

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Techniques de production industrielle

Thème

Le soudage par friction des alliages d'aluminium 6063

Présenté par :

- SALEM Wassim
- &
- ZELLAGUI Mohammed

Encadré par:

- SAIB Cherif
- & Co-Encadré par :
- BENLAMNOUAR MOHAMED-FARID

Devant le jury composé de :

<u>NOM et Prénom</u>	<u>Grade</u>	<u>Qualité</u>
HEBICHE Nouredine Anwar.....	MAA-UMB M'sila	Président
SAIB Cherif	MCA-UMB M'sila	Encadreur
BENLAMNOUAR Mohamed-Farid	CP- CRTI Chéraga-Alger	Co-Encadreur
BECHENE Leila	MCB-UMB M'sila	Examinatrice

Année Universitaire : 2022 / 2023

N° d'ordre : GM/...../2023

**« L'idée à qui tout cède et qui toujours éclaire
Prouve sa sainteté même dans sa colère.
Elle laisse toujours les principes debout.
Être vainqueur, c'est peu ; mais être grands, c'est tout. »**
(Victor Hugo – Les Châtiment)



DEDICACES

A ma très chère mère

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier
Comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me
guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les
différents obstacles.*

A mon très cher père

*Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.
Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.*

*A mes très chers frères Mehdi, Halim et Ahmed charif et leurs épouses, et mes belles
sœurs Fati et Nassima et leurs maris*

Toute ma famille

A tous mes autres amis,

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

(SALEM Wassim)





DEDICACES

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU

*De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail. Je tiens
à dédier cet humble travail à*

: A ma tendre mère et mon très cher père

A mes sœurs

A mes chères tantes A mes chères sœurs A mes frères

: A mon binôme Wassim

A mes amis proches

Tous ceux qui m'aiment et que j'aime

(ZELLAGUI Mohammed)



Remerciements



Nous remercions dieu, le tout puissant, qui nous a donné le courage et la patience durant toute la période de réalisation de ce travail.

Nous tenons à exprimer notre vifs remerciements et notre sincère gratitude à notre directeur de thèse, monsieur SAIB CHERIF, enseignant à l'université de M'sila, d'avoir accepté de diriger cette thèse.

Nous le remercions pour ses conseils, ses discussions scientifiques et son aide considérable afin de mener à bien ce travail.

Nous souhaitons également transmettre nos remerciements à toutes les personnes qui nous ont consacré du temps durant ces deux semaines surtout Mr BENLAMNOUAR Mohammed Farid ainsi que l'ensemble des employés de CRTI (Centre de recherche en technologies industrielles de chéraga).

Notre profonde gratitude va aussi aux membres de jury qui ont bien voulu nous faire l'honneur de participer au jury.

Enfin, Nous remercions sans exception, tous nos amis, tous les collègues et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Sommaire

Dédicaces.....	
Remerciement.....	
Sommaire.....	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
INTRODUCTION GENERALE	
1	
CAHAPITRE I : Soudage par friction des alliages d'aluminium	3
I.1. Les alliages d'aluminium.....	4
I.1.1 Ou se trouve l'aluminium	4
I.1.2 qu'est-ce qu'un alliage d'aluminium.....	5
I.1.3 Toujours un alliage et jamais à l'état pur	5
I.1.4 Un monde d'alliage d'aluminium.....	6
I.1.5 Les catégories des alliages d'aluminium.....	7
I.2 Les séries d'aluminium.....	7
I.2.1 Série 1000.....	7
ALLIAGES THERMODURCISSABLES.....	
I.2.2 Série 2000.....	8
I.2.3 Série 6000.....	8
I.2.3 Série 7000.....	8
ALLIAGES NON THERMODURCISSABLES.....	
I.2.5 Série 3000	9
I.2.6 Série 4000	12
I.2.7 Série 5000.....	12
I.3 Caractéristiques des alliages d'aluminium série 6000.....	12
I.3.1 Etude d'alliage d'aluminium série 6000.....	13
I.3.2 Eléments d'addition d'aluminium série 6000.....	14
I.3.3 Composés et précipitation.....	14
I.4 Soudabilité des alliages d'aluminium.....	15
I.4.1 Soudabilité globale.....	15
I.4.2 Soudabilité opératoire.....	16
I.4.3 Soudabilité métallurgique	16
I.4.3 Métaux d'apport.....	17
CAHAPITRE II : Les types de soudage.....	18
II.1 Définition de soudage.....	19
II.1.1 Les procédés de soudage.....	19
II.2 Le soudage par pression.....	20
II.2.1 Définition de soudage par friction.....	20
II.2.2 Type de soudage par friction.....	21
II.2.3 Soudage par friction linéaire	21
II.2.4 Soudage par friction malaxage.....	21
II.2.6 Principe du soudage par friction rotative	22
II.3 Paramètres du soudage par friction	23
II.3.1 Vitesse de rotation.....	23
II.3.2 Pression.....	23
II.3.3 Temps	23
II.3.4 Mécanismes de soudage par friction rotative.....	24
II.3.4.1 Phase de friction.....	24
II.3.4.2 Phase de forgeage	24
II.4 Défauts de soudage.....	24
II.4.1 Flash.....	24
II.4.2 Manque de parallélisme entre les épaulements.....	25

II.4.3 Conflits d'écoulement.....	25
II.4.4 Défaut de type cavit.....	25
II.4.5 Plan de joint résiduel ou joint line Remnant.....	25
II.5 Applications du soudage par friction rotative.....	25
II.5.1. Avantages et limites du soudage par friction rotative.....	26.
II.6 Caractéristiques d'un joint soudé.....	26
II.6.2 Ecoulements de matière.....	27
II.7. La zone de la fusion ZF.....	28
II.7.1 Méthode de la zone fondue.....	28
II.7.2 Principe de la technique.....	28
II.8. La zone du fusion ZAT.....	29
II.8.2 Distribution des tissus.....	30
II.8.3 Performance.....	30
II.8.4 Durcissement.....	31
CHAPITRE III : Matériaux et Procédures Expérimentales.....	32
III.1. Matériau de base.....	33
Catégorie d'aluminium 6063.....	33
MACHINE A SOUDER.....	33.
III.3. Procédures de soudage.....	35
III.3.1. Préparation des pièces à souder par friction :.....	35
III.3.2. Soudage des éprouvettes.....	35
Processus.....	36
III.3.3. Les paramètres d'usinage.....	37
Usinage des éprouvettes.....	37
III.5. Caractérisation mécaniques des éprouvettes soudées.....	38
III.5.1. Essai de dureté vickers.....	38
III.5.2. Essai de Traction.....	39
CHAPITRE IV : Résultats & discussions.....	41
IV.1. La première partie.....	42
IV.1.1 Les résultats de l'essai de dureté.....	42
IV.1.1.1 Les éprouvettes 1/2/3.....	42
IV.1.1.2 Les éprouvettes 4/5/6.....	43
IV.1.1.3 Les éprouvettes 7/8/9.....	44
Observation.....	45
Résultat.....	45
IV.1.2. Les résultats de l'essai de traction.....	46
IV.1.2.1. Des éprouvettes 1/2/3.....	46
IV.1.2.2. Des éprouvettes 4/5/6.....	47
IV.1.2.3. Des éprouvettes 7/8/9.....	47
Interprétation de résultats.....	49
IV.1.3. Tableau des résultats.....	49
IV.2. La deuxième partie : l'optimisation des paramètres de soudage par friction.....	49
IV.2.1. Définition du logiciel « MINITAB ».....	49
IV.2.2. Les analyses de Taguchi.....	49
IV.2.3. Les analyses de régression.....	51
IV.2.4. La méthode ANOVA totalement emboîtée.....	55
IV.2.5. Le test de conformité.....	55
Conclusion générale.....	57
Bibliographie.....	59

