

**Université Kasdi Merbah Ouargla**



*Faculté des hydrocarbures énergies renouvelables et science de la terre et de l'univers*

**Département de forage et Mécanique des chantiers pétroliers**

**Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention d'un diplôme  
de Master professionnel**

**Spécialité : Mécanique des chantiers pétroliers**

Présentée Par : **BAARI Aziz**

-THEME-

---

**Etude de soudage à l'état solide « soudage par  
friction », étude de cas : Soudage d'une tige de  
forage**

---

Soutenu publiquement

20/06/2018

**Devant le jury composé de :**

**M. BOUCHMAA Kamel**

**Président**

**UKM OUARGLA**

**M. HELAL Yazid**

**Encadreur**

**UKM OUARGLA**

**M. ABDESSALAM Yacine**

**Examineur**

**UKM OUARGLA**

**Promotion : 2017/2018**

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma très chère Mère et mon très cher Père, pour leurs soutiens, leurs  
patiences et leurs confiances.*

*Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce  
qu'ils font pour moi « que Dieu vous garde et vous bénisse ».*

*Mon très cher frère Midou.*

*Et Toute la famille Baâri.*

*Tous mes amis (es) du quartier et ceux de la fac, sans oublier tous les  
résidents de Biskra. « Tolga »*

*Toute ma promotion.*

*Aziz*

# Remerciements

*Je tiens à remercier avant tout Dieu tout puissant de m'avoir  
donné le courage de terminer nos études.*

*Nos professeurs et les travailleurs de l'université de*

**OUARGLA**

*Nous tenons à remercier en premier lieu et très chaleureusement  
Mr. Helal Yazid d'avoir accepté de diriger notre travail et pour  
l'aide*

*Nous remercions les responsables d'hall technologie de  
Université KHAIDER MOHAMMED Biskra aussi la société  
de Cosider Canalisation Pole C01 – EHS & CND –  
OUMACHE .BISKRA;*

*Nous remercions toutes personnes qui nous ont aidés de près Ou  
de loin.*

*Et spécialement mes parents*

## Table des matières

Dédicaces .....	i
Remerciement .....	ii
Table des matières .....	iii
Liste des figures .....	vi
Liste des tableaux .....	ix
Introduction générale .....	1
1. Chapitre -I- Procédés de soudage .....	3
1.1. Introduction .....	4
1.2. Définition de soudage .....	4
1.3. Les procédés de soudage .....	5
1.4. Le soudage par fusion .....	7
1.4.1. Soudage à l'arc électrique .....	8
1.4.1.1. Soudage à arc à l'électrode enrobée .....	8
1.4.1.2. Soudage MIG (Metal Inert Gas) .....	9
1.4.1.3. Soudage MAG (Metal Activ Gas) .....	9
1.4.1.4. Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas) .....	9
1.4.1.5. Soudage plasma .....	11
1.4.2. Soudage à la flamme .....	11
1.4.3. Soudage aluminothermique .....	12
1.4.4. Soudage par faisceaux d'électrons .....	12
1.4.5. Soudage par faisceaux lase .....	13
1.4.6. Soudage électrogaz .....	15
1.4.7. Soudage par résistance .....	15
1.5. Le soudage à l'état solide.....	17
1.5.1. Soudage par diffusion .....	17
1.5.2. Soudage par frictio .....	18
1.5.3. Soudage par friction-malaxage (FSW) .....	18
1.5.4. Soudage par explosion .....	19
1.5.5. Soudage par ultrason .....	20
1.5.6. Soudage par impulsion magnétique .....	21
1.6. Conclusion partielle .....	22

2. Chapitre –II- Soudage par friction .....	23
2.1. Introduction .....	24
2.2. Description du procédé .....	25
2.2.1. Définition .....	25
2.2.2. Principe de soudage par friction.....	26
2.2.3. Les différentes phases opératoires de soudage par friction .....	27
2.2.4. Cycle de soudage .....	28
2.2.5. Les caractéristiques mécaniques .....	28
2.3. Les avantages et les limites .....	29
2.4. Principaux domaines d'application .....	30
2.4.1. Domaine de l'automobile .....	31
2.4.2. Domaine l'industrie aéronautique et du spatial .....	31
2.2.3. Domaine l'industrie pétrolière .....	32
2.4.4. Domaine de l'agriculture .....	34
2.5. Conclusion partielle .....	35
3. Chapitre –III- Matériaux et procédures expérimentales .....	36
3.1. L'alliage d'aluminium 2017A .....	37
3.1.1. Généralités .....	37
3.1.2. Propriétés mécaniques .....	38
3.2. Acier A60 .....	38
3.3. Procédée de soudage des deux pièces .....	39
3.3.1. Description du procédé .....	39
3.3.1.1. Machine mise en place .....	40
3.3.1.2. Mode opératoire .....	41
3.4. Observation lors du soudage .....	44
3.4.1. Mesures de températures en cour de soudage .....	43
3.5. Observateur des joints après soudage .....	43
3.5.1. Contrôle non destructif .....	44
3.5.1.1. Examen visuel .....	44
3.5.1.2. Le contrôle par ressuage.....	44
3.5.1.3. Gammagraphie (radiographie $\gamma$ ) .....	45
3.6. Caractérisation mécanique .....	46
3.6.1. Essai mécanique de cisaillement par traction .....	46

4. Chapitre -VI- : Résultats et discussions .....	47
4.1. Introduction .....	48
4.2. Soudure des pièces en aluminium 2017A .....	48
4.2.1. Contrôle non destructif .....	48
4.2.1.3. Détecter les défauts de 1 <sup>ère</sup> éprouvette d'Al 2017A .....	48
4.2.1.3. Détecter les défauts de 2 <sup>ème</sup> éprouvette d'Al 2017A .....	51
4.2.1.3. Détecter les défauts de 3 <sup>ème</sup> éprouvette d'Al 2017A .....	52
4.2.1.4. Détecter les défauts de 4 <sup>ème</sup> éprouvette d'Al 2017A .....	54
4.3. Soudure des pièces en acier A60 .....	55
4.3.1. Contrôle non destructif .....	55
4.3.1.1. Détecter les défauts de 1 <sup>ère</sup> éprouvette d'acier A60 .....	55
4.3.1.2. Détecter les défauts de 2 <sup>ème</sup> éprouvette d'acier A60 .....	58
4.3.1.3. Détecter les défauts de 3 <sup>ème</sup> éprouvette d'acier A60.....	61
Conclusion générale .....	63
Résumé .....	64
Références bibliographiques .....	66

## Liste des figures

LISTE	PAGE
Figure I.1 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus	6
Figure I.2 : Classification des procédés de soudage en fonction d'énergie	7
Figure I.3 : Soudage à arc à l'électrode enrobée	8
Figure I.4 : Soudage MAG/MIG	9
Figure I.5 : Procédé de soudage TIG (avec sa torche)	10
Figure I.6 : Soudage plasma	11
Figure I.7 : Soudage à la flamme	12
Figure I.8 : Soudage aluminothermique	12
Figure I.9 : Soudage par faisceaux d'électrons	13
Figure I.10 : Soudage par faisceaux laser	14
Figure I.11 : Procédé de soudage par faisceaux laser ; a) laser défocalisé. b) laser focalisé	14
Figure I.12 : Le soudage électrogaz	15
Figure I.13 : Le soudage par résistance	16
Figure I.14 : Soudage par diffusion	17
Figure I.15 : Soudage par friction	18
Figure I.16 : Schéma montrant les principales composantes de l'outillage en soudage par friction malaxage (FSW)	19
Figure I.17: Soudage par explosion	20
Figure I.18 : Soudage par ultrasons : a) schéma du procédé b) machine de soudage	21
Figure I.19 : Soudage par impulsion magnétique	22
Figure II.1 : Soudage par friction ; a) schéma d'une machine de soudage par friction. b) exemple de soudage pour la fabrication des vérins hydraulique	24
Figure II.2 : principe de soudage par friction ; a) Les deux pièces sont clamées et une des pièces est mise en rotation, b) Les pièces sont mises en contact l'une de l'autre avec la force de friction F1: la température augmente dans la surface de contact, c) La partie en rotation est freinée et la force de forgeage F2 est exercée	26
Figure II.3 : chronologie d'une opération de soudage par friction	27

Figure II.4 : Le cycle de soudage par friction	28
Figure II.5 : Pièce d'un turbo	31
Figure II.6 : Partie d'une boîte de vitesse	31
Figure II.7 : Partie d'un amortisseur: tube soudé à une pièce comprimée	31
Figure II.8 : Partie d'un cric hydraulique: le tube à double paroi est soudé en une fois	31
Figure II.9 : Production de boulons à crochet	32
Figure II.10 : Soudage de tiges de piston	32
Figure II.11 : Soudage des roues dentées d'une boîte de vitesse	32
Figure II.12 : Fixation d'une bride à une valve hydraulique	32
Figure II.13 : Atelier de production de tiges de forage (Chine)	33
Figure II.14 : La machine de soudage par friction dans l'atelier	33
Figure II.15 : Principe de fonction de soudage par friction	34
Figure II.16 : Piston d'un moteur diesel	34
Figure II.17 : Remplacement de pièces forgées ou coulées par des profilés standards soudés par friction	34
Figure II.18 : Arbres de transmission soudés par friction	35
Figure III.1 : Macrographie de deux échantillons soudés par friction.(a) Acier A60/Acier A60 (N=1400tr/min, t=30s). (b) Al 2017A/Al 2017 (N=1400 tr/min,t=30s)	39
Figure III.2 : Machine de tour dans l'hall technologie (Université KHAIDER MOHAMMED Biskra)	40
Figure III.3 : levier de commande de la boîte de vitesse (2000tr/min)	40
Figure III.4 : Mode de fixation des deux pièces. (a) la pièce en rotation au mandrin. (b) la pièce est fixe à la poupée mobile	41
Figure III.5 : Chronologie d'une opération de soudage	42
Figure III.6 : Photo d'un joint soudure soudé par friction	42
Figure III.7 : photographie du dispositif. a) Thermocouple. b) Installation de thermocouple sur la pièce fixe	43
Figure III.8 : Contrôle de joint de soudure par ressuage	44
Figure III.9 : Produits de contrôle par ressuage	44
Figure III.10 : photo de film par gammagraphie	45



Figure III.11 : Les dispositifs de contrôle par gammagraphie. (a) Machine de développement COLENTA INDX 900 E. (b) Gammagraphes SENTINEL série 880. (c) Dosimètres 6150AD. (d) Négatoscope 10x24. (e) Ecrans renforçateurs au plomb. (f) GAINÉ AMOVIBLE 880 Sigma 6535	46
Figure IV.1 : éprouvette en aluminium 2017A avec t=30 s et N= 1400 tr/min.	50
Figure IV.2 : Contrôle de 1 <sup>ère</sup> éprouvette d'Al 2017A par contrôle visuel.	51
Figure IV.3 : chronologie de l'opération de ressuage. a) Préparation de surface et dégraissage par solvant. b) Application de pénétrant (pénétration). c) le révélateur pour détecter les défauts.	51
Figure IV.4 : Contrôle de 1 <sup>ère</sup> éprouvette d'Al 2017A par ressuage.	52
Figure IV.5 : éprouvette en aluminium 2017A avec t=120 s et N= 1400 tr/min.	53
Figure IV.6 : Contrôle de 2 <sup>ème</sup> éprouvette d'Al 2017A par contrôle visuel.	53
Figure IV.7 : Contrôle de 2 <sup>ème</sup> éprouvette d'Al 2017A par ressuage.	54
Figure IV.8 : éprouvette en aluminium 2017A avec t=30 s et N= 2000 tr/min.	54
Figure IV.9 : Contrôle de 3 <sup>ème</sup> éprouvette d'Al 2017A par contrôle visuel.	55
Figure IV.10 : Contrôle de 3 <sup>ème</sup> éprouvette d'Al 2017A par ressuage.	55
Figure IV.11 : éprouvette en aluminium 2017A avec t=120 s et N= 2000 tr/min.	56
Figure IV.12 : Contrôle de 4 <sup>ème</sup> éprouvette d'Al 2017A par contrôle visuel.	56
Figure IV.13 : Contrôle de 4 <sup>ème</sup> éprouvette d'Al 2017A par ressuage.	57
Figure IV.14 : éprouvette en acier A60 avec t=30s et N=2000 tr/min.	57
Figure IV.15 : la longueur d'apparition d'une trace de propagation d'chaleur dans la première éprouvette.	57
Figure IV.16 : Contrôle par contrôle visuel de l'éprouvette 1 de l'acier A60.	58
Figure IV.17 : Détecter les défauts de la 1 <sup>ère</sup> éprouvette par ressuage.	57
Figure IV.18 : Préparation des éprouvettes pour l'opération de gammagraphe.	58
Figure IV.19 : Contrôle de 1 <sup>ère</sup> éprouvette d'acier A60 par gammagraphie. (a) Face A. (b) Face B.	58
Figure IV.20 : éprouvette en acier A60 avec t=30s et N=1400 tr/min.	59
Figure IV.21 : Contrôle de 2 <sup>ème</sup> éprouvette d'acier A60 par examen visuel.	60
Figure IV.22 : Contrôle de 2 <sup>ème</sup> éprouvette d'acier A60 par ressuage.	60
Figure IV.23 : Contrôle de 2 <sup>ème</sup> éprouvette d'acier A60 par gammagraphie.	60
Figure IV.24 : éprouvette en acier A60 avec t=120 s et N=2000 tr/min.	61

Figure IV.25 : Contrôle de 3<sup>ème</sup> éprouvette d'acier A60 par examen visuel. 61

---

Figure IV.26 : Contrôle de 3<sup>ème</sup> éprouvette d'acier A60 par ressuage. 62

---

---

**Liste de tableaux**

Tableau II.1 : les caractéristiques du soudage par friction.....	29
Tableau III.1 : composition de l'alliage 2017A en pourcentage massique.....	37
Tableau III.2 : Propriétés mécaniques de l'aluminium 2017A.....	38
Tableau III.3 : Composition de l'acier en pourcentage massique.....	38

## Introduction générale

Le soudage trouve des applications dans des secteurs d'activité très diversifiés comme la production, la construction, la réparation et la maintenance. Il constitue un moyen d'assemblage privilégié pour toute construction faisant intervenir des matériaux métalliques.

Pour de nombreuses applications industrielles il est nécessaire d'assembler par soudage homogène ou hétérogène, comme l'industrie pétrolière ce qui est souvent utilisé les soudages par fusion tels que les tiges de forage.

Le soudage par fusion (TIG, MAG au laser) par exemple implique une grande quantité d'énergie thermique. Par contre l'utilisation des procédés d'assemblage à l'état solide (Soudage en explosion, soudage par diffusion..) qui peuvent exclure de nombreuses questions telles que l'apport excessif de chaleur, et problème de solidification. Cela motive à utiliser un nouveau procédé de soudage ' ' soudage par friction ' '.

Le soudage par friction (Friction welding) a été développé sous sa forme industrielle en Union soviétique vers 1956 puis en Grande-Bretagne et aux États-Unis quelques années plus tard. Le principe du soudage par friction consiste à deux axes ou tubes doivent être soudés bout à bout, on immobilise alors une partie tandis que l'autre est mise en rotation à une vitesse constante. Quand les deux parties serrées l'une contre l'autre entrent en contact, les forces de friction provoquent un couple de résistance. L'énergie mécanique créée est transformée en chaleur dans la surface de contact. La chaleur générée augmente la température en un temps relativement court jusqu'à la température de soudage (température de forgeage). Ensuite, la partie en rotation est détachée du moteur, freinée jusqu'à l'arrêt. Une force de forgeage axiale est alors exercée afin de réaliser une soudure entre les deux parties [1].

La problématique de soudage par friction des tiges de forage est optimisation des paramètres de soudage par friction (la vitesse de rotation [tr/min], la charge [N] ou pilotage [mm], temps de friction [s]), l'objectif de cette étude réalisation et étude de technique de soudage de tige de forage « soudage par friction ». De plus, on a concentré notre étude sur l'effet des paramètres de soudage par friction (vitesse de rotation et le temps de friction), en détectant des défauts dans des joints par le contrôle destructif et le contrôle destructif de soudure et d'assurer des bonnes propriétés mécaniques du joint de soudure.

Pour ce la en fait plusieurs essais expérimentaux de soudage par friction des barres cylindrique en alliage aluminium (Al 2017) dans un premier temps et le soudage par friction des barres on acier (A60) dans l'atelier mécanique a laide un machine à outil (tour parallèle).

Ce manuscrit s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre présente la définition et le classement des procédés de soudage qui est divisé en soudage en fusion et à l'état solide où il a clarifié le principe de fonctionnement de chaque procédé.

Le deuxième chapitre présente le principe général du soudage par friction en détail (la définition et le principe de fonctionnement) et les différents paramètres influant sur la qualité de ce type d'assemblage, puis nous présentons les avantages et les limites de soudage par friction et ses différents domaines d'application industrielle et nous avons donné un exemple de soudage des tiges de forage.

Le troisième chapitre : décrit le mode opératoire et les matériaux utilisés. Les techniques de caractérisations utilisées sont les techniques de contrôle non destructif tel que l'examen visuel, le ressuage et la radiographie ( $\gamma$ ) pour détecter les défauts de soudage dans les éprouvettes et enfin des essais mécaniques de traction pour évaluer la rigidité du joint.

Le quatrième chapitre ressemble les résultats expérimentaux obtenus, les discussions de ces résultats et leur interprétation. Enfin une conclusion générale accompagné de quelques perspective. Enfin une conclusion générale accompagnée de quelques perspectives.

# **Chapitre I**

# **Procédés de soudage**

## 1. 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 [2].

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 indispensable surtout du point de vue économique [3].

### 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 [4].

### 1.3. Les procédés de soudage

On estime qu'il y a une quarantaine ou une cinquantaine de procédés de soudage au total. La **figure I.1** présente un organigramme des procédés de soudage les plus répandus. Les procédés de soudage se subdivisent en deux grands groupes, en l'occurrence les procédés 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 ou

non un métal d'apport ou une atmosphère protectrice par exemple 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, de nombreux matériaux subissent, à ces températures très élevées, des modifications 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 procédé 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 les matériaux 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 par pression 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 le soudage 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 [1].



