



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DEMASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Métallurgie

Spécialité: Génie Métallurgique

Réf.:.....

Présenté et soutenu par :

REZGUI Farouk

Réalisation d'une machine de soudage par friction malaxage

Le : Septembre 2020

Jury:

Dr. Amrane Mohamed Nadhir	Pr	Université de Biskra	Président
Dr. Bentrah Hamza	MCA	Université de Biskra	Examineur
Pr. Boumerzoug Zakaria	Pr	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire: 2019 – 2020

Dédicaces

Je dédie ce travail de recherche à ma mère et à mon père. Je le dédie aussi à toute ma famille et mes amis.

Je le dédie à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

Remerciement

Je remercie vivement mon encadreur, professeur Boumerzoug Zakaria qui m'a proposé ce thème de recherche et aussi sa disponibilité durant toute cette année universitaire.

Je remercie les membres de jury qui ont accepté d'expertiser mon travail de recherche (Pr. *Amrane Mohamed Nadhir* et Dr. *Bentrah Hamza*).

Je remercie le personnel du Hall de technologie, et son responsable Guettala Ismaïne pour toutes les facilités techniques.

Je remercie mes enseignants de la filière métallurgie qui ont contribué à ma formation.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui m'ont aidé dans mon travail de recherche

Table of Contents

Introduction Générale	1
Chapitre I :	2
Soudage des métaux par friction malaxage	2
Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage.....	3
Introduction	3
I.1- Le soudage par friction malaxage FSW (Friction Stir Wilding):	3
I.2- Le principe de soudage par friction malaxage FSW (Friction Stir Wilding):	3
I.2.1- Phase de pénétration:	4
I.2.2- Phase de soudage:	5
I.2.3- Phase de retrait:	6
I.3- Les différentes configurations possibles pour le soudage FSW:	6
I.4- Les matériaux considérés:	7
I.5- Structure générale des assemblages obtenus par FSW (la microstructure):	8
I.6- Les paramètres:	10
I.6.1- Les paramètres du procédé:	10
I.6.2- Paramètres outils:	14
I.7- Description et origines des défauts:	16

I.8- Avantage et inconvénients du FSW:	21
I.8.1- Avantage:	21
I.8.2- Inconvénients:	21
I.9- Applications:	21
Conclusions:	24
Chapitre II:	25
Les machines de soudage par friction malaxage industrielles et modèles de laboratoires	25
Chapitre II: Les machines de soudage par friction malaxage industrielles et modèles de laboratoires.....	26
Introduction:	26
II.1- Machines industrielles de soudage FSW:	26
II.1.1- Les fraiseuses modifiées:	27
II.1.2- Les machines FSW dédiées:	28
II.1.3- Les robots à architecture parallèles (tricept):	30
II.1.4- Les robots polyarticulés:	33
II.2- Machines de soudage FSW laboratoire:	34
II.2.1- Modèle de Mangesh S. Prabhavalkar et al [56]:	34
II.2.2-Modèle de Mohd Années Siddiqui et al [57]:	36
II.2.3- Modèle de Jithin Ambarayil Joy et all [58]:	37
Conclusion:	37

Chapitre III	38
Description de la machine de soudage par friction malaxage réalisée	38
Chapitre III: Description de la machine de soudage par friction malaxage réalisée	39
Introduction :.....	39
III.1Partie mécanique :.....	39
III.1.1- Simulation dans solid works :.....	39
III.2- Partie électronique :.....	41
III.2.1- Appareils électroniques:.....	41
III.2.2- Assemblage des appareils électroniques:	47
III.3- Partie informatique:	49
III.3.1- Le site Web:	49
III.3.2- Arduino IDE:	50
III.3.3-Contrôle de la puissance et de la vitesse:	51
III.4- Partie métallurgique:	52
III.4.1- Préparation de l'outil :	52
III.4.2- Quelques résultats de soudage:.....	53
Conclusion Générale.....	56
Résumé.....	57
Références.....	1

Liste des figures:

Figure. I. 1: Présentation du soudage par friction malaxage. A-Soudure rectiligne de deux plaques mises bout à bout. B-Visualisation du plan de joint lors de la phase de soudure [8].	4
Figure. I. 2: Schématisation de phase de pénétration [8].	5
Figure. I. 3: Schématisation de phase de soudage [8].	6
Figure. I. 4: Schématisation de phase de retrait de l'outil [8].	6
Figure. I. 5: Les différentes configurations de soudage effectuées par FSW : (a) bout à bout, (b) en coin, (c) en T, (d) transparence, (e) transparence multiple, (f) T par transparence, et (g) angle [10].	7
Figure. I. 6: Macrographie d'un cordon de soudure FSW lors du soudage bout à bout de deux plaques d'aluminium [16].	8
Figure. I. 7: Observation microscopique des différentes zones de la soudure FSW 2024-T3/2024-T3 côté AS et côté RS [17].	9
Figure. I. 8: Macroscopies optiques des joints AA2524 pour différentes vitesses de rotation (vitesse d'avance et effort F_z fixes) [21].	11
Figure. I. 9: Effet de la vitesse de rotation sur les différents alliages d'aluminium à vitesse de soudage constante [11].	12
Figure. I. 10: Effet de la vitesse de soudage sur différents alliages d'aluminium à vitesse de rotation constante [11].	12
Figure. I. 11: Effet de la force de soudage sur la microdureté des soudures d'Al AA6061 [23].	13
Figure. I. 12: Angle d'inclinaison de l'outil [20]	14
Figure. I. 13: Schématisation de l'outil FSW et de quelques géométries de pions et d'épaulements [31].	15
Figure. I. 14: Les différentes technologies d'outil existant [34].	16
Figure. I. 15: Résumé des domaines d'apparition des défauts en fonction des paramètres de vitesse de rotation et de déplacement en FSW bout à bout [35].	17
Figure. I. 16: Flash [36].	18
Figure. I. 17: Manque de parallélisme entre les épaulements [36].	18
Figure. I. 18: Conflit d'écoulement [36].	19
Figure. I. 19: Défaut de type cavité [36].	19
Figure. I. 20: Plan de joint résiduel [36].	20
Figure. I. 21: Assemblage de l'avion Eclipse 500 avec le procédé de FSW [37].	22
Figure. I. 22: Application du soudage par FSW par points [37].	22

Figure. I. 23: Technique de soudage des carrosseries des trains Hitachi [9].	23
Figure. I. 24: Bateau en aluminium construit en utilisant FSW [39].	23
Figure. II. 1: Les machines les plus utilisées pour la réalisation du FSW [42].	27
Figure. II. 2: Fraiseuse adaptée pour le FSW, à UCL-PRM [42].	28
Figure. II. 3: Exemple de machine dédiée au FSW. A- Machine ESAB Legio permettant de réaliser des soudures dans le plan (x,y). B- Machine de type portique cinq axes MTS [8].	30
Figure. II. 4: Tricepta-TR805[48] et b-ParallelKinematics Machine (PKM) [50] utilisé en FSW.	32
Figure. II. 5: Robot polyarticulé soudant une pièce possédant des surfaces concaves et convexes [52].	34
Figure. II. 6: A- Dessin 3D de machine FSW. B- La machine de FSW modèle de Mangesh S. Prabhavalkar et al [56].	35
Figure. II. 7: La machine de FSW modèle de MohdAneesSiddiqui et al [57].	36
Figure. II. 8: Vue modèle d'une machine de soudage par friction-malaxage modèle de Jithin Ambarayil Joy et al [58].	37

Liste des Tableaux:

Tableau. I. 1: Grandes Applications du FSW [38].	24
--	----

Introduction Générale

Dans l'optique de réduire le coût de fabrication, la consommation en carburant des engins et garantir le respect de l'environnement en réduisant les émissions des gaz à effet de serre, l'allègement des structures reste dans le domaine du transport un enjeu majeur qui pousse les concepteurs à la recherche de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques d'assemblage. Le soudage par friction est l'un des procédés utilisés intensivement dans les secteurs industriels. Ce type de soudage s'effectue à des températures inférieures aux températures de fusion des deux métaux à souder.

Un des procédés de soudage les plus récents est le soudage par friction malaxage (SFM) communément appelé par son nom anglais « Friction Stir Welding (FSW) ». Cette technique de soudage à froid inventée accidentellement a été brevetée par « The Welding Institute (TWI) » en 1991.

Le principe du FSW consiste à apporter une énergie d'origine mécanique par l'action d'un outil à l'interface entre les pièces à souder. La liaison se crée de proche en proche à l'état solide. L'intérêt de ce procédé est d'éviter certains problèmes métallurgiques rencontrés en soudage « classique » par fusion, lors du soudage des aluminiums par exemple.

L'objectif de ce mémoire de master est de réaliser une machine de soudage par friction malaxage de laboratoire.

Le mémoire est composé de trois chapitres :

- Le premier chapitre présente le principe de soudage par friction malaxage des métaux, aussi les différents types de ce procédé et leurs applications.
- Le deuxième chapitre est consacré aux différents types de machines industrielles pour le soudage par friction malaxage.
- Le troisième chapitre est consacré à la description de la machine de soudage par friction malaxage réalisée dans le cadre de ce mémoire de master.

Chapitre I :

Soudage des métaux par friction malaxage

Chapitre I : Soudage des métaux par friction malaxage

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le soudage par friction malaxage FSW (Friction Stir Welding), pour avoir une idée détaillée sur ce procédé.

I.1- Le soudage par friction malaxage FSW (Friction Stir Wilding):

Le "soudage par friction malaxage" est issu d'un brevet déposé par Thomas et ses collaborateurs en 1991 [1] à la TWI (The Welding Institute – Royaume-Uni), Le terme français est maintenant défini [2], et la méthode est très étudiée.

L'usage industriel de ce procédé a été limité aux alliages légers, typiquement les alliages d'aluminium, car il n'existait pas d'outils assez résistants pour les autres familles d'alliages dont les aciers. De récents développements technologiques, notamment l'usage de nitrure de bore cubique poly cristallin (ou PCBN), a permis d'élargir le champ d'utilisation du FSW [3]. Cela nous permet d'éviter les défauts causés par le processus de solidification, après utilisation de soudage par fusion. Ce procédé FSW est appliqué dans la construction navale, les avions, les voitures et industries aérospatiales

I.2- Le principe de soudage par friction malaxage FSW (Friction Stir Wilding):

Le soudage par friction malaxage « Friction Stir Welding » est un procédé d'assemblage de pièces en phase solide. Le principe fondamental de la friction malaxage est l'insertion d'un troisième corps axisymétrique en rotation dans les matières à joindre pour ensuite le déplacer. Par effet tribologique entre les matériaux et l'instrument (figure. I. 1), il se crée un échauffement local rendant la zone malaxée à l'état dit thixotropique (état "pâteux") [4], la zone n'est pas à l'état liquide [5, 6] mais plutôt malléable. La technique peut être assimilée à un phénomène d'extrusion contenue sous l'action d'un outil, couplé à un forgeage de la matière non malaxée selon Reynolds [7]. Le procédé se décrit en trois phases:

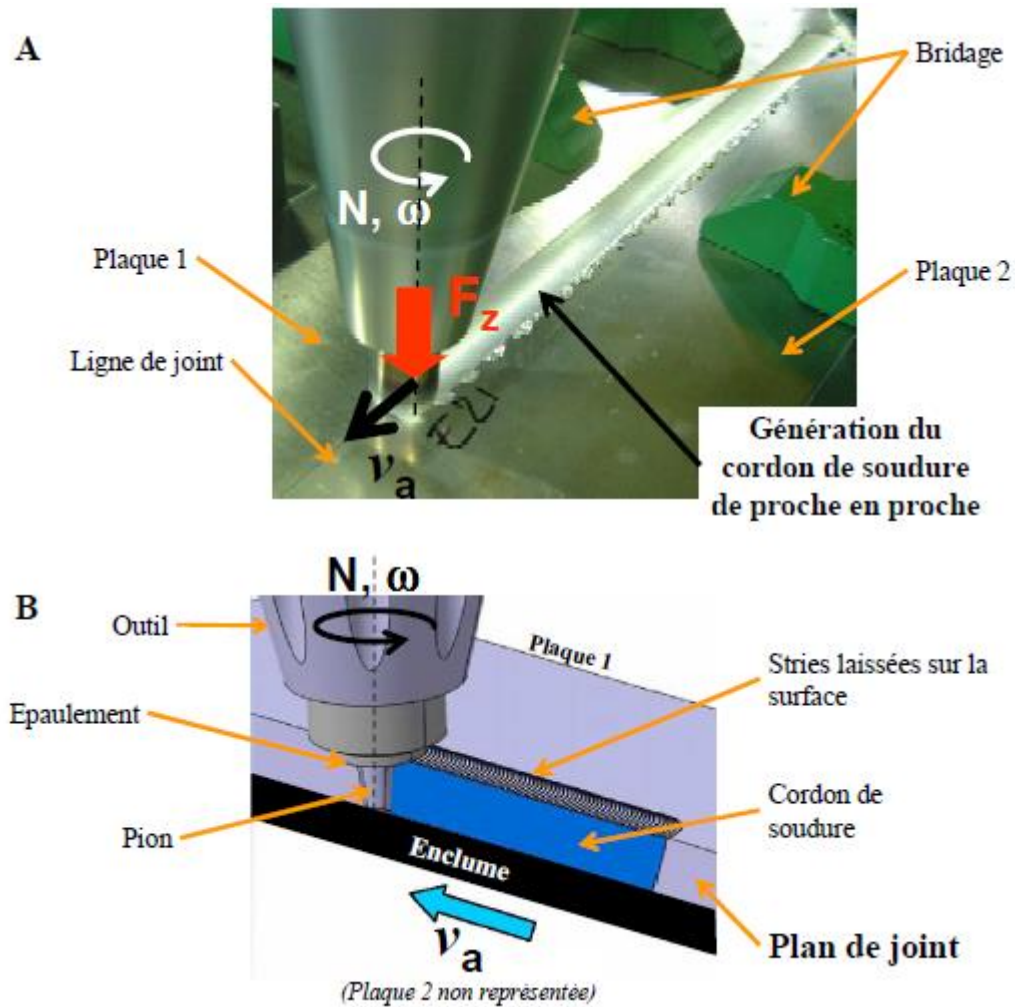


Figure. 1. 1: Présentation du soudage par friction malaxage. A-Soudure rectiligne de deux plaques mises bout à bout. B-Visualisation du plan de joint lors de la phase de soudure [8].

1.2.1- Phase de pénétration:

Le pion pénètre progressivement dans le plan de joint des deux pièces à souder, on lui applique une force normale jusqu'à ce que l'épaule soit en contact avec les pièces. L'outil reste dans cette position pendant un temps de maintien appelé (dwell time) pour créer la quantité de chaleur suffisante pour ramollir la matière (figure. 1. 2) [9].

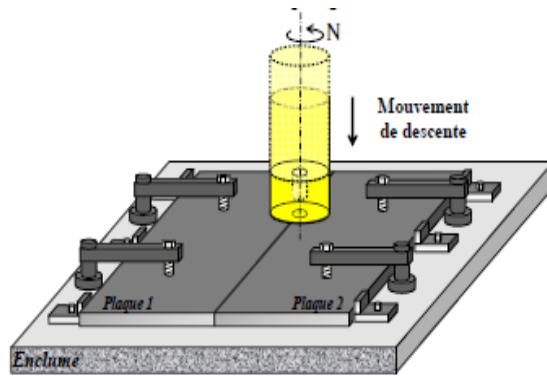


Figure. I. 2: Schématisation de phase de pénétration [8].

I.2.2- Phase de soudage:

Une fois la température de soudage (état ramolli de la matière) atteinte, le pion tournant commence à avancer le long de la ligne de joint (autre configuration possible : déplacement de la table), ainsi on assure le malaxage de la matière entre les deux pièces. Un effort appelé effort de forgeage est appliqué sur l'outil est maintenu pendant cette phase. La matière malaxée est déformée plastiquement et constitue le cordon de soudure. Le cordon obtenu n'est pas symétrique (figure. I. 3). En effet, le mouvement combiné de rotation et d'avance donne naissance à deux côtés :

- Un côté avance (advancing side) où le sens de la vitesse de rotation de l'outil coïncide avec sa vitesse d'avance.
- Un côté recul (retreating side) où le sens de la vitesse d'avance de l'outil s'oppose à sa vitesse d'avance [9].