LISTE DES FIGURES

<i>Figure I.1. Alliage d'aluminium.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I.2. La zone affectée thermiquement.....</i>	<i>15</i>
<i>.Figure II.1 Les procédés de soudage.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure II.2. Principe de Soudage par friction linéaire</i>	<i>21</i>
<i>Figure II.3. Soudage par friction malaxage et linéaire.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure II.4. Illustration schématique des différentes zones de la soudure par friction rotative.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure II.5. La zone fondue.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure II.6. Les zones ZAT et ZF.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure II.7. Les zone de soudage.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure II.8. Les zones de soudage.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure III.1. Schéma d'un machine de soudage.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure III.2. La machine de soudage par friction rotative utilisée.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure III.3. Les barres d'alliage d'aluminium.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure III.4. Le principe du soudage.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure III.5. Le principe du soudage.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure III.6. Montre l'opération d'usinage d'une éprouvette.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure III.7. Les éprouvettes après usinage.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure III.8. Appareil de mesure de dureté.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure III.9. Appareil de traction.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure IV.1. Graphique de dureté des ép 1/2/3.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure IV.2. Graphique de dureté des ép 4/5/6.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure IV.3. Graphique de dureté des ép 7/8/9.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure IV.4. Exemple d'essai de dureté.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure IV.5. L'essai de traction des ép 1/2/3.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure IV.6. Graphique d'essai de traction des ép 4/5/6.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure IV.7. Graphique d'essai de traction des ép 7/8/9.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure IV.8. Les éprouvettes après l'essai de traction.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure IV.9. Représentation a) des principaux moyennes et (b) rapport S/B pour Hv MB.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure IV.10. Représentation a) des principaux moyennes et (b) rapport S/B pour Hv ZAT.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure IV.11. Représentation b) des principaux moyennes et (a) rapport S/B pour Hv ZF.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure IV.12. Représentation b) des principaux moyennes et (a) rapport S/B pour E (Mpa)...</i>	<i>51</i>
<i>Figure IV.13. Représentation a) des principaux moyennes et (b) rapport S/B pour Rm (Mpa)</i>	<i>51</i>
<i>Figure IV.14. Diagramme de Pareto des effets normalisés (Hv MB).....</i>	<i>52</i>
<i>Figure IV.15. Diagramme de Pareto des effets normalisés (Hv ZAT)</i>	<i>52</i>
<i>Figure IV.16. Diagramme de Pareto des effets normalisés (Hv ZF)</i>	<i>53</i>
<i>Figure IV.17. Diagramme de Pareto des effets normalisés (E)</i>	<i>54</i>
<i>Figure IV.18. Diagramme de Pareto des effets normalisés (Rm).....</i>	<i>54</i>
<i>Figure IV.19. Diagramme 3D de pourcentage de contribution des facteurs.....</i>	<i>55</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau I.1. Les caractéristiques des séries d'aluminium.....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau I.2. Les caractéristiques de série 6000 d'aluminium.....</i>	<i>13</i>
Tableau III.1. Composition chimique de l'alliage d'aluminium 6063.....	33
Tableau III.2. Caractéristiques des machines utilisées dans le soudage par friction.....	33
Tableau III.3. Les caractéristiques de machine de soudage.....	34
Tableau III.4. Les paramètres de soudage.....	36
Tableau IV.1. La distribution des paramètres de soudage par friction sur les éprouvettes	42
Tableau IV.2. La dureté des éprouvettes 1/2/3.....	43
Tableau IV.3. La dureté des éprouvettes 4/5/6.....	43
Tableau IV.4. La dureté des éprouvettes 7/8/9.....	44
Tableau IV.5. Les résultats pratiques.....	49
Tableau IV.6. Test de conformité.	55

Introduction générale



twinkl

L'étude des procédés de soudage semble être un domaine de recherche aussi simple que complexe, car il nécessite une combinaison de connaissances issues de différents domaines de la physique et de la mécanique. La plupart des procédés sont associés à des phénomènes aussi divers, modifications de la microstructure des matériaux soudés, échanges thermiques et apparition de contraintes résiduelles.

Parmi tous les procédés de soudage que nous avons étudiés et mis en œuvre, il existe un procédé de soudage par friction qui semble relativement nouveau par rapport aux autres procédés de soudage. Cependant, la curiosité de la recherche et les espoirs placés dans ce nouveau procédé nous ont conduit à entamer des recherches expérimentales sur celui-ci.

L'explication de cet énorme développement réside dans la capacité de traitement, les alliages d'aluminium, en particulier les alliages à durcissement par précipitation (séries 2000, 5000, 6000, 7000), qui sont de plus en plus utilisés dans l'industrie (industrie automobile, navale et terrestre) et surtout dans l'industrie aérospatiale, être utilisé pour remodeler les ailes des avions. Par conséquent, le matériau pour une telle application doit avoir à la fois une faible densité et de très bonnes propriétés mécaniques. Les alliages d'aluminium offrent l'un des meilleurs compromis entre ces deux propriétés : densité/propriétés mécaniques.

Par conséquent, dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude des matériaux de soudage en alliage d'aluminium.

Cependant, ces alliages sont difficiles à souder de manière classique, voir par exemple le soudage à l'arc qui reste une technique appréciée dans son domaine en raison de son coût. La conséquence de ce processus dans les alliages avec écrouissage est la modification de la microstructure du matériau de base et donc de ses propriétés mécaniques.

Bien que le rivetage soit toujours la principale méthode d'assemblage, une méthode pourrait consister à éliminer les rivets utilisés pour assembler les tôles, en utilisant un procédé de soudage adaptatif utilisé dans les grandes industries comme l'aérospatiale. Jusqu'à récemment, seuls les rivets et les vis étaient utilisés comme liants. Cependant, ces procédés présentent plusieurs inconvénients en plus de la pénalité de masse et du joint irrégulier entre les deux tôles. Premièrement, le rivetage est associé à de fortes concentrations de contraintes non négligeables qui dégradent évidemment la résistance mécanique des fixations, notamment celles responsables de la formation de fissures de fatigue. Le deuxième problème est lié à la faible résistance à la corrosion des structures rivetées. Enfin,

La défaillance des structures et des composants mécaniques n'est pas seulement causée par des charges externes ; Les contraintes résiduelles jouent un rôle important en lien avec les différentes propriétés des matériaux (fatigue, corrosion ou rupture). Les contraintes résiduelles sont des contraintes qui subsistent dans une structure ou une pièce mécanique en l'absence de contraintes

extérieures. Ils interviennent dans de nombreuses pièces mécaniques et ont une origine thermique (trempe, soudure, ...), mécaniques (abrasion, polissage...) ou métallurgiques.