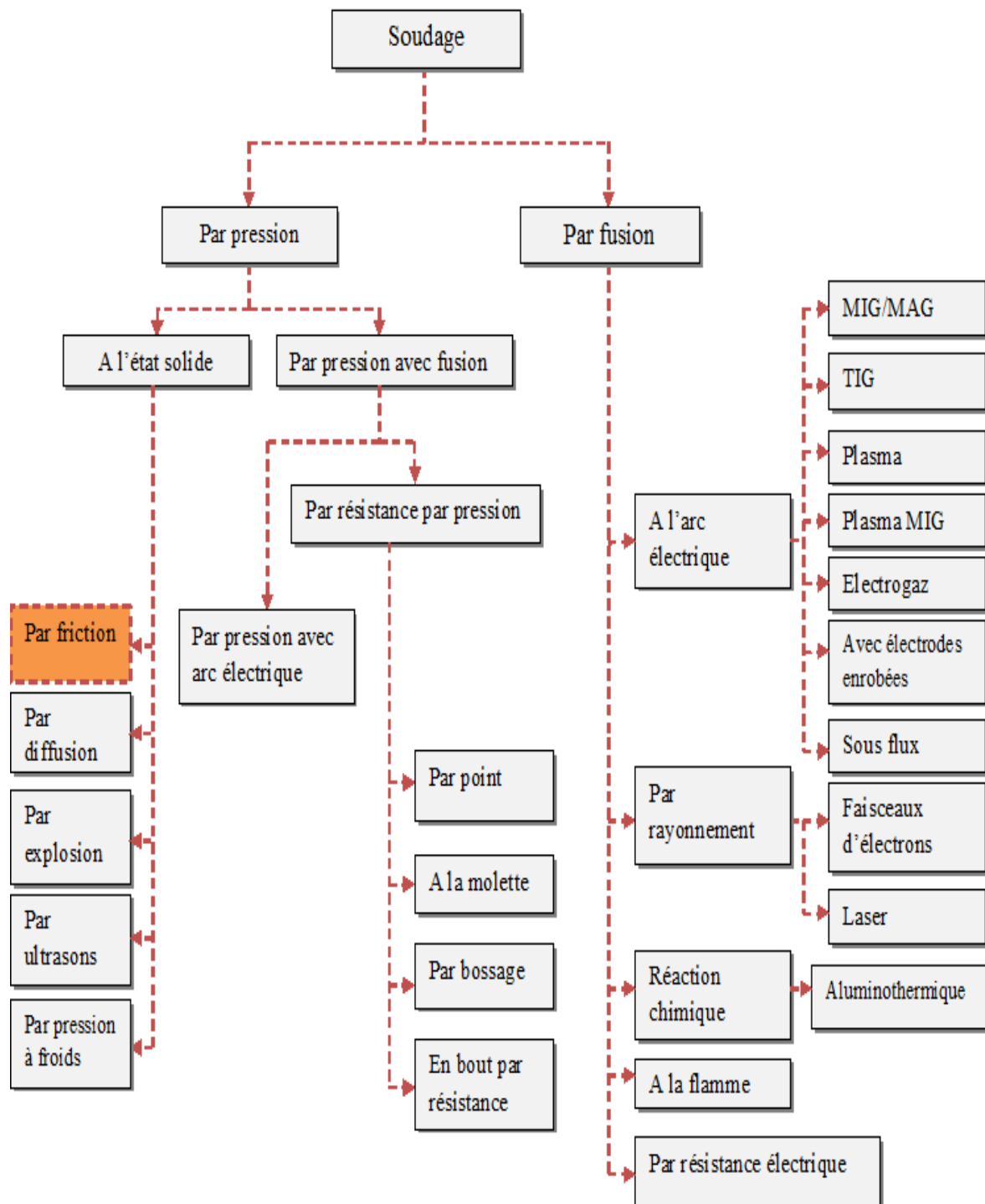


Figure I.1 : Organigramme des procédés de soudage les plus répandus.

On dénombre quelques dizaines de procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres, la continuité métallique est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques, 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 I.2.

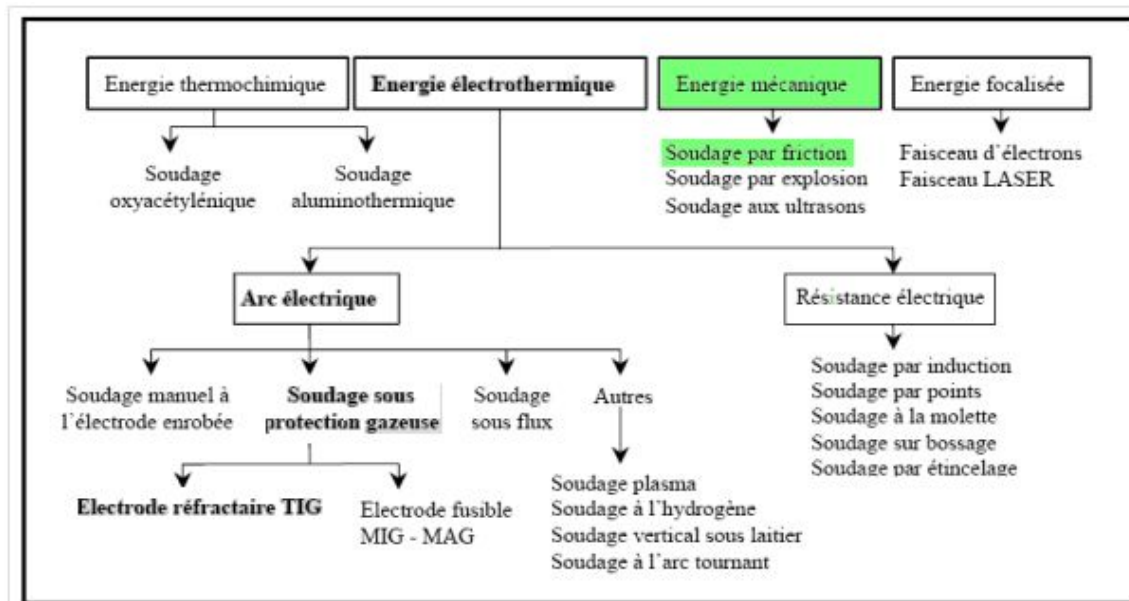


Figure I.2 : Classification des procédés de soudage en fonction d'énergie [6].

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 même pépérite est le soudage en phase liquide [2].

## 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.

### 1.4.1.1. Soudage à arc à l'électrode enrobée

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].

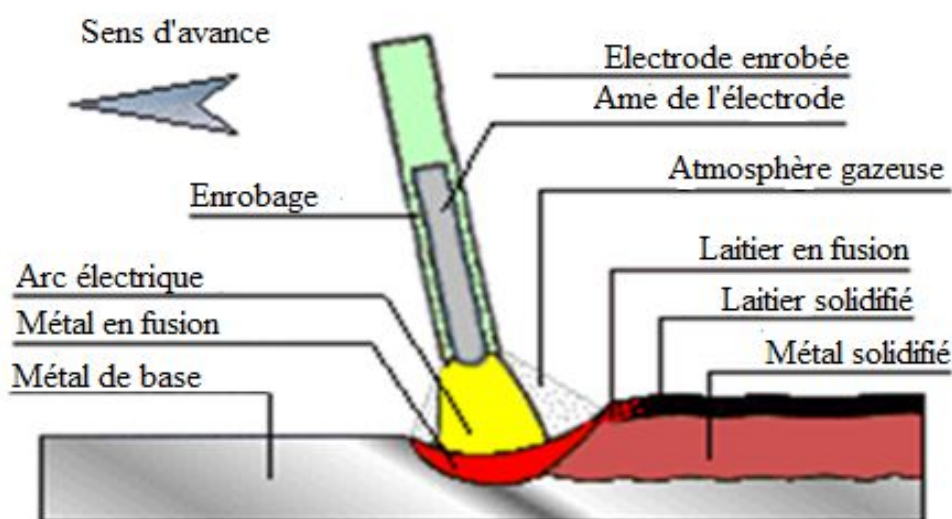


Figure I.3: Soudage à arc à l'électrode enrobée [7].

### 1.4.1.2. Soudage MIG (Metal Inert 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 d'épaisseur supérieur à 3 mm.

### 1.4.1.3. Soudage MAG (Metal Activ Gas)

Variante du MIG utilisant un mélange de gaz carbonique CO<sub>2</sub> 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].

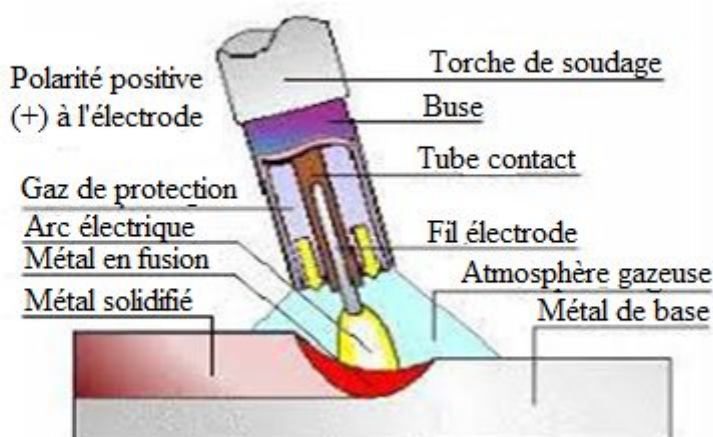


Figure I.4 : Soudage MAG/MIG [8].

### 1.4.1.4. Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas)

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].

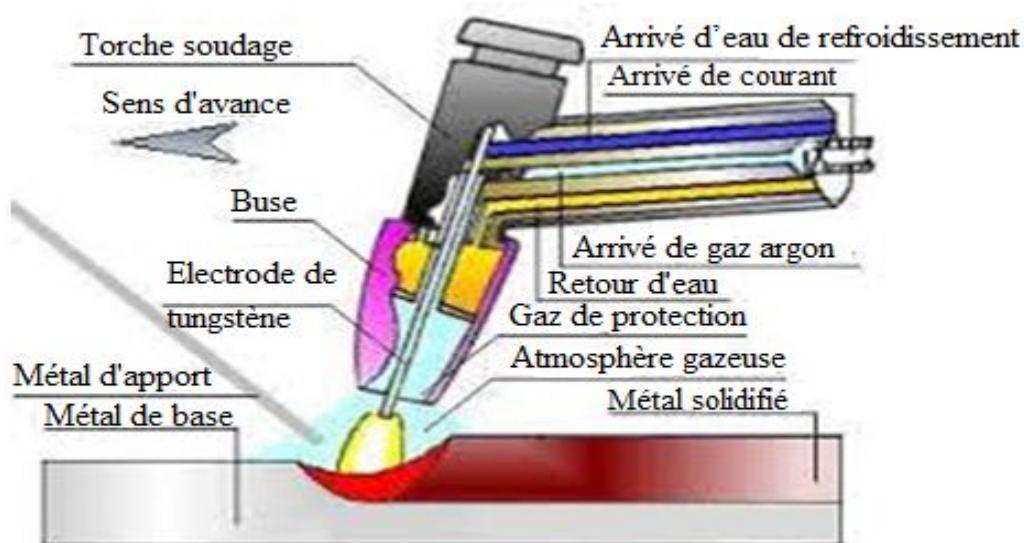


Figure I.5 : Procédé de soudage TIG (avec sa torche) [9].

### 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 pneumatiquement (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].

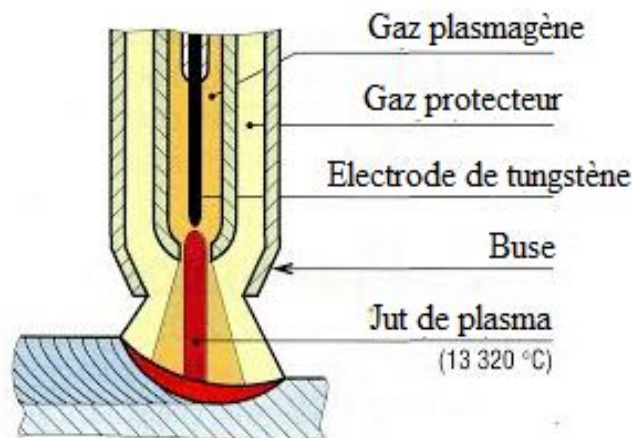


Figure I.6 : Soudage plasma [17].

### 1.4.2. Soudage à la flamme

L'énergie thermique, générée par l'oxycombustion 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].

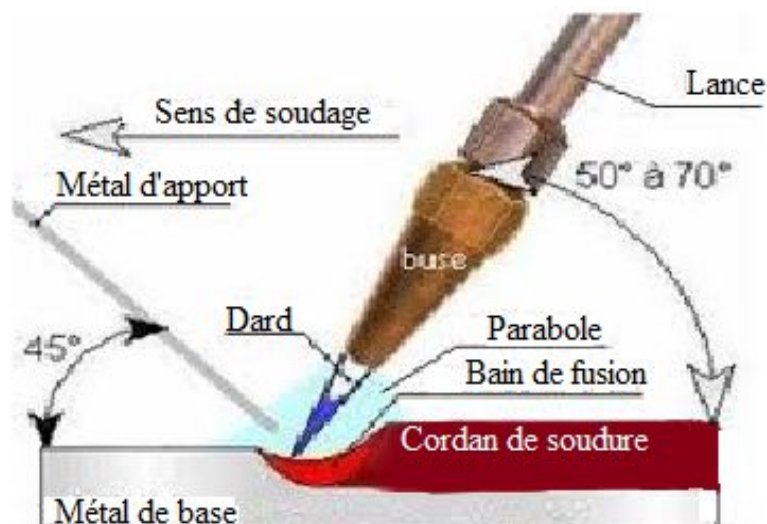


Figure I.7 : Soudage à la flamme.

### 1.4.3. 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 souder 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].

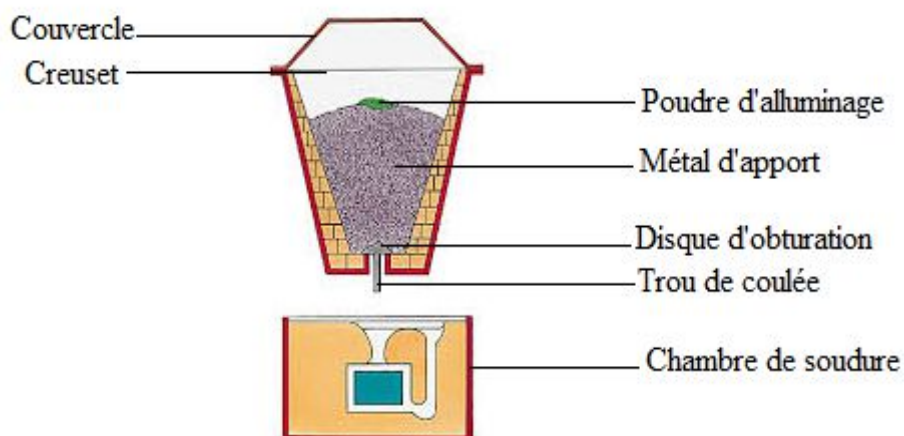


Figure I.8 : Soudage aluminothermique

#### 1.4.4. Soudage par faisceaux d'électrons

Le soudage par faisceaux d'électrons est un procédé de soudage par fusion où la chaleur est générée par un impact d'électrons émis 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 [2].

Utilise 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].

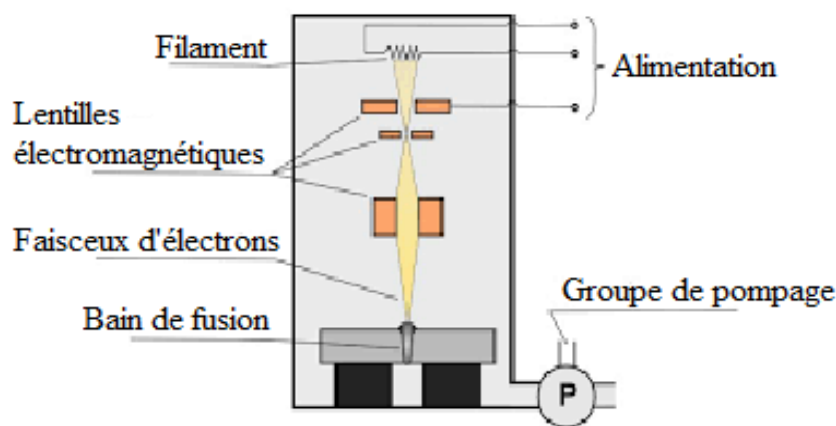


Figure I.9 : Soudage par faisceaux d'électrons

#### 1.4.5. Soudage par faisceaux laser

Le soudage par faisceaux laser est utilisé dans l'industrie automobile depuis quarante ans. En 1975, il fut installé un laser CO<sub>2</sub> pour le soudage des composants de transmission. De nos jours, les meilleures d'entreprise à travers le monde profitent des



avantages de ce procédé. Le soudage par faisceaux laser fournit une source de chaleur très concentrée comme le soudage par faisceaux d'électrons (figure I.10) [11].

Avec un faisceau focalisé et une densité d'énergie élevée qui permet d'obtenir un capillaire de vapeur (figure I.11a). Avec un faisceau défocalisé pour lequel la densité d'énergie diminue inexorablement et l'apport calorifique se fait généralement par conduction thermique (figure I.11b).

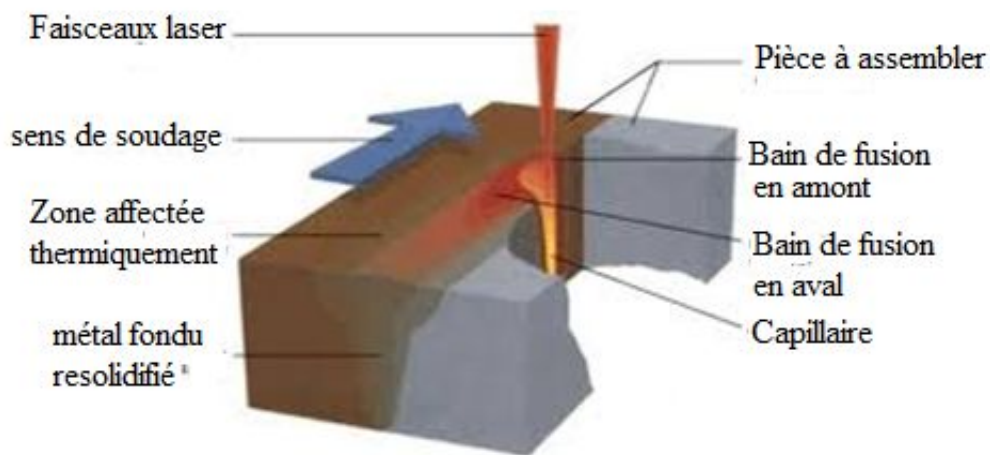


Figure I.10 : Le soudage par faisceaux laser [12].

Le soudage par faisceau laser est une technique à haute densité d'énergie. On peut distinguer deux régimes de fonctionnement du laser [2].

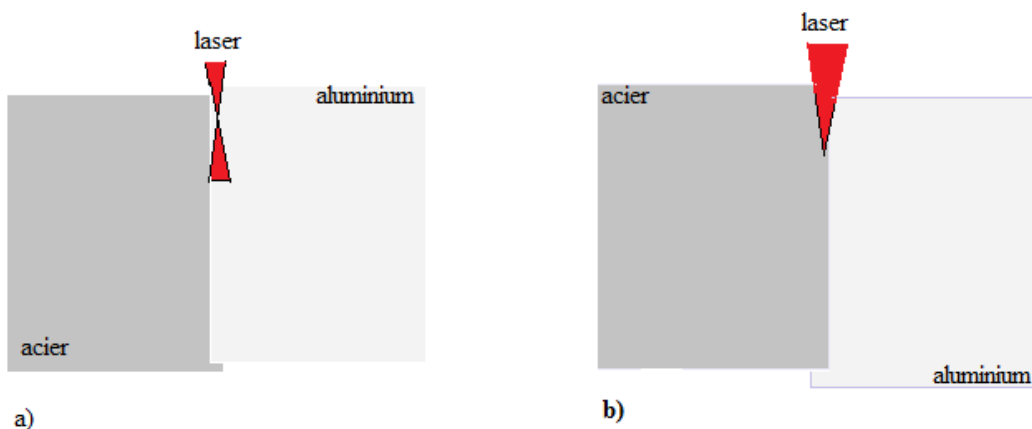


Figure I.11 : Procédé de soudage par faisceaux laser ; a) laser défocalisé. b) laser focalisé [2].

### 1.4.6. Soudage électrogaz

Le soudage électrogaz est un développement du soudage sous laitier électroconducteur 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].

