

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

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Ingénierie des matériaux et des surfaces
Génie mécanique

**Simulation numérique d'un soudage par friction
malaxage d'un alliage d'aluminium et un acier réalise
sous logiciel ABAQUS**

Proposé et encadré par :

Pr. Hadji Mohamed
Dr. Saber benomar

Réalisé par :

Sayah Brahim
Djellal Asma

Année universitaire 2019/2020.

Remerciement :

Mes remerciements à dieu tout puissant pour

Pla volonté, la santé et la patience qu'il m'a donnée toujours.

Je tiens à remercier chaleureusement mon promoteur : Docteur **Saber Benomar** d'avoir accepté de diriger ce travail et de m'avoir prodigué des

Conseils scientifiques, ont été précieux et des orientations pour la réalisation de ce travail.

Des remerciements aux membres du jury, pour l'intérêt et d'avoir accepté de juger ce travail.

A l'ensemble des enseignants qui ont contribué à ma formation ainsi que tout le personnel administratif qui, a participé au bon déroulement de ce travail, les enseignants du département de génie mécanique. Pour sa disponibilité, sa patience et ses conseils qu'ils ont prodigué.

Mes remerciements vont aussi à tous mes parents, mes enseignants, mes amis et mes collègues de la promotion 2020.

A tous ceux qui, par leur encouragement ou leur amitié.

Dédicace ...

Je dédie ce travail :

Ma chère mère qui n'a vécu que pour me voir réussir dans ma vie et avoir un

Bon statut social

A mon père

A mes frères et sœurs et à tous ma famille

A tous mes amis et collègues de la promotion 2020

A tous ceux qui m'ont aidé à finir ce mémoire.

Brahim

Dédicace ...

*A ceux qui se sont toujours dévoués et sacrifiés
Pour moi ; ceux qui m'ont
Encouragé et soutenu à combattre les aléas de la
vie et donner le meilleur de moi ; en témoignage
De mon éternelle reconnaissance je dédie
Essentiellement cette thèse à mes parents.
A mes chers sœurs ainsi qu'à mes chers
Frères ; qui m'ont énormément aidé et à qui je
Témoigne toute mon affection et ma profonde
Admiration.
Je finis par remercier toute personne qui m'a
Aidé et soutenue, de près ou de loin, pour que ce modestes mémoire aboutisse*

Asma

ملخص:

الهدف من هذه الدراسة النهائية هو المحاكاة الرقمية لعملية اللحام بدمج الاحتكاك FSW سبائك الألومنيوم والفولاذ باستخدام برنامج ABAQUS معلمات اللحام مثل سرعة دوران الأداة ومعدل التغذية (الأداة / أو الجزء) والقوة المطبقة على الأداة ومعامل الاحتكاك الكتف / المواد المراد تجميعها في مجال درجة الحرارة وتدفق الحرارة المتولد.

Résumé:

Le présent travail de fin d'études a pour objectif de simuler numériquement le procédé de soudage par friction malaxage(FSW) d'alliage d'aluminium et acier en utilisant le logiciel Abaqus en tenant compte de l'effet de certains paramètres de soudage comme la vitesse de rotation de l'outil, la vitesse d'avance (outil/ ou pièce), la force appliquée sur l'outil et le coefficient de frottement Shoulder/matériaux à assembler sur le champ de température et le flux de chaleur générés.

Abstract

The aim of this latest study is to digitally simulate the Friction Friction Welding (FSW) process of aluminum alloys and steel alloys using Abaqus software taking into account the effect of certain welding parameters such as tool rotation speed, feed rate (tool / part), the force applied to the tool and the coefficient of friction of the shoulder / material to be assembled in the domain of temperature and heat flux generated.

Table des matières :

Table des matières :	8
Liste des figures :	10
Liste des tableaux :	12
Introduction générale.....	1
1 Chapitre I.....	2
1.1 Introduction :	2
1.2 Les Procédés de Soudage :	2
1.3 Le soudage par fusion :	3
1.3.1 Le soudage à l'arc électrique :	3
1.3.2 Le soudage par faisceaux d'électrons :	7
1.3.3 Le soudage par faisceaux laser :	9
1.3.4 Soudage par résistance :	12
1.4 Soudage à l'état solide :	14
1.4.1 Soudage par diffusion :	14
1.4.2 Soudage par friction :	16
1.4.3 Soudage par friction-malaxage :	19
1.4.4 Soudage par ultrason :	20
1.4.5 Soudage par impulsion magnétique :	22
1.4.6 Soudage par explosion :	24
1.5 Conclusion partielle :	28
2 Chapitre II	29
2.1 Le procédé de soudage par friction-malaxage :	29
2.1.1 Principe du soudage FSW :	29
2.1.2 Géométrie de l'outil :	33
2.1.3 Différents types d'outils :	38
2.1.4 Les différentes phases opératoires :	40
2.1.5 Paramètres du soudage par friction-malaxage FSW :	42
2.2 Avantages et inconvénients du procédé :	43
2.3 Phénomènes physiques se produisant lors du soudage par friction malaxage :	44
3 Chapitre III	46
3.1 Présentation du code de calcul par éléments finis ABAQUS [97] :	46
3.2 Les Logiciels sur le marché :	46
3.3 Deux solveurs principaux:	46
3.4 ABAQUS :	47

3.4.1	ABAQUS/Standard : Algorithme implicite	47
3.4.2	ABAQUS/Explicit:.....	47
3.5	Comparaison :.....	48
3.6	Présentation des différents types d'éléments Abaqus :.....	49
3.7	Les systèmes d'unités dans le logiciel ABAQUS : [97]	49
3.8	Structure d'une analyse sous Abaqus :.....	50
3.9	Caractéristiques du logiciel ABAQUS :.....	51
3.10	Présentation du logiciel ABAQUS /CAE :.....	52
4	Chapitre IV : Simulation numérique	59
4.1	Module part :	59
4.2	Module property :.....	59
4.3	Module assembly	60
4.4	Module step :	62
4.5	Module interaction :.....	62
4.6	Module mesh :	63
4.7	Module load :.....	63
4.8	Module job :.....	64
4.9	Module vitalisation :.....	64
	Conclusion générale	66

Liste des figures :

Figure 1.1:Classification des procédés de soudage [5].	3
Figure 1.2:Procédé de soudage à l'arc électrique [1] (a) électrode enrobé, (b) TIG,(c) MIG. [5].	4
Figure 1.3:Micrographie des joints soudure dissimilaires soudées par MIG	5
Figure 1.4: Section d'une soudure Al / Fe réalisée par procédé TIG [10].	6
Figure 1.5: Assemblage du processus de soudage à l'arc à double face (DSAWB) [15].	7
Figure 1.6: Schéma d'une machine à souder par faisceau d'électrons [17].	8
Figure 1.7 : Soudage dissimilaire Al/ acier souder par faisceau d'électrons [18].	8
Figure 1.8 : Le soudage par laser [19].	9
Figure 1.9: Procédé de soudage par faisceaux laser ; a : laser focalisé. b : laser délocalisé [12].	10
Figure 1.10 : Coupes transversales de soudures : a) Fe sur Al, b) Al sur Fe [21].	11
Figure 1.11 : Joint dissimilaire soudé par faisceau laser défocalisé [24].	12
Figure 1.12: Schéma de principe du procédé de soudage par résistance [25].	13
Figure 1.13 : Soudure Al / Fe réalisée par résistance (par point) : (a) apparence de la section croisée du joint-soudé, (b) effet du soudage par courant sur la résistance [34].	14
Figure 1.14 : Schéma de principe de soudage par fusion.	15
Figure 1.15 : Joint dissimilaire Al / acier soudé par le procédé de soudage par diffusion [38].	16
Figure 1.16 : Soudage par friction (a) schéma d'une machine de soudage par friction, (b) exemple de soudage pour la fabrication des vérins hydrauliques.	17
Figure 1.17 : Macrographie de soudage par friction AA6061-AISI 4340 [47].	17
Figure 1.18: Joint dissimilaire A5083 / S10C obtenu par le soudage par friction : composés intermétalliques à l'intérieur de la couche IMC d'après l'analyse EDS de la soudure [49].	18
Figure 1.19 : Différentes formes de couches intermétalliques dans une soudure :(a) taches intermétalliques, (b) poussière de intermétallique, (c) couche intermétallique [49].	19
Figure 1.20 : Schéma du procédé de soudage par friction malaxage [63].	20
Figure 1.21 : Soudage par ultrasons :a) schéma du procédé b) machine de soudage	21
Figure 1.22 : Observation de l'interface dans le joint A1050 / SS400 soudé par ultrasons [66].	21
Figure 1.23 : Principe de soudage par impulsion magnétique.	22
Figure 1.24 : Soudage par impulsion magnétique AL / Fe ; a) La microstructure d'interface joint A1050/A1050 et A5052/SPCC. b) le mode rupture de joint soudé SPCC / Al [68].	23
Figure 1.25 : Analyse micrographique à l'aide SEM d'un joint soudé par impulsion magnétique Al / Fe [69].	23
Figure 1.26 : Soudage par pression magnétique acier / aluminium : a. micrographies MEB de l'interface de soudure avec couche intermédiaire [70].	24
Figure 1.27 : Schéma du procédé de soudage par explosion [72].	25
Figure 1.28 : Défaut de manque de fusion au stade initial et arrachement local du matériau de placage [73].	26
Figure 1.29: Assemblage par explosion Al / Fe [74].	26
Figure 1.30 : Microstructures de soudage par explosion : (a) acier haute résistance faiblement allié à l'aluminium (b) l'aluminium / l'acier à double phase [75].	27

Figure 1.31: Microstructure des échantillons soudés par explosion, pour différentes épaisseurs de la couche intermédiaire : (a) de 0,2 mm, (b) 0,5 mm, (C) de 1,0 mm, et (d) de 2,0 mm [76].

.....	28
Figure 2.1: Représentation schématique du principe de soudage par friction-malaxage. [79].	30
Figure 2.2: Génération du cordon de soudure de proche en proche [80].	31
Figure 2.3 : Présentation du soudage par friction-malaxage[80].	31
Figure 2.4 : (a) Phase de plongée.	32
Figure 2.5 : (b) Phase de soudage.	32
Figure 2.6 : (c) Retrait de l'outil.....	32
Figure 2.7: Outils de soudage FSW [83]	34
Figure 2.8: Outils FSW développé par TWI [85].	35
Figure 2.9 :Schématisation de l'outil de soudage et de quelques géométries des pions et de l'épaulement [86].	37
Figure 2.10 : Les différentes technologies de soudage [88].	38
Figure 2.11 : Différents technologies d'outils (Normes, ARB07a).	40
Figure 2.12 : Phase 1 – Phase De Descente. [77].	41
Figure 2.13 : Phase 2 : Réalisation De Cordon[77].	41
Figure 2.14 : Phase 3 : Retrait de l'outil [77].	42
Figure 2.15 :Visualisation des paramètres des soudages [89].	43
Figure 3.1 : Organigramme de résolution de schéma implicite. [94].	47
Figure 3.2 : Organigramme de résolution de schéma explicite.	48
Figure 3.3 : Différents types d'éléments disponibles dans la bibliothèque d'Abaqus.	49
Figure 3.4: structure d'analyse sur ABAQUS.[93].	50
Figure 3.5 : Interface de code d'ABAQUS.	51
Figure 3.6 : Fenêtre de module part.	52
Figure 3.7 : Fenêtre de module Property.	53
Figure 3.8 :Fenêtre de module Assembly.	54
Figure 3.9: Fenêtre de module step.	54
Figure 3.10: Fenêtre de module interaction.....	55
Figure 3.11: Fenêtre de module load	56
Figure 3.12 :Fenêtre de module mesh.	57
Figure 3.13 : Fenêtre de module job.	57
Figure 3.14: Fenêtre de module Visualisation.	58
Figure 4.1 : module part bien termine.	59
Figure 4.2: du module assembly.	60
Figure 4.3 : module du step	62
Figure 4.4: module d'interaction.	62
Figure 4.5 : Le maillage.	63
Figure 4.6 : module load.	64
Figure 4.7 : de monitor.	64
Figure 4.8 : module visualisation	65

Liste des tableaux

Tableau 3.1: Inconvénients et avantages de module implicite et explicite. [94].....	48
Tableau 3.2: les unités dans ABAQUS. [93].	50
Tableau 4.1: de propriétés	60

Introduction générale

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.

Dans ce travail nous nous sommes intéressés au soudage par friction malaxage deux plaques en alliage d'aluminium et un acier afin d'étudier les déformations résiduelles.

Le mémoire est composé de 4 chapitres.

Le premier chapitre présente les différents types de procédés de soudage en fusion et à l'état solide et qui sont utilisés pour le soudage dissimilaire. Une revue bibliographique des travaux de recherche publiés dans chaque type de soudage a été faite. Nous avons aussi établi un tableau comparatif résumant les différents procédés de soudage et leurs propriétés. À partir de ce tableau nous avons opté pour le soudage par friction malaxage.

Le deuxième chapitre présente Le procédé de soudage par friction malaxage et les avantages et inconvénients du procédé et les phénomènes physiques se produisant lors du soudage par friction malaxage.

Le troisième chapitre présente les généralités sur le logiciel **ABAQUS**.

Le quatrième chapitre présente simulation numérique des deux plaqués d'aluminium et acier sous **ABAQUS**.

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

1 *Chapitre I*

1.1 Introduction :

Nous présentons brièvement différents procédés de soudages employés pour assembler l'acier avec l'aluminium. Ils sont classés en deux catégories : les procédés de soudage par fusion et ceux à l'état solide, comme le soudage par friction malaxage.

FSW est un procédé utilisé en général, cependant il peut être appliqué dans certains cas particulier, en mode de soudage hétérogène pour assembler deux matériaux différents tel que l'aluminium /acier.

L'assemblage par soudage occupe une place importante dans tous les domaines de l'industrie et de la construction mécanique. Il forme un maillon primordial dans l'assemblage de bateaux, de trains, d'avion, de fusée de voiture, de ponts, de tuyaux, et de réservoirs. La facilité de sa mise en œuvre et le contrôle des propriétés mécaniques telle la résistance mécanique, rendent le soudage très indispensable surtout du point de vue économique [1].

Le soudage est un procédé qui consiste à assurer la liaison permanente de deux ou plusieurs parties constitutives de nature identique ou différente, soit par chauffage, soit par pression, soit par l'action simultanée des deux, de la chaleur et de la pression. Le soudage peut être effectué avec ou sans emploi d'un produit d'apport. On considère qu'un matériau métallique soudable par un procédé et pour un type d'application, lorsqu'il est possible d'assurer une continuité métallique (chimique, mécanique etc.) par la constitution d'un joint soudé qui, par ses caractéristiques locales et les conséquences globales de sa présence, satisfait au mieux les propriétés requise pour l'application souhaitée [2].

1.2 Les Procédés de Soudage :

On dénombre quelques dizaines de procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres, la continuité métallique est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques. Les sources d'énergies utilisées dans le domaine du soudage sont de types chimiques, électriques, optiques ou mécaniques [3].

Selon Perry et al. [4], on peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre comme il a été présenté sur la figure .1.

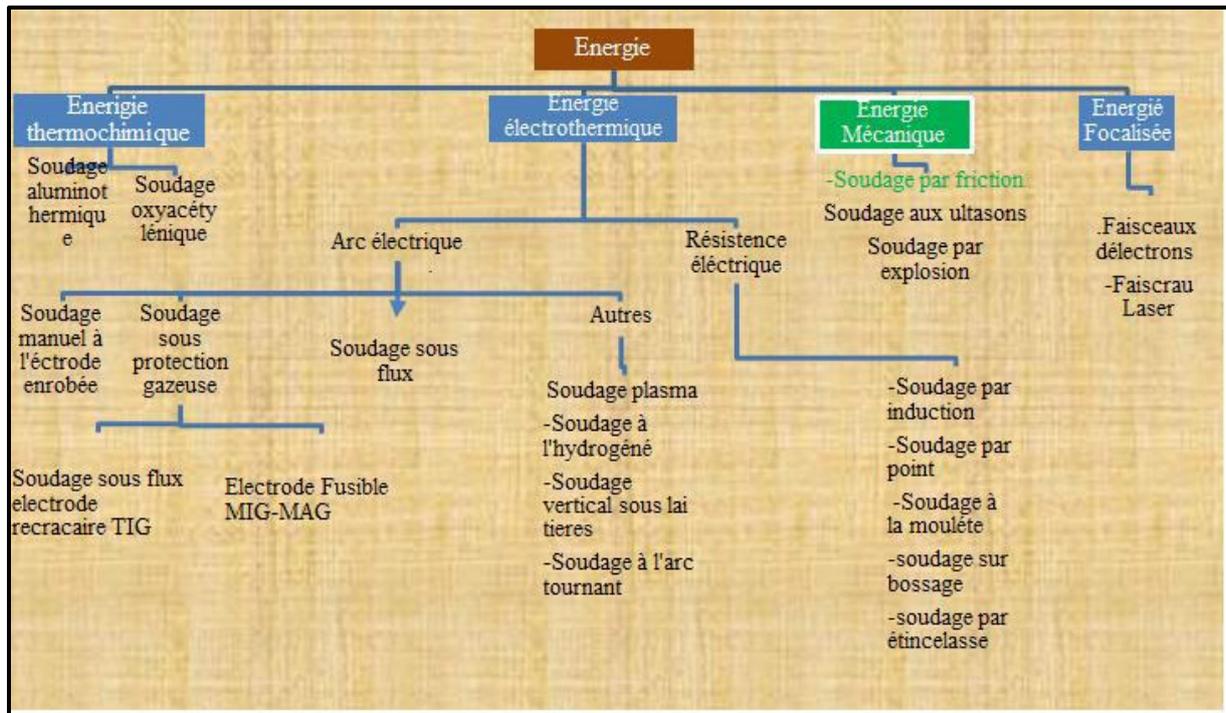


Figure 1.1: Classification des procédés de soudage [5].

1.3 Le soudage par fusion :

La plupart des procédés de soudage en phase liquide ont été développés depuis la fin du XIXe siècle puisqu'avant on ne disposait pas de moyens pour focaliser l'énergie de manière à faire fondre les métaux localement. Dans l'industrie le procédé plus utilisé pour construire des assemblages de matériaux de mémé pépérite est le soudage en phase liquide. Nous allons voir comment elle est adaptée pour le soudage dissimilaire aluminium /acier.

1.3.1 Le soudage à l'arc électrique :

Lors de procédée de soudage à l'arc, l'apport calorifique est assuré par un arc électrique entre une électrode et la pièce à assemblée. Cette technique est la plus répandue en soudage. Le métal d'apport provient d'une baguette indépendante ou de l'électrode elle-même. L'arc électrique est facile à produire et possède une intensité élevée ; il existe beaucoup de moyens pour le mettre en oeuvre, ainsi la figure (.2) représente quelques-uns parmi ces moyens.

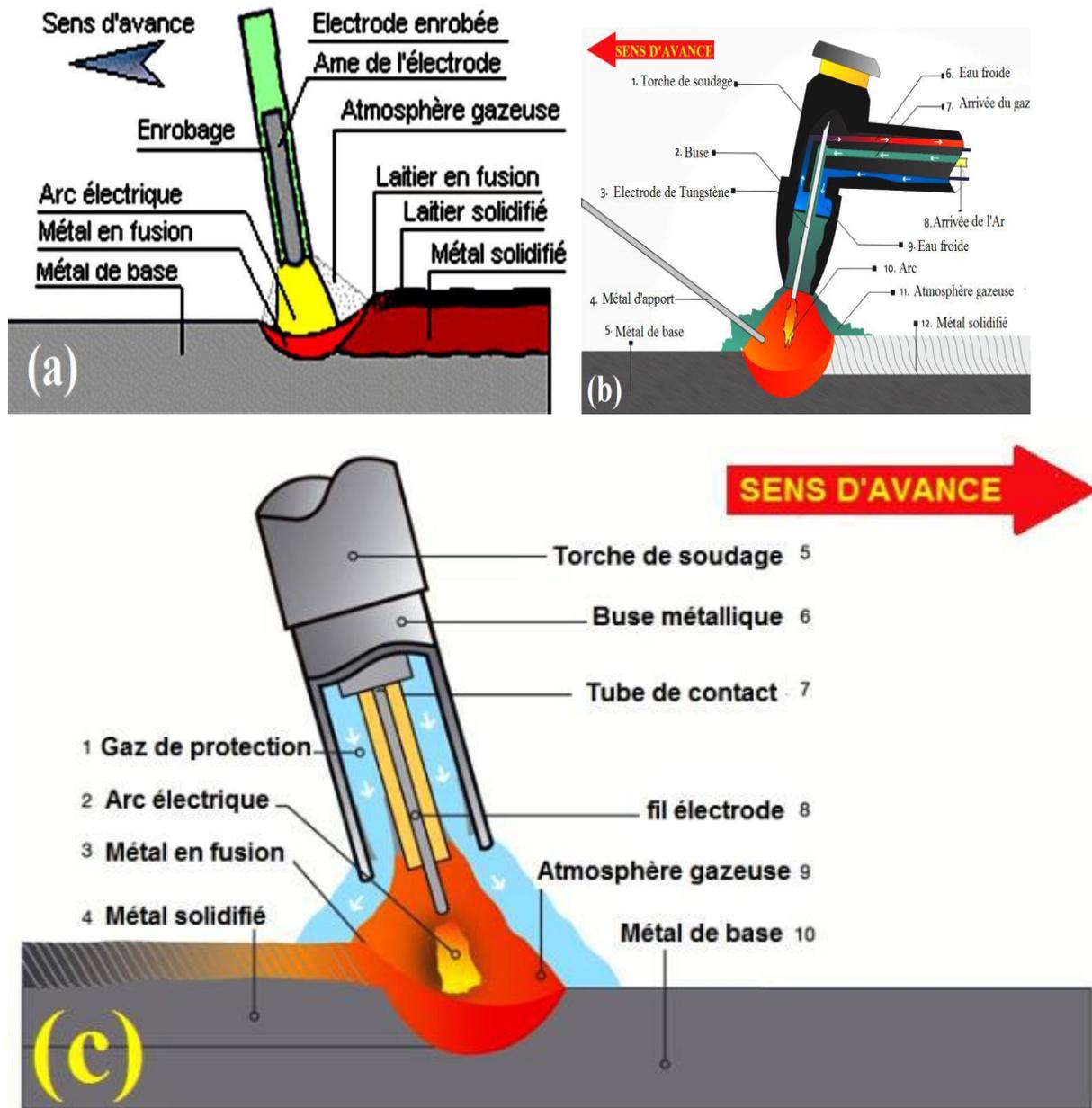


Figure 1.2: Procédé de soudage à l'arc électrique [1] (a) électrode enrobé, (b) TIG, (c) MIG. [5].

Pour le soudage hétérogène de l'acier avec un alliage d'aluminium, deux méthodes sont généralement utilisées : la première méthode est le TIG (Tungstène Inerte Gaz) où l'électrode est réfractaire, c'est-à-dire qu'elle est protégée par un mélange gazeux (Figure 2-b-) [2]. Des études antérieures montrent que la méthode de soudage à l'arc la plus courante et le type de joint de soudure utilisés pour produire des soudures en aluminium et en acier sont le

gaz inerte au tungstène (TIG) et la soudure par joint de recouvrement, respectivement [6, 7]. Le soudage TIG est plus favorable que le soudage au gaz inerte au métal (MIG) [8], La seconde méthode est le MIG (Métal Inert Gas), elle fait usage de fil fourré. Le métal d'apport est fourni par l'électrode elle-même qui agit comme un fil fusible sous protection gazeuse [9]. La fusion est obtenue grâce à un arc électrique s'établissant entre le fil-électrode, continu et fusible, et le métal de base (Figure I. 2-c-).

Dans ce cas, les alliages d'aluminium constituent le matériau d'apport. Ce procédé est suivi afin de diminuer la température de soudage et donc contrôler la quantité de composés intermétalliques puisque c'est la nature de ces derniers qui déterminera la résistance de l'interface Al / Fe. Les températures atteintes se situent en dessous de la température de fusion de l'acier de manière à ce que seul l'aluminium entre en fusion comme il a été noté dans les travaux d'He et al. [10].

Zong et all. [11] présentèrent une étude sur les alliages d'aluminium nommés 2B50 et l'acier inoxydable (1Cr18Ni9Ti) qui ont été soudés par soudage MIG en utilisant du métal d'apport Al-Si (4043). Ils ont étudié l'effet de différents revêtements sur les apparences de la surface des soudures. Les résultats ont montré que le revêtement aluminite avait une influence imparfaite pour améliorer l'apparence du cordon de soudure et qu'il y avait beaucoup de micro-fissures au milieu de la zone de liaison, toujours des zones de manque de fusion comme le montre la figure .3. (a-b et c). En conséquence, la fracture s'est produite à l'interface entre la zone de fusion et le métal de base en acier, avec seulement une résistance à la traction de 60 MPa. Des bons joints dissimilaires entre un alliage d'aluminium et un acier galvanisé excellente ont été obtenus (figure.3. d), atteignant avec une résistance à la traction moyenne de l'assemblage 193,6 MPa.

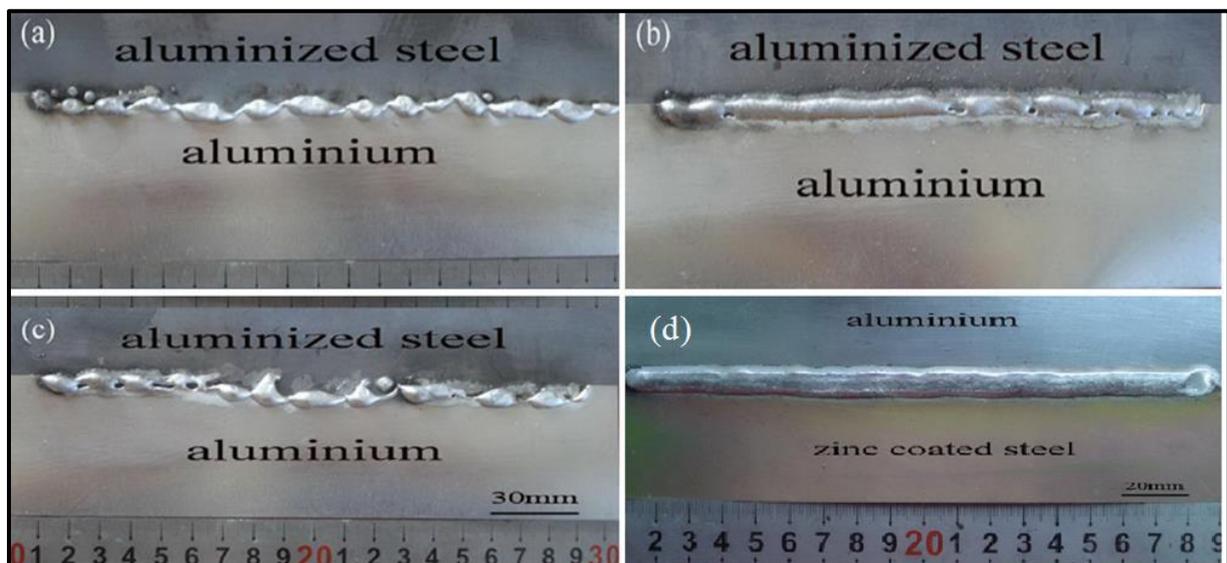


Figure 1.3:Micrographie des joints soudure dissimilaires soudées par MIG .

(a-c) joints entre l'acier aluminite / Al 2B50 fabriquées par différentes entrées de chaleur, (d) joint entre l'acier galvanisé /Al 2B50 [11].

Les travaux de Sierra et al. [12] montrèrent que de bon résultats ont été obtenus : une résistance à la traction jusqu'à 300 MPa pour des assemblages dissimilaires soudée par TIG (aciers inoxydables avec métal d'apport Al-4%Si). Le problème majeur rencontré est l'importante quantité de chaleur produite qui conduit à la formation d'une épaisse couche d'intermétalliques, néanmoins ce problème est surmonté par l'augmentation de la vitesse de soudage (jusqu'à 1 m/min) [12].

