RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE POPULAIRE
MINISTÈREDE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Yahia Farés Médéa
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire deMaster

DOMAINE : Sciences et Technologie
FILIERE : Génie Mécanique
OPTION**:**Construction Mécanique

Thème

Etude expérimentale du procédé de Soudage FSW sur les alliages d'aluminium

Présenté par :

M. ADIL HAMID

M. SAIDANI KHALED

Encadré par :

Dr. R. BOUGHEDAOUI

Dr. M. Djaghdjough

Promotion : Juin 2022

Remerciement

Nos remerciements vont particulièrement à nos parents pour leursoutienetleursencouragements.

Nous tenons à remercier notre promoteur Dr.BOUGHEDAOUI RACHID pour sa disponibilité, ses encouragements durant toute la période du travail ainsi que les efforts consentis pour L'élaboration de ce mémoire.

Nos remerciements également Monsieur M. Djaghdjough ainsi que l'ensemble du corps enseignants de l'université YAHIA FARES de Médéa en général et plus particulièrement à ceux du GÉNIE MECANIQUE.

Nous adressons également nos remerciements à tous les travailleurs de la société Poval à Al-Berrouagia en général, et en particulier les travailleurs de l'unité de maintenance, la branche de production, dirigée par farouk chadouli, mezade yakoube, labidi youcef et derouaouai messoud

Enfin,nous remercions toutes les personnes qui nous ont conseillées,qui se sont simplement intéressées à ce travail.

Dédicace

Je cordialement dédie ce travail à:

A Mon père Brahim
A la plus belle femme Ma mère Djamila
A ma grand-mère mahdjouba
A mes frères : mohamed, farouk, abdelhak, Omar et zainab ainsi que ses enfants
A Mon bonheur Wafa.
A Ma tante Masseouda
A toute l'équipe de TSM spécialement Tayeb. Hicham Abdelaghanni

Aussi he dédie ce mémoire à toute ma promo de construction et à tous mes amis qui m'ont soutenu par leurs encouragements.

KHALED SAIDANI

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mon cher père Mohamed

A ma chère mère khaira

A Mes frères et mes sœurs,Toute la famille,Tous mes amis.

ADIL HAMID

Résumé :

Le soudage par Friction Malaxage (Friction StirWelding) est un procédé d'assemblage inventé en 1991 à l'université de Cambridge en Angleterre. Le principe du soudage par friction consiste à brider deux tôles métalliques bord à bord, puis d'animer un outil en rotation ce qui génère un flux de chaleur grâce à la friction de celui-ci avec les matériaux à assembler. L'outil est muni d'un épaulement et d'un pion qui permet de malaxer et drainer les métaux. Le soudage par Friction a un grand intérêt, il exclut le métal d'apport à des températures inférieures aux températures de fusion des matériaux à assembler. Le travail demandé consiste en premier lieu à une étude théorique présentant les différents types de procédés de soudage et par las suite une étude assez détaillée du soudage par friction. La partie expérimentale consiste à la conception et la fabrication de l'outil ainsi que le soudage de pièces en alliage d'aluminium .

Les mots clés: Le soudage par Friction Malaxage, soudage par friction, outil en rotation, alliage d'aluminium.

Summary:

Friction Stir Welding is an assembly process invented in 1991 at the University of Cambridge in England. The principle of friction welding consists of clamping two metal sheets edge to edge, then animating a rotating tool which generates a flow of heat thanks to the friction of the latter with the materials to be assembled. The tool is equipped with a shoulder and a pin which allows mixing and draining the metals. Friction welding has a great interest, it excludes the filler metal at temperatures below the melting temperatures of the materials to be assembled. The work requested consists first of all of a theoretical study presenting the different types of welding processes and then a fairly detailed study of friction welding. The experimental part consists of the design and manufacture of the tool as well as the welding of aluminum alloy parts.

Keywords: Friction Stir Welding, friction welding, rotating tool, aluminum alloy.

ملخص :

لحام الدمج الاحتكاكي هو عملية تجميع تم اختراعها في عام 1991 في جامعة كامبريدج في إنجلترا. يتكون مبدأ اللحام بالاحتكاك من تثبيت لوحين معدنيين من الحافة إلى الحافة ، ثم تحريك أداة دوارة تولد تدفقًا حراريًا بفضل احتكاك الأخير بالمواد المراد تجميعها. الأداة مزودة بكتف ودبوس يسمح بخلط وتجفيف المعادن. يتمتع اللحام الاحتكاكي باهتمام كبير ، فهو يستبعد معدن الحشو عند درجات حرارة أقل من درجات حرارة انصهار المواد المراد تجميعها. يتكون العمل المطلوب أولاً من دراسة نظرية تعرض أنواعًا مختلفة من عمليات اللحام ثم دراسة مفصلة إلى حد ما عن اللحام بالاحتكاك. يتكون الجزء التجريبي من تصميم وتصنيع الأداة بالإضافة إلى لحام أجزاء سبائك الألومنيوم.

الكلمات المفتاحية: لحام الدمج الاحتكاكي، اللحام بالاحتكاك، أداة دوارة، سبائك الألمنيوم.

Sommaire

Introduction général 14

Chapitre I: Procédés de soudage 18

1.1.Introduction 18

1.2.Définition de soudage 18

1.3. Les procédes de soudage 18

1.4. Le soudage par fusion 21

1.4.1 Soudage à l'arc électrique: 22

1.4.1. Soudage à arc à l'électrode enrobe 22

1.4.1.2. Soudage MIG (Métal Inerte Gas): 22

1.4.1.3. Soudage MAG (Métal Active Gaz) : 23

1.4.1.4 Le soudage TIG (Tungstène Inerte Gaz) 23

1.4.1.5 Soudage plasma: 24

1.4.2. Soudage à la flamme 25

1.2.3 Soudage aluminothermique 25

Soudage par faisceaux d'électrons1.4.4 26

1.4.6 Soudage électro gaz 29

1.4.7 Soudage par résistance 30

1.5. Le soudage à l'état solide 31

1.5.1. Soudage par diffusion 31

1.5.2 Soudage par friction 32

1.5.2 Soudage par friction-malaxage (FSW) 33

1.5.4. Soudage par explosion 33

1.5.5. Soudage par ultrason 34

1.5.6. Soudage par impulsion magnétique: 35

1.6. Conclusion 35

Chapitre II 37

Soudage par friction 37
II – Introduction: 38
II.1- Historique de procédé de soudage par friction malaxage (Friction Stir Welding) : 38
II.2 Principe de soudage malaxage (FSW): 38
1- Définition: 38
II. 3 Domaine d'application 39
II. 4.Avantages et inconvénients de la technique: 39
II.4.1Avantages : 39
II.4.2 Inconvénients 40
II.5. Paramètres du soudage par friction-malaxage 40
II.5.1 La Géométrie de l'outil assure deux fonctions principales 41
II.5.2 Les vitesses de rotation et d'avance 42
II.7. Propriétés des joints : 44
II. 7.1.Matériaux d'étude et composition chimique 44
II. 7.2. Microstructures de la zone soudée : 44
II. 7.3. Flux de chaleur : 46
II. 7.4 Propriétés mécanique : 47
II. 7 Conclusion: 50
Chapitre III 51
Conception et réalisation d'un outil FSW 51
III Introduction 52
III 2 Conception et réalisation 52
III 2 1 Stratèges de travail 52
III.2.3 Matériaux utilisés pour l'outil et leurs propriétés 53
2.4 Conception des pièces de l'outil 55
2.4.1 Éléments composant notre outil FSW 55
2.4.2 Définition et rôle de chaque élément. 56

2.5 Repérage et Feuilles d'analyse des surfaces des pièces 60

Condition de travail :..... 60

Conclusion general..... 69

Références bibliographies 71

Listes des tableaux

Tableau 1: Synthèse des matériaux d'outil utilisés en FSW 43
Tableau 2: Classification générale des alliages d'aluminium 44
Tableau 3: composition chimique en% de l'acier E335. 53
Tableau 4: Caractéristiques mécaniques moyennes. 54
Tableau 5: composition chimique de l'acier X210Cr12. 54
Tableau 6: Propriétés physiquesdel'acier X210Cr12 55
Tableau 7: Les paramètres expérimentaux 64

Listes des figures

Figure I.1: Classification des procédés de soudage en fonction d'énergie 21
Figure I.2: Soudage MAG/MIG 22
Figure I.3: Soudage MAG/MIG 23
Figure I. 4: Procèdè de soudage TIG (avec sa torche). 24
Figure I.5:soudage plasma 25
Figure I. 6 :soudage à la flamme 25
Figure I. 7: Soudagealuminothermique 26
Figure I.8: Soudage par faisceaux d'électrons 27
Figure I.9 : Le soudage parfaisceauxlaser 28
Figure I.10: P rocédé de soudage par faisceaux laser ; a) laser défocalisé. 29
Figure I.11: Le soudage électro gaz 30
Figure I.12: Le soudage par résistance 31
Figure I.13 : Soudage par diffusion 32
Figure I.14: Soudage par friction 32
Figure I.15 : Schéma montrant les principales composantes de l'outillage en soudage par friction malaxage (FSW). 33
Figure I.16: Soudage par explosion 34
Figure I.17: Soudage parultrasons 35
Figure I.18: Soudage parimpulsion magnétique 35
Figure II.1: Schéma de principe de soudage par friction malaxage (FSW) 39
Figure II.2: Schéma simplifié de l'outil (tige et épaulement) dans le soudage par friction-malaxage 41
Figure II.3: Les différentes formes de la tige 41
Figure II.4: Les différentes formes d'épaulement 42
Figure II.5 : Synthèse des géométries et des formes utilisées pour les pions 42
Figure II.6: Synthèse des matériaux d'outil utilisés en FSW 45
Figure II.7: Profil d'un joint soudé selonune coupe perpendiculaire à la direction de soudage 46
Figure II.8: Profile de la température enregistrée par thermocouples placés à 2mm de la surface localisé dans les trois zones montré sur la figure ci-contre. 46
Figure II.9: microstructure de AA7449 par FSW. 47
Figure II.10: Comparaison des données du modèle thermique aux données enregistrées par thermocouples placés à 6mm de la surface du joint soudé (V = 133 mm/min, rpm344=ω) ... 49

Figure II.11: profile de la dureté d'un joint AA2124 49
Figure II.12: profile de la dureté d'un joint AA7075 50
Figure III.1: fraiseuse verticale semi-automatique. 53
Figure III.2: schéma général d'assemblage. 56
Figure III.3: porte-outil 57
Figure III.4: corps d'outil. 57
Figure III.5: outil. 58
Figure III.6: couvercle. 58
Figure III.7: outil de soudage FSW. 59
Figure III.8: Réglagede la vitesse de rotation de l'outil(Vr) 61
Figure III.9:Réglage de la vitesse d'avance de soudage (VL'angle d'inclinaison α. 61
Figure III.10: Système de bridage pour la fixation des tôles 62
Figure III.11: les étapes de soudage 63
Figure III.12: Plaque soudée 64
Figure III.13: Les empreintes existantes sur FSW 65
Figure III.14: Plaques soudées 67

Introduction général

Introduction général

L'étude des procédés de soudage apparaît comme un domaine de recherche à la fois simple et complexe, car il demande de mettre en commun des connaissances issues de domaines distincts de la physique et de la mécanique. La plus part des procédés met en jeu des phénomènes aussi variés, des modifications microstructurales des matériaux soudés, les transferts de chaleur, l'apparition des contraintes résiduelles,....

Parmi l'ensemble des procédés de soudage, ce lui que nous avons étudié et réalisé est le procédé de soudage par friction et malaxage ou Friction Stir Welding, il apparaît relativement récent vis-à-vis des autres procédés de soudage. Cependant, la curiosité de recherche et les espoirs fondés en ce nouveau procédé, nous a mené à lancer une étude expérimentale à son sujet.

L'explication de ce formidable développement réside dans la capacité du procédé à assembler des alliages d'aluminium,et des alliages cuiver notamment les alliages à durcissement structural (série 2000, 5000, 6000, 7000), sont de plus en plus utilisés dans l'industrie (automobile, naval et terrestre), et particulièrement l'industrie aéronautique, pour constituer la voilure des avions. Donc pour une telle application le matériau doit offrir à la fois une faible densité et de très bonnes propriétés mécaniques. Les alliages d'aluminium offrent un des meilleurs compromis entre ces deux propriétés densité/propriétés mécaniques. Alors nous nous sommes intéressés dans cette thèse à l'étude de soudage sur des matériaux en alliages d'aluminium.

Cependant, ces alliages sont difficilement soudables par voie classique, voir par exemple le soudage à l'arc qui reste une des techniques privilégiées dans son domaine d'application pour des raisons de coût. Ce procédé appliqué à des alliages à durcissement structural a pour conséquence de modifier la microstructure du matériau de base et donc ses propriétés mécaniques.

Toutefois le principale moyen d'assemblage reste le rivetage, une méthode serait d'éliminer les rivets servant à joindre les tôles entre elles par un procédé de soudage adapter, utilisées dans des grandes industries telle que l'aéronautique. Jusqu'à une époque récente, seuls le rivetage et le boulonnage étaient utilisés en tant que moyens d'assemblage. Pourtant, ces procédés présents de nombreux désavantages en plus de celui de la masse et une jonction hétérogène entre les deux tôles. Premièrement, le rivetage implique des fortes concentrations de contraintes non négligeables qui sont bien évidemment néfastes pour la tenue mécanique des assemblages, particulièrement responsable de la formation de fissures de fatigue. Le second problème est lié à la mauvaise résistance à la corrosion des structures rivetées. Enfin,

le rivetage est difficilement automatisable et donc cher. Le soudage est une voie possible de remplacement du rivetage. C'est ce constat qui amène les industriels à étudier le soudage par friction malaxage FSW « Friction Stir Welding » ; dont l'avenir est très prometteur. L'industrie aéronautique en particulier manifeste un intérêt considérable.

Le soudage par friction malaxage (Friction Stir Welding) est un nouveau procédé d'assemblage mis au point par TWI (The Welding Institude) en 1991. L'originalité de ce procédé consiste de souder à l'état solide, ce qui sous-entend que les matériaux de base à souder ne sont jamais en fusion durant l'opération de soudage. ce qui supprime les défauts liés à la solidification et conduit à des contraintes internes faibles par rapports au soudage classique (soudage laser ou à l'arc). Cela a permis évidemment d'ouvrir de nombreuses portes technologiques. Il devient alors possible d'assembler des alliages dits "difficilement soudables" comme par exemple le soudage des alliages d'aluminium des séries 2XXX et 7XXX, réputés non soudables selon les procédés classiques par fusion. Le soudage par FSW présente un intérêt évident : c'est un procédé qui présente des avantages considérable et économique. Cependant c'est un procédé assez nouveau qu'il faut apprendre à maîtriser.

L'analyseet la caractérisation de la microstructure fait aussi parti de notre étude car le soudage par friction malaxage entraîne d'importantes modifications des microstructures initiales. La microstructure évolue sensiblement à travers le point soudé et par là même les propriétés mécaniques. Nous allons caractériser les propriétés mécaniques par des essais de traction sur micro éprouvette, elles vont nous permettent de mesurer un champ de déformation et de voir où se localise la déformation durant l'essai et donc de mettre en évidence la zone faible du joint.

Les défaillances des structures et composants mécaniques ne sont pas seulement dues aux sollicitations extérieures ; les contraintes résiduelles jouent un rôle prépondérant par rapport aux différentes propriétés d'un matériau (fatigue, corrosion ou rupture). Les contraintes résiduelles sont des contraintes qui demeurent dans une structure ou une pièce mécanique en absence de toutes sollicitations extérieures. Elles existent dans beaucoup de pièces mécaniques et ont des origines thermiques (trempe, soudage, ...), mécaniques (grenaillage, polissage, ...) ou métallurgiques.

Les contraintes résiduelles peuvent modifier la structure et les propriétés mécaniques initiales du matériau. Leurs présences dans ce dernier peuvent aussi bien avoir des effets bénéfiques que néfastes. En effet, il est généralement observé que les contraintes résiduelles de compression ont un effet bénéfique sur la duré de vie de la pièce car elles limitent l'apparition des fissures. Par contre, les contraintes résiduelles de traction favorisent la

génération des fissures. Par conséquent, il est nécessaire de déterminer les contraintes résiduelles au mieux.

Les techniques de mesures des contraintes résiduelles utilisées traditionnellement peuvent êtres regroupées en deux classes : les techniques destructives et non destructives.

Chapitre I
Procédés de soudage

Chapitre I: Procédés de soudage

1.1.Introduction

Nous présentons brièvement différents procédés de soudages employés pour assembler deux matériaux différents. Ils sont classés en deux catégories : les procédés de soudage par fusion et ceux à l'état solide, comme le soudage par friction [1].

Le soudage par friction est un procédé utilisé en générale, cependant il peut être appliqué dans certains cas particulier, en mode de soudage hétérogène pour assembler deux différents.

L'assemblage par soudage occupe une place importante dans tous les domaines de l'industrie et de la construction mécanique. Que ce soit pour l'assemblage de bateaux, de trains, d'avions, de fusées, ou encore de voitures, de ponts, de tuyaux, de réservoirs, de tige de forage. La facilité de sa mise en œuvre et le contrôle des propriétés mécaniques, rendent le soudage très indispensablesurtout du point de vue économique[2].