Le but de ce travail est de présenter ce type de soudage dans nos ateliers et d'étudier ses propriétés physiques, notamment la rigidité des éléments soudés et ses avantages.

Ce travail comporte quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre nous avons parlé sur les alliages d'aluminium (catégories et caractéristiques) en général et les séries d'aluminium (séries 1000 2000 3000 4000 6000 et 7000) et les propriétés de série 6000 et leurs éléments d'addition, composés et précipitation et enfin nous parlons de soudabilité des alliages d'aluminium.

- Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude du procédé de soudage en générale et le soudage par friction, dont nous avons donné beaucoup de détails sur ce procédé, son principe, ces types, ces avantages, ... etc.

- Dans le troisième chapitre nous avons parlé sur le matière utilisé « Aluminium 6063 » et procédure de soudage, préparation des échantillons normalisées au sein de l'Atelier de mécanique à l'Université de M'sila et le centre de recherche CRTI « CHERAGA » avec des moyens proches de la machine réelle, suivi par des essais effectués pouvoir vérifier certaines caractéristiques mécaniques des éprouvettes soudées au niveau du joint de soudure.

- Le dernier chapitre rapporte tous les résultats obtenus avec les commentaires, les interprétations et la discussion.

- A la fin de cette thèse, nous trouverons une conclusion générale suivie par des perspectives.

CHAPITRE I

Soudage par friction des alliages d'aluminium



I.1. Les alliages d'aluminium :

Les alliages d'aluminium : quels sont les principaux et à quoi servent-ils ? L'aluminium est un métal clé pour la conversion d'énergie. Le fait qu'il ne soit pas utilisé sous sa forme pure comme le fer, bien qu'il soit produit spécifiquement pour la fabrication de l'aluminium, rend la connaissance des alliages d'aluminium indispensable dans l'industrie. Dans certains cas, il est déjà possible de prédire les propriétés de l'alliage en fonction de la proportion des éléments déterminée par l'intelligence artificielle. L'aluminium est un métal tendance. Ses principales caractéristiques, telles que la résistance et la légèreté, en font un métal de plus en plus intéressant et parfois indispensable pour de nombreux secteurs. Le processus qui va du dépôt à notre canette, au cadre de notre fenêtre, à la batterie de notre voiture électrique ou à l'avion qui nous emmène en vacances et bien d'autres endroits où il se trouve, se caractérise par deux circonstances : Bien que c'est l'un des éléments les plus courants sur terre, il est économiquement judicieux de l'extraire uniquement du minerai de bauxite et sa forme pure n'est pas utilisable dans l'industrie, des alliages d'aluminium sont utilisés. Après nos articles sur l'aluminium (son recyclage et ses usages), nous vous présentons dans cet article les principaux alliages de ce matériau.

I.1.1 Où se trouve l'aluminium ?

L'aluminium est l'un des éléments chimiques les plus abondants de la croûte terrestre, le troisième seulement après l'oxygène et le silicium, et le cinquième en termes de tonnes extraites des gisements minéraux. Cependant, tous les minerais d'aluminium ne sont pas économiques à extraire : pratiquement tous sont produits à partir de bauxite, une roche sédimentaire à haute teneur en aluminium que l'on trouve couramment dans les climats tropicaux et subtropicaux humides. Ainsi, l'Australie, la Chine, la Guinée et l'Inde sont les principaux pays producteurs de bauxite. Si seule l'exploitation de la bauxite est économiquement avantageuse pour l'extraction de l'aluminium, c'est parce qu'elle est facilement soumise à un processus de lessivage : l'aluminium est déplacé par le mouvement de l'eau dans le sol, ce qui peut facilement se produire dans un climat humide tel que tropical ou subtropical. . Après cette lixiviation, l'aluminium passe par d'autres étapes, par ex. B. précipiter la solution sous forme d'alumine, qui est ensuite calcinée pour produire de l'alumine. L'ensemble de ce processus s'appelle le processus Bayer. Selon le procédé Bayer, l'alumine doit être fondue en le dissolvant dans un bain de cryolithe fondue, qui élimine l'aluminium fondu par électrolyse. Cette partie s'appelle le procédé Hall-Héroult. Les principaux pays producteurs d'aluminium à partir de bauxite, c'est-à-dire réalisant cette dernière transformation, sont généralement des pays où l'électricité est moins chère car l'électrolyse implique une forte consommation d'« énergie ». Ainsi, le recyclage de l'aluminium (dont nous parlons dans cet article)

CHAPITRE I : Soudage par friction des alliages d'aluminium est devenu indispensable pour l'avenir. Parmi ces pays figurent le Canada, où l'électrolyse nécessaire

est assurée par l'énergie hydroélectrique, mais aussi la Chine, l'Inde et la Russie (premier, deuxième et troisième, juste devant le Canada). Le processus de fabrication de l'aluminium ne s'arrête cependant pas là. Après ces phases, un processus d'alliage avec d'autres métaux est nécessaire pour pouvoir l'utiliser pour diverses applications industrielles.

1.1.2 Qu'est-ce qu'un alliage d'aluminium ?

Le terme "alliage" n'est certainement pas étranger à la plupart d'entre nous. C'est un mélange de matériaux métalliques, dans ce cas un alliage d'aluminium est un mélange d'aluminium et d'autres métaux. Mais passons aux choses plus techniques et voyons ce qu'est exactement un alliage. Le terme "alliage" est réservé uniquement à un mélange de deux ou plusieurs matériaux dont au moins l'un est un métal. Une autre caractéristique distinctive de l'alliage est qu'il devait être forgé à des fins humaines. En d'autres termes : dans la nature, nous ne trouvons pas d'alliages qui apparaissent spontanément, mais ce sont toujours des processus qui se déroulent entre les mains de l'homme. Par exemple, un mélange d'éléments de bauxite ne peut pas être considéré comme un alliage. De plus, il s'agit d'un état d'alliage qui conserve toutes les propriétés du métal dans le matériau résultant (conductivité électrique, ductilité, lustre, matité, etc.) et peut également entraîner des propriétés supplémentaires telles que la résistance ou une dureté plus élevée que les métaux d'origine. J'avais. Pour résumer : doit contenir au moins un métal dans le mélange. Il est créé par l'homme et ne se produit pas spontanément dans la nature. Doit conserver les propriétés des éléments d'origine. Peut ajouter des propriétés supplémentaires à ces éléments réels. Sont généralement définis comme des pourcentages en poids de chaque matériau : par exemple 93,6 % d'aluminium + 6,0 pourcent de cuivre + 0,4 pourcent de zirconium (ensemble, ils forment 100 %) pour l'alliage d'aluminium 2004. Dans la recherche fondamentale, ils sont généralement définis en proportions atomiques : z Exemple Cu - 27 % en poids d'Al pour un alliage cuivre-aluminium à 27 % en poids. Aluminium et cuivre 73 wt.