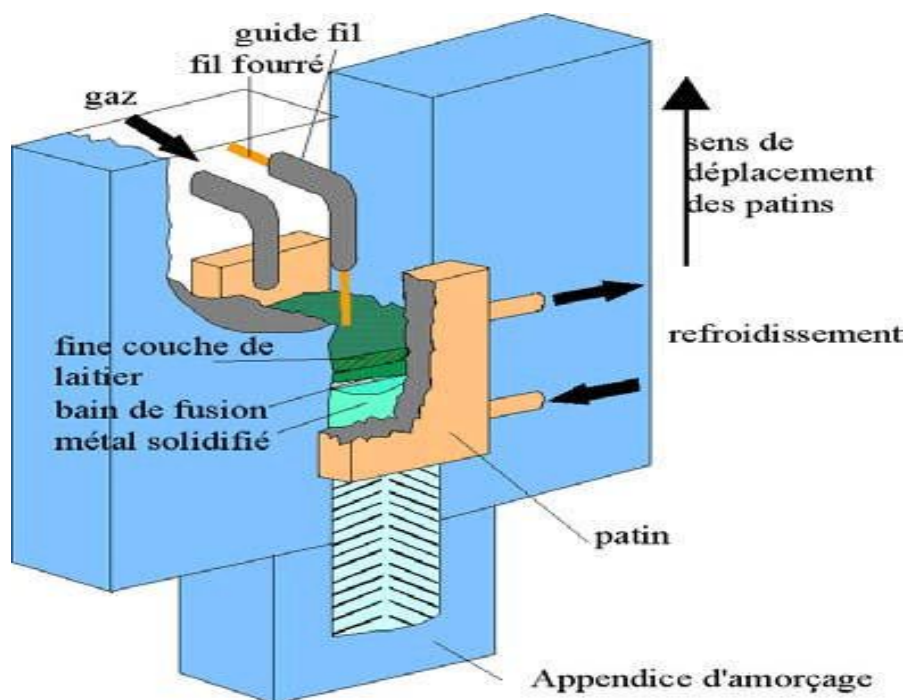


Figure I.12 : Le soudage électrogaz [17]

### 1.4.7. Soudage par résistance

Le soudage par résistance a été inventé par E. Tomson 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, le soudage à molette.

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

$$E = R.I^2 . t$$

Ou :

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

R : Résistance électrique du conducteur exprimée en ohm [ $\Omega$ ].

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.

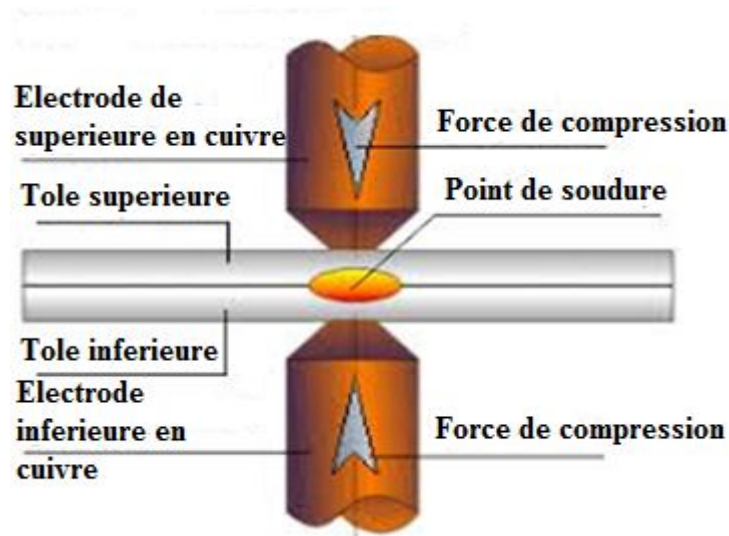


Figure I.13 : Le soudage par résistance

## 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 [3].

### 1.5.1. 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 opération est réalisée à 920 °C [7].

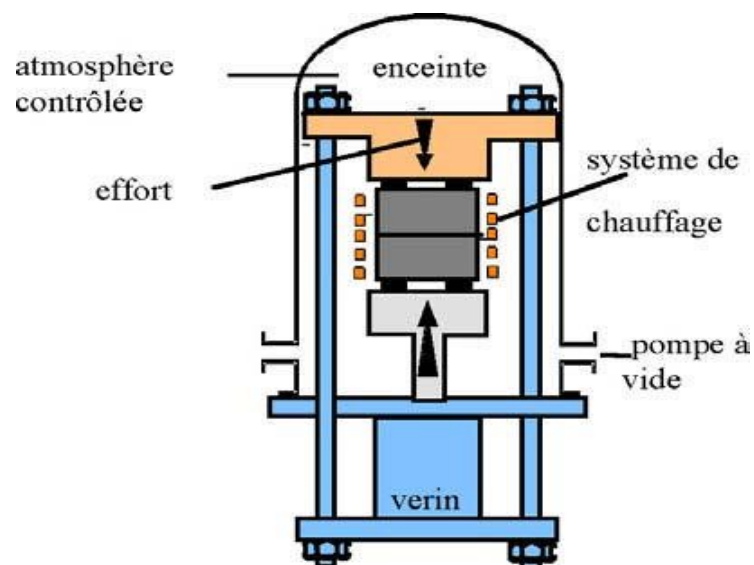


Figure I.14 : Soudage par diffusion [17].

### 1.5.2. Soudage par friction

Le 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 entraîne 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-).

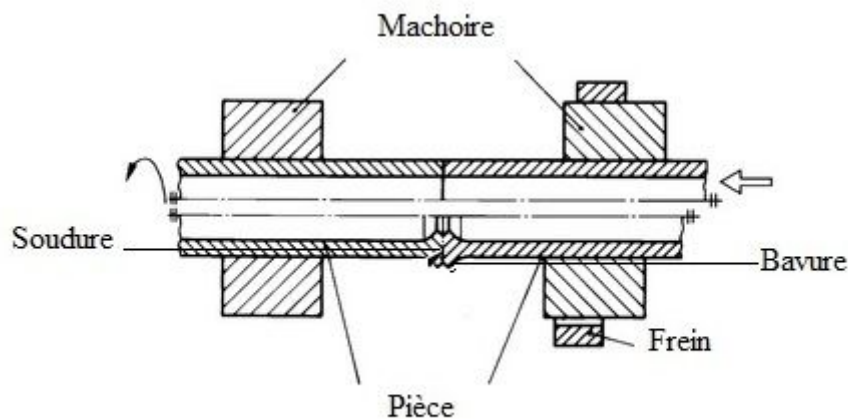


Figure I.15 : Soudage par friction

### 1.5.3. 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 assembler. 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 la verticale [2].

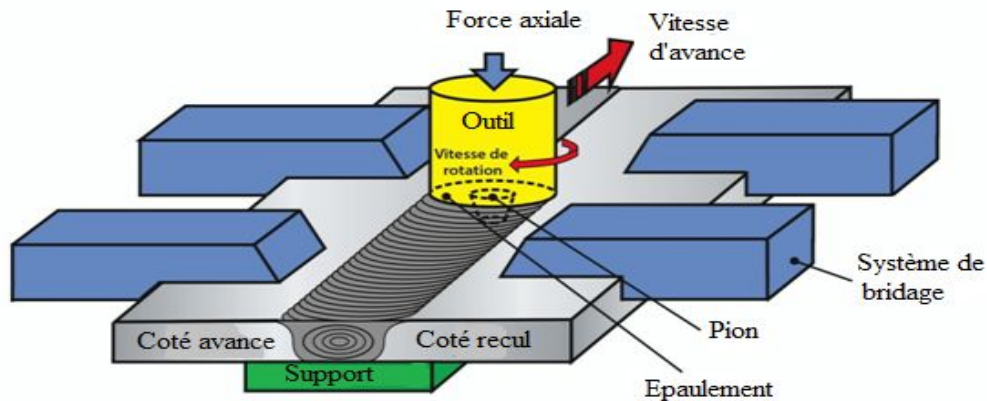


Figure I.16 : Schéma montrant les principales composantes de l'outillage en soudage par friction malaxage (FSW) [17].

#### 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.

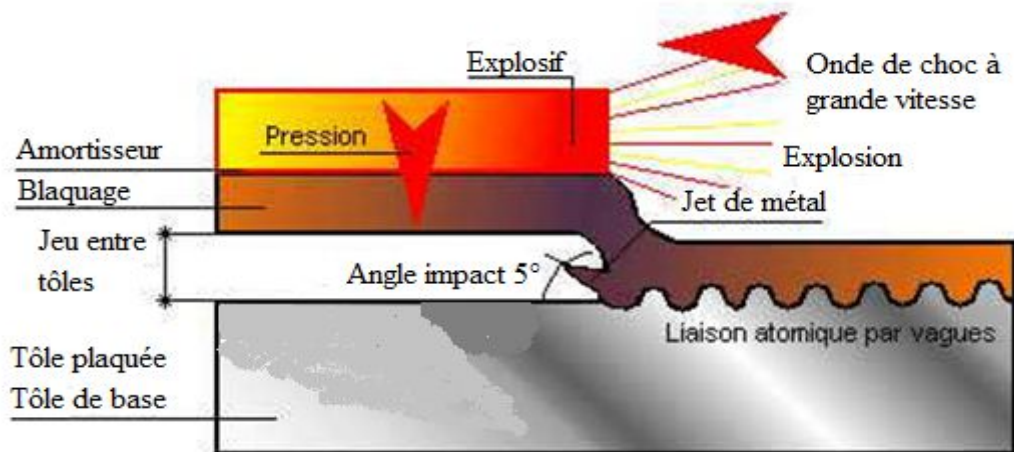


Figure I.17 : Soudage par explosion

Le 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 50kHz) qui transmises à un matériau le font vibrer. Il s'agit d'un procédé de soudage à froid en phase solide où les atomes des surfaces à assembler se combinent entre eux sous l'effet de forces d'attraction interatomique [2]. Le transducteur génère des vibrations ultrasoniques qui sont transmises par un transformateur de vitesse amplificateur à une "sonotrode". 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].

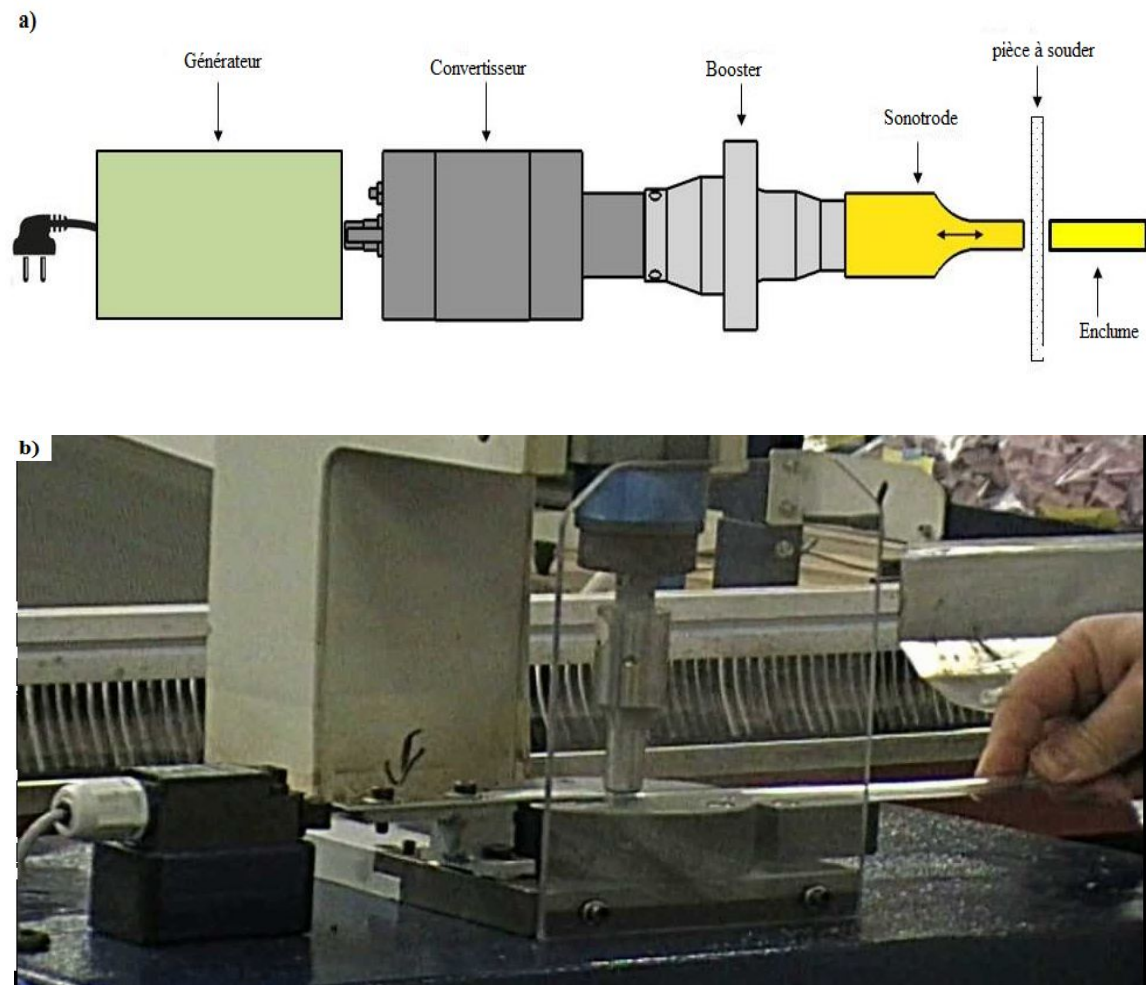


Figure I.18 : Soudage par ultrasons : a) schéma du procédé b) machine de soudage

### 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 [14].



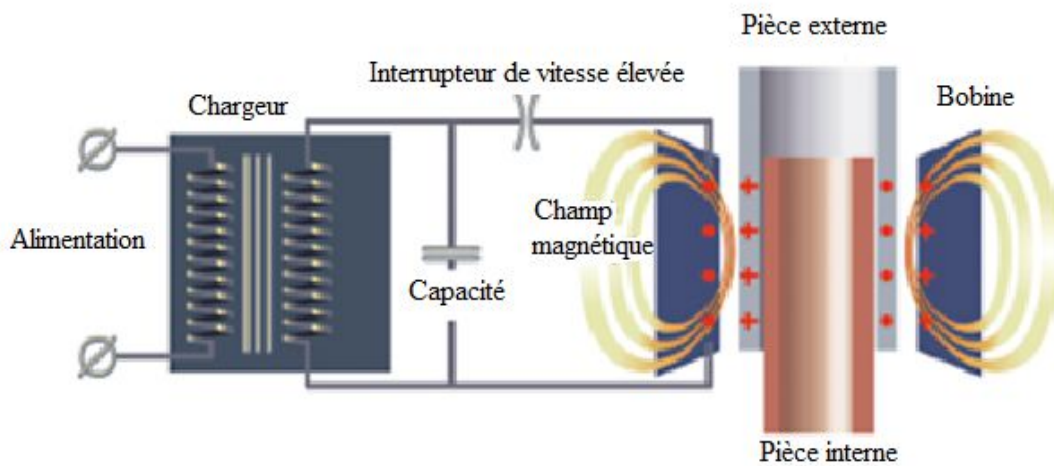


Figure I.19 : Soudage par impulsion magnétique [14].

## 1.6. Conclusion partielle

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 : 1) la quantité de métal d'apport (le coût est proportionnel au volume de la soudure), 2) l'apport de chaleur (plus il est important et plus il risque d'y avoir des problèmes de résistance aux chocs et de déformation), et 3) 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**

## 2. Chapitre –II- Soudage par friction

### 2.1. Introduction

Connu dès la fin du siècle dernier, mais rarement employé, le soudage par friction a été développé sous sa forme industrielle en Union soviétique vers 1956 puis en Grande-Bretagne et aux États-Unis quelques années plus tard.

Le soudage par friction permet de réaliser des assemblages en bout de deux pièces dont l'une au moins a une symétrie de révolution. Il met en œuvre l'effet thermique engendré dans leur plan de joint par la rotation rapide sous pression des pièces l'une sur l'autre ou encore par friction. La puissance de chauffe résulte du couple résistant et de la vitesse de rotation maintenue en principe constante. C'est un procédé d'assemblage global qui se classe parmi les procédés de forgeage. Du fait du fluage du matériau pendant la friction et lors du forgeage, la température de fusion n'est jamais atteinte [15].

Dans une application donnée, il peut entrer en compétition favorable avec les autres procédés utilisables, à savoir et essentiellement : le soudage en bout par résistance ou par étincelage, le soudage par bossage annulaire, le soudage par faisceau d'électrons et le brasage. Le soudage par friction est un procédé de soudage multiple et novateur qui trouve de nombreuses applications dans différentes branches de l'industrie. Les avantages du soudage par friction sont des assemblages de haute qualité, la rapidité du procédé par rapport aux procédés de soudage conventionnels et la possibilité d'une automatisation complète du processus de telle sorte qu'une qualité constante est garantie. De plus, le procédé de soudage par friction offre, dans le cadre de l'environnement, d'importants avantages : pas de fumées de soudage, pas de rayonnement UV ou électromagnétiques. Autre avantage: pas de métal d'apport ou de gaz de protection [16].

De plus, l'utilisation du procédé de soudage par friction peut mener à une économie en coût significative (matériaux et salaires) en remplaçant, par exemple des pièces forgées ou coulées onéreuses par des produits standards soudés par friction.

## 2.2. Description du procédé

### 2.2.1. Définition

Le soudage par friction est obtenu par l'échauffement de deux pièces pressées et en mouvement l'une par rapport à l'autre. Le mouvement relatif entraîne un échauffement de l'interface jusqu'à plastification locale du matériau, puis soudage par diffusion atomique. Un flux de chaleur est généré par conversion de l'énergie mécanique en énergie thermique. La qualité de la liaison ainsi obtenue est supérieure à celle des matériaux utilisés. La figure II-1 présente une machine de soudage par friction dans les ateliers de confection mécanique [15].

On note que la qualité de la soudure dépend de plusieurs paramètres : la vitesse de rotation, le temps de friction, et la pression exercée. L'avantage d'un tel procédé est qu'il n'y a pas de métal d'apport et qu'il permet de souder des matériaux hétérogènes, de plus, sa mise en œuvre est assez facile [2].

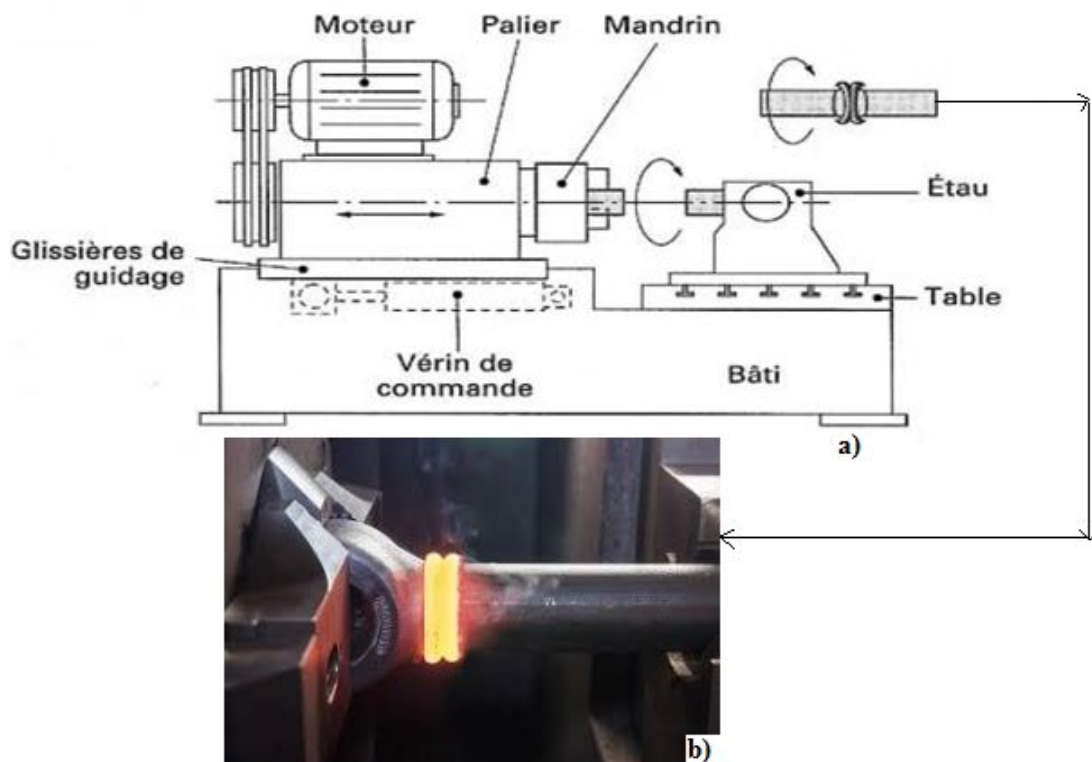


Figure II.1 : Soudage par friction ; a) schéma d'une machine de soudage par friction, b) exemple de soudage pour la fabrication des vérins hydraulique [2].