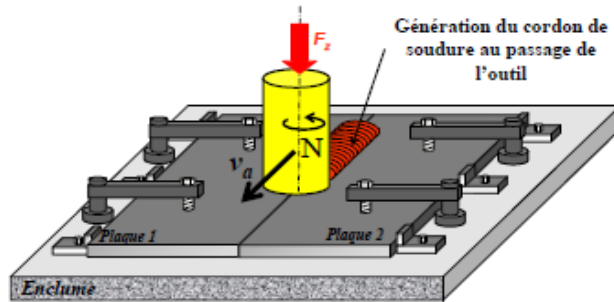


Figure. I. 3:Schématisation de phase de soudage [8].

I.2.3- Phase de retrait:

Une fois le cordon réalisé, le pion est retiré du joint en laissant un trou à l'extrémité du cordon, un outil à pion rétractable permet d'éviter la formation de ce trou. Dans ce cas, l'épaulement reste en contact avec la matière jusqu'à la fin de retrait du pion (figure.I.4) [9].

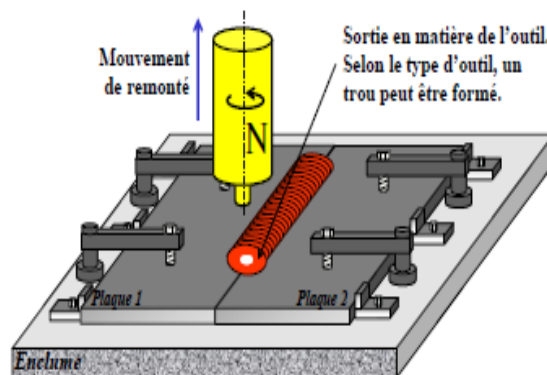


Figure. I. 4: Schématisation de phase de retrait de l'outil [8].

I.3- Les différentes configurations possibles pour le soudage FSW:

Le soudage se réalise essentiellement sur des pièces minces bout à bout, mais accepte d'autres configurations de joints tels que le soudage d'angle ou en "T" ou le soudage par superposition. Les différentes configurations possibles pour le soudage FSW sont présentées sur (la figure. I. 5).

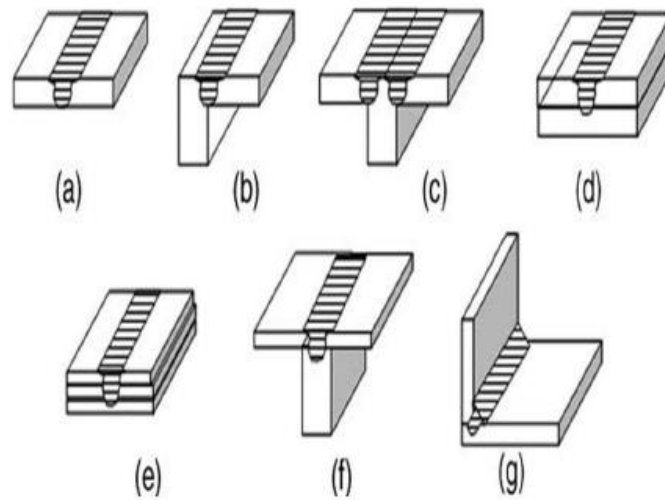


Figure. 1. 5: Les différentes configurations de soudage effectuées par FSW : (a) bout à bout, (b) en coin, (c) en T, (d) transparence, (e) transparence multiple, (f) T par transparence, et (g) angle [10].

I.4- Les matériaux considérés:

a-Matériaux soudables par FSW

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

b-Possibilité d'assemblage hétérogènes:

- Différents alliages d'aluminium.
- Aluminium / Acier, Etc....

I.5- Structure générale des assemblages obtenus par FSW (la microstructure):

Le joint soudé résultant du soudage par frottement-malaxage comporte trois zones distinctes en plus du métal de base. Ces zones, montrées sur la Figure. I. 6 et. I. 7, ont été mises en évidence lors des premières études portant sur la microstructure du joint [12] [13] [14] [15].

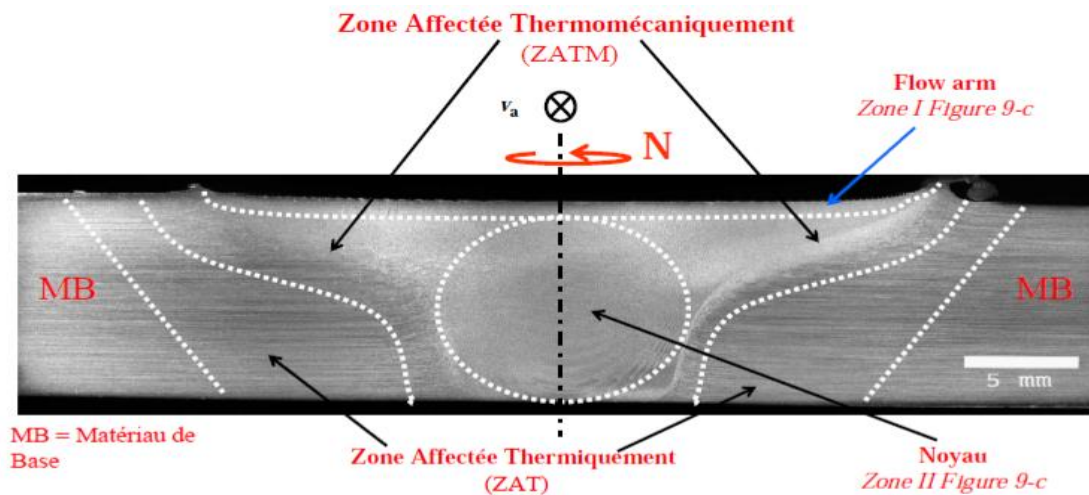


Figure. I. 6: Macrographie d'un cordon de soudure FSW lors du soudage bout à bout de deux plaques d'aluminium [16].

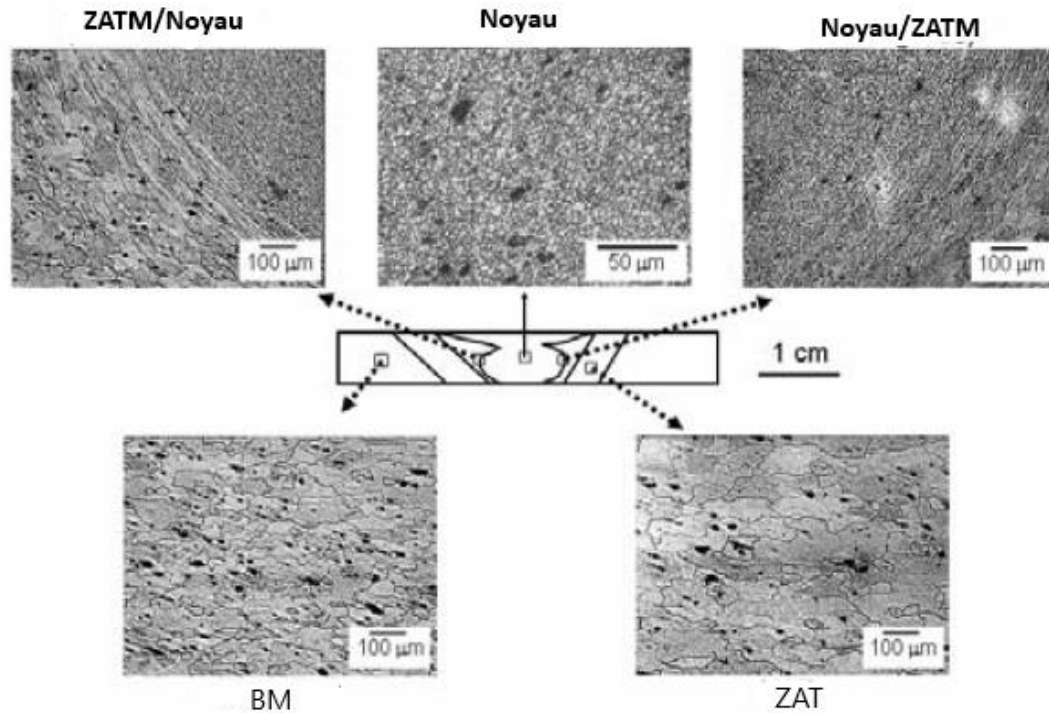


Figure. I. 7: Observation microscopique des différentes zones de la soudure FSW 2024-T3/2024-T3 côté AS et côté RS [17].

Le Métal de Base (MB):

Situé loin du joint, ne subit aucune déformation mécanique lors de l'opération de soudage et les températures atteintes n'engendrent pas de modifications microstructurales. Il conserve ses propriétés mécaniques initiales.

La Zone Affectée Thermiquement (ZAT):

Comme le métal de base, ne subit aucune déformation mécanique lors de l'opération de soudage. Toutefois, les températures atteintes sont plus élevées, et engendrent des modifications microstructurales qui vont modifier localement les propriétés mécaniques initiales.

La Zone Affectée Thermo-Mécaniquement (ZATM):

Située sous l'épaulement de l'outil, est soumise à des températures élevées et à une déformation mécanique non négligeable, due aux flux de matière entraînés par le passage du pion de l'outil.

Le Noyau:

Est la zone la plus affectée par les effets thermiques et la mécanique du procédé. Vu en coupe, le noyau est facilement reconnaissable par sa microstructure entièrement recristallisée [18].

I.6- Les paramètres:

I.6.1- Les paramètres du procédé:

Les principaux paramètres du procédé sont la vitesse de rotation de l'outil habituellement exprimée en rpm (révolutions on rotation per minute), la vitesse de soudage (mm/min), la charge axiale(kN) ainsi que l'angle d'inclinaison de l'outil. Les choix de l'utilisateur peuvent parfois être limités par les caractéristiques de la machine de soudage. [20]

I.6.1.1- La vitesse de rotation:

De l'outil en contact avec la matière génère la chaleur autour de l'outil et permet de malaxer la matière. Le choix d'une vitesse de rotation optimale s'avère donc primordial. D'une part, une vitesse de rotation trop élevée, peut entraîner un chauffage excessif de la pièce et occasionner des "flash" ; d'autre part, une vitesse de rotation trop faible conduit à un chauffage insuffisant des pièces à souder, limitant ainsi le malaxage de matière. Cela provoque alors la formation de bavures et de cavités dans la soudure. L'augmentation de la vitesse de rotation provoque un élargissement simultané du noyau comme illustré dans les figures I.8 et I.9 [20].

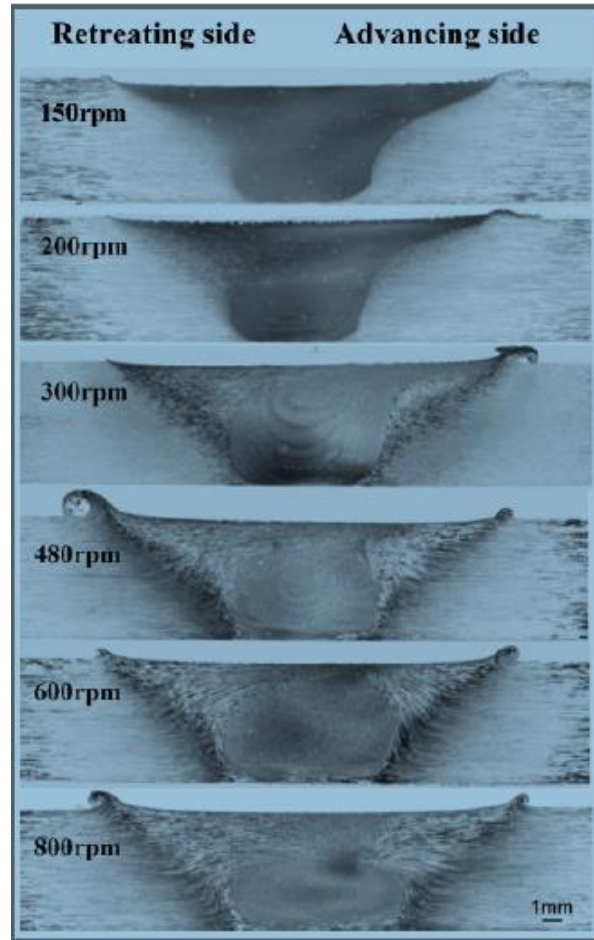


Figure. I. 8: Macroscopies optiques des joints AA2524 pour différentes vitesses de rotation (vitesse d'avance et effort F_z fixes) [21].

I.6.1.1- La vitesse d'avance:

Tout comme la vitesse de rotation doit être choisie de manière optimale. Son choix doit être fait en fonction des propriétés du matériau de base afin de ne pas risquer d'endommager l'outil. L'influence de ce paramètre a fait l'objet de nombreuses tu des au cours de la dernière décennie (figure.I.10) [20].

Exemple:

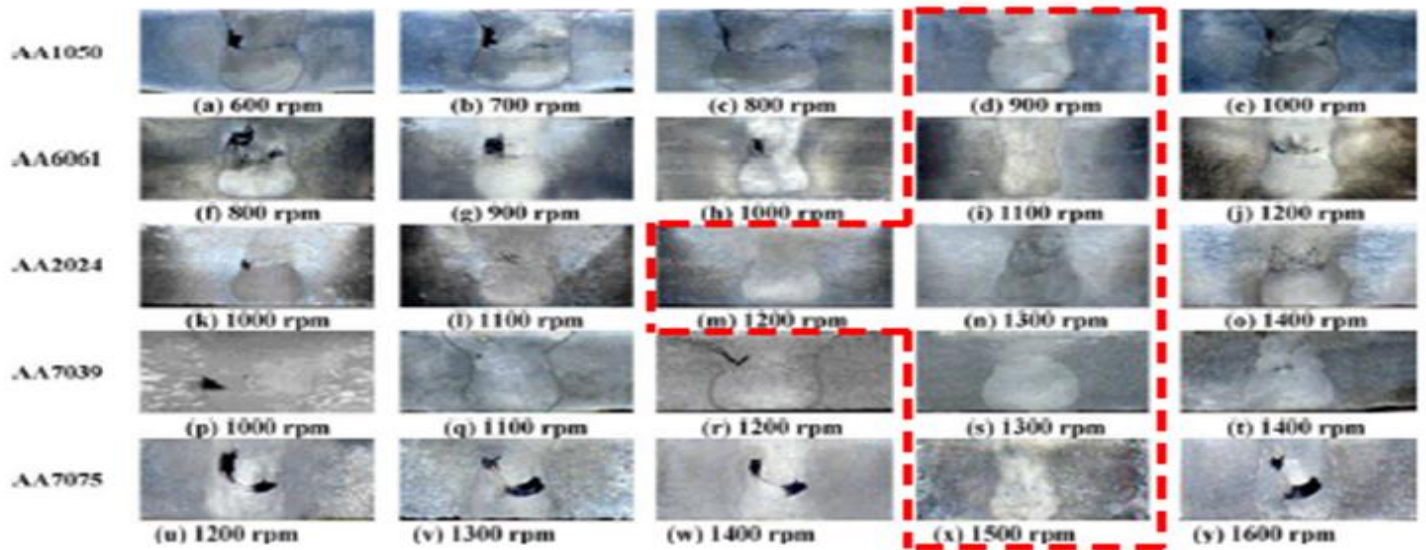


Figure. I. 9: Effet de la vitesse de rotation sur les différents alliages d'aluminium à vitesse de soudage constante [11].