1.1.3 Toujours un alliage et jamais à l'état pur

Contrairement au fer, qui est principalement allié au carbone pour fabriquer de l'acier mais qui est également utilisé à l'état pur (par exemple le fer forgé), l'aluminium n'est jamais utilisé à l'état pur car ses propriétés ne sont pas inintéressantes à l'usage. Pour cette raison on appelle alliages d'aluminium aluminium et on ne connaît pas le nom de ses alliages les plus courants (dans l'industrie on appelle duralumin, magnésium, birmabright...) car ce métal n'est pas produit industriellement sans le combiner comme l'aluminium l'est avec d'autres éléments. Les alliages

CHAPITRE I : Soudage par friction des alliages d'aluminium
d'aluminium existent en telle abondance que les systèmes d'intelligence artificielle d'aujourd'hui peuvent prédire les

Meilleures proportions en prédisant les propriétés de l'alliage avant de les tester, comme l'explique cette étude.

I.1.4 Un monde d'alliages d'aluminium

Dans la suite, il existe d'innombrables alliages d'aluminium. Il s'agit littéralement d'une coïncidence, comme nous l'avons vu avec le système de prédiction automatique des alliages, car tout changement de pourcentage dans les éléments du mélange, aussi petit soit-il, se traduit par un nouvel alliage. Cependant, les plus couramment utilisés sont une cinquantaine. Chaque série est considérée comme une famille d'alliages ayant des propriétés communes (les éléments qu'ils contiennent). De petits ajouts de chrome, titane, zirconium, nickel, etc. peuvent également être effectués dans les familles (séries). [1]



Figure I.1. Alliage d'aluminium.

I.1.5 Les catégories des alliages d'aluminium :

L'aluminium est un élément chimique de symbole Al et de numéro atomique 13. C'est un métal argenté pauvre et ductile caractérisé par sa résistance à l'oxydation et sa faible densité. C'est le métal le plus abondant de la croûte terrestre et le troisième élément le plus abondant après l'oxygène et le silicium. il représente en moyenne 8 % de la masse matérielle de la surface solide de notre planète. L'aluminium est trop réactif pour être présent naturellement dans le milieu naturel :

CHAPITRE I : Soudage par friction des alliages d'aluminium
au contraire, il se présente sous forme combinée dans plus de 270 minéraux différents. Le plus important d'entre eux est la bauxite, où elle se présente sous forme d'oxyde hydraté, à partir de laquelle l'alumine est extraite. L'alumine est dérivée de la bauxite qui est broyée puis gravée à chaud avec de la cendre de soude. Une lessive se forme qui, après avoir séparé les oxydes de fer et de silicium, est introduite dans les décomposeurs pour précipiter l'oxyde d'aluminium. L'aluminium est obtenu à partir d'alumine par électrolyse dans une cellule revêtue de carbone (cathode).

Les principales propriétés de l'aluminium sont :

- *Bonne conductivité thermique et électrique*
- *Faible densité : 2,7 kg/dm³*
- *Point de fusion : 658°C*
- *Faible module d'élasticité : 70000 N/mm² 70000 MPa 7000 DaN/mm²*
- *Limite élastique inférieure*
- *Allongement à la rupture élevé (feuilles minces, feuilles, papier)*
- *Bonne conductivité (67 conductivité du cuivre).*

L'aluminium métallique est très sensible à l'oxydation, mais est immédiatement passivé par une fine couche d'oxyde d'aluminium Al₂O₃ imperméable, de plusieurs microns d'épaisseur, qui protège le corps métallique de la corrosion. Cette résistance à la corrosion et son extrême légèreté en ont fait un matériau largement utilisé dans l'industrie. L'aluminium est un produit industriel important, pur ou allié, notamment dans les secteurs de l'aérospatiale, des transports et de la construction. [2]

1.2. Les séries d'aluminium :

1.2.1 Série 1000

Les alliages de la série 1000 sont constitués d'au moins 99 % d'aluminium pur. Cette série présente une excellente résistance à la corrosion, une excellente usinabilité et une conductivité thermique et électrique élevée. Les alliages typiques de cette série sont le 1100 pour le câblage électrique et les articles décoratifs, le 1050 pour les échangeurs de chaleur et les ustensiles de cuisine et le 1350 pour les applications électriques.

• ALLIAGES THERMODURCISSABLES

Certains alliages sont renforcés par traitement thermique. C'est un processus en trois étapes : décoloration, trempe et vieillissement. Le traitement thermique chauffe l'aluminium jusqu'à un certain point. Les éléments d'alliage, appelés substances dissoutes, sont répartis de manière homogène avec l'aluminium. Le métal est ensuite refroidi. Les atomes dissous se combinent chacun pour former un précipité finement divisé. Celui-ci se produit soit à température ambiante, dit vieillissement naturel, soit dans un four à basse température, dit vieillissement artificiel.

I.2.2 Série 2000

Dans la série 2000, le cuivre est utilisé comme principal élément d'alliage et permet d'augmenter la résistance à la traction grâce au traitement thermique par solution. Ces alliages n'ont pas le même niveau de résistance à la [corrosion](#) atmosphérique comme beaucoup d'autres alliages d'aluminium.

Par conséquent, ces alliages sont généralement protégés par anodisation. Ils sont généralement revêtus d'un alliage de haute pureté ou d'un alliage de la série 6000 pour résister à la [corrosion](#). Puisque les alliages de la série 2000 sont difficiles à souder, ils sont utilisés dans les structures boulonnées ou rivetées. De plus, son utilisation se fait principalement dans le domaine militaire, dans la fabrication d'avions et des réservoirs cryogéniques. L'alliage le plus connu de la série est le 2024 qui sont utilisé dans le transport militaire et civil.

I.2.3 Série 6000

La série 6000 est polyvalente, therm durcissable, hautement ductile, soudable et possède une bonne résistance mécanique et une bonne résistance à la corrosion. Les alliages de cette série contiennent du silicium et du magnésium pour former du siliciure de magnésium dans l'alliage. Les produits d'extrusion de la série 6000 sont le premier choix pour les applications architecturales et de construction. Ils peuvent être soudés et anodisés. L'alliage 6061 est l'alliage le plus courant de cette série et est couramment utilisé dans les remorques, les carrosseries de camions, les phares et les applications marines. Le 6063 est utilisé pour les applications architecturales car, comme le 6061, il peut être facilement extrudé.

I.2.4 Série 7000

Le zinc est le liant principal de cette série. Pour améliorer les propriétés mécaniques, le magnésium doit être ajouté en petites quantités. D'autres éléments tels que le cuivre et le chrome peuvent également être ajoutés en petites quantités. Cependant, ces alliages sont difficiles à fabriquer et à fabriquer. Pour cette raison, ils sont utilisés dans des applications très spécifiques nécessitant une résistance mécanique élevée, comme la fabrication de pare-chocs pour avions ou voitures. Les alliages les plus connus sont le 7050 et le 7075, largement utilisés dans l'industrie aérospatiale. La plupart des alliages de cette série ont une couche protectrice car ils ont une résistance à la corrosion plus faible.