### 2.2.2. Principe de soudage par friction

Le principe du soudage par friction est présenté aux figures II.2 et suivantes. Supposons que deux axes ou deux tubes doivent être soudés bout à bout. Une des pièces est bloquée, tandis que l'autre est mise en rotation contre l'autre à une vitesse constante à l'aide d'un moteur (soudage par friction en continu). Quand les deux pièces sont mises en contact l'une de l'autre, les forces de friction provoquent un couple de résistance. L'énergie qui en résulte, est transformée en chaleur dans la surface de contact. La chaleur générée augmente la température en un court laps de temps jusqu'à la température de soudage (température de forgeage). La pièce en rotation est ensuite détachée du mandrin, freinée jusqu'à l'arrêt total. Une force de forgeage axiale est exercée afin de réaliser une soudure entre les deux pièces. Durant la phase d'échauffement et la phase de soudage, une quantité de métal plastique est refoulée, sous l'action de la force de pression axiale de telle sorte que l'ébarbure caractéristique du soudage par friction se forme [1].

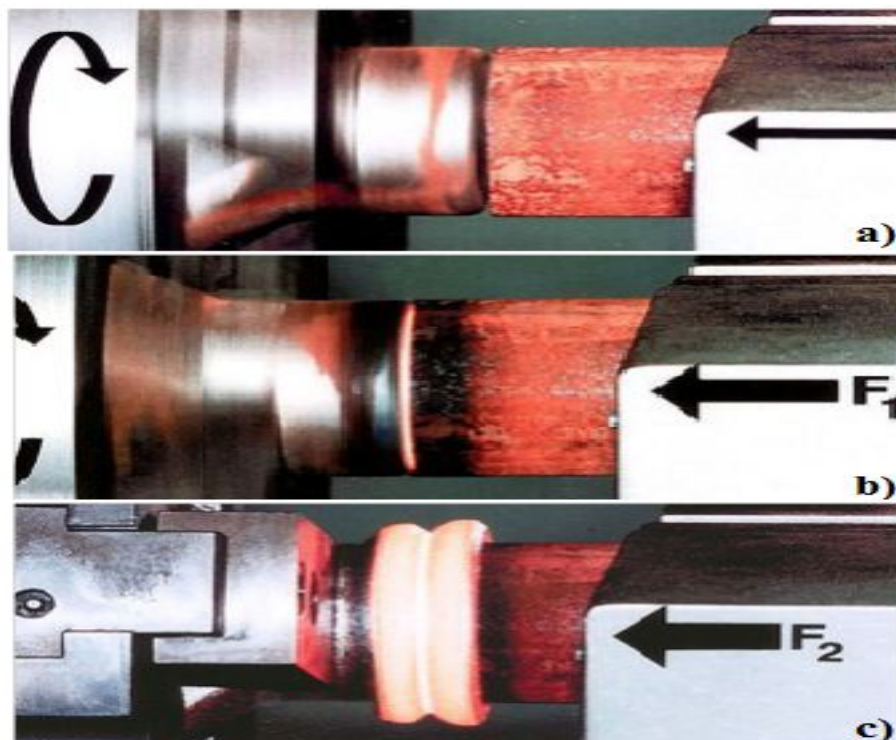


Figure II.2 : principe de soudage par friction ; a) Les deux pièces sont clamées et une des pièces est mise en rotation, b) Les pièces sont mises en contact l'une de l'autre avec la force de friction  $F_1$ : la température augmente dans la surface de contact, c) La partie en rotation est freinée et la force de forgeage  $F_2$  est exercée [16].

### 2.2.3. Les différentes phases opératoires de soudage par friction

Figure II-3. Présente de façon schématique les quatre phases opératoires du procédé de soudage par friction. L'opération de soudage peut-être décomposée en 3 phases successives : 1) phase de lancement, 2) phase de soudage (friction), 3) phase de forgeage.

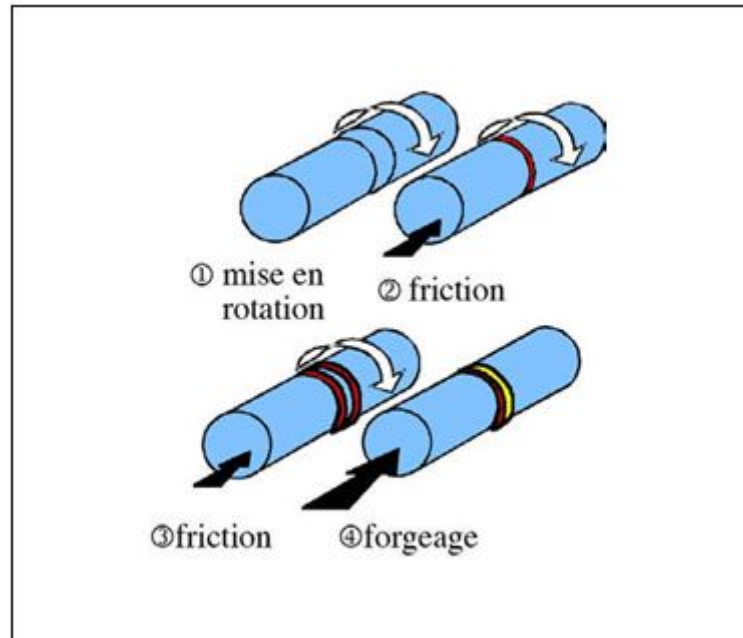


Figure II.3 : chronologie d'une opération de soudage par friction [17].

#### ❖ Phase 1 :

Une des pièces est mise en rotation puis débrayée, elle continue de tourner par inertie

#### ❖ Phase 2-a :

Les deux pièces sont mises en contact sous l'effet d'un effort de pression constant. La rotation diminue librement (freinage), les pièces s'échauffent localement (frottement)

#### ❖ Phase 2-b :

Sous l'effet de la chaleur et de l'effort, les pièces se déforment (l'ensemble se raccourci). La vitesse de rotation continue de diminuer.

#### ❖ Phase 3 :

Lorsque la pièce a entièrement décéléré, les pièces refroidissent pendant que l'effort en maintenu constant.

### 2.2.4. Cycle de soudage

Les paramètres influant sur la qualité de ce type d'assemblage sont :

- ✓ Le temps de soudage.
- ✓ La pression exercée entre les pièces.
- ✓ La vitesse de rotation relative
- ✓ La consommation de matière.

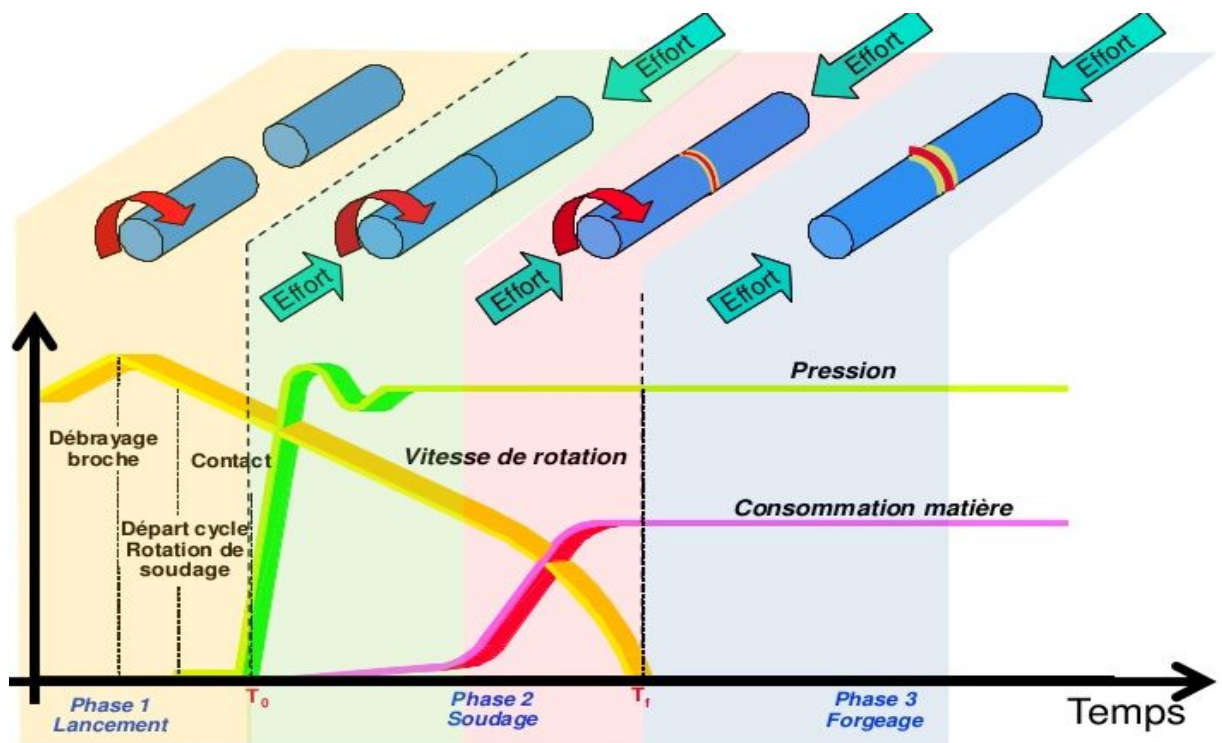


Figure II.4 : Le cycle de soudage par friction [18].

### 2.2.5. Les caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques sont maintenues voire améliorées :

- ✓ **Résistance à l'extension** : La résistance à l'extension dans la zone d'assemblage est au moins égale à celle des matériaux soudés.
- ✓ **Résistance à la torsion** : La zone d'assemblage a les mêmes caractéristiques de résistance à la torsion que les pièces soudées.

- ✓ **Résistance à la flexion** : La résistance à la flexion est inférieure à celle des matériaux assemblés dans la zone de la soudure. Cette perte est de l'ordre de 15 %.
- ✓ **Dureté** : La dureté, dans la zone soudée, est supérieure à la dureté des matériaux assemblés. Le gain de dureté dépend du matériau, de son état métallurgique et du cycle de soudage.

Le tableau II.1 présente les principales caractéristiques du soudage par friction.

Tableau II.1 : les caractéristiques du soudage par friction [19].

Vitesse de rotation	50 à 80 000 t/min
Pression axiale	15 à 400 MN/m <sup>2</sup>
Gamme de diamètre	1 à 150 mm
Durée de cycle	5 à 500 s
Mise en œuvre	Machine standard à raccorder, outillage spécifique
Portabilité	Généralement fixe en atelier

### 2.3. Les avantages et les limites

Les avantages du soudage par friction sont:

- ✓ Assemblages de haute qualité, avec une bonne structure métallurgique, car le matériau n'est pas porté à fusion.
- ✓ Procédé de soudage 'one-shoot'.
- ✓ Pas de préparation spéciale des pièces.
- ✓ Procédé de soudage beaucoup plus rapide que les procédés de soudage conventionnels.
- ✓ Peu de déformations après soudage en raison du bref temps de soudage et de la faible température maximale.
- ✓ Possibilité de souder des pièces de sections très différentes à condition de prendre certaines mesures de précaution.
- ✓ Economique: le soudage par friction permet de réaliser des économies sur le coût des pièces soudées (économie en temps, en matériau et en salaire).



- ✓ Les matériaux dissemblables ne pouvant être soudés avec d'autres procédés, peuvent être soudés avec le procédé par friction, comme l'aluminium ou le cuivre sur l'acier.
- ✓ Très bonne reproductibilité et possibilités d'automatisation.
- ✓ Pas de nécessité de métaux d'apport.
- ✓ Ecologique: pas de gaz de protection, fumées ou rayonnements.
- ✓ Pas de nécessité de soudeurs agréés.

Les limites du soudage par friction sont:

- ✓ L'alignement des pièces à souder est critique pour la réalisation d'une friction et d'un chauffage uniformes.
- ✓ Les ébarbures doivent être éliminées mécaniquement.
- ✓ Coût d'investissement de l'appareillage.
- ✓ Les techniques de contrôle non destructif ne sont pas encore appliquées sur les soudures par friction. Le risque existe donc que ces techniques ne puissent pas détecter tous les défauts de soudage. La surveillance des paramètres du processus est probablement la meilleure méthode pour le contrôle de qualité.
- ✓ Le soudage par friction ne peut pas être appliqué sur des matériaux ayant un très faible coefficient de friction comme la fonte grise, le bronze et le laiton à forte teneur en plomb (les particules de graphite agissent comme des lubrifiants et contrecarrent l'échauffement).
- ✓ Lors du soudage de très grandes sections, la capacité de la machine peut constituer une limite.

#### **2.4. Principaux domaines d'application**

En raison de ses larges possibilités d'applications, il n'est pas étonnant que le soudage par friction soit souvent utilisé dans des secteurs divergents, tel que l'industrie automobile (soupapes, axes, ...), industrie électrique (raccords, électrodes, ...), forage (raboutage de tubes, ...), aéronautique et aérospatial (turbines, ...), Soudabilité (Facilement soudable : aciers, inox, monel, aluminium, titane ; Difficilement soudable : bronze, cuivre, ... ; Joints hétérogènes : aluminium-cuivre, ...).

### 2.4.1. Domaine de l'automobile

Le soudage par friction est utilisé pour la production de pièces dans l'industrie automobile comme des stabilisateurs, des soupapes, des tiges de piston, des pompes à eau, ...



Figure II.5 : Pièce d'un turbo [1].

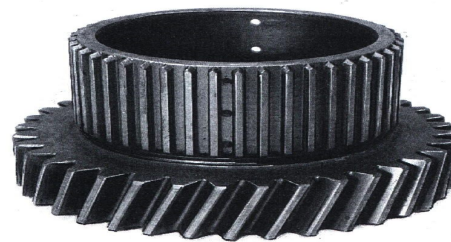


Figure II.6 : Partie d'une boîte de vitesse [1].

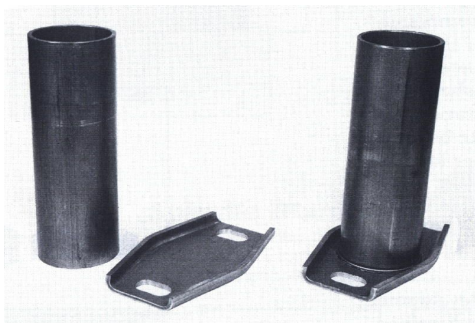


Figure II.7 : Partie d'un amortisseur: tube soudé à une pièce compressée [1].

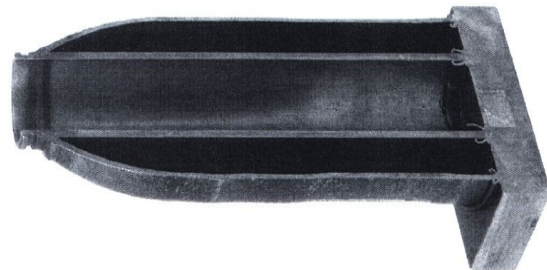


Figure II.8 : Partie d'un cric hydraulique: le tube à double paroi est soudé en une fois [1].

### 2.4.2. Domaine l'industrie aéronautique et du spatial

Le procédé de soudage par friction peut être utilisé pour de nombreuses applications. Il est ainsi utilisé dans l'aviation et la navigation spatiale pour le soudage de boulons à crochet (figure II-9), pour la fabrication de tiges de piston légères (figure II-10) ou pour des éléments de boîtes de vitesse (figure II-11).

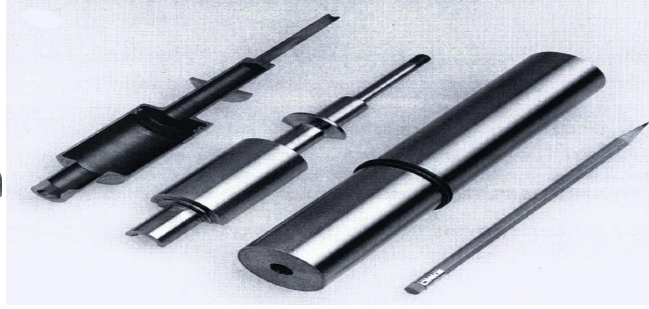


Figure II.9 : Production de boulons à crochet [1].

Figure II.10 : Soudage de tiges de piston [1].

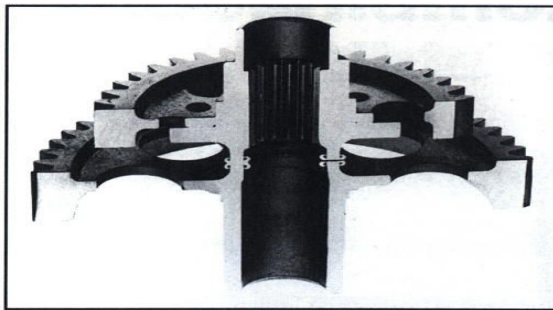


Figure II.11 : Soudage des roues dentées d'une boîte de vitesse [1].

### 2.2.3 Domaine l'industrie pétrolière

Le soudage par friction est également utilisé dans la pétrochimie, par exemple pour le soudage de brides à des valves hydrauliques (Figure II-12) ou pour le soudage de tiges de forage. Les soudures par friction sont suffisamment fortes pour résister aux couples élevés durant le forage.

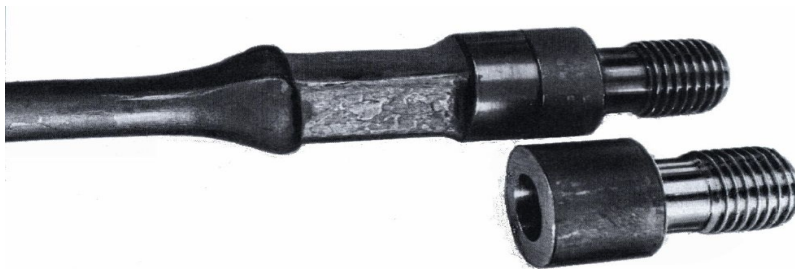


Figure II.12 : Fixation d'une bride à une valve hydraulique [1].

Un exemple de soudage des tiges de forage : Cette machine à souder par friction de 600t, qui est le premier équipement de soudage pour tubes de grand diamètre en Chine, peut traiter des tuyaux d'un diamètre allant jusqu'à 300mm [20] (Figure II-13).



Figure II.13 : Atelier de production de tiges de forage (Chine) [20].

Le traitement thermomécanique contribue à améliorer grandement l'efficacité du soudage.



Figure II.14 : La machine de soudage par friction dans l'atelier [20].

La machine de soudage par friction travaille en fonction du principe de soudage par friction inertielle. Elle est capable de détecter intelligemment les paramètres de soudage et de chauffer le point de contact des 2 pièces à une vitesse étonnante. Après avoir atteint la température souhaitée, la machine réalise le soudage des deux parties d'une manière stable et fiable.

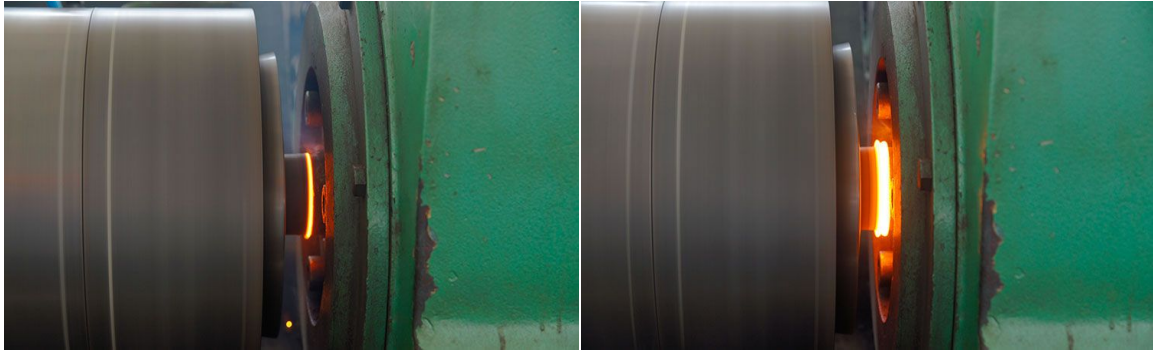


Figure II.15 : Principe de fonction de soudage par friction [20].

#### 2.4.4. Domaine de l'agriculture

Le soudage par friction est également très utilisé lors de la production d'éléments pour trucks, véhicules agricoles (Figures II-15 et II-16), camions et engins agricoles par exemple les tiges à des yeux de tige (Figure II-17). Une économie notable en coût peut être réalisée par le remplacement de pièces complètement forgées par de petites pièces forgées soudées à des barres ou des tubes [16].

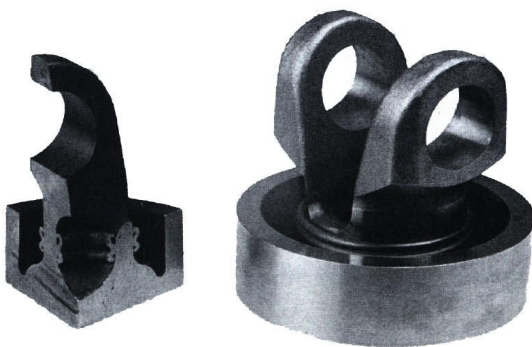


Figure II.16 : Piston d'un moteur diesel [1].

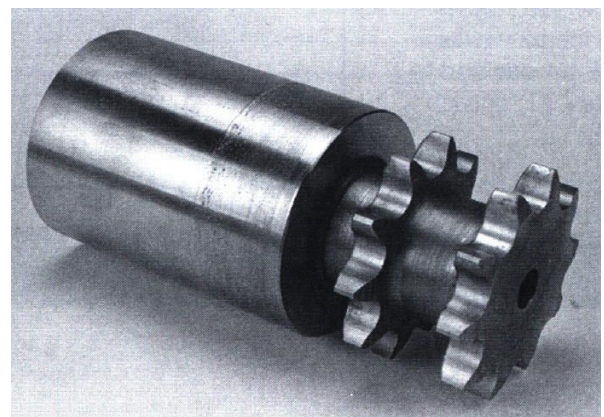


Figure II.17 : Remplacement de pièces forgées ou coulées par des profilés standards soudés par friction [1].



Figure II.18 : Arbres de transmission soudés par friction [16].

## 2.5. Conclusion partielle

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.

Dans les prochains chapitres, nous avons procédé à l'assemblage des matériaux à savoir un alliage d'aluminium et un acier. Nous avons concentré sur l'effet des paramètres de soudage sur les éprouvettes utilisés.

# **Chapitre III**

## **Matériaux et procédures expérimentales**

### 3. Chapitre –III- Matériaux et procédures expérimentales

Les matériaux constitutifs des pièces cylindriques utilisées sont l'alliage d'aluminium 2017A et l'acier A60. Une brève description de chacun de ces deux métaux est reprise ci-dessous. De plus, le procédé de soudage et technique de caractérisation des joints de soudure obtenus sont aussi présentés.

#### 3.1. L'alliage d'aluminium 2017A

##### 3.1.1. Généralités

L'alliage d'aluminium, dont il est question dans ce travail de thèse, est un alliage d'aluminium 2017A (françaises « AFNOR » : AU 4 G, Allemandes « DIN » : Al Cu Mg 1, Européennes « NF EN/EN » : Al Cu 4 Mg Si (A), US : 2017 A) de composition chimique représenté sur le tableau III.1, dont les dimensions des pièces : 60 mm longueur et Ø16 mm de diamètre.

Tableau III.1 : composition de l'alliage 2017A en pourcentage massique [21].

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr+Ti
0.20-0.80	≤ 0.70	3.5-4.5	0.4-1.0	0.4-1.0	≤ 1.0	≤ 0.25	< 0.25
Chaque autre		Total autre			Al		
≤ 0.05		≤ 0.25			Reste		

L'aluminium 2017A est également un alliage à durcissement structural, c'est à dire qu'il tire ses propriétés mécaniques de la taille et de la distribution des précipités qu'il contient. il s'agit d'un alliage très répandu de la série 2XXX (Al-Cu et Al-Cu-Mg). Les teneurs en cuivre des alliages de cette série sont comprises entre 2.6 et 6.3%, et quand ils en contiennent, leurs teneurs en magnésium varient de 0.5 à 1.5%. Le durcissement structural de ces alliages qui est dû à la précipitation de forme transitoire des composés d'équilibre  $\text{CuAl}_2$  et  $\text{CuMgAl}_2$ , leur confère d'excellentes propriétés mécaniques. L'addition de silicium et de manganèse à des teneurs inférieures à 0.8%, favorise la formation de composé quaternaire qui par dispersion améliorent les propriétés de la matrice. Par contre, la présence de fer est souvent nuisible, car à cause de la formation de  $\text{Cu}_2\text{FeAl}_7$ , le fer diminue la quantité de cuivre nécessaire au durcissement structural [22]. Ils comportent



également des éléments d'alliage secondaire comme le chrome, le zinc, le titan, etc. qui jouent également un rôle dans les propriétés des alliages de cette série.

### 3.1.2. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques classiques des alliages d'aluminium 2017A (la limite d'élasticité à 0.2%  $R_{p0.2}$ , la limite à la rupture  $R_m$ , l'allongement à rupture A) couramment admises sont données dans le tableau III.2.

Tableau III.2 : Propriétés mécaniques de l'aluminium 2017A [21].

$\varnothing$ (mm)	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	A (% mini)
$\varnothing \leq 55$	$\geq 400$	$\geq 250$	10

### 3.2. Acier A60

L'acier utilisé dans notre étude est un acier non allié d'usage courant (Désignation européenne : Fe590-2 + E335 ou 1.0060, désignation allemande : St60-2, désignation française : A60-2 ou A60.) de composition chimique représenté dans le tableau III.3, Dont les dimensions des pièces : 60 mm longueur et  $\varnothing 16$  mm de diamètre.

Tableau III.3 : Composition de l'acier en pourcentage massique [23].

Eléments	P	S	N	Fe
Pourcentage massique	0.055	0.055	0.014	Reste

Acier à usage courant en mécanique générale. Non traité, il offre une bonne résistance mécanique. Acier de construction non allié d'usage général, non effervescent. L'analyse chimique n'est pas définie par la norme et ne garantit pas d'éventuels traitements thermiques.

Utilisé dans des pièces soumises à de fortes pressions de surface, vis sans fin, pignons, clavettes, axes, bagues.....

### 3.3. Procédée de soudage des deux pièces

Le soudage par friction est un procédé de soudage mécanique où l'apport de chaleur nécessaire au soudage est fourni par le frottement des pièces à assembler. L'une est fixe, l'autre est animée d'un mouvement de rotation.

#### 3.3.1. Description du procédé

L'objectif de ce travail expérimental est de déterminer a posteriori pour quels paramètres la soudure possèdera les meilleures propriétés mécaniques. Les soudures seront soumises à contrôle non destructif (Examen visuel, ressuage et radiographie) et à des essais de cisaillement par traction.

Notre travail passe par plusieurs étapes, Ces étapes sont pour changer les vitesses de rotation (1400, 2000) tr/min et le temps de friction (30s, 120s) et les types des métaux (Aluminium 2017A, acier A60), Parce que nous essayons de la meilleure vitesse de rotation et le temps de friction le plus de succès dans chaque type de métal. La figure III.1. Représenté deux éprouvettes soudé par friction.

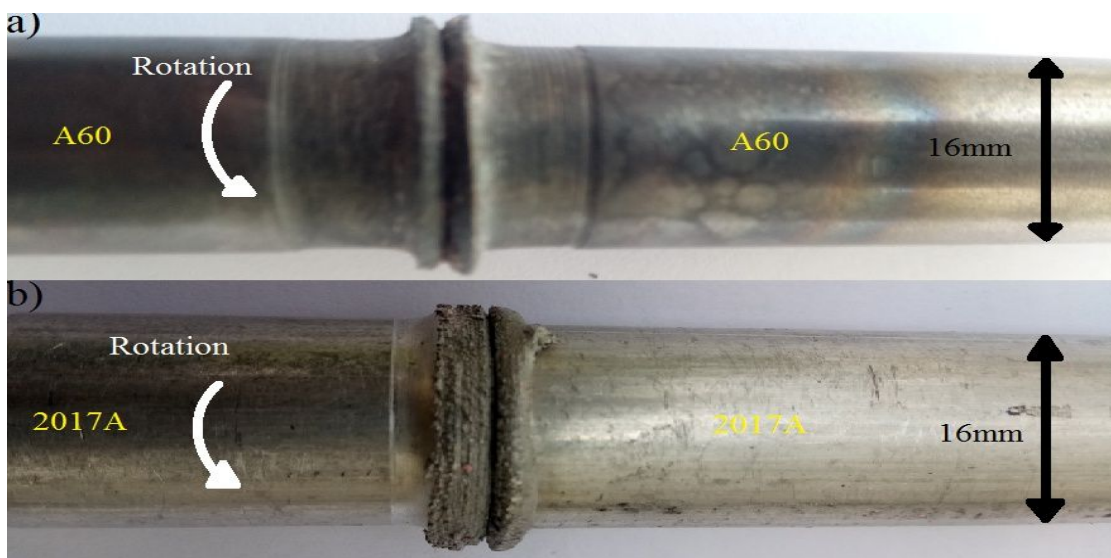


Figure III.1 : Macrographie de deux éprouvettes soudées par friction. (a) Acier A60/Acier A60 (N=1400tr/min, t=30s). (b) Al 2017A/Al 2017 (N=1400 tr/min, t=30s).

### 3.3.2.1. Machine mise en place

En soudage par friction, on utilise habituellement une machine de tour qui est représentée sur la figure III.2.



Figure III.2 : Machine de tour dans l'hall technologie (Université KHAIDER MOHAMMED Biskra).

Pour comprendre et exécuter les différentes opérations qui s'effectuent au cette machine, il est nécessaire de connaître les organes principaux qui le constituent. Les éléments les plus importants pour faire cette soudure sont : poupée fixe (mandrin de serrage), poupée mobile, levier de commande (inverseur et commutateur) du moteur, levier de commande de la boîte de vitesse (figure III.3.).



Figure III.3 : levier de commande de la boîte de vitesse (2000tr/min).

La figure III.4 montre la méthode de fixation des deux pièces, la première pièce au mandrin (la pièce en rotation) et la deuxième à la poupée mobile (la pièce fixe).

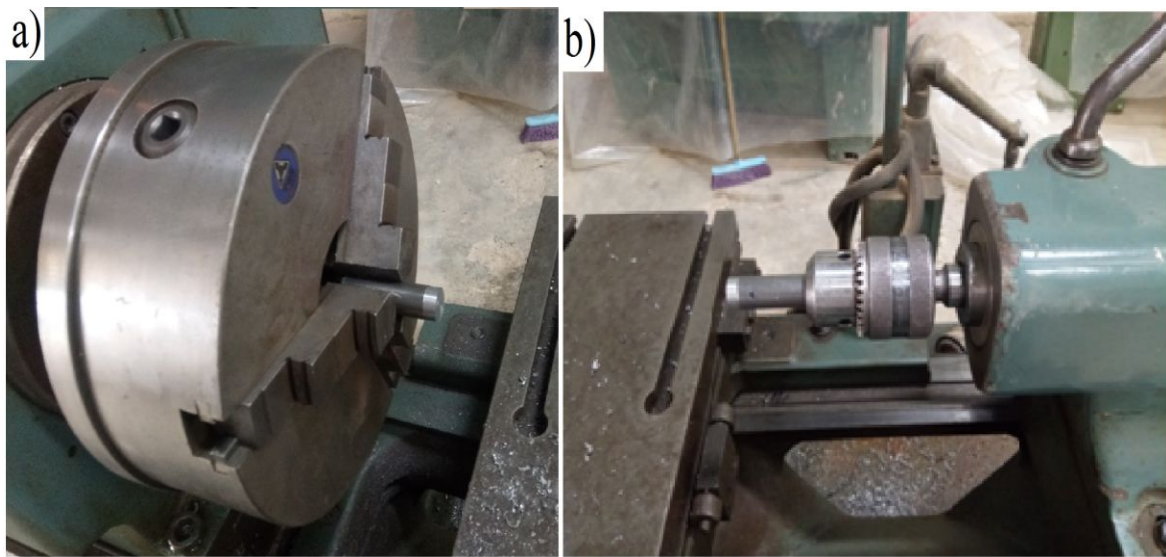


Figure III.4 : Mode de fixation des deux pièces. (a) la pièce en rotation au mandrin. (b) la pièce est fixe à la poupée mobile.

### 3.3.2.2. Mode opératoire

La chronologie lors du procédé de soudage comporte quatre étapes majeures (Figure III.5.) :

- (a)- Une des pièces est mise en rotation puis débrayée, elle continue de tourner par inertie
- (b)- Les deux pièces sont mises en contact sous l'effet d'un effort de pression constant. La rotation diminue librement (freinage), les pièces s'échauffent localement (frottement)
- (c)- Sous l'effet de la chaleur et de l'effort, les pièces se déforment (l'ensemble se raccourci). La vitesse de rotation continue de diminuer.
- (d)- Lorsque la pièce a entièrement décéléré, les pièces refroidissent pendant que l'effort en maintenu constant.

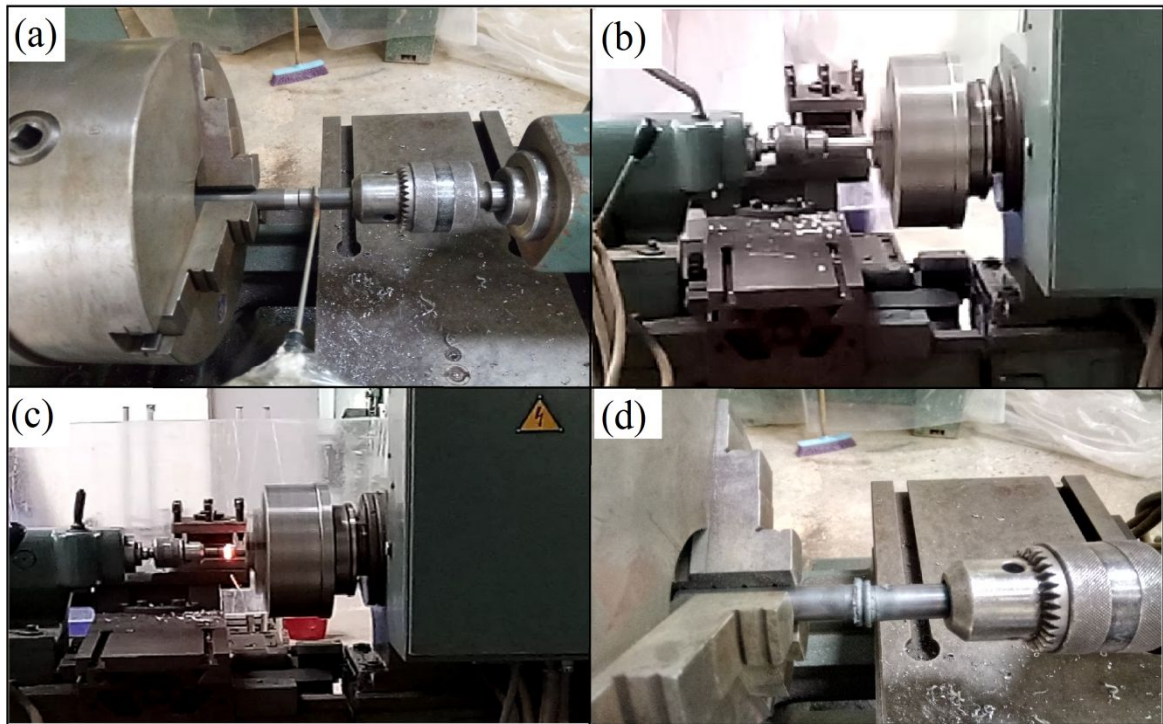


Figure III.5 : Chronologie d'une opération de soudage

### 3.4. Observation lors du soudage

La figure III.6 montre un exemple d'un joint de soudure obtenu par soudage par friction.



Figure III.6 : Photo d'un joint soudure soudé par friction

### 3.4.1. Mesures de températures en cour de soudage

Afin de calculer la température maximale pendant le soudage, il est nécessaire d'effectuer des mesures de température pour de nombreuses conditions de soudage différentes . Nous utilisons un thermocouple (Figure III.7.a) pour calculer la température, donc il est installé sur la pièce fixe comme décrit dans la figure III.7.b.

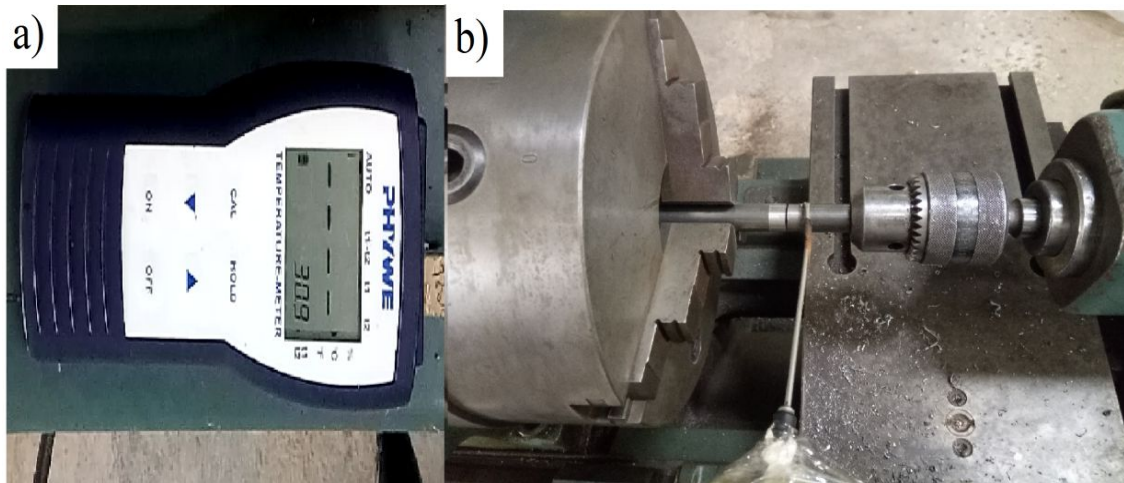


Figure III.7 : photographie du dispositif. a) Thermocouple. b) Installation de thermocouple sur la pièce fixe.

## 3.5. Observateur des joints après soudage

### 3.5.1. Contrôle non destructif

C'est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenance [25].

#### 3.5.1.1. Examen visuel

Examen visuel est le procédé de contrôle, le plus simple et le plus général puisqu'il est aussi le point final de la majorité des autres procédés non destructifs.

### 3.5.1.2. Le contrôle par ressuage

Le contrôle par ressuage est un moyen de recherche de défauts de surface qui est parmi les plus anciens, les plus simples et les plus largement utilisés de nos jours [25]. Il détecte les défauts de surface par exemple les fissures (Figure III.8).

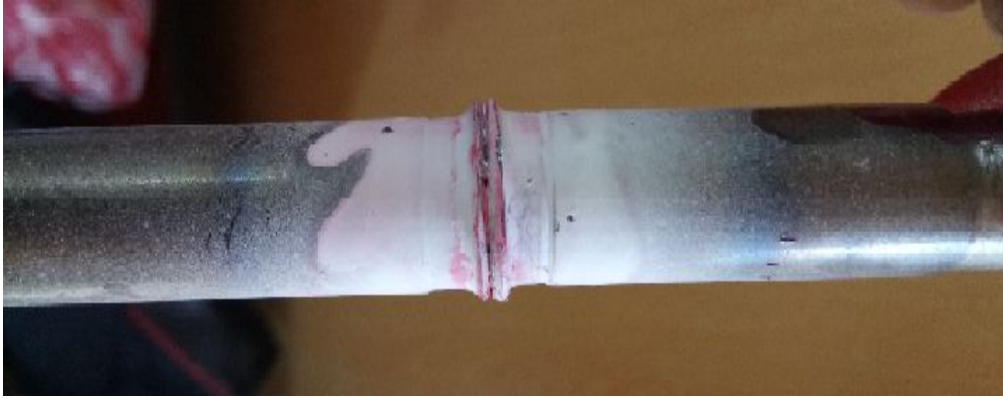


Figure III.8 : Contrôle de joint de soudure par ressuage

Nous utilisons dans notre travail trois produits sont respectivement solvant pour le dégraissage, pénétrant et révélateur, la figure III.9 représenté les produit de contrôle par ressuage.



Figure III.9 : Produits de contrôle par ressuage.

### 3.5.1.3. Gammagraphie (radiographie $\gamma$ )

Cette technique de radiographie industrielle utilise une source de rayonnements gamma( $\gamma$ ). Elle consiste à placer la pièce à radiographier entre la source de rayonnements et un film photographique contenu dans une cassette souple ou rigide. Après un temps d'exposition dépendant de la nature et de l'épaisseur du matériau radiographié, le film est développé et révèle les défauts existant éventuellement à l'intérieur de la pièce [26] (Figure III.10.).



Figure III.10 : photo de film par gammagraphie.

Les dispositifs de contrôle par gammagraphie représentent dans la figure III.10. (Machine de développement COLENTA INDX 900 E, Gammagraphes SENTINEL série 880, Dosimètres 6150AD, Négatoscope 10x24, Ecrans renforceurs au plomb, GAINÉ AMOVIBLE 880 Sigma).



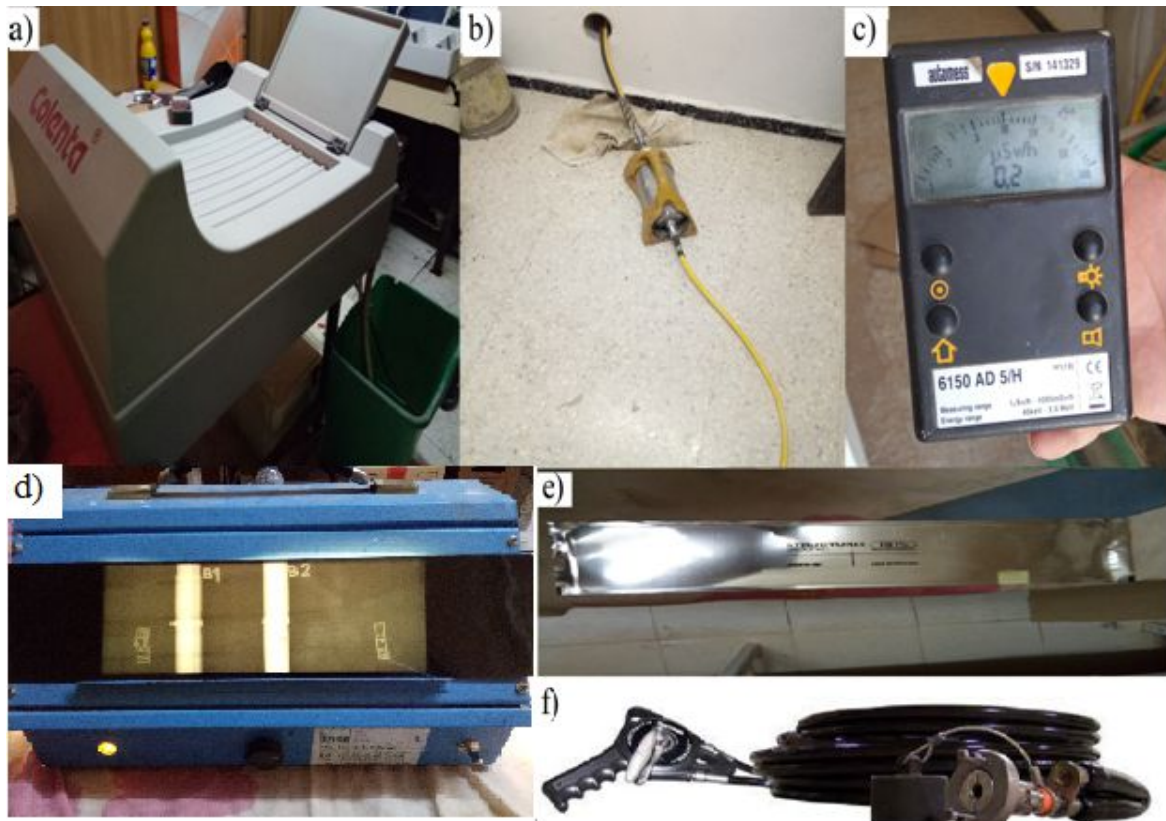


Figure III.11 : Les dispositifs de contrôle par gammagraphie. (a) Machine de développement COLENTA INDX 900 E. (b) Gammagraphes SENTINEL série 880. (c) Dosimètres 6150AD. (d) Négatoscope 10x24. (e) Ecrans renforçateurs au plomb. (f) GAINÉ AMOVIBLE 880 Sigma.

# **Chapitre IV**

## **Résultats et discussions**

## **4. Chapitre -VI- : Résultats et discussions**

### **4.1. Introduction**

Nous divisons le chapitre -IV- à deux temps, dans un premier temps contrôle non destructif des joint de soudure obtenus par friction d'alliage d'aluminium 2017A et un acier A60, puis nous présentons les différents types de défauts observés dans les joints réalisés à différentes conditions de soudage (vitesse de rotation, temps de friction). Dans un deuxième temps, nous présentons les caractérisations mécaniques des cordons de soudure obtenues par procédé de soudage par friction des métaux étudiés.

### **4.2. Soudure des pièces en aluminium 2017A**

Dans ce travail nous utilisons quatre éprouvettes d'aluminium 2017A pour deux conditions variantes (vitesse de rotation, temps de friction), les vitesses de rotation sont 1400 tr/min et 2000 tr/min avec des temps de 30s et 120s. On a essayé les quatre éprouvettes différentes afin de détecter les défauts par deux techniques (contrôle visuel, ressuage), chaque une a :

- ✓ Epreuve 1 :  $N= 1400$  tr/min,  $t=30$  s
- ✓ Epreuve 2 :  $N=1400$  tr/min,  $t= 120$  s
- ✓ Epreuve 3 :  $N=2000$  tr/min,  $t= 30$  s
- ✓ Epreuve 4 :  $N= 2000$  tr/min,  $t=120$  s

#### **4.2.1. Contrôle non destructif**

##### **4.2.1.1. Détecter les défauts de la première éprouvette d'Al 2017A**

La figure IV.1 représente la première éprouvette d'aluminium 2017A avec :  $N= 14000$  tr/min,  $t=30$ s.

En utilisant un thermocouple on a effectué des mesures de différentes températures sur opération de soudage à la fin on a obtenu des résultats indésirables due à la vibration pendant l'opération cette dernière a causé la séparation de la liaison entre thermocouple et l'éprouvette, on n'arrive pas à mesurer la température de cette éprouvette par thermocouple.



Figure IV.1 : éprouvette en aluminium 2017A avec  $t=30$  s et  $N= 1400$  tr/min.

### a. 1<sup>ère</sup> technique : par contrôle visuel

Les défauts représentent dans dommage mécanique à cause de préparation d'éprouvettes pour soudage. Les dommages mécaniques peuvent être définis comme tout dommage de la surface du matériau durant le processus de fabrication et constrictio[n] [27]. On remarque à l'œil nu que la consommation de la matière n'est pas importante due à les conditions suivantes : temps de friction, vitesse de rotation insuffisantes pour un soudage complet (Figure IV.2).



La consommation de la matière  
n'est pas importante

Dommage mécanique

Figure IV.2 : Contrôle de 1<sup>ère</sup> éprouvette d'Al 2017A par contrôle visuel.

**b. 2<sup>ème</sup> technique : par contrôle ressuage**

On peut trouver dans cette technique d'autres défauts comme : manque de fusion à la racine de la soudure, les fissures de surface, inclusion gazeuses à la surface.

La figure IV.3. représente l'opération effectuée dans trois phases : Premièrement on a préparé la surface d'éprouvettes en enlevant toutes les impuretés avec un solvant (Figure IV.3.a), deuxièmement dans cette phase on a utilisé un pénétrant avec une couleur rouge pour arroser l'éprouvette puis on laisse cet dernier un bon moment selon la température de milieu afin de ne pas avoir une couleur rouge sur la surface on a rincé cette éprouvette (Figure IV.3.b), troisièmement dans cette phase en utilisant un révélateur avec une couleur blanche on arrose cette éprouvette en attendant l'apparition de la couleur rouge qui nous donne un indice de défaut existant dans ce cas (Figure IV.3.c).

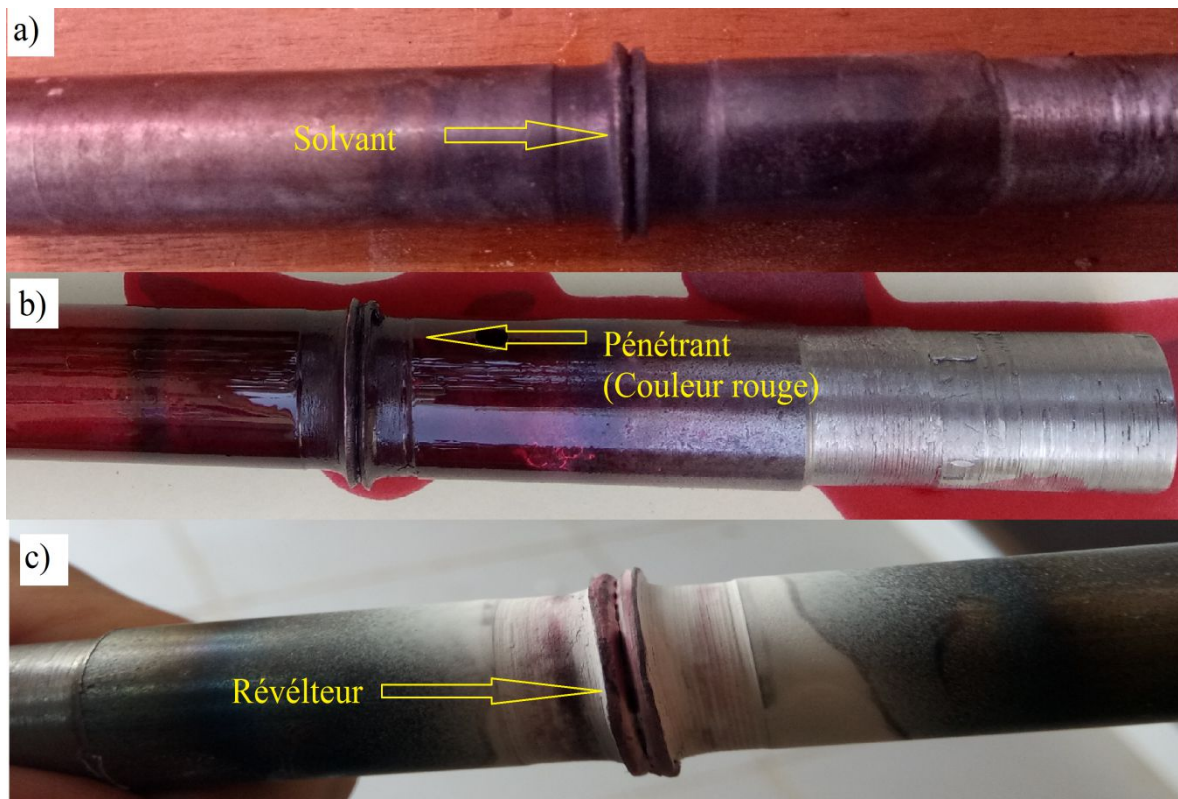


Figure IV.3 : chronologie de l'opération de ressuage. a) Préparation de surface et dégraissage par solvant. b) Application de pénétrant (pénétration). c) le révélateur pour détecter les défauts.

A la fin de cette expérience on remarque sur la première éprouvette une couleur rouge indique le défaut manque de fusion et cela revient aux conditions utiliser (N, t), donc cette éprouvette est refusée (Figure IV.4).

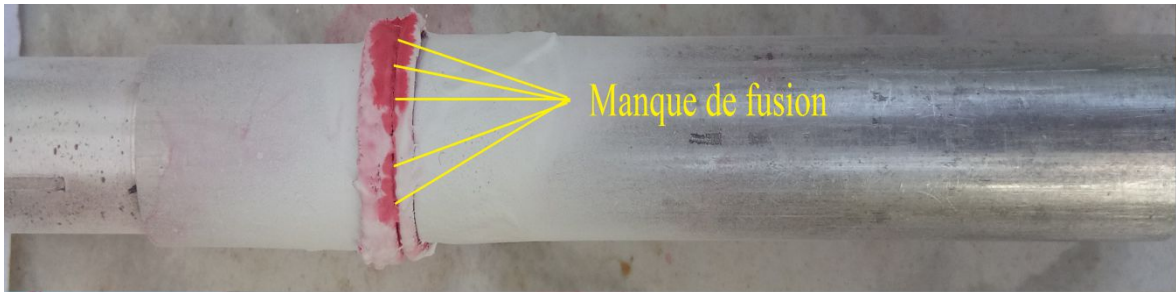


Figure IV.4 : Contrôle de 1<sup>ère</sup> éprouvette d'Al 2017A par ressuage.

#### 4.2.1.2 Détection des défauts de la deuxième éprouvette d'Al 2017A

La figure IV.5 représente un joint de soudure de éprouvette 2 (N= 1400 tr/min, t= 120s) dont on a augmenté le temps de friction t= 120s.



Figure IV.5 : éprouvette en aluminium 2017A avec t=120 s et N= 1400 tr/min.

##### a. 1<sup>er</sup> technique : par contrôle visuel

On remarque l'existence d'un dommage mécanique comme dans les éprouvettes précédente ce défaut est nécessaire pour le travaille. L'apparition des fissures clair dans joint de soudeur avec une consommation importante de la matière, à partir de là on peut conclure que le temps de friction était très grand (120s).

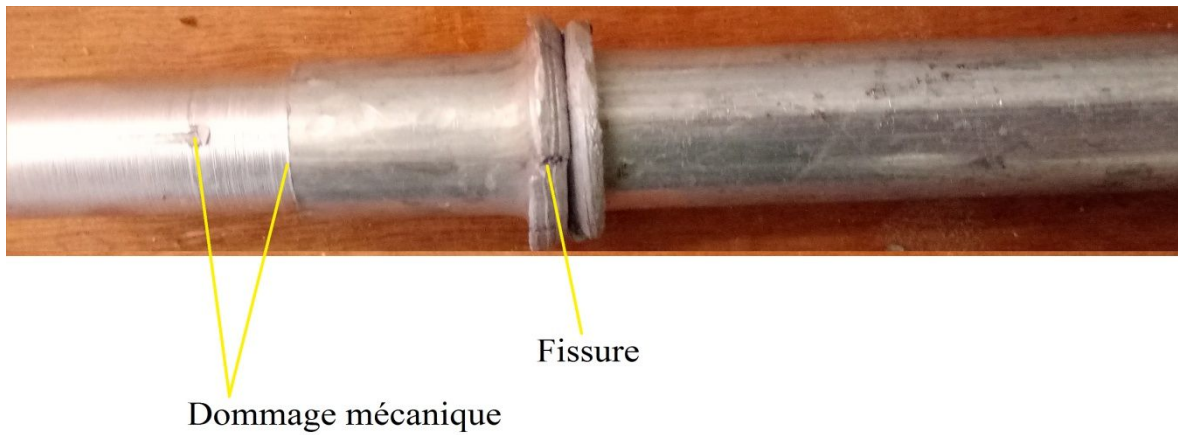


Figure IV.6 : Contrôle de 2<sup>ème</sup> éprouvette d'Al 2017A par contrôle visuel.

### b. 2<sup>ème</sup> technique : par contrôle ressuage

Apparition de couleur rouge clairement dans les fentes ce qui a avoir des fissures et manque de fusion pour cela éprouvette n'ai pas acceptable (Figure IV.7).

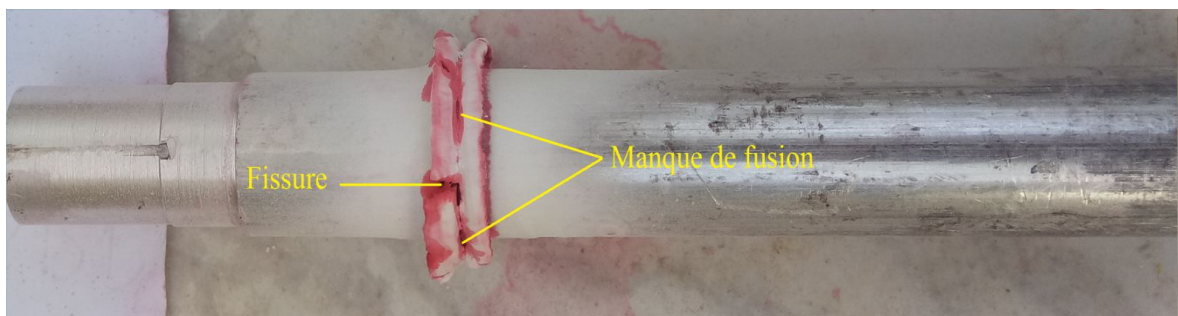


Figure IV.7 : Contrôle de 2<sup>ème</sup> éprouvette d'Al 2017A par ressuage.

### 4.2.1.3. Détecter les défauts de la troisième éprouvette d'Al 2017A

La figure IV.8 représente la troisième éprouvette avec :  $N=2000\text{tr/min}$ ,  $t=30\text{s}$ .



Figure IV.8 : éprouvette en aluminium 2017A avec  $t=30\text{ s}$  et  $N=2000\text{ tr/min}$ .

**a. 1<sup>ère</sup> technique : par contrôle visuel**

On a remarqué l'absence de défaut dans la troisième éprouvette sauf qu'un défaut (dommage mécanique) ce dernier n'ai été pas considérer comme un défaut dans notre soudage avec une consommation de la matière acceptable (Figure IV.9).