1.2.Définition de soudage

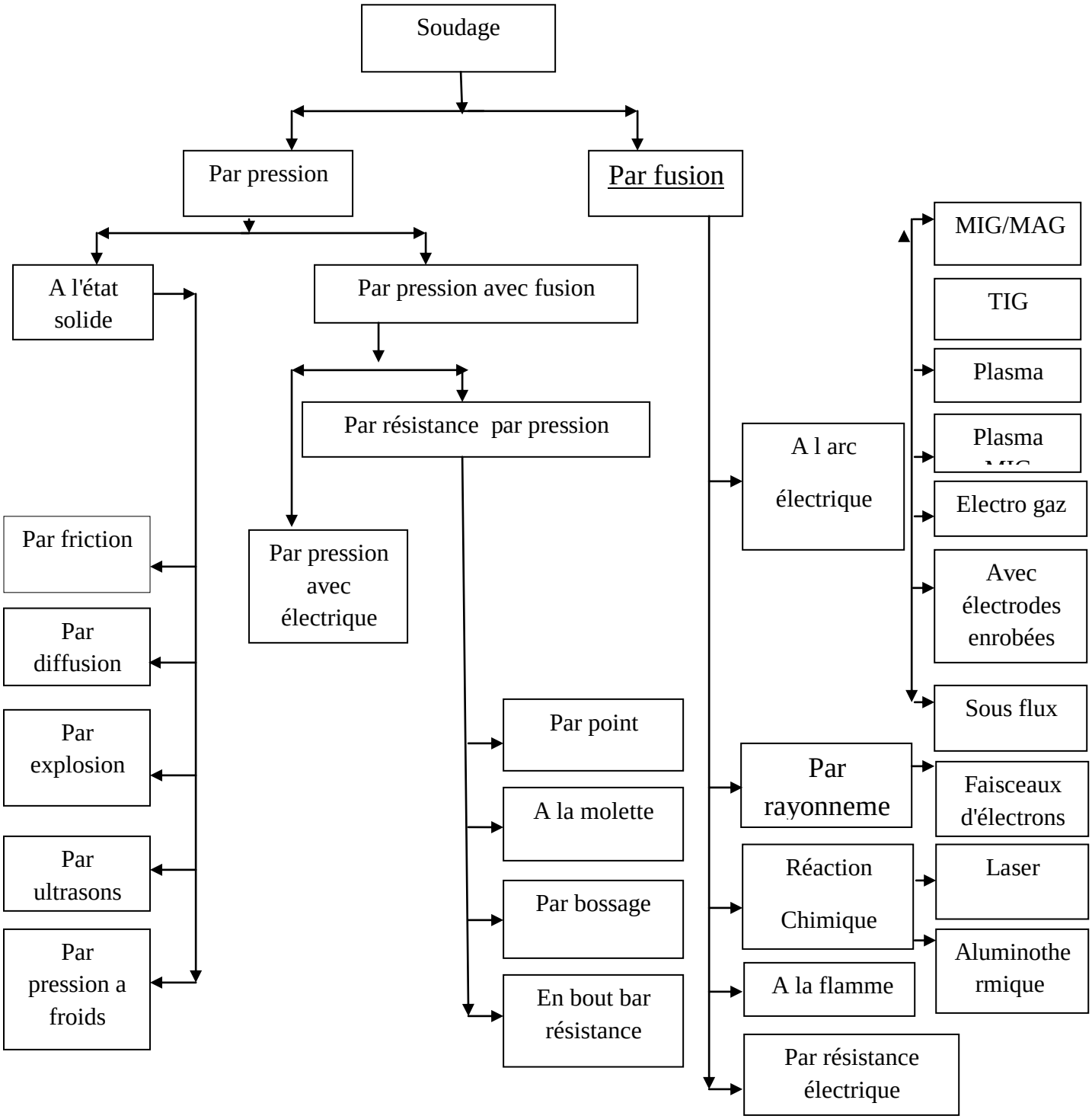
Le soudage est l'opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage de façon permanente, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, avec ou sans emploi d'un produit d'apport. On considère qu'un matériau métallique est soudable par un procédé et pour un type d'application, lorsqu'il est possible d'assurer une continuité métallique par la constitution d'un joint soudé qui, par ses caractéristiques locales et les conséquences globales de sa présence, satisfait au mieux les propriétés requises pour l'application souhaitée[3].

1.3. Les procédes de soudage

On estime qu'il y a une quarantaine ou une cinquantaine de procédés de soudage au total. présente un organigramme des procédés de soudage les plus répandus. Les procédés de soudage se subdivisent en deux grands groupes, en l'occurrence lesprocédés de soudage par fusion et les procédés de soudage par pression. Dans le cas des procédés de soudage par fusion, les matériaux à assembler sont portés à fusion, avec ounon un métal d'apport ou une atmosphère protectrice par example un gaz ou un vide . Les impuretés et les couches d'oxydes doivent être éliminées du bain de fusion. L'inconvénient du soudage par fusion est qu'à la température de fusion, la plupart des matériaux sont très réactifs de sorte que la contamination par des éléments indésirables est très difficile à éviter. De plus, denombreux matér iaux subissent, à ces températures très élevées, desmodifications métallurgiques

indésirables telles que la dissolution des carbures ou autres précipités ou la formation de phases intermétalliques fragiles lors du soudage de matériaux dissemblables. Le pr océdé le plus courant est le soudage à l'arc électrique tel que le soudage TIG, MIG/MAG et avec électrodes enrobées. D'autres procédés de soudage où lesmatériaux sont amenés à fusion sont par exemple le soudage au laser, le soudage aluminothermique, le soudage oxyacétylénique, etc.Le deuxième grand groupe de procédés de soudage sont les procédés de soudage par pression. Dans ces procédés, les matériaux à assembler sont pressés l'un contre l'autre, avec ou sans chauffage additionnel des surfaces à souder. Les procédés de soudage parpression peuvent à leur tour être subdivisés en deux sous groupes: les procédés de soudage en phase solide et les procédés de soudage par pression où les matériaux sont amenés à la fusion. Dans ce dernier groupe, le chauffage peut se faire via un arc électrique tel que lesoudage des goujons et le soudage par percussion, ou via une résistance électrique comme le soudage par point et le soudage par bossage. Avec les procédés de soudage en phase solide, les matériaux ne sont pas portés à fusion. L'avantage le plus important du soudage à l'état solide est que les matériaux conservent leurs propriétés originelles. Ces procédés offrent la possibilité de réaliser des assemblages hétérogènes entre des métaux et des alliages très différents non soudables avec d'autres procédés. La zone affectée thermiquement est généralement réduite suite aux brefs temps de soudage et aux températures maximales relativement faibles. Le procédé de soudage par friction est un des procédés de soudage à l'état solide [4].

Organigramme des procédés de soudage les plus répandus.



On dénombre quelques dizaines de procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différent. Pour les uns, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d 'autre , la continuité métallique est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques, la source d'énergies utilisées dans le domaine du soudage sont de types chimiques, électriques, optiques ou mécaniques [5-6], on peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre comme il a été présenté sur la figure

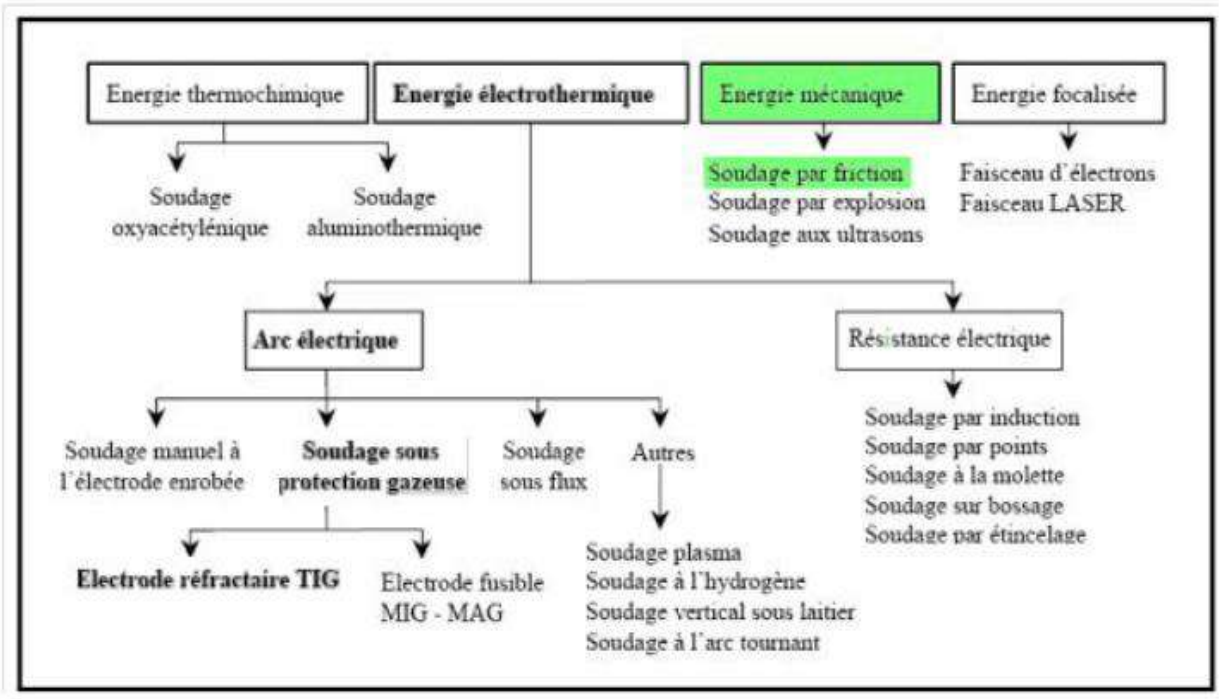


Figure I.1: Classification des procédés de soudage en fonction d'énergie [6].

Dans la pratique, il est nécessaire de faire intervenir une énergie supplémentaire (d'origine chimique, électrique, mécanique...) pour obtenir rapidement la continuité recherchée. On peut citer deux grandes familles de procédés de soudage que nous allons détailler dans la suite : le soudage dit « par fusion » et le soudage dit « à l'état solide »

1.4. Le soudage par fusion

La plupart des procédés de soudage en phase liquide ont été développés depuis la fin du XIXe siècle puisque 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 [1]

1.4.1 Soudage à l'arc électrique:

La fusion du métal d'apport et des pièces à assembler est obtenue par un arc électrique jaillissant entre une électrode et les pièces à assembler. La fusion très localisée amène moins de déformation que la fusion au chalumeau. Cependant le refroidissement rapide entraîne l'apparition de contraintes internes et de déformations qu'il est parfois difficile de corriger. C'est ce procédé qui est le plus utilisé industriellement en soudage autogène.

1.4.1. Soudage à arc à l'électrode enrobe

Le procédé de soudage à l'arc avec électrode enrobée est relativement simple. Un poste à souder, généralement à courant constant, est connecté à une électrode enrobée et à une pièce de métal à souder, ce qui provoque la création d'un arc électrique, libérant l'énergie nécessaire pour fondre le métal d'apport (contenu dans l'électrode) sur le métal à souder. Le flux recouvrant l'électrode sert à protéger le bain de fusion de la contamination atmosphérique [7].

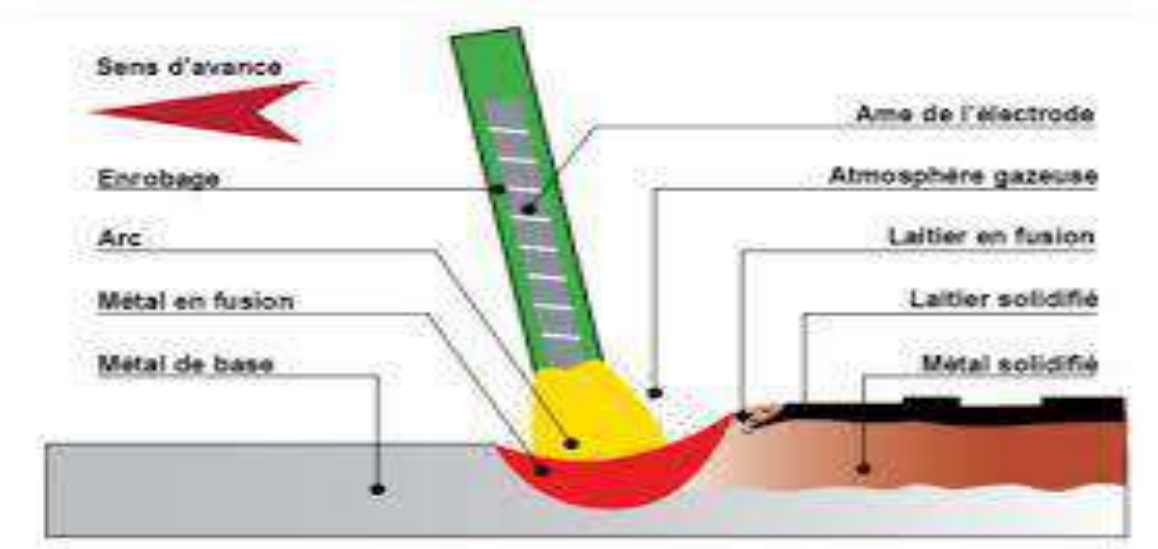


Figure I.2: Soudage MAG/MIG[7].

1.4.1.2. Soudage MIG (Métal Inerte Gas):

On utilise une électrode fusible travaillant en atmosphère inerte afin de protéger le bain de fusion de l'air ambiant. L'électrode est un fil qui se déroule automatiquement. Le gaz protecteur est généralement de l'argon ou de l'argon plus de l'hélium [8].

Ce procédé convient pour :

- Le soudage à plat et en position pour l'aluminium et les alliages légers.

- Le soudage à plat des tôles d'acier

1.4.1.3. Soudage MAG (Métal Active Gaz) :

Variante du MIG utilisant un mélange de gaz carbonique CO2 et d'argon adapté au soudage des aciers de construction au carbone. Ce procédé est uniquement utilisé pour le soudage des aciers faiblement alliés ou non [8].

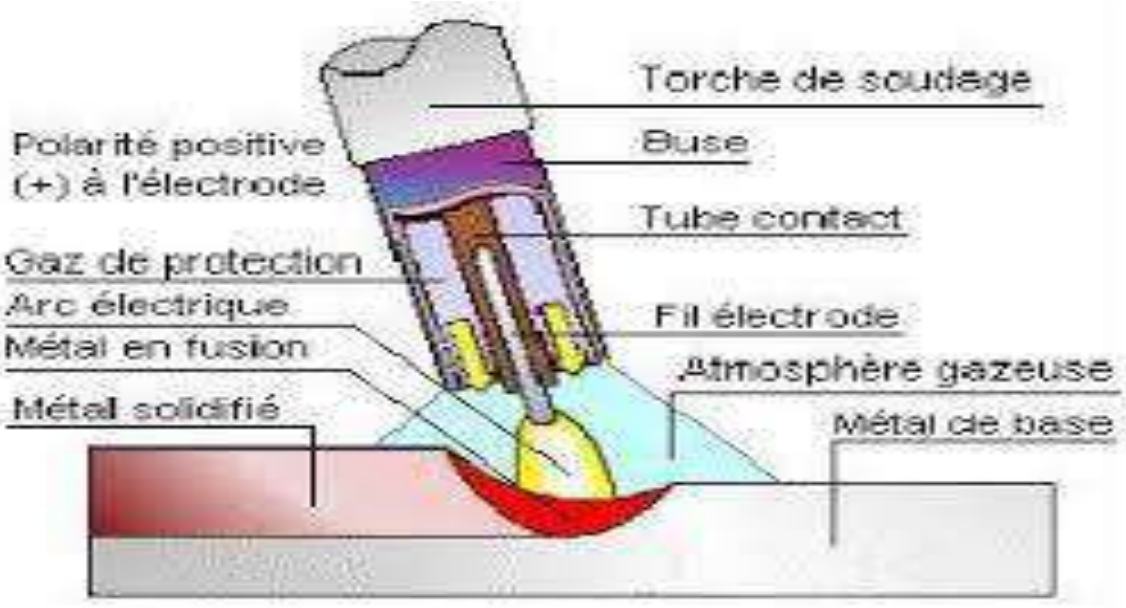


Figure I.3: Soudage MAG/MIG[8].

1.4.1.4 Le soudage TIG (Tungstène Inerte Gaz)

Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) aux USA, utilise une électrode non consommable constituée d'une pointe de tungstène (de Ø 1,0 mm à Ø 8,0 mm) portée par une torche dotée d'une arrivée annulaire de gaz inerte (Argon ou Argon + Hélium pour les procédés automatiques). Ce gaz protège l'arc électrique et le bain de fusion de l'atmosphère externe durant le soudage. Si un métal d'apport est nécessaire, il est amené manuellement ou automatiquement avec un dévidoir dans le bain de fusion. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement les pièces à assembler et le métal d'apport pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure.

Le principe de soudure TIG est simple en soi puisque la torche électrique est conçue pour alimenter un jet de gaz inerte. Ce jet vient envelopper l'arc électrique à la pointe de l'électrode et créer un bouclier gazeux empêchant l'air ambiant de venir en contact avec l'opération de soudure. La torche de soudage est reliée à la borne électrique de sortie négative

du générateur de soudage à courant continu ou alternatif. La masse est placée sur la pièce à souder et reliée à la borne positive du générateur. L'alimentation en gaz de soudage est obtenue par le branchement sur le poste d'une bouteille munie d'un détendeur / débitmètre [9].