• ALLIAGES NON THERMODURCISSABLES

Les alliages non traités thermiquement sont renforcés par le travail à froid. Le travail à froid se produit pendant les méthodes de laminage, filage ou pliage. C'est l'action de « travailler » le

CHAPITRE I : Soudage par friction des alliages d'aluminium métal pour le rendre plus fort. Par exemple, lorsque l'aluminium est aplati, il devient plus fort puisque les grains sont déformés. Les éléments d'alliage comme le magnésium intensifient cet effet, ce qui entraîne une résistance encore plus élevée.

I.2.5 Série 3000

Le manganèse est le principal élément d'alliage de cette série, souvent avec une petite quantité de magnésium. Cependant, seul un pourcentage limité de manganèse peut être ajouté efficacement à l'aluminium, soit de 1.0 % à 1.5 %. Le 3003 est un alliage populaire à usage général et peut être utilisé dans des applications telles que tôles de toiture, réservoirs d'entreposage, articles ménagers, échangeurs de chaleur et ustensiles de cuisine. L'alliage 3304, qui a une plus grande résistance mécanique, est utilisé dans les canettes de bière ou de boissons gazeuses en aluminium.

Alliages d'aluminium corroyés : extrait de nuances									
R.C.: résistance à la corrosion A.O.: aptitude à l'anodisation A.S.: aptitude au soudage U.: usinabilité					*** : excellente ** : bonne * : moyenne - : faible				
Désignations	état	RrM pa mini	Re0,2 Mpa mini	A%	R.C.	A. O.	A.S.	U	Observations
Aluminium pur : série 1000 ; E = 67 GPa ; famil le non trempante ou sans durcissement structural									
EN AW-1050A[Al 99,5] (1050A)	O	65	20	2035	***	***	***	-	génie chimique; bâtiment; alimentaire; emballages filés; feuilles fines; électroménager; emboutissage...
	H12	85	65	2-9					
	H14	105	85	2-6					
	H18	140	120	1-2					
EN AW-1080A[Al 99,8] et EN AW-1070A[Al 99,7] (1070A et 1080A)	O	60	15	2635	***	***	***	-	génie chimique; pièces de décoration; alimentaire...
	H12	80	55	5-12					
	H14	100	70	4-7					
	H18	125	105	2					
EN AW-1100[Al 99,0Cu] et EN AW-1200[Al 99,0] (1200 et 1100)	O	75	25	1933	***	***	***		idem 1050A; aluminium du commerce; alimentaire; tubes; composants électriques
	H12	95	75	2-8					
	H14	115	95	2-6					
	H18	150	130	1-2					
Aluminium + cuivre : série 2000 ; E = 74 GPa ; alliaes trempants ou avec durcissement structural									
EN Cu4SiMg] (2014)	O	220	140	1216	-	*	**	**	hautes caractéristiques; cycles; aéronautique; pièces épaisses; pièces extrudées;...
	T3	395	245	14					
	T4	400	250	14					
	T6	440	390	6					

CHAPITRE I : Soudage par friction des alliages d'aluminium

<i>EN AW-2017A [Al Cu4MgSi] (2017 ou 2017A)</i>	<i>O T4</i>	<i>225 390</i>	<i>145 245</i>	<i>12- 3 13- 4</i>	-	**	**	**	<i>mieux à la corrosion que 2014; cycles, automobile, horlogerie, rivets, pièces forgées.</i>
<i>EN AW-2024[Al Cu4Mg1] (2024)</i>	<i>O T4</i>	<i>220 435</i>	<i>140 275</i>	<i>1213 1214</i>	-	*	**	**	<i>Plus résistant que le 2017; tôles épaisses pour usinage; très utilisé en aéronautique...</i>
<i>EN AW-2090 [Al Cu2,7Li2,4] (2090)</i>	<i>T6</i>	<i>550</i>	<i>517</i>	<i>6</i>					<i>hautes résistances; légèreté grâce au Li; carlingues d'avion</i>
Aluminium + manganèse : série 3000 ; E = 67 GPa ; alliages non trempants ou sans durcissement structural									
<i>EN AW-3003[Al Mn1Cu] (3003)</i>	<i>O H12 H14 H18</i>	<i>95 120 145 190</i>	<i>35 90 125 170</i>	<i>1524 3-7 2-5 1-2</i>	***	**	***	**	<i>mêmes applications que 1050A et 1100 en légèrement plus résistant et moins ductile; alimentaire; feuilles...</i>
<i>EN AW-3005 [Al Mn1Mg0,5] (3005)</i>	<i>O H12 H14 H18</i>	<i>115 145 170 220</i>	<i>45 125 150 200</i>	<i>1219 3-5 1-3 1-2</i>	***	**	***	**	<i>idem 3003 avec de meilleures caractéristiques mécaniques. (3004 est un peu mieux que 3005); architecture...</i>
Aluminium + silicium : série 4000 ; E = 70 GPa ; alliages trempants ou avec durcissement structural									
<i>EN AW-4006[Al Si1Fe] (4006)</i>	<i>O H12 H14 T4</i>	<i>95 120 140 120</i>	<i>40 90 120 55</i>	<i>1725 4-5 3 21</i>	*	*	*	*	<i>pièces forgées ou embouties; poêles, autocuiseurs, casseroles...</i>
Aluminium + magnésium : série 5000 ; E = 70 GPa ; alliages non trempants ou sans durcissement structural									
<i>EN AW-5005[Al Mg1] (5005)</i>	<i>O H12 H14 H18</i>	<i>100 125 145 185</i>	<i>35 95 120 165</i>	<i>1524 2-7 2-5 1-2</i>	***	***	***	*	<i>chimie; bâtiment (panneaux de façade et de couverture); alimentaire; chaudronnerie; emboutissage</i>
<i>EN AW-5052[Al Mg2,5] (5052)</i>	<i>O H12 H14 H18</i>	<i>170 210 230 270</i>	<i>65 160 180 210</i>	<i>1219 4-10 3-5 2-3</i>	***	***	***	*	<i>bonne Rr, Re et bonne résistance à la fatigue; applications comme 5005; feuilles et panneaux résistants...</i>
<i>EN AW-5754[Al Mg3] (5754)</i>	<i>O H12 H14 H18 H22 H24</i>	<i>190 220 240 290 220 240</i>	<i>80 170 190 250 130 160</i>	<i>1218 4-9 3-5 2-3 7-10 6-10</i>	***	***	***	**	<i>chemin de fer, marine, automobile, génie électrique, bâtiment (panneaux), citernes de transport, alimentaire, chimie, pièces forgées</i>