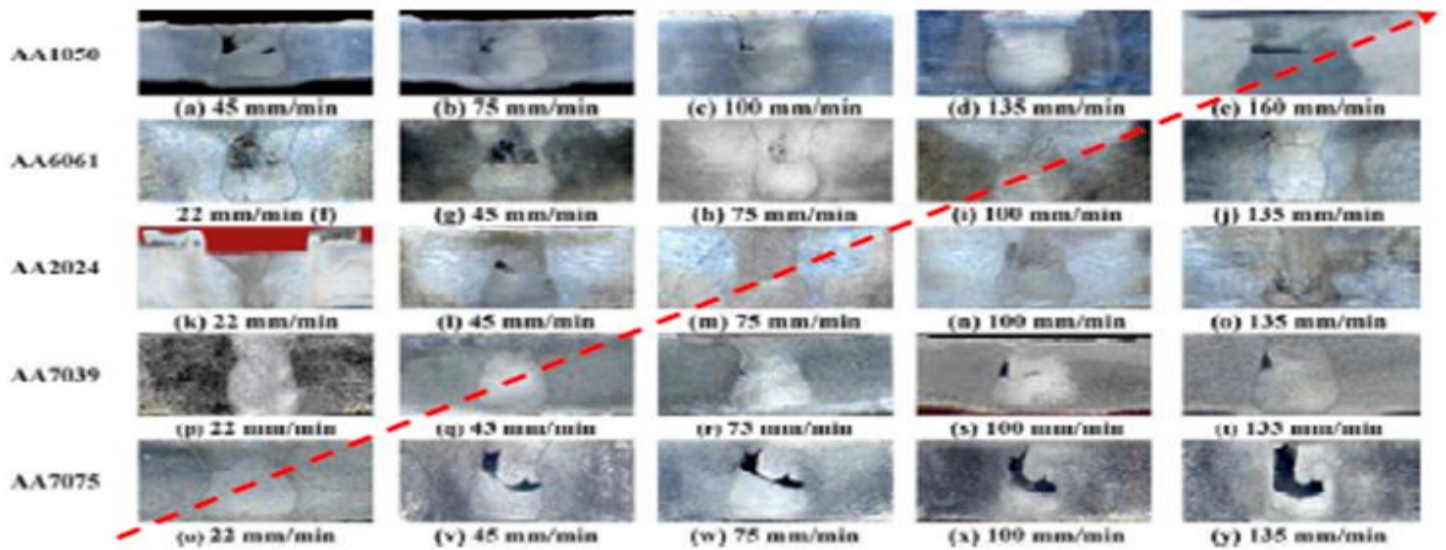


Figure. I. 10: Effet de la vitesse de soudage sur différents alliages d'aluminium à vitesse de rotation constante [11].

I.6.1.3- La force de forgeage:

Ou charge axiale est la force appliquée pour maintenir l'outil dans la position verticale souhaitée. Il est important de la maîtriser lorsqu'on fait un pilotage en force parce qu'elle conditionne le choix des vitesses d'avance et de rotation [23] ont montré expérimentalement que la charge axiale a une influence sur la dureté maximale (figure. I. 11).

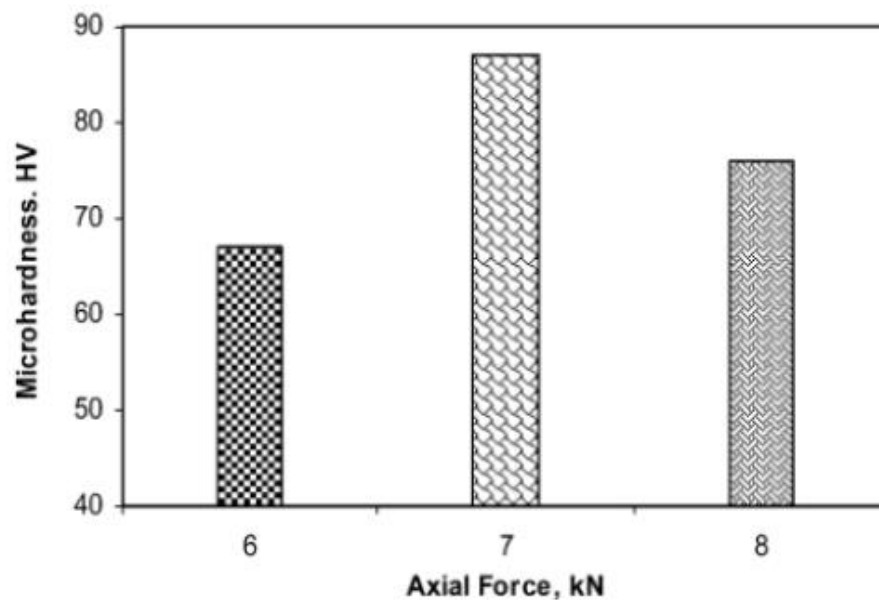


Figure. I. 11: Effet de la force de soudage sur la microdureté des soudures d'Al AA6061 [23].

I.6.1.4- L'angle d'inclinaison de l'outil:

Permet d'optimiser l'écoulement de la matière autour du pion. Il permet aussi de corriger l'inclinaison sur l'outil provoqué par la résistance des pièces à souder pendant le soudage. Sa valeur évolue généralement entre 0° et 5°. Certains types d'outils permettent de s'affranchir de l'imposition d'un angle d'inclinaison : plus particulièrement, un outil à deux épaulements (bobbintool) a été développé permettant de souder sans angle d'inclinaison. Certains chercheurs [24]. [25] ont étudié l'influence de l'angle d'inclinaison sur la qualité des soudures d'aluminium

2014 avec un outil conique fileté. Ils ont fait varier l'angle de 0° à 3° avec un pas de 0,5°, et ont constaté qu'avec un angle de 3°, l'état de surface de la soudure est bon, aucune cavité n'est présente à l'intérieur de la soudure et la taille des défauts est minimale (figure. I.12).

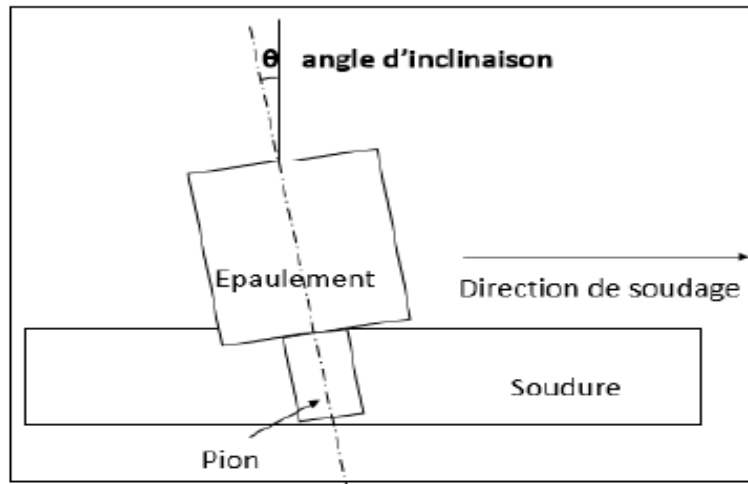


Figure. I. 12: Angle d'inclinaison de l'outil [20]

I.6.2- Paramètres outils:

I.6.2.1- Généralités

L'outil FSW a une forme enveloppe relativement simple. Il est schématisé sur la Figure. I. 15. Il a trois fonctions principales [29].

- Chauffer les pièces par frottement et par déformation plastique [29] [30].
- Malaxer les matériaux pour former le joint [29].
- Contenir le flux de matière sous l'épaule et autour du pion [29].

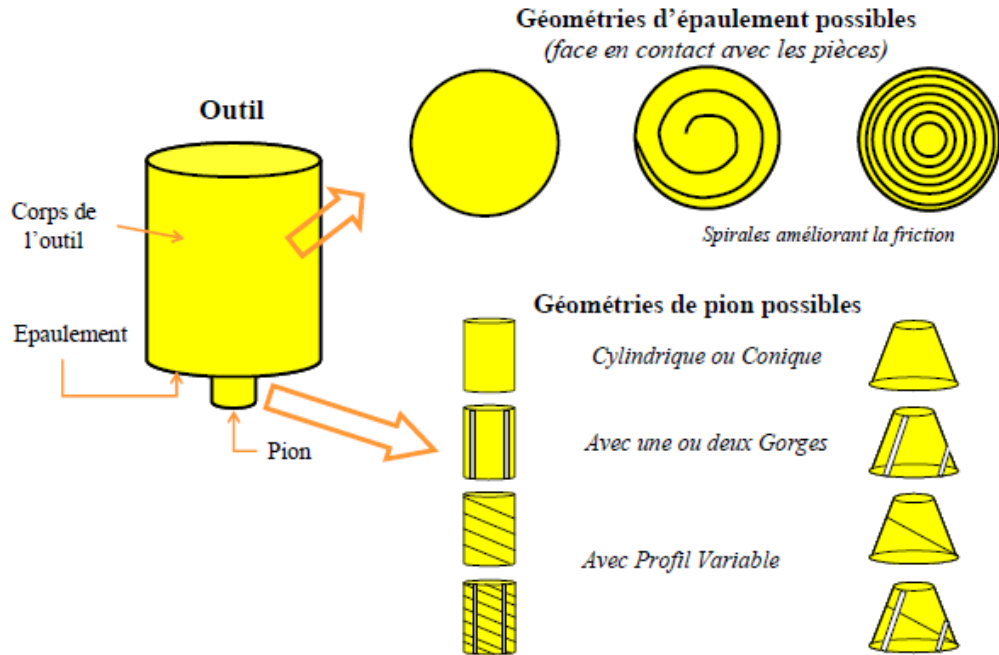


Figure. I. 13: Schématisation de l'outil FSW et de quelques géométries de pions et d'épaulements [31].

I.6.2.2- Les technologies d'outil:

Outil à pion fixe, figure. I. 16. A :

Comme son nom l'indique, l'épaulement et le pion sont fixes l'un par rapport à l'autre [8].

Outil à pion ajustable, figure. I. 16. B:

Contrairement à l'outil à pion fixe, cet outil possède un pion de longueur variable [32] [33].

Outil à double épaulement figure. I. 16. C:

L'outil est composé de deux épaulements reliés par un pion dont la longueur peut être ajustée au cours du soudage [32].

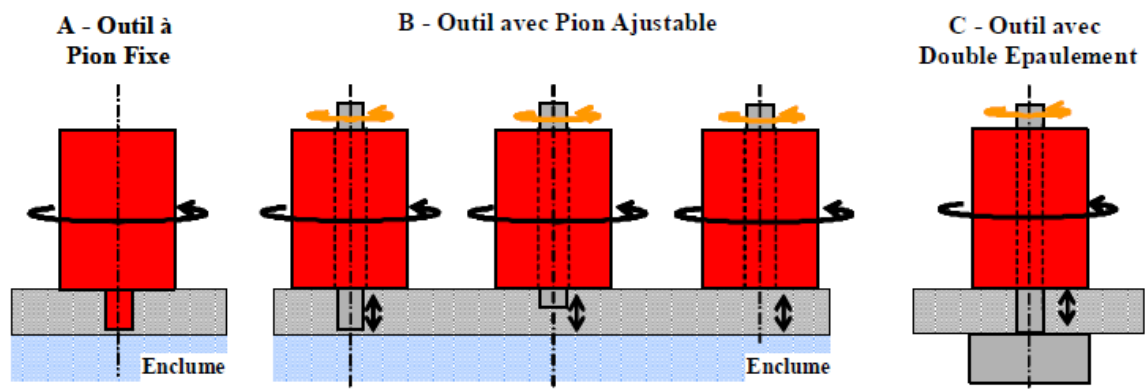


Figure. I. 14: Les différentes technologies d'outil existant [34].

I.7- Description et origines des défauts:

Les défauts sont majoritairement liés au flux de matière autour de l'outil, dus à un mauvais choix de paramètre pour le(s) matériau(x) donné(s) ou une mauvaise installation de bridage des pièces à joindre. Arbogast et ses collaborateurs [35] résument les défauts que l'on peut trouver dans un graphique schématique (Figure. I. 15).

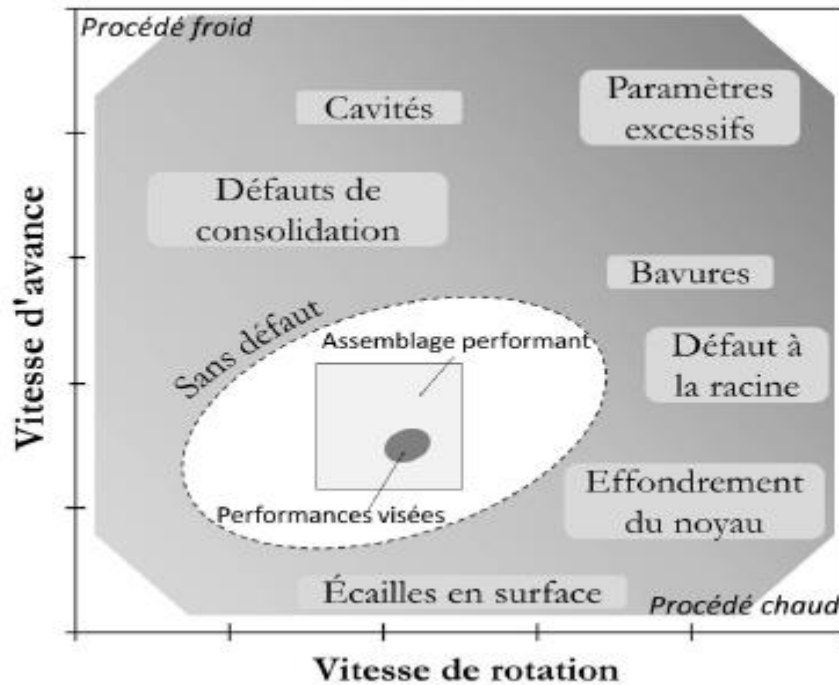


Figure. I. 15: Résumé des domaines d'apparition des défauts en fonction des paramètres de vitesse de rotation et de déplacement en FSW bout à bout [35].

Flash:

Le flash est un bourrelet de matière plastifiée chassée hors de l'épaulement (Figure. I. 16). Il est généralement localisé au recréation Sidé, côté de la soudure où les champs de vitesse sont opposés. Le flash affecte l'état de surface de la soudure et peut être interprété, dans de nombreux cas, comme un indicateur de soudure trop énergétique. Si le flash devient excessif, la perte de matière peut être à l'origine d'autres types de défauts [36].

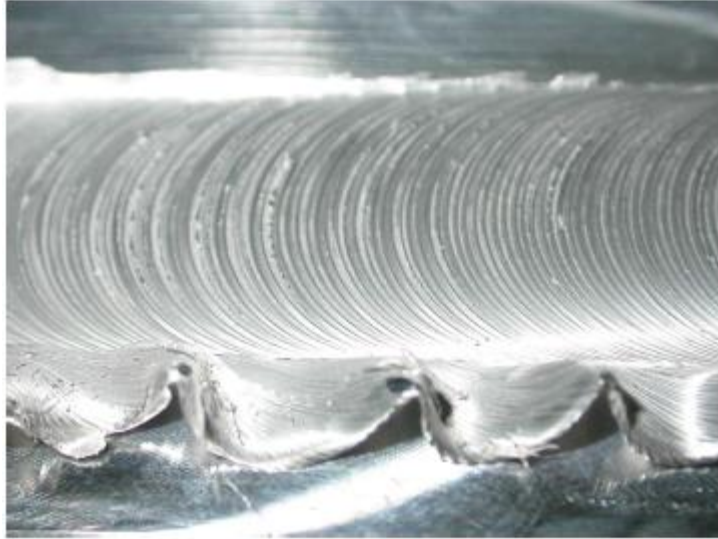


Figure. I. 16: Flash [36].

Manque de parallélisme entre les épaulements:

Lorsque les efforts sur l'outil Bobbin Tool deviennent trop importants, la rigidité du pion n'est plus suffisante pour assurer le parallélisme parfait entre les deux épaulements (Figure. I. 17). Les soudures ainsi réalisées présentent un aspect dissymétrique. Ce défaut apparaît très souvent pour des efforts transverses très élevés et précède de généralement la rupture du pion, sollicité en flexion rotative [36].