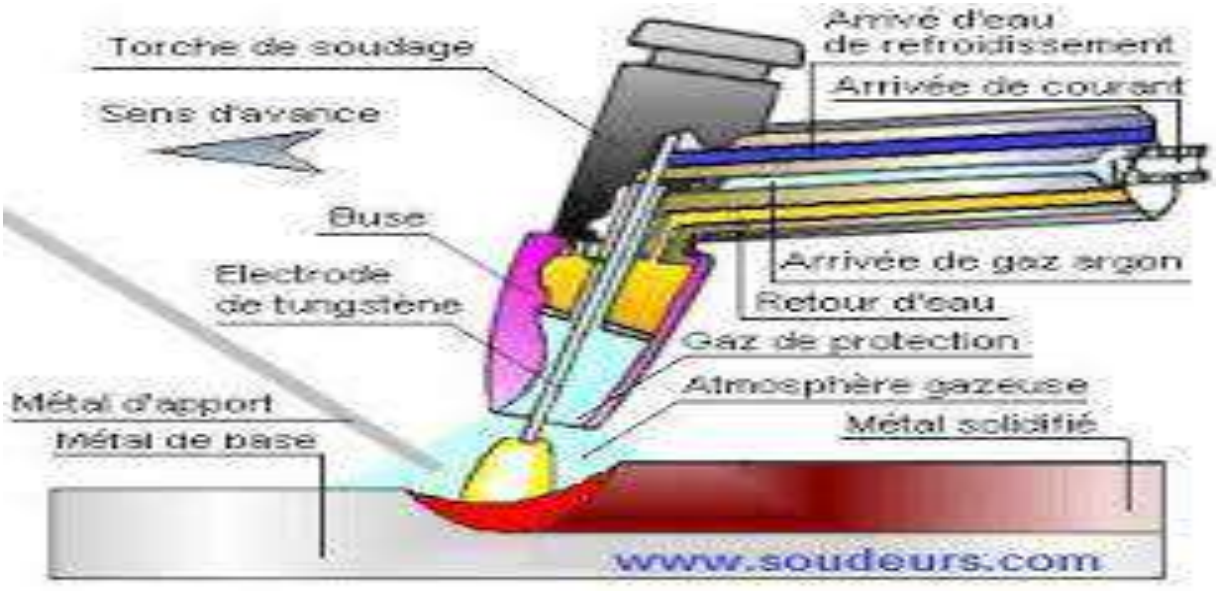


Figure I.4: Procédé de soudage TIG (avec sa torche)[12].

1.4.1.5 Soudage plasma:

Considéré comme une évolution du soudage TIG, il s'en distingue par le fait que l'arc est contraint mécaniquement (constriction mécanique) ou pneumatique (constriction pneumatique), générant ainsi une densité d'énergie supérieure. L'arc peut jaillir entre la tuyère et l'électrode (arc non-transféré) ou entre la pièce et l'électrode (arc transféré) voire être semi-transféré. Le soudage plasma peut être réalisé sans chanfrein sur un assemblage en bout à bout d'un dixième de mm jusqu'à des épaisseurs de 8 mm. Dans ce cas, il nécessite très peu de métal d'apport. Il est utilisé quasi exclusivement en mode automatisé (robot) et les vitesses de soudage sont élevées (dizaines de cm par seconde). Cette méthode permet de souder à des températures atteignant les 10 000 °C [10]

.

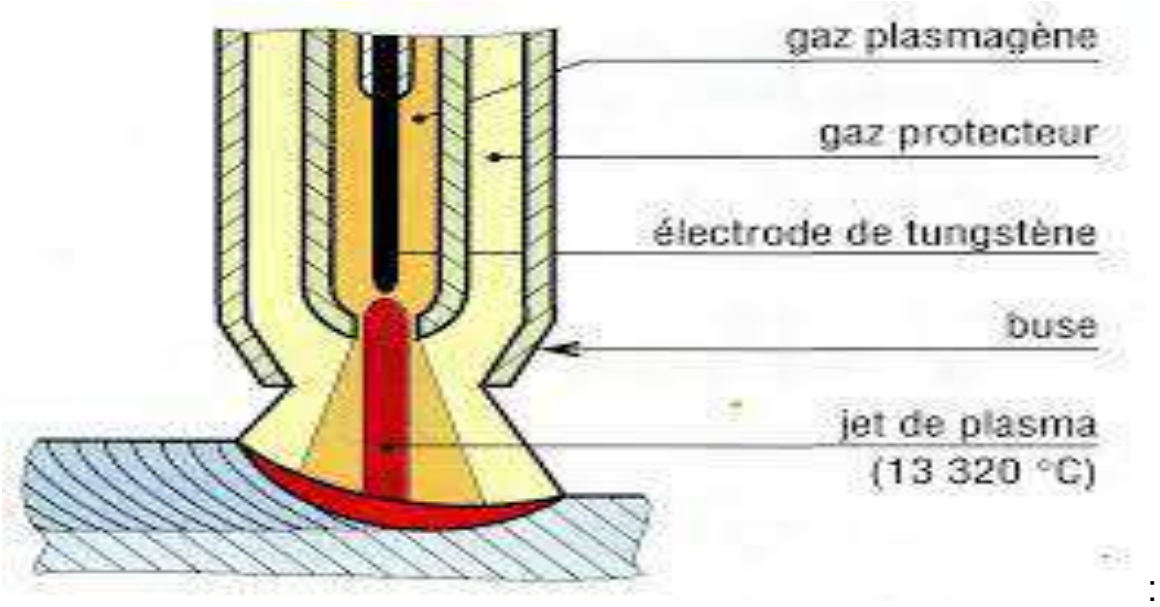


Figure I.5:soudage plasma[12].

1.4.2. Soudage à la flamme

L'énergie thermique, générée par l'oxy-combustion d'un mélange gazeux combustible et comburant, focalisée à la sortie de la buse du chalumeau, est utilisée pour faire fondre les bords à souder. Lorsqu'un métal d'apport est nécessaire, celui -ci se présente sous la forme d'une baguette métallique du diamètre approprié tenue à la main et apportée de proche en proche dans le bain de fusion[10].

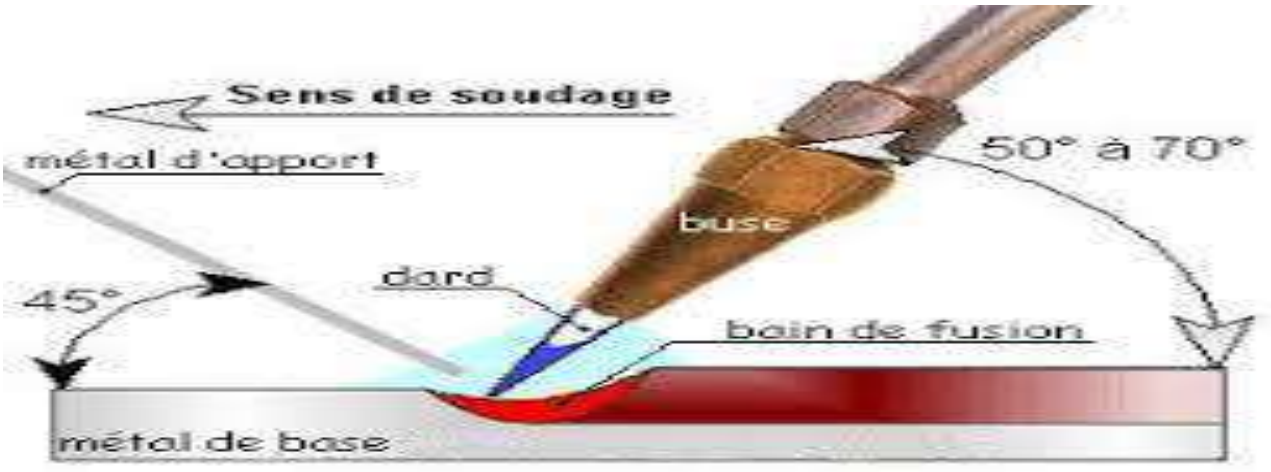


Figure I.6:soudage à la flamme [12].

1.2.3 Soudage aluminothermique

Utilisé pour la réparation de pièces massives telles que les rails de chemin de fer, c'est une méthode de soudage chimique : le joint à réaliser est emprisonné dans une forme, que l'on remplit d'un mélange pulvérulent à base d'aluminium et d'oxyde de fer. Les pièces à sou der

sont chauffées au rouge et le mélange est ensuite enflammé ; la réduction de l'oxyde de fer par l'aluminium provoque la fusion et l'alumine produite est expulsée vers le haut par décantation[10].

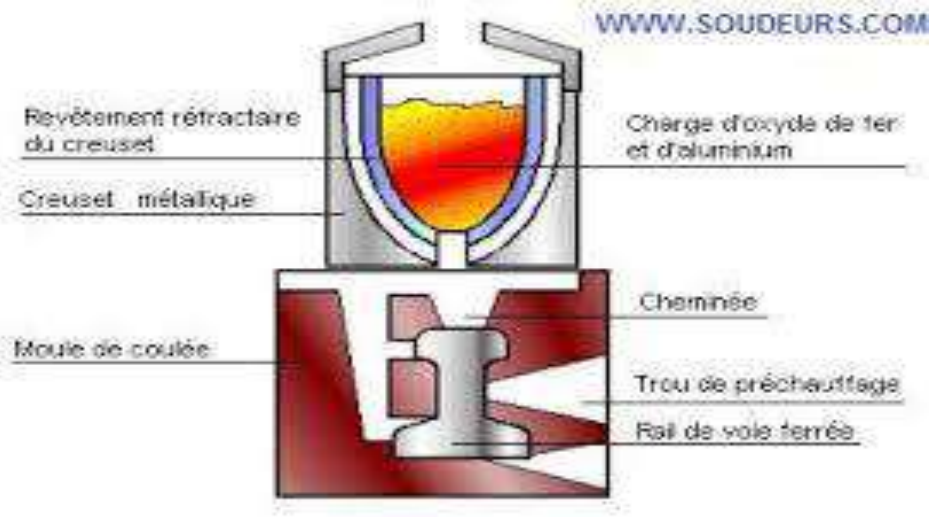


Figure I.7: Soudage aluminothermique [12].

1.4.4 Soudage par faisceaux d'électrons

Le soudage par faisceaux d'électrons est un procédé de soudage par fusion ou la chaleur est générée par un impact d'électrons émis 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 [1]. Ils utilisent l'énergie cinétique des électrons projetés dans une enceinte sous vide et focalisés sur la pièce à souder pour créer une zone fondue. Le procédé de soudage par faisceau d'électrons est incontournable pour les soudures de haute performance et de fortes épaisseurs. Il garantit la préservation des propriétés mécaniques entre les différentes parties soudées et trouve donc une excellente application dans les pièces de très haute sécurité, à très forte valeur ajoutée, comme celles de l'industrie aéronautique. La souplesse du procédé permet de souder des pièces d'épaisseur 0,1 mm à plus de 200 mm avec la même machine Bodycote dispose de la plus grande capacité en Europe pour le service en soudage par faisceau d'électrons [10].

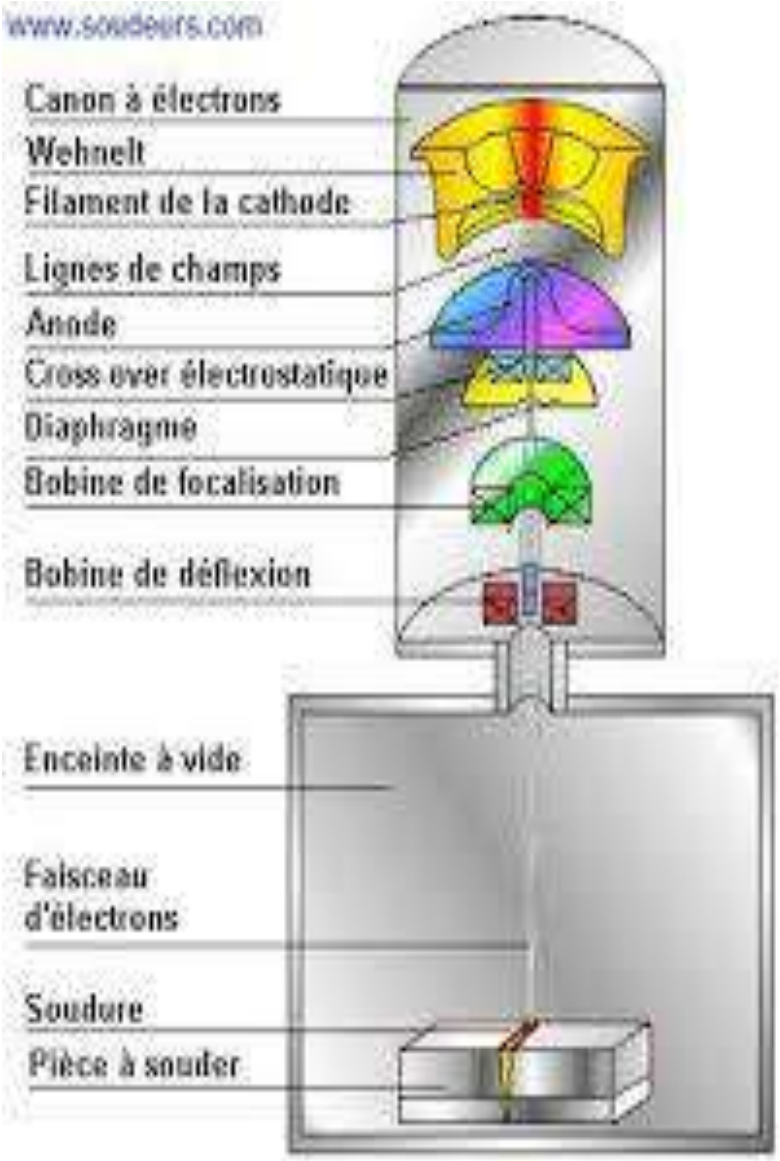


Figure I.8: Soudage par faisceaux d'électrons [12].

1.4.5. Soudage par faiseaux 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 concentré comme le soudage par faisceaux d'électrons (figure I.9) [11]. Avec un faisceau focalisé et une densité d'énergie élevée qui permet d'obtenir un capillaire de vapeur (figure

I10a). Avec un faisceau défocalisé pour lequel la densité d'énergie diminue inexorablement et l'apport calorifique se fait généralement par conduction thermique (figure I10b).

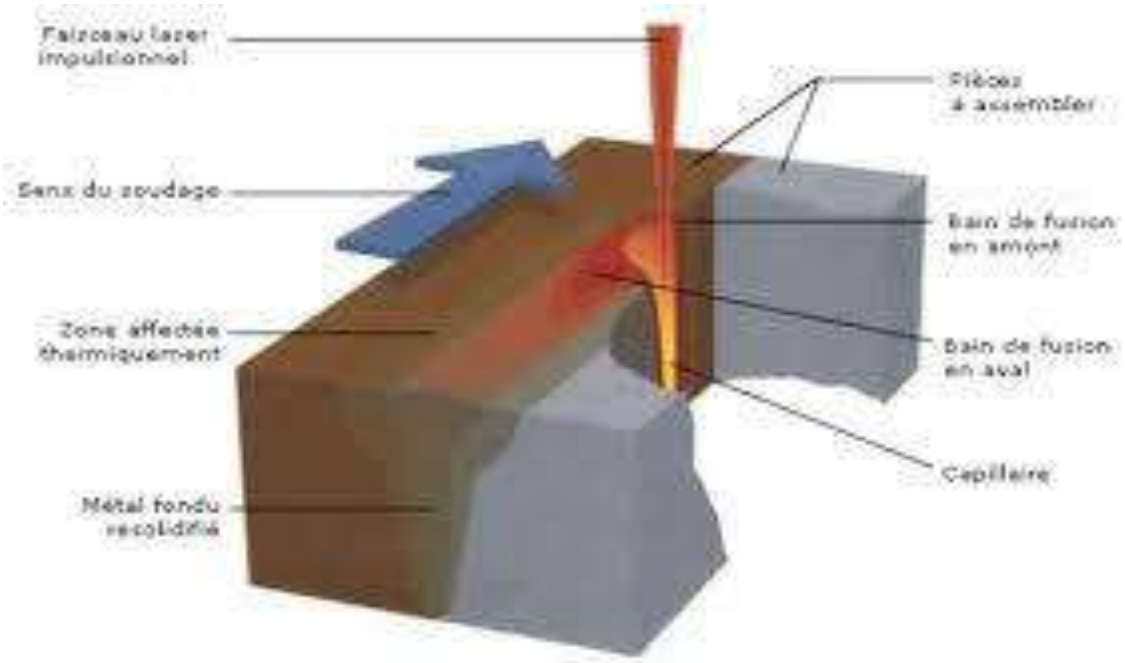


Figure I.9: Le soudage par faisceaux laser [12].