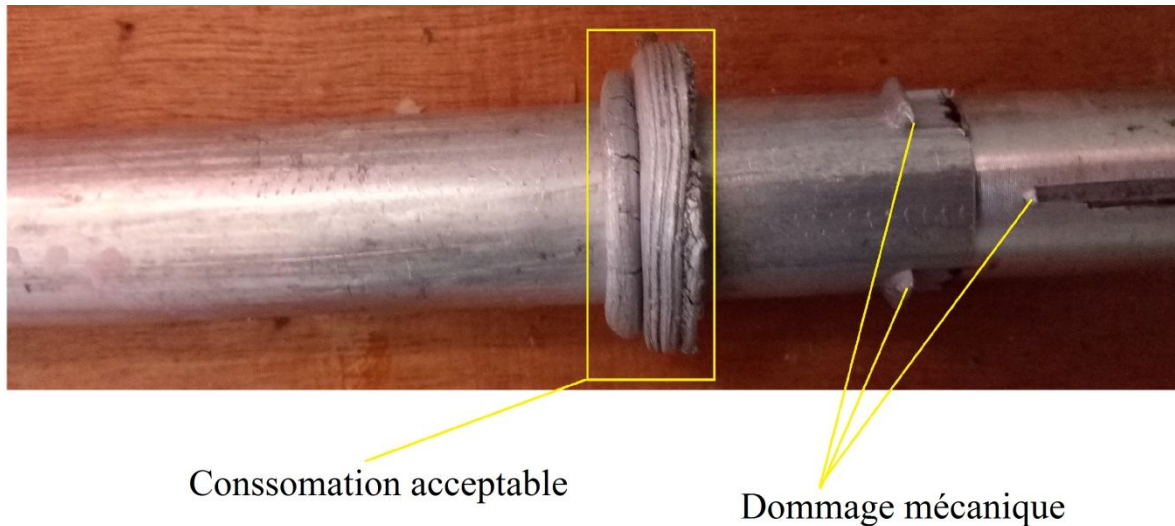


Figure IV.9 : Contrôle de 3<sup>ème</sup> éprouvette d'Al 2017A par contrôle visuel.

**b. 2<sup>ème</sup> technique : par contrôle ressuage**

On a observé l'absence de la couleur rouge par rapport à autres éprouvettes qui indique un soudage sans défaut et tout ça nous a permet d'acceptée ces condition de la troisième éprouvette (Figure IV.10).

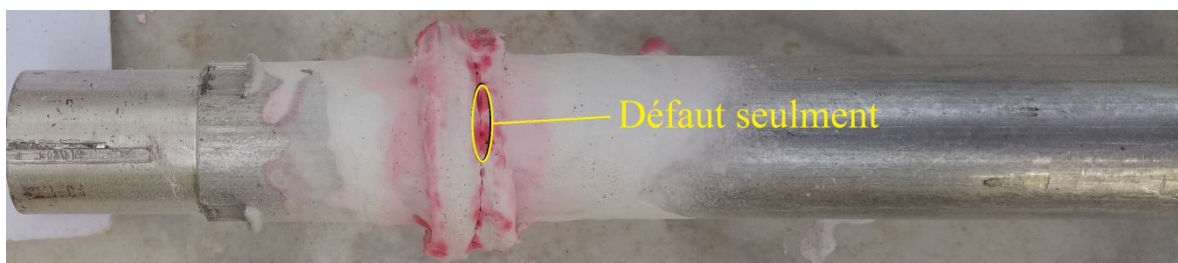


Figure IV.10 : Contrôle de 3<sup>ème</sup> éprouvette d'Al 2017A par ressuage.



#### 4.2.1.4. Détecter les défauts de la quatrième éprouvette d'Al 2017A

La figure IV.11 représente une éprouvette avec :  $N=2000\text{tr/min}$ ,  $t=120\text{ s}$ , comme on peut la considérer initialement et sans essai qu'elle est inacceptable parce que on peut la comparer avec d'autres éprouvettes de 2017A.



Figure IV.11 : éprouvette en aluminium 2017A avec  $t=120\text{ s}$  et  $N= 2000\text{ tr/min}$ .

##### a. 1<sup>er</sup> technique : par contrôle visuel

Dans la quatrième éprouvette (Figure IV.12) on a trouvé des défauts trop clairs tels que : des grandes fissures avec une consommation excessive de la matière et aussi un défaut de dommage mécanique, et pour cela on refuse cette éprouvette et ces conditions nous ne conduisent pas à un soudage acceptable.

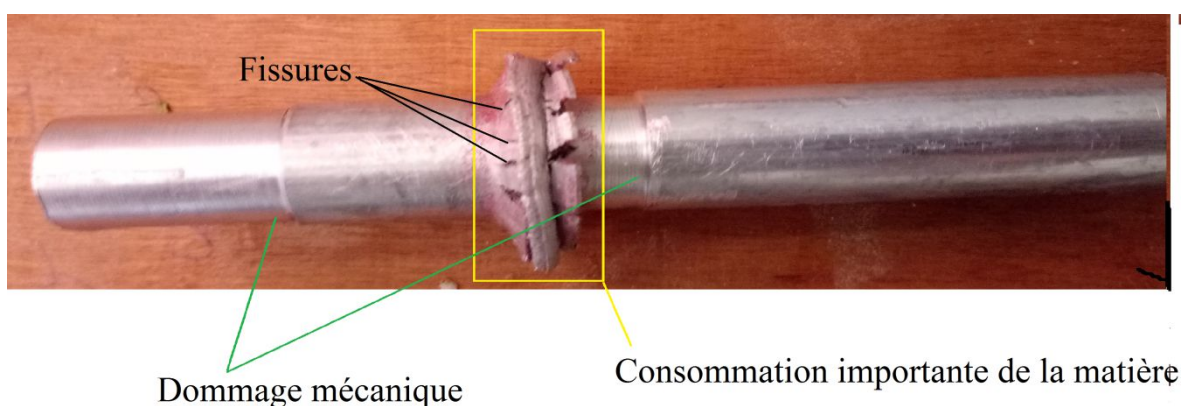


Figure IV.12 : Contrôle de 4<sup>ème</sup> éprouvette d'Al 2017A par contrôle visuel.

### b. 2<sup>ème</sup> technique : par contrôle ressuage

L'apparition claire de la couleur rouge indique la présence de plusieurs défauts comme : les fissures, manque de fusion (Figure IV.13).

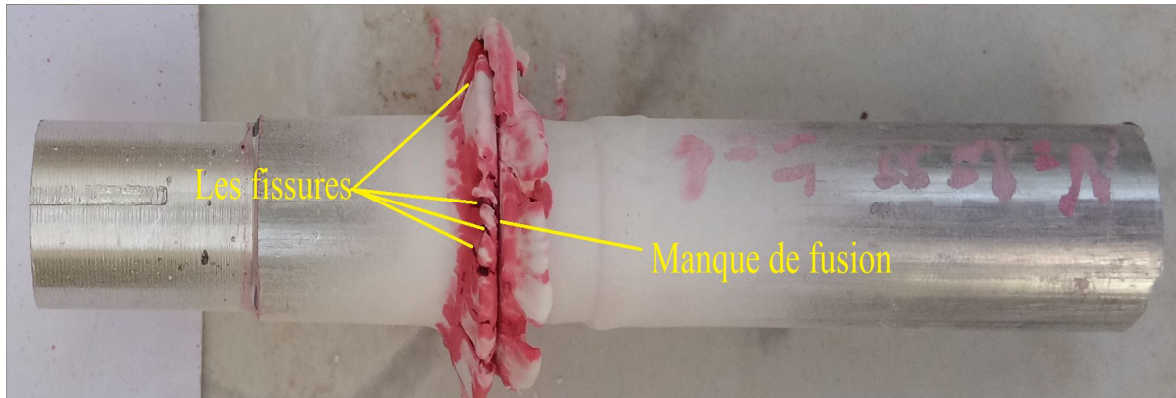


Figure IV.13 : Contrôle de 4<sup>ème</sup> éprouvette d'Al 2017A par ressuage.

### 4.3. Soudure des pièces en acier A60

Pour atteindre un soudage parfait il ne faut obtenir un bon temps de friction (t) et de vitesse de rotation (N) correspondants, et pour cela nous avons essayé sur quelque éprouvette des expériences en fonction de temps de friction (t) et de vitesse de rotation (N).

#### 4.3.1. Contrôle non destructif

##### 4.3.1.1. Détecter les défauts de la première éprouvette en acier A60

La figure IV.14 représente le cordon de la première éprouvette en acier A60 avec le temps de friction  $t = 30s$  et la vitesse de rotation  $N = 2000tr/min$ .



Figure IV.14 : éprouvette en acier A60 avec  $t=30s$  et  $N=2000 tr/min$ .

En utilisant un thermocouple on a effectué des mesureurs de différentes températures sur opération de soudage à la fin on a obtenus des résultats indésirable due à la vibration pendant l'opération cette dernière a causé la séparation de la liaison entre thermocouple et l'éprouvette. Nous mésuserons donc la température aux dépenses la longueur d'apparition d'une trace de propagation d'chaleur dans l'éprouvette (Figure VI.15) dont la longueur  $L_1 = 25$  mm.

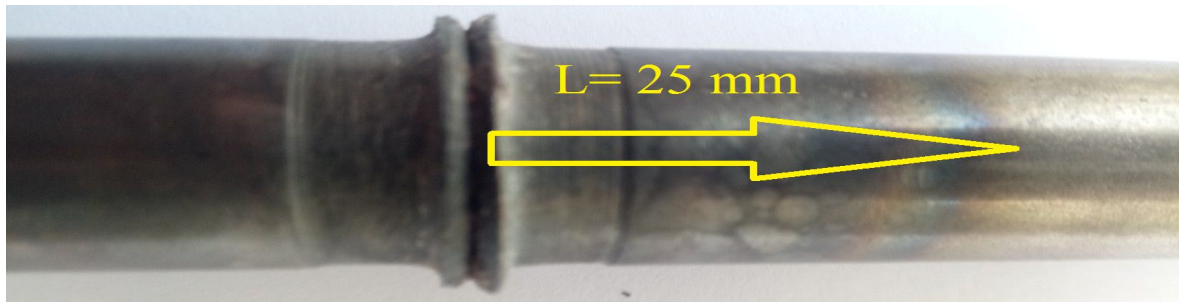


Figure IV.15 : la longueur d'apparition d'une trace de propagation d'chaleur dans la première éprouvette.

Pour détecter des défauts trouvé dans les éprouvettes on fait le contrôle non destructif par trois techniques : contrôle visuel, contrôle ressuage, radiographie ( $\gamma$ ).

#### a. 1<sup>er</sup> technique : par contrôle visuel

Les défauts représentent dans dommage mécanique à cause de préparation d'éprouvettes pour soudage. A partir de cette opération on remarque qu'il y a une consommation acceptable de la matière pondant ce soudage ce qui montre un bon soudage (Figure IV.16).



Figure IV.16 : Contrôle par contrôle visuel de l'éprouvette 1 de l'acier A60.

**b. 2<sup>ème</sup> technique : par contrôle de ressuage**

A la fin de cette expérience on remarque sur la première éprouvette qu'il n'existe presque aucun défaut sauf apparition de la couleur rouge indique le manque de fusion, mais on peut l'accepter. (Figure IV.17).

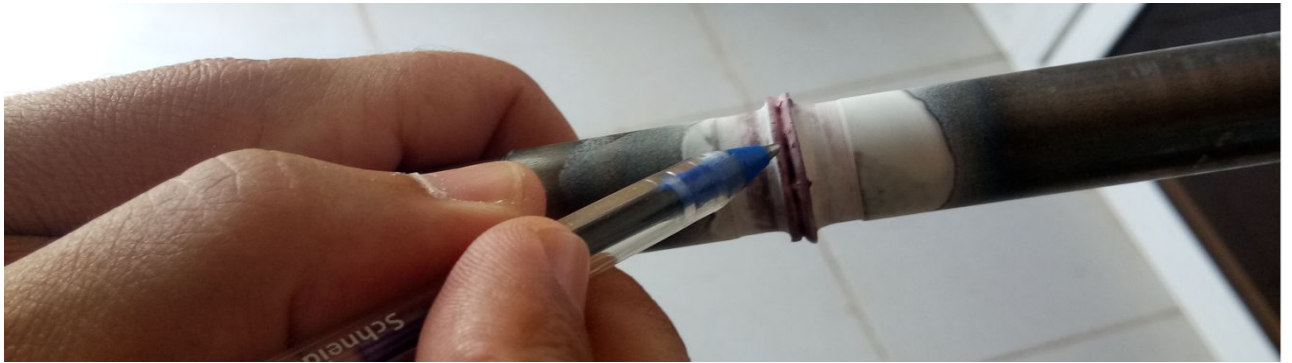


Figure IV.17 : Détecter les défauts de la 1<sup>ère</sup> éprouvette par ressuage.

**c. 3<sup>ème</sup> technique : par radiographie ( $\gamma$ )**

Cette préparation a pour but diriger les rayons gamma ( $\gamma$ ) sur les deux faces de l'éprouvette (face A1, A2) avec un angle de 90 ° où on place l'éprouvette sur le film (Figure IV.6), dans laboratoire on prend ce film sur une machine de développement COLENTA INDX 900 E, on déduit les résultats final de ce film par un Négatoscope.

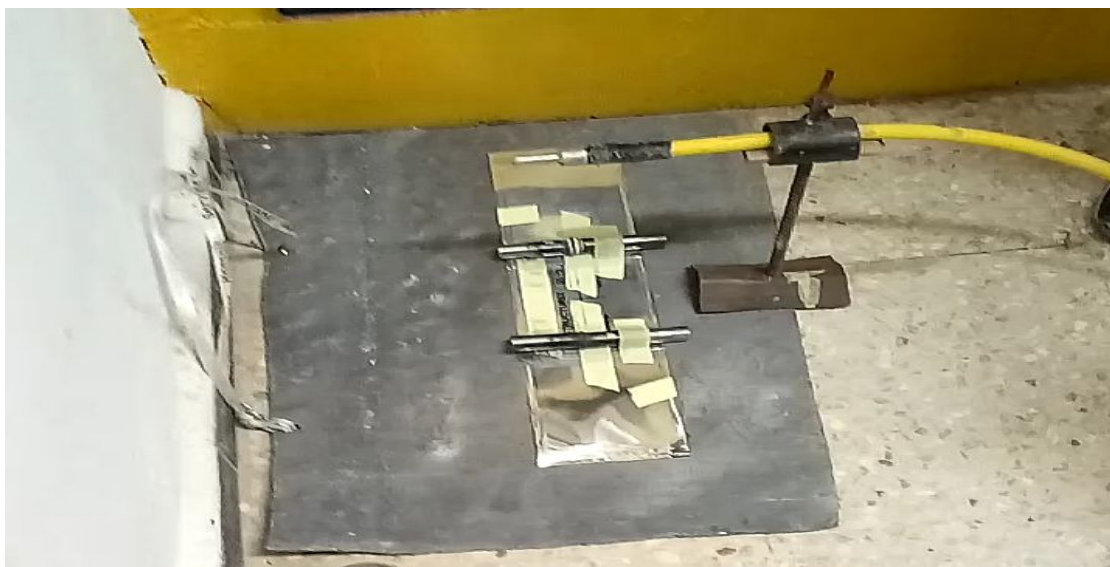


Figure IV.18 : Préparation des éprouvettes pour l'opération de gammagraphe.

La radiographie  $\gamma$  nous a montré qu'il y a un soudage cohésion sauf deux point sur le film indiquent le manque de fusion, mais n'est pas influençant donc on considéré ce soudage acceptable (défauts tolérable selon les codes applicables par exemple API 1104 [27]).

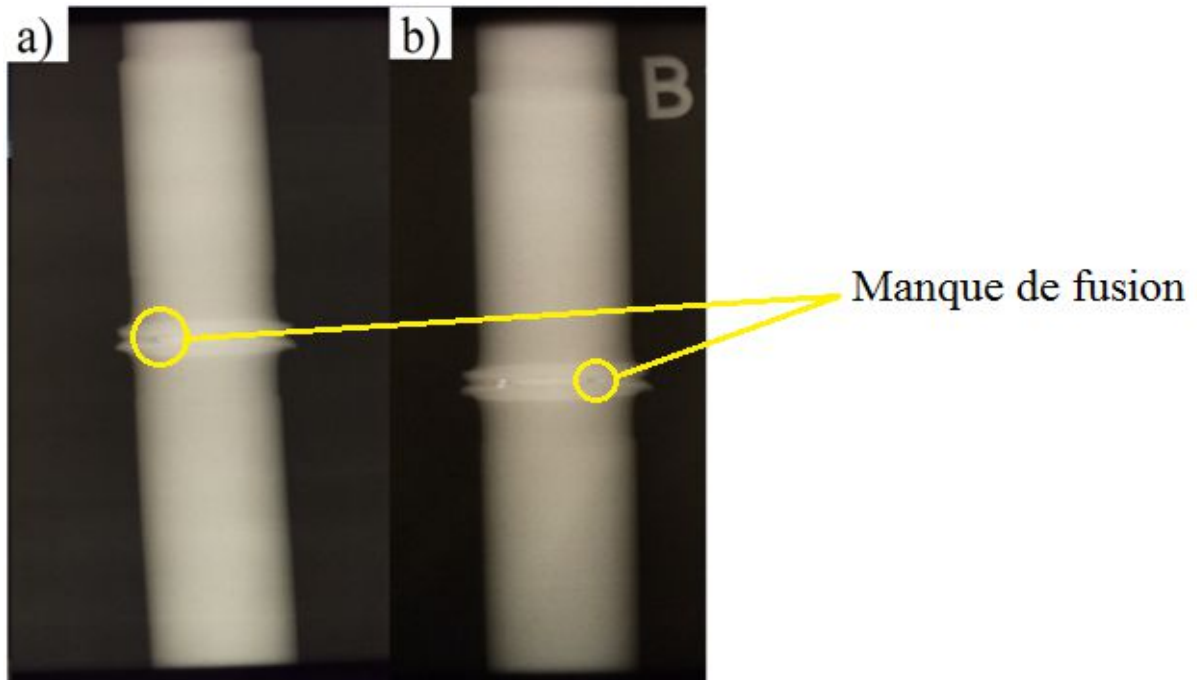


Figure IV.19 : Contrôle de 1<sup>ère</sup> éprouvette d'acier A60 par gammagraphie.(a) Face A.  
(b) Face B.

#### 4.3.1.2. Détecter les défauts la deuxième éprouvette en acier A60

La figure IV.20 représenter joint de soudure avec :  $t = 30s$ ,  $N = 1400tr/min$ , dont la longueur de propagation de chaleur  $L_2 = 19 mm$ , elle est plus petite celle du la première éprouvette  $L_1$ .

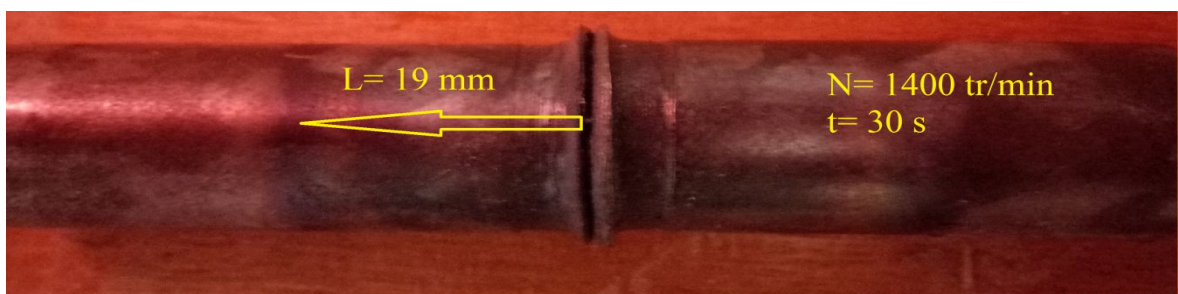


Figure IV.20 : éprouvette en acier A60 avec  $t=30s$  et  $N=1400 tr/min$ .