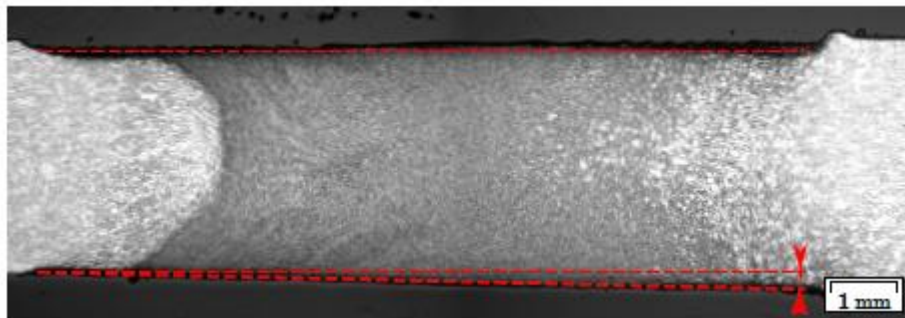


Figure. I. 17: Manque de parallélisme entre les épaulements [36].

Conflits d'écoulement:

Un conflit d'écoulement dans un noyau soudé est un point singulier où plusieurs lignes d'écoulement se rejoignent de manière chaotique (Figure. I. 18). Les conflits d'écoulement apparaissent lorsque les paramètres de soudage ne sont pas adéquats (par exemple vitesse d'avance trop élevée par rapport à la vitesse de rotation) ou lors que le design de l'outil n'est pas optimal. Le conflit d'écoulement est un défaut mineur que l'homme de métier doit considérer comme un indicateur dans sa recherche de paramètres optimaux [36].

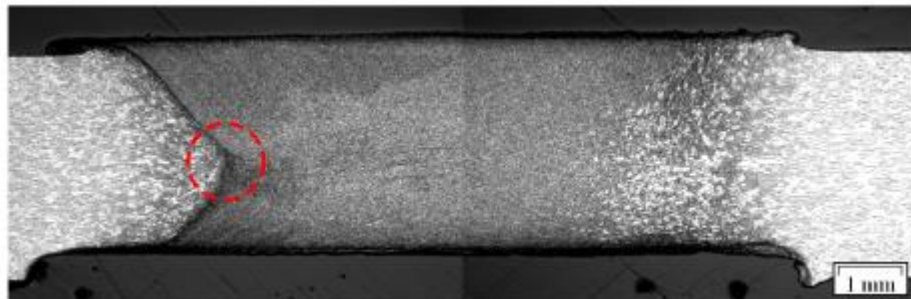


Figure. I. 18: Conflit d'écoulement [36].

Défaut de type cavité:

Les cavités (Figure. I. 19) sont des défauts volumiques internes, invisibles en surface, généralement orientés dans le sens de la soudure. Les origines possibles de l'apparition d'un défaut de type cavité sont multiples : température de formation du joint soudé inadéquate, manque de consolidation (effort de soudage insuffisant), fort conflit d'écoulement, bridage insuffisant des coupons... [36].

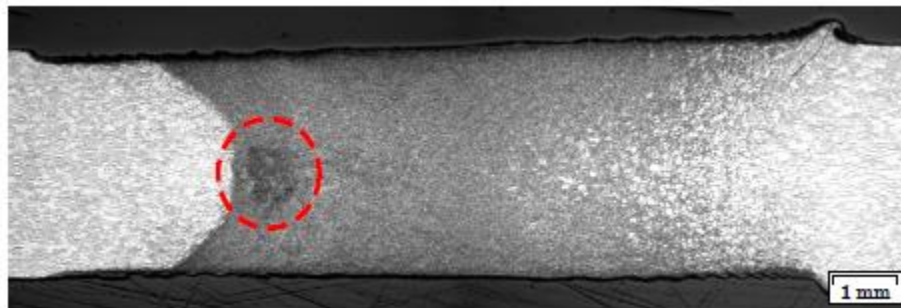


Figure. I. 19: Défaut de type cavité [36].

Plan de joint résiduel ou Joint Line Remnant:

Certaines observations macroscopiques laissent apparaître une ligne sinueuse, plus ou moins continue, parcourant le joint soudé de haut en bas (Figure. I. 20). Cette ligne, appelée JLR (Joint Line Remnant), est le plan de joint résiduel après le passage de l'outil. Le décapage des coupons avant soudage permet d'atténuer considérablement le plan de joint résiduel mais ne permet pas de le supprimer totalement. La nocivité de ce défaut n'a, à ce jour, pas été clairement démontrée [36].

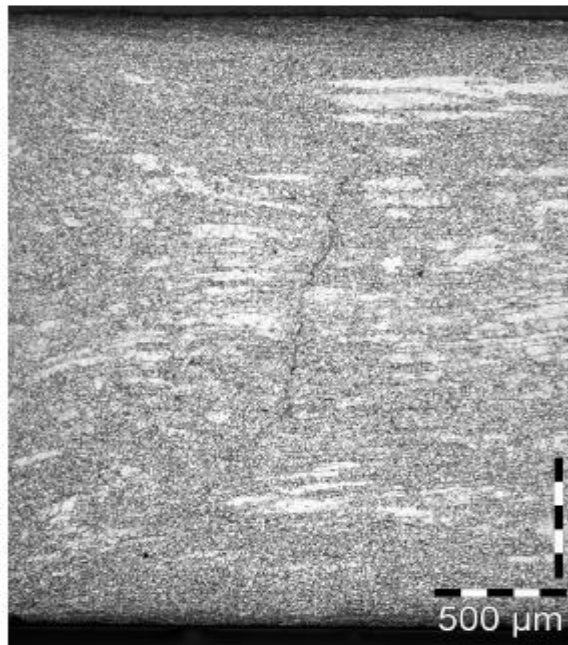


Figure. I. 20: Plan de joint résiduel [36].

I.8- Avantage et inconvénients du FSW:

I.8.1- Avantage:

-Possibilité d'assembler des pièces de sections fortement différentes à condition de prendre certaines précautions [27] [28].

-Des matériaux dissemblables peuvent être assemblés, comme l'aluminium avec le cuivre et de l'acier [26].

-Excellente répétabilité, très bonne reproductibilité et possibilités d'automatisation.

-Aucun consommable, pas besoin de métal d'apport.

-Assemblages de haute qualité ayant une bonne structure métallurgique (le matériau n'atteint pas sa température de fusion).

I.8.2- Inconvénients:

-Investissement important.

- Maintient rigide des pièces à souder contrairement à d'autres procédés de soudage (génération des contraintes).

- Besoin d'un dispositif d'appui (enclume ou support adapté).

I.9- Applications:

Pour des exigences élevées en termes de qualité du joint de soudure, le FSW présente un recours efficace puisqu'il permet d'avoir des qualités de joints de soudures proche des caractéristiques mécaniques du métal de base dans certaines configurations, ce qui est difficile à atteindre avec des procédés de soudage traditionnels [9]. Ces quelques domaines d'utilisation:



Figure. I. 21: Assemblage de l'avion Eclipse 500 avec le procédé de FSW [37].



Figure. I. 22: Application du soudage par FSW par points [37].

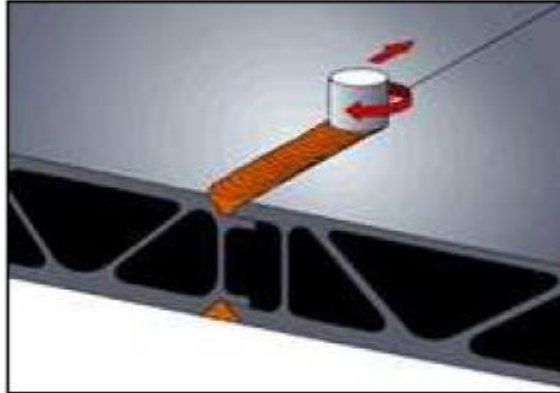


Figure. I. 23: Technique de soudage des carrosseries des trains Hitachi [9].



Figure. I. 24: Bateau en aluminium construit en utilisant FSW [39].

Tableau. I. 1: Grandes Applications du FSW [38].

Year	Application	Company
1995	*Hollow heat exchangers	Marine Aluminum, Norway
1996	*Commercial shipbuilding	Marine Aluminum, Norway
1998	Delta II rockets	Boeing, US
1999	*Commercial shipbuilding	SAPA, Sweden
2000	*Automotive components	SAPA, Sweden
2000	Laser system housings	General Tool, US
2001	*Motor housings	Hydro Aluminum (formerly Marine Aluminum), Norway
2001	*Automotive components	Showa, Japan
2001	*Train bodies	Hitachi, Japan
2002	*Automotive components	Tower Automotive, US
2003	Aircraft structure	Eclipse, US
2003	*Commercial shipbuilding	Advanced Joining Technologies, US
2004	Space shuttle external tanks	Lockheed Martin, US
2004	Food trays	RIFTEC, Germany

Conclusions:

Dans ce chapitre nous avons pu voir le principe et les applications du soudage par friction malaxage et qui va nous permettre de mieux aborder la partie pratique de ce mémoire.

Chapitre II:

Les machines de soudage par
friction malaxage industrielles et
modèles de laboratoires

Chapitre II: Les machines de soudage par friction malaxage industrielles et modèles de laboratoires

Introduction:

Dans ce chapitre, on présente les différentes machines de soudage par friction malaxage soit industrielle ou de laboratoire.

II.1- Machines industrielles de soudage FSW:

Smith et Eireiner [40], [41] proposent une synthèse complète des moyens couramment utilisés, industriellement ou expérimentalement, pour réaliser du FSW. Aujourd'hui, les principales machines utilisées sont les suivantes [8] (figure. II. 1) :

- Les fraiseuses modifiées,
- Les machines dédiées FSW,
- Les robots à architecture parallèles (tricept),
- Les robots à architecture série ou robots polyarticulés.

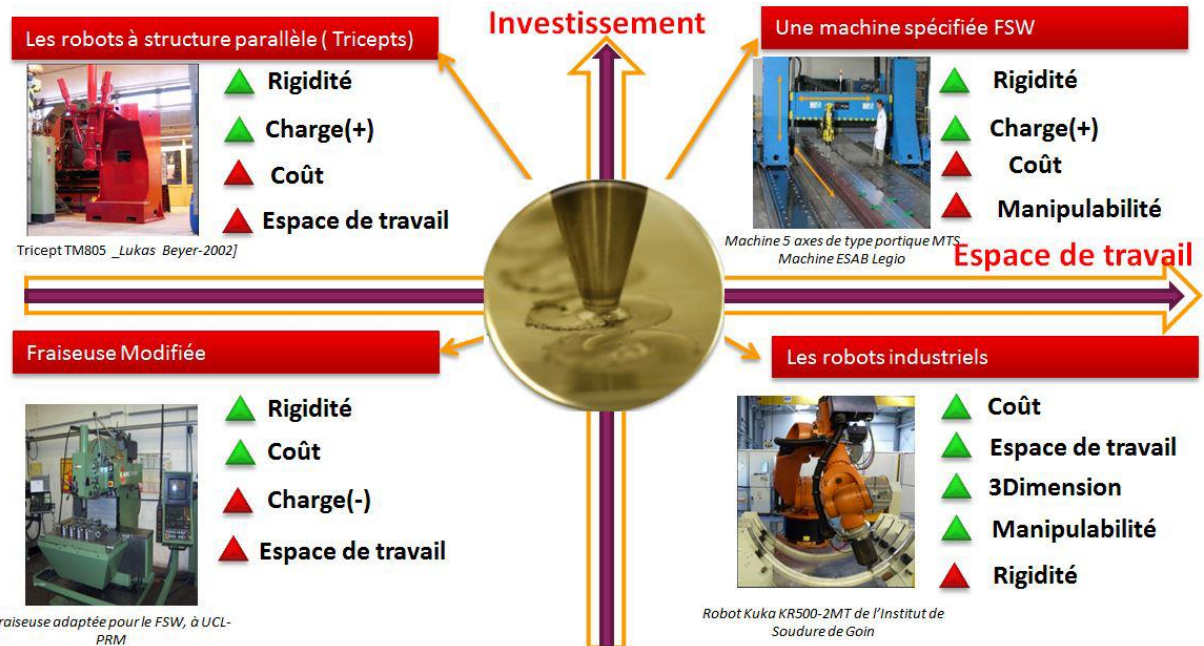


Figure. II. 1: Les machines les plus utilisées pour la réalisation du FSW [42].

Chacune de ces machines possèdent des avantages et des inconvénients. Nous proposons de présenter chacune des machines à travers leurs capacités en effort, leur rigidité, leur volume de travail, etc.

II.1.1- Les fraiseuses modifiées:

La première application du soudage par FSW a été réalisée par Wayne Thomas avec un outil tournant sur une machine de fraisage modifiée. Ponte a précisé dans ses travaux de recherches que le matériel utilisé pour le FSW présente les caractéristiques générales d'une fraiseuse [43]. Cette machine peut être adaptée pour souder par FSW, vu qu'elle a une bonne rigidité [44], un faible niveau de vibrations ainsi que la capacité de fournir des vitesses de rotation et de déplacements constants [43] (Figure. II. 2). Des nombreux essais pour souder par FSW ont été commencé avec des fraiseuses. La fraiseuse n'est pas conçue pour résister aux charges axiales et radiales élevées demandées en FSW, comme elle n'offre pas de surveillance de charge ou de contrôle en effort.



Figure. II. 2: Fraiseuse adaptée pour le FSW, à UCL-PRM [42].

II.1.2- Les machines FSW dédiées:

Ces machines sont développées spécifiquement pour réaliser du FSW. Elles ressemblent fortement à des machines d'usinage comme le montre la Figure. II.3:

Ces machines permettent de souder en 2 ou 3 dimensions. Elles peuvent appliqués des efforts axiaux pouvant aller jusque 90kN. Leur rigidité globale assure une bonne précision du suivi de joint. De même, ses actionneurs et systèmes de guidage sont conçus pour accuser des efforts importants. Ceci leur permet de souder une large gamme de matériaux et d'épaisseurs.

La Figure. II. 3. A présente une machine permettant de souder en 2 dimensions. La Figure. II. 3. B présente une machine de type portique cinq axes. L'avantage principal de ce type de machine est son espace de travail, l'inconvénient majeur réside dans le coût d'investissement élevé et l'accessibilité de l'outil au plan de joint [45].

Etant dédiée au FSW, elles permettent de souder avec un contrôle en effort ou exposition. De même, selon la machine choisie, elles offrent la possibilité d'utiliser les trois technologies d'outil FSW. Certaines d'entre elles sont mêmes munies d'un dispositif débridage intégré (comme la machine présentée sur la Figure. II. 3. A) [8].



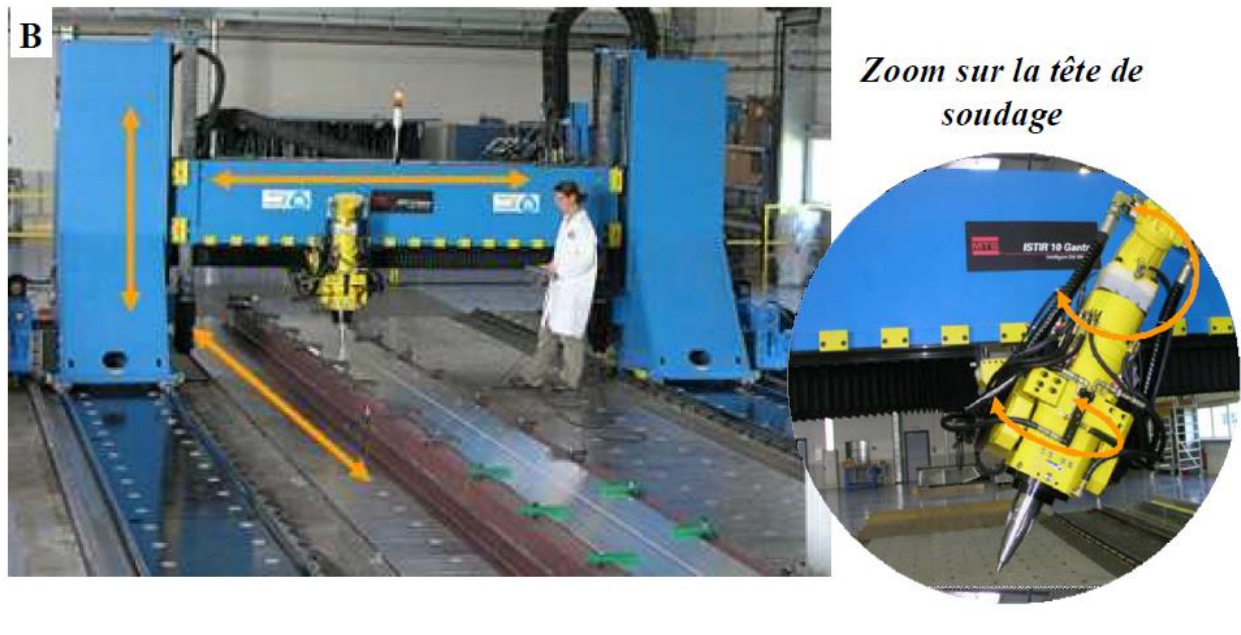


Figure. II. 3: Exemple de machine dédiée au FSW. A- Machine ESAB Legio permettant de réaliser dessoudures dans le plan (x,y). B- Machine de type portique cinq axes MTS [8].

Généralement, on associe aux machines dédiées FSW un coût d'investissement élevé et une faible productivité [46]. Par conséquent, d'autres types de machines ont été étudiés afin de permettre la réalisation de soudure en trois dimensions, d'accroître la productivité et de réduire les coûts d'investissement [8].

II.1.3- Les robots à architecture parallèles (tricept):

Une machine parallèle est une structure mécanique composée de plusieurs chaînes qui agissent en parallèle, en coopération plutôt que l'une sur l'autre, comme dans le cas des manipulateurs série ou des robots articulés. Le Triceps est une machine d'usinage utilisée pour des applications de fraisage à grande vitesse. Ce module se compose de 5 degrés de liberté avec une répétabilité de 10 micromètres. Tricept T805 est contrôlée avec un contrôleur Siemens 840D [47]. Il a été utilisé pour des applications FSW dans le centre de recherche GKSS-Forschungszentrum en Allemagne [48]. Cette machine est capable de créer des forces axiales très grandes, jusqu'à 45 kN. Le Tricept P9000 PKMest spécifié pour produire un effort d'actionnement continu de 20 kN avec des pics de force qui peuvent aller jusqu'à 40 kN [49].

Les avantages de Tricept sont la grande précision (de l'ordre de 50 μ m [50]), la rigidité et la vitesse, avec une grande capacité de transport de charge. Le Tricept est un bon moyen pour la réalisation des soudages par FSW dans les applications des trajectoires linéaires car il possède une grande capacité à pousser seulement dans une direction, généralement la direction verticale.

Par conséquent, son volume de travail et sa manipulabilité sont très limités en le comparant avec un robot sériel. De plus, le tricept nécessite des investissements très élevés. Pour améliorer la capacité de poussée dans les directions latérales d'un tricept, Palpacelli a proposé de le relier à un simple dispositif câble dont la plate-forme mobile était rigidement attachée à l'effecteur terminal du robot [51] (Figure. II. 4).



Figure. II. 4: Tricepta-TR805[48] et b-ParallelKinematics Machine (PKM) [50] utilisé en FSW.

II.1.4- Les robots polyarticulés:

Les robots polyarticulés sont des machines amplement utilisées dans divers secteurs de l'industrie. On les retrouve dans la réalisation d'opérations de soudage par fusion, de palettisation, de peinture, etc. Selon Smith et al. Ou Voellner et al. [46], [52] ce type de machine pourrait contribuer à l'essor du FSW car il permettrait de réduire les coûts d'investissement comparés à ceux nécessaires à l'achat de machines dédiées FSW ou détriments [46], [52], [53]. La Figure. II. 5 présente un robot polyarticulé soudant une forme complexe nécessitant l'utilisation d'une machine cinq axes [54]. Les robots polyarticulés utilisés pour réaliser du FSW sont des robots de forte capacité de charge, pouvant transporter 500kg au bout de leur poignet [46]. Ils sont généralement utilisés pour assurer des opérations de palettisation. Des travaux réalisés par Smith [46] montrent les difficultés rencontrées à souder avec des robots ayant une charge utile inférieure à 500kg.

Les robots polyarticulés offrent la possibilité de souder des formes complexes (à deux ou trois dimensions) grâce à leur flexibilité et à leur accessibilité dans un volume de travail vaste, jusque 120m³ [55], [52], [46], [45]. Par contre, ils sont limités en termes de force applicable de par la capacité des motoréducteurs et la rigidité de la structure [46], [52]. L'effort axial maximal estimé est de 13 à 15kN [53], [54].

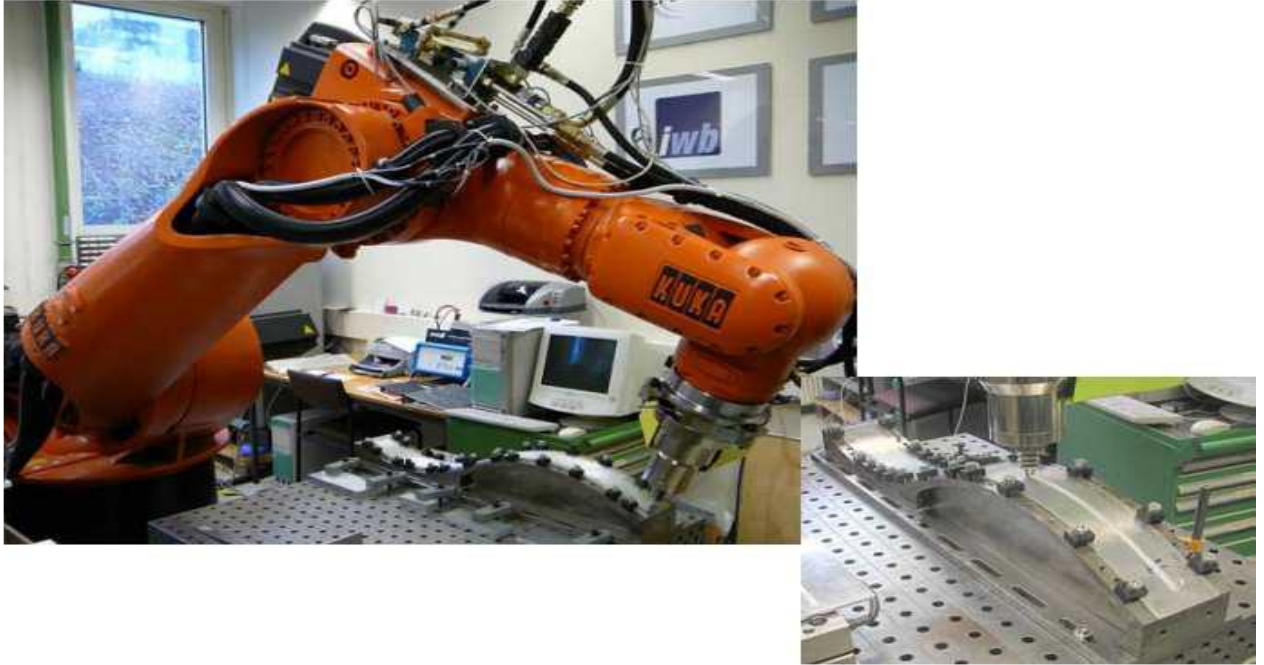


Figure. II. 5: Robot polyarticulé soudant une pièce possédant des surfaces concaves et convexes [52].

II.2- Machines de soudage FSW laboratoire:

Les chercheurs suivants [56] [57] [58] [59] [60], ont conçu des machines à soudage par friction malaxage au coût le plus bas possible pour effectuer des tests de soudage par friction malaxage en laboratoire.

II.2.1- Modèle de Mangesh S. Prabhavalkar et al [56]:

Dans ce travail, Mangesh et al. [56], ont utilisé la machine de forage conventionnelle pour faire fonctionner l'outil en raison de son régime et de son couple élevé. La Figure. II. 6 illustrent la configuration mise au point pour le soudage par friction-malaxage sur une perceuse conventionnelle. Pour développer cette configuration, ils ont fabriqué un banc de machine pour le montage de la plaque de support, une plaque de support (étau) pour maintenir la pièce pendant le processus, un outil de soudage, un porte-outil et une vis mère conformément aux spécifications des calculs de conception. Le lit initial a été remplacé par le lit nouvellement fabriqué et au-dessus duquel la plaque de support est montée. L'outil est inséré dans un porte-

outil spécialement conçu pour l'outil FSW, qui peut être tourné à l'aide d'un moteur électrique et d'agenceurs à courroie de poulie [56].

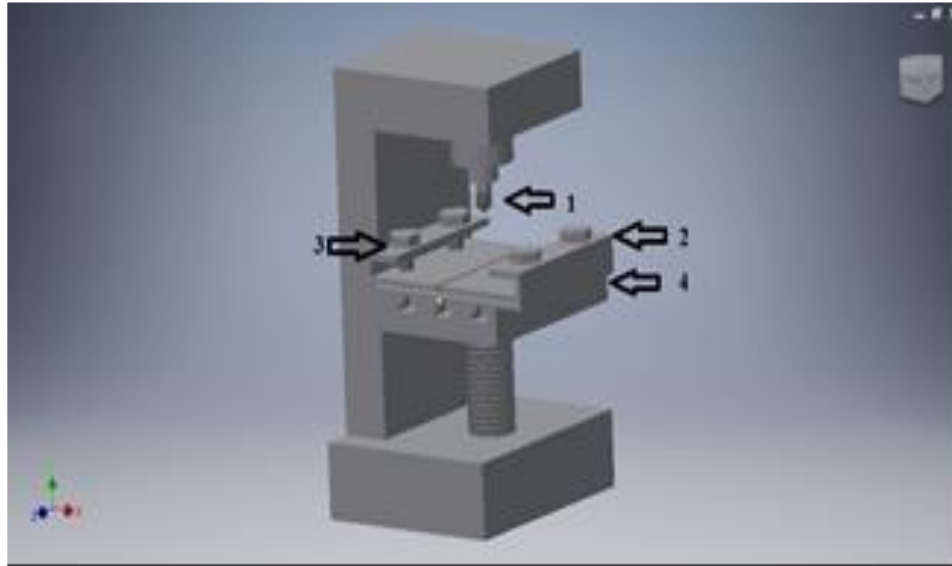


Figure. II. 6: A- Dessin 3D de machine FSW. B- La machine de FSW modèle de Mangesh S. Prabhavalkar et al [56].

II.2.2-Modèle de Mohd Années Siddiqui et al [57]:

L'expérimental utilisé dans le travail de Siddiqui et al [57], perceuse à main (montrée à la Figure. II. 7). La machine est fixée verticalement par serrage. La plaque de support coulissante est disponible pour fournir une vitesse d'avance ou de soudage. La perceuse à main a une vitesse de rotation de 2600 tr / min et une puissance de 450W [57].

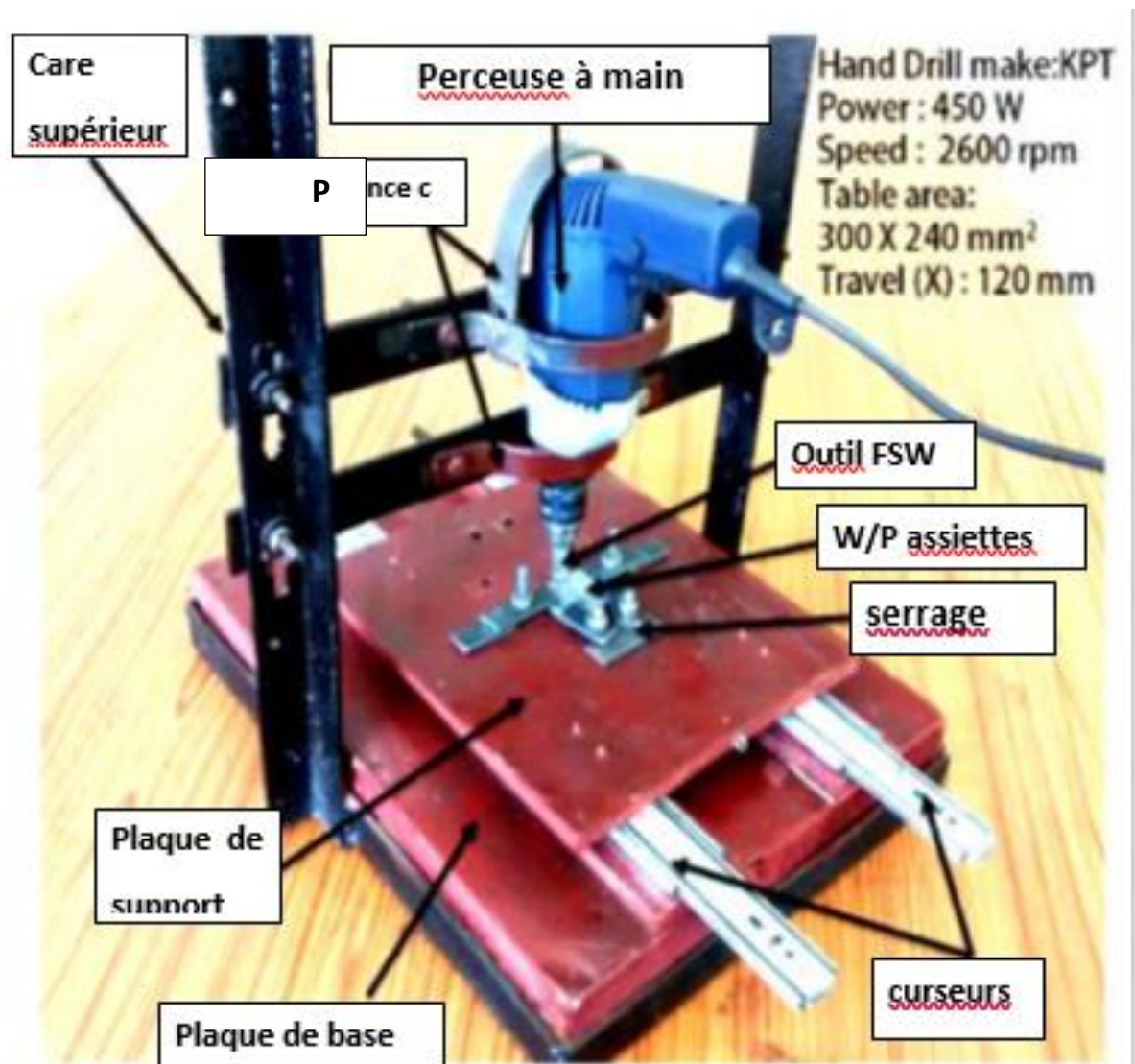


Figure. II. 7: La machine de FSW modèle de MohdAneesSiddiqui et al [57].

II.2.3- Modèle de JithinAmbarayil Joy et all [58]:



Figure. II. 8: Vue modèle d'une machine de soudage par friction-malaxage modèle de Jithin Ambarayil Joy et all [58].

Conclusion:

Dans ce chapitre, Nous avons séparé les types de machines de soudage par friction malaxage FSW utilisées dans l'industrie et donné des exemples de machines utilisées dans les laboratoires, conçues par des équipes de recherche pour réduire le coût des expériences de soudage FSW.

Chapitre III

Description de la machine de
soudage par friction malaxage
réalisée

Chapitre III: Description de la machine de soudage par friction malaxage réalisée

Introduction :

Dans ce chapitre, on présente l'équipement utilisé dans l'installation de machine de soudage par friction malaxage et les résultats obtenus. Nous avons divisé ce chapitre en quatre parties (partie mécanique, partie électronique, partie informatiques et partie métallurgique). Le but de ce chapitre est de présenter la machine fabriquée avec le même système de CNC capable de contrôler les paramètres les plus importants de soudage FSW, telle que la vitesse de soudage et la force appliquée.

III.1Partie mécanique :

III.1.1- Simulation avec Solidworks :

Afin d'éviter certaines erreurs, nous avons dessiné la machine en utilisant le logiciel approprié : Solidworks (Figure. III. 1).