Le soudage par faisceau laser est une technique à haute densité d'énergie. On peut distingue deux régimes de fonctionnement du laser

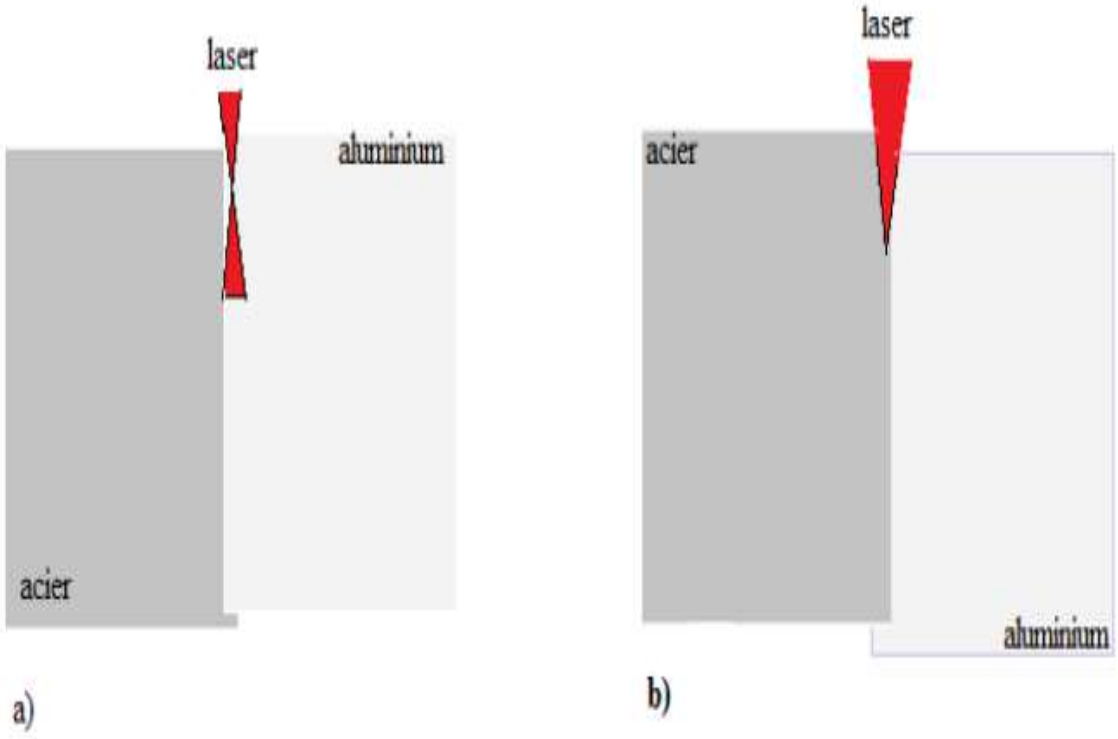


Figure I.10: Procédé de soudage par faisceaux laser ;
a) laser défocalisé. b) laser focalisé [1].

1.4.6 Soudage électro gaz

Le soudage électro gaz est un développement du soudage sous laitier électro-conducteur auquel il ressemble quant à sa conception et son utilisation. Au lieu de fondre dans un laitier, l'électrode fond dans un arc entouré d'un gaz de protection, comme en soudage MIG / MAG. Cette méthode est utilisée pour des tôles de 12 à 100 mm ; un balayage est utilisé pour des épaisseurs supérieures. Le joint est normalement préparé en « I », avec un espace. On utilise aussi des préparations en « V ». En réalisation de joints verticaux, sur de gros réservoirs par exemple, des économies importantes sont faisables, comparativement au soudage MIG / MAG [7].

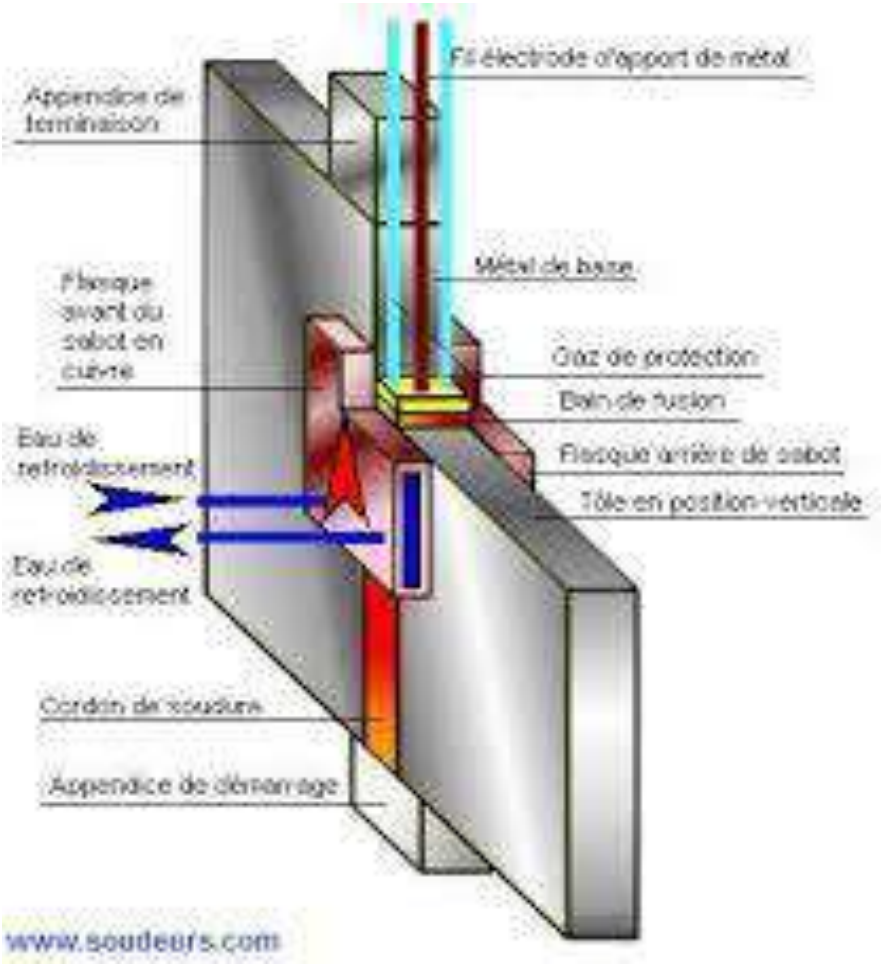


Figure I.11: Le soudage électro gaz[12].

1.4.7 Soudage par résistance

Le soudage par résistance a été inventé par E. Thomson en 1877. Il reprend le principe du soudage par forgeage [13]. Il existe d'autres techniques qui reposent sur le même principe : le soudage par bossage, le soudage en bout et le soudage à molette.

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

$$E = RI^2t \qquad (1)$$

Où:

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

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

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

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

En soudage par résistance, une force est appliquée pour maintenir les pièces à souder en contact (figure I.13). 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 de soudage.

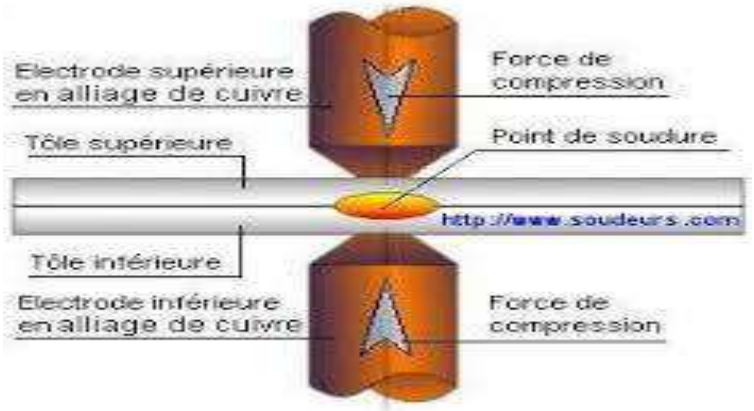


Figure I.12: Le soudage par résistance[12].

1.5. Le soudage à l'état solide

Les procédés de soudage à l'état solide regroupent tous les procédés où il y a création d'une liaison métallique sans que les matériaux (métaux de base et éventuellement le métal d'apport) n'atteignent ni ne dépassent leur température de fusion respective. Le nettoyage des surfaces s'effectue alors par un frottement et/ou une déformation intense localisée conduisant à chasser les impuretés et créer un contact intime entre les matériaux à assembler permettant à la diffusion et aux forces interatomiques de prendre le relais [4].

1.5.1. Soudage par diffusion

Le Soudage par diffusion consiste à se servir du phénomène de diffusion des atomes pour créer une liaison. Il est très utilisé pour effectuer des pièces creuses renforcées à partir de plusieurs tôles en titane. Dans ce cas, on tire au vide à l'inter-tôle et on presse avec une pression de gaz argon par l'extérieur. Cette operation est réalisée à 920 °C [7].

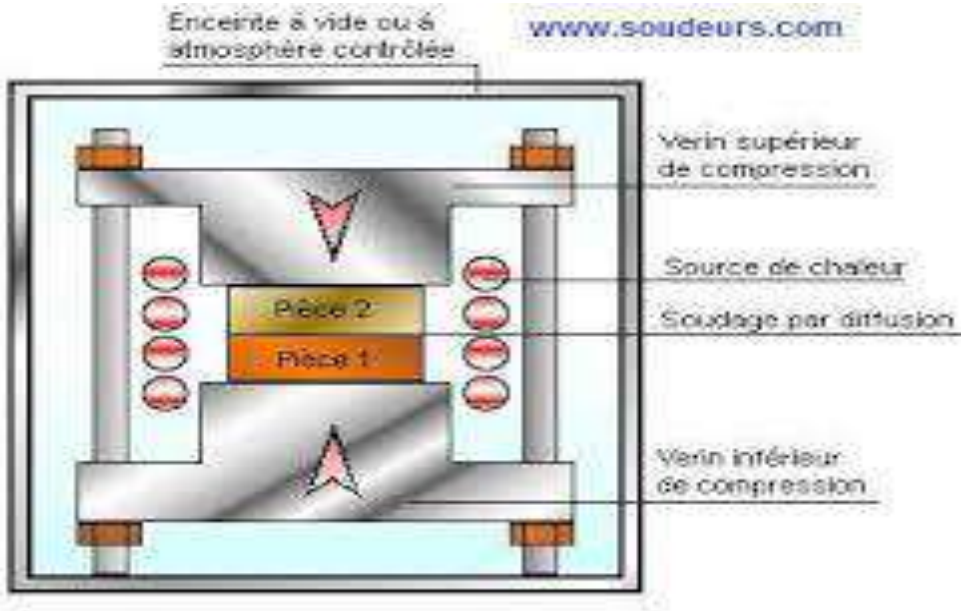


Figure I.13: Soudage par diffusion[12].

1.5.2 Soudage par friction

soudage par friction, présenté sur la figure I.15. Ce type de soudage est obtenu par l'échauffement de deux pièces pressées et en mouvement l'une par rapport à l'autre. Le mouvement relatif entraine un échauffement de l'interface jusqu'à plastification locale du matériau, puis soudage par diffusion atomique. La qualité de la liaison ainsi obtenue est supérieure à celle des matériaux utilisés. Il n'y a pas de métal d'apport. On peut souder des matériaux différents [10]. Un état de l'art plus approfondi sur le soudage par friction sera présenté dans le (chapitre -II -).

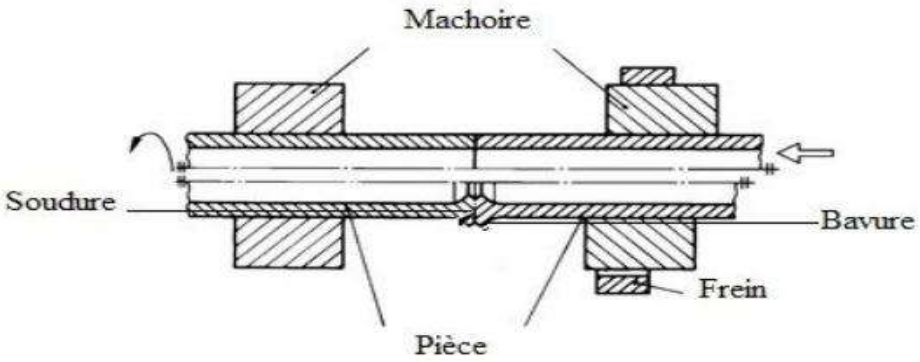


Figure I.14: Soudage par friction[10]

1.5.2 Soudage par friction-malaxage (FSW)

Le soudage par friction malaxage, présenté sur la (figure I.16), 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 plastiques subies par ceux –ci. L'outil est incliné d'un angle de 0.5 à 5 par rapport à vertical [1].

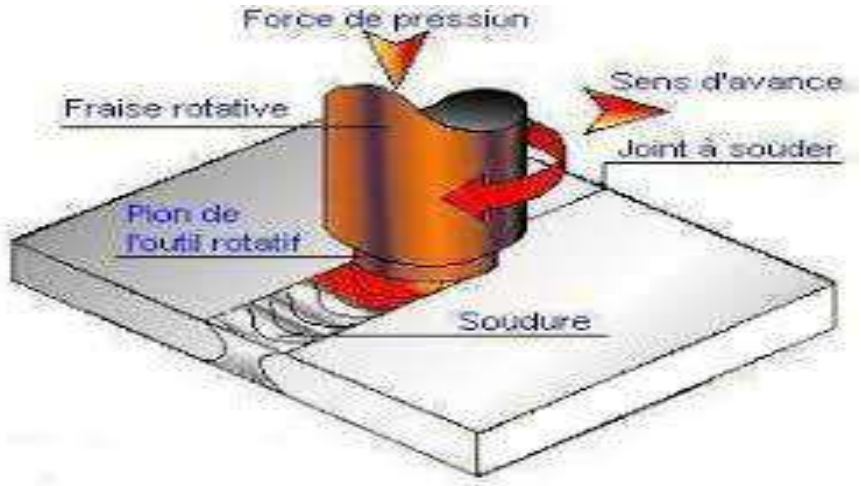


Figure I.15: Schéma montrant les principales composantes de l'outillage en soudage par friction malaxage (FSW) [1].

1.5.4. Soudage par explosion

Cette technique découverte fortuitement en 1957 lors d'essais de formage par explosion, est essentiellement employée pour assembler des métaux de nature différente, par exemple de l'aluminium sur de l'acier. Généralement, il s'agit de profilés pré-soudés qui permettent ces assemblages (exemple : superstructures en aluminium sur un bateau à coque en acier dans le but d'abaisser le centre de gravité) [7].

Les métaux à assembler sont superposés selon un certain angle et recouverts d'une couche uniforme d'explosif, la combustion rapide (détonation) de celui-ci provoque une fusion en coin qui se propage sur toute la surface mêlant les deux métaux.

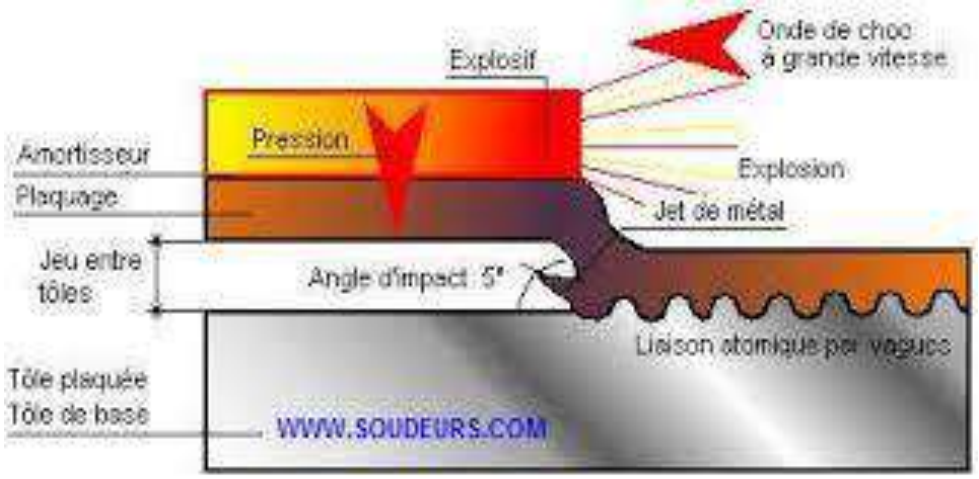


Figure I.16: Soudage par explosion[12].

Soudage par explosion est utilisé dans de nombreuses industries :

- ✓ Equipement de procédé chimique tel que les récipients sous pression, réacteur, échangeur 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.
- ✓ Constriction navale et marine bimétalliques transition joints sont les plus anciennes applications du soudage par explosion.

1.5.5. Soudage par ultrason

Les ultrasons sont des ondes acoustiques de hautes fréquences (20 à 50Hz) qui transmises à un matériau le font vibrer. Il s'agit d'un procédé de soudage à froid en phase solide ou les atomes des surfaces à assembler se combinent entre eux sous l'effet de forces d'attraction interatomique [1]. Le transducteur génère des vibrations ultrasoniques qui sont transmises par un transformateur de vitesse amplificateur à une "sonotone". Les pièces à souder, serrées entre une « enclume » et la « sonotrode », subissent des déformations localisées en qui rompent les pellicules superficielles des zones de contact. L'interpénétration des surfaces de contact s'ensuit. Sous l'effet du frottement à l'interface, la température s'élève, la zone de déformation s'étend et le soudage se produit. Ce procédé est surtout destiné aux

pièces de faibles épaisseurs (< 2 mm). Il est à rapprocher dans son mécanisme au soudage par friction [10].

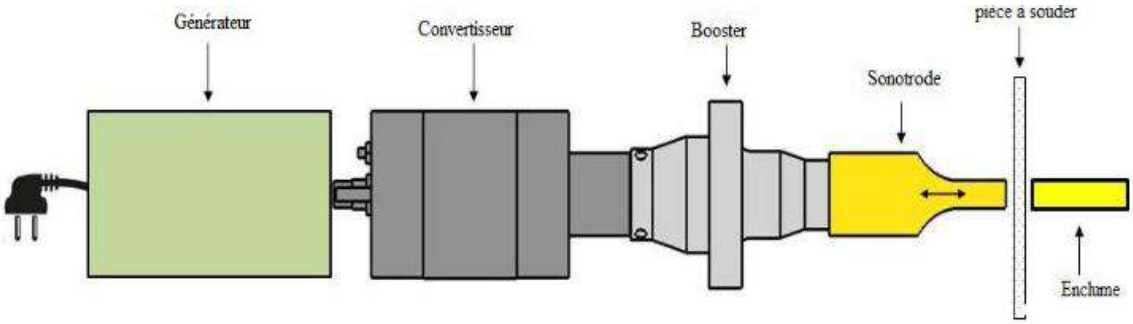


Figure I.17: Soudage par ultrasons[10]

1.5.6. 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 I.23), elles offrent d'importants avantages par rapport aux techniques conventionnelles de soudage [11].