**a. 1<sup>er</sup> technique : par contrôle visuel**

On observe qu'il y a sur la deuxième éprouvette le même défaut que sur la 1<sup>ère</sup> éprouvette telle que les dommages mécaniques. On remarque qu'il y a un dénivellement et une peu consommation de la matière qui indique vitesse de rotation pendant le temps de friction n'était pas assez pour un bon soudage (Figure IV.21).

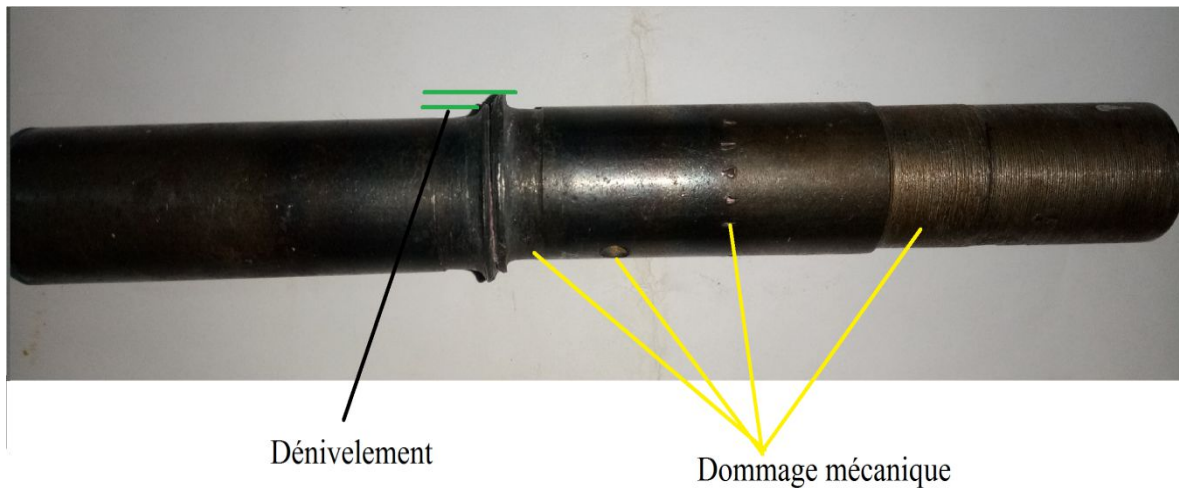


Figure IV.21 : Contrôle de 2<sup>ème</sup> éprouvette d'acier A60 par examen visuel.

**b. 2<sup>ème</sup> technique : par contrôle ressuage**

Apparition de couleur rouge plus que dans la première éprouvette qui montre le défaut de mande de fusion a la racine donc on considère ce défaut inacceptable, ce dernier due à le temps de soudage n'a pas suffisant et par contre la vitesse de rotation suffisant qui confirme la remarque précédente a propos la consommation de la matière de la deuxième éprouvette (Figure IV.22).

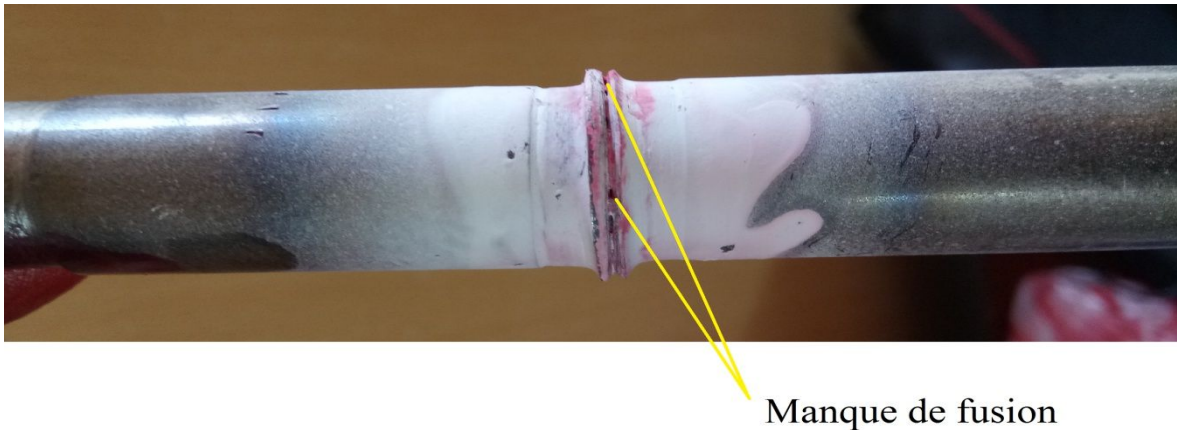


Figure IV.22 : Contrôle de 2<sup>ème</sup> éprouvette d'acier A60 par ressuage.

### c. 3<sup>ème</sup> technique : par la radiographie $\gamma$

D'après le film de 2<sup>ème</sup> éprouvette on remarque une fusion incomplète donc il y a un manque de cohésion moléculaire entre partiels de l'éprouvette avec une présence un dénivellement "face A" (Figure IV.23).

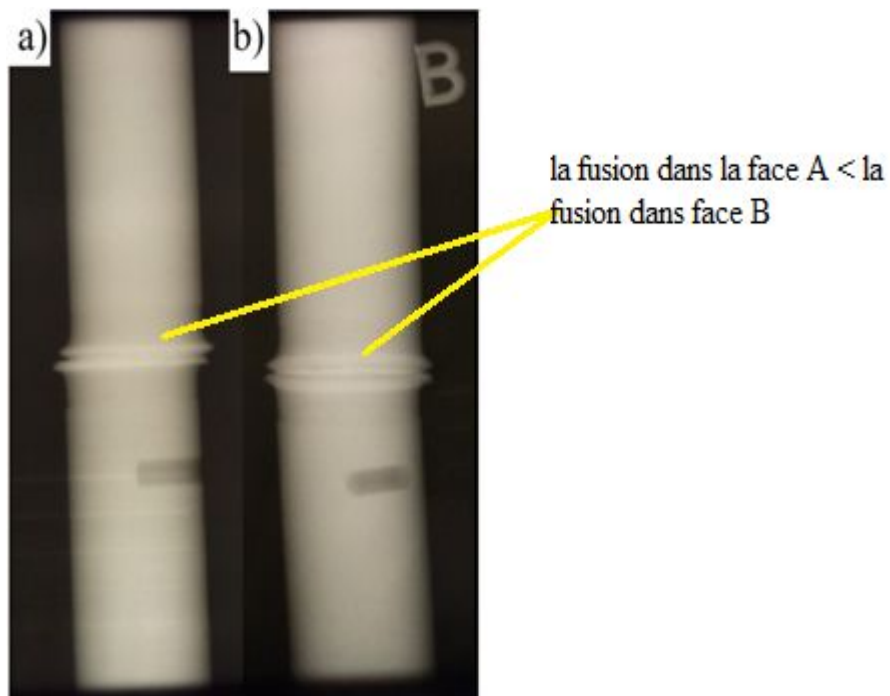


Figure IV.23 : Contrôle de 2<sup>ème</sup> éprouvette d'acier A60 par gammagraphie.

### 4.3.1.3. Détecter les défauts la troisième éprouvette en acier A60

L'éprouvette représentée sur la figure IV.24 avec :  $N=2000$  tr/min,  $t=120$  s, et en muserons la longueur de propagation de chaleur  $L=33$  mm on trouve que celle-ci est trop grande de là on peut conclure que ce degré de chaleur très élevé.



Figure IV.24 : éprouvette en acier A60 avec  $t=120$  s et  $N=2000$  tr/min.

#### a. 1<sup>er</sup> technique : par contrôle visuel

À l'œil nu on remarque une grande consommation de la matière et aussi un dommage mécanique, à cause de temps de soudage  $t=120$  min et vitesse de rotation  $N=2000$  tr/min ces derniers créent un grand défaut important ce qui a conduit à dénivèlement (Figure IV.25)

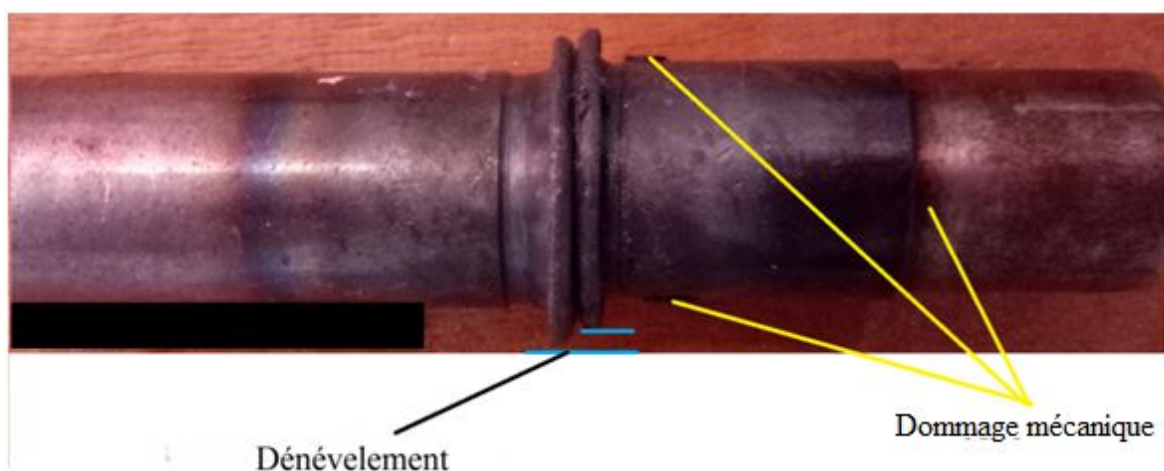


Figure IV.25 : Contrôle de 3<sup>ème</sup> éprouvette d'acier A60 par examen visuel.



**b. 2<sup>ème</sup> technique : par contrôle ressuage**

La figure IV.26 montre les défauts détectés par pénétrants de couleur rouge tels que : les manques de fusion donc la troisième éprouvette n'est pas acceptable.

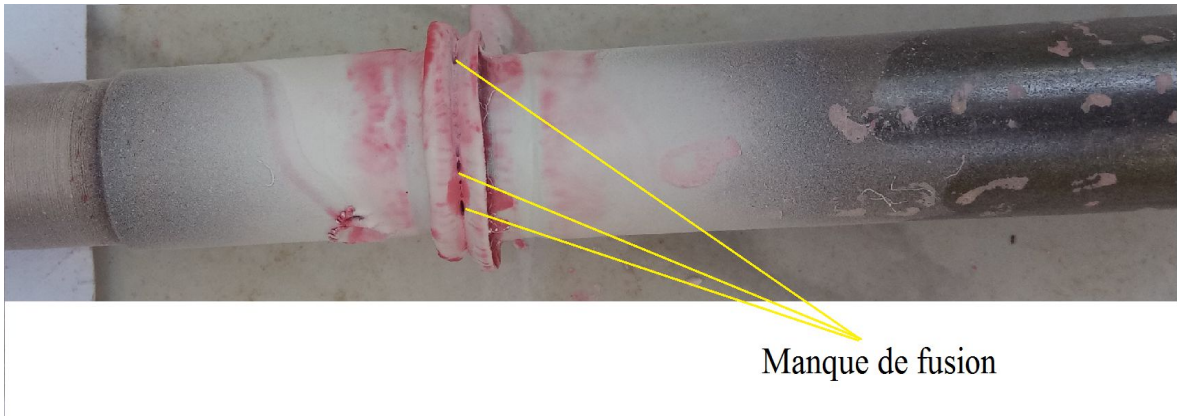


Figure IV.26 : Contrôle de 3<sup>ème</sup> éprouvette d'acier A60 par ressuage.

## Conclusion générale

L'objectif de ce travail avait par but est l'étude de soudage à l'état solide « le soudage par friction » dans l'industrie pétrolière spécifiquement le soudage des tiges de forage, 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 :

- Plusieurs types de défauts sont observés dans un cordon de soudure (Fissure, manque de fusion, manque de pénétration, défauts de forme,...).
- Les techniques de détecter des défauts s'effectuent par un contrôle visuel, le ressuage et la radiographie ( $\gamma$ ).
- Les paramètres de soudage ont une influence sur la résistance du joint, ainsi que sur d'éventuels défauts présents dans le joint.
- La vitesse de rotation optimale pour le soudage par friction soit en acier ou aluminium est 2000 tr/min.
- L'augmentation de temps de friction (supérieure à 30s) provoque une grande consommation de matière de l'éprouvette et des défauts par exemple un dénivèlement.
- La vitesse de rotation moins 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

1-Continuité de 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

2-Etude de l'effet des traitements thermiques sur le comportement du joint soudé par friction.

3-Modélisation de soudage par friction de Stige de forage par le logiciel ABACUS

## Références bibliographiés

1. *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).*
2. *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).*
3. *Gerard, M., thèse « Soudage-diffusion hétérogène assisté par friction malaxage-cas du couple Al/Fe- ». Ecole Centrale de Nantes (18 novembre 2010).*
4. *Merry, G., Soudage et soudabilité métallurgique des métaux. Technique de l'ingénieur, 10 janvier 1994 (M715).*
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 soudage TIG appliqué au titane et ses alliages ainsi qu'aux aciers inoxydables, 2000, Ecole Centrale de Nantes (ESN).*
7. *Anglade, B. ; Horisio 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). (12 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>. (12 avril 2018).*
11. *Sierra, G., Etude métallurgique et mécanique de l'assemblage hétérogène acier/aluminium par les procédé laser et TIG. 2006.*
12. *Bellhadj, A., Contribution à l'étude expérimentale et numérique du soudage laser : Application aux alliages de magnésium, 2009, Paris ENSAM.*
13. *Casez, R., Procédés de soudage : Principes généraux et critères de choix. Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique, 1995 (B7700).*

14. Soudure I.B.D soudage par impulsion magnétique. 2016 ; Available from. <http://www.bil-ibs.be/fr/soudage-par-impulsion-magnétique> (15 avril 2018).
15. Cazes, R., soudage par friction (10/02/1996). *Techniques de l'ingénieur*. <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/soudage-par-friction>. (24 avril 2018).
16. KUKA Industries FRICTION WELDING GERMANY 2016. (24 avril 2018). <http://www.kuka.com/fr/technologies/2016/07/soudage-par-friction>.
17. « Soudage-Coupage » (SYMOP). <http://www.irs.fr>. (24 avril 2018).
18. Pichot, F. ; Corpace, F., *Conception et fabrication des moteurs aéronautiques* (27/03/2014). Groupe SAFRAN (SNECMA).
19. Soudage par friction, CODE ISO : 42. (24 avril 2018) <http://ep-c.fr/servises-indusriel/le-soudage/138-le-soudage-par-friction-html>.
20. <http://www.forage-video.com/manufacturing>. (28 avril 2018).
21. Métaux détail (MDS). <http://www.métaux-détail.com>. (03 mai 2018).
22. Bailon, J.P. ; Dorlot, J.M., « Des matériaux » troisième édition. Presses Internationales Polytechnique.
23. Hadjdaj, S., *Cours de module « CND » 3<sup>ème</sup> LMD Mécanique des chantiers pétroliers* (UKMO).
24. <http://www.enst.dz/conferanceTCND/CONTROLE-NON-DESTRUCTIF>. (15 mai 2018)
25. Bencharef, M.K., *Les défauts de soudage*. Octobre 2011 « YAMANI INSTITUTE OF TECHNOLOGY » COSIDER Canalisation Biskra.
26. Bouharid, M., *Chef service de CND «COSIDER Canalisation. Oumache. BISKRA. »*

**Résumé :**

Le soudage par friction est classé avec les procédés de soudage à l'état solide, il a plusieurs avantages par rapport les autres procédés de soudage et il existe dans plusieurs domaines d'application (L'industrie pétrolière, automobiles, aéronautique et du spatial, ...). Le but de ce travail est la réalisation et l'étude de technique soudage de tige de forage « soudage par friction ». Nous avons aussi examiné les effets de certains paramètres de soudage par friction, tels que la vitesse de rotation et le temps de friction. Nous avons utilisé plusieurs méthodes de caractérisation, simples mais efficaces et adaptée à ce genre de travaux de recherche ; tels que l'essai de traction et le contrôle non destructif comme l'examen visuel, le ressuage et la radiographie ( $\gamma$ ) pour détecter les défauts dans chaque éprouvette, et à savoir l'effet les conditions énoncées (vitesse de rotation, temps de friction). Nous avons observé que l'augmentation de la vitesse de rotation avait diminué les défauts du joint soudée. Lorsque le temps de friction augmente, la charge traction augmente. Finalement, nous avons noté que La vitesse de rotation optimale pour le soudage par friction soit en acier ou aluminium est 2000 tr/min.

**Mot clés :** soudage par friction, soudage à l'état solide, industrie pétrolière, acier, aluminium, vitesse de rotation, temps de friction, défauts.

**Abstract :**

Friction welding is classified with the welding processes in solid state , it has several advantages relative to other welding processes and applied in many fields (petroleum industry, automotive, aviation and space, etc.). The aim of this action is to make and study welding drilling columns "friction welding. We test the effects settings such as rotation speed and time of friction, we used several analytical methods are simple, but effective and appropriate for this kind of research, as mechanical tests tensile test and also used non destructive control such as Visual inspection, liquid penetrant The pervasive and radiography ( $\gamma$ ), in order to detect defects in each sample, and see the impact conditions (rotation speed and time of friction (. noted that the increase in rotational speed has reduced defects of welded joint with increasing time of friction increases pregnancy. Finally, we noticed that the secret -Optimum welding turnover is steel or aluminum 2000 RPM

**Key words:** friction welding, solid state welding, petroleum industry, steel, aluminum, speed of rotation, time of friction, defects.

### ملخص :

يصنف لحام الاحتكاك مع عمليات اللحام في الحالة الصلبة ، و له عدة مميزات بالنسبة إلى عمليات اللحام الأخرى و يطبق في العديد من الميادين (الصناعة البترولية ، السيارات ، الطيران و الفضاء ، ...). الهدف من هذا العمل هو تحقيق و دراسة لحام أعمدة الحفر "لحام الاحتكاك" . حيث قمنا باختبار تأثيرات الإعدادات مثل سرعة الدوران و زمن الاحتكاك ، لقد استخدمنا عدة طرق تحليلية بسيطة و لكنها فعالة و ملائمة لهذا النوع من البحوث ، كالاختبارات الميكانيكية مثل تجربة الشد و أيضا استعملنا المراقبة اللاإتلافية مثل الفحص البصري واختبار اختراق السائل المتغلغل و التصوير بالأشعة ( $\gamma$ ) ، و ذلك من أجل كشف العيوب الموجودة في كل عينة ، و منه معرفة تأثير الشروط المطروحة (سرعة الدوران و زمن الاحتكاك ) . لاحظنا أن الزيادة في سرعة الدوران قد قللت من عيوب المفصل الملحوم. مع زيادة وقت الاحتكاك، يزيد الحمل الشد. وأخيرًا ، لاحظنا أن سرعة دوران اللحام المثلى هي الفولاذ أو الألمونيوم 2000 دورة في الدقيقة.

**الكلمات المفتاحية:** لحام الاحتكاك ، اللحام في الحالة الصلبة ، الصناعة البترولية ، الفولاذ ، الألمنيوم ، سرعة الدوران ، زمن الاحتكاك ، العيوب .