CHAPITRE I : Soudage par friction des alliages d'aluminium

<i>EN AW-5086[Al Mg4] (5086)</i>	<i>O H12 H14 H18 H22 H24</i>	<i>240 275 300 345 275 300</i>	<i>100 200 240 270 185 220</i>	<i>1117 3-7 2-4 1 5-10 4-8</i>		<i>***</i>	<i>**</i>	<i>***</i>	<i>**</i>	<i>comme 5754 en légèrement plus résistant et moins ductile. panneau; marine; chemin de fer; citernes routières; cryogénie; pièces forgées.</i>
<i>Aluminium + silicium + magnésium : série 6000 ; E =70 G Pa : alliages trempants</i>										
<i>EN AW-6061[Al Mg1SiCu] (6061)</i>	<i>O T4 T6</i>	<i>150 205 290</i>	<i>85 110 240</i>	<i>1419 1218 6-10</i>		<i>***</i>	<i>***</i>	<i>***</i>	<i>*</i>	<i>résistance à la corrosion; chimie; alimentaire; fûts; pots; emballages; pièces "épaisses"; pièces de structure; canoës...</i>
<i>EN AW-6082[Al SiMgMn] (6082)</i>	<i>O T4 T6</i>	<i>150 205 310</i>	<i>85 110 260</i>	<i>1418 1215 6-10</i>		<i>***</i>	<i>***</i>	<i>***</i>	<i>*</i>	<i>comme 6061 en légèrement plus résistant et un peu meilleur à l'anodisation</i>
<i>Aluminium + zinc : série 7000 ; E = 7200 Gpa ; alliages trempants ou avec durcissement structural</i>										
<i>EN AW-7020[Al Zn4,5Mg1] (7020)</i>	<i>O T4 T6</i>	<i>220 320 350</i>	<i>140 210 280</i>	<i>1215 1114 7-10</i>		<i>**</i>	<i>**</i>	<i>**</i>	<i>**</i>	<i>charpentes, structures soudées; pièces "épaisses"; armement (blindage, caissons...); pièces forgées...</i>
<i>EN AW-7075[AlZn5,5MgCu] (7075)</i>	<i>O T6 T76 T73</i>	<i>275 525 500 460</i>	<i>145 460 425 385</i>	<i>10 6-8 7-8 7-8</i>		<i>*</i>	<i>**</i>	<i>*</i>	<i>**</i>	<i>pour hautes résistances (plus résistant mais moins ductile que 2024); pièces extrudées et forgées ; boulonnerie; cycles; aéronautique (armatures d'avion); armement...</i>

Tableau I.1. Les caractéristiques des séries d'aluminium. [4]

I.2.6.Série 4000

Uncas particulier est la série 4000 car elle est à la fois traitable thermiquement et non traitable thermiquement. La plupart des alliages de cette série ne peuvent pas être traités thermiquement. A l'inverse, lors du soudage d'alliages trempés et revenus, ils en absorbent certains éléments d'alliage et peuvent donc réagir à certains traitements thermiques. Les alliages de la série 4000 sont associés au silicium, qui peut être ajouté en quantités suffisantes pour abaisser le point de fusion de l'aluminium sans affecter sa fragilité. Pour cette raison, la série 4000 produit un fil de soudure et une soudure de qualité supérieure lorsqu'un point de fusion plus bas est requis. L'alliage

CHAPITRE I : Soudage par friction des alliages d'aluminium
4043 est l'un des alliages d'apport les plus couramment utilisés pour le soudage des alliages de la série 6000 pour les applications structurelles et automobiles.

I.2.7.Série 5000

Le magnésium est le principal agent d'alliage de la série 5000 et est l'un des éléments d'alliage les plus efficaces et les plus utilisés pour l'aluminium. La concentration doit être supérieure à 7% pour être efficace. Les alliages de cette série possèdent une bonne résistance mécanique, ainsi qu'une soudabilité efficace en plus de présenter une forte résistance à la [corrosion](#) dans les milieux marins. Pour cette raison, les alliages d'aluminium et de magnésium sont grandement utilisés dans les applications structurales comme dans les bâtiments et les ponts. Les exemples d'applications communes d'alliage incluent :

- 5005 pour les feuilles anodisées des applications architecturales;
- 5052 en électronique;
- 5056 pour les citernes routières et les bennes de camion;
- 5082 pour les couvercles de contenants de boisson en aluminium;
- 5083 et 5083 dans des applications marines et les plates-formes de forage;
- 5454, 5754 et 5154 dans les bâtiments, travaux publics, transport et industries mécaniques.[3]

I.3. Caractéristiques des alliages d'aluminium série 6000 :

Les éléments supplémentaires les plus importants de la série 6000 sont le magnésium et le silicium. Ils ont une grande importance industrielle. Leur durcissement est provoqué par la précipitation de formes intermédiaires du composé Mg_2Si . Ils ont de très bonnes propriétés de formage à froid et de formage. Ils présentent un bon comportement à basse température mais une résistance limitée à haute température et de bonnes propriétés mécaniques. Ils résistent bien à la corrosion atmosphérique et ont un bon état de surface lorsqu'ils sont polis avec. Les alliages de la série 6000 sont divisés en deux catégories : La première est constituée d'alliages qui contiennent plus de magnésium et de silicium (ex. 6061, 6082). Leurs applications sont aussi variées que les structures (châssis, supports, etc.), l'aéronautique, l'électricité et l'électronique. La deuxième catégorie est moins chargée en silicium et a donc des propriétés mécaniques plus faibles. Par exemple, l'alliage 6060 a de moins bonnes propriétés mécaniques dans le processus de filage. Utilisé pour la décoration, les meubles et la ferronnerie. A noter également l'existence du 6101, anciennement appelé Almélec (tableau II.8). En raison de sa bonne conductivité électrique, il est utilisé en France pour la construction de lignes moyenne et haute tension.

I.3.1 Étude d'alliage d'aluminium série 6000 :

Alliage	-	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr + Ti	Autres chaque	Autres total	Al
6060	Min.	0,03	0,10	/	/	0,35	/	/	/	/	/	/	/	le reste
	Max.	0,60	0,30	0,10	0,10	0,60	0,05	/	0,15	0,10	/	0,05	0,15	
6082	Min.	0,70	/	/	0,40	0,60	/	/	/	/	/	/	/	le reste
	Max.	1,30	0,50	0,10	1,00	1,20	0,25	/	0,20	0,10	/	0,05	0,15	
6101	Min.	0,30	/	/	/	0,35	/	/	/	/	/	/	/	le reste
	Max.	0,70	0,50	0,10	0,03	0,80	0,30	/	0,10	/	/	0,05	0,15	

Tableau I.2. Les caractéristiques de série 6000 d'aluminium.

I.3.2 Éléments d'addition d'aluminium série 6000 :

Les alliages d'aluminium de la série 6000 se composent principalement d'aluminium et de magnésium, avec des éléments supplémentaires ajoutés pour améliorer les propriétés spécifiques de l'alliage. Certains des additifs typiques utilisés dans la série 6000 sont :

Magnésium (Mg) : Il s'agit de l'ajout de base dans les alliages de la série 6000. Il améliore la résistance et la ténacité de l'alliage tout en maintenant la bonne ductilité et la faible sensibilité à la corrosion du.