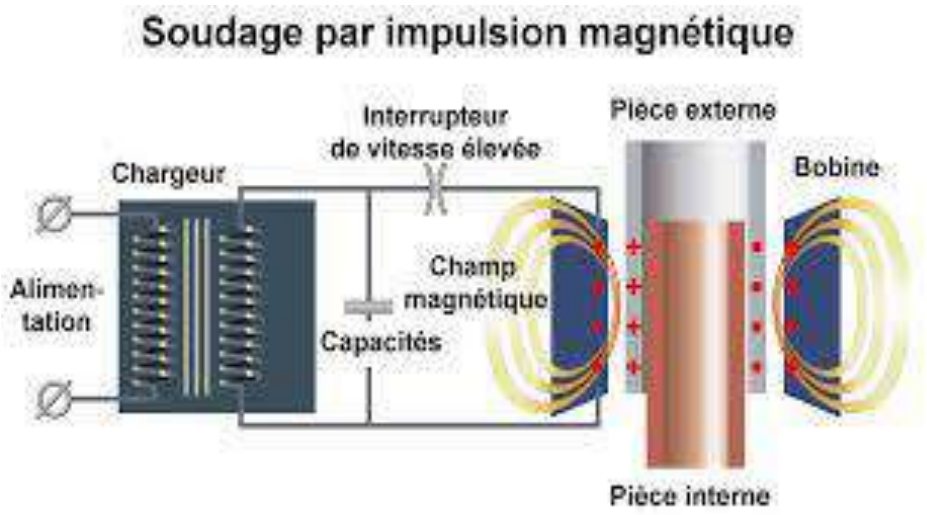


Figure I.18: Soudage par impulsion magnétique [13].

1.6. Conclusion

Le choix du type de soudure dépend, dans chaque cas particulier, du procédé, de la nature et de l'épaisseur du matériau. L'objectif est d'obtenir la meilleure résistance mécanique

et la meilleure qualité possibles de la soudure, en limitant les coûts. Pour limiter les coûts, il faut limiter :

- la quantité de métal d'apport (le coût est proportionnel au volume de la soudure),
- l'apport de chaleur (plus il est important et plus il risque d'y avoir des problèmes de résistance aux chocs et de déformation),
- le travail de préparation (on choisira de préférence des types d'assemblages dans lesquels les surfaces font partie de la pièce à souder, et donc généralement une soudure d'angle.

Chapitre II
Soudage par friction

II – Introduction:

Dans ce chapitre nous présenterons en première partie une revue bibliographique sur le principe de soudage par Friction Malaxage. Nous décrivons sur les différents processus intervenant durant le soudage, leurs phénomènes mécaniques, thermiques et les modifications microstructurales pour les alliages d'aluminium constituant la majeure partie des applications actuelles.

II.1- Historique de procédé de soudage par friction malaxage (Friction Stir Welding) :

En 1991 un nouveau procédé de soudage est mis au point par TWI (The Welding Institute). Il permet un assemblage à l'état solide, ce qui supprime les défauts liés à la solidification et conduit à des contraintes internes plus faibles que les procédés de soudage classiques. Ce procédé est bien adapté aux alliages d'aluminium difficilement soudables [14] (série 2000, 6000, 7000) et aux alliages frottement alliés. De ce fait, des allègements des structures non négligeables peuvent être sérieusement envisagés par les industriels du transport aérien, naval et terrestre en utilisant ces alliages « légers » assemblés par friction malaxage et difficilement soudable par les voies traditionnels

II.2 Principe de soudage malaxage (FSW):

1- Définition*:*

Par friction: Le principe de soudage « FSW » consiste à souder deux tôles à partir d'un outil en pénétrant le long du joint rotation (figure II-1). Le soudage par Friction Stir Welding est un procédé de soudage par friction et malaxage dans le principe est simple. Les deux tôles à assembler sont mises en contact et solidement bridées sérieusement pour éviter tout écartement du joint pendant l'opération de soudage. L'outil en rotation pénètre la matière située sous et autour de la tête de friction, puis se déplace le long du joint à souder. Une de ses caractéristiques principales consiste à ne pas faire fondre les matériaux que l'on veut assembler [15].

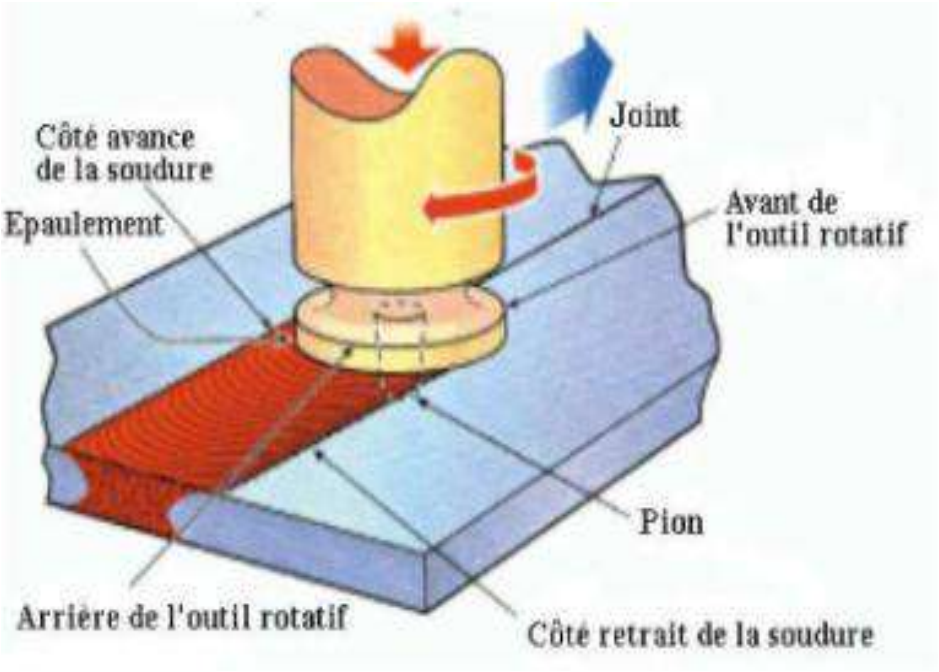


Figure II.1: Schéma de principe de soudage par friction malaxage (FSW) [16]

II. 3 Domaine d'application

Le procédé de soudage par friction malaxage est appelé à connaître un développement important dans les prochaines années. De nouvelles applications voient constamment le jour Il est principalement utilisé dans l'industrie de la construction et du transport, telle que l'industrie spatiale, aéronautique, ferroviaire, automobile, maritime... Une liste non exhaustive d'applications du procédé dans différentes industries est présentée ci-dessous :

- Industrie Aéronautique soudage de tôles en remplacement du rivetage pour les ailes, le fuselage, soudage de réservoirs cryogéniques, réservoirs de kérosène, corps de missiles ...
- Construction navale pont, plate-forme d'atterrissage d'hélicoptères, mât et bôme, coque de bateau...
- Transport ferroviaire planchers de voitures, corps de container..,
- Automobile raboutage de tôles, réservoir d'essence, carter de moteur électrique. [19]

II. 4.Avantages et inconvénients de la technique:

II.4.1Avantages *:*

Le soudage par friction malaxage est un procédé intéressant pour l'industrie. Maîtriser les paramètres de ce procédé, offrira plusieurs avantages à l'industrie du transport, à savoir

l'allègement de la structure ainsi que d'excellentes propriétés mécaniques. C'est une excellente alternative pour les matériaux difficilement soudables, notamment les séries 2000 et 7000 des alliages d'aluminium. Le processus de soudage est à l'état solide ce qui permet d'éviter les problèmes de soudage conventionnel avec fusion, comme les porosités et les fissures en plus d'économiser l'énergie de chauffage. Il ne nécessite pas de matière d'apport ce qui constitue une économie sur les consommables mais aussi cela réduit le poids de la pièce donc constitue une économie sur l'énergie de transport. La soudure obtenue présente de bonnes propriétés métallurgiques avec une microstructure fine et, si les paramètres du procédé sont bien choisis, on ne trouve pas de porosités, ce qui améliore les propriétés mécaniques. On obtient des soudures avec un bel aspect de surface sans matière qui déborde, ce qui épargne le traitement de surface. De plus c'est un procédé "propre" car il n'y a pas d'émission de gaz nocif, génère peu de déchets, et ne nécessite pas de solvants pour le dégraissage [15]

II.4.2 Inconvénients

Ses inconvénients sont :

- Ne convient pas aux matériaux à haute résistance.
- Nécessité d'avoir un appui (forces transversales par l'arrière).
- Présence de cratères en fin de soudure.
- Usure des outils suivant les matériaux à assembler.
- Mal adapté au soudage 3D.
- Présence de Trou à la fin de chaque soudure.
- Taquets de début et de fin de soudure [19]

II.5. Paramètres du soudage par friction-malaxage

Plusieurs paramètres influencent le mouvement de la matière et les caractéristiques microstructurales et mécaniques de la soudure. Les paramètres les plus déterminants sont les vitesses de rotation et d'avance de l'outil de soudage. Mais aussi l'outil lui même, sa géométrie, le matériau dont il est conçu et sa dureté. On note également d'autres paramètres comme la force appliqué sur l'outil, l'angle d'inclinaison de l'outil ou encore la profondeur de plonge de l'outil dans le matériau à souder.

II.5.1 La Géométrie de l'outil assure deux fonctions principales

Tout d'abord, il produit un frottement contre la pièce provoquant ainsi une concentration de la chaleur qui va ramollir le matériau, et il permet le mouvement de la matière du côté avançant de la soudure vers le côté reculant [15]

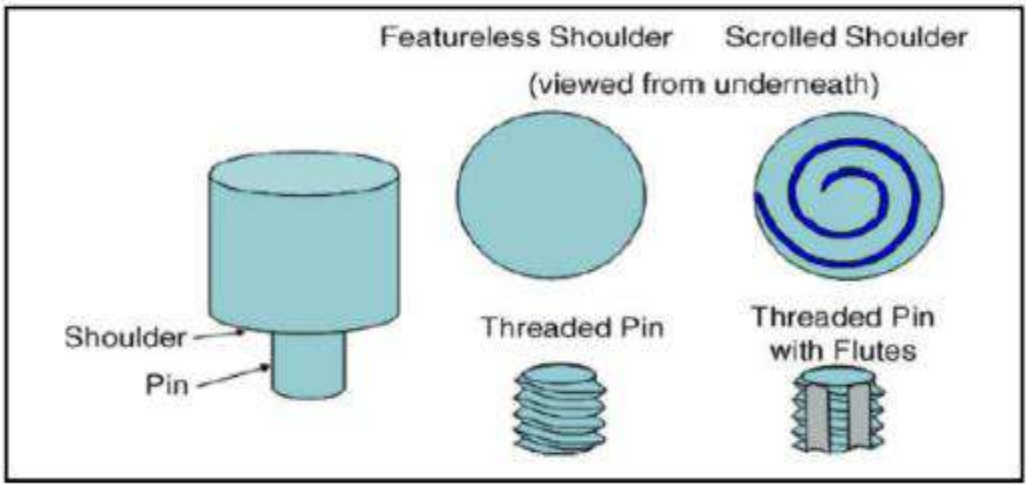


Figure II.2: Schéma simplifié de l'outil (tige et épaulement) dans le soudage par friction-malaxage[15]

La tige (également appelée pion) plonge dans le matériau jusqu'à ce que l'épaulement touche la pièce. La longueur de la tige détermine la profondeur de plongée. Le frottement de l'épaulement sur la pièce provoque le taux de chaleur le plus élevé. Le design de l'outil joue un rôle important dans l'uniformité de la microstructure et ainsi les propriétés mécaniques du joint. Les tiges filetées et les épaulements concaves sont les plus utilisés car ils permettent de mieux malaxer la matière et d'éviter le débordement et les bavures [15]

L'angle d'inclinaison de la tige est également un paramètre important qui permet à l'épaulement de bien répartir la matière malaxée du côté avançant au côté reculant de l'outil.

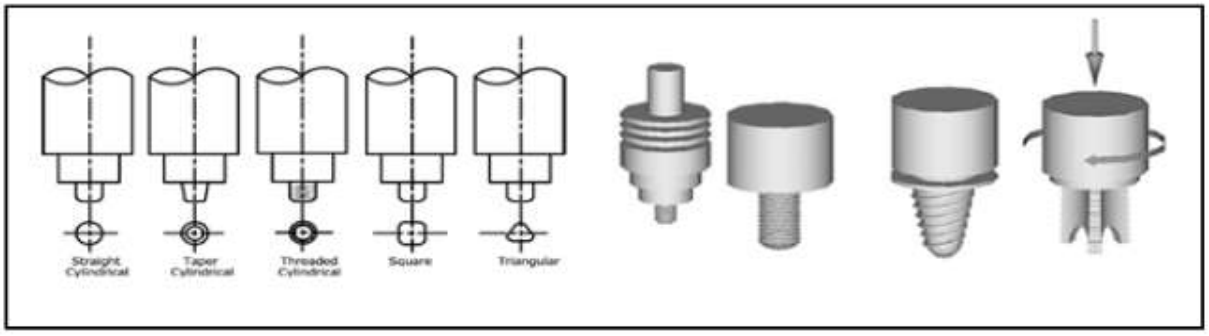


Figure II.3: Les différentes formes de la tige[15]

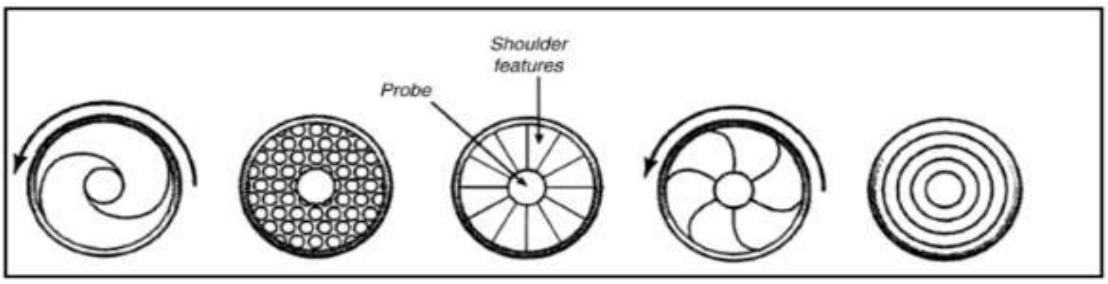


Figure II.4: Les différentes formes d'épaulement[15]

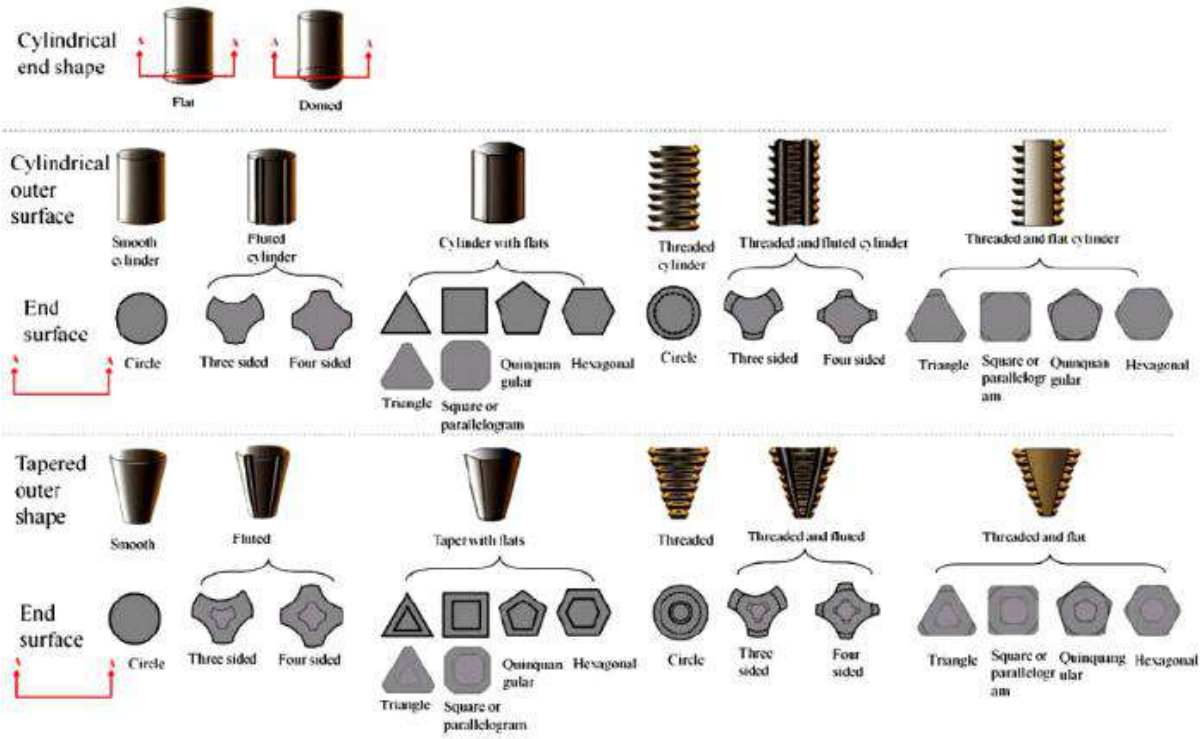


Figure II.5 : Synthèse des géométries et des formes utilisées pour les pions [17]

II.5.2 Les vitesses de rotation et d'avance

Les vitesses de rotation et d'avance sont deux paramètres très importants dans le soudage par friction-malaxage car ils déterminent la qualité de la soudure. La rotation de l'outil ωest exprimée en rotation par minute (rpm) et la vitesse d'avance de l'outil γ, en millimètre par min (mm/min).