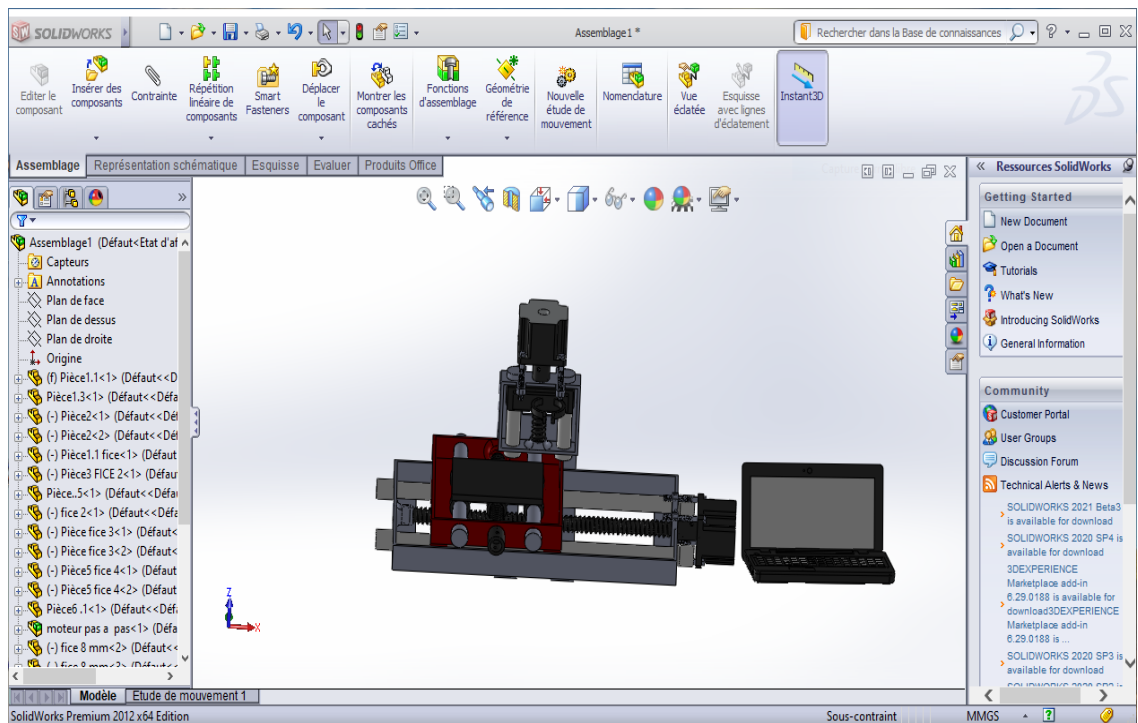


Figure. III. 1: La simulation de machine de soudage par fiction malaxage dans Solidworks.

III.1.2- La forme finale de machine de soudage par friction malaxage :

La figure. III. 2 montre une vue générale de la machine après l'assemblage final de toutes ses pièces et les d'axe x et z.

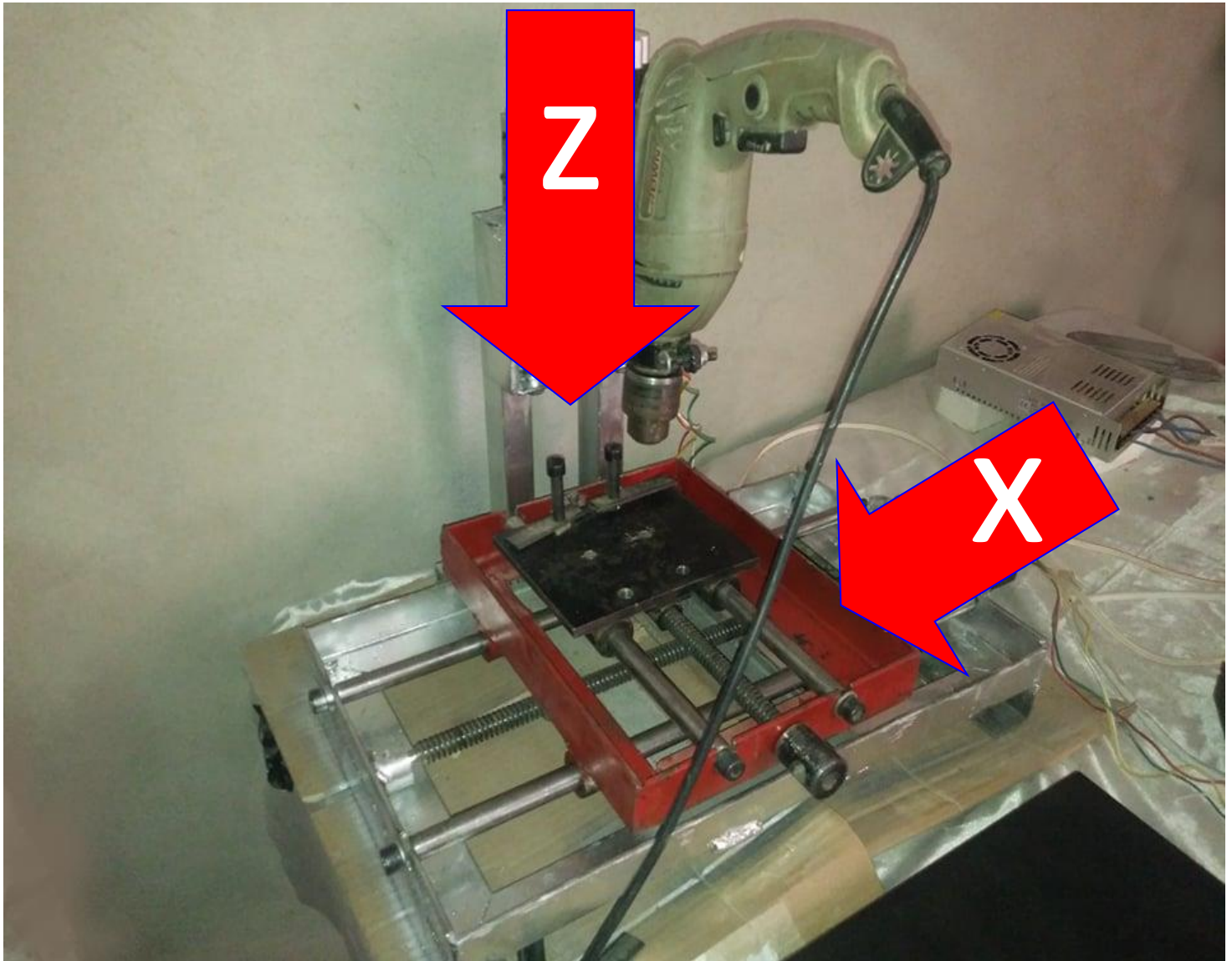


Figure. III. 2: La forme finale de la machine de soudage par friction malaxage.

III.2- Partie électronique :

Dans cette partie, nous avons utilisé quatre appareils électroniques en plus d'un ordinateur et qui ont été connectés entre eux.

III.2.1- Appareils électroniques:

III.2.1.1- Moteurs pas à pas:

Un moteur pas à pas est un moteur électrique utilisé dans les petites machines et qui ont besoin d'un contrôle précis de leurs moteurs, comme une imprimante, un cutter laser, etc....

Et l'une des caractéristiques les plus importantes de ce type de moteur est qu'il peut contrôler avec précision le nombre et la vitesse de ses tours et l'angle d'arrêt (Figure. III. 3).

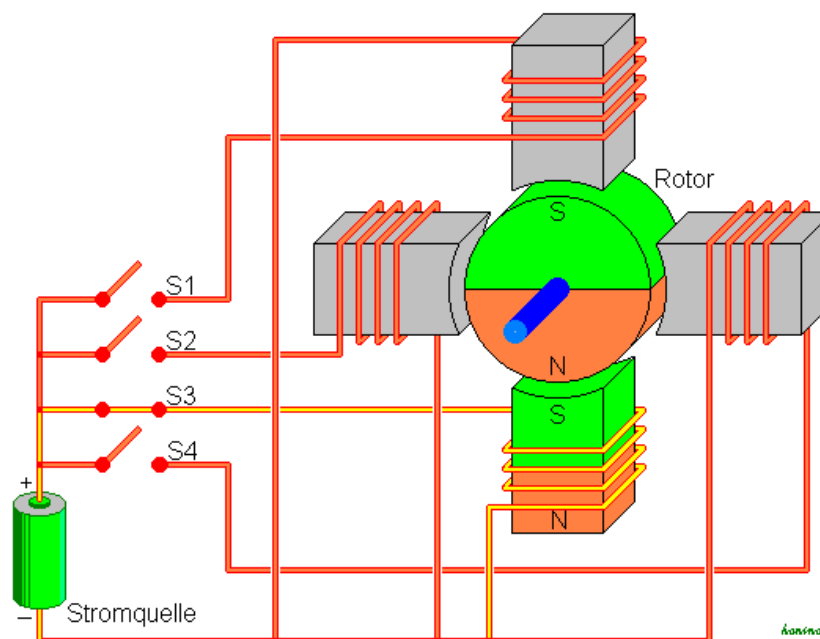


Figure. III. 3: Principe du moteur pas à pas.

La figure III.4 présente le modèle du moteur choisi qui est un NEMA34 JKB6H567-



Figure. III. 4: Moteurs pas à pas hybrides NEMA34 JK86HS67-5904 à 1,8 degrés

- **Description du moteur :**

Ces caractéristiques techniques sont les suivantes :

- **Numéro de modèle:** JK86HS67-5904
- **Phase:** 2 phases
- **Fil de plomb (No.):** 4 fils
- **Structure:** hybride
- **Angle de marche:** 1.8 °
- **Hauteur du moteur:** 86 mm
- **Couple de maintien:** 3.4N. M
- **Vitesse:** basse / haute vitesse
- **Certification:** CE, RoHS, ISO9001
- **Forme:** carré
- **Applications:** Utilisation pour les robots électroniques, moteur pas à pas, équipements électroniques, moteur pas à pas électronique, moteur stéréo électronique Moteur pas à pas de routeur CNC.

III.2.1.2- Stepper Motor Driver:

Nous avons utilisé Stepper Motor Controller Leadshine DM556 Z-phase DigitalStepper Motor Driver 18-48 VDC 2'1A to 5'6A NEMA23NÊMA34 (Figure. III. 5).

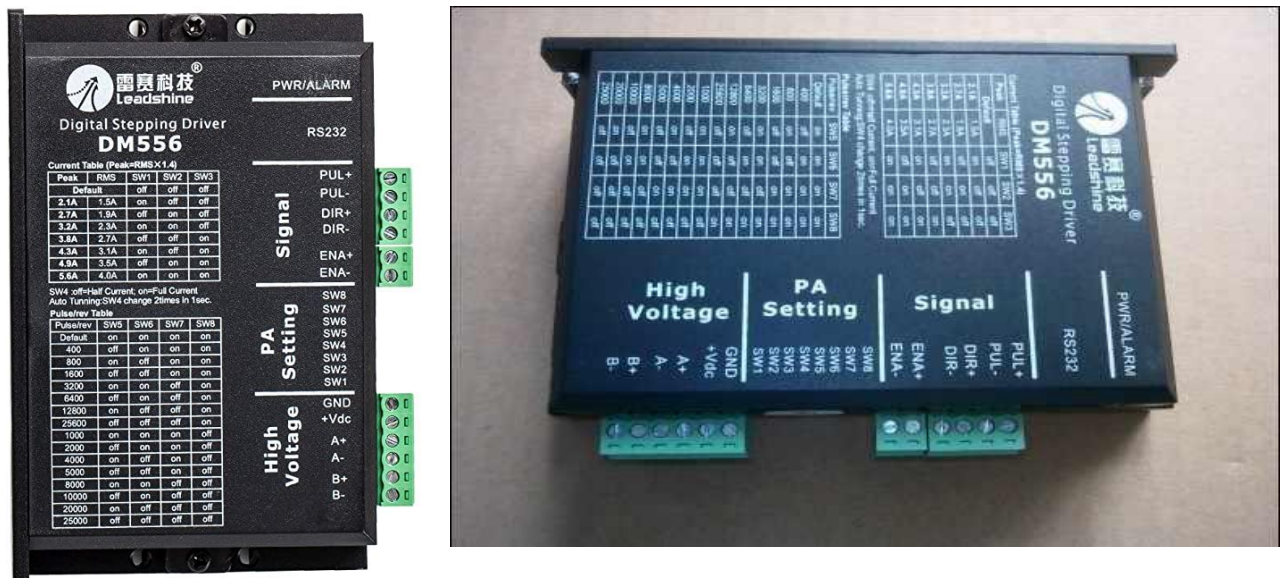


Figure. III. 5: Stepper Motor Controller Leadshine DM556 2-phase Digital Stepper Motor Driver 18-48 VDC 2.1A to 5.6A NEMA23 NEMA34.

- **Description:**

- **Fonctionnalités:**

- * Mouvement extra doux
- * Faible entraînement et chauffage du moteur
- * Step & direction ou contrôle CW / CCW
- * Technologie de contrôle pas à pas à base de DSP
- * Identification automatique du moteur et configuration automatique
- * Fit pour le moteur pas à pas 42/57; on note qu'il est et largement utilisé dans la machine de conditionnement automatique, machine de gravure et autres équipements d'automatisation.

- **Spécification:** Tout neuf

- **Modèle:** DM556
- **Application:** moteur pas à pas 42/57
- **Tension d'entrée:** DC 20-50V
- **Courant de sortie:** 1.0-5.6A, 8 niveaux réglables, résolution 0.5A
- **Méthode de conduite:** entraînement PWM bipolaire à courant constant
- **Fréquence de réponse d'impulsion:** 200kHz (Max)
- **Résistance d'isolement:** > 500 MΩ
- **Force d'isolation:** 500V / min
- **Dimensions:** 118 * 75.5 * 34mm / 4.6 * 3.0 * 1.3in
- **Poids:** env. 270g / 9.5oz

III.2.1.3- POWER SUPPLY:

Nous avons utilisé un POWER SUPPLY 24V15A (Figure. III. 5). C'est un générateur de tension.



Figure. III. 6: POWER SUPPLY 24V15A.

- **Description:**

Les caractéristiques de ce POWER SUPPLY sont les suivantes :

- **Tension d'entrée:** AC110V / AC220V
- **Tension de sortie:** 24V DC
- **Puissance:** 360W
- **Matériau de la coque:** boîtier en métal / base en aluminium

- **Protection:** protection contre les pénuries, protection contre les surcharges, protection contre les surtensions
- **Température de fonctionnement:** 0 ~ 40 °C
- **Température de stockage:** -20 ~ 60 °C
- **Humidité ambiante:** 0 ~ 95% sans condensation
- **Application:** Largement utilisé dans l'automatisation industrielle, l'affichage LED, les communications, etc.

III.2.1.4- Arduino:

Nous avons utilisé un ARDUINO UNO R3 ATmega32SP ATmega16U2 (Figure. III. 5).



Figure. III. 7: ARDUINO UNO R3 ATmega32SP ATmega16U2.

*** Description:**

La carte UNO R3 est compatible avec l'Arduino d'origine, et elle offre maintenant une qualité et des performances excellentes.

Arduino est une source d'informatique physique à plate-forme ouverte reposant sur un simple environnement de développement de cartes d'entrée / sortie qui effectue le traitement / le câblage. Arduino peut être utilisé pour développer des objets interactifs autonomes ou peut être connecté au programme sur votre ordinateur (tel que flash, traitement, maxsmaps). Open Source Ed peut être téléchargé gratuitement (actuellement pour Mac OS X, Windows et Linux).

C'est le nouveau Tsduino Ono R3. En plus de toutes les fonctionnalités de la carte précédente, ONU R3 utilise maintenant ATmega16U2 au lieu de la puce ATmega8U2. Cela permet des vitesses de transfert plus rapides, aucun pilote requis pour Linux ou Mac (fichier INF pour le système d'exploitation Windows), la possibilité d'afficher Uno sous forme de clavier, souris, manette de jeu, etc.

Note: Tosondino Ono R3 nécessite l'installation correcte des pilotes de dossier Arduino 1.0 sur certains ordinateurs. Nous avons testé et confirmé que R3 peut être programmé dans les anciennes versions de ED. Cependant, la première fois que vous utiliserez R3 sur un nouvel ordinateur, vous devrez avoir installé Arduino 1.0 sur cet ordinateur. La puce est ATmega16U2, la prise à 28 broches Deep est ATmega328-PU.