Les travaux de Song et all. [13, 14] présentèrent le procédé de soudage TIG avec un métal d'apport d'Al-Si (figure 4.) d'un joint dissimilaire d'alliage d'aluminium 5A06 et l'acier inoxydable ALSI321 de configuration bout à bout. Les auteurs ont étudié l'effet de la variation de la composition du métal d'apport sur les caractéristiques mécaniques, ils ont réussi à atteindre la valeur de 172.5MPa pour la résistance à la traction, ils ont conclu que c'est la différence de l'épaisseur de la couche intermétallique qui explique les variations de résistance.

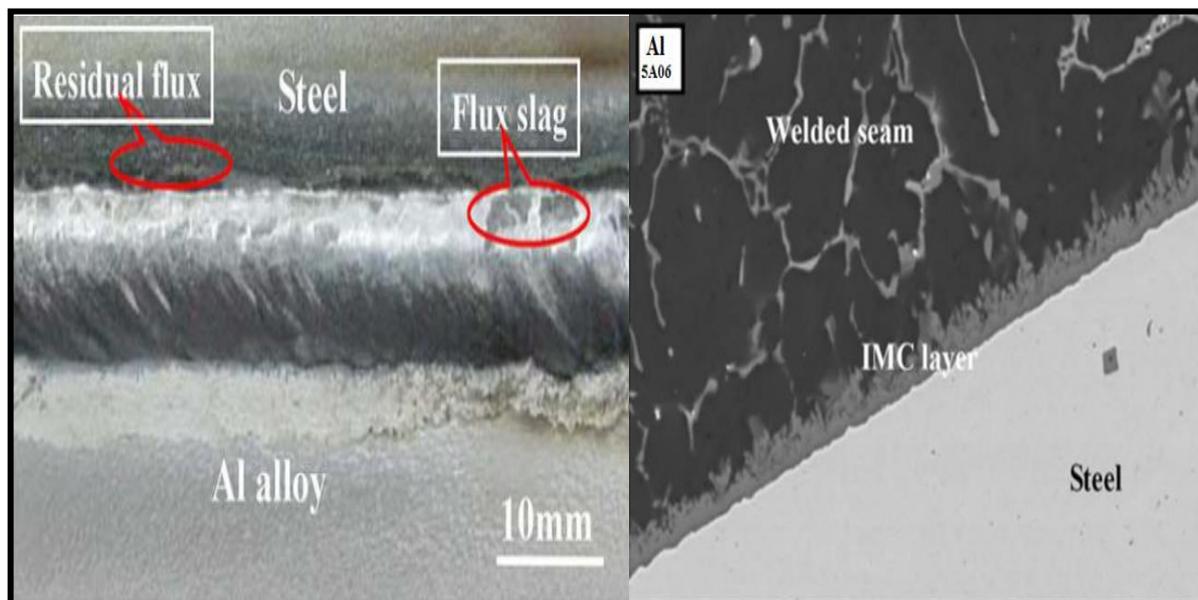


Figure 1.4: Section d'une soudure Al / Fe réalisée par procédé TIG [10].

Dans leurs travaux de Zheng Yee et al. [15] ont utilisé un nouveau procédé – soudage brasage à double face MIG-TIG (DSAWB) (figure. 5). Ce procédé a été appliqué pour assembler l'alliage d'aluminium AA5052 et l'acier à faible teneur en carbone Q235 d'une épaisseur de 3,0 MM. La microstructure et les propriétés mécaniques des joints ont été étudiés et comparées à celles de l'assemblage traditionnel de gaz inerte métallique (MIG). La résistance à la traction moyenne des joints DSAWB a atteint 148,1 MPa, soit 2,5 fois celle des joints MIG traditionnels.

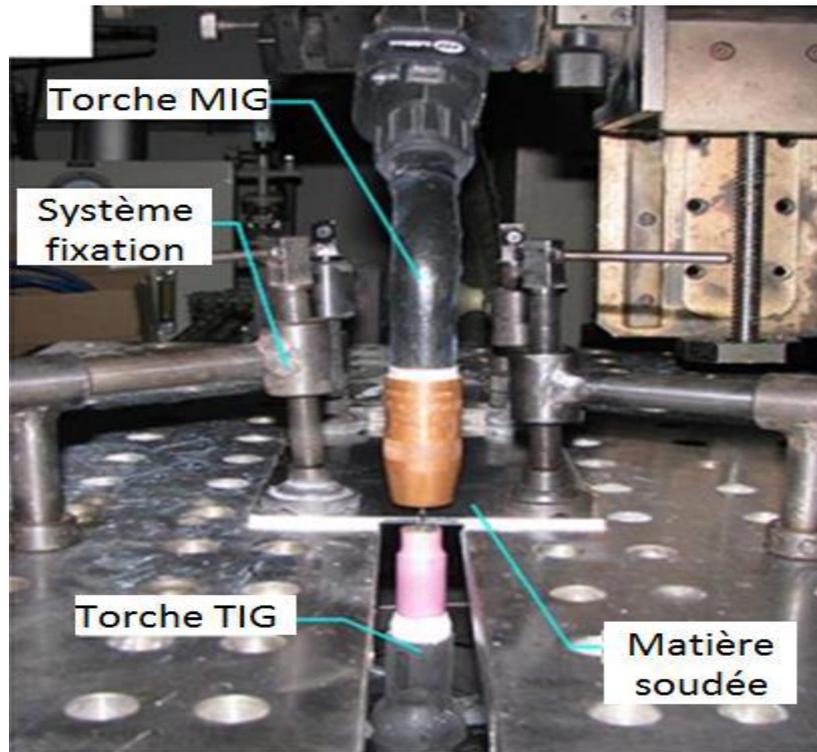


Figure 1.5: Assemblage du processus de soudage à l'arc à double face (DSAWB) [15].

1.3.2 Le soudage par faisceaux d'électrons :

Le soudage par faisceaux d'électrons est un procédé de soudage par fusion où la chaleur est générée par un impact d'électrons émis et accélérés grâce à un canon à électrons. L'émission de ces électrons se fait sous vide. Les électrons sont focalisés et envoyés à grande vitesse sur les tôles à souder.

A l'endroit de l'impact des électrons incidents, la chaleur est produite par une transformation de l'énergie cinétique des électrons en énergie calorifique, le matériau peut fondre localement, c'est une fusion ciblée. Ce procédé permet d'obtenir des taux de pénétration élevés et donc souder des plaques d'épaisseur importante [16].

On peut souder des épaisseurs plus de 300 mm d'acier en passe. Cette technique à haute densité d'énergie (acier /aluminium) nécessite le pouvoir de contrôler le flux de chaleur et de le limiter (figure 6.) [17].

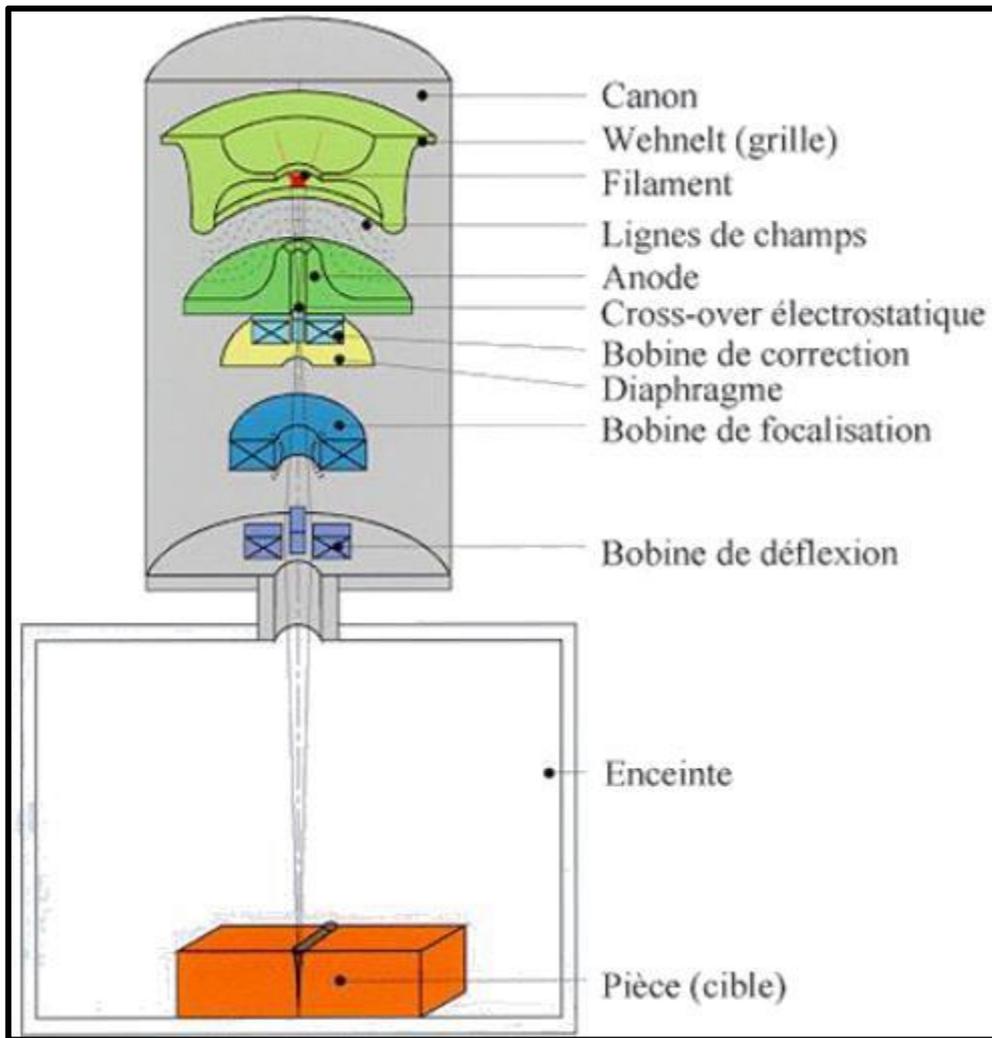


Figure 1.6: Schéma d'une machine à souder par faisceau d'électrons [17].

BACH ET AL. [18] ILS SONT INTERESSES A CETTE TECHNIQUE (PAR FAISCEAUX D'ELECTRONS) POUR ASSEMBLER DES JOINTS DISSIMILAIRES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM 6061 ET A5182 AVEC UN ACIER REVETU D'UNE COUCHE DE ZINC DE CONFIGURATION RECOUVREMENT (FIGURE 7), A RESISTANCE TRES ELEVEE JUSQU'A 210MPA.

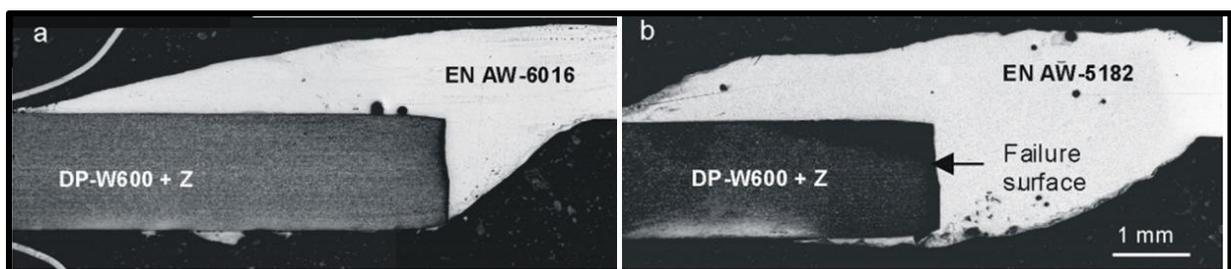


Figure 1.7 : Soudage dissimilaire Al/ acier souder par faisceau d'électrons [18].

1.3.3 Le soudage par faisceaux laser :

Le soudage par faisceaux laser est utilisé dans l'industrie automobile depuis quarante ans. En 1975, il fut installé un laser CO_2 pour le soudage des composantes de transmission. De nos jours, les meilleures d'entreprise à travers le monde profitent des avantages de ce procédé. Le soudage par faisceaux laser fournit une source de chaleur très concentrée comme le soudage par faisceau d'électrons (figure .8.) [12].

Avec un faisceau focalisé et une densité d'énergie élevée qui permet d'obtenir un capillaire de vapeur (figure .9 -a-). Avec un faisceau défocalisé pour lequel la densité d'énergie diminue inexorablement et l'apport calorifique se fait généralement par conduction thermique. (Figure .9-b-).

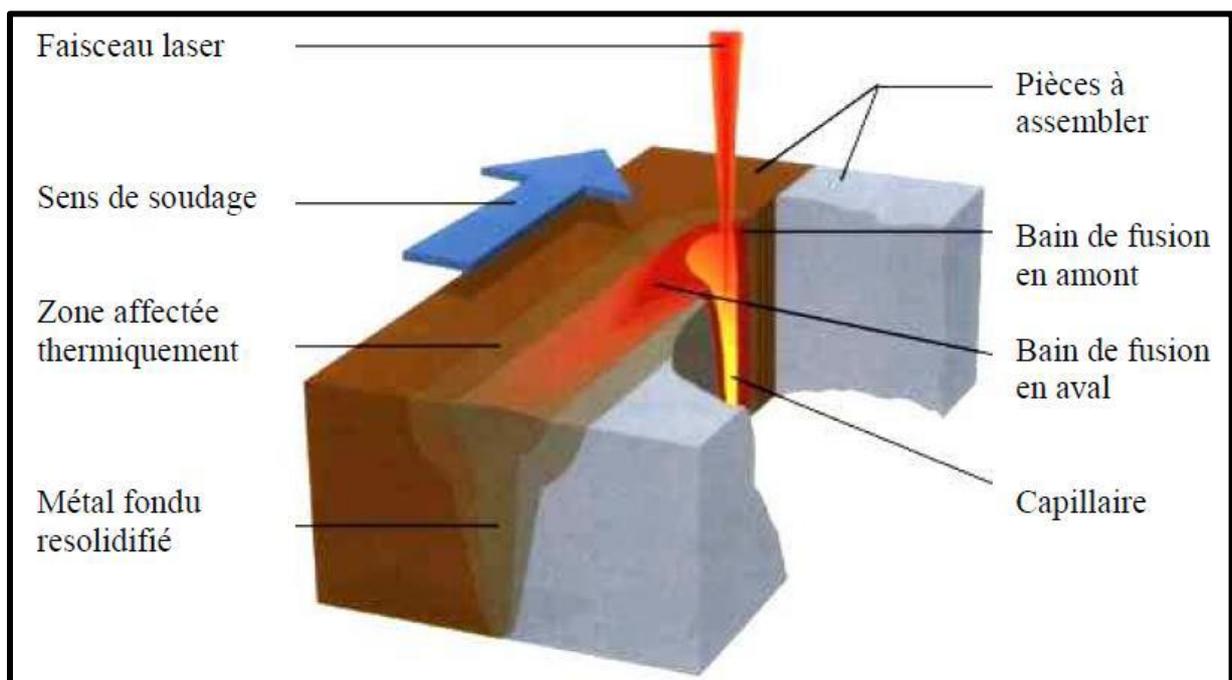


Figure 1.8 : Le soudage par laser [19].

Le soudage par faisceau laser est une technique à haute densité d'énergie. On peut distinguer deux régimes de fonctionnement du laser (Figure 8.) :

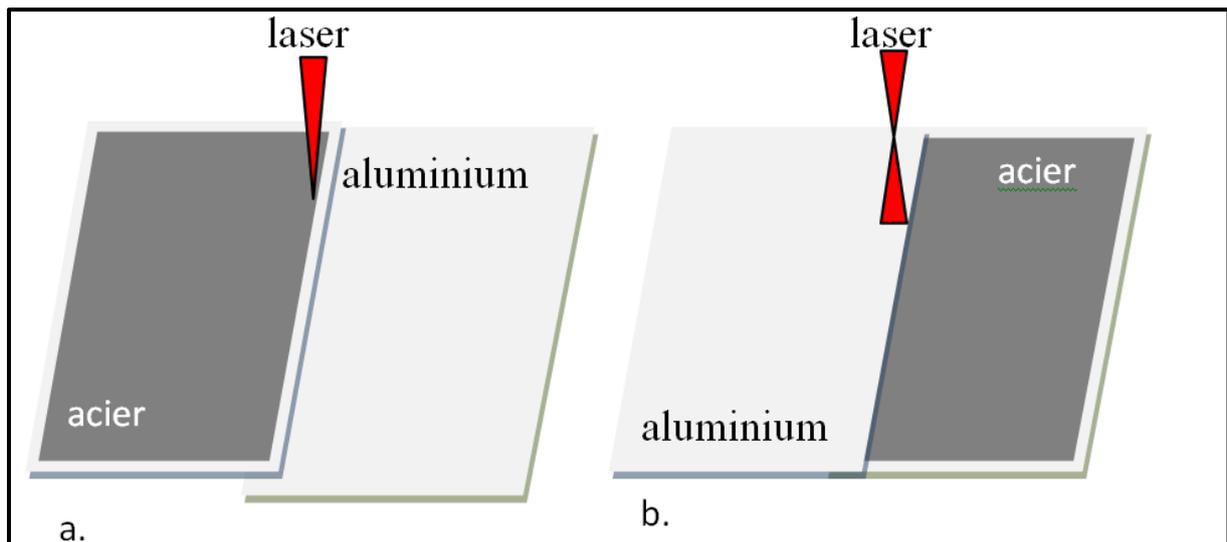


Figure 1.9: Procédé de soudage par faisceaux laser ; a : laser focalisé. b : laser délocalisé [12].

Concernant le soudage dissimilaire (aluminium avec acier) par un faisceau laser, des études ont été réalisées pour les deux configurations. Kata Yuma et al. [20] avaient testé deux configurations d'assemblages en transparence où l'acier peut être placé soit au-dessus de l'aluminium, soit en dessous, les deux métaux rentrent en fusion lors du passage du faisceau.

- a) Pour la première configuration, où un exemple est présenté sur la figure .10. a. Ces auteurs montrent qu'au-delà d'une certaine pénétration supérieure ou égale à 0.3 mm du bain de fusion dans l'aluminium lorsque la plaque d'acier est située au-dessus du dispositif, des fissures apparaissent à la périphérie du joint.
- b) Dans le cas de la configuration (b) (Figure .10. b), l'acier est placé au-dessus de l'alliage aluminium, l'aluminium entre en fusion grâce à une conduction thermique de la plaque d'acier. Les résultats de Sierra et al. [21] mettent en évidence un nombre important de fissures dans le joint (Figure .10. b) et une croissance limitée des phases intermétalliques fragiles.

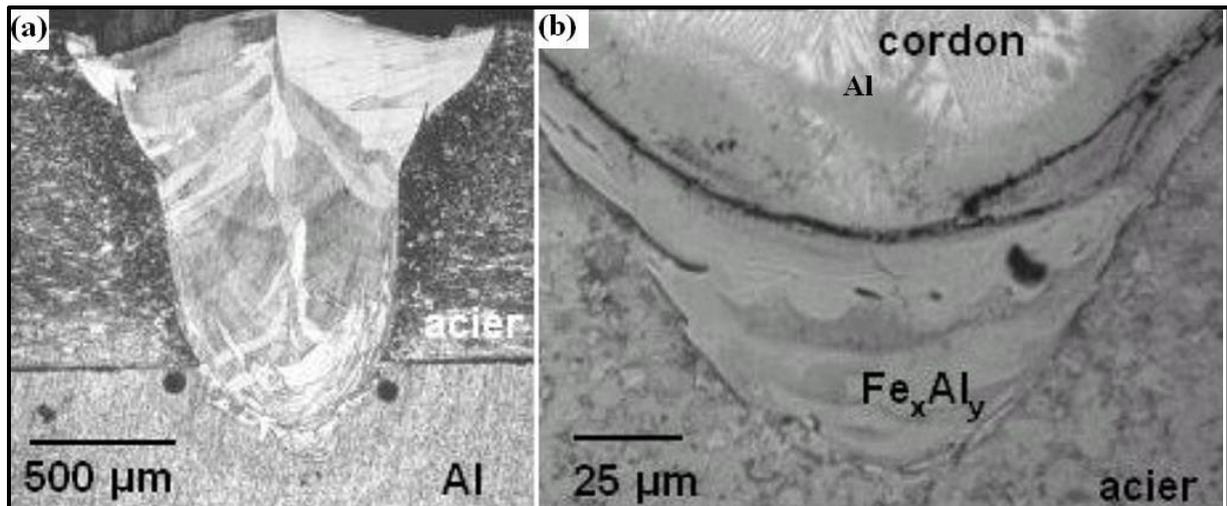


Figure 1.10 : Coupes transversales de soudures : a) Fe sur Al, b) Al sur Fe [21].

Le deuxième régime, où le faisceau laser est délocalisé sur l'acier, la température de soudage est inférieure et l'acier reste à l'état solide et la fusion de l'aluminium placé en-dessous, et ceci grâce à la chaleur transportée par conduction à travers l'acier [22, 23]. Si l'acier est placé au-dessus de l'alliage d'aluminium, l'aluminium rentre en fusion grâce à la conduction thermique de la plaque d'acier.

Kwang-Jin et al. [24] ont effectué des assemblages dissimilaires à l'aide d'un faisceau laser délocalisé pour une plaque d'alliage d'aluminium A6111 de 1,2 mm d'épaisseur et une plaque d'acier à faible teneur en carbone (SPCC) de 1,0 mm d'épaisseur (figure 11.) . Le faisceau laser délocalisé a été appliqué sur la surface supérieure de la plaque SPCC et le faisceau a été déplacé dans différentes conditions de soudage. Une résistance améliorée est obtenue lorsque l'interface de soudure est recouverte d'une couche IMC mince (environ 1 μm d'épaisseur) et continue.

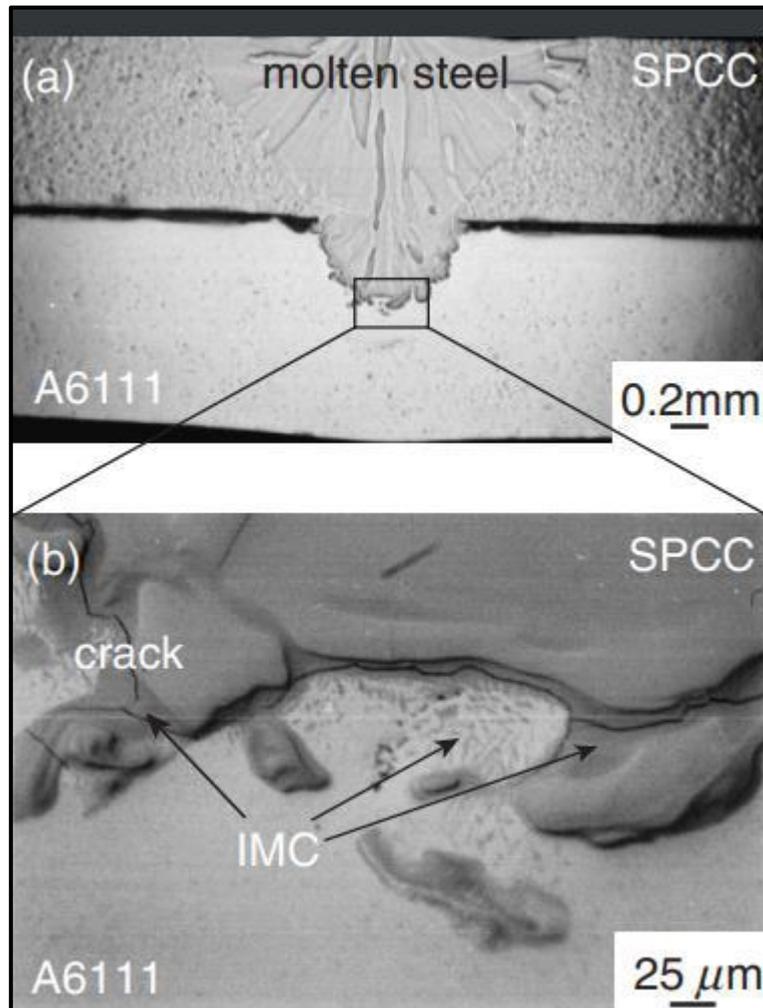


Figure 1.11 : Joint dissimilaire soudé par faisceau laser défocalisé [24].

1.3.4 Soudage par résistance :

Le soudage par résistance a été inventé par E. Thomson en 1877. Il reprend le principe du soudage par forgeage [1]. Il existe d'autres techniques qui reposent sur le même principe : le soudage par bossage, le soudage en bout, le soudage à molette.

L'augmentation de température est obtenue par effet Joule. La quantité de chaleur générée par cet effet est exprimée suivant la loi de Joule :

$$E = R \cdot I^2 \cdot t \quad (1)$$

Où :

E : Quantité de chaleur dégagée en joule [j].

R : Résistance électrique du conducteur exprimée en ohm [Ω].

I : Intensité du courant électrique exprimé en ampère [A].

t : Temps de passage du courant électrique exprimé en seconde [s].

En soudage par résistance, une force est appliquée pour maintenir les pièces à souder en contact (voir Figure I.12.). Un courant est alors imposé à travers les pièces au moyen d'électrodes. Il y a échauffement des interfaces et des volumes par effet Joule. L'action combinée de la force et de la température permet la réalisation du soudage.

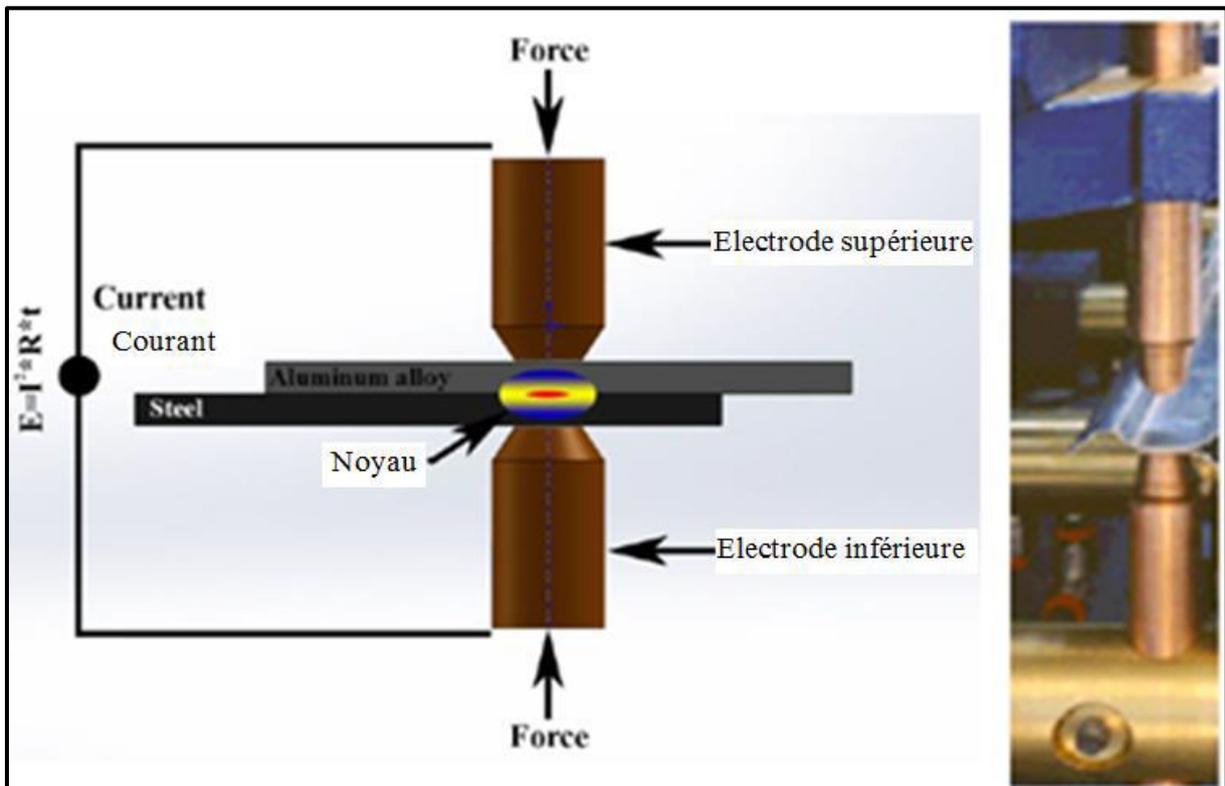


Figure 1.12: Schéma de principe du procédé de soudage par résistance [25].

Pour le soudage acier /aluminium en soudage par point, les études réalisées ont généralement été effectuées avec insert acier / aluminium calaminé [26]. Ces travaux montrent un bain de fusion présent uniquement dans l'alliage d'aluminium [27]. L'épaisseur de l'intermétallique est inférieure à $10\mu\text{m}$. Ozawa et al. [28-30] avaient effectué des essais d'arrachement assez concluant ils ont obtenu une résistance d'assemblage qui avoisine les 40 MPA.

Pour une plaque de recouvrement en acier, dans les travaux de Lihu Cui et al. [25, 31-33], il a été montré qu'avec l'augmentation du courant de soudage, le diamètre noyau

D'articulation augmente, et que la charge de cisaillement augmente dans un premier temps puis elle diminue ; et qu'une charge maximale au cisaillement par traction de 1.5 kW est obtenue avec un courant de soudage d'intensité 12 kA (Figure 13) [34].

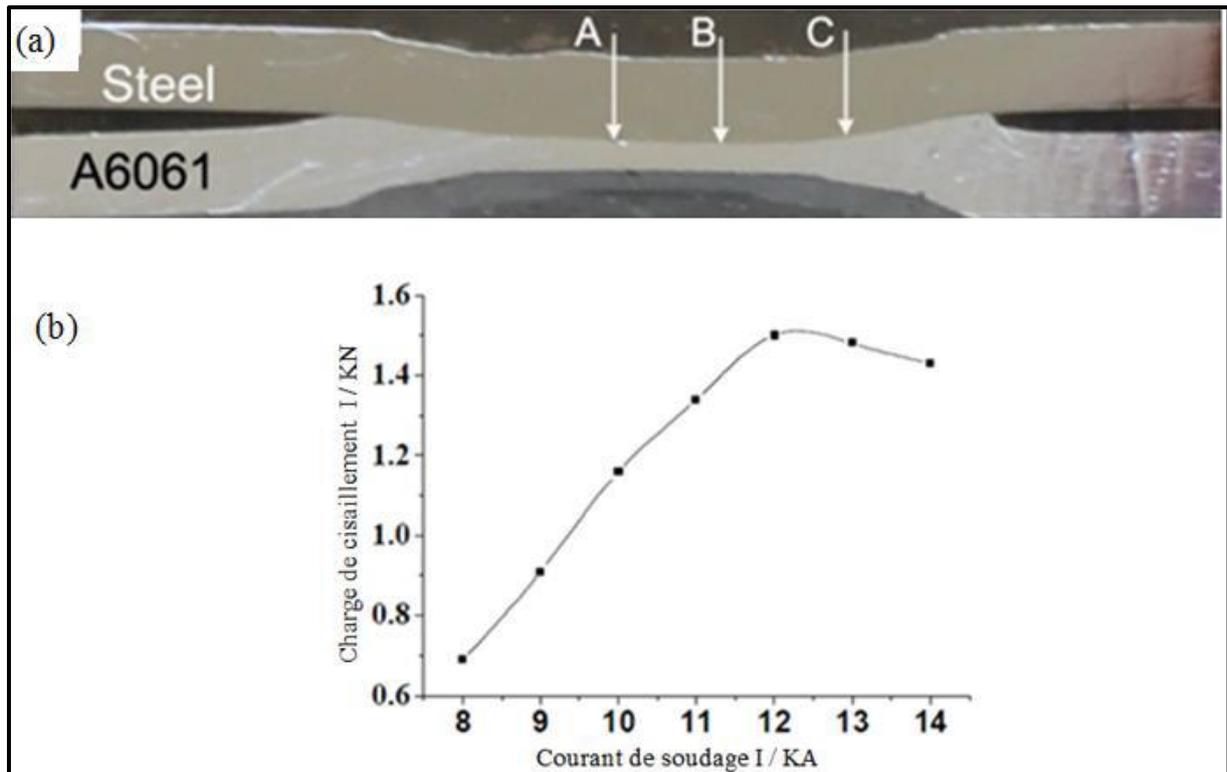


Figure 1.13 : Soudure Al / Fe réalisée par résistance (par point) : (a) apparence de la section croisée du joint-soudé, (b) effet du soudage par courant sur la résistance [34].

1.4 Soudage à l'état solide :

Le soudage à l'état solide est une classe des procédés dans lesquels deux surfaces sont jointes sans la fusion du métal de base (ou /et) l'ajout d'un métal d'apport fondu. Les procédés de soudage en phase solide ont été développés avant ceux passant par une phase liquide à cause de l'exigence de l'apport d'énergie moins important comparés aux autres procédés. Un exemple bien connu est le soudage par forgeage qui était utilisé dans la fabrication d'armes déjà dans les temps très reculés.

1.4.1 Soudage par diffusion :

Dans ce procédé opérant en phase solide de manière statique, les pièces sont maintenues en contact sous un effort donné et sont réalisées à une température précise pendant un temps défini. Il y a déformation plastique locale des surfaces et, du fait du contact intime de celle –

ci, la diffusion des atomes entre les pièces à assembler permet d'obtenir la continuité de la matière (figure 14).

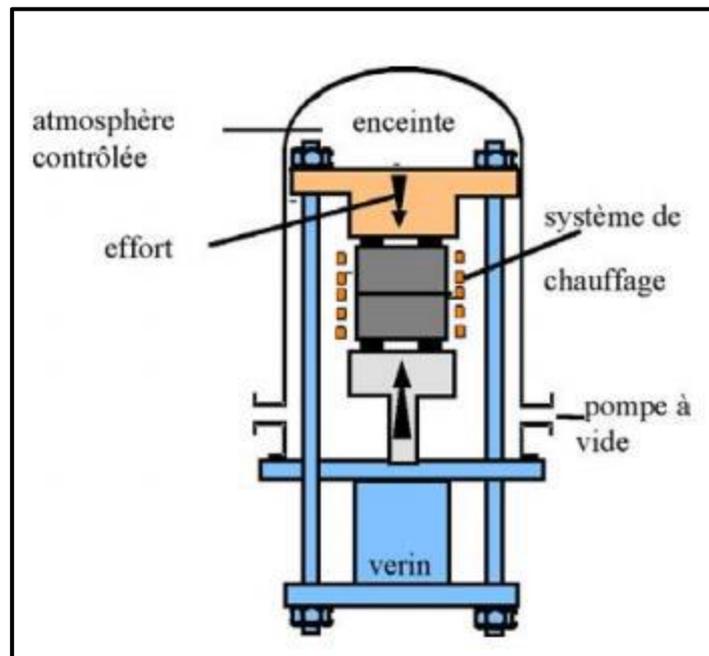


Figure 1.14 : Schéma de principe de soudage par fusion.

Ce procédé peut être réalisé pour des soudures homogènes mais également pour des soudures hétérogènes notamment entre un acier et un alliage d'aluminium [27].

Les travaux de Kuroda et al. [35] ont été consacrés au soudage par diffusion dissimilaire des alliages Al-6061 avec un acier SUS316 afin de déterminer si l'alliage d'aluminium et les aciers inoxydables peuvent être jointes de cette manière. La liaison par diffusion a été effectuée sous vide à des températures de 723-848 K et une pression de 9,8 MPa. SEM investigations ont montré que forme une couche de réaction à l'interface A6061 / SUS316 d'environ 1 à 2 microns, la résistance à la traction des joints portée à environ 200 MPa. Des composés intermétalliques tels que Fe_2Al_5 et $FeAl_3$ ont été détectés. Hirose et al. [36, 37] Présentèrent des résultats de résistance en traction de l'ordre de 130 [MPa], entre alliage 6061 et acier, et des épaisseurs de couche intermétallique ont été réduite en quelque micromètres. Calerons et al [38] ont étudié l'assemblage acier inoxydable du type 316 (figure 15) et qui ont été soudés par diffusion à deux alliages d'aluminium (1100 et 6061) et à 99,999% d'aluminium pur.

Cependant, ces méthodes ne sont pas largement utilisées dans la production pratique de l'industrie, car la taille et la forme de ces joints à l'état solide sont extrêmement restreintes, les conditions du processus sont compliquées et l'équipement coûte cher.

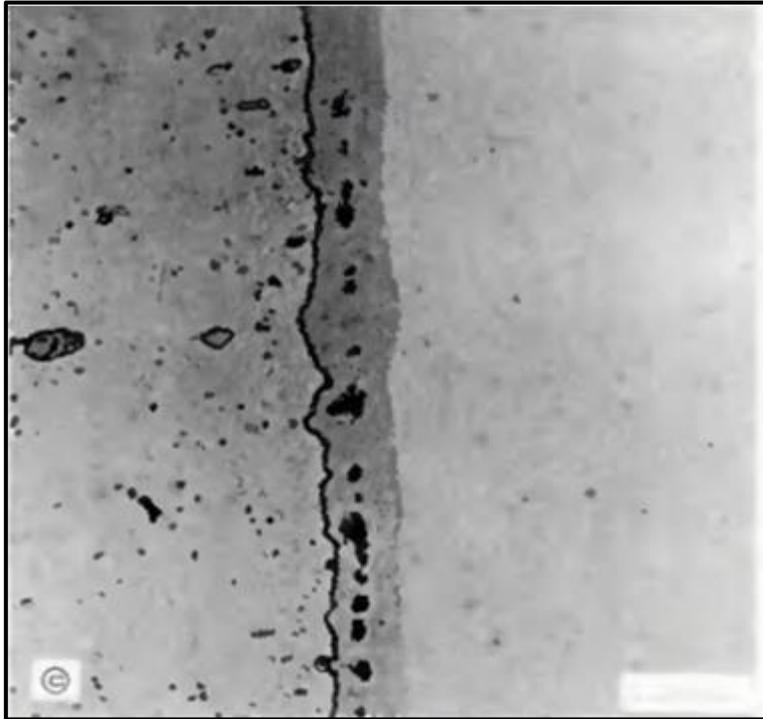


Figure 1.15 : Joint dissimilaire Al / acier soudé par le procédé de soudage par diffusion [38].

1.4.2 Soudage par friction

Le soudage par friction est obtenu grâce à l'échauffement des deux matériaux à assembler, souvent des pièces de section circulaire. Un flux de chaleur est généré par conversion de l'énergie mécanique en énergie thermique. Généralement, l'une des pièces est en rotation alors que la deuxième reste statique. La figure 16 présente une machine de soudage par friction ayant une morphologie très simple et des avantages intéressants et appréciés dans les ateliers de construction mécanique [39].

On note que la qualité de la soudure dépend de plusieurs paramètres : la vitesse de rotation de l'outil, le temps de friction, et la pression exercée. L'avantage d'un tel procédé est qu'il n'y a pas de métal d'apport et qu'il permet de souder des matériaux dissimilaires, de plus, sa mise en oeuvre est assez facile.

De nombreuses études [40-47] ont été réalisées sur le soudage hétérogène de l'acier avec l'aluminium pur ou en utilisant ses différents alliages, par friction rotative (Figure 17).

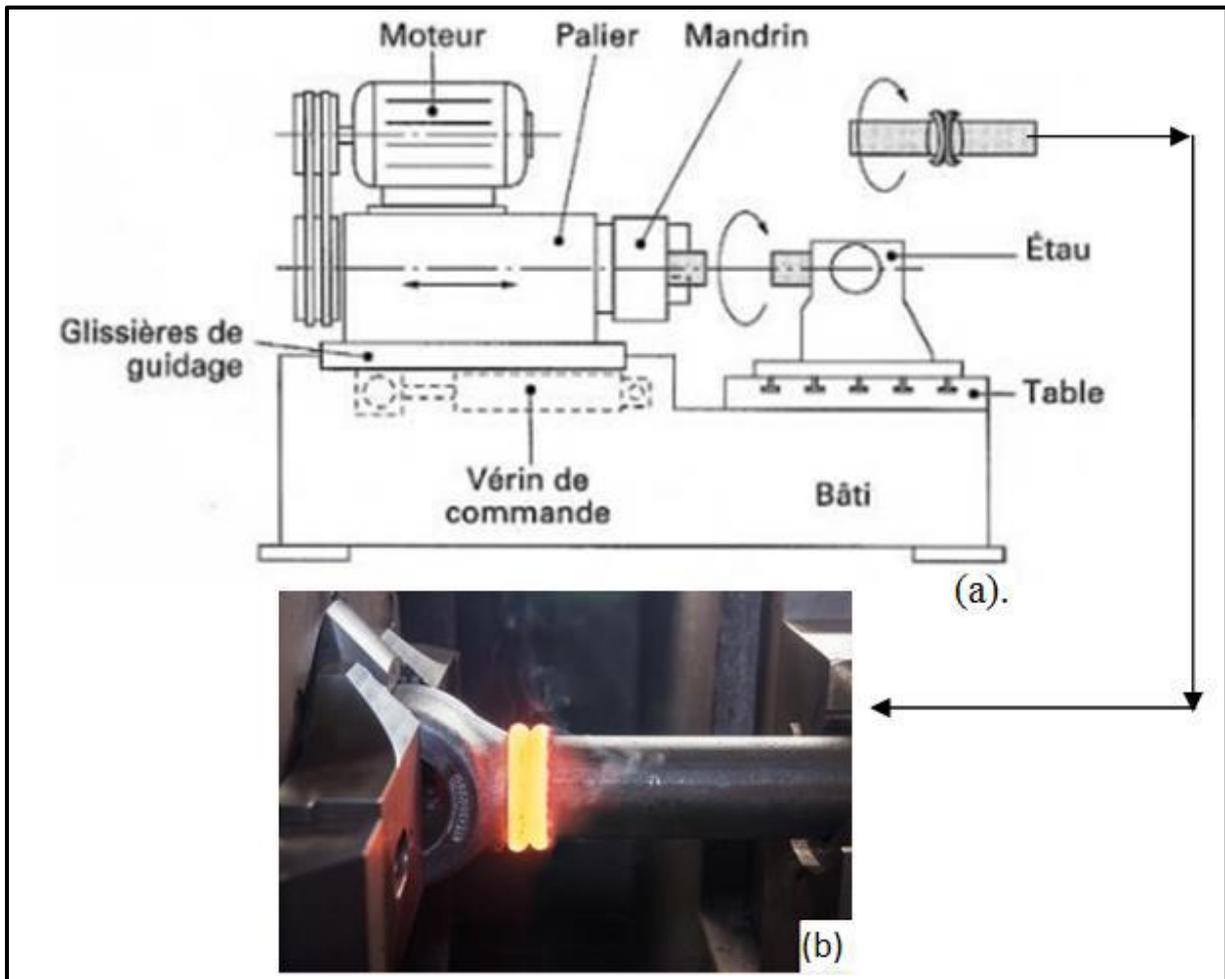


Figure 1.16 : Soudage par friction (a) schéma d'une machine de soudage par friction, (b) exemple de soudage pour la fabrication des vérins hydrauliques.



Figure 1.17 : Macrographie de soudage par friction AA6061-AISI 4340 [47].

Ces recherches ont démontré qu'il est possible d'atteindre des résistances mécaniques équivalentes à celle des matériaux de base (résistance mécanique en traction de 300 MPa pour un alliage 6061 et de 380 MPa pour un alliage 2017[40, 48], Ces résultats sont dus au fait que

l'épaisseur de la couche de l'intermétallique est très mince, pour des paramètres opératoires optimisés.

Rombaut et al. [49] avaient réalisé des soudures par friction des alliages d'aluminium de différentes nuances et l'acier. Ils avaient remarqué que l'épaisseur de la couche IMC avait augmenté presque proportionnellement avec le temps de friction avec un taux en fonction du type d'alliage d'aluminium. Ces auteurs ont noté une augmentation de la pression de friction ce qui améliore la vitesse de croissance de la couche IMC, et que cette couche était constituée de particules granulaires aléatoirement distribuées (Figure 18.).

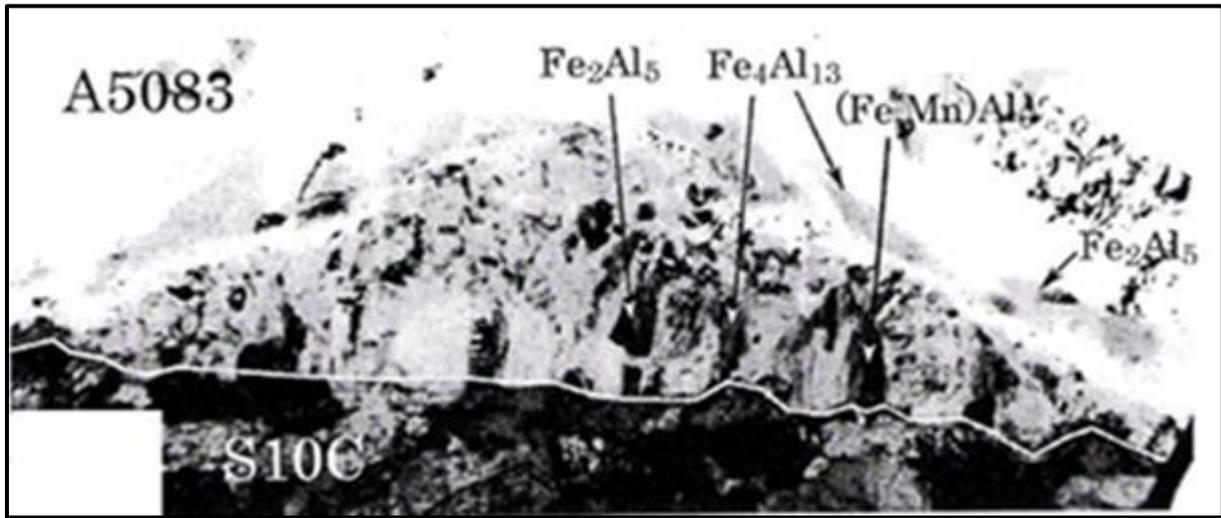


Figure 1.18: Joint dissimilaire A5083 / S10C obtenu par le soudage par friction : composés intermétalliques à l'intérieur de la couche IMC d'après l'analyse EDS de la soudure [49].

Malgré le succès de ce procédé de soudage, il peut engendrer plusieurs types de défauts tel que : fissures, caries ou porosités. Selon les paramètres de soudage utilisés, différentes formes de couches intermétalliques ont pu être observées. La figure (19.) représente les formes les plus courantes [49].

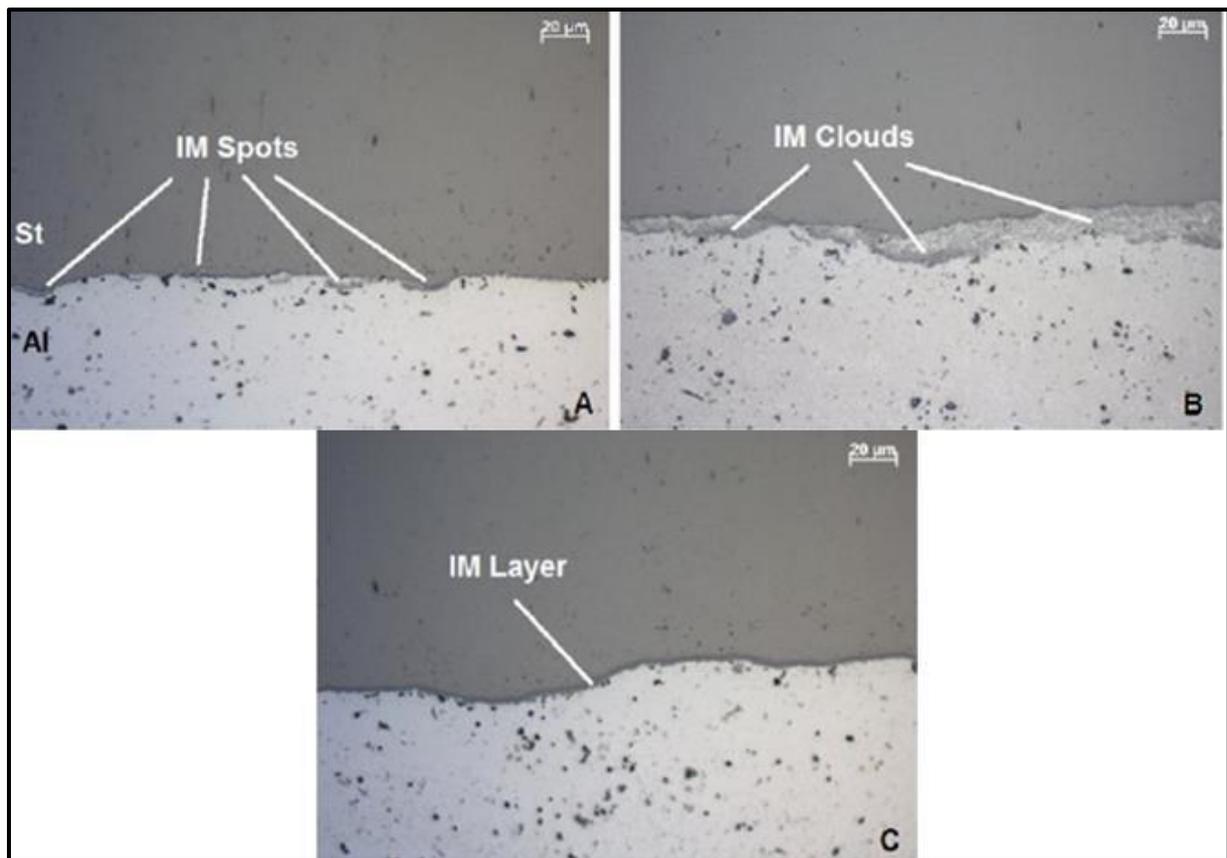


Figure 1.19 : Différentes formes de couches intermétalliques dans une soudure :(a) taches intermétalliques, (b) poussière de intermétallique, (c) couche intermétallique [49].

1.4.3 Soudage par friction-malaxage :

Le soudage par friction malaxage, présenté sur la (figure 20.), un outil en rotation génère un flux de chaleur grâce à la friction de celui-ci avec les matériaux à assemblée. L'outil est muni d'un épaulement et d'un pion qui permet de malaxer et drainer les métaux. Une pression est exercée pour que la puissance totale mécanique soit suffisamment grande. Cette puissance se transforme en chaleur et élève la température des matériaux, d'une part grâce à la friction et, d'autre part, grâce aux déformations plastique subies par ceux –ci. L'outil est incliné d'un angle de 0.5 à 5 par rapport à la verticale.

Beaucoup d'études [50-62] ont été réalisés pour l'assemblage l'acier et l'aluminium avec ce procédé de soudage. Un état de l'art plus approfondi sur le soudage par friction malaxage sera présenté dans le (chapitre -2-).

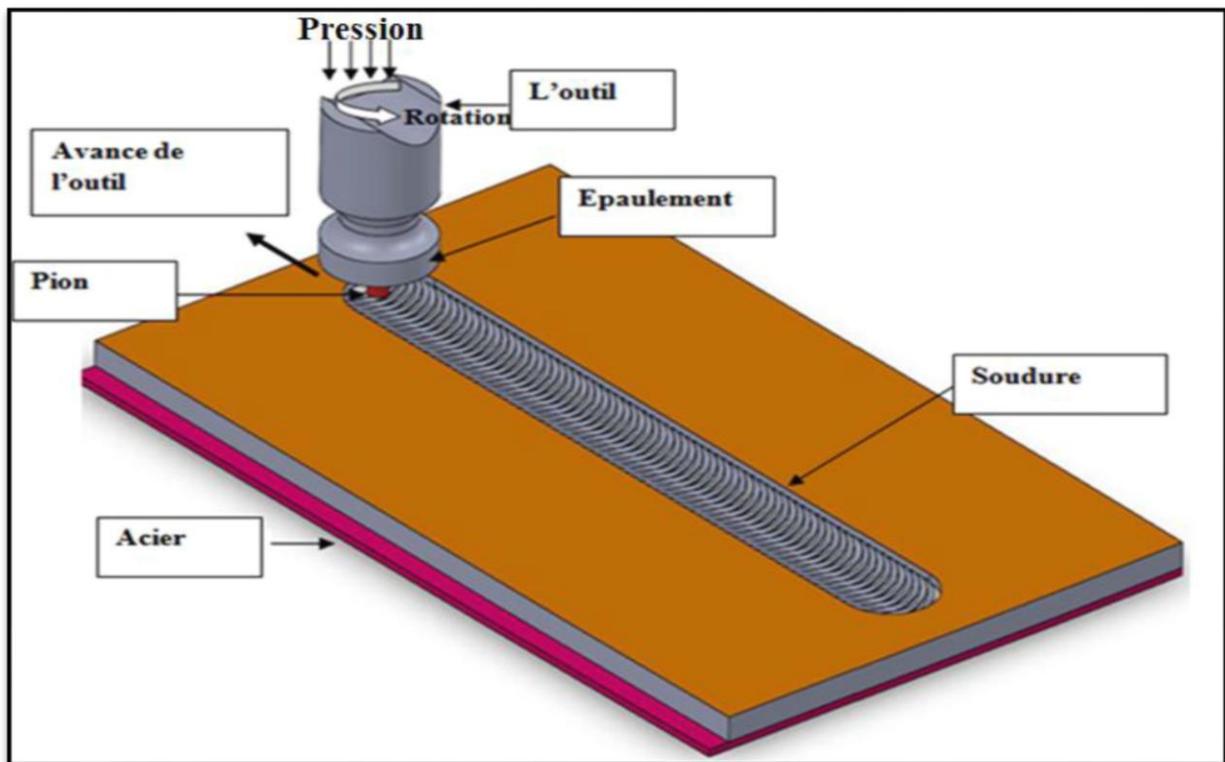


Figure 1.20 : Schéma du procédé de soudage par friction malaxage [63].

1.4.4 Soudage par ultrason :

Les ultrasons sont des ondes acoustiques de hautes fréquence (20 à 50 Hz) qui transmises à un matériau le font vibrer. Il s'agit d'un procédé de soudage à froid en phase solide où les atomes des surfaces à assembler se combinent entre eux sous l'effet de forces d'attraction interatomiques. L'assemblage se fait par recouvrement, les pièces sont serrées l'une contre l'autre entre une « *enclume* » et une « *sonotrode* » qui produit des vibrations transversales, ainsi que des frictions localisées qui décaper les surfaces et élèvent la température jusqu'à la formation de la soudure. Le procédé est schématisés sur la Figure .21. Ce procédé permet l'assemblage homogène et hétérogène de métaux faible épaisseur ainsi que celui des matières plastique.

Pour l'assemblage de l'aluminium avec acier, on signale que dans les travaux de Tsujino et al. [64], des joints de soudures dissimilaires acier /aluminium, ont été réalisés, en configuration bout à bout par ultrasons à 15 kHz avec une source de vibration de type Langevin appliquant huit PZT boulonnés serrés et 50 kW à induction statique amplificateur de puissance à thyristors. Ils ont obtenu un joint de soudure qui a une résistance à la traction de l'ordre de la résistance de l'aluminium de base. Tsujino et al. n'ont malheureusement pas réalisé d'étude métallographique qui aurait permis de mettre en évidence la présence éventuelle de phases intermétalliques dans les joints obtenus.

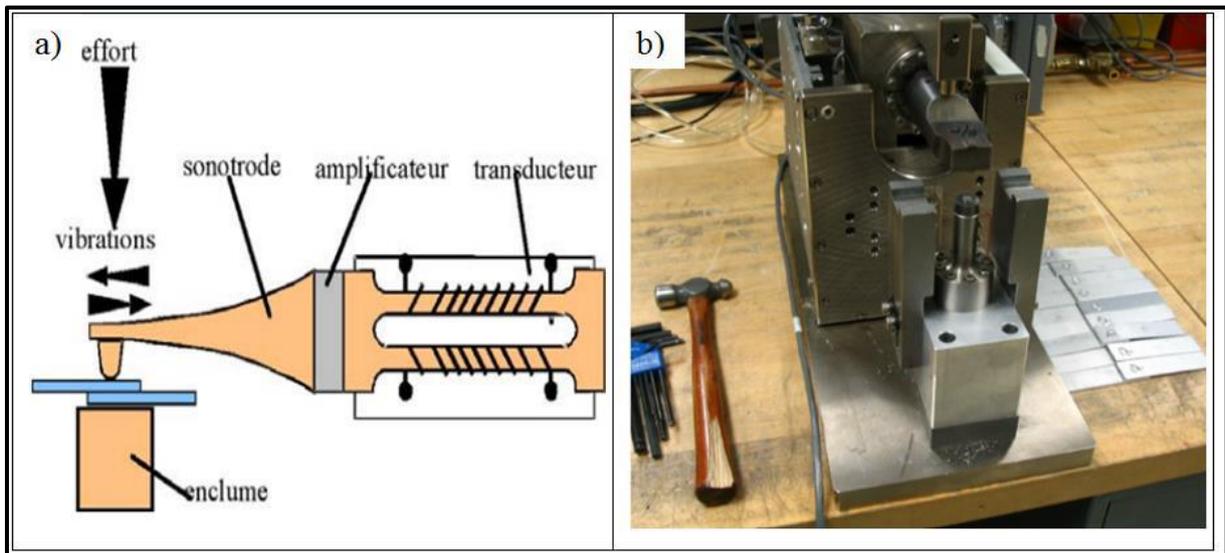


Figure 1.21 : Soudage par ultrasons :a) schéma du procédé b) machine de soudage

Watanabe et al. [66] ont effectué un soudage par ultrasons entre une tôle d'acier doux SS400 et un alliage d'aluminium A5052 (Figure .22.) . Dans cette investigation, les auteurs ont étudié l'influence des conditions de soudage par ultrasons sur les propriétés mécaniques et la microstructure de l'interface d'un joint, et ont examiné l'effet de l'intermétallique pour améliorer la résistance du joint. Les principaux résultats obtenus dans cette étude sont : la résistance du joint soudé pour un temps de soudage de 3,0 s, a diminué en raison de la formation du composé intermétallique $FeAl$ à l'interface. En utilisant comme métal d'insertion de l'aluminium commercial pur, la résistance du joint a été améliorée avec succès et la résistance de la soudure était environ trois fois plus grande que celle du joint sans que le métal d'insertion.

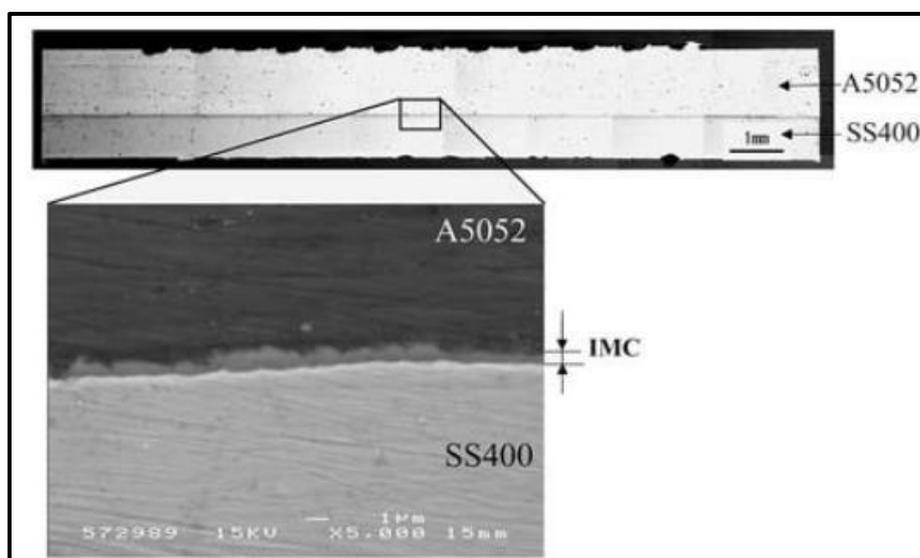


Figure 1.22 : Observation de l'interface dans le joint A1050 / SS400 soudé par ultrasons [66].

1.4.5 Soudage par impulsion magnétique

Soudage par impulsion magnétique (Magnetic Pulse Welding) est un procédé basé sur l'utilisation de forces électromagnétiques. Etant donné que ces techniques ne font pas usage de chaleur pour réaliser l'assemblage (Figure .23.), elles offrent d'importants avantages par rapport aux techniques conventionnelles de soudage [67]

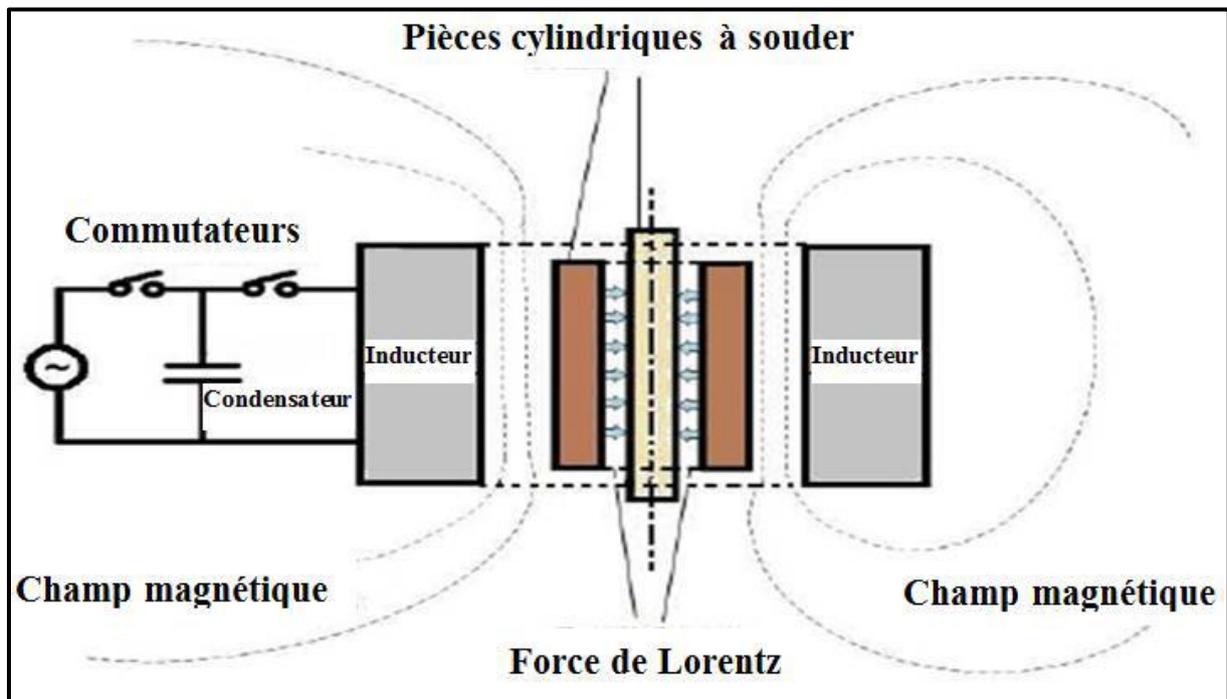


Figure 1.23 : Principe de soudage par impulsion magnétique.

Pour l'assemblage de l'aluminium avec acier, dans leurs travaux de T. Aizawa et al. [68] avaient soudé des alliages d'aluminium (A1050, A2017, A3004, A5182, A5052, A6016, et A7075) et à l'acier (SPCC), par le soudage par impulsions magnétiques (Figure .24. -a-) [68], il a été montré que la résistance à la traction maximale de cisaillement de l'échantillon soudé possède également la même que la valeur du métal de base plus faible. On peut signaler que les tôles conservent leurs propriétés d'origine, avec absence des problèmes liés à la zone affectée thermiquement pendant le processus de soudure, et que la zone soudée est plus forte que les métaux les plus faibles de base, enfin un échec a eu lieu en dehors de la zone soudée pour ces combinaisons. La rupture est toujours dans le métal le plus faible et à l'extérieur de la zone soudée, comme le montre la figure.24-b-.

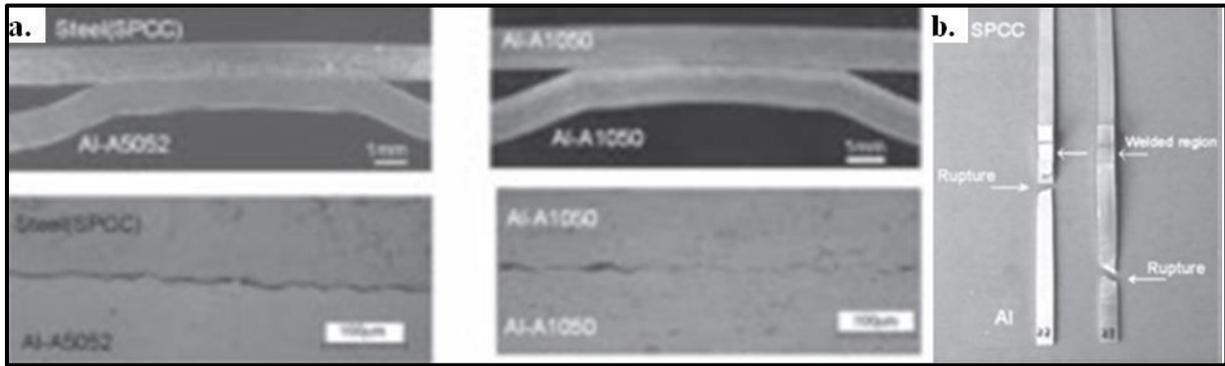


Figure 1.24 : Soudage par impulsion magnétique AL / Fe ; a) La microstructure d'interface joint A1050/A1050 et A5052/SPCC. b) le mode rupture de joint soudé SPCC / Al [68].

Dans les travaux de Manogaran et al. [69] une approche innovante a été développée. C'est-à-dire le soudage par impulsion magnétique par point des joints aluminium / acier (Figure .25.). Il a été conclu que c'est un procédé de soudage très rapide (temps de travail dure quelques microsecondes), il peut être appliqué aux joints homogène et hétérogène du couple Al/Fe, et que les couches intermétalliques ne se forment qu'autour des interfaces ondulées, elles sont très minces (de l'ordre 2-5 μm).

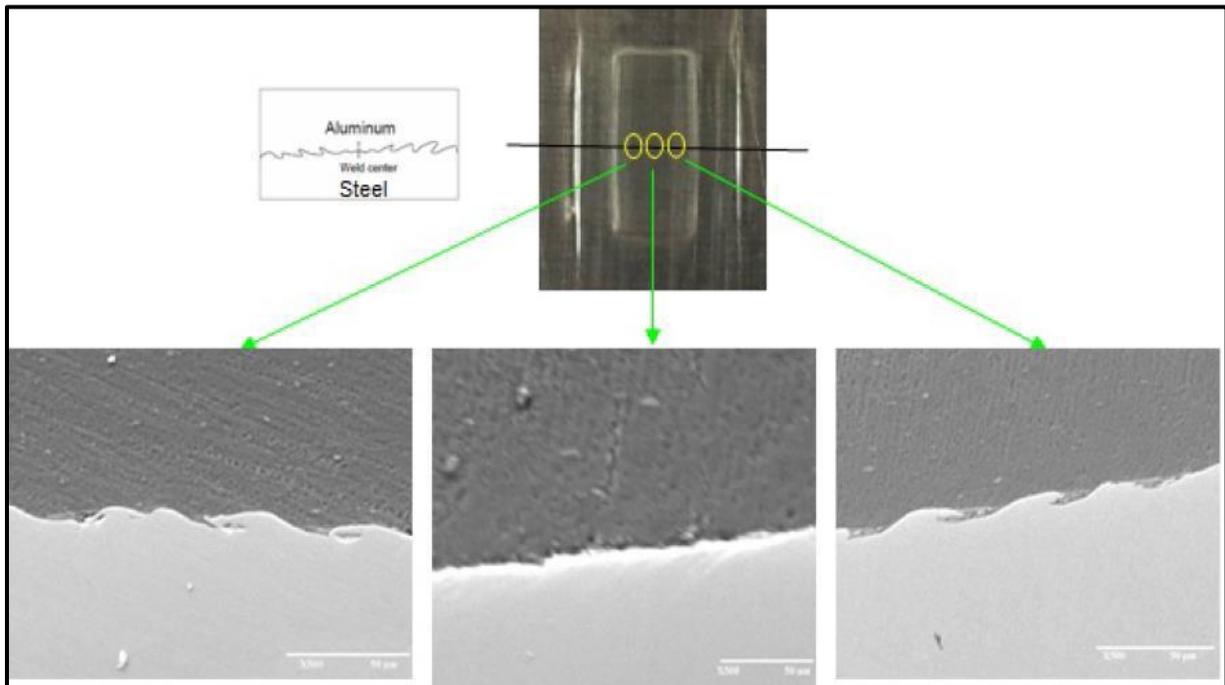


Figure 1.25 : Analyse micrographique à l'aide SEM d'un joint soudé par impulsion magnétique Al / Fe [69].

Certains auteurs comme Kwang-Jin Lee et al. [70] avaient soudé des joints dissimilaires de l'acier à bas carbone (SPCC) avec un alliage d'aluminium 61611. Ce travail avait été réalisé en utilisant la méthode de soudure de pression magnétique de configuration joint recouvrement (figure .26). La couche intermédiaire multi-phases et couche d'aluminium à grains raffinés sont considérées comme l'origine d'inter faciale à haute résistance de liaison du joint de recouvrement.

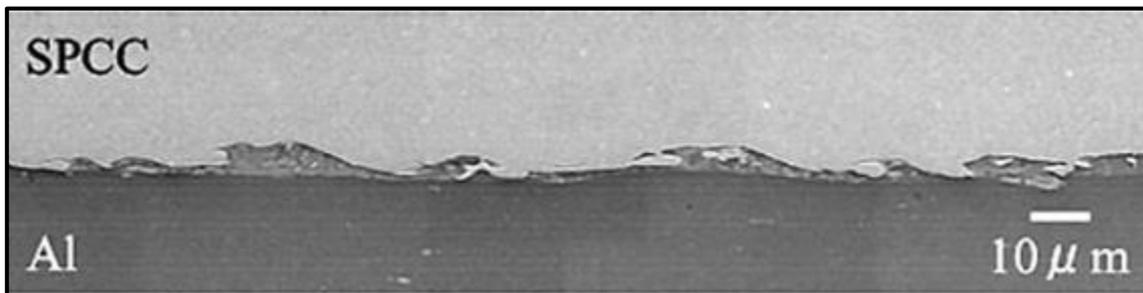


Figure 1.26 : Soudage par pression magnétique acier / aluminium : a. micrographies MEB de l'interface de soudure avec couche intermédiaire [70].

Parmi les résultats obtenus par S. D. Kore et al. [71] une haute résistance au cisaillement a été signalé en raison de la plus grande pénétration du champ magnétique dans le centre de la zone de liaison.

1.4.6 Soudage par explosion

Le soudage par explosion utilise l'énergie libérée par une charge d'explosion pour provoquer entre deux surfaces à assembler une collision dirigée de telle sorte que la ligne de contact se déplace régulièrement pendant l'explosion. L'explosion projette violemment le revêtement sur le support et un mince jet de métal plastifié jaillit en précédant le fond de contact (Figure .27.).

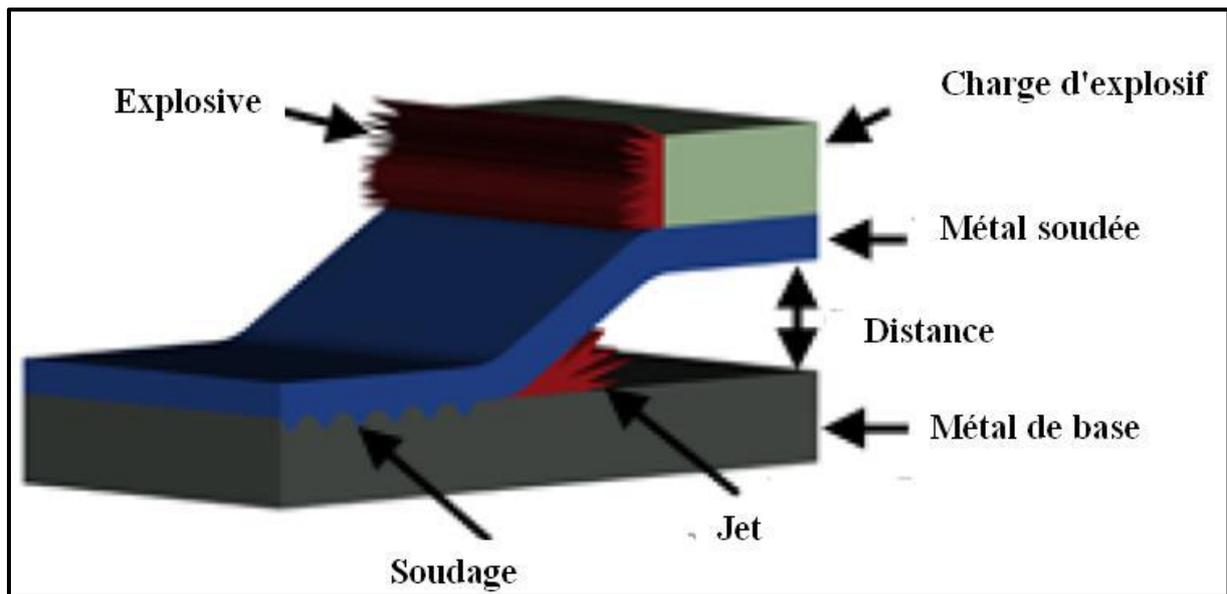


Figure 1.27 : Schéma du procédé de soudage par explosion [72].

Le soudage par explosion est utilisé dans de nombreuses industries :

- ❖ Equipement de procédé chimique tel que les récipients sous pression, réacteurs, échangeurs de chaleur.
- ❖ Tuyaux cryogéniques joints de transition.
- ❖ Pour la fabrication des matériaux plaqués, le soudage de tubes sur les plaques tubulaires et la fabrication bimétalliques. Le placage par explosion ne s'applique qu'aux liaisons difficiles: métaux métallurgiquement très dissemblables (Al - acier), métaux altérables à chaud (Ti -Ta - Zr), pièces ne supportant pas le laminage, soit à cause de leur forme, soit à cause de la fragilité du support. Ce procédé permet d'arracher les impuretés et les oxydes superficiels [73] pour obtenir des soudures de bonne qualité comme le montre Figure 28.
- ❖ Construction navale et marine bimétalliques transition joints sont les plus anciennes applications du soudage par explosion. Dans la construction navale de tôles entières de trois matériaux sont soudées par explosion. Les tôles sont un acier doux, un aluminium commercialement pur pour faire la transition, puis d'un alliage d'aluminium 5083. Elles sont ensuite découpées (figure 29) [74]

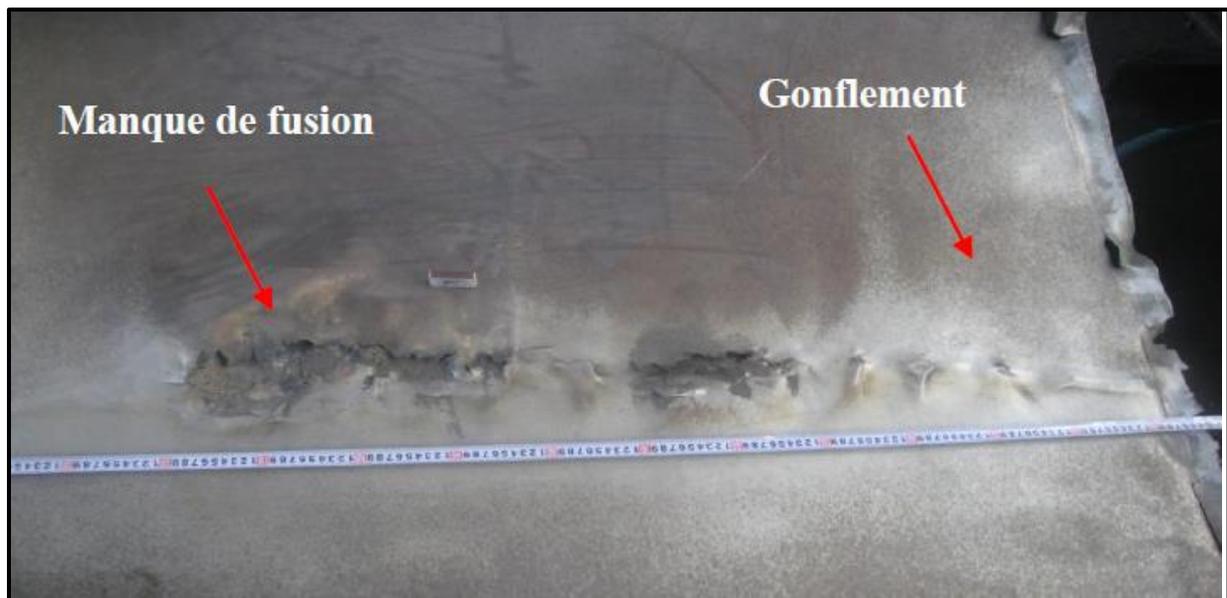


Figure 1.28 : Défaut de manque de fusion au stade initial et arrachement local du matériau de placage [73].

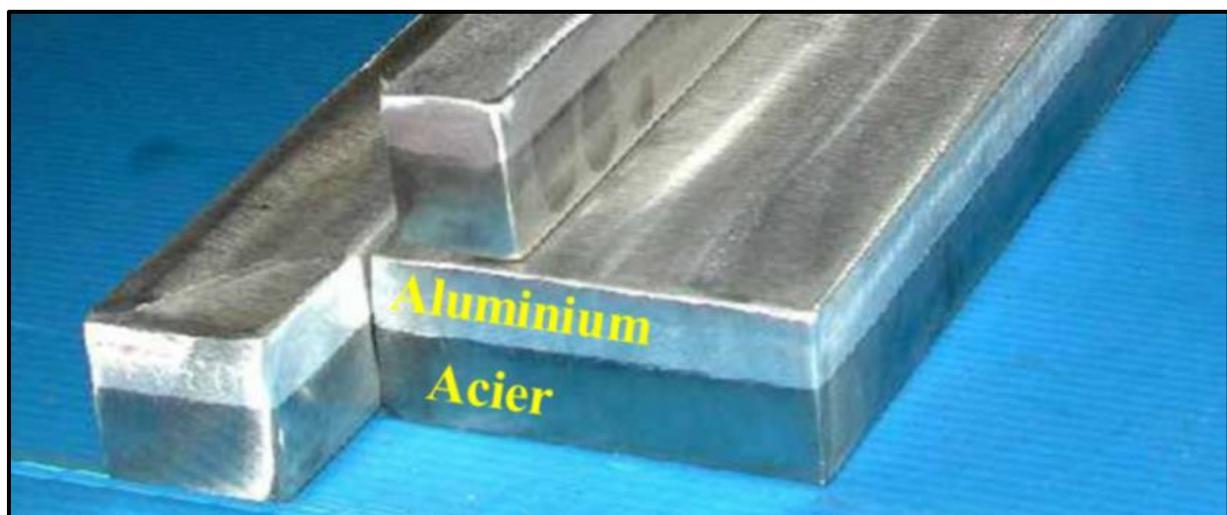


Figure 1.29: Assemblage par explosion Al / Fe [74].

Findik et al. [75] se sont intéressés à la fabrication bimétalliques à partir d'un acier faiblement allié à haute résistance (1,45 Wt.% Mn-0,2 Wt.%) et de l'acier à double phases reliée à un alliage d'aluminium, séparément par le soudage par explosion, ils ont rapporté que les efforts de cisaillement sont de l'ordre de 420 MPa et 720 MPa (Figure 30)

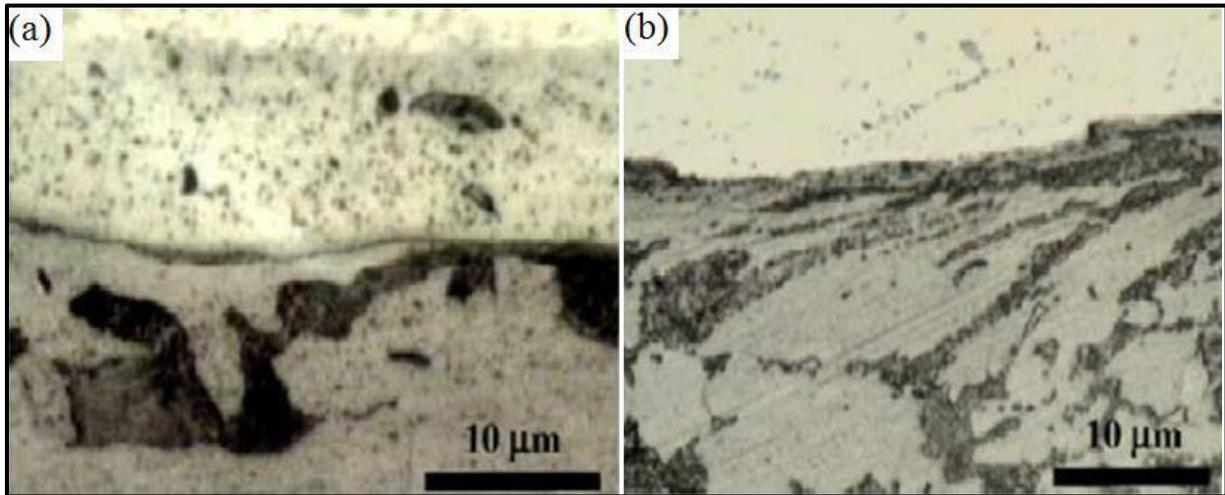


Figure 1.30 : Microstructures de soudage par explosion : (a) acier haute résistance faiblement allié à l'aluminium (b) l'aluminium / l'acier à double phase [75].

Han et al. [76] avaient étudié les effets de l'épaisseur de la couche intermédiaire d'aluminium AA1050 sur la morphologie d'interface et le comportement à la déformation au cisaillement des tôles d'acier SS41 et d'un alliage d'aluminium AA5083 soudée par explosion. Il a été montré qu'une nouvelle couche (zone interrassiale) s'est formée à la limite (AA1050 / SS41) et irrégulières (figure 31). L'épaisseur de AA1050 la plus mince (0,2 mm) a montré la plus haute résistance au cisaillement de l'ordre de 90 MPa et des composé intermétalliques de composition $FeAl$, se sont formés dans une zone d'épaisseur comprise entre 10 et 20 μm .

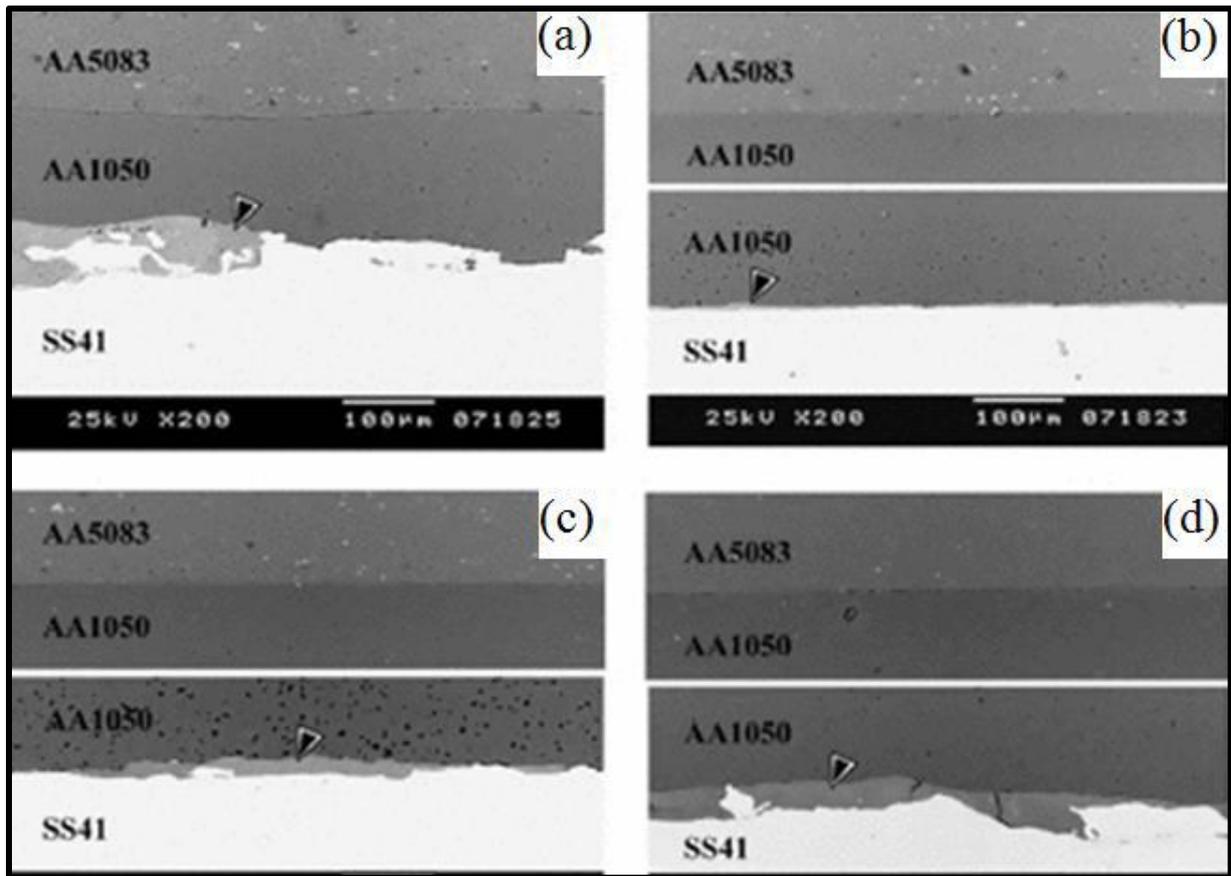


Figure 1.31: Microstructure des échantillons soudés par explosion, pour différentes épaisseurs de la couche intermédiaire : (a) de 0,2 mm, (b) 0,5 mm,(C) de 1,0 mm, et(d) de 2,0 mm [76].

1.5 Conclusion partielle :

Le soudage par friction malaxage présente beaucoup d'avantages par rapport aux différents procédés évoqués précédemment, tels que la facilité de mise en œuvre et la basse relative de la température de soudage (inférieure à la température de fusion), tout en restant compétitif du point de vue de la vitesse du soudage et des géométrie des pièces à souder vis à vis aux procédés de soudage par fusion . Dans la suite de notre travail, nous avons focalisé notre intérêt sur le procédé de soudure par friction malaxage (FSW).

2 *Chapitre II*

2.1 Le procédé de soudage par friction-malaxage :

Le soudage par friction malaxage, plus communément appelé Friction Stir Welding (FSW) a été développé par Thomas Wayne à l'institut de soudure britannique (The Welding Institute, TWI). Le premier brevet portant sur ce procédé de soudage a été déposé en décembre 1991 par TWI. Le principe de cette technologie de soudage est basé sur le principe physique du soudage par friction en rotation. La différence majeure consiste à utiliser un outil rotatif dont le rôle est de brasser et mélanger la matière à l'interface des pièces à assembler. La soudure est réalisée à l'état solide (état « pâteux »). L'avantage majeur de ce procédé est de souder des matériaux sans atteindre leur température de fusion. Il permet ainsi d'assembler des alliages réputés difficilement soudables par les procédés de soudage traditionnels tels que les alliages d'aluminium, de cuivre et de titane. Plus généralement, le soudage par FSW convient particulièrement bien aux alliages à bas point de fusion et malléables à chaud tels que les alliages d'aluminium, de magnésium, voire de cuivre. Ces types d'alliages sont principalement utilisés dans le cadre de l'allègement des structures dans l'industrie des transports terrestre, aéronautique, spatiale et navale. L'avenir de ce procédé paraît particulièrement prometteur pour des applications spécifiques à tous secteurs industriels (transport, aéronautique, spatial, automobile militaire...) Il est d'ailleurs déjà utilisé de manière industrielle pour certaines applications aux Etats-Unis, au Japon et dans les pays scandinaves. [77]

2.1.1 Principe du soudage FSW :

Le principe de soudage par friction malaxage consiste à mettre en contact deux pièces à souder qui seront solidement bridées sur une machine. Un outil fixé à la machine qui est formé d'un pion et d'un épaulement est mis préalablement en rotation (400 à 1200 tr/mn) Au [2]contact du pion avec les pièces à souder, une chaleur est engendrée et porte localement les bords en contact des pièces à l'état pâteux, ce qui facilite la plongée du pion dans la, figure 2.1

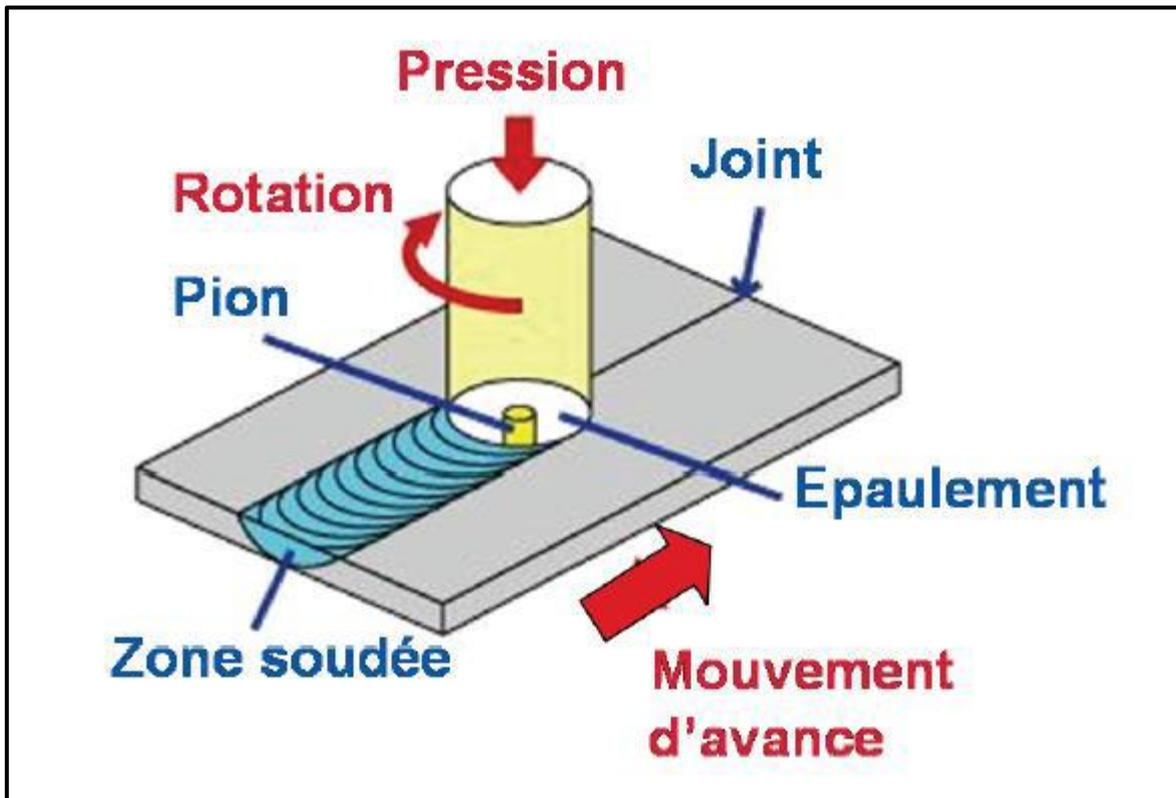


Figure 2.1: Représentation schématique du principe de soudage par friction-malaxage. [79].

Le rôle joué par l'épaulement qui s'appuie avec une force importante sur la surface des pièces à assembler est d'abord d'empêcher le métal brassé d'être expulsé et produit un effet de forgeage à l'arrière sur la partie qui vient d'être brassée et déformée, ensuite de la chaleur engendrée au contact de l'épaulement avec les pièces à souder figure 2.2.

L'outil en place est maintenu en rotation pendant quelques secondes (phase d'attente) puis est soumis à un mouvement de translation dans le sens du joint de soudage (phase d'avance) à une vitesse définie (jusqu'à 2m/min) [78] Lors du soudage le matériau est soumis, à des variations de températures dues aux frottements du pion et de l'épaulement avec les pièces à assembler et à des déformations plastiques intenses dues au malaxage.

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

Une liaison métallique est ainsi réalisée sans atteindre la température de fusion du métal de base des pièces à assembler ce qui permet de s'affranchir des problèmes liés à la solidification qui apparaissent dans les procédés du soudage classique tels que porosités, soufflures, fissuration à chaud, etc.. Et avoir pour les pièces à souder des caractéristiques mécaniques d'assemblage supérieur au soudage traditionnel figure 2.2.

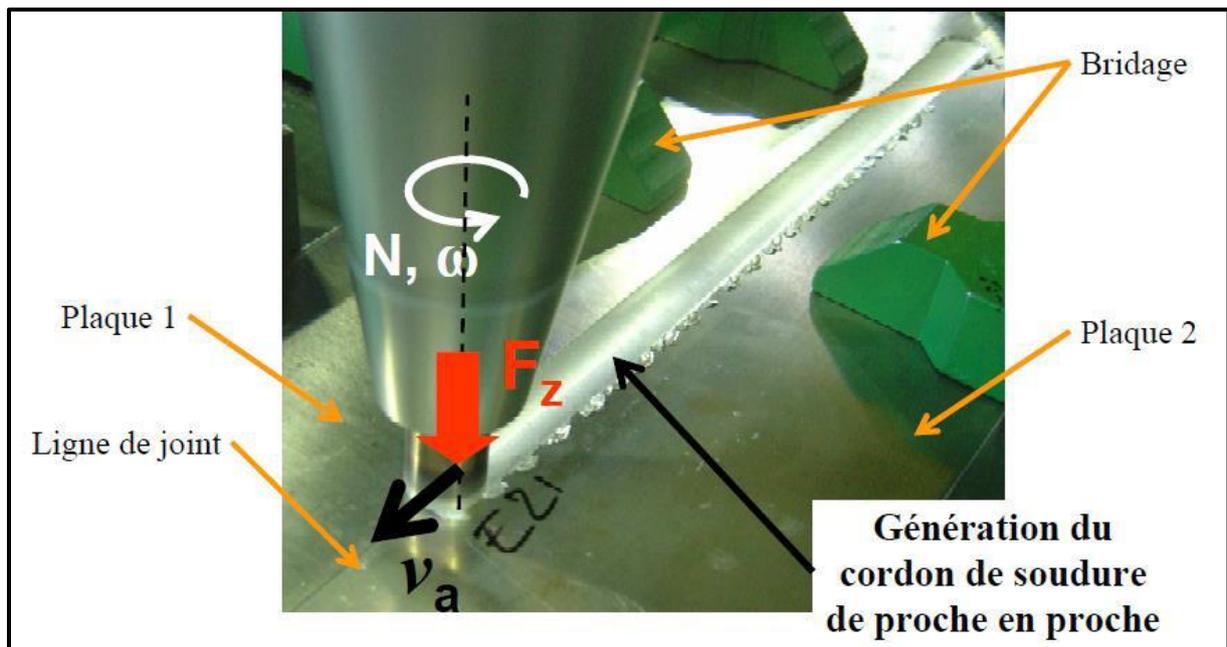


Figure 2.2: Génération du cordon de soudure de proche en proche [80].

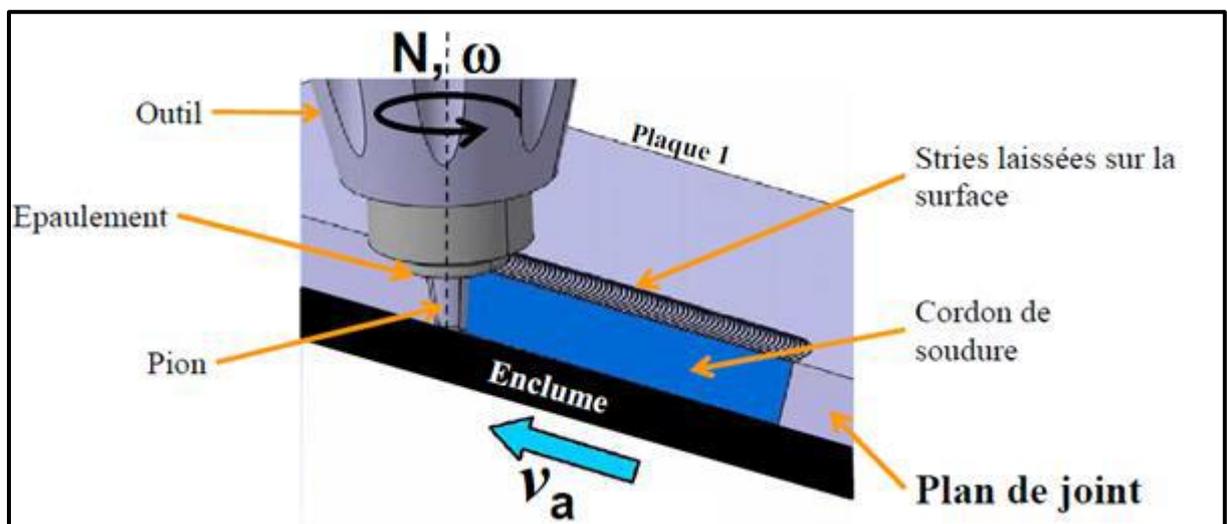


Figure 2.3 : Présentation du soudage par friction-malaxage[80].

Les trois principales phases opératoires de soudage par friction malaxage sont schématisées sur les Figures 2.4.a, b, c [80].

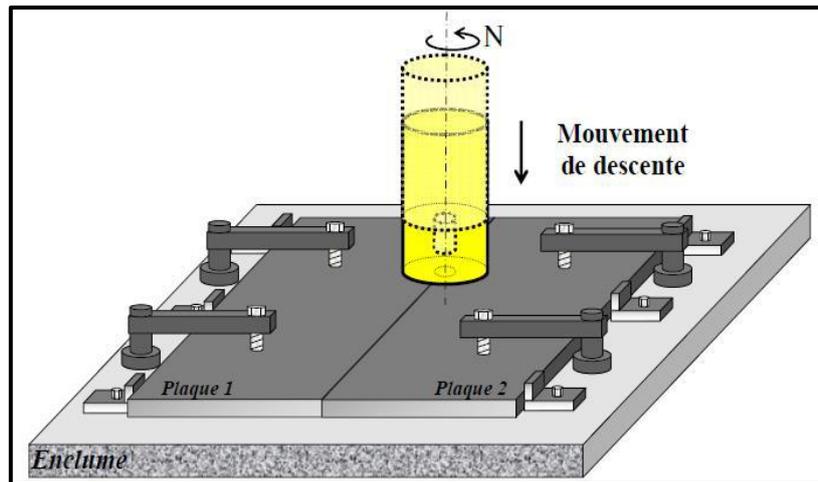


Figure 2.4 : (a) Phase de plongée.

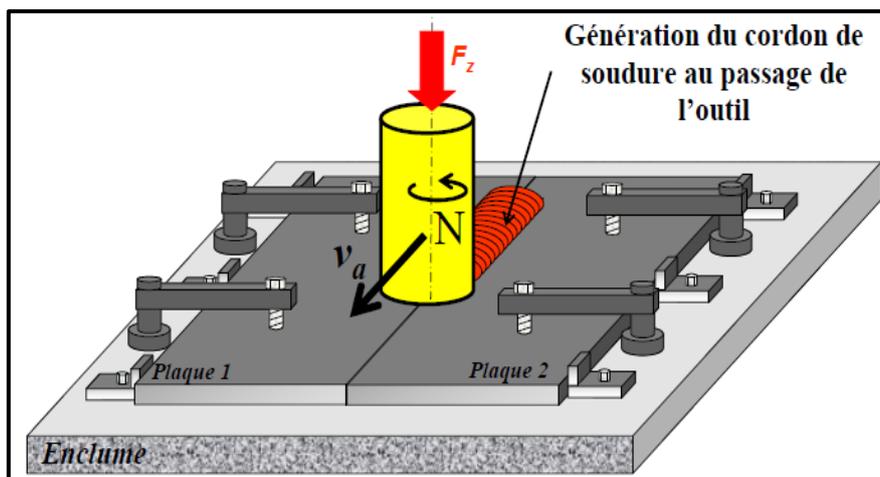


Figure 2.5 : (b) Phase de soudage.

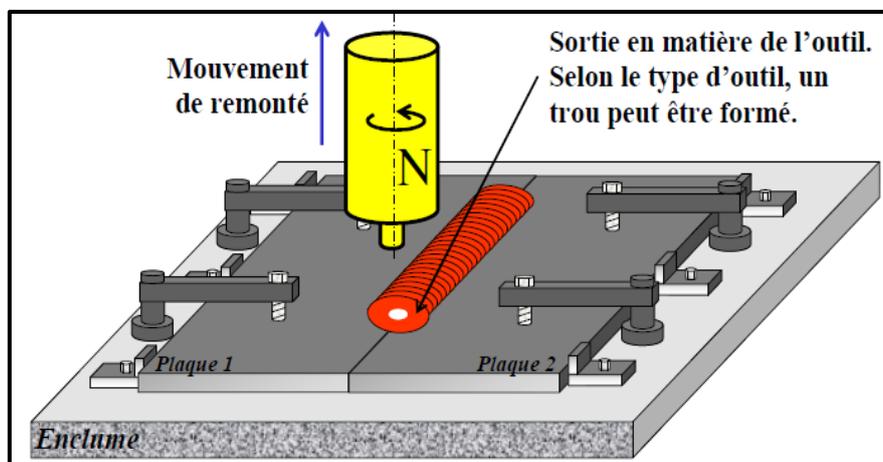


Figure 2.6 : (c) Retrait de l'outil.

2.1.2 Géométrie de l'outil :

La forme de l'outil de soudage constitue la base du procédé de soudage FSW et une optimisation des autres paramètres est impossible sans tenir compte de sa géométrie, qui a une forte influence sur la distribution spatiale de l'écoulement et par conséquent sur la quantité de chaleur créée. Ainsi, la géométrie de l'outil serait l'aspect le plus important car il ouvre son potentiel d'application en termes de matériaux, d'épaisseurs soudables et de performances.

La géométrie de l'outil de soudage a un effet direct sur l'uniformité du joint et de la microstructure résultante, ainsi que sur les forces nécessaires pour réaliser l'opération.

En particulier, le rapport entre les tailles de l'épaulement et de la tige est critique. La taille de l'épaulement est, en termes de création de la chaleur, le plus important facteur géométrique.

A l'origine du procédé FSW, l'outil comportant simplement un épaulement associé à une tige. Il est apparu intéressant d'effectuer à la tige des reliefs sous forme de nervures circulaires ou hélicoïdales dans le but d'augmenter l'effet de malaxage du métal à rendre plus facile la formation de la distribution spatiale de l'écoulement et la quantité de chaleur créée.

En termes de création de la chaleur l'épaulement est le facteur géométrique le plus important. En effet un épaulement de plus grande taille augmente la quantité de chaleur due au frottement ; mais se traduit aussi par une plus grande quantité de matériau entraînée.

Concrètement, l'élévation de la température due au frottement de l'épaulement et du matériau est plus importante pour un épaulement grand [81]

Il existe ainsi un rapport entre l'épaisseur de la tôle à souder et le diamètre de l'épaulement [82]

La surface de l'épaulement peut être lisse ou texturée, dans ce dernier cas elle facilite l'écoulement du matériau par la présence de rainures figure 2.7.

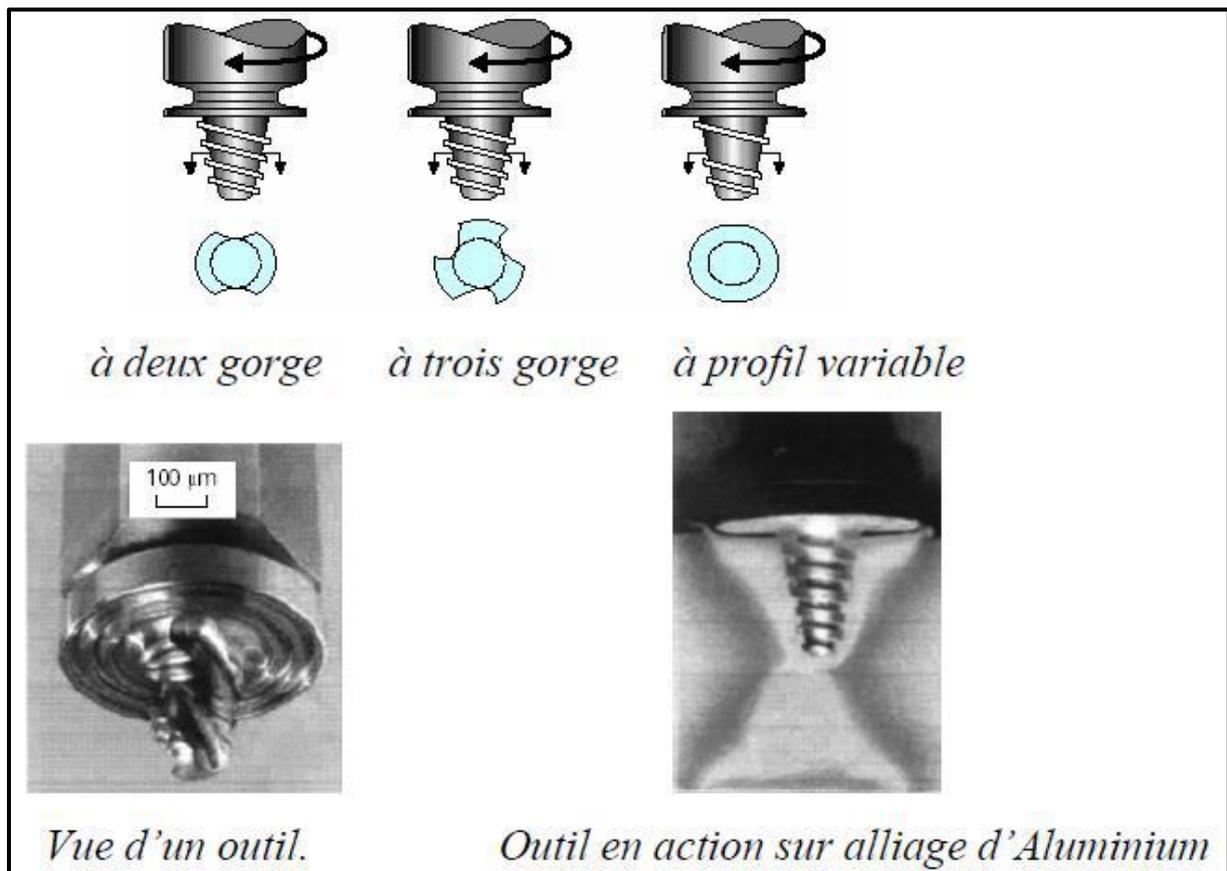


Figure 2.7: Outils de soudage FSW [83] .

a) Géométrie du pion :

Des études ont été menées sur la géométrie du pion, pour optimiser l'opération de soudage et la qualité de la soudure. Le pion est de dimensions appropriés à la nature des matériaux et à l'épaisseur des pièces à souder, sa longueur est adaptée à la pénétration, qui ne doit pas excéder l'épaisseur des tôles à souder. Les formes des pions sont de plus en plus complexes et les géométries des outils « Whorl™ » et « MX-Triflute™ » développées par TWI [84](l'institut de soudure britannique) en sont de bons exemples. Ces deux types d'outils sont représentés sur la Figure 2.6 ainsi qu'un outil de géométrie plus simple, « Trivex™ ». Le pion « Trivex™ » se compose de trois faces convexes avec ou sans filets. Cette configuration d'outil sans filets est communément utilisée pour la modélisation numérique du soudage par FSW.

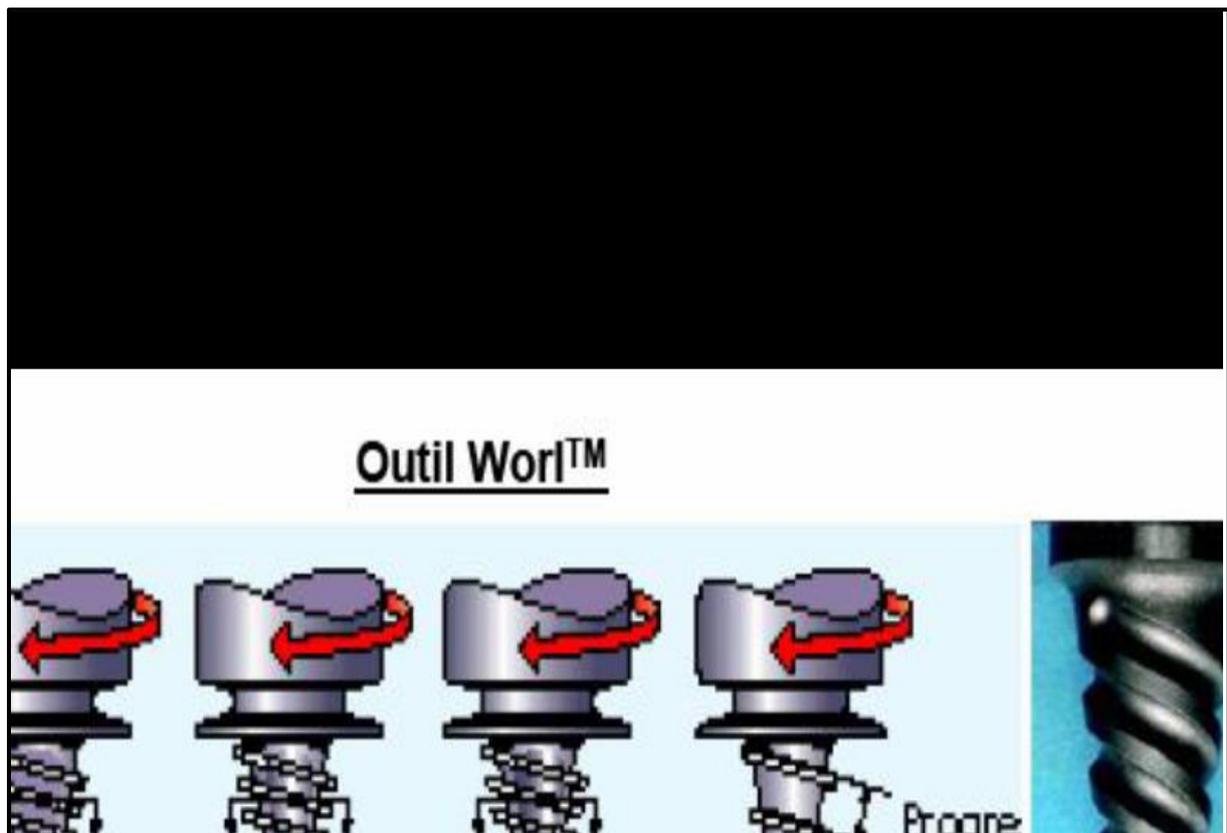


Figure 2.8: Outils FSW développés par TWI [85].

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

Selon le recueil de publications de Mishra et Ma[85], ces types d'outils présenteraient un certain nombre d'avantages par rapport à un outil conventionnel de forme cylindrique :

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

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

L'avantage majeur des outils « Worl™ » et « Triflute™ » par rapport à un outil classique de forme cylindrique est d'avoir un meilleur rapport (ratio) entre le volume du pion et le volume de matière déplacée (rapport entre volume statique et volume dynamique). Par

exemple, le rapport établi entre deux outils similaires, c'est-à-dire de même diamètre et de même longueur, lors du soudage d'une plaque d'aluminium, serait de 1.1 :1 pour un outil cylindrique, de 1.8 :1 pour 1 outil de type « WorlTM » et de 2.6 :1 pour un outil de type « MX-TrifluteTM ».

b) Épaulement :

La taille de l'épaulement est un paramètre géométrique important de l'outil qui permet la création de la chaleur et le raffinement de la matière malaxée durant l'opération du soudage. Cette caractéristique a aussi un effet sur la topographie du joint (par exemple il peut être avantageux de laisser le pourtour de l'épaulement lisse pour améliorer le fini du joint et en conséquence, les performances en fatigue [86] L'épaulement joue le rôle de butée déterminant la longueur de pénétration de la tige et permet aussi le blocage du reflux de la matière vers le haut.

D'autre part, la surface de l'épaulement peut être lisse ou texturée, dans ce dernier cas l'écoulement du matériau peut être facilité par la présence de rainures.

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

L'outil FSW a une forme enveloppe relativement simple. Il est schématisé sur la Figure 2.7. Il a trois fonctions principales :

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

L'épaulement a pour rôle d'amener de la chaleur par frottement et de confiner la matière malaxée sous l'outil. Le pion, lui, a pour fonction de malaxer le matériau.

Toutefois, c'est l'action combinée de ces deux éléments qui assure l'apport de chaleur et le flux de matière nécessaire à la formation du joint. La Figure 2.8 présente différentes géométries d'outils. Les formes du pion et de l'épaulement ainsi que la présence de filets, de gorges, de rainures, etc. conditionnent le flux de matière et la génération de température. L'ensemble influence la microstructure du cordon formé et donc ses propriétés mécaniques. C'est pourquoi, la géométrie de l'outil a fait l'objet de plusieurs études de recherche et de développements.

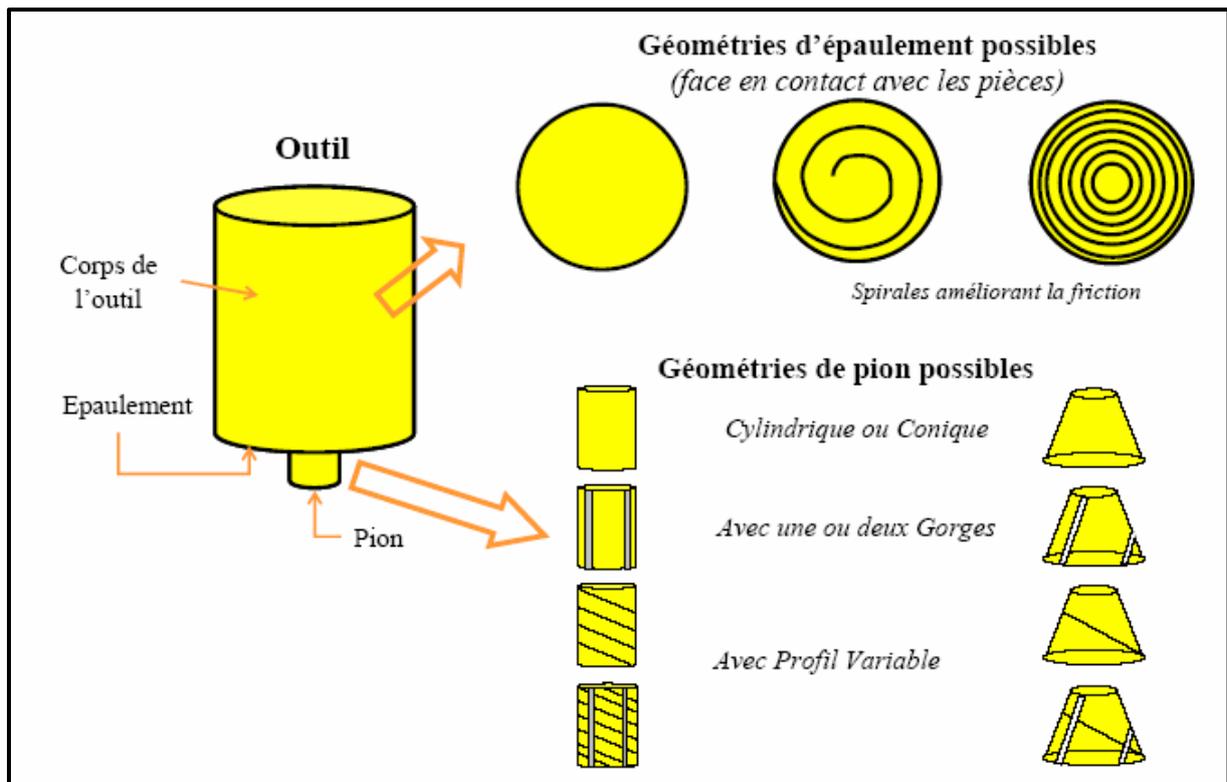


Figure 2.9 :Schématisation de l'outil de soudage et de quelques géométries des pions et de l'épaulement [86].

Le choix de la géométrie de l'épaulement qui peut être plat, concave ou convexe dépend de la configuration du joint à souder. On utilise généralement un épaulement convexe pour les soudures d'angles alors que l'épaulement concave est plus adéquat pour un soudage de joint bout à bout, enfin l'épaulement plat peut s'avérer préférables lors du soudage de surface courbes telles des tuyaux. Le pion est également un élément très important, deux buts sont recherchés pour une amélioration de l'écoulement de la matière et la minimisation des efforts appliqués [86]

L'écoulement peut être amélioré en augmentant :

- ❖ La quantité de chaleur générée que ce soit par frottement ou par déformation plastique.
- ❖ La quantité de métal déplacée.

De manière générale on essaie d'augmenter la surface de contact entre la tige et le matériau pour augmenter la quantité de chaleur générée et maximiser la quantité de métal déplacée.

La minimisation des efforts appliqués améliore l'efficacité énergétique des procédés. Dans le même contexte d'amélioration de la qualité du soudage on préfère comme pion une tige filetée et / ou vrillée.

La comparaison des tiges filetées et lisses montre l'utilité du filetage [85]

Pour un ensemble de paramètres donné, une tige mène à un joint montrant des cavités internes, cela conduit à une réduction importante de la résistance du joint en traction. Les pions filetés ou vrillés engendrant un mouvement vertical du métal déplacé, ce qui améliore la pénétration du soudage et même à une meilleure intégrité du joint. Toutefois les aspérités qui emprisonnent une partie du matériau ont pour effet d'augmenter la force verticale et le couple appliqué sur l'outil lorsque le soudage est effectué en contrôlant la position [87]

La forme optimale doit donc permettre de déplacer une grande quantité de matériau sans emprisonner ce dernier.

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

2.1.3 Différents types d'outils :

On distingue trois différentes configurations d'outils possibles qui sont utilisées pour le soudage par friction-malaxage (FSW). Ceux sont, l'outil conventionnel, l'outil à pion rétractable et l'outil à double épaulement appelé aussi « Bobbin Tool » ou « Self tool ».

Les trois types d'outil sont schématisés sur la figure 2.10.

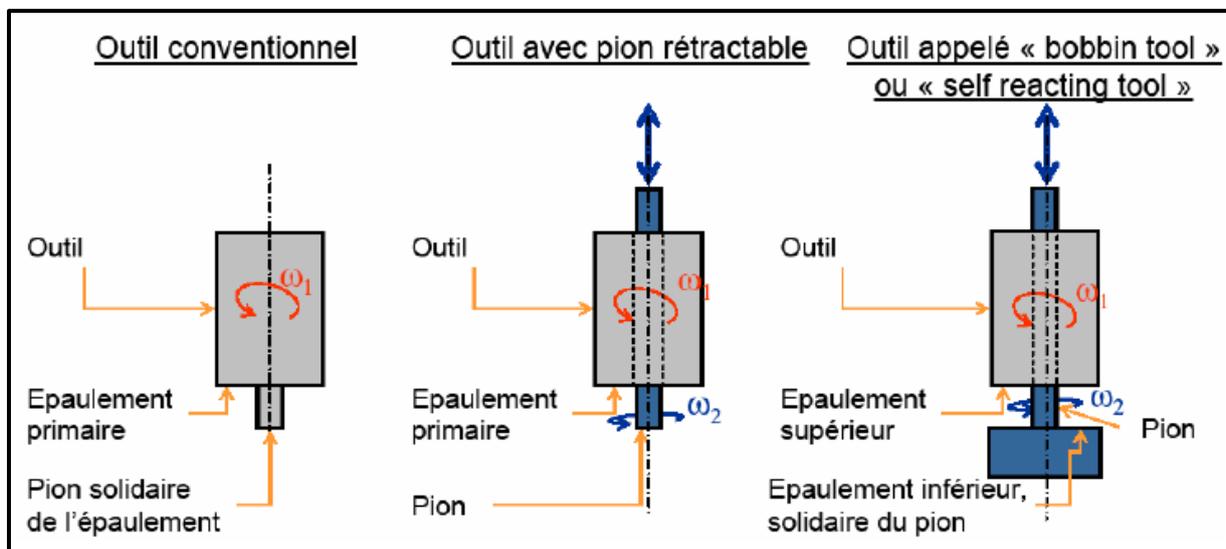


Figure 2.10 : Les différentes technologies de soudage [88].

❖ L'outil conventionnel

Il est fait d'un seul bloc (le pion et l'épaulement sont solidaires). Il n'y a pas de mouvement relatif possible entre le pion et l'épaulement et le soudage s'effectue avec appui et frottement de l'épaulement sur une seule face. C'est la configuration la plus simple. Cette technologie possède quelques inconvénients :

- Chaque pion est calibré pour souder une épaisseur donnée.
- En cas de rupture du pion, il faut changer tous l'outil.

- A la fin du soudage, la sortie de l'outil provoque la formation d'un trou.

❖ **L'outil à pion rétractable**

Cet outil a la particularité de fonctionner avec un épaulement et un pion actionnés par deux axes machines indépendants l'un de l'autre, possibilité donc de mouvement relatif.

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

❖ **L'outil à double épaulement « Bobbin Tools »**

Possède deux épaulement positionnés cotés endroit et envers des pièces à souder. L'apport de chaleur s'effectue par frottement des épaulements sur les deux faces des pièces. La distribution de la température est alors symétrique à l'intérieur du joint. La soudure est verticalement symétrique et le risque de manque de liaison (défaut de pénétration) est éliminé.

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

Comme pour l'outil avec pion rétractable, le pion et l'épaulement inférieur ne sont pas solidaires de l'épaulement supérieur. Les deux ensembles sont pilotés de manière indépendante par deux actionneurs. L'effort de soudage est appliqué par l'épaulement inférieur et repris par l'épaulement supérieur pour créer un effort de pincement des tôles. Cette technologie permet d'envisager le soudage des pièces d'épaisseurs plus importantes dont la géométrie ne permet pas l'utilisation d'enclume. Toutefois, la présence de l'épaulement secondaire limite encore plus les géométries possibles des joints. [88]

D'autres types d'outils peuvent exister et sont schématisés par la figure 2.11. de la température est alors symétrique à l'intérieur du joint. La soudure est verticalement symétrique et le risque de manque de liaison (défaut de pénétration) est éliminé.

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

Comme pour l'outil avec pion rétractable, le pion et l'épaulement inférieur ne sont pas solidaires de l'épaulement supérieur. Les deux ensembles sont pilotés de manière indépendante par deux actionneurs. L'effort de soudage est appliqué par l'épaulement inférieur et repris par l'épaulement supérieur pour créer un effort de pincement des tôles. Cette technologie permet d'envisager le soudage des pièces d'épaisseurs plus importantes

dont la géométrie ne permet pas l'utilisation d'enclume. Toutefois, la présence de l'épaulement secondaire limite encore plus les géométries possibles des joints. [88]

D'autres types d'outils peuvent exister et sont schématisés par la figure 2.11.

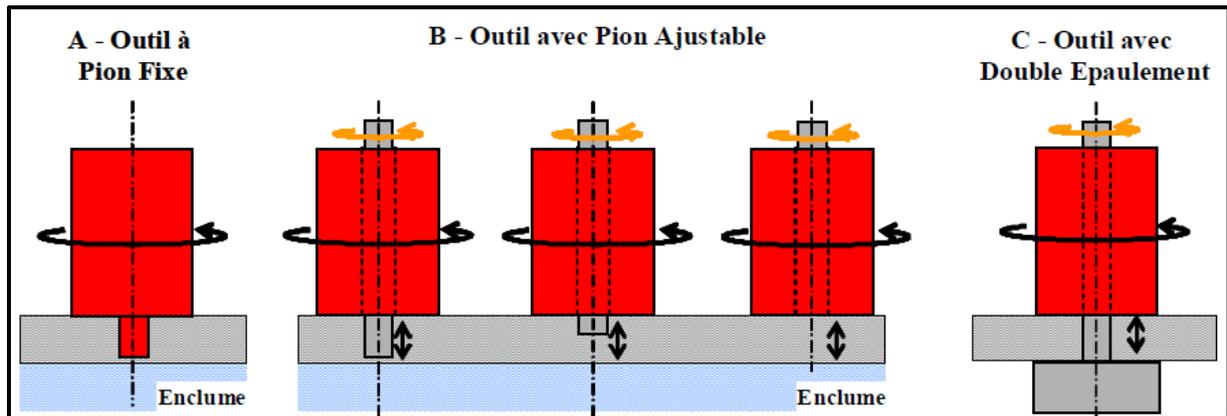


Figure 2.11 : Différents technologies d'outils (Normes, ARB07a).

2.1.4 Les différentes phases opératoires :

Les Figures .10, 11 et 12 qui suivent présentent de façon schématique les trois différentes phases opératoires du procédé de soudage par FSW. L'opération de soudage peut-être décomposée en 3 phases successives : une phase d'approche, une phase de réalisation du cordon de soudure et une phase de retrait de l'outil.

❖ Phase d'approche (Figure 2.12) :

C'est au cours de la première phase de l'opération que l'outil va pénétrer progressivement dans l'interface des pièces à assembler. Pour ce faire, l'outil doit vaincre un couple (effort) résistif important. L'élévation progressive de la température, due au frottement, entraîne un «ramollissement» de la matière, facilitant l'insertion du pion dans l'interface. Il pénètre dans la matière jusqu'à ce que l'épaulement soit en contact avec la surface des pièces à souder. L'outil tourne encore quelques secondes sur lui-même afin d'atteindre le une température suffisante pour le soudage). Ce temps d'attente est appelé temps de maintien ou « dwell time ». L'opération de soudage proprement dite peut alors commencer. Le temps de maintien n'est pas toujours nécessaire, l'avance du pion peut débuter dès que l'outil a pris position dans les pièces.

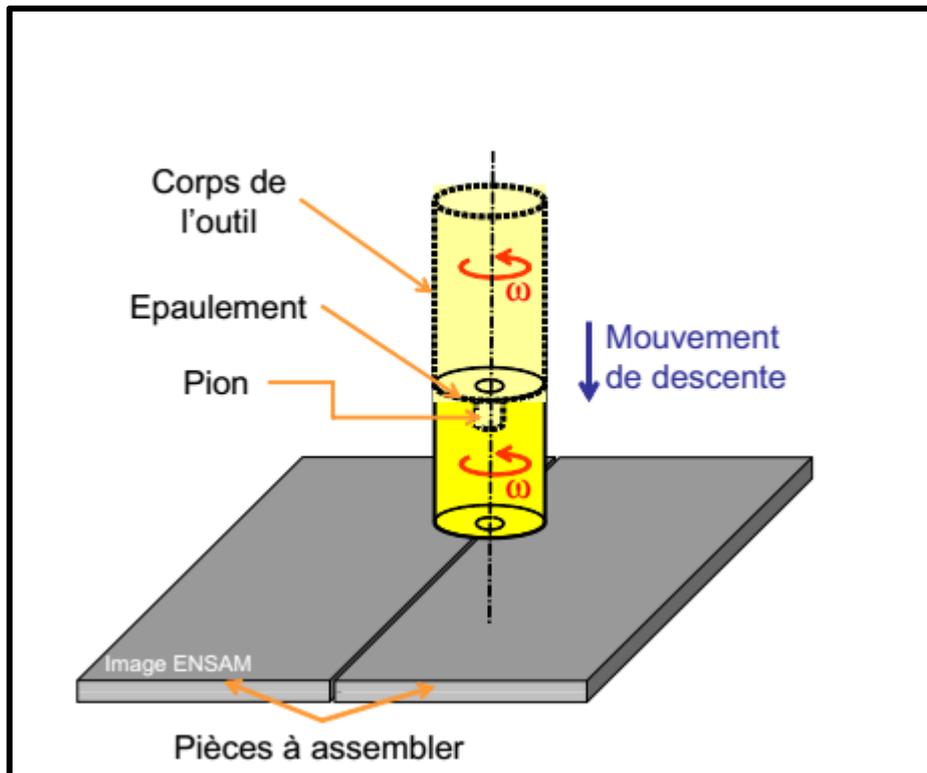


Figure 2.12 : Phase 1 – Phase De Descente. [77].

❖ Phase de soudage (Figure 2.13) :

L'outil est alors animé d'un mouvement d'avance le long de la ligne de soudage. Le régime permanent est atteint avec l'équilibre thermique entre l'apport de chaleur par friction et la dissipation dans les pièces et les outillages (enclume et bridage). La matière est alors brassée autour du pion et en dessous de l'épaule, entraînant une déformation plastique de cette dernière.

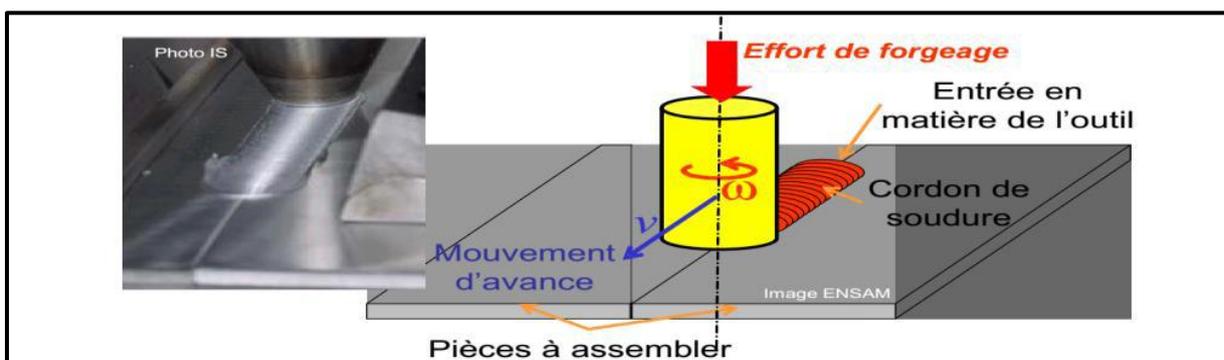


Figure 2.13 : Phase 2 : Réalisation De Cordon[77].

❖ Phase de retrait de l'outil (Figure 2.14):

Une fois le cordon réalisé, l'outil est alors sorti de la matière. Selon le type d'outil utilisé, l'empreinte du pion à l'intérieur de la matière peut être présente au niveau de l'extraction du pion. Ceci est le cas lorsque le pion et l'épaulement restent solidaires durant la phase de retrait de l'outil.

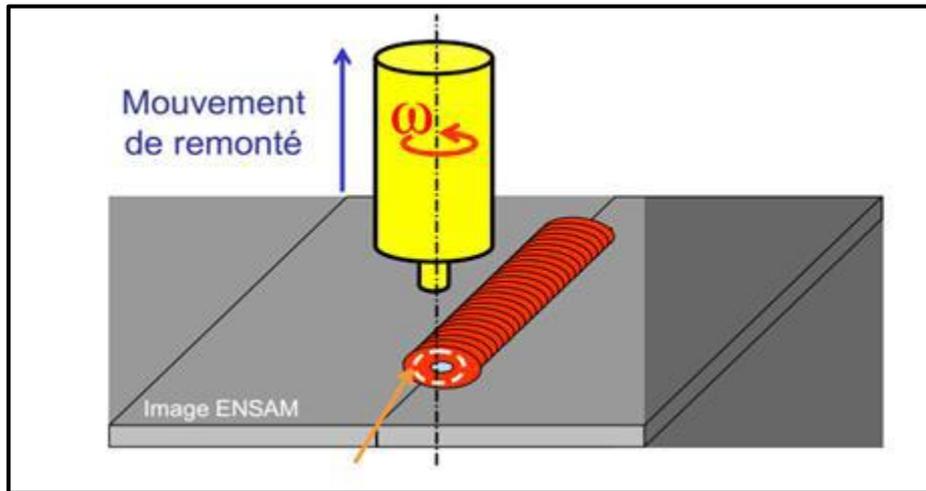


Figure 2.14 : Phase 3 : Retrait de l'outil [77].

Il est parfois nécessaire de couper les deux extrémités de la soudure après soudage car d'une part, la sortie de l'outil peut générer un trou et d'autre part, la température en début de soudage n'atteint pas de façon immédiate le régime établi (présence possible de défauts dans la soudure [77])

2.1.5 Paramètres du soudage par friction-malaxage FSW :

Le procédé de soudage par friction malaxage est très différent des procédés de soudage conventionnels étant donné qu'aucun métal d'apport et qu'aucune source de chaleur externe ne

sont utilisés. Il nécessite toutefois des équipements plus imposants que le soudage à l'arc ou au plasma et autant de précision au niveau du contrôle de ses paramètres. En effet, ceux-ci varient selon l'épaisseur, le type de matériau et le type de soudure à réaliser. Les quatre principaux paramètres de soudage sont :

- ✓ la géométrie de l'outil.
- ✓ la vitesse de rotation de l'outil.
- ✓ la vitesse d'avance de l'outil.
- ✓ la position de l'outil.

Évidemment, ces paramètres varient selon plusieurs facteurs. Il est donc nécessaire de bien comprendre leurs effets pour obtenir une soudure de qualité [89].

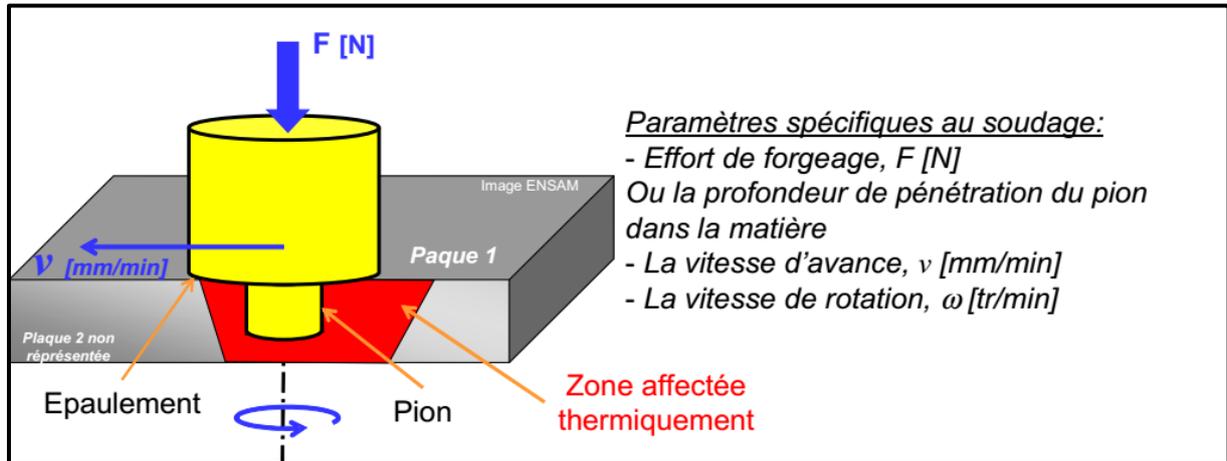


Figure 2.15 : Visualisation des paramètres des soudages [89].

2.2 Avantages et inconvénients du procédé :

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

➤ **Avantages liés au procédé :**

- Large gamme d'épaisseurs soudables,
- Préparation des surfaces des pièces à assembler par usinage mécanique,
- Pas de décapage chimique avant soudure pour alliages légers,
- Possibilité de souder des matériaux différents,
- Soudure en une seule passe sur toute l'épaisseur, ou en deux passes opposées sur épaisseurs fortes,

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

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

➤ **Avantages économiques et environnementaux :**

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

➤ **Avantages liés à l'équipement :**

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

➤ **Inconvénients :**

Dans ce procédé, et contrairement aux procédés continus conventionnels, la soudure s'effectue en « aveugle », du fait que, l'épaulement et l'appui masquent complètement les phénomènes dont la soudure résulte. L'impossibilité visuelle directe est un handicap dans la recherche de paramètres et dans la surveillance du soudage en cours ; s'impose ainsi la nécessité de disposer d'un système de surveillance et de contrôle des paramètres en temps réel. De plus, en fin de cordon, le retrait de l'outil laisse un trou qu'il n'est pas possible de combler de façon simple par FSW. Pour des soudures linéaires ouvertes, cela implique la mise en oeuvre de taquets à éliminer en début et en fin de cordon.[90]

2.3 Phénomènes physiques se produisant lors du soudage par friction malaxage :

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

a) 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.

b) Thermique :

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

c) Métallurgie :

Les phénomènes mécaniques et thermiques, dans l'ensemble des procédés de soudage par fusion, entraînent une modification de la microstructure du matériau de base et ses propriétés Mécaniques. Cet inconvénient provient des phénomènes métallurgiques qui apparaissent lors du soudage et qui représentent le lieu de concentration des contraintes dans le cas des sollicitations externes. Le premier phénomène métallurgique est la modification de l'état de précipitation du matériau. Le second est la recristallisation du matériau. Le procédé de soudage FSW permet au contraire d'obtenir des modifications métallurgiques moins importantes, par rapport aux autres procédés, causées par les différents changements de phase au cours de soudage. Une coupe transversale du joint soudé permet d'obtenir les différentes zones dans lesquelles la matière est affectée thermiquement (Heat Affected Zone HAZ) ou thermo-mécaniquement (Thermo Mechanical Affected Zone TMAZ) (Chaque zone dépend de la température atteinte, des modifications métallurgiques et des déformations subies au cours du procédé de soudage [91])

3 *Chapitre III*

3.1 **Présentation du code de calcul par éléments finis ABAQUS [97] :**

Fondé en 1978, ABAQUS, est l'un des premiers fournisseurs mondiaux de logiciels et Services pour l'analyse par éléments finis. La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommées mondiale dans tous les secteurs industriels.

ABAQUS offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Le logiciel fournit un environnement inégalé pour l'analyse par éléments finis, proposant un grand nombre de choix aux opérations impliquant des fournisseurs et des produits multiples.

3.2 **Les Logiciels sur le marché :**

Il faut savoir que les logiciels de conception et de calculs assistés par ordinateur sont très nombreux sur le marché. Les plus utilisés sont NASTRAN, CATIA, ABAQUS et SolidWorks. Tous ces logiciels effectuent les mêmes tâches, c'est à dire qu'ils génèrent les caractéristiques et de faire des calculs d'une structure (déformations, ruptures, plastification...) et enfin ils permettent de traiter ces résultats afin d'en sortir des données utilisables et exploitables.

La plupart des entreprises utilisent un assortiment de ces logiciels qui sont plus ou moins performants dans l'une ou l'autre de ces tâches, par exemple, dessiner avec CATIA, calculer avec ABAQUS et faire du post traitement avec NASTRAN. Il vous sera donc certainement demandé dans le monde de l'entreprise une maîtrise de plusieurs de ces outils, d'où l'intérêt de commencer avec ABAQUS. [92]

3.3 **Deux solveurs principaux:**

Le programme d'éléments finis que nous utilisons dans l'espace FEA (Final Élément Analyse) est *ABAQUS / CAE*, une interface utilisateur inspirée et similaire pour l'ensemble du système. ABAQUS est une suite de modules d'analyse par éléments finis. Les modules d'analyse, *ABAQUS / Standard* et *ABAQUS / Explicit*, constituent le coeur des outils d'analyse complémentaires et intégrés.

ABAQUS/CAE intègre les modules d'analyse dans un environnement ABAQUS complet pour la modélisation, la gestion et la surveillance de l'analyse ABAQUS et la visualisation des résultats. [93]

3.4 ABAQUS :

3.4.1 ABAQUS/Standard : Algorithme implicite

- Code général d'analyse par éléments finis (discrétisation spatiale)
- Résolution basée sur l'algorithme de Newton-Raphson et la méthode de Riks.
- Problèmes linéaires et non linéaires.
- Géométrie 1D, 2D, 3D et Axisymétrique.
- Nombreuses procédures d'analyse dans le domaine temporel et fréquentiel

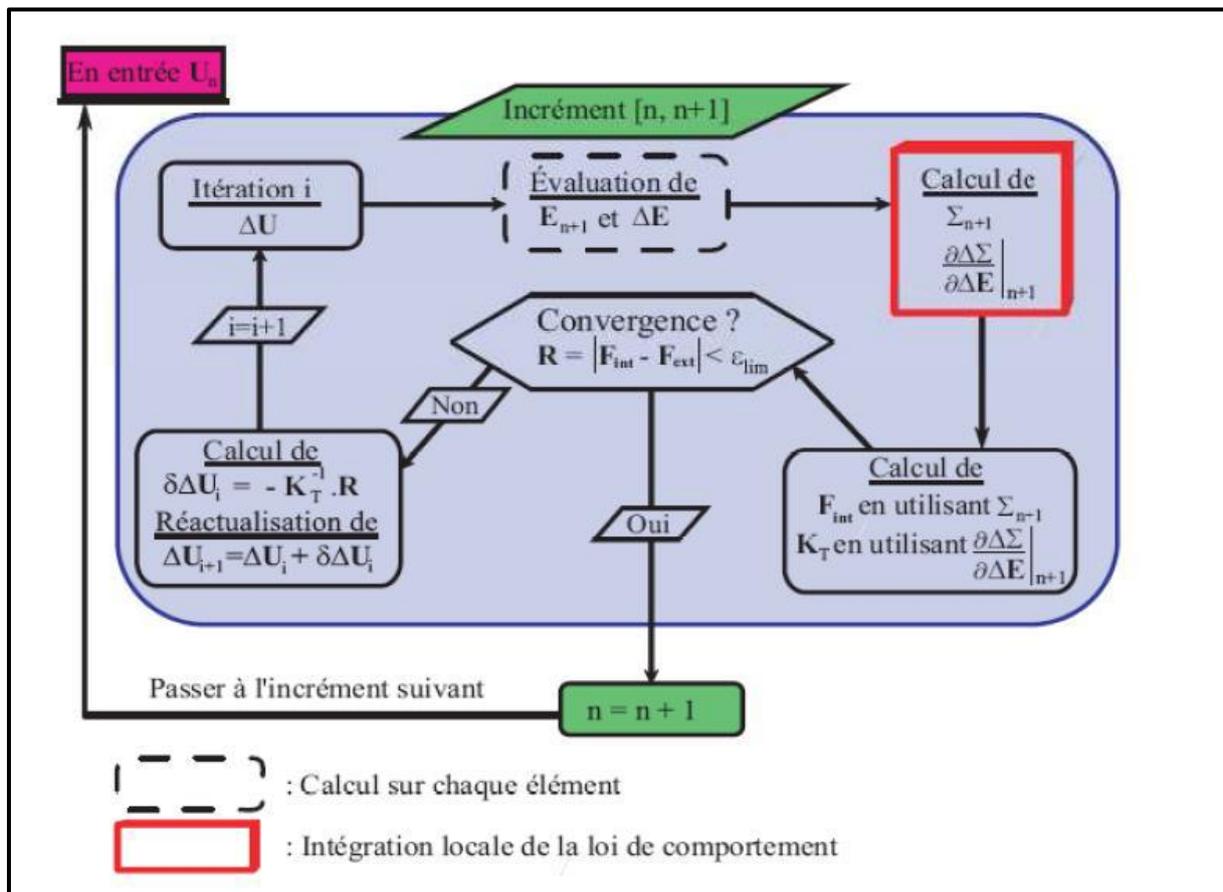


Figure 3.1 : Organigramme de résolution de schéma implicite. [94].

3.4.2 ABAQUS/Explicit:

Algorithme « dynamique » explicite.

- Analyse non linéaire (discrétisation spatiale et temporelle).
- Problème transitoire et dynamique des structures.
- Résolution basée sur la méthode explicite d'intégration en temps.

Mais possibilité d'analyses quasi-statiques où il existe un comportement non linéaire important.

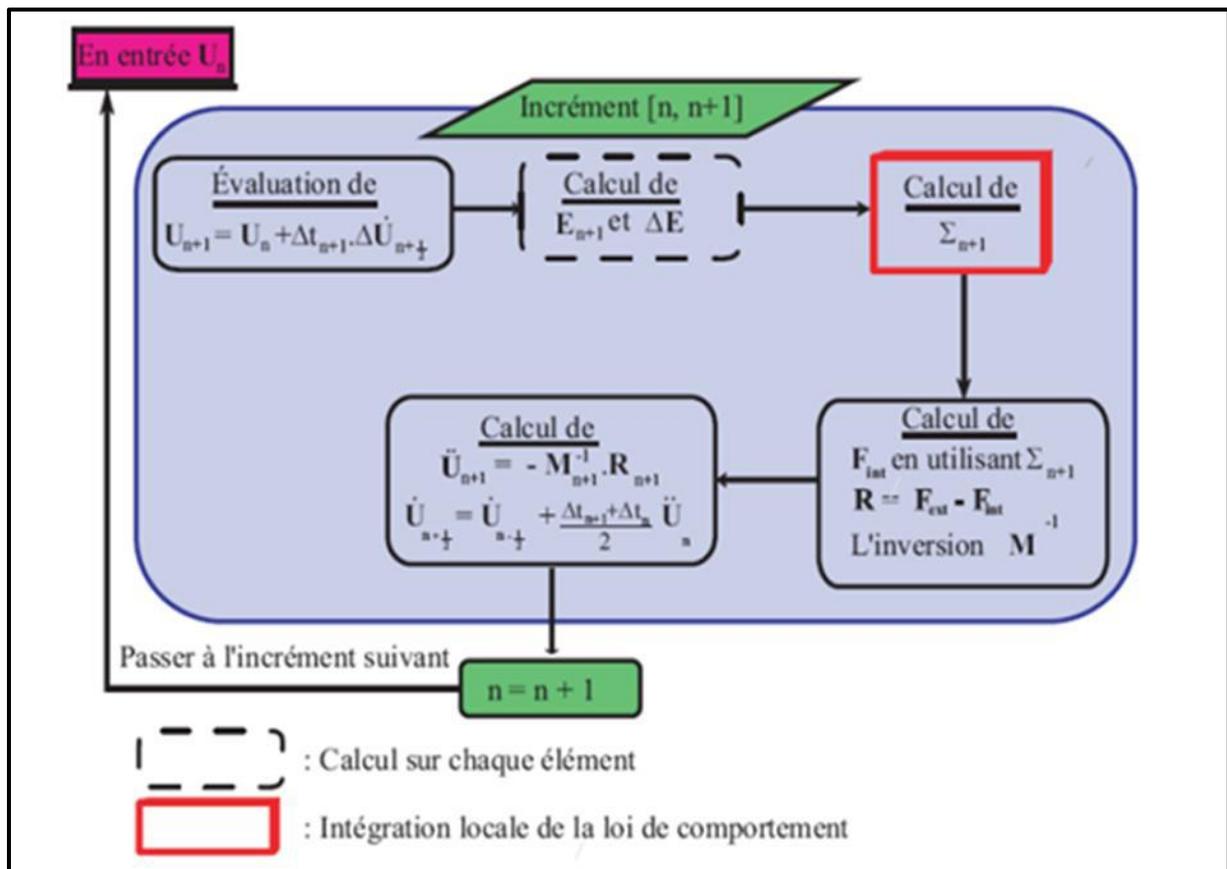


Figure 3.2 : Organigramme de résolution de schéma explicite.

3.5 Comparaison :

Le tableau présente une comparaison entre la méthode Explicit et Implicite :

EXPLICITE	IMPLICITE
☹ Conditionnellement stable	☺ inconditionnellement stable
☹ pas de temps réduit	☺ pas de temps géré par l'utilisateur
☺ précision en Δt^2	☺ précision en Δt^2
☺ inversion de $[M]$, diagonale	☹ inversion de $[M] + \alpha[K]$, non diagonale
☺ taille mémoire réduite	☹ taille mémoire importante
☺ résolution élément par élément	☹ Résolution globale, nécessite la convergence à chaque itération
☺ robuste	☹ pivots nuls, divergence
☺ faible coût CPU	☹ coût CPU important

Tableau 3.1: Inconvénients et avantages de module implicite et explicite. [94]

3.6 Présentation des différents types d'éléments Abaqus :

Le code de calcul ABAQUS dispose d'une multitude de types d'éléments qui diffèrent par leurs propriétés d'interpolation, de symétrie et leurs propriétés physiques. Ainsi, le code propose des éléments à 3D dimensions, à 2D dimensions des éléments linéaires (1D) et les connecteurs.

Le choix entre ces différentes dimensionnalités dépend de la maîtrise du problème à simuler.

Ce qui permet de tenir compte des symétries de géométrie, des chargements, des conditions aux limites et des propriétés des matériaux. [95]

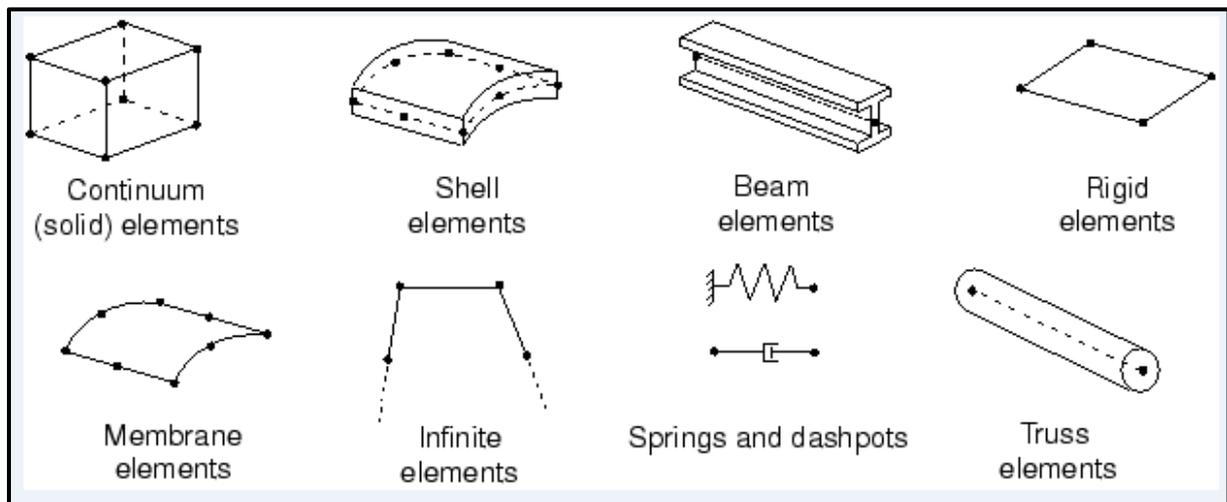


Figure 3.3 : Différents types d'éléments disponibles dans la bibliothèque d'Abaqus.

3.7 Les systèmes d'unités dans le logiciel ABAQUS : [97]

Avant de commencer à définir un modèle, vous devez choisir le système d'unités que vous utiliserez. ABAQUS n'a pas de système intégré d'unités. Toutes les données d'entrée doivent être spécifiées dans des unités cohérentes dans les résultats qui suivent le système d'unité et base sur SI (mm).

Quantité	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Longueur	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Masse	kg	tonne (10 ³ kg)	slug	lbf s ² / in
Temps	s	s	s	s
Contrainte	Pa (N / m ²)	MPa (N / mm ²)	lbf / ft ²	Psi (lbf / in ²)
Energie	J	mJ (10 ⁻³ J)	ft lbf	in lbf
Masse volumique	kg/m ³	tonne / mm ³	slug / ft ³	lbf s ² / in ⁴

Tableau 3.2: les unités dans ABAQUS. [93].

3.8 Structure d'une analyse sous Abaqus :

Abaqus n'est qu'un solveur (implicite, explicite) qui effectue la résolution d'un Problème décrit par un fichier d'entrée (ou fichier de données) et qui écrit la solution vers un Fichier de sortie (ou fichier de résultats).

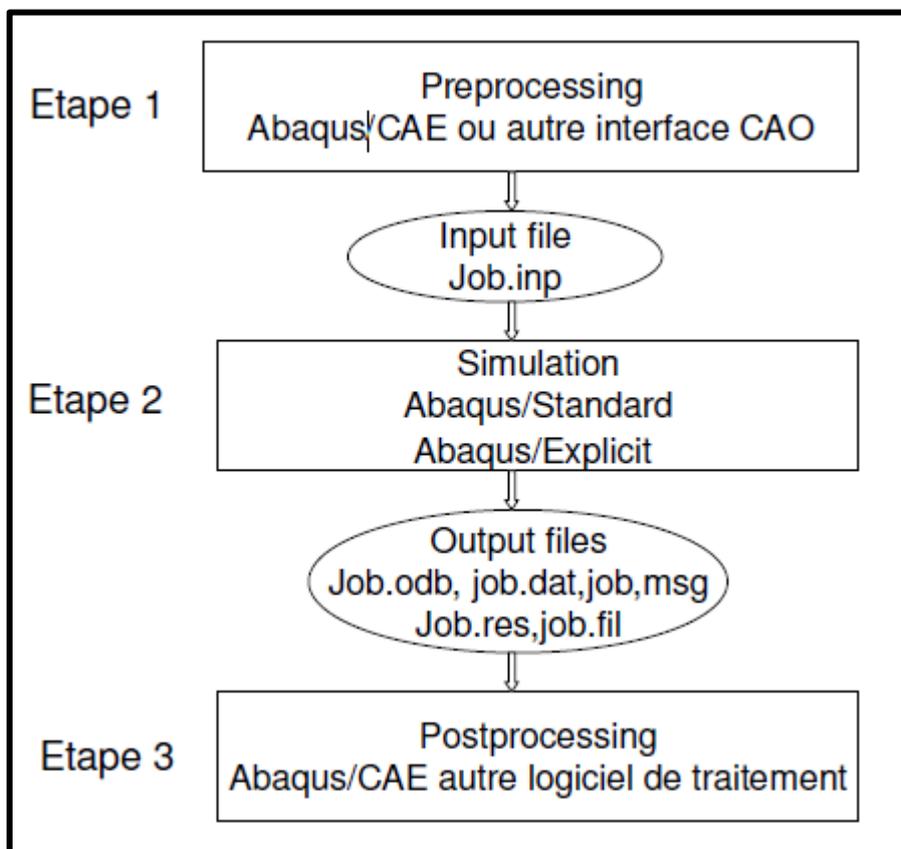


Figure 3.4: structure d'analyse sur ABAQUS.[93].

3.9 Caractéristiques du logiciel ABAQUS :

ABAQUS® a été développé par Hibbit, Karlsson & Sorensen (HKS) (devenue ABAQUS®, Inc depuis) depuis 30 ans et le début de la théorie des éléments finis et a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer toutes les nouveautés de la théorie et des besoins de l'entreprise, jusqu'à ce que l'entreprise soit rachetée par Dassault industries en Octobre de l'année 2005. ABAQUS® est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de Problèmes non linéaires. [98]

Le coeur du logiciel ABAQUS® est donc ce qu'on pourrait appeler son "moteur de calcul". À partir d'un fichier de données (caractérisé par le suffixe. inp), qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier .odb. Deux tâches restent à accomplir : générer le fichier de données (cela s'appelle aussi effectuer le prétraitement), et exploiter les résultats contenus dans le fichier. odb (ou post traitement). La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux, des chargements, etc..., suivant une syntaxe précise. [98]

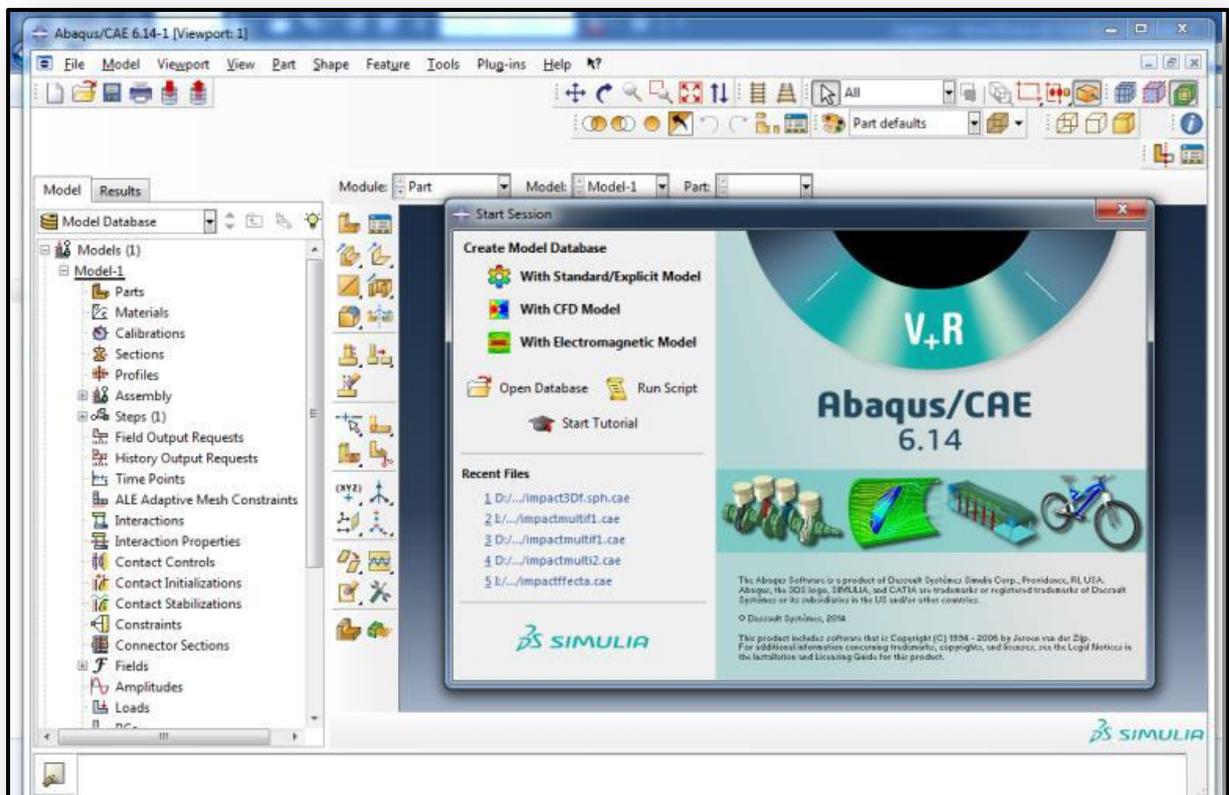


Figure 3.5 : Interface de code d'ABAQUS.

Il faut savoir que le pré traitement et le post traitement peuvent être effectués par d'autres logiciels. ABAQUS® propose le module ABAQUS®/ CAE, interface graphique qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation : La génération du fichier de données, Le lancement du calcul proprement dit, L'exploitation des résultats.

3.10 Présentation du logiciel ABAQUS/CAE :

ABAQUS / CAE est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module Contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation :

a) **Le module Part :** Le module Part permet de créer tous les objets géométriques nécessaires à notre problème, soit en les dessinant dans ABAQUS®/ CAE, soit en les important d'un logiciel de dessin tiers.



Figure 3.6 : Fenêtre de module part.

b) **Le module Property :**

Le module propriété permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.

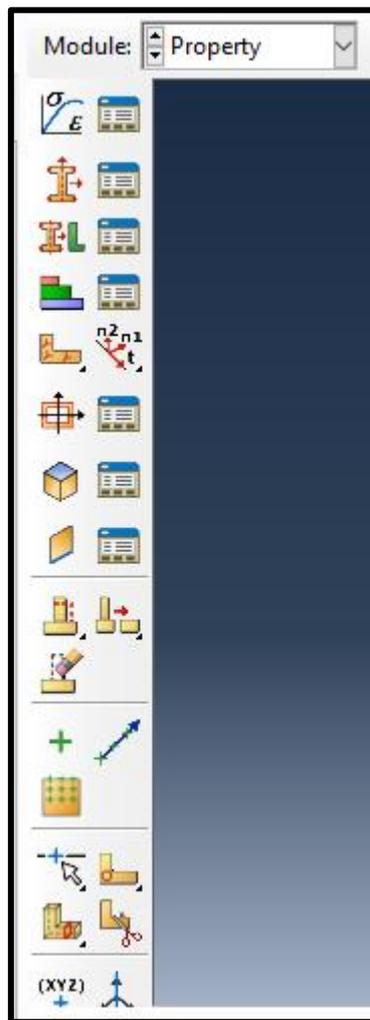


Figure 3.7 : Fenêtre de module Property.

c) Le module Assembly :

Ce module permet d'assembler les différents objets géométriques assemblage.



Figure 3.8 :Fenêtre de module Assembly.

d) Le module Step :

Ce module permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est à dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à quand, il est aussi possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés.

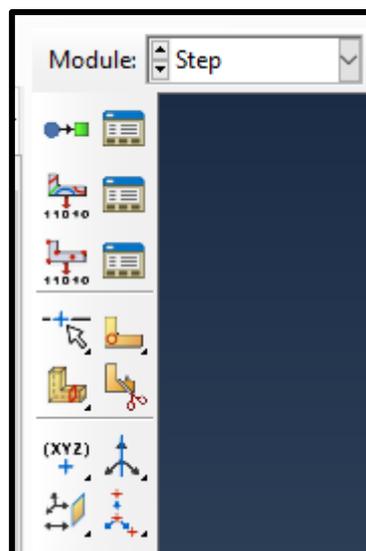


Figure 3.9: Fenêtre de module step.

e) **Le module Interaction :**

Grâce ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'ABAQUS ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante



Figure 3.10: Fenêtre de module interaction

f) **Le module Load :**

Le module **Load** permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs. Il faut savoir que les chargements et les conditions limites sont dépendants des steps, par exemple une force est appliquée au step 1 mais inactive au step 2 :



Figure 3.11: Fenêtre de module load .

g) *Le module mesh :*

Le module de mesh pour le maillage de la pièce et pour donner une forme géométrique



Figure 3.12 :Fenêtre de module mesh.

h) Le module Job :

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module Job pour analyser ce modèle. ABAQUS® va alors réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats.

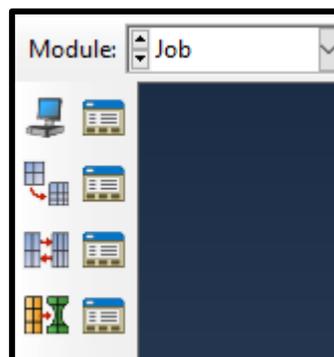


Figure 3.13 : Fenêtre de module job.

Le module Visualisation :

Ce module permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations...



Figure 3.14: Fenêtre de module Visualisation.

4 *Chapitre IV : Simulation numérique*

4.1 Module part :

Dans le module part on a dessiner les plaque d'aluminium et d'acier et acier avec même dimension et l'outil métallique en 3D.

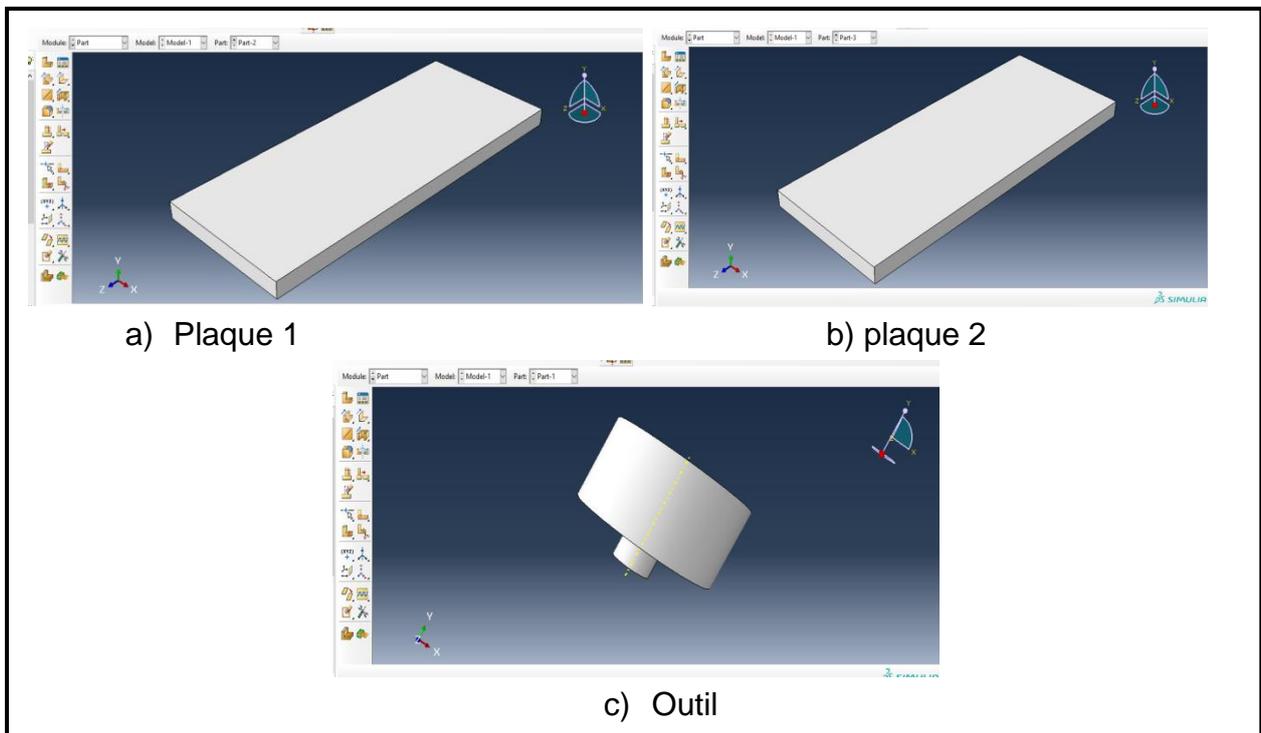


Figure 4.1 : module part bien termine.

4.2 Module property :

Dans ce module il faut choisir les différent propriétés mécaniques tel que le module de Young, le coefficient de poisson, la densité, la conductivite et la chaleur spécifique.

	Aluminium	Acier	Outils
Densité (Kg/m ³)	0.1246	0.0975	0.0961
Module de Young (MPa)	9409	10000	10300
Coefficient de Poisson	0.13	0.3	0.3
Conductivité (s/m)	0.23	0.39	0.27
Spécificité de la chaleur (j)	0.274	0.214	0.215

Tableau 4.1: de propriétés

4.3 Module assembly

On assemble plaque d'aluminium et plaque d'acier et l'outil comme présenté dans la figure suivante :

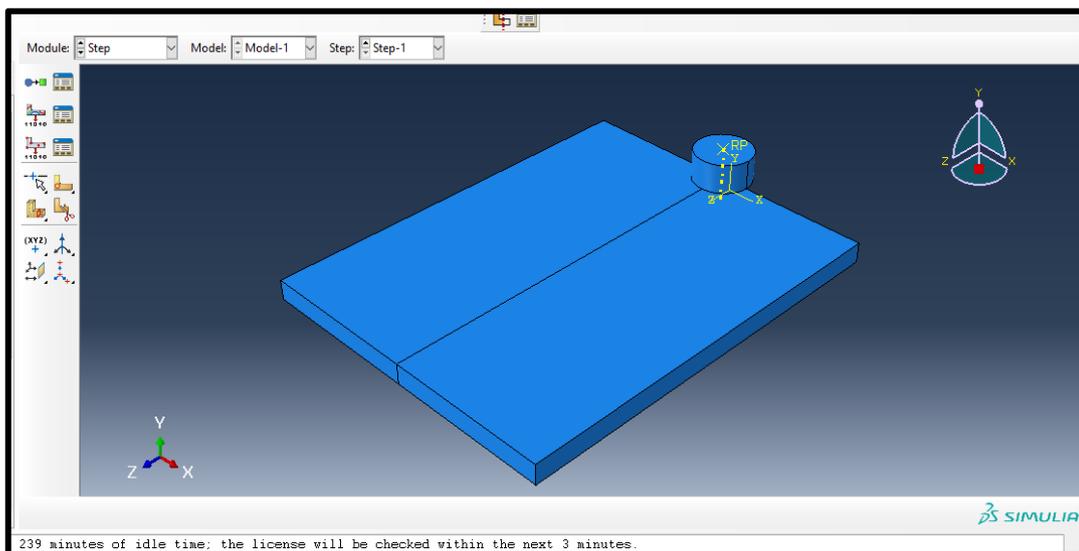


Figure 4.2: du module assembly.

4.4 Module step :

Dans ce module on choisit la période 20s (time) et user- defined time increment 0.001 et donner dans le figure suivante :

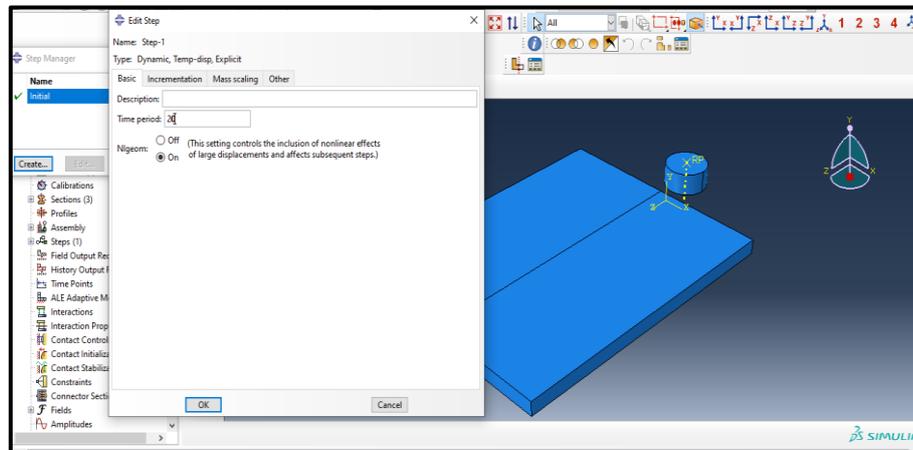


Figure 4.3 : module du step .

4.5 Module interaction :

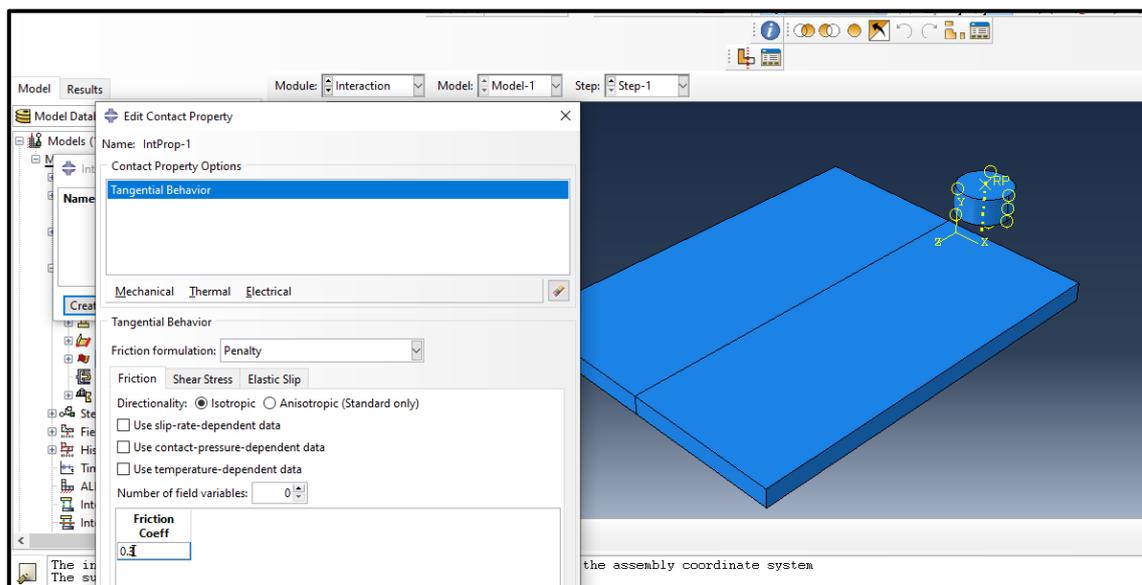


Figure 4.4: module d'interaction.

4.6 Module mesh :

C'est le maillage de plaque d'aluminium et plaque d'acier et l'outil pour donner une forme géométrique

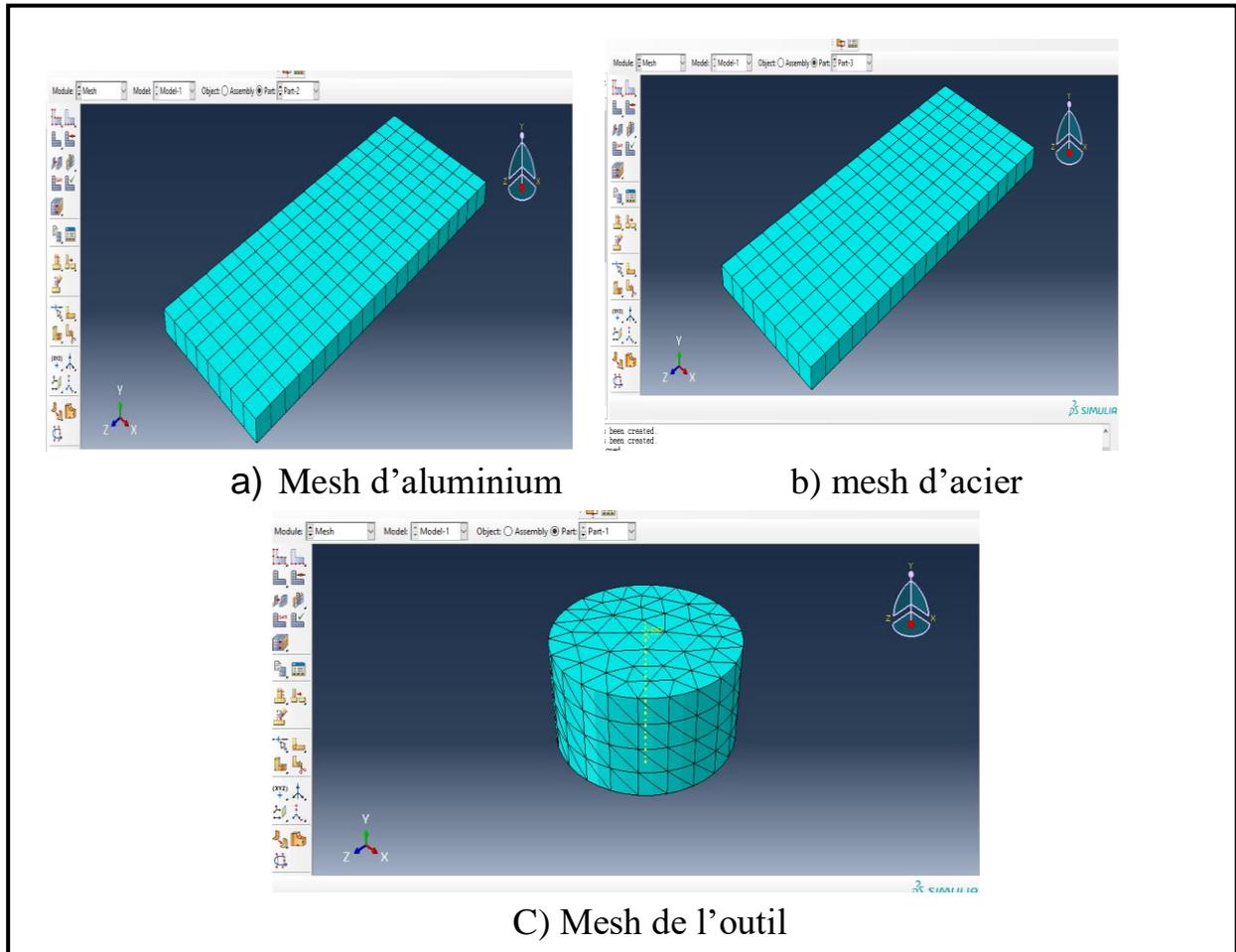


Figure 4.5 : Le maillage.

4.7 Module load :

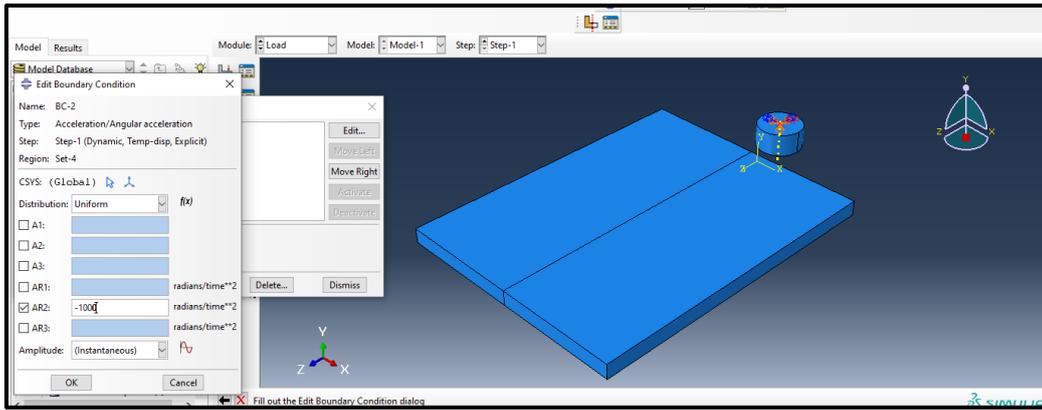


Figure 4.6 : module load.

4.8 Module job :

Dans ce module en lancer calcul on peu resultat de module visualisation.

Step	Increment	Total Time	CPU Time	Step Time	Stable Time Inc	Kinetic Energy	Total Energy
1	1000	1	3.3	1	0.001	1.63671e+06	1.54887e+06
1	2000	2	6.7	2	0.001	1.83269e+06	1.54895e+06
1	3000	3	10.2	3	0.001	2.19837e+06	1.549e+06
1	4000	4	13.7	4	0.001	2.71325e+06	1.54904e+06

Errors	Warnings	Output	Data File	Message File	Status File
Submitted: Sat Jun 15 23:59:52 2019 started: Analysis Input File Processor completed: Analysis Input File Processor started: Abaqus/Explicit Packager completed: Abaqus/Explicit Packager started: Abaqus/Explicit					

Figure 4.7 : de monitor.

4.9 Module vitalisation :

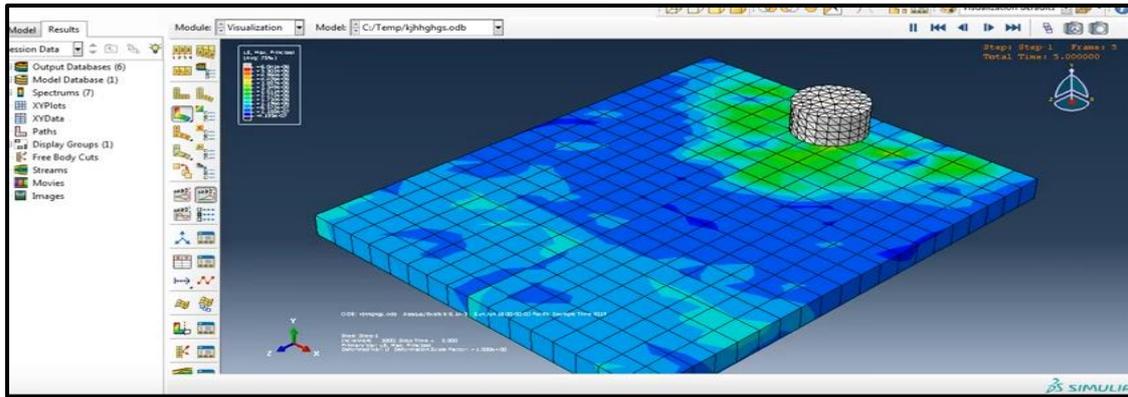


Figure 4.8 : module visualisation

Conclusion générale

Le procédé de soudage par friction malaxage FSW devient rapidement la méthode d'assemblage de choix pour alliage d'aluminium et acier. Le procédé à l'état solide est capable de former des soudures haute-fidélité a d'excellents débits.

L'objectif principal de ce travail était d'utilisation de logiciel ABAQUS/CAE pour simuler numériquement le procédé de soudage par friction malaxage(FSW) d'alliage avec aluminium.

Références bibliographiques

- [1] Cazes, R., *Procédés de soudage: Principes généraux et critères de choix*. Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique, 1995(B7700): p. B7700. 1-B7700. 6.
- [2] Murry, G., *Soudage et soudabilité métallurgique des métaux*. Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques, 1994(M715): p. M715. 1-M715. 35.
- [3] Blondeau, R., *Procédés et applications industrielles du soudage*. Hermès Science publication, Paris, 2001.
- [4] Perry, N., *Etude et développement des flux solides en vue d'application en soudage ATIG appliqué au titane et ses alliages ainsi qu'aux aciers inoxydables*, 2000, Ecole Centrale de Nantes (ECN)(ECN)(ECN)(ECN).
- [5] Centre technique des industries, m., *Mécanosoudage : conception*1989, Senlis, Oise: CETIM.
- [6] Borrisutthekul, R., et al., *Feasibility of using TIG welding in dissimilar metals between steel/aluminum alloy*. Energy Research Journal, 2010. **1**(2): p. 82-86.
- [7] Dong, H., et al., *Dissimilar metal joining of aluminum alloy to galvanized steel with Al -Si, Al -Cu, Al -Si -Cu and Zn -Al filler wires*. Journal of Materials Processing Technology, 2012. **212**(2): p. 458-464.
- [8] Mathers, G., *The welding of aluminium and its alloys*2002: Woodhead publishing.
- [9] Davis, L. and M. Sc, *An introduction to welding fluxes for mild and low alloy steels*1981: Welding Institute.
- [10] He, H., et al., *Strength prediction of aluminum -stainless steel-pulsed TIG welding - brazing joints with RSM and ANN*. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2014. **27**(6): p. 1012-1017.
- [11] Zhang, H. and J. Liu, *Microstructure characteristics and mechanical property of aluminum alloy/stainless steel lap joints fabricated by MIG welding -brazing process*. Materials Science and Engineering: A, 2011. **528**(19): p. 6179-6185.
- [12] Sierra, G., *Etude métallurgique et mécanique de l'assemblage hétérogène acier/aluminium par les procédés laser et TIG*, 2006, Montpellier 2.
- [13] Song, J., et al., *Effects of Si additions on intermetallic compound layer of aluminum -steel TIG welding -brazing joint*. Journal of Alloys and Compounds, 2009. **488**(1): p. 217-222.
- [14] Song, J., et al., *Spreading behavior and microstructure characteristics of dissimilar metals TIG welding -brazing of aluminum alloy to stainless steel*. Materials Science and Engineering: A, 2009. **509**(1): p. 31-40.
- [15] Ye, Z., et al., *Microstructure and mechanical properties of 5052 aluminum alloy/mild steel butt joint achieved by MIG-TIG double-sided arc welding -brazing*. Materials & Design, 2017. **123**: p. 69-79.
- [16] Rathod, M. and M. Kutsuna, *Joining of aluminum alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding*. WELDING JOURNAL-NEW YORK-, 2004. **83**(1): p. 16-S.
- [17] Tomashchuk, I., *Assemblage hétérogène cuivre-inox et TA6V-inox par les faisceaux de haute énergie: compréhension et modélisation des phénomènes physico-chimiques*, 2010, Université de Bourgogne.

- [18] Bach, F.W., et al. *Joining of steel-aluminium hybrid structures with electron beam on atmosphere*. in *Advanced Materials Research*. 2005. Trans Tech Publ.
- [19] Belhadj, A., *Contribution à l' étude expérimentale et numérique du soudage laser: application aux alliages de magnésium*, 2009, Paris, ENSAM.
- [20] Katayama, S., *Laser welding of aluminium alloys and dissimilar metals*. *Welding international*, 2004. **18**(8): p. 618-625.
- [21] Sierra, G., et al., *Steel to aluminium key-hole laser welding*. *Materials Science and Engineering: A*, 2007. **447**(1): p. 197-208.
- [22] Wagner, F., et al., *Characterization and properties of dissimilar metal combinations of Fe/Al and Ti/Al-sheet materials*. Proc. ICALEO'01 (CD-ROM), 2001.
- [23] Kreimeyer, M. and G. Sepold. *Laser steel joined aluminium-hybrid structures*. in *Proceedings of ICALEO*. 2002.
- [24] Lee, K.-J., S. Kumai, and T. Arai, *Interfacial microstructure and strength of steel to aluminum alloy lap joints welded by a defocused laser beam*. *Materials transactions*, 2005. **46**(8): p. 1847-1856.
- [25] Qiu, R., S. Satonaka, and C. Iwamoto, *Effect of interfacial reaction layer continuity on the tensile strength of resistance spot welded joints between aluminum alloy and steels*. *Materials & Design*, 2009. **30**(9): p. 3686-3689.
- [26] Yasuyama, M., K. Ogawa, and T. Taka, *Spot welding of aluminium and steel sheet with an insert of aluminium clad steel sheet: dissimilar metal joining of aluminium and steel sheet (1st Report)*. 1996.
- [27] Girard, M., *Soudage Diffusion Hétérogène assisté par Friction Malaxage: cas du couple Al/Fe*, in *Ecole Centrale de Nantes 2010*, Ecole Centrale de Nantes: Nantes. p. 218.
- [28] Ogawa, K., et al., *Shear strength characteristics of aluminium alloy friction welds*. *Welding international*, 1991. **5**(11): p. 860-866.
- [29] Ogawa, et al., *Fatigue strength of aluminium alloy similar material friction welded joints*. *Journal of Light Metal Welding Structure Association*, 1987. **25**(1): p. 6.
- [30] Ogawa, K., S. Kaga, and K. Adachi, *Friction Welding of Aluminum*. *J. Light Met. Weld. Constr.*, 1981. **19**(10): p. 448-454.
- [31] Miyamoto, K., et al., *Dissimilar joining of aluminum alloy and steel by resistance spot welding*. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 2009. **2**(2009-01-0034): p. 58-67.
- [32] Qiu, R., et al., *Interfacial characterization of joint between mild steel and aluminum alloy welded by resistance spot welding*. *Materials characterization*, 2010. **61**(7): p. 684-688.
- [33] Zhang, Y., et al., *Feasibility study of dissimilar joining of aluminum alloy 5052 to pure copper via thermo-compensated resistance spot welding*. *Materials & Design*, 2016. **106**: p. 235-246.
- [34] Cui, L., et al., *Resistance spot welding between steel and aluminum alloy*. 2015.
- [35] Kuroda, S., K. Saida, and K. Nishimoto, *Microstructure and properties of directly bonded joint of A6061 aluminum alloy to SUS316 stainless steel*. *Quart J Jpn Weld Soc*, 1999. **17**(3): p. 484-489.
- [36] Hirose, A., et al. *Interfacial reaction and strength of dissimilar joints of aluminum alloys to steels for automobile*. in *Materials Science Forum*. 2005. Trans Tech Publ.

- [37] Hirose, A., et al. *Influence of alloying elements on interfacial reaction and strength of aluminum/steel dissimilar joints for light weight car body*. in *Materials science forum*. 2007. Trans Tech Publ.
- [38] Calderon, P., D. Walmsley, and Z. Munir, *An investigation of diffusion welding of pure and alloyed aluminum to Type 316 stainless steel*. WELDING JOURNAL, 1985. **64**(4): p. 104-114.
- [39] Cazes, R., *Soudage par friction*1980: Ed. Techniques Ingénieur.
- [40] Yamamoto, N., et al. *Formation of intermetallic compounds in friction bonding of Al alloys to steel*. in *Materials science forum*. 2007. Trans Tech Publ.
- [41] Fukumoto, S., et al., *Evaluation of friction weld interface of aluminium to austenitic stainless steel joint*. Materials Science and Technology, 1997. **13**(8): p. 679-686.
- [42] Fukumoto, S., et al., *Microstructures of friction welded joint of 6061 aluminum alloy to 304 stainless steel*. JOURNAL-JAPAN INSTITUTE OF LIGHT METALS, 1998. **48**: p. 36-41.
- [43] Shubhavardhan, R. and S. Surendran, *Friction welding to join dissimilar metals*. International journal of emerging technology and advanced engineering, 2012. **2**(7): p. 200-210.
- [44] Fukumoto, S., et al., *Amorphization by friction welding between 5052 aluminum alloy and 304 stainless steel*. Scripta materialia, 2000. **42**(8): p. 807-812.
- [45] OCHI, H., et al., *Friction welding using insert metal*. Welding journal, 2004. **83**(3): p. 36-40.
- [46] Kimura, M., et al., *Joining phenomena and joint strength of friction welded joint between pure aluminium and low carbon steel*. Science and Technology of Welding and Joining, 2009. **14**(5): p. 388-395.
- [47] Meshram, S.D. and G.M. Reddy, *Friction welding of AA6061 to AISI 4340 using silver interlayer*. Defence Technology, 2015. **11**(3): p. 292-298.
- [48] Kawai, G., et al., *Friction weldability of aluminium alloys to carbon steel*. Welding international, 2000. **14**(2): p. 101-107.
- [49] Rombaut, P., W. De Waele, and K. Faes. *Friction welding of steel to ceramic*. in *Sustainable Construction and Design 2011 (SCAD)*. 2011. Ghent University, Laboratory Soete.
- [50] Simar, A., T. Pardoën, and B. De Meester, *Effect of rotational material flow on temperature distribution in friction stir welds*. Science and Technology of Welding & Joining, 2013.
- [51] Zheng, Q., et al., *Dissimilar friction stir welding of 6061 Al to 316 stainless steel using Zn as a filler metal*. Journal of Alloys and Compounds, 2016.
- [52] Yazdipour, A. and A. Heidarzadeh, *Effect of friction stir welding on microstructure and mechanical properties of dissimilar Al 5083-H321 and 316L stainless steel alloy joints*. Journal of Alloys and Compounds, 2016. **680**: p. 595-603.
- [53] Leitao, C., et al., *Aluminium-steel lap joining by multipass friction stir welding*. Materials & Design, 2016. **106**: p. 153-160.
- [54] Zhang, G., et al., *Friction stir brazing: a novel process for fabricating Al/steel layered composite and for dissimilar joining of Al to steel*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011. **42**(9): p. 2850-2861.

- [55] Chen, C. and R. Kovacevic, *Joining of Al 6061 alloy to AISI 1018 steel by combined effects of fusion and solid state welding*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004. **44**(11): p. 1205-1214.
- [56] Kimapong, K. and T. Watanabe, *Friction stir welding of aluminum alloy to steel*. Welding journal, 2004. **83**(10): p. 277.
- [57] Lee, W.-B., et al., *Interfacial reaction in steel-aluminum joints made by friction stir welding*. Scripta materialia, 2006. **55**(4): p. 355-358.
- [58] Okamura, H. and K. Aota, *Joining of dissimilar materials with friction stir welding*. Welding international, 2004. **18**(11): p. 852-860.
- [59] Uzun, H., et al., *Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 to X5CrNi18-10 stainless steel*. Materials & Design, 2005. **26**(1): p. 41-46.
- [60] Watanabe, T., H. Takayama, and A. Yanagisawa, *Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding*. Journal of Materials Processing Technology, 2006. **178**(1): p. 342-349.
- [61] Yasui, T., et al. *Welding of aluminum and steel by friction stir diffusion process*. in *Materials Science Forum*. 2004. Trans Tech Publ.
- [62] Kimapong, K. and T. Watanabe, *Effect of welding process parameters on mechanical property of FSW lap joint between aluminum alloy and steel*. Materials Transactions, 2005. **46**(10): p. 2211-2217.
- [62] Helal, Y. and Z. Boumerzoug, *Dissimilar friction stir welding of Al-6061 to steel*. AIP Conference Proceedings, 2016. **1772**(1): p. 030008.
- [64] Tsujino, J., et al., *Ultrasonic butt welding of aluminum, aluminum alloy and stainless steel plate specimens*. Ultrasonics, 2002. **40**(1): p. 371-374.
- [65] Vlad, M., *Ultrasonic welding of aluminum: a practical study in consistency, part marking and control modes* 2007: ProQuest.
- [66] Watanabe, T., H. Sakuyama, and A. Yanagisawa, *Ultrasonic welding between mild steel sheet and Al-Mg alloy sheet*. Journal of Materials Processing Technology, 2009. **209**(15): p. 5475-5480.
- [67] Soudure, I.B.d. *Soudage par impulsion magnétique*. 2016; Available from: <http://www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-impulsion-magnetique>.
- [68] Aizawa, T., M. Kashani, and K. Okagawa, *Application of magnetic pulse welding for aluminum alloys and SPCC steel sheet joints*. Welding journal, 2007. **86**(5): p. 119-124.
- [69] Manogaran, A., et al. *magnetic pulse spot welding: application to al/fe Joining*. in *6th International Conference on High Speed Forming, March 27th-29th 2014, Daejeon, Korea*. 2014.
- [70] Lee, K.-J., et al., *Interfacial microstructure and strength of steel/aluminum alloy lap joint fabricated by magnetic pressure seam welding*. Materials Science and Engineering: A, 2007. **471**(1-2): p. 95-101.
- [71] Kore, S., P. Date, and S. Kulkarni, *Electromagnetic impact welding of aluminum to stainless steel sheets*. Journal of Materials Processing Technology, 2008. **208**(1): p. 486-493.
- [72] Acarer, M. and B. Demir, *An investigation of mechanical and metallurgical properties of explosive welded aluminum-dual phase steel*. Materials letters, 2008. **62**(25): p. 4158-4160.
- [73] Pervukhin, L.B., *Explosive welding: theory and practice*. 2010.
- [74] McKenney, C.R. and J.G. Banker, *Explosion-bonded metals for marine structural applications*. Marine Technology Society Journal, 1971. **8**(3).

- [75] Findik, F., *Recent developments in explosive welding*. Materials & Design, 2011. **32**(3): p. 1081-1093.
- [76] Han, J.H., J.P. Ahn, and M.C. Shin, *Effect of interlayer thickness on shear deformation behavior of AA5083 aluminum alloy/SS41 steel plates manufactured by explosive welding*. Journal of Materials Science, 2003. **38**(1): p. 13-18.
- [77] Sandra Zimmer Friction Stir Welding, Le soudage par Friction Malaxage Bénédicte Da Costa Xavier Stassart Laurent Langlois
- [78] M. Ericsson and R. Sandström. Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG. International Journal of Fatigue, 25(12) :1379_1387, 2003
- [79] Eric FEULVARCH, Modélisation numérique du soudage par friction malaxage. Thèse de doctorat. Décembre 2005.
- [80] Zimmer, Contribution à l'industrialisation du soudage par friction malaxage. Arts et métiers. Paris Tech. décembre 2009.
- [81] Kurt, A., Gulenc, B., Uygur, I., Ates, H., 2006. The effect of rotation speed on mechanical properties of commercially pure Aluminium joined by friction stir welding. In: Materials and Technology Conference, 15–19 October., Fundamentals and Characterisation vol. 1, Ohio, USA, pp. 565–570.
- [82] Frédéric GEMME, Modélisation numérique des phénomènes physiques du soudage par friction malaxage et comportement en fatigue de joints soudés en aluminium 7075-T6. Université Montréal- Canada. Mars 2011.
- [83] Roland CAZES, soudage par friction-malaxage, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique BM 7 746.
- [84] TWI, The Welding Institute <http://www.twi.co.uk/j32k/index.xtp>
- [85] R.S. Mishra, Z. Y. Ma, Friction stir welding and processing. Material science and Engineering R 50 (2005) 1-78
- [86] Friction Stir welding and processing Material Science and Engineering R 50 (2005) 178 R.S. Mishra, Z.Y. Ma
- [87] D.A. Burford ,B.M. Tweedy,C.A. Widener, 6th International Friction Stir Welding Symposium FSW Aerospace III (Session 11B) October 12th, 2006
- [88] CEWAC, Centre d'étude Wallon de l'Assemblage et du Contrôle des matériaux <http://cewac.be>
- [89] FRÉDÉRIC THIBEAULT Etude NUMÉRIQUE ET EXPÉRIMENTALE DU SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE
- [90] Abdelaziz Times li mutation du soudage par friction et malaxage à l'aide de méthodes sans maillage Université De Lorraine 2013
- [91] Self-optimization in tool wear for friction-stir welding of Al 6061_20% Al2O3 MMC R.A. Prado, L.E. Murr *, K.F. Soto, J.C. McClure. Department of Metallurgical and Materials Engineering, The University of Texas , El Paso, TX 79968-0520, USA, 2002.
- [92] Julien Briche. Thermomécanique .Introduction à la CAO sur le logiciel ABAQUS. E-mail : julien.briche@laposte.net
- [93] Abaqus. Une brève introduction. ABAQUS/CAE 6.9.
- [94] GOUMGHAR Amirouche. Caractérisation expérimentale et simulation numérique

du comportement mécanique de tubes renforcés soumis à un écrasement axial promotion 2016/2017

[95] HAOUCHINE Malik .Simulation de l'écrasement de tubes minces –Comparaison expérimental/numérique. Élaboré par Promotion 2015 / 2016.

[96] Olivier ANSART Fabien AVRILLAS Eric KREME Ibrahima NIANG Karim ZANNIR / MNRV 2 / Projet scolaire .2004/2005.

[97] Marc Blétry. Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux.2006 2007

[98] Abaqus Analysis User's Manual, ABAQUS, HTML Documentation, Dassault Systèmes, (2008).