II.6. **Matériaux utilisés pour la réalisation des outils FSW**

La qualité de soudage et l'usure de l'outil sont deux considérations importantes dans le choix du matériau de l'outil. Les propriétés la qualité de la soudure peuvent être affectées, en influençant la production de chaleur et de sa dissipation [17]

Les conditions extrêmes de soudage diminuent sa durée de vie de l'outil FSW et peuvent rapidement l'endommager. Les matériaux de l'outil doivent assurer sa résistance aux contraintes exercées par la matière.

Durant chaque phase du soudage, l'outil est sollicité à différents efforts qui varient selon les conditions opératoires. Les efforts engendrées lors de l'interaction « outil / matière», les conditions tribologiques, et thermiques peuvent entrainer la dégradation de la partie active de l'outil. Lors des phases de pénétration et le soudage, le pion subit un effort de forgeage important. L'effort de cisaillement appliqué par la matière au niveau de l'épaulement peut provoquer la rupture du pion.

Puisque l'outil doit assurer à la fois le malaxage et le frottement avec la matière à souder, ces fonctions dégradent rapidement l'outil. L'alternance du contact « outil / matière », glissement, adhérence mènent à l'usure des formes usinée au pion et ou l'épaulement [17]. Les matériaux des outils FSW (tableau II.1) ont été développés pour répondre aux besoins de soudage de différents types d'alliages. En raison des différentes nuances et épaisseurs des structures soudées en FSW, l'outil doit présenter pour chaque application une bonne dureté à haute température.

Tableau 1: Synthèse des matériaux d'outil utilisés en FSW[18].

Alliage	Epaisseur : e [mm]	Matériau Outil
Alliages d'aluminium	12 < e < 26	Acier à outil, WC-CO MP159
Alliage de Magnésium	e < 6	Acier à outil, WC
Cuivre et ses alliages	11< e < 50	Alliage de nickel, PCBN Acier à outil
Alliage de titane	e < 6	Alliage de tungstène
Acier Inoxydable	e < 6	PCBN[1], alliage de tungstène
Acier faiblement allié	e < 10	WC, PCBN[3]
Alliage de Nickel	e < 6	PCBN[3], alliage de tungstène

II.7. Propriétés des joints :

II. 7.1.Matériaux d'étude et composition chimique :

L'aluminium non allié présente des propriétés mécaniques très faibles : par exemple la limite d'élasticité de l'aluminium pur à 99,99% est insignifiant. Ceci limite donc énormément son utilisation et amène à considérer les différents alliages d'aluminium. Ces alliages sont obtenus par ajouts de certains éléments entrant en solution solide (par substitution ou par insertion) ou formant des précipités avec l'aluminium présent. Ces différents ajouts ont pour but d'améliorer les caractéristiques mécaniques de l'aluminium pur.

Une classification de ces alliages a été élaborée suivant la nature de l'élément majoritaire ajouté, on distingue les séries 1XXX, 2XXX, 3XXX, 4XXX, 5XXX, 6XXX et 7XXX (tableau II. 2). D'autres éléments, dont les pourcentages sont minoritaires, entrent aussi dans la composition de ces alliages.

Tableau 2: Classification générale des alliages d'aluminium

Classe	Élément(s) majoritaire(s)
1XXX	Aluminium pur à au moins 99% (en composition chimique)
2XXX	Cuivre
3XXX	Manganèse
4XXX	Siliciun
5XXX	Magnésium
6XXX	Silicium – magnésium
7XXX	Zinc - magnésium

II. 7.2. Microstructures de la zone soudée :

La soudure se compose de quatre zones principales présentant des microstructures et des propriétés différentes (Fig.I.3). En effet, le gradient thermique et le gradient de déformation impliquent un gradient de microstructures à travers la soudure. De nombreuses études ont été menées sur l'évolution microstructurale, principalement sur les alliages d'aluminium de la série 2000, 6000 et 7000 qui sont les meilleurs candidats à ce type de soudage.

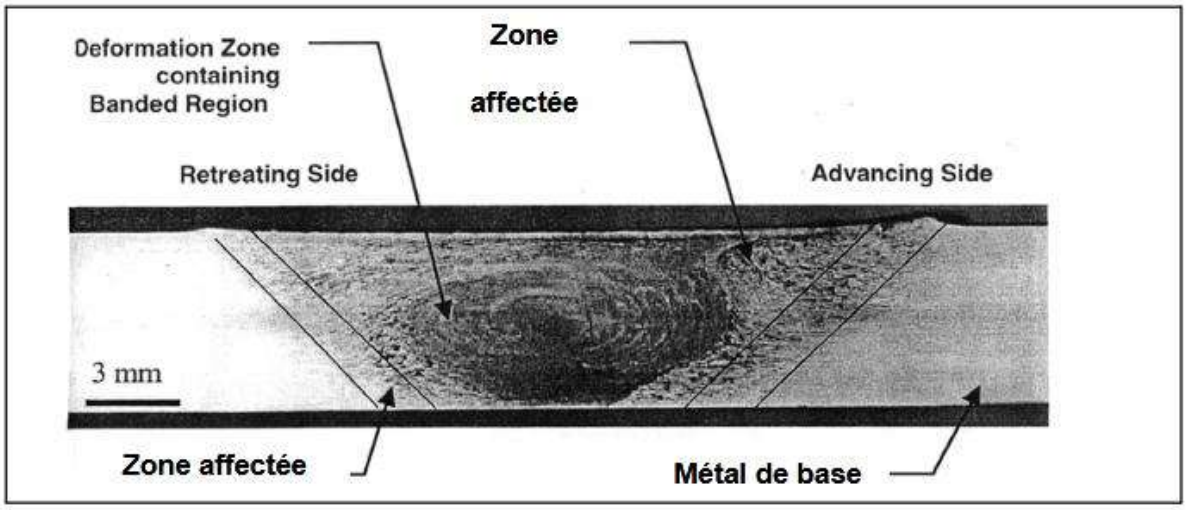


Figure II.6: Profil d'un joint soudé selon une coupe perpendiculaire à la direction de soudage[20].

Le métal de base, qui se trouve loin de la zone soudée, ne subit ni déformation ni échauffement important. Par conséquent il conserve ses propriétés et microstructures d'origine. Comme son nom l'indique, la zone affectée thermiquement (ZAT ou HAZ) subit un échauffement compris entre 150°C et 350°C sans déformation notable. La texture granulaire est identique à celle du métal de base, cependant la population de dislocations et l'état de précipitation peuvent changer. En se rapprochant du centre de la soudure la précipitation grossit et la dureté diminue. Cette zone est similaire à la zone affectée thermiquement que l'on observe lors du soudage par fusion. Sa taille dépend du profil temps – température et donc de la vitesse de soudage et de la perte de chaleur à travers les fixations [20].

La zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM ou TMAZ) se trouve autour du noyau soudé. Elle connaît une histoire thermique et plastique complexe, ce qui peut induire un début de recristallisation et des phénomènes de précipitation et/ou de réversion des précipités en place dans le métal de base. Les pics de températures dans cette zone sont compris entre 350°C et 450°C [20].

Le noyau soudé subit la plus grande déformation plastique et la température peut atteindre les 500°C. A cette température les précipités présents peuvent se dissoudre et les intermétalliques sont broyés et redistribués par la grande déformation plastique. Une autre zone, se situe au-dessus du noyau, dans la partie haute du joint. Elle se forme quand l'épaulement vient forger la matière

II. 7.3. Flux de chaleur :

Le procédé de soudage par friction malaxage fait intervenir une composante mécanique mais aussi thermique. La chaleur provient de deux sources, par friction entre l'épaulement et les tôles, et par déformation au niveau du pion. Au cours du soudage, chaque point de la zone affectée thermiquement subit un cycle thermique complexe dont les caractéristiques dépendent principalement de la distance au cordon de soudure. Les profils thermiques ont été calculés par modélisation et calibrés sur des mesures expérimentales par thermocouple (Figure II.7a et - Figure II.7b) [21].

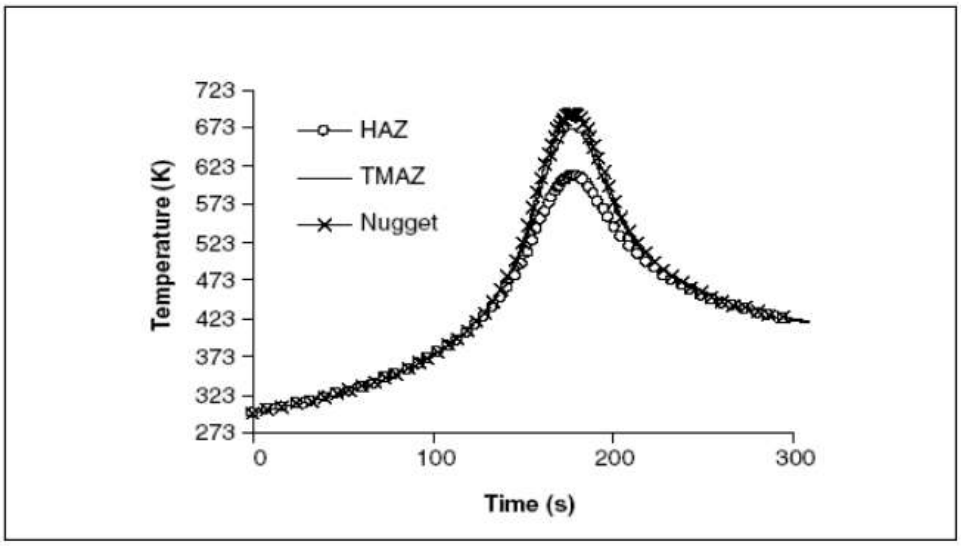


Figure II.7: Profile de la température enregistrée par thermocouples placés à 2mm de la surface localisé dans les trois zones montré sur la figure ci-contre[21].

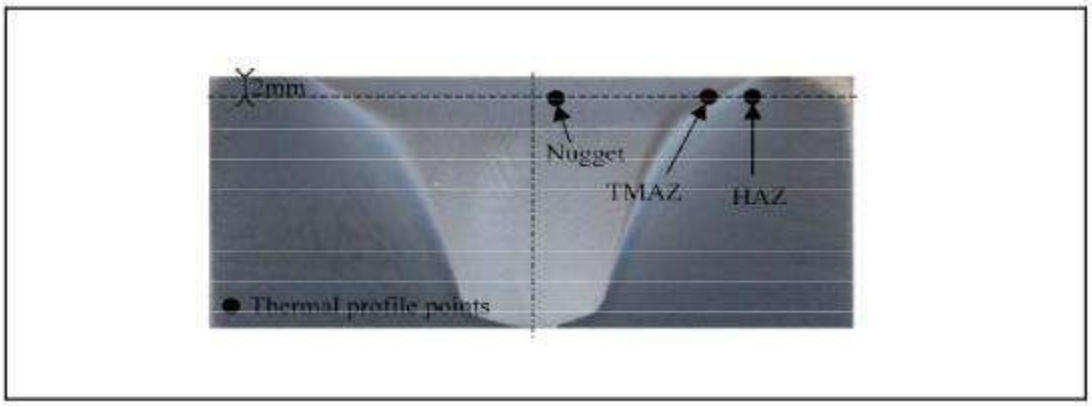


Figure II.8: microstructure de AA7449 par FSW .[21]

Dans la littérature, beaucoup d'auteurs [22-25] proposent une modélisation numérique par éléments finis pour simuler le transfert thermique pendant la phase stationnaire du

procédé. Souvent, en première approximation, aucun échange n'est pris en compte entre l'outil et le matériau. Par conséquent, la chaleur provenant de la déformation plastique autour du pion étant négligée, donc l'outil n'est pas modélisé. La source de chaleur en mouvement et ajouté une distribution de chaleur générée par le frottement entre l'épaulement et la matière. L'apport de chaleur surfacique issu du frottement est déterminé à partir de la contrainte tangentielle et de la vitesse de glissement outil-matière.

Les paramètres qui influencent le plus la production de chaleur sont la forme du pion et l'angle d'inclinaison. L'inclinaison de l'outil provoque de plus grandes pressions du côté avançant de la soudure de l'épaulement. Beaucoup d'auteurs considèrent comme négligeable la quantité de chaleur créée par le pion, par conséquent la chaleur est considérée comme provenant uniquement de la friction au niveau de l'épaulement. D'autres simplifications ont été faites sur la géométrie de l'outil, notamment en prenant un pion cylindrique et un épaulement plat puis en séparant le phénomène de translation et de rotation de l'outil. On peut voir sur les figures ci-dessous sont des exemples des modélisations de champ de température qui ont été faite sur des alliages d'aluminium. Les résultats présentés dans la littérature se rapprochent relativement bien, La simulation conduit à une température maximale d'environ 550°C. Il est tout de même important de noter que la valeur de la contrainte tangentielle peut fortement modifier le champ des températures (figure II. 8).

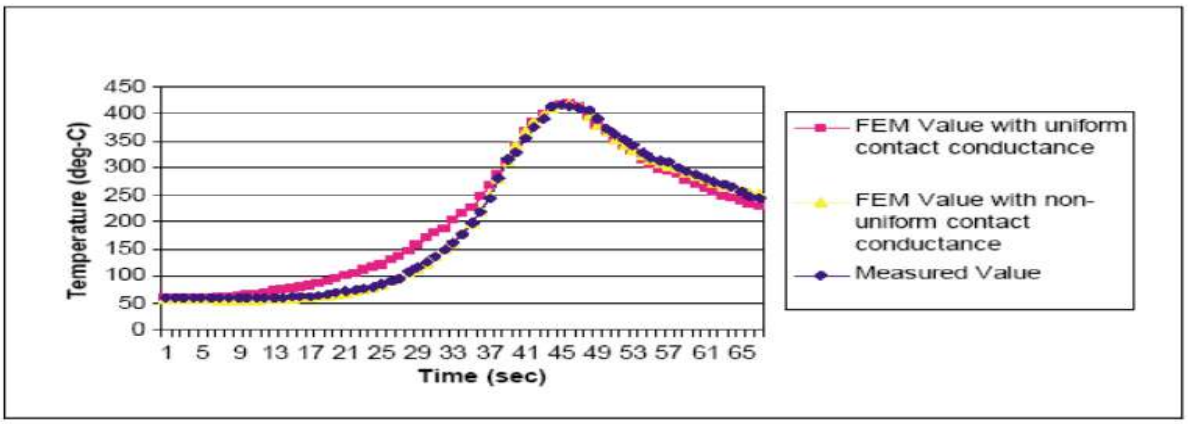


Figure II.9: Comparaison des données du modèle thermique aux données enregistrées par thermocouples placés à 6mm de la surface du joint soudé (V = 133 mm/min, ω = rpm344) [23].

II. 7.4 Propriétés mécanique :

Le profil de dureté à travers la soudure change de forme selon l'alliage et l'état initial, notamment entre les alliages à durcissement par écrouissage, série 5XXX, et ceux à durcissement structural, séries 2XXX, 6XXX et 7XXX (notation commercial).

La microstructure est principalement influencée par le flux de chaleur apporté par frottement entre l'épaulement et la tôle, plutôt que par l'ensemble chaleur et déformation fournies par le pion. Pour les alliages à durcissement structural, série 2XXX, 6XXX et 7XXX, la dureté est minimale dans la zone soudée (Figure I.6 et I.7). Elle chute de façon significative dans le noyau et dans la ZATM [26].

La ZATM est marquée par la croissance ou la coalescence de la phase durcissante et ce la, quel que soit l'alliage [2]. Dans la littérature on explique que c'est la compétition entre les processus de précipitation et de coalescence qui implique un minimum de dureté à la frontière ZATM – ZAT [27].

Pour le joint 2124 T3, la dureté chute dans la zone soudée et atteint un minimum à la limite ZAT – ZATM (figure II. 9). Puis, près du noyau, l'écrouissage induit par le soudage entraîne une remontée de la dureté. Le noyau présente une structure fine recristallisée ainsi qu'une diminution de la densité de dislocations. De plus, les hautes températures atteintes durant le soudage entraînent la dissolution des précipités présents, ce qui permet, de retour à température ambiante, la formation de précipités durcissant. La ZATM présente un minimum de dureté. Dans la ZAT on note un pic de dureté dû à la formation de précipités durcissants [28].

Les mesures de dureté ont permis de caractériser les cinétiques de durcissement structural à l'aide d'un micro uromètre, et afin de caractériser les propriétés plastiques de la microstructure, en termes notamment de limite d'élasticité et d'écrouissage par des essais de traction est primordial.

Les propriétés mécaniques de la zone soudée par FSW sont meilleures que celles des soudures avec fusion car elles gardent des propriétés relativement peu diminuées par rapport au métal de base [29, 30,31]. L'augmentation des vitesses de soudage permet d'augmenter la dureté du noyau et d'améliorer les propriétés mécaniques [30].