Description de la performance de l'Arduino:

- Entrée / sortie numérique E / S numérique: 0 à 13.
- Entrée / sortie analogique I / O analogique: 0 à 5.
- Supporte la fonction de téléchargement du FAI.
- Tension d'entrée: Pas d'alimentation externe lors de la connexion à l'ordinateur USB, alimentation d'entrée externe 5V ~ 9V Ds.
- Tension de sortie: 5V / 3,3 Vt.
- Utilisation du processeur du contrôleur Atmega328 Atmel.

III.2.2- Assemblage des appareils électroniques:

La figure. III. 8: donne un aperçu général de connexion des différents éléments électroniques,

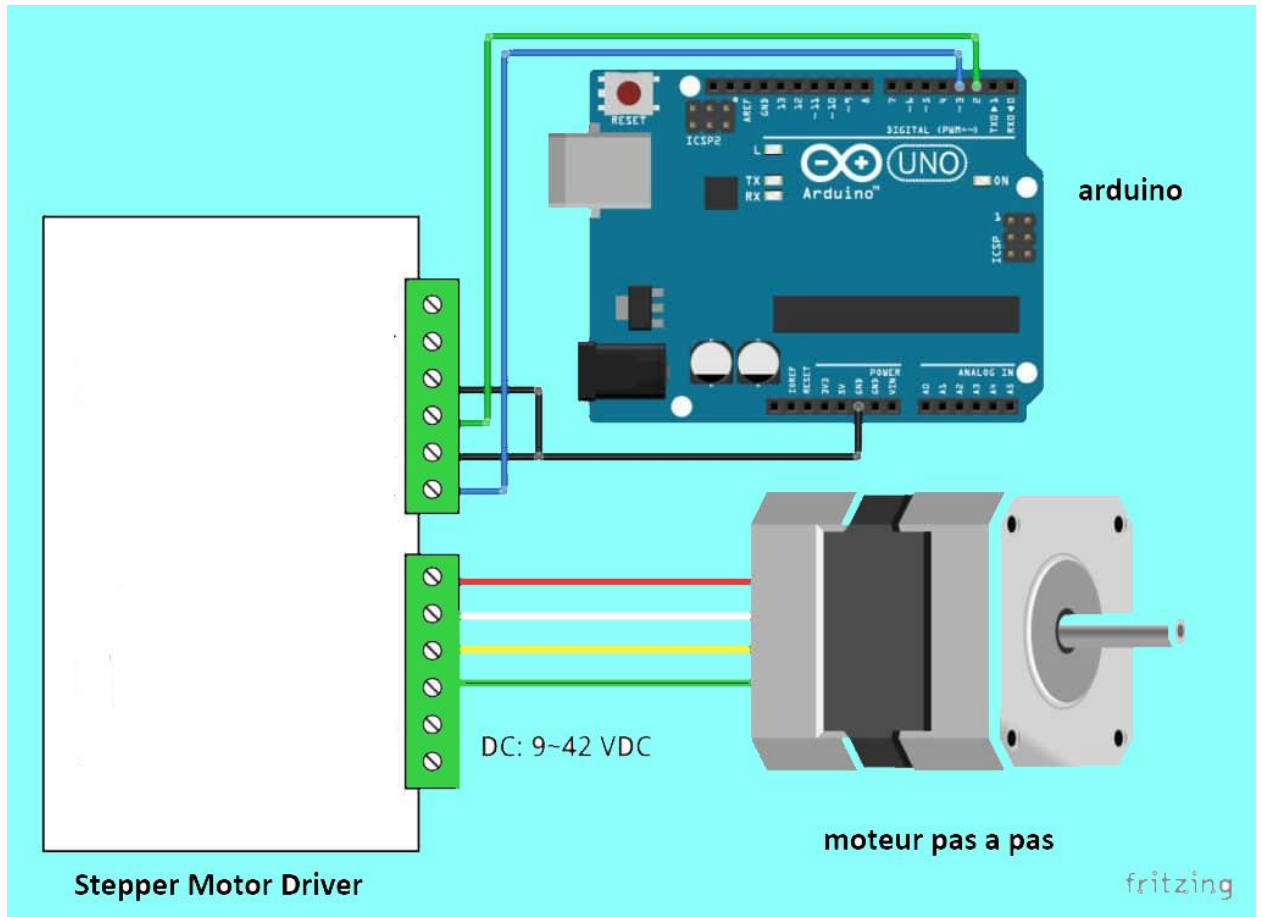


Figure. III. 8: Schéma de l'assemblage des éléments électroniques:

Connexion à l'Arduino:

Nous utilisons ce schéma pour connecter tous les fils des deux axes x et z sur l'Arduino(Figure. III. 9).

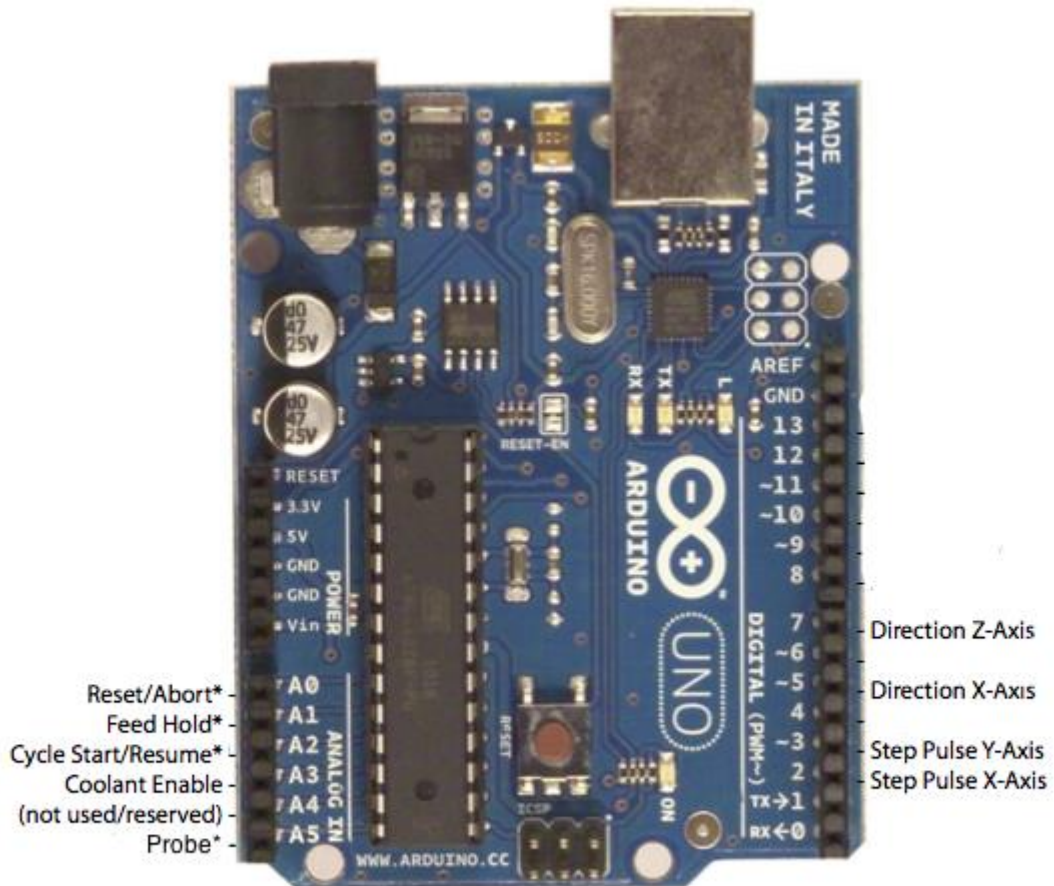


Figure. III. 9: Un schéma montrant les endroits pour connecter les deux axes x et z sur l'Arduino

III.3- Partie informatique:

Dans cette partie, nous nous appuyons sur la programmation dans l'application Arduino IDE, et nous utiliserons également le site Web suivant: <https://easel.inventables.com/projects/PG2KJz5SpD60h91fMoARog>.

III.3.1- Le site Web:

Nous avons utilisé un contrôle manuel pour définir le point de départ avec une grande précision et pour maintenir l'échantillon dans la bonne position. Nous avons utilisé aussi le site Web pour ce contrôle manuel: <https://easel.inventables.com/projects/PG2KJz5SpD60h91fMoARog>(Figure. III. 10).

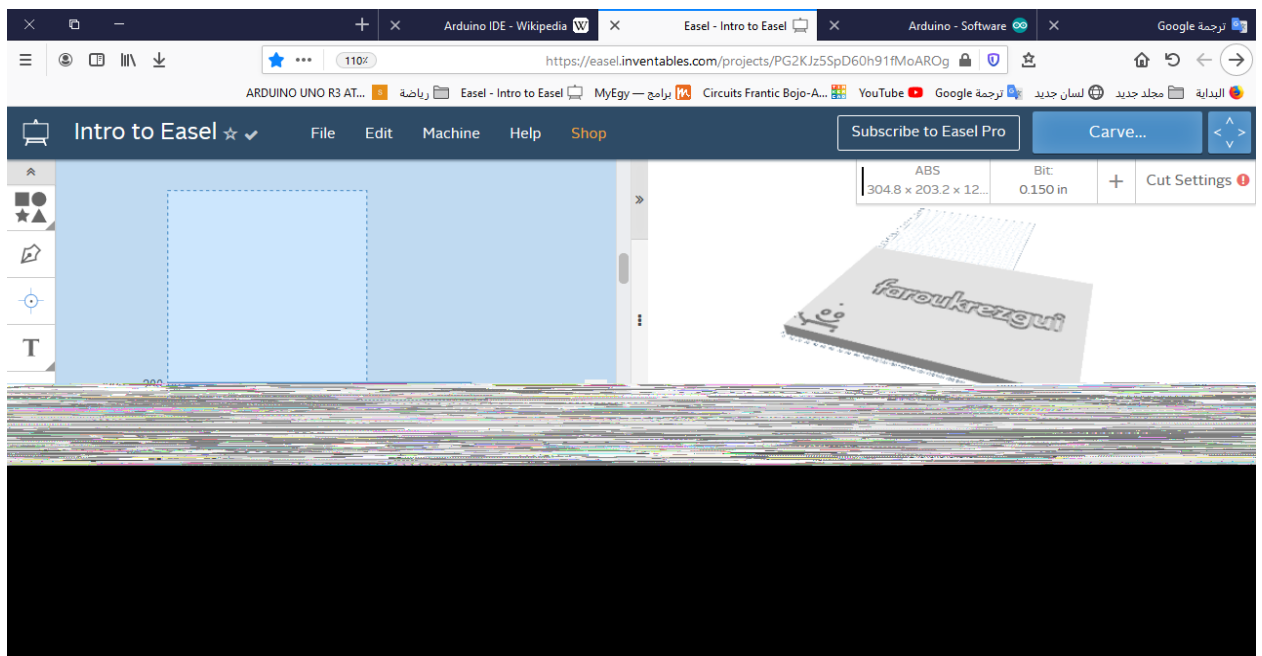
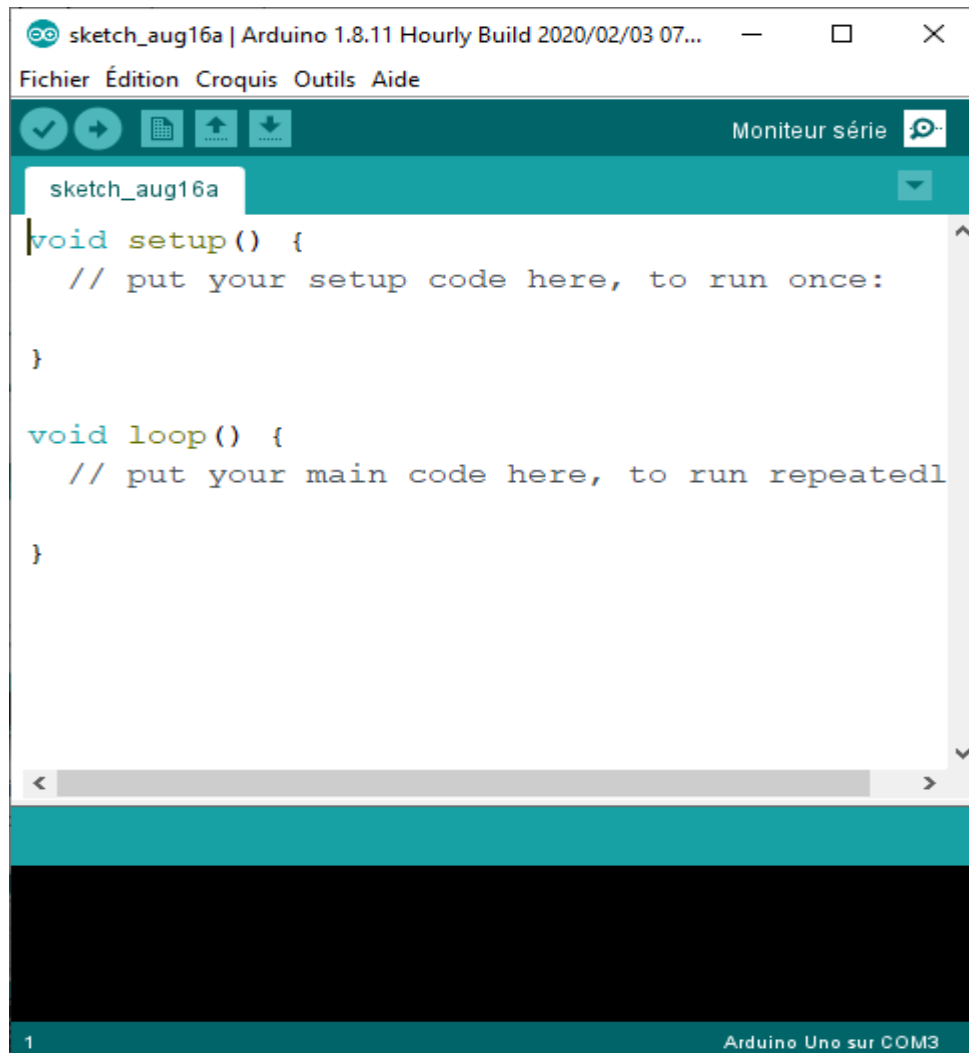


Figure. III. 10: Capture d'écran du site Web utilisé.

III.3.2- Arduino IDE:

L'environnement de développement intégré Arduino (IDE) (Figure. III. 11) est une application multiplateforme (pour Windows, macOS, Linux) qui est écrite dans des fonctions de C et C ++ [2]. Il est utilisé pour écrire et télécharger des programmes sur des cartes compatibles Arduino, mais aussi, avec l'aide de cœurs tiers, d'autres cartes de développement de fournisseurs.



```
sketch_aug16a
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly
}
```

1 Arduino Uno sur COM3

Figure. III. 11: Capture d'écran de l'IDE Arduino montrant un programme clignotant.

III.3.3-Contrôle de la puissance et de la vitesse:

III.3.3.1- Contrôle de la vitesse:

Pour contrôler la vitesse, nous avons utilisé les équations données suivantes :

- 1000 Impulsion de carbone = 1 cm
- Vitesse : $V=d/t$

Avec : t le temps et d : la distance.

Donc quand on veut appliquer une certaine vitesse, on ne calcule que le temps entre les impulsions électriques tnz ou tnx.

III.3.3.2- Contrôle de la puissance:

Cela inclut le calcul de la force chaque fois que nous modifions le nombre d'impulsions dans un cycle, à l'aide d'un appareil Stepper Motor Driver (Figure. III. 12), en ajustant les boutons selon le tableau dessus.

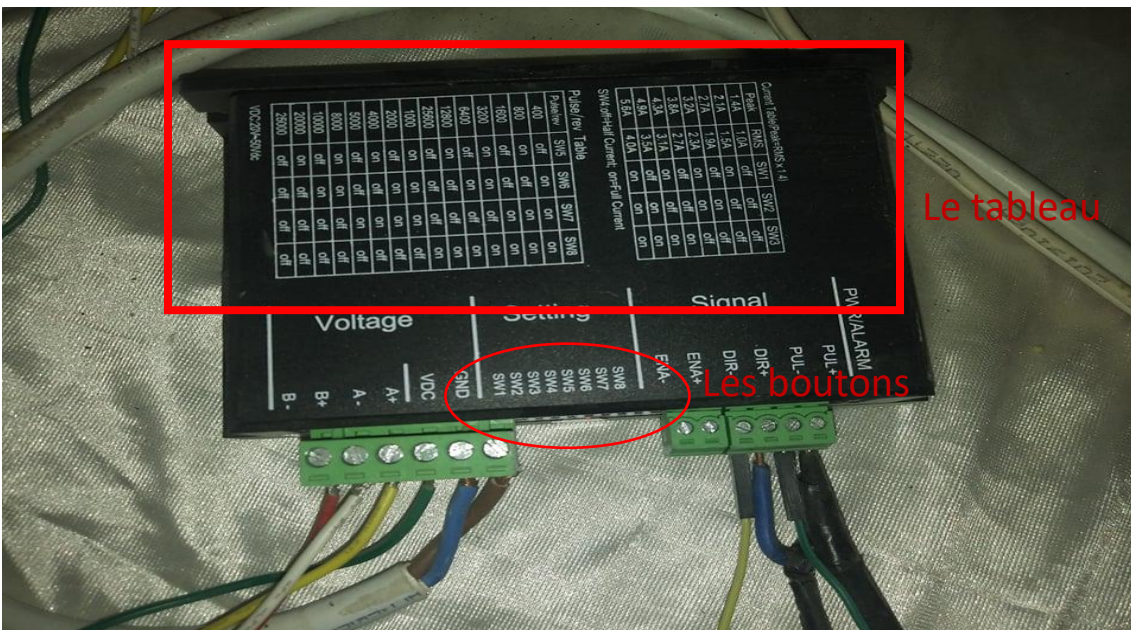


Figure. III. 12: Tableau et boutons situés sur Stepper Motor Driver.

III.4- Partie métallurgique:

Dans cette partie d'étude, on présente en premier lieu, l'outil qui a été fabriqué par usinage et qui est utilisé pour réaliser le soudage par friction malaxage. Ensuite on présente le résultat de soudage de deux tôles en plomb.

III.4.1- Préparation de l'outil :

Les figure.iii.13 et 14 présentent la forme de l'outil qui a été fabriqué par usinage. L'outil est et qui a été recuit puis trempé afin de lui donner une dureté élevée.



Figure. III. 13: La forme générale de l'outil.



Figure. III. 14: Le pion de l'outil.

III.4.2- Quelques résultats de soudage:

Les figures III.15, 16 et 17 montrent les joints de soudure obtenus par soudage friction malaxage de deux tôles en plomb. La soudure (assemblage) a été bien réussie. On note que pour aboutir à des résultats satisfaisants; plusieurs tentatives de soudage ont été effectuées. Par exemple, la figure III.1 la forme du joint soudé est due à une vitesse excessive du déplacement.



Figure. III. 15: La première expérience de soudage par friction malaxage des toles en plomb..

Par contre la deuxième expérience de soudage a donné un joint plus ou moins acceptable (Figure III.16).



Figure. III. 16: Deuxième expérience semi-réussie.

La troisième expérience a été bien réussie (Figure III.17).



Figure. III. 17: Troisième expérience de soudage.

D'après nos différentes expériences; afin d'avoir la meilleure expérience possible, il est nécessaire de respecter les recommandations suivantes :

- La forme de l'outil a suffisamment de bosses pour faire suffisamment de friction pour augmenter la température entre les tôles.
- Choisir le moment approprié de friction pour augmenter la température avant de déplacer l'outil sur l'axe x.
- Assurez-vous que l'échantillon et la perceuse électrique sont bien fixés.

Conclusion Générale

Le but de ce mémoire était de réaliser une petite machine de soudage par friction malaxage.

La machine réalisée est composée principalement des éléments suivants :

- Table de fixation des deux tôles à souder
- Un moteur électrique qui fait tourner l'outil de soudage
- Un système électronique de control

On a pu maîtriser les paramètres de soudage (Vitesse de rotation et le déplacement) pour mieux contrôler le procédé de soudage par friction malaxage

. Un test de soudage a été aussi effectué avec succès sur deux tôles en plomb.

Enfin; nous pouvons dire que ce travail réalisé est le suivi d'un travail déjà entamée l'année passée et qui a été amélioré durant ce travail de master.

Perspectives :

Il sera intéressant si on maîtrise d'autres paramètres de soudage par friction malaxage comme la force appliquée par l'outil sur les deux tôles

Résumé

L'objectif de ce mémoire est de réaliser une machine de soudage par friction malaxage. Nous avons pu maîtriser les paramètres de soudage (Vitesse de rotation et de déplacement). Deux tôles de plomb ont été soudées avec succès par cette machine.

ملخص

الهدف من هذه المذكرة هو إنجاز آلة لحام احتكاك متخصصة في اللحام عن طريق الاحتكاك والخلط، لقد تم التحكم أيضاً في عناصر اللحام (سرعة الدوران والانتقال) الذين يولدان اللحام. تمت بنجاح عملية لحام صفيحتان من الرصاص بالآلة المنجزة.

Abstract

The objective of this dissertation was to make a welding machine by stir friction. We mastered the applied parameters of the welding (rate of rotation and displacement) which cause the friction and the welding of the two work-pieces. Two sheets of lead were welded.

Références

- [1] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Temple-Smith et C. J. Dawes, (1991), Friction stir butt welding. Brevet (GB) no.9125978-8.
- [2] P. L. Threadgill, Terminology in friction stir welding, Science and Technology of Welding and Joining, 12(4):357–360, 2007.
- [3] Mallart et al, MATEC Web of Conférences, Etude métallurgique du soudage par friction malaxage sur un acier à haute limite élastique destiné à la construction navale, 7,02007 (2013).
- [4] W. M. Thomas, P. L. Threadgill et E. D. Nicholas, The feasibility of friction stir welding steel. Science and Technology of Welding and Joining, 4(6):365–372, 1999.
- [5] C. J. Dawes et W. M. Thomas, Friction stir process welds aluminium alloys, The process produces low-distortion, high-quality, low-cost welds on aluminium, Welding Journal, 75(3): 41–45, 1996.
- [6] T. J. Lienert, W. L. Stellwag Jr, B. B. Grimmer et R. W. Warke, Friction stir welding studies on mild steel, Welding Journal – New-York, 82(1):1–9–S, 2003.
- [7] A. P. Reynold, Visualisation of material flow in autogenous friction stir weld, Science and technology of welding and joining, 5(2):120–124, 2000.
- [8] S. ZIMMER, CONTRIBUTION A L'INDUSTRIALISATION DU SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE, Thèse de doctorat, pp, 24-25, 2009.
- [9] N. Jemal, Contribution à la caractérisation thermique et mécanique de la zone soudée en FSW, Génie mécanique [physics.class-ph]. Artset Métiers Paris Tech, 2011. Français. NNT: 2011ENAM0046. Pastel-00766216.
- [10] R. S. Mishra, Z. Y. Ma, (2005), "Friction stir welding and processing", Materials Science and Engineering R, volume 50, pages 1-78.
- [11] A. Guedoiri, (2012) Contribution à la modélisation et à la simulation numérique du soudage par friction et malaxage. Autre. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, Français. NNT : 2012ENAM0060. Pastel-00842393
- [12] G. Liu, L. E. Murr, C. S. Niou, J. C. McClure, & F. R. Vega, (1997), Microstructural aspects of the

friction stir welding of 6061-T6 aluminum, *ScriptaMaterialia*, 37(3), 355-361.

[13] L. E. Murr, G. Liu, & J. C. McClure, (1997). Dynamic recrystallization in friction stir welding of aluminum alloy 1100, *Journal of Material Science Letters*, 16(22), 1801-1803.

[14] L. E. Murr, G. Liu, & J. C. McClure, (1998). TEM study of precipitation and related microstructures in friction stir welded 6061 aluminum, *Journal of Materials Science*, 33(5), 1243-1251.

[15] O. V. Flores, C. Kennedy, L. E. Murr, D. Brown, S. Pappu, & B. M. Nowak, (1998). Microstructural issues in a friction stir welded aluminum alloy. *ScriptaMaterialia*, 38(5), 703-708.

[16] S. Zimmer, W. Chapeau, B. Da Costa, X. Stassart, N. Ben Slima Ayadi, L. Langlois, J. C. Goussain, B. de Meester, L. D'Alvise, Manuel Pédagogique, *Le soudage par friction malaxage, friction stirwelding*, ISBN 978-2-900781-67-8.

[18] M. ParisTech, (5 déc 2018), Étude et modélisation du comportement mécanique de panneaux de structure soudés par friction-malaxage (FSW), thèse de doctorat, l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres PSL Research University, pp,36.

[17] M. Jariyaboon, A. J. Davenport, R. Ambat, B. J. Connolly, S. W. Williams, D. A. Price, (2007), the effect of welding parameters on the corrosion behaviour of friction stir welded AA2024-T351, *Corrosion Science*, and 49877-909.

[19] A. GUEDOI, (le 18 décembre 2012), Contribution à la modélisation et à la simulation numérique du soudage par friction et malaxage, Doctorat ParisTech T H È S E, pp.28.

[21] J. Yan, M. A. Sutton, and A. P. Reynolds, (2005) Process-structure property relationships for nugget and heat affected zone regions of AA2524-T351 friction stir welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, 10(6):725-736, December. ISSN 1362-1718, 1743-2936. Doi:10.1179/174329305X68778. URL <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/174329305X68778>. Xiii, 19, 20.

[23] K. Elangovan, V. Balasubramanian & M. Valliappan, (2008), Influences of tool pin profile and axial force on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy, *The international journal of advanced manufacturing technology*, 38(3-4), 285-295.

[20] G. J. TCHEIN, (11 décembre 2018), Étude des couplages thermomécaniques et

microstructuraux d'un alliage de titane au cours du soudage FSW, DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX, pp.22.23.

[24] R. S. Mishra & M. W. Mahoney, (2007), Friction Stir Welding and Processing, ASM International.

[25] G. Krishna, P. R. Reddy, &Manzoor M. G. Hussain, (2015), Effect of tool tilt angle on aluminum 2014 friction stir welds, Global journal of researches in engineering, 14(7), 61–70.

[26] T. Watanabe, H. Takayama and A. Yanagisawa, (2006), Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding. J. Mater. Process. Technol, 178, pp. 342-349.

[27] J. Schneider, A. Nunes et M. Brendel, The Influence of Friction Stir Weld Tool Form and Welding Parameters on Weld Structure and Properties, Nugget Bulge in Self- Reacting Friction Stir Welds, 8th International Symposium on Friction Stir Welding, Germany.

[28] A. Sullivan and J.D. Robson, (2008) Microstructural properties of friction stir welded and post-weld heattreated 7449 aluminium alloy thick plate, Mater. Sci. Eng. 478A, pp. 351-360.

[29] R. A. Mishran, (2007), Chapter 1 Introduction, Friction Stir Welding and Processing, édité par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International.

[30] C. B. Fuller, (2007), Friction Stir Welding and Processing - Chapter 2 Friction Stir Tooling: Tool Materials and Designs, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International G.

[31] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, (2005). Friction stir welding and processing, Materials Science and Engineering, 50, 1-78.

[32] Avant-projet de norme soumis à enquête probatoire jusqu'au, (25 novembre 2007).
ISO/DIS 25239-1

[33] D. H. Wykes, Cerritos, Calif, (1997), Adjustable Pin for FSW Tool, Patent Number 5 697 544.

[34] W. J. Arbegast, (2007), Chapter 13, Application of Friction Stir Welding and Related Technologies, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International.

[35] J. William, A.Arbegast, (2008) flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding, ScriptaMaterialia, 58(5):372–376.

[36] B. Guerin, (2010), Soudage d'alliages d'aluminium par la technologie friction

stirweldingebobbintool, thèse de doctorate, l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, pp,45-46-47

[37] W. J. Arbegast, (2007), Chapter 13, Application of Friction StirWelding and Related Technologies, Friction StirWelding and Processing, Edité par R.S. Mishra et M.W.Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International.

[38] J.Kevin, (2005), Colligan Friction Stir Welding for ship construction, Navy metalworking center, <http://www.ncemt.ctc.com/>

[39] C.E.D.Rowe, Wayne Thomas, Advances in tooling materials for FSW.

[40] C. B. Smith, 2007, Friction Stir Welding and Processing - Chapter 11 Robots and machines for friction stir welding / processing, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International

[41] D. Eireiner, 2006, Prozessmodellezur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding, ISBN: 3-8316-0650-1

[42] FawziaDardouri. Dispositif d'assistance associé à des robots manipulateurs utilisés dans des procédés de fabrication/FSW. Automatique / Robotique. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM; Institut für Philosophie (Karlsruhe, Allemagne), 2018. Français. NNT: 2018ENAM0036. tel- 02193207

[43] M Ponte, J Adamowski, C Gambaro, and E Lertora. Low-cost transformation of a conventional milling machine into a simple fsw work station. In AMST 05 Advanced Manufacturing Systems and Technology, pages 357–365. Springer, 2005.

[44] D. Eireiner. Prozessmodellezur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding, volume 201. Herbert UtzVerlag, 2006.

[45]M. Soron, 2007, Towards Multidimensionality and Flexibility in Friction Stir Welding Using an Industrial Robot System, Recent Advances in Friction Welding and Allied Processes, Dubrovnik, Croatia

[46] C.B. Smith, 2000, Robotic Friction Stir Welding using a Standard Industrial Robot, 2nd FSW Symposium, Gothenburg, Sweden

- [47] R Zettler, S Lomolino, JF Dos Santos, T Donath, F Beckmann, T Lippman, and D Lohwasser. A study on material flow in fsw of aa 2024-t351 and aa 6056-t4 alloys. In 5th International FSW Symposium-Metz, France, pages 14–16, 2004.
- [48] R Zettler, S Lomolino, JF Dos Santos, T Donath, F Beckmann, T Lippman, and D Lohwasser. Effect of tool geometry and process parameters on material flow in fsw of an aa 2024-t351 alloy. *Welding in the World*, 49(3-4):41–46, 2005.
- [49] J. De Backer. Feedback control of robotic friction stir welding. PhD thesis, University west, 2014.
- [50] Tricept PKM Tricept. Tutoriel LATEX. http://www.pkmtricept.com/files/catalogo_en.pdf, July 24-11-2019.
- [51] M Palpacelli. Static performance improvement of an industrial robot by means of a cable-driven redundantly actuated system. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 38:1–8, 2016.
- [52] G. Voellner, F. Zaeh, J. Silvanus, O. Kellenberger, 2007, *Robotic Friction Stir Welding*, AeroTech Congress & Exhibition, Los Angeles, California
- [53] M. Soron, 2008, *Friction stir welding of high-strength aluminium alloys using an industrial robot system: A feasibility study*, 7th International FSW Symposium, Awaji Island, Japan
- [54] G. Voellner, F. Zaeh, O. Kellenberger, D. Lohwasser, J. Silvanus, 2006, *3-D FSW using a modified high payload robot*, 6th International FSW Symposium, Saint Sauveur, Canada
- [55] G.E.Cook, H.B. Smartt, J.E. Mitchell, A.M.Strauss, R.Crawford, 2003, *Controlling robotic friction stir welding*, *Welding Journal*, Vol. 82 No.6, pp.28-34.
- [56] S. Mangesh, S. Prabhavalkar, M. Bhushan, M. Chalke Nikhil, V. Joshi3 Pawan, C. Karangutkar
- [57] R. Akshay . Patil5, 2016 , *Redesign and Modification of Conventional Drilling Machie for Friction Stir Welding of Aluminium Alloys*, , *IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development* | Vol. 4, Issue 02, 2016 | 1766-1769,

[58] J. A .Joy, M. Sajjad, D-W. Jung, (2018), Design and Fabrication of Friction Stir Welding Machine.