$\text{Sigma admissible}(\text{acier 304}) = 206807 \text{ KN/m}^2$$

Property	Value	Units
Elastic Modulus	1.9e+11	N/m <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.29	N/A
Shear Modulus	7.5e+10	N/m <sup>2</sup>
Mass Density	8000	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Strength	517017000	N/m <sup>2</sup>
Compressive Strength		N/m <sup>2</sup>
Yield Strength	206807000	N/m <sup>2</sup>
Thermal Expansion Coefficient	1.8e-05	/K
Thermal Conductivity	16	W/(m·K)
Thermal Conductivity	16	W/(m·K)
Specific Heat	500	J/(kg·K)
Material Damping Ratio		N/A

**Figure IV.3** — Tableau de caractéristiques de l'acier 304



**Figure IV.4** — Les deux plaques soudées

### IV.2.3 LA SIMULATION

Notre étude sera basée sur la résistance à la rupture en traction (XX) et en flexion (YY).

Ces forces de traction et flexion seront augmenter jusqu'à la rupture de la pièce dans chaque cas pour finir par une étude comparative.

✓ Premier cas :

La pièce unie soumise a une force de traction puis une force de flexion cette force sera augmenter jusqu'à la rupture de la pièce.

Note : le réglage du maillage est le même pour les 2 cas.

1. Traction :  
On fixe notre pièce d'un côté et on tire de l'autre côté.

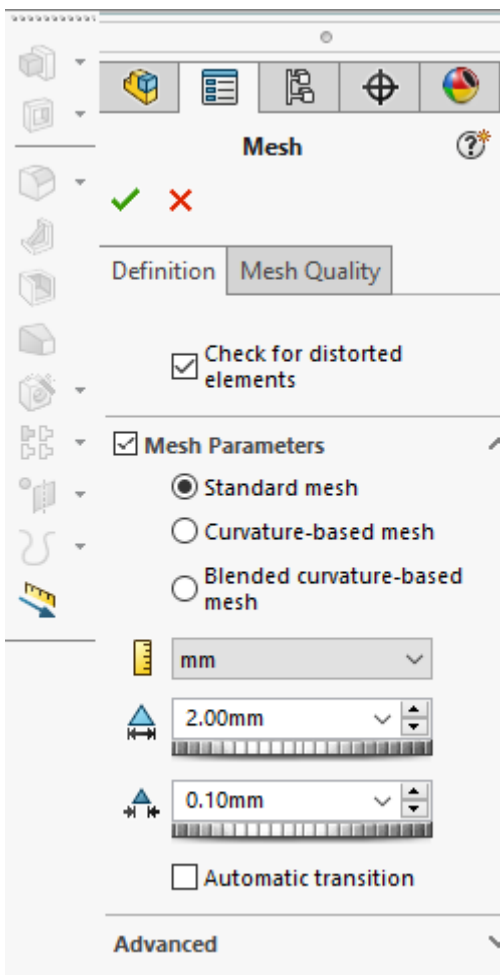
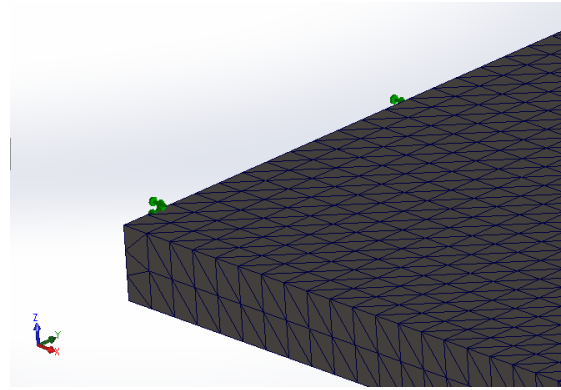
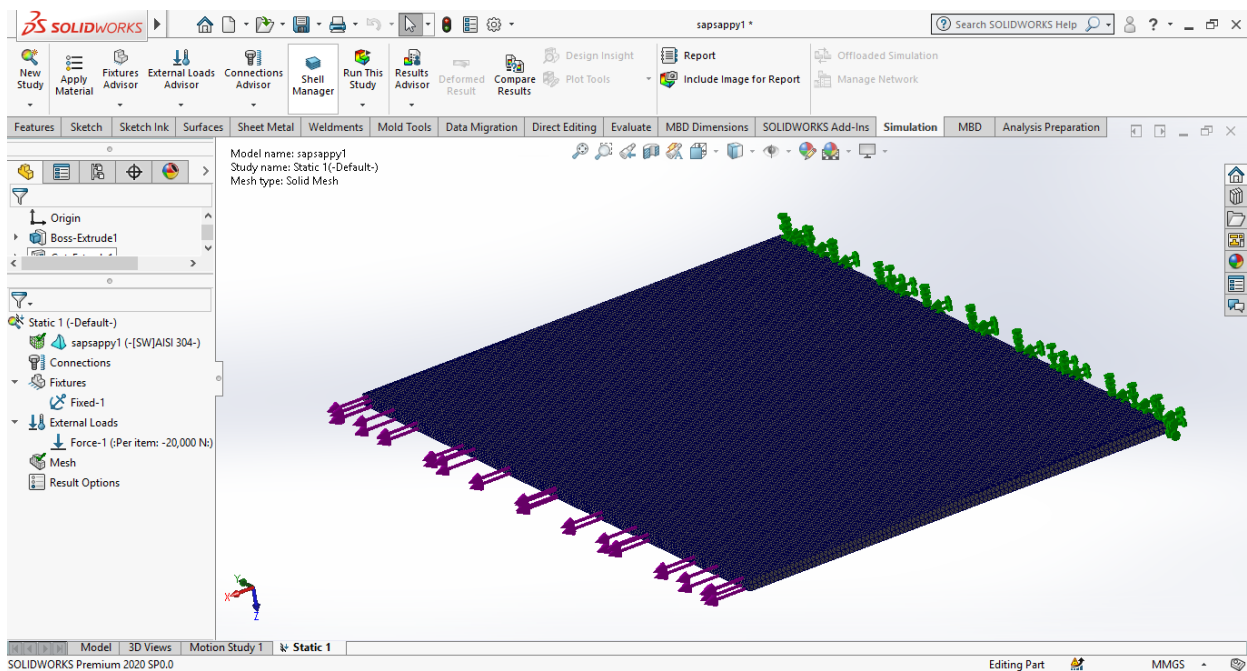