Silicium (Si) : Souvent ajouté pour améliorer la résistance à la traction et à haute température des alliages de la série 6000. Il peut également améliorer la résistance à la corrosion et aider à créer la structure métallurgique souhaitée lors du traitement thermique.

Cuivre (Cu) : L'ajout de cuivre peut augmenter la résistance des alliages de la série 6000 mais aussi diminuer la ductilité. Il est généralement utilisé en petites quantités pour améliorer les propriétés spécifiques de l'alliage.

Zinc (Zn) : Parfois ajouté en petites quantités pour améliorer la résistance à la corrosion des alliages de la série 6000.

Manganèse (Mn) : Peut être utilisé comme élément supplémentaire pour améliorer la résistance et la ténacité des alliages de la série 6000, mais un ajout peut également être utilisé pour réduire la plasticité.

Chrome (Cr) : Parfois utilisé en petites quantités pour améliorer la résistance à la corrosion des alliages de la série 6000. Ces ajouts sont généralement ajoutés dans des proportions spécifiques

CHAPITRE I : Soudage par friction des alliages d'aluminium pour obtenir les propriétés souhaitées des alliages de la série 6000. Il convient de noter que certains alliages peuvent varier dans la composition exacte et la quantité d'ajouts utilisés en fonction de leur application spécifique.

I.3.3 Composés et précipitation :

L'aluminium peut former et précipiter divers composés en combinaison avec d'autres éléments ou dans certaines conditions.

Voici quelques composés d'aluminium typiques et des méthodes de précipitation : Alumine (Al₂O₃) : C'est le composé d'aluminium le plus courant.

Il se forme naturellement sur la surface en aluminium exposée à l'air, formant une couche protectrice qui empêche la corrosion. Hydroxyde d'aluminium (Al(OH)₃) : formé lorsque l'aluminium réagit avec de l'eau ou des solutions aqueuses contenant des ions hydroxyde (OH⁻). L'hydroxyde d'aluminium peut précipiter sous forme solide en présence d'ions hydroxyde et est utilisé dans des applications telles que les antiacides et le traitement de l'eau Sulfate d'aluminium (Al₂(SO₄)₃) : formé lorsque l'aluminium réagit avec l'acide sulfurique (H₂SO₄) ou d'autres sulfates. Le sulfate d'aluminium est utilisé dans le traitement de l'eau, le traitement des eaux usées et comme adjuvant dans certains procédés industriels.

Chlorure d'aluminium (AlCl₃) : formé lorsque l'aluminium réagit avec l'acide chlorhydrique (HCl) ou d'autres chlorures. Le chlorure d'aluminium est utilisé comme catalyseur dans certaines réactions chimiques et comme additif dans l'industrie textile.

Carbonate d'aluminium (Al₂(CO₃)₃) : Peut se former lorsque l'aluminium réagit avec le dioxyde de carbone (CO₂) en présence de carbonates. Le carbonate d'aluminium peut précipiter sous forme solide et se trouve dans certaines roches et certains minéraux.

Ces exemples ne représentent qu'une fraction des composés liés à l'aluminium et des procédés de précipitation.

I.4. Soudabilité des alliages d'aluminium :

Les différentes séries d'alliage sont toutes soudables, mais certaines nuances de la série 7000 sont plus difficilement soudables de par leur grande sensibilité à la fissuration. La soudabilité opératoire de l'aluminium est généralement bonne. Cependant, il faut prendre certaines précautions lors du soudage de l'aluminium.

Les familles d'alliages qui se soudent le plus facilement sont les séries 1000, 3000 et 5000 qui n'ont pas été traitées thermiquement. La série 6000 peut aussi être soudée facilement, mais le soudage provoque une baisse des propriétés mécaniques.

Les alliages à résistance élevée des séries 2000 et 4000 sont soudables, mais il faut prendre des précautions particulières. À l'intérieur de la famille 7000, seulement les alliages 7039 et 7005 sont

CHAPITRE I : Soudage par friction des alliages d'aluminium soudables. De plus, les soudures vieillissent naturellement et retrouvent 70 à 90% de leur résistance mécanique antérieure à l'intérieur de 30 à 90 jours suivant le soudage.

I.4.1 Soudabilité globale :

La chaleur nécessaire pour fusionner le métal de base lors du soudage abaisse la résistance mécanique à l'intérieur de la zone affectée thermiquement en provoquant un recuit. Dans le cas d'un alliage ayant été écroué pour obtenir ses propriétés mécaniques, il n'est pas possible de régénérer les propriétés de cette zone par un traitement thermique.

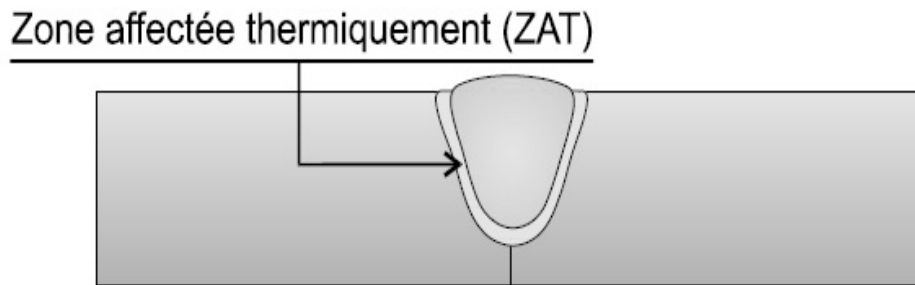


Figure I.2. La zone affectée thermiquement.

I.4.2 Soudabilité opératoire :

La couche d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) recouvrant l'aluminium et ses alliages a une épaisseur d'environ 0,01 mm (0,0004 po) et a tendance à augmenter avec la température.

Cette couche mince est thermiquement et électriquement isolante et insoluble dans le métal liquide. Il a également une densité plus faible et reste donc au-dessus du bain de fusion lorsque le métal est fondu.

Pour souder l'aluminium, cette couche de soudure destructrice doit être éliminée par des moyens mécaniques tels qu'une meuleuse et une brosse en acier inoxydable, ou par des moyens chimiques tels que des solutions alcalines fortes. Lors du soudage au gaz (Sodel 480) ou aux électrodes enrobées (Sodel 118), le décapant (flux) contenu dans le fil ou le laitier produit lors de la fusion du revêtement empêche la formation de la couche d'oxyde. Semblable au soudage GTAW (TIG) ou GMAW (MIG), le gaz de protection utilisé protège le bain de soudure de la contamination de l'air et aide à minimiser la formation d'une couche d'oxyde. De plus, le soudage GTAW (TIG) utilise un courant alternatif pour décomposer la couche d'oxyde qui se forme à nouveau à des températures élevées.