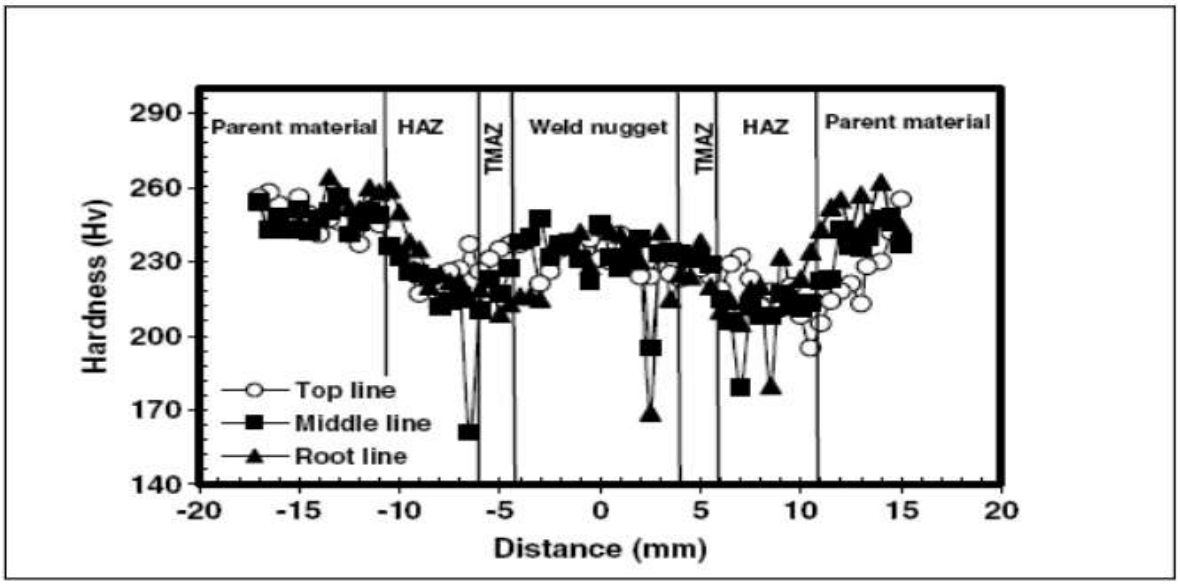


Figure II.10: profile de la dureté d'un joint AA2124 [28]

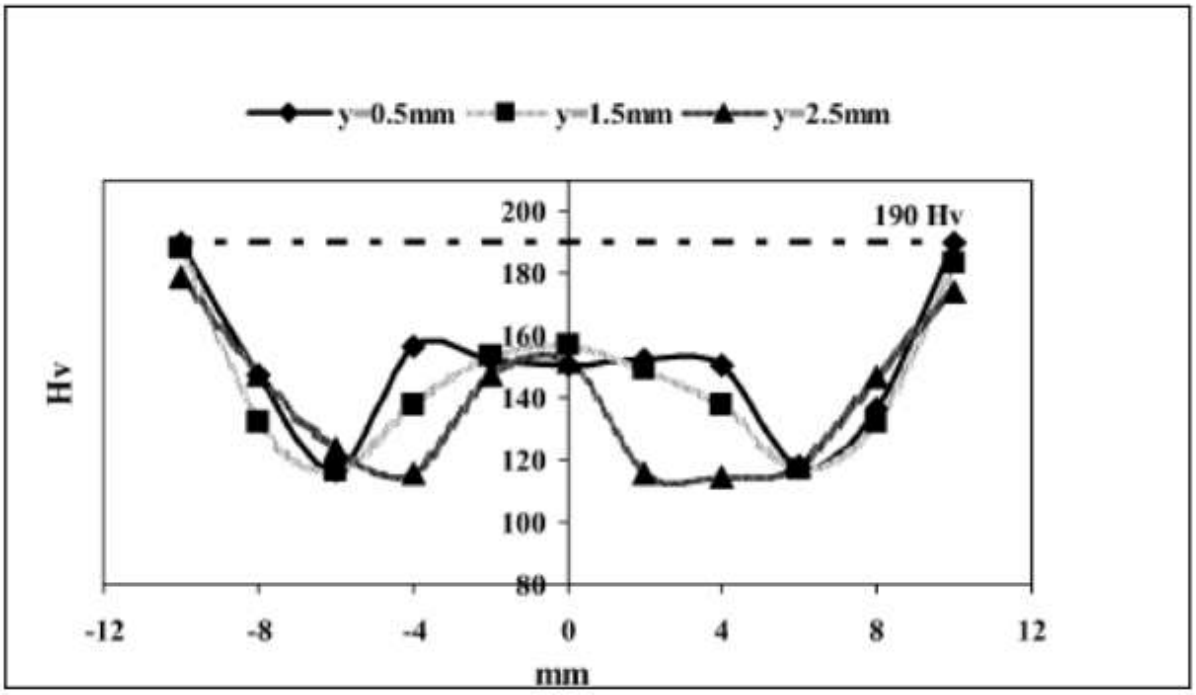


Figure II.11: profile de la dureté d'un joint AA7075 [32]

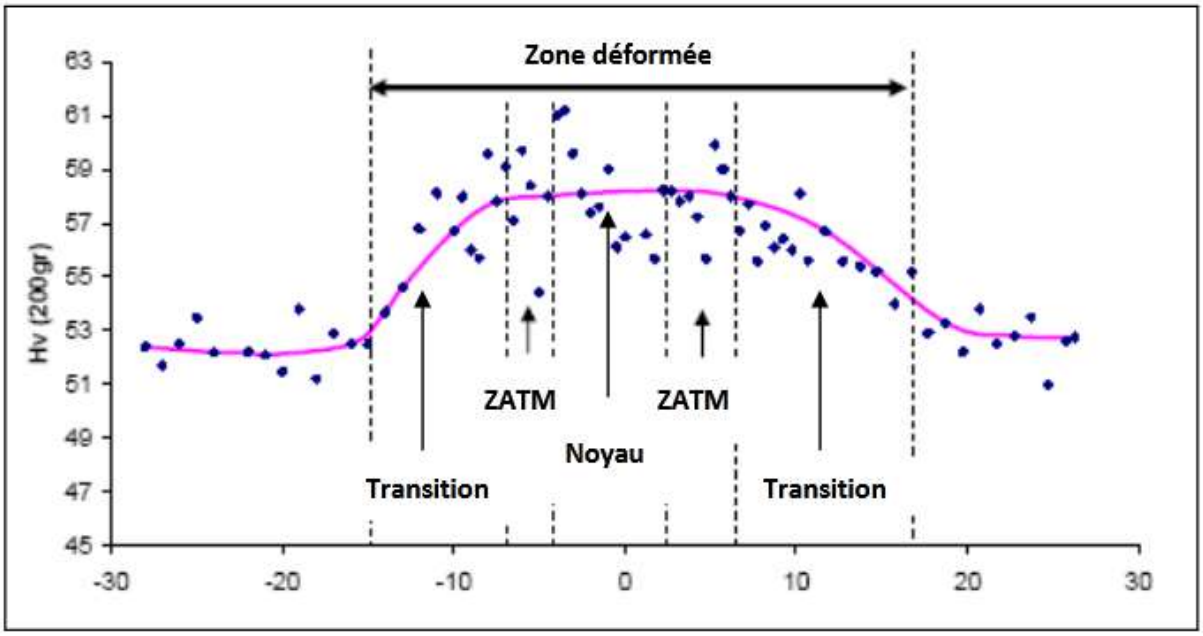


Figure II.12: profile de la dureté d'un joint O5251[30].

II. 7 Conclusion*:*

Le soudage par friction permet d'assembler des matériaux ne pouvant être assemblés avec des procédés conventionnels, par exemple : le titane au cuivre. Cette possibilité permet de faire des économies par une conception judicieuse de telles pièces: des pièces en un matériau très onéreux peuvent être remplacés par des pièces soudées où les matériaux onéreux ne sont utilisés que localement où c'est nécessaire.

Chapitre III

Conception et réalisation d’un outil FSW

III Introduction

Le troisième et dernier chapitre est organisé en deux parties. Dans la première, On a présenté les étapes de conception et de réalisation de l'outil FSW. La deuxième partie est consacrée à la mise en fonctionnement de l'outil ainsi des tests de traction ont été réalisés.

III 2 Conception et réalisation

III 2 1 Stratèges de travail

La démarche retenue s'articule autour de plusieurs étapes selon une méthodologie conditionnée par différents paramètres; notamment les étapes suivantes montrent la méthode de réalisation de cet outil.

Premièrement la conception et la réalisation des croquis et schémas des pièces en se basant sur des études antérieures même si ces dernières nous informe sur la forme générale mais non sur les démentions réelles, pour cela on se base d'abord sur le porte outil de notre machine (fraise) a portée de main car notre pièce doit s'emboiter parfaitement (minimiser le jeu au maximum), ensuite vient la concrétisation et réalisabilité de notre outil qui dépend des différentes machines disponibles dans l'atelier afinde réaliser les différents processus de fabrication de la pièce et bien sûr la géométrie simple des élémentsqui composent l'outil reste une solution réalisable par rapport à ces moyens, aussi la disponibilité de la matière première.

Finalement le réajustement de la pièce après plusieurs essais pour avoir un résultat satisfaisant.

III.2.2 Présentation de la machine utilisée

Actuellement, deux types d'installations permettent de réaliser désassemblages avec ce procédé : les robots industriels et les bancs de soudage. Ils sont adaptés aux grandes séries et aux pièces longues. La manière la plus simple et bien souvent la moins chère d'implanter le soudage par friction malaxage est la modification d'une machine-outil ou d'un centre d'usinage conventionnel.

procédé étant relativement semblable à une opération d'usinage classique, c'est-à-dire un outil rotatif se déplaçant sur la pièce, il est très facile d'adapter de telles machines pour cet usage. Dans notre cas, les soudures ont été faites en utilisant une fraiseuse universelle qui est une machine-outil utilisée pour usiner tout type de pièces mécaniques, à l'unité ou en série, par enlèvement de matière à partir de blocs ou parfois d'ébauches estampées ou moulées, à l'aide d'un outil coupant nommé fraise, dont la vitesse de rotation peut atteindre 1400 tr/min, et la vitesse d'avance 315 mm/min. Le principal avantage de la machine utilisée est qu'on ne lui a fait subir aucune modification (Figure III. 1).



Figure III.1: fraiseuse verticale semi-automatique.

III.2.3 Matériaux utilisés pour l'outil et leurs propriétés

Selon les données bibliographiques, les éléments essentiels de l'outil sont fabriqués en acier de différentes nuances, les métaux à assembler étant en général des alliages ayant des températures de fusion modérées (T_{fusion}<1000°C).Dans notre cas, l'outil servira au soudage des alliages d'aluminium dont les températures de fusionT_{fusion} avoisinent 640°C- 660°C.

Le corps de l'outil et le couvercle sont constitués d'acier E335A 60-2 selon la norme française (AFNOR), Acier de construction non allié à usage courant en mécanique générale. Non traité, il offre une bonne résistance mécanique

- Composition chimique en %:

Tableau 3: composition chimique en% de l'acier E335.

Eléments	% maxi
Phosphore (P)	0.055
Soufre (S)	0.055
Azote (N)	0.014
Fer (Fe)	Le reste

- Caractéristiques mécaniques moyennes

Tableau 4: Caractéristiques mécaniques moyennes.

R_m(N/mm²)	R_e(N/mm²)	A (%)
590 / 770	305 / 335	6 / 16

La partie essentielle (épaulement et le pion) est fabriquée en acier X210Cr12 qui présente de meilleures propriétés mécaniques.

L'acier est un acier de travail à froid avec une grande résistance à l'usure (teneur élevée en carbures de chrome) et une remarquable capacité de coupe (pour les feuilles de tôle jusqu'à 4 mm d'épaisseur). Haute acceptation de trempe, faible variation dimensionnelle des pièces, ténacité moyenne. Cette nuance est un grand classique parmi les aciers au chrome lédéburitiques à 12 %.

Ces applications sont:

- Outils de découpage, emboutissage (poinçons, matrices).
- Outils d'usinage (outils pour le travail du bois).
- Outils de formage (outils pour l'extrusion des alliages légers et des matières plastiques,
- outils pour compression des matières abrasives).
- Instruments de mesure (calibres,tampons, jauges).
- Composition chimique selon AFNOR, Z200C12 (valeur indicative en % du poids):

Tableau 5: composition chimique de l'acier X210Cr12.

C	Si	Mn	P	S	Cr
1.9-2.2	0.1-0.6	0.2-0.6	0-0.03	0-0.03	11.0-13.0

Propriétés physiques:

Tableau 6: Propriétés physiquesdel'acier X210Cr12

Résistance à la traction (MPA)	Dureté d'utilisation (HRC)	Module d'élasticité (MPA)	Densité	Conductibilité thermique (W/m/°C)
env. 850	max. 62	210 000	7,7	20

2.4 Conception des pièces de l'outil

La conception assistée par ordinateur (CAO) comprend l'ensemble des logiciels et des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir,et de tester virtuellement des produits.

La CAO permetde concevoir des systèmes dont la complexité dépasse la capacité de l'être humain, et d'apprécier globalement le comportement de l'objet créé avant même que celui-ci n'existe. En CAO, on ne dessine pas, on construit virtuellement un objetcapable de réagirdans son espace réel selon des lois régiespar le logiciel. Le résultat, appelé maquette numérique qui constitue un véritable prototype évolutif. Durant notre conception nous avons utilisé le logiciel deconception appelé (SolidWorks).

En premier lieu nous avons utilisé les commandes du logiciel SolidWorks telque: Esquisses, fonctions pour concevoir les déférentes pièces de l'outil. L'utilisation de la commande assemblages nous a permis d'effectuer le montage des pièces en formant l'outil complet.

2.4.1 Éléments composant notre outil FSW

Notre outil de soudage de forme cylindriqueest composé essentiellement deséléments Suivants: le porte-outil (1), arbre (2) , outil (3) et le couvercle (4).

Les dessins de définitions (planche) de chaquepiècesont représentés dansl'annexe, partie dessins de conception

.La Figure III.1 montre l'ensemble de ces différents composants et leurs dessin d'assemblage.

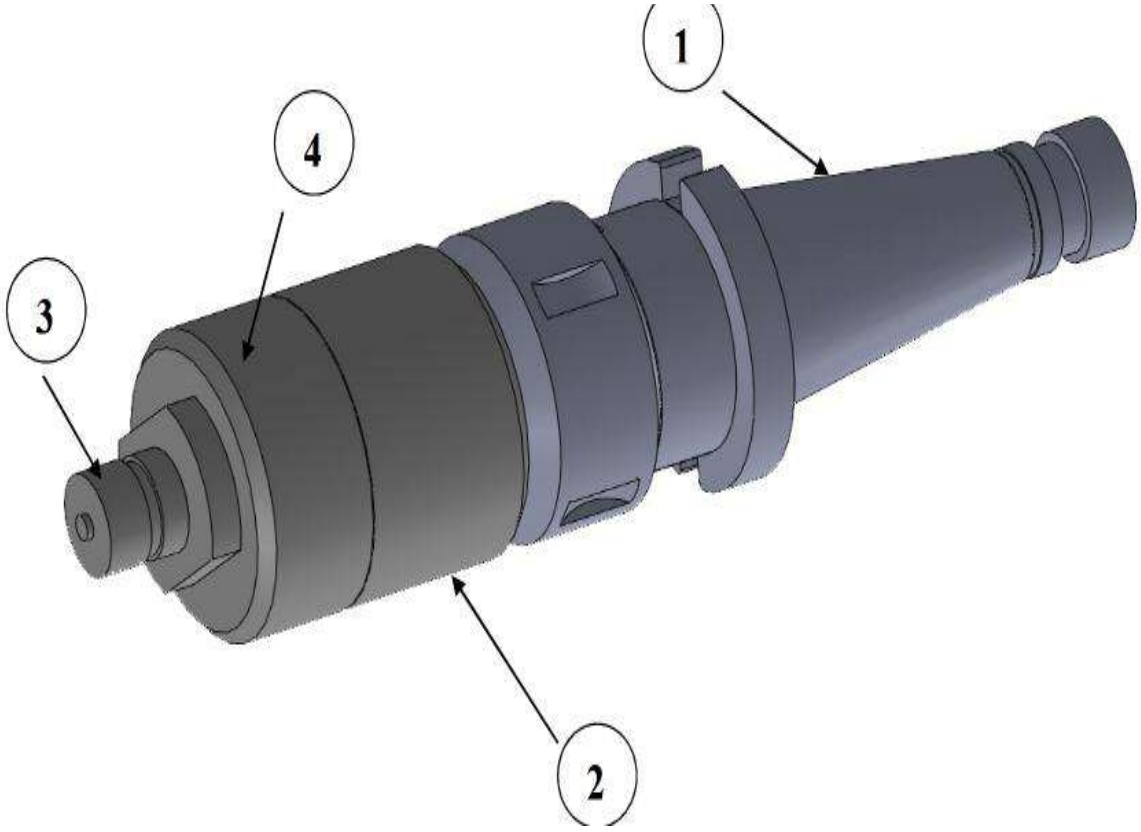


Figure III.2: schéma général d'assemblage.

2.4.2 Définition et rôle de chaque élément.

- **Le porte-outil:**

La (figureIII.3) qui suit illustre un porte-outil (1)d'une fraiseuse.la partie coniqueest joint au mandrin de la machine alors que la partie cylindriqueapour rôle deréunir l'ensemble des éléments constituant l'outil et de transmettre l'énergiecinétique de rotation au couple pion/épaulement, à l'aide d'une pince (2) et un couvercle (3) pour tenir bien le corps de l'outil. (PlancheN°1,2,3)

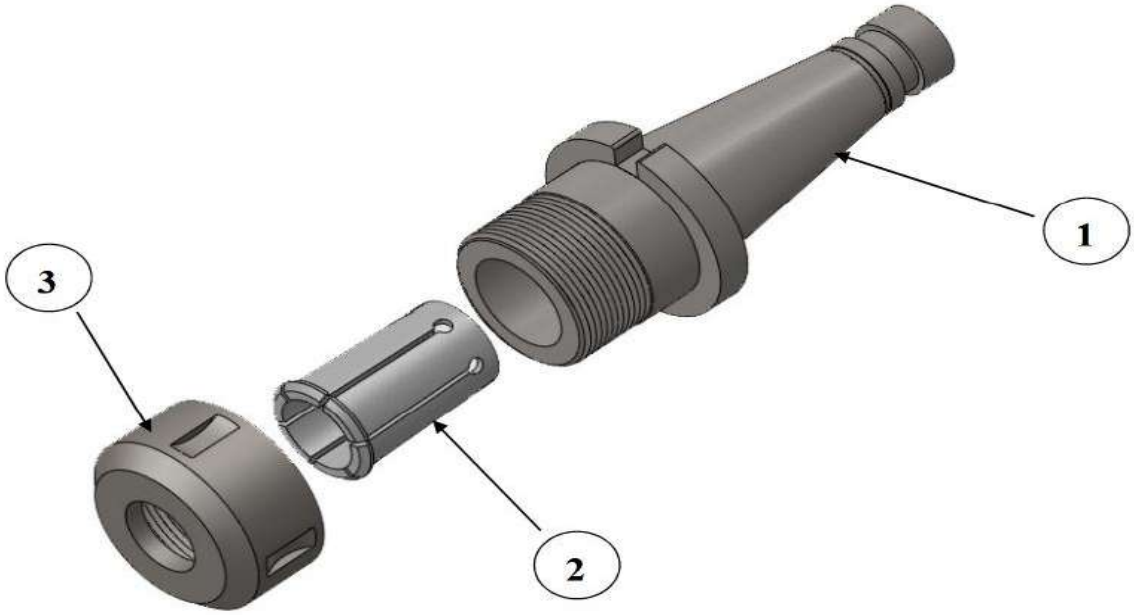


Figure III.3: Déssin éclaté du porte-outil

- **Le corps de l'outil:**

C'estl'élément où s'emboite l'outil dans son trou cylindrique, d'une profondeur de 40mm et un rayon de 10mm, et la partie cylindrique de diamètre 20mm entre dans le porte outil(PlancheN°4).



Figure III.4: corps de fixation d'outil.

- **Outil:**

C'est l'élément essentiel de dispositif, il a pour rôle de souder les pièces, le pion et l'épaulement sont solidaire, sa partie cylindrique entre dans le corps et cela va éliminer tout mouvement (figure III.5) (PlancheN°5).

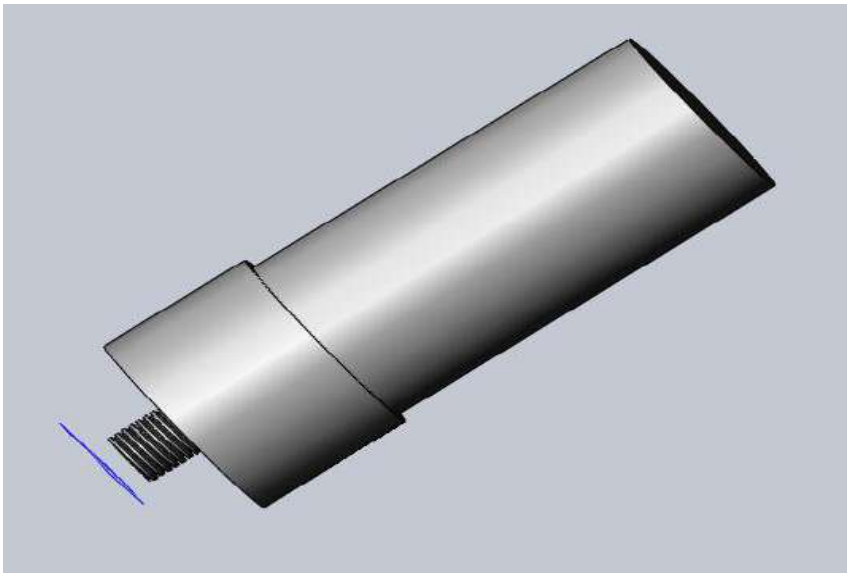


Figure III.5: outil.

- **Couvercle:**

Il sert à maintenir l'outil en position, en bloquant son mouvement vers le bas lors du soudage. Le méplat de diamètre 30mm sert au serrage de couvercle (Figure III.7)(PlancheN°6).

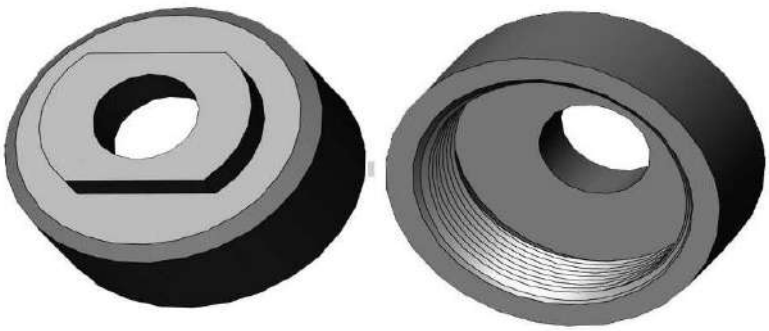


Figure III.6: couvercle.

La (figure III.8) montre une photographie de l'outil de soudage par friction et malaxage réalisé



Figure III.7: outil de soudage FSW.

2.5 Repérage et Feuilles d'analyse des surfaces des pièces

Le passage de l'idée à la réalisation effective d'une pièce mécanique (ou d'un produit quelconque de manière générale) fait intervenir trois fonctions principales :

- La conception et la construction.
- L'étude et la préparation de la fabrication.
- La fabrication.

Le temps et les moyens consacrés à la réalisation de chaque fonction dépendent du type de produit fabriqué et de son nombre d'exemplaires. Selon letype d'entreprise la réalisation des fonctions peut être assurée par une seule personne (fabrication artisanale) ou par des services très spécialisés (fabrications sérielles de produits de moyenne ou grande complexité technique).

Toute pièce mécanique évolue d'un état initial, correspondant à la pièce brute,vers un état final, représentatif du contrat de départ qu'est le dessin de définition. La valeur ajoutée représente l'ensemble des opérations (usinages, traitement, etc.) à effectuer.

- La gamme de fabrication est un document d'archive dans lequel sont consignées, demanière chronologique et globale, les différentes phases de la transformation d'un produit

Condition de travail :

Avant de souder, il faut :

- Placer le porte outil dans la machine de fraisage.
- Mesurer l'épaisseur des tôles à souder.
- Montage et fixation du pion dans l'épaulement. Il faut respecter la distance entre la tête du pion et celle de l'épaulement.
- Montage de l'épaulement avec le porte outil,
- Régler les paramètres de soudage :
  - Vitesse de rotation de l'outil **Vr**.
  - Vitesse d'avance de soudage **Va**.



Figure III.8: Réglagede la vitesse de rotation de l'outil (Vr)



Figure III.9:Réglage de la vitesse d'avance de soudage (VL'angle d'inclinaison α).

- Placer un support sur la table de la machine.
- Nettoyer les tôles à souder avec de l'alcool puis les polir en surface et sur les bords par un Papier abrasif afin pour limiter la présence des huiles et des oxydes.
- Vérifier la planéité des tôles.
- Positionner les deux tôles à souder sur le support surla table de la machine de façon à ce que les bords à souder soit bien parallèle à l'avance du pion lord de soudage et les

lignes de laminage des deux tôles doit être dans la même direction (parallèle ou perpendiculaire par raport au sens du soudage).

♦ Fixer les deux tôles à souder avec le support sur la table de la machine à l'aide d'un système debridage pour éviter tout mouvement relatif de celle-ci sous l'action des efforts générés.

♦ Vérifier que le bord à souder est parallèle avec l'avance du pion par le centrage du début jusqu'à la fin de l'operation.



Figure III.10: Système de bridage pour la fixation des tôles



Figure III.11: les étapes de soudage



Figure III.12: Plaque soudée

Les tôles utilisées, les paramètres de l'outil ainsi que les paramètres de soudage sont mentionnés sur le tableauci-dessous

Tableau 7: Les paramètres expérimentaux

Vitesse d'avanceVa [mm/min]	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5
La profondeur [mm]	0	0.3	0.6	1	1.6	2.5	3.5	4.2
Vitesse de rotation N [tr/min]	280	355	450	560	710	900	1120	1400

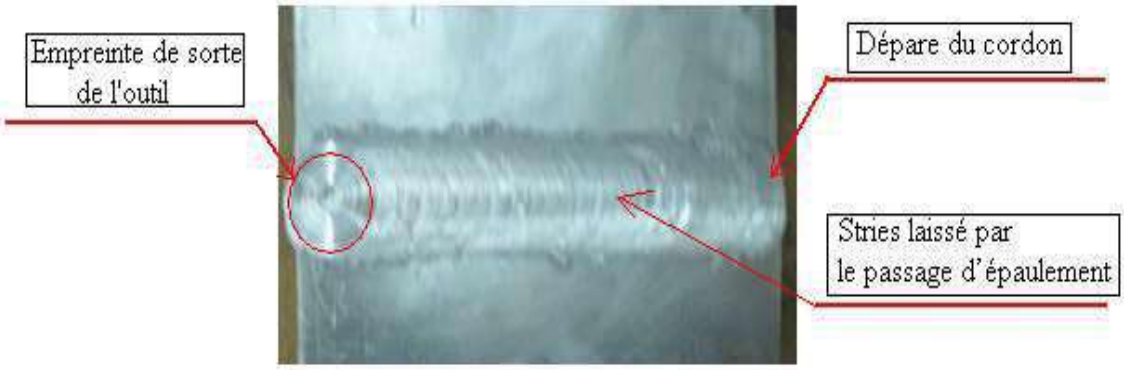


Figure III.13: Les empreintes existantes sur FSW

Il existe deux types de soudures:

- Les soudures froides dont le rapport de vitesse de rotation sur vitesse d'avance est inférieur à un tr/mm.
- Les soudures chaudes pour les quelles ce rapport est supérieur à 1tr/mm .Dans notre cas et vu que le rapport est très grand,on utilise les soudures chaudes.











Figure III.14: Plaques soudées

Coclusion general

Conclusion general

L'objectif de ce travail avait pour but : l'étude de soudage à l'état solide « le soudage par friction » pour souder des toles d'aluminium, nous avons conclu plusieurs avantages de soudage par friction par exemple il exclut le métal d'apport et pas de gaz de protection, fumées ou rayonnements.

A partir de ce travail, on a trouvé que :

a. Plusieurs types de défauts sont observés dans un cordon de soudure (Fissure, manque de fusion, manque de pénétration, défauts de forme,…).
b. Les techniques de détecter des défauts s'effectuent par un contrôle visuel, le ressuage et la radiographie (γ).
c. Les paramètres de soudage ont une influence sur la résistance du joint, ainsi que sur d'éventuels défauts présents dans le joint.
d. La vitesse de rotation optimale pour le soudage par friction ,qu'il s'agisse d'acier ou l'aluminium peut étre superieur à 1400tr/min pour assurer une bonne soudure de l'aluminium
e. L'augmentation de temps de friction (supérieure à 30s) provoque une grande consommation de matière de l'éprouvette et des défauts par exemple un dénivellement.
f. La vitesse de rotation mois rapide 1400 tr/min cause des défauts tel que le manque de fusion.

A l'issue de ce travail, on peut dégager de nombreuses perspectives de recherche :

- Continuité avec l'analyse de joint soudé par Mesure des contraintes résiduelles au niveau du joint soudé.
- Des essais de corrosion pour étudier sa résistance à la corrosion
- Etude de l'effet des traitements thermiques sur le comportement du joint soudé par friction.

Références bibliographies

Références bibliographies

1 . Helal, Y., thèse « L'effet de soudage par friction malaxage sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un joint soudé composé d'un alliage d'aluminium industriel et un acier » .Université MOHAMMED KHAIDER Biskra (2017).

2 . Gerard, M., thèse « Soudage-diffusion hétérogène assiste par friction malaxage- cas du couple Al/Fe- ». Ecole Centrale de Nantes (18 novembre 2010.

3 . Merry, G., Soudage et soudabilité métallurgique des métaux. Technique de l'ingénieur, 10 janvier 1994 (M715).

4 . Koen Faes ir, (IBS) : soudage par friction (traduction : M.C. Ritzen IBS.BIL), http://www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-friction. (12 avril 2018).

5 . Blandeau, R., procédés et applications industrielles du soudage. Hermes science publication, Paris, 2001.

6 . Perry, N., Etude et développement des flux solides en vue d'application en soudageTIG appliqué au titane et ses alliages ainsi qu'aux aciers inoxydables, 200 0, Ecole Centrale de Nantes (ESN).

7 .Anglade, B. ; Hor isio Molinaro, H. ; Lavernhe, S., Technique de réalisation de châssis micro -soudés : le soudage (03 février 2017). Ecole Normal Supérieure Paris –Saclay.

8 . Obtention des pièces mécano soudés (Soudage autogène).

(1 2 avril 2018).http://www.gelin.denise.free.fr/docu/245-soudage-cours.pdf.

9. Aissani, M., thèse « Etude du comportement thermique et mécanique des matériaux aéronautiques par des méthodes numériques : Application au soudage de structures métalliques ». Université SAAD DAHLAB DE BLIDA INSTITUT AERONAUTIQUE (15 septembre 2013).

10. http://www.fr.wikipedia.org/wiki/soudage.

11 . « Soudage-Coupage » (SYMOP). http://www.irs.fr

12. WWW.SOUDERS.COM

13.WWW.Bil Ibs.COM

14 . Paul A. Colegrove, Hugh R. Shercliff "3-Dimensional CFD modelling of flow round a threaded friction stir welding tool profile", Journal of Materials Processing Technology 169 (2005) 320–327.

15 . R.Mishraa, Z.Mab "Friction stir welding and processing. Center for Friction Stir Processing", Materials Science and Engineering R 50 (2005)

16 .Hasan Okuyucu, Adem Kurt, Erol Arcaklioglu "Artificial neural network application to the friction stir welding of aluminum plates", Materials and Design (2005) 11-17.

17.stir hang, Y., et al., Review of tools for friction welding and processing.Canadian Metallurgical Quarterly, 2012. 51(3): p. 250-261.

18 . Lienert, T., R. Mishra, and M. Mahoney, Friction Stir Welding and Processing.ASM International, Materials Park, OH, 2007: p. 123-154.

19 . Mohamed, O. Mohamed. Réalisation et amélioration d'un outil de soudage FSW essais avec differentes formes de pions. Thèse ingéniorat 2010, cote : 3-531-033-2.

20 . Pedro Vilac, Lu´ısa Quintino, Jorge F. dos Santos "iSTIR—Analytical thermal model for friction stir welding", Journal of Materials Processing Technology 169 (2005) 452–465.

21 . N. Kamp, Sullivan, R. Tomasi, J.D. Robson "Modelling of heterogeneous precipitate distribution evolution during friction stir welding process", Acta Materialia 54 (2006) 2003–2014.

22 . H.W. Zhang, Z. Zhang, J.T. Chen "The finite element simulation of the friction stir welding process, Department of Engineering Mechanics", Materials Science and Engineering A 403 (2005) 340–348.

23 . Vijay Soundararajan, Srdja Zekovic, Radovan Kovacevic "Thermo-mechanical model with adaptive boundary conditions for friction stir welding of Al 6061", International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 1577–1587

24 . G. Buffa, J. Hua, R. Shivpuri, L. Fratini "A continuum based fem model for friction stir welding model development", Materials Science and Engineering A 419 (2006) 389–396.

25 . Eric Feulvarch, Frédéric Boitout, Jean-Michel Bergheaun "Modélisation thermomécanique et microstructurale du soudage par friction-malaxage", Rapport ESI Group, LTDS UMR 5513 CNRS/ECL/ENISE, 2001.

26 . R. Ueji, H. Fujii, L. Cuib, A. Nishioka, K. Kunishige, K. Nogi "Friction stir welding of ultrafine grained plain low-carbon steel formed by the martensite process", Materials Science and Engineering A 423 (2006) 324–330.

27 .R.Mishraa, Z.Mab "Friction stir welding and processing. Center for Friction Stir Processing", Materials Science and Engineering R 50 (2005) 1–78.

28 . Huseyin Uzun "Friction stir welding of SiC particulate reinforced AA2124 aluminium alloy matrix composite", Materials and Design (2006) 11-17.

29. W. Woo, H. Choo a,b,D.W. Brown c, P.K. Liaw a, Z. Feng b "Texture variation and its influence on the tensile behavior of a friction stir processed magnesium alloy", Scripta Materialia 54 (2006) 1859–1864.

30 . C. Genevois, A. Deschamps, P. Vacher "Comparative study on local and global mechanical properties of 2024 T351, 2024 T6 and 5251 O friction stir welds", Materials Science and Engineering A 415 (2006) 162–170.

31 . M. Amirizad, A.H. Kokabi, M. Abbasi Gharacheh, R. Sarrafi, B. Shalchi, M. Azizieh; "Evaluation of microstructure and mechanical properties in friction stir welded A356+15%SiCp cast composite ", Materials Letters 60 (2006), pp. 565–568.

32 .A. Barcellona, G. Buffa, L. Fratini, D. Palmeri "On microstructural phenomena occurring in friction stir welding of aluminium alloys", Journal of Materials Processing Technology (2006) 51-55.