Figure IV.5 — Le réglage du maillage utilisé





**Figure IV.6** — Photo zoomée qui montre les détails du maillage utilisé



**Figure IV.7** — L'emplacement de la fixation et la force utilisée en traction

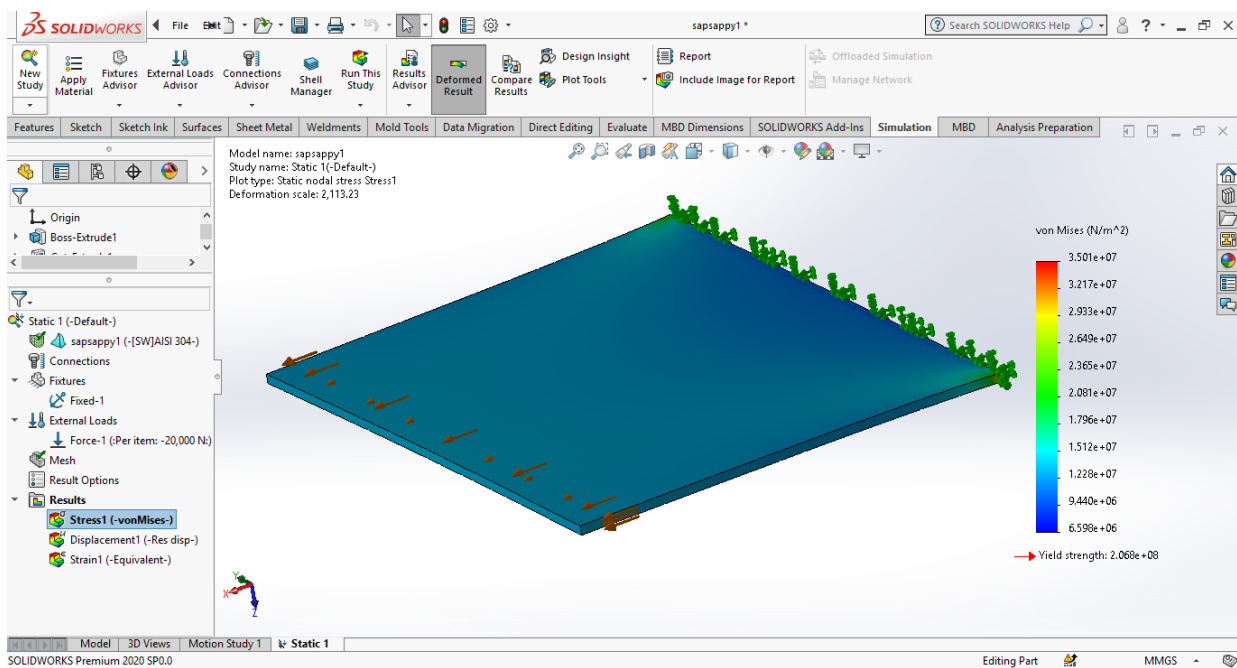
Après certains essais on est arrivés à trouver la force nécessaire pour que la pièce entre dans une déformation plastique.

## Les forces utilisées dans les essais :

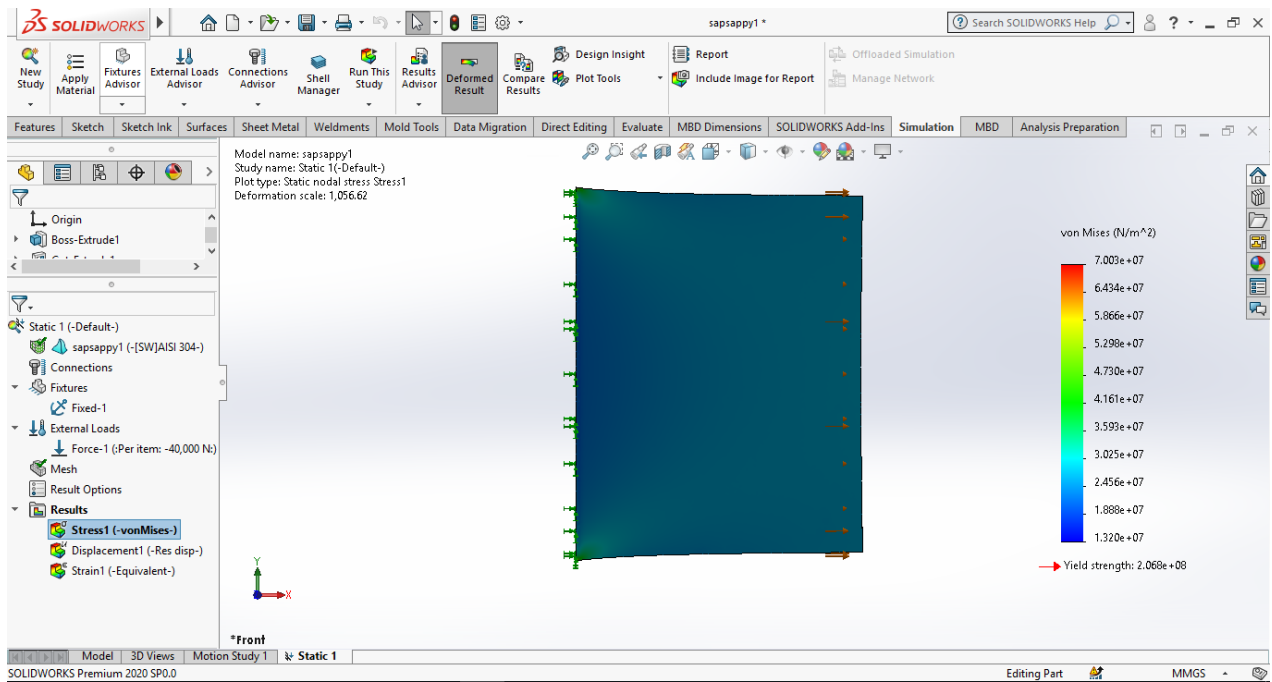
### En traction :

1.  $20\text{KN/m}^2$
  2.  $40\text{KN/m}^2$
  3.  $60\text{KN/m}^2$
  4.  $80\text{KN/m}^2$
  5.  $100\text{KN/m}^2$
  6.  $120\text{KN/m}^2$
- } déformation élastique
- déformation plastique

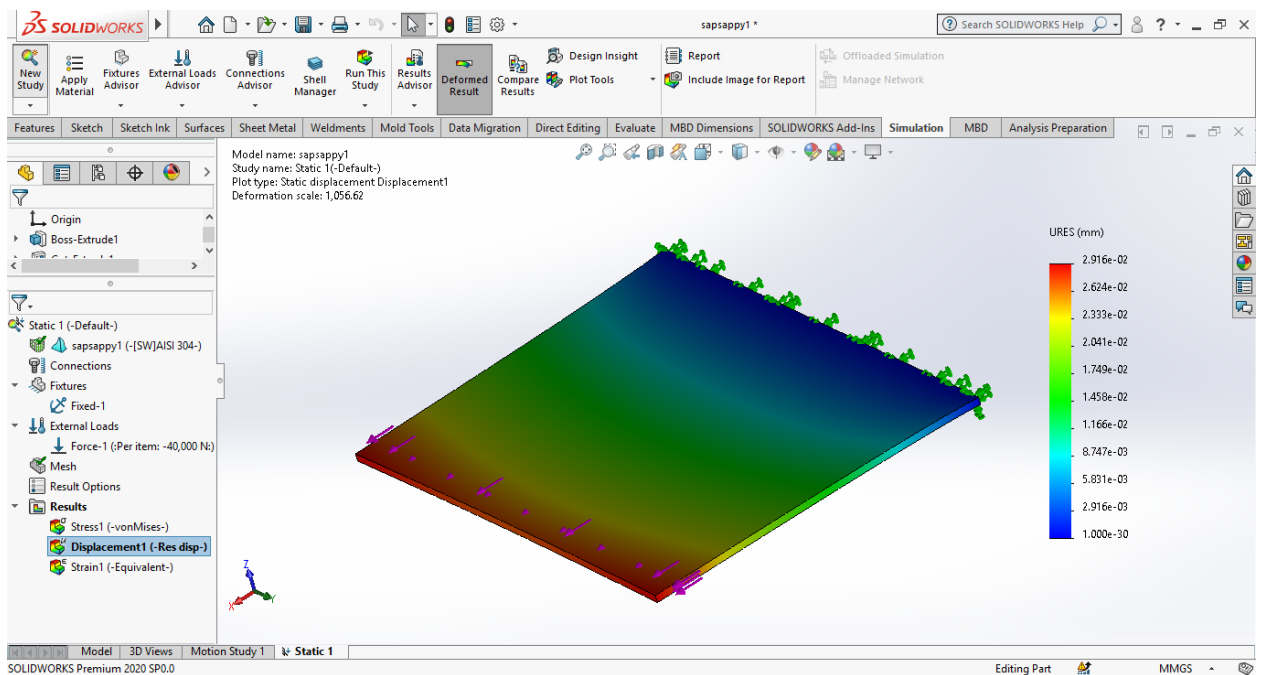
Les figures suivantes vont montrer quelques essais de ces simulations.



**Figure IV.8** — Simulation en traction (déformation) avec une force de  $20\text{KN/m}^2$

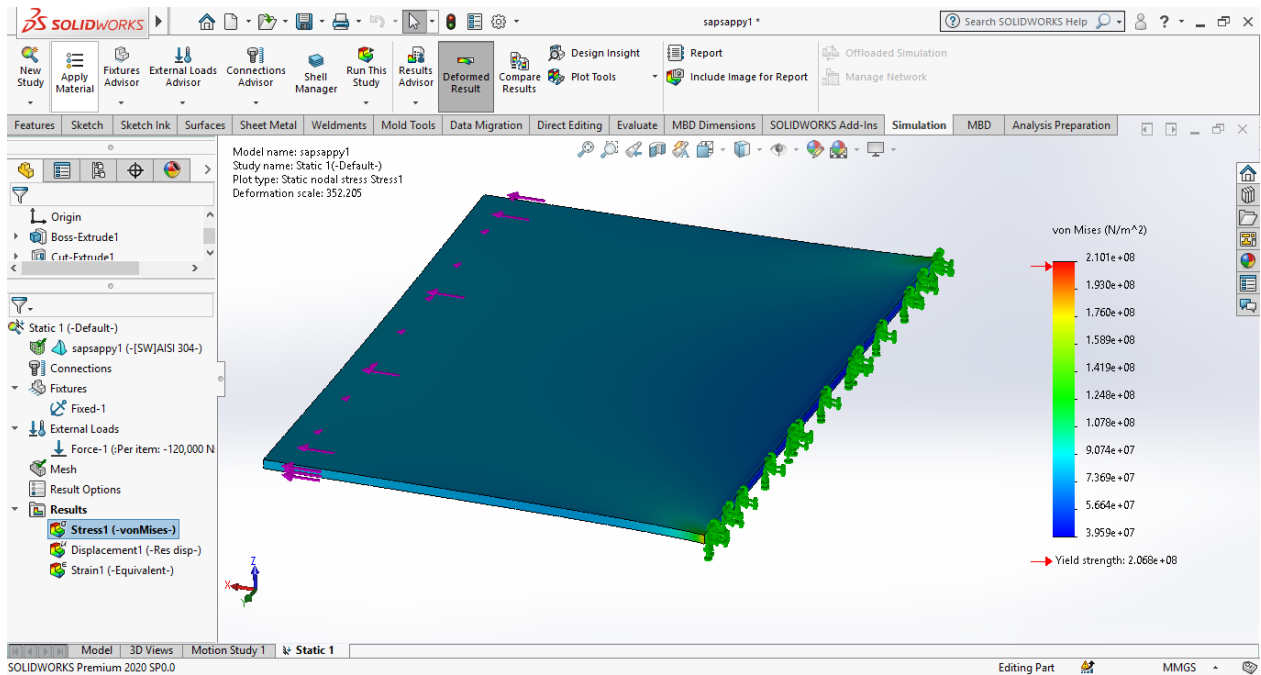


**Figure IV.9** — Simulation en traction (déformation) avec une force de 40KN/m<sup>2</sup>



**Figure IV.10** — Simulation en traction (déplacement) avec une force de 40KN/m<sup>2</sup>

On remarque dans ces figures de simulation en traction qu'on est toujours dans la déformation élastique donc pas de danger sur la plaque. Même le déplacement qui est montré dans la figure IV.9 est négligeable.

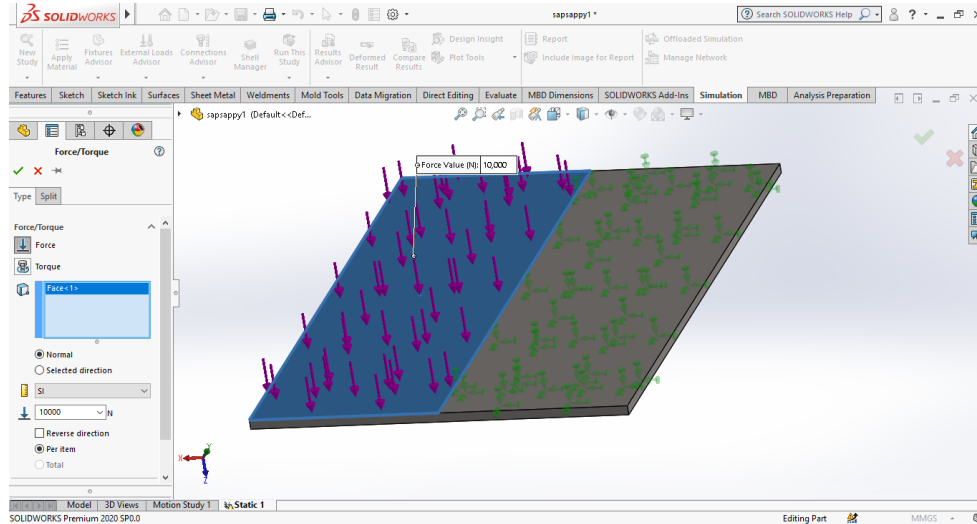


**Figure IV.11** — Simulation en traction (déformation) avec une force de 120KN/m<sup>2</sup>

A 120KN/m<sup>2</sup> on remarque qu'on a dépassés la sigma admissible de notre matériel utilisé et donc on est dans la déformation plastique.

## 2. En flexion :

On fixe notre plaque d'un côté et on exerce une pression de l'autre côté, en utilisant le même de la mesh. Comme montre la figure suivante :

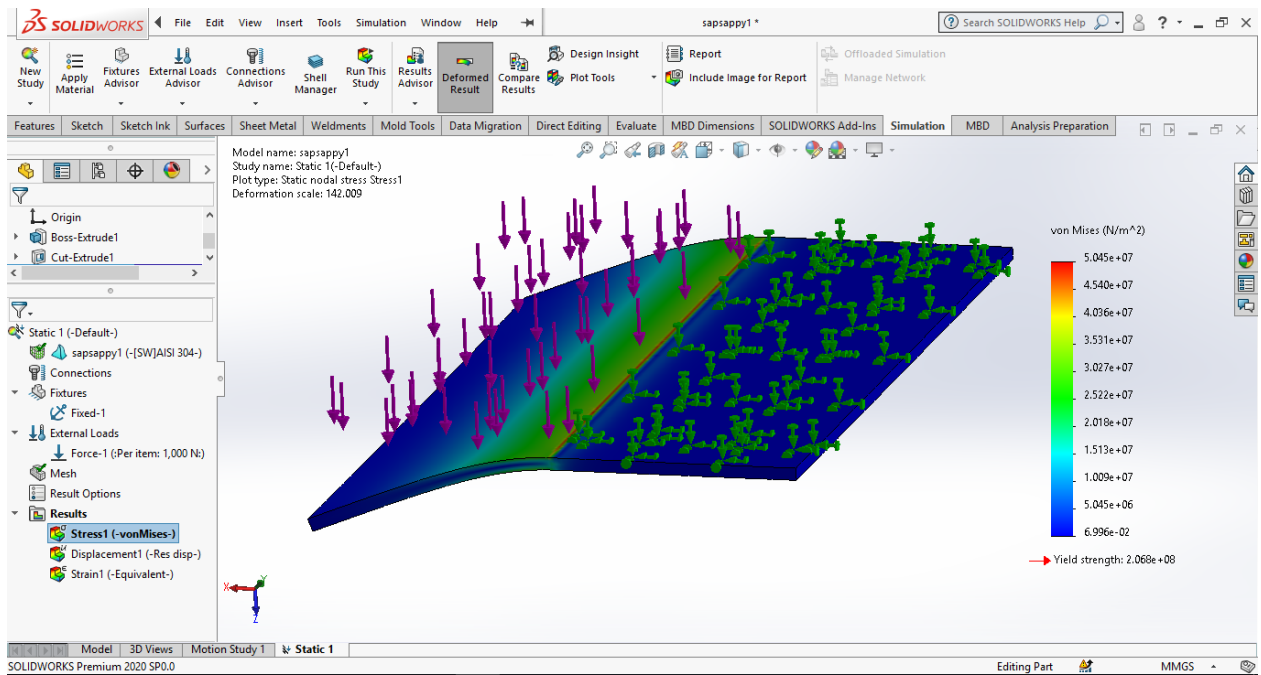


**Figure IV.12** — Fixation et l'exerçant de la force sur la plaque dans logiciel SolidWorks

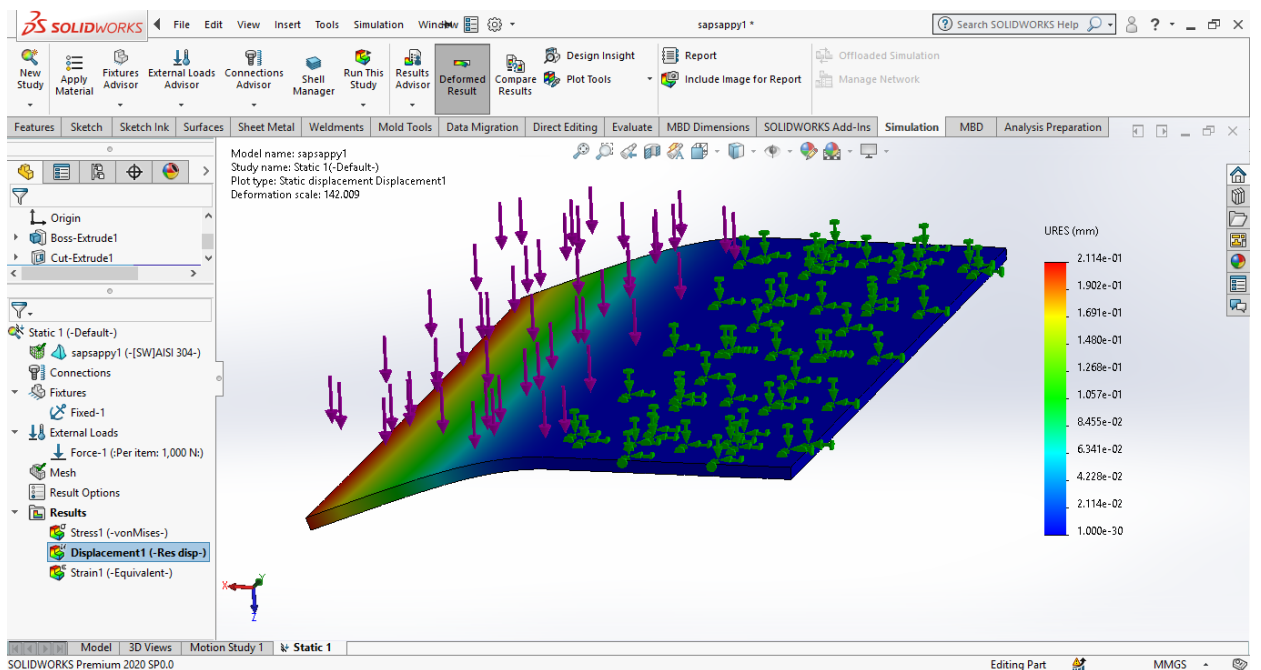
Les forces utilisées utilisées dans la flexion :

1.  $1\text{KN/m}^2$
  2.  $2\text{KN/m}^2$
  3.  $3\text{KN/m}^2$
  4.  $4\text{KN/m}^2$
  5.  $4.2\text{KN/m}^2$
- } déformation élastique
- } déformation plastique

Les figures suivantes vont montrer quelques essaie de ces simulations.



**Figure IV.13** — Simulation en flexion (déformation) avec une force de 1KN/m<sup>2</sup>



**Figure IV.14** — Simulation en flexion (déplacement) avec une force de 1KN/m<sup>2</sup>

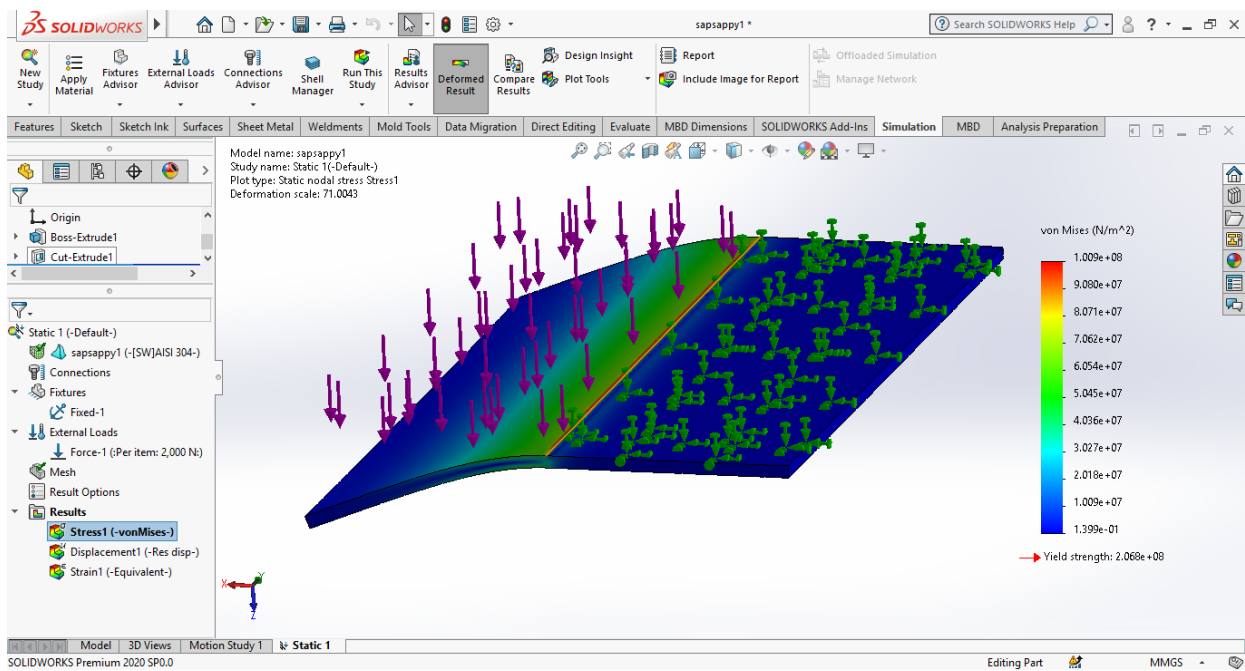
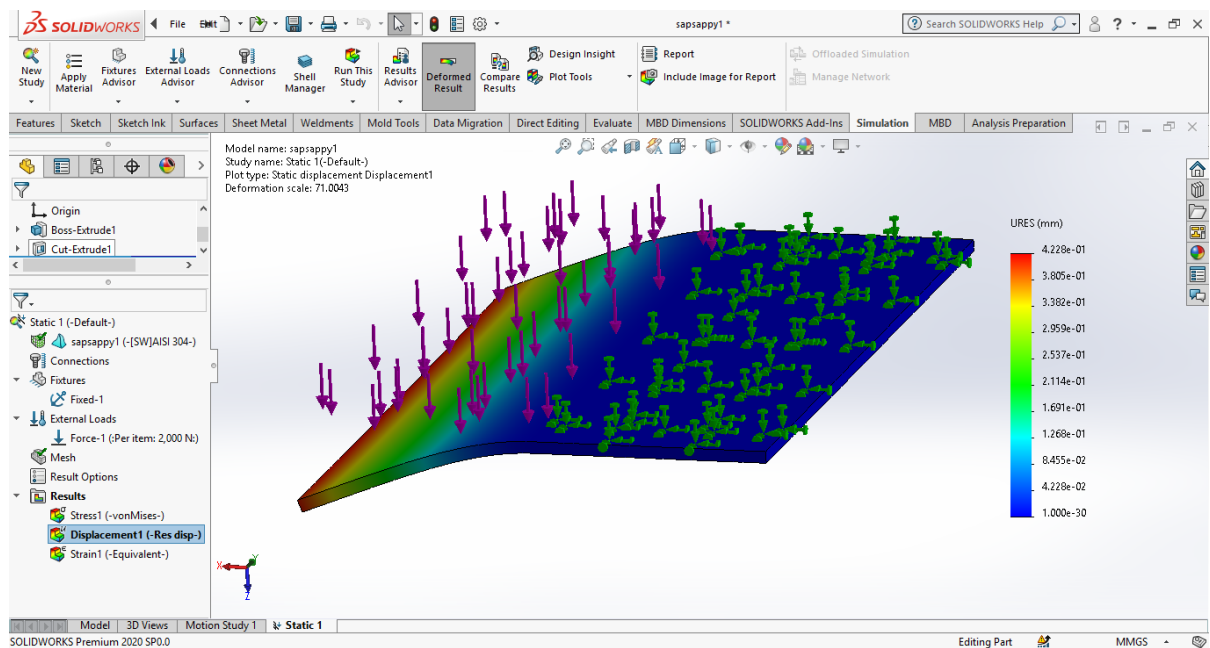
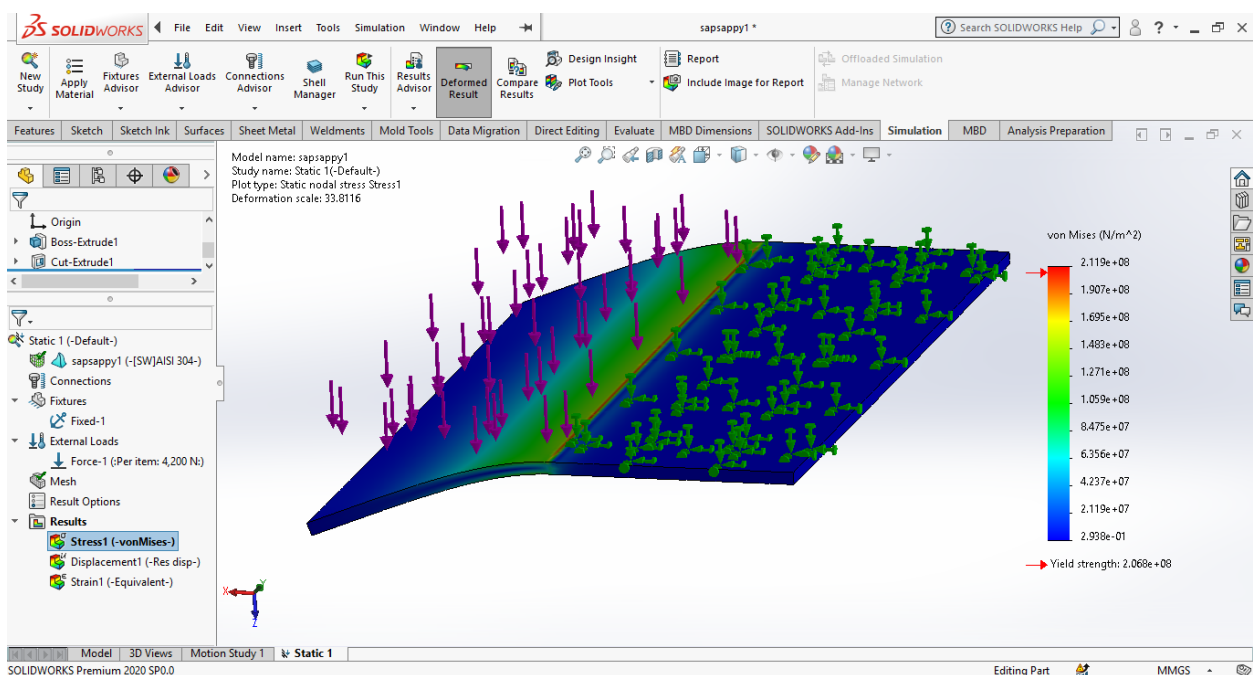


Figure IV.15 — Simulation en flexion (déformation) avec une force de 2KN/m<sup>2</sup>



**Figure IV.16** — Simulation en flexion (déplacement) avec une force de  $2\text{KN/m}^2$

On remarque jusqu'à maintenant qu'on est toujours dans la déformation élastique avec un déplacement négligeable.



**Figure IV.17** — Simulation en flexion (déformation) avec une force de  $4.2\text{KN/m}^2$

A  $4.2\text{KN/m}^2$  on remarque qu'on a dépassés la sigma admissible de notre matériel utilisé et donc on est dans la déformation plastique.

### Conclusion du premier cas :

Notre plaque a pu résistée jusqu'à :

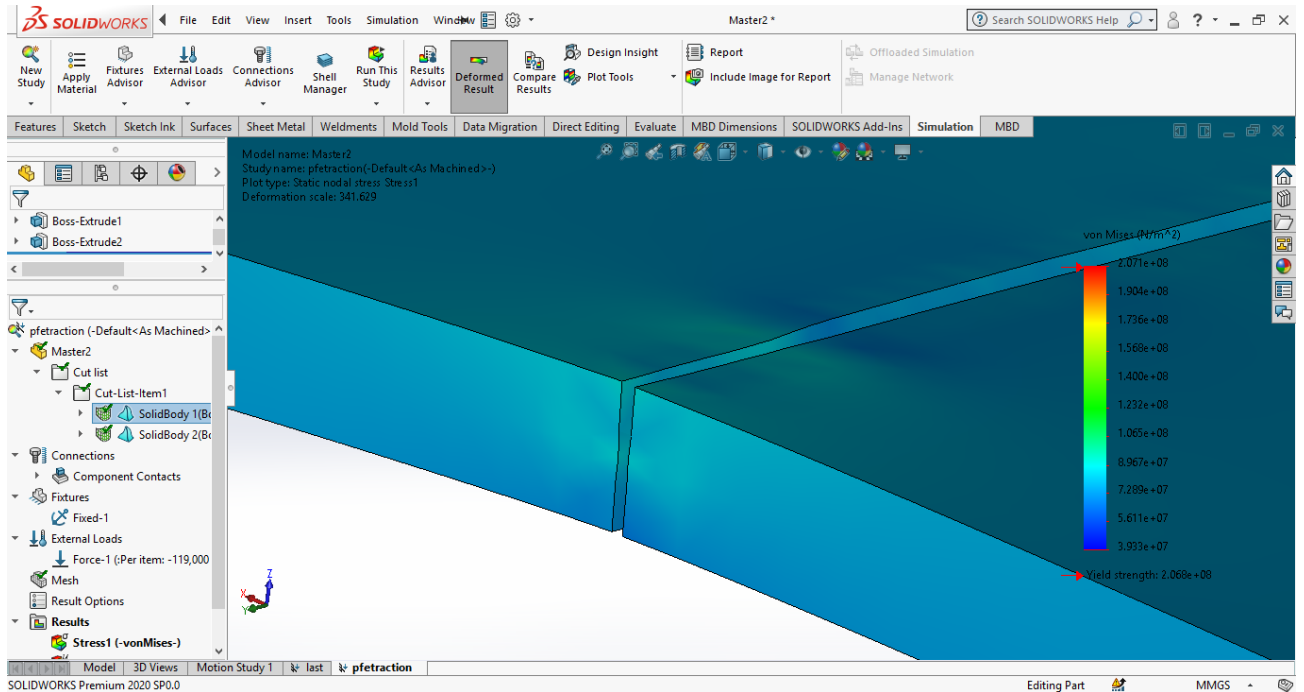
\*  $120\text{KN/m}^2$  en traction

\*  $4.2\text{KM/m}^2$  en flexion



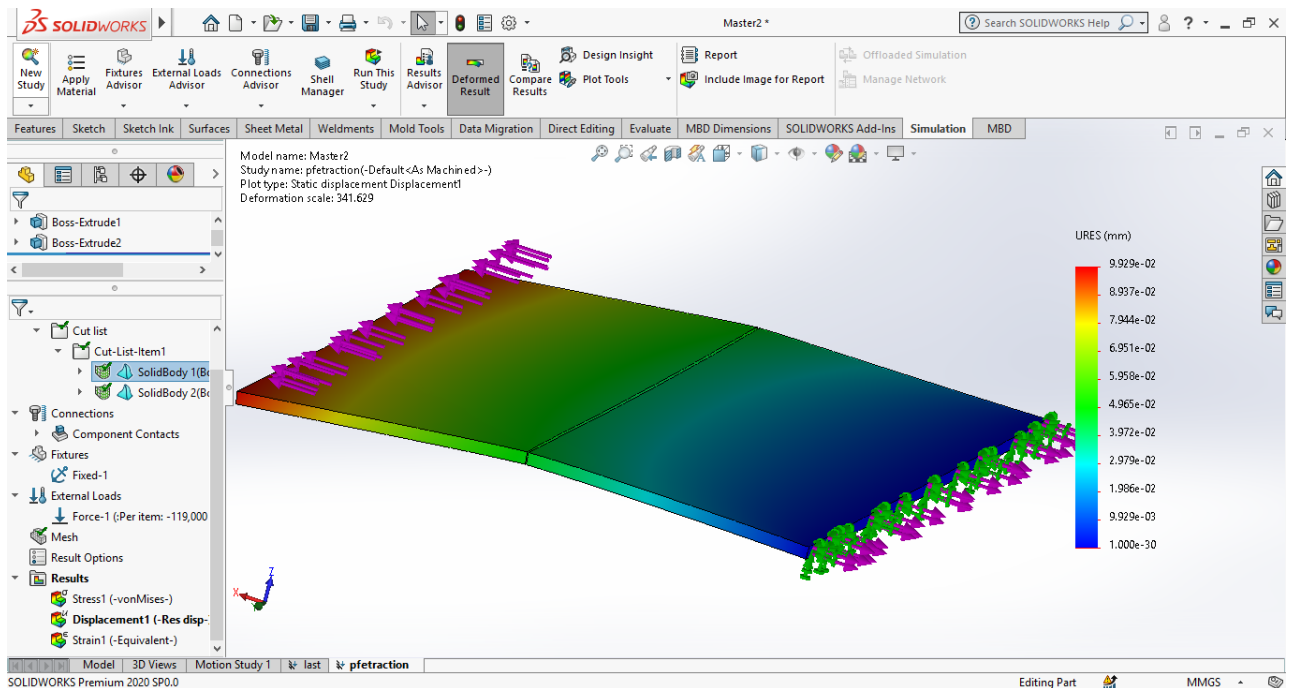
✓ Deuxièmes cas :

1. En traction :



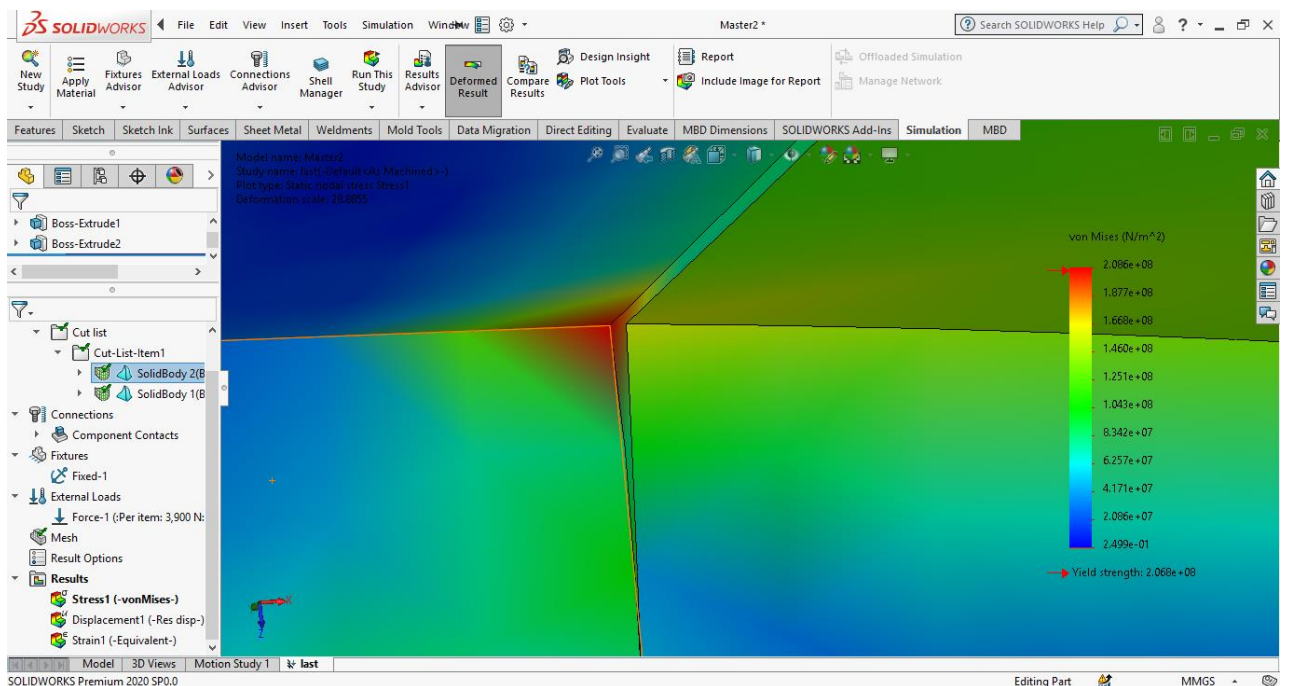
**Figure IV.18** — Simulation en traction (déformation) avec une force de 190KN/m<sup>2</sup>

On remarque qu'on a atteint le sigma admissible du matériau avec 190KN/m<sup>2</sup>.

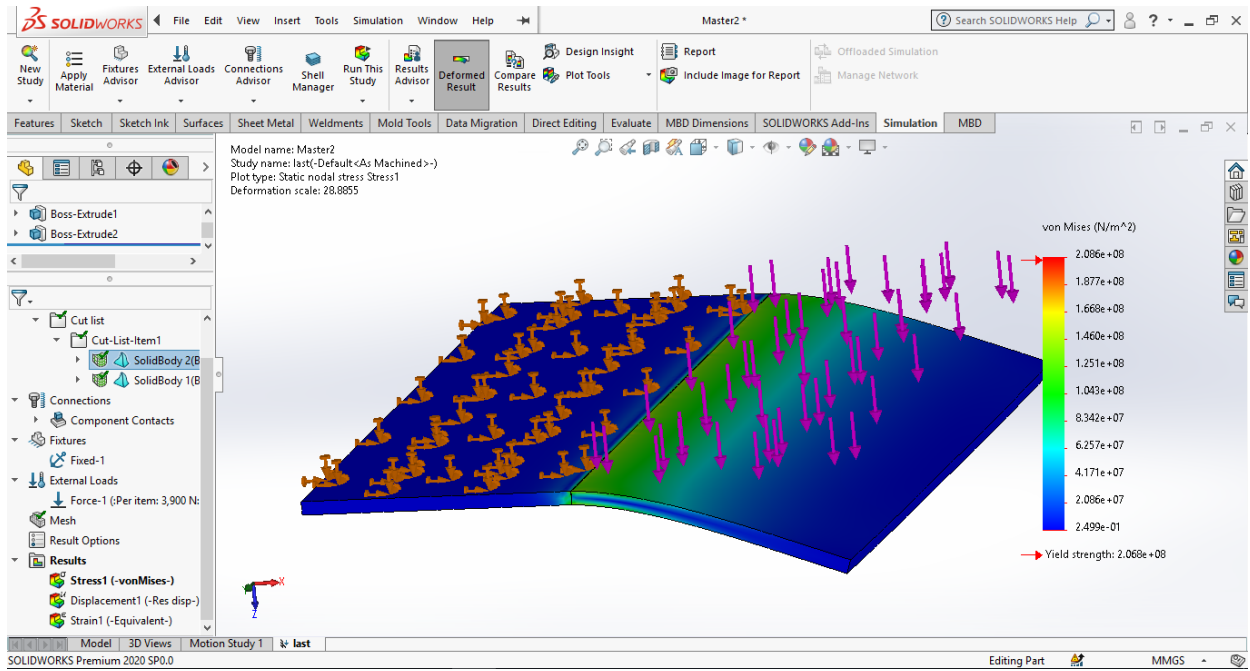


**Figure IV.19** — Simulation en traction (déplacement) avec une force de  $190\text{KN/m}^2$

2. En flexion :



**Figure IV.20** — Fissures entre les plaques (soudure) après une pression de  $3.9\text{KN/m}^2$



**Figure IV.21** — Simulations en flexion (déformation) avec une force de 3.9KN/m<sup>2</sup>

**Conclusion du troisième cas :**

Notre plaque a pu résistée jusqu'à : 190KN/m<sup>2</sup> en traction

3.9KM/m<sup>2</sup> en flexion

#### IV.2.4 CONCLUSION

L'étude de ce travail se concentre sur le soudage par friction malaxage des aciers inoxydables. La problématique majeure liée à l'application du soudage par friction malaxage de ces aciers est le développement d'outil capable de résister aux efforts mis en jeu lors de procédé.

Le but de notre travail était d'étudier l'application du procédé de soudage par friction malaxage (FSW) sur les aciers inoxydables. Malgré que ces derniers soient difficilement soudables, nous avons obtenu une bonne qualité de la soudure d'après la simulation. Le cordon était homogène. Certains paramètres comme l'avance et la vitesse de rotation peuvent influencer sur la qualité de la soudure. Un des problèmes rencontrés était parfois la présence de déformations au niveau des échantillons soudés qui peut être dû à l'effet thermique résiduel et la pression appliquée.

Une partie de notre recherche bibliographique a montré qu'il est nécessaire de connaître l'évolution des aciers inoxydables d'une manière intégrée tout au long du processus d'élaboration. Ces propriétés mécaniques sont en partie liées à la nature et à la proportion des éléments de ces alliages qui les composent.

Une deuxième partie de notre recherche bibliographique a montré que ces matériaux sont dans l'ensemble difficilement soudables car d'une part, ils sont sujets aux criques lors de la solidification de la soudure et d'autre part, leurs caractéristiques mécaniques après soudage changent fortement. Cependant, l'utilisation du procédé de soudage FSW peut améliorer certains de ces résultats.

Nos résultats ne sont cependant pas essentiellement basés sur l'outil. Les paramètres opératoires (la vitesse de rotation, la pression verticale, la vitesse d'avance) nécessaires à l'obtention d'une soudure sans défaut sont également étudiés et optimisés afin de réduire les sollicitations appliquées à l'outil et idéalement à augmenter le rendement du procédé.

Il est clair que le soudage de ces aciers est relativement vaste et que les difficultés rencontrées pour souder de l'acier inoxydable ne sont pas mes mêmes que celles rencontrées pour souder

de l'acier tendre, d'après la recherche bibliographique. Les conditions les plus sévères possibles ont été atteintes lors du soudage de ce matériau.

Enfin, si des applications spécifiques pour lesquelles le procédé semble prometteur étaient proposées, les aciers correspondant à ces applications seraient utilisés.

## REFERENCES

- 1 : Utilisation de rivets pour riveter les métaux et autres matériaux 2019-11-12 par dumvybaveni.cz.
- 2 : Représentation de clavette par ikastaroak.ulhi.
- 3: Soudage par friction linear par Philip Threadgill 2001 TWI Ltd.
- 4 : le soudage par friction, un procédé de soudage multiple et innovateur par - soudage info, r. Koen Faes, IBS (Traduction : M.C. Ritzen - IBS-BIL).
- 5 : concours ENSAM-ESTP- ARCHIMEDE épreuve de science industrielle PSI, Etude d'une machine de soudage par friction – malaxage.
- 6 : Friction Stir Welding – principes de la technologie et cas d'applications industriels Amarilys BEN ATTAR – Institut de Soudure.  
NAE Tech Hour FSW 30 Mars 2016.
- 7 : Ecole doctorale n° 364 : Sciences Fondamentales et Appliquées, l'École nationale supérieure des mines de Paris par Sabrina GASTEBOIS le 9 juillet 2015.
- 8 : ISO 857-1 :1998, Soudage et techniques connexes — Vocabulaire — Partie 1 : Soudage des métaux online browsing platform (OBP).
- 9 : Étude numérique et expérimentale des mécanismes thermiques lors du soudage par friction malaxage à Saguenay, Québec en janvier 2011 par Franco-Québécois.
- 10 : Caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de la liaison bimétallique Acier Ordinaire E36/ Acier anti-usure, MAROUF.H, Magister 2012.
- 11: K.H.Lo,C.H.Shek,J.K.L.Lai : Recent developments in stainless steels, Materials Science and Engineering R 65 (2009).
- 12 : J. Baralis & G. Maeder : Précis métallurgie, Nathan, Paris, 1997.
- 13 : Laurent ANTONI & Alain GALERIE : Corrosion sèche des métaux, Techniques de l'Ingénieur, M 4224.
- 14 : Dudognon Julien : Étude des modifications structurales induites par implantation ionique dans les aciers austénitiques, thèse de doctorat de l'université d'Orleans, Décembre 2006.
- 15 : P. Lacombe, G. Béranger, Les aciers inoxydables, Chapitre II, Les éditions de physiques 1990.
- 16 : Thèse / Jean-Yves MAETZ / Evolution de la microstructure d'un acier inoxydable lean duplex lors du vieillissement / 2014.
- 17 : SolidWorks : [solidworks.fr](http://solidworks.fr) Profil de la société -archive-
- 18 : «Nos clients témoignent / A-S3D» -archive-, sur le site logiciel-cao.com consulté le 10 mars 2017.
- 19 : mise en plan dans SolidWorks, «Formation SolidWorks - Vues de mise en plan sous SolidWorks» -archive- 16 septembre 2016 consulté le 10 mars 2017.