Une autre difficulté avec le soudage de l'aluminium est sa conductivité thermique élevée. Pour contrer les pertes de chaleur dues à la diffusion de la chaleur, il est souvent nécessaire de préchauffer les pièces à assembler à 200 à 260°C (400 à 500°F). Le préchauffage stabilise l'arc de soudage, le rend moins erratique et favorise également une bonne pénétration. Pour les pièces en

CHAPITRE I : Soudage par friction des alliages d'aluminium
aluminium traitées thermiquement ou soumises à un vieillissement, il est important de comprendre l'effet du préchauffage sur les propriétés mécaniques de l'alliage en question. Parfois, une température trop élevée entraîne une détérioration de certaines propriétés mécaniques ou une fragilité.

1.4.3 Soudabilité métallurgique :

Le soudage des alliages d'aluminium peut entraîner une baisse de la résistance mécanique du métal de base s'il est écroui, et ce partout où la température atteinte à l'intérieur de la pièce est supérieure à 350°C (660°F) lors du soudage. Il est impossible de régénérer les propriétés mécaniques

qui ont été obtenues par écrouissage avec un traitement thermique après le soudage. Selon l'application, il est important de tenir compte de cette perte de résistance dans la ZAT.

Si l'alliage a subi un ou des traitements thermiques avant le soudage, il faut tenir compte que le soudage fera disparaître tous les effets des traitements thermiques précédents. Plus la zone affectée est grande, plus la diminution des propriétés mécaniques a un effet néfaste sur la performance de la pièce lorsque mise en service. Cependant une faible zone a des effets limités sur la baisse des propriétés mécaniques. C'est pourquoi, il est important de toujours restreindre au minimum la largeur de la zone affectée thermiquement.

Généralement dans le cas d'un alliage d'aluminium qui a été durci par précipitation, même si en pratique c'est difficilement réalisable, il est préférable de suivre dans l'ordre l'une ou l'autre des méthodes suivantes;

- homogénéisation*
- soudage d'un alliage déjà mis en solution*
- Soudage ou (exemple condition T4)*
- mise en solution*
- Vieillissement*

1.4.4 Métaux d'apport :

Le choix du métal d'apport est surtout fonction de la soudabilité, des propriétés mécaniques désirées ou de la résistance à la corrosion.

Pour minimiser la fissuration à chaud, on utilise la [Sodel 118](#) pour le soudage à l'électrode enrobée ou la [Sodel 480](#) au chalumeau. La teneur élevée en silicium de cette électrode et cette baguette offre un bon pouvoir désoxydant en plus d'abaisser la température de fusion du métal d'apport. De plus, la faible teneur en magnésium de ces produits diminue également les risques de fissuration à chaud.. [5]

CHAPITRE II

Les types de soudage



II.1.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. [6]

II.1.1 Les procédés de soudage

On estime qu'il existe environ quarante à cinquante procédés de soudage au total montre un aperçu des procédés de soudage les plus courants. Les procédés de soudage sont divisés en deux groupes principaux, à savoir les procédés de soudage et les procédés de soudage sous pression. Dans le processus de soudage, les matériaux à assembler sont fondus avec ou sans matériau supplémentaire ou dans une atmosphère protectrice telle que le gaz ou le vide. Les impuretés et les couches d'oxyde doivent être éliminées du bain de soudure. L'inconvénient du soudage est que la plupart des matériaux sont très réactifs à leur point de fusion, ce qui rend la contamination par des éléments indésirables très difficile à éviter. De plus, de nombreux matériaux à ces températures très élevées subissent des changements métallurgiques indésirables, par ex. B. la dissolution de carbures ou d'autres dépôts ou la formation de phases intermétalliques cassantes lors du soudage de différents matériaux. La méthode la plus courante est le soudage à l'arc, par ex. B. TIG, soudage MIG/MAG et MMA. D'autres procédés de soudage dans lesquels les matériaux sont fondus sont, par exemple, le soudage au laser, le soudage aluminothermique, le soudage autogène, etc. Le deuxième groupe principal de procédés de soudage sont les procédés de soudage sous pression. Dans ce processus, les matériaux à assembler sont pressés ensemble, avec ou sans chauffage supplémentaire des surfaces de soudage. Les procédés de soudage sous pression peuvent à leur tour être divisés en deux sous-groupes : les procédés de soudage en phase solide et les procédés de soudage sous pression, dans lesquels les matériaux sont assemblés. Dans ce dernier groupe, le chauffage peut être par un arc, tel que. B. soudage de goujons et soudage par impact, ou par résistance électrique, tels que. B. soudage par points et soudage par points. Les procédés de soudage en phase solide ne font pas fondre les matériaux. L'avantage le plus important du soudage à l'état solide est que les matériaux conservent leurs propriétés d'origine. Ces procédés offrent la possibilité de réaliser des assemblages hétérogènes de différents métaux et alliages qui ne peuvent pas être soudés avec d'autres procédés. En raison des temps de soudage courts et des températures de pointe relativement basses, la zone affectée par la chaleur est généralement petite. Le procédé de soudage par friction fait partie des procédés de soudage à l'état solide. [7]

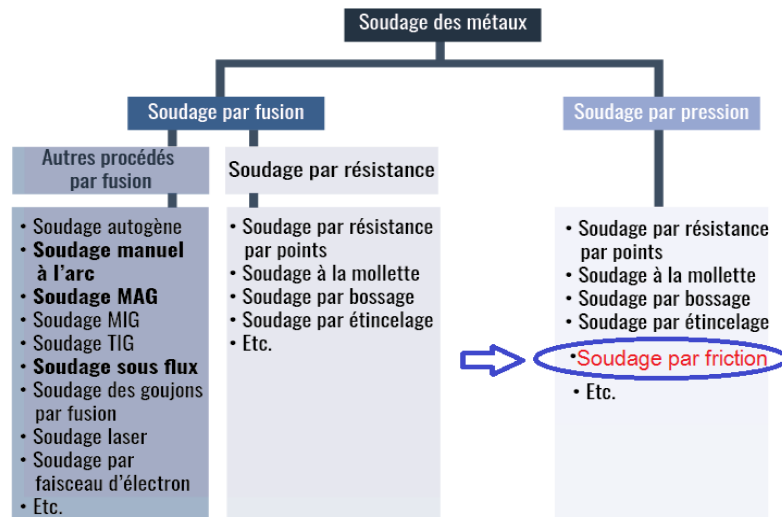


Figure II.1. Les procédés de soudage.

II.2 Le soudage par pression :

Cette catégorie comprend tous les procédés de soudage dans lesquels une soudure est réalisée, généralement sans matériau d'apport, par l'application d'une pression ou d'un frottement, puis d'une pression suffisante pour provoquer une déformation plastique (à froid ou à chaud) afin d'assurer une continuité atomique entre les bords de la soudure. [8]

II.2.1 Définition de soudage par friction

Dans le soudage par friction rotative (RFW), des joints bout à bout sont réalisés entre deux pièces, dont au moins une est à symétrie de rotation. Il met en œuvre l'effet thermique qui se produit dans le plan de leur connexion en raison de la rotation rapide sous la pression des pièces les unes contre les autres. La puissance calorifique résulte du couple résistant et de la vitesse. En raison du fluage du matériau lors du frottement et du forgeage, le point de fusion ne s'est jamais atteint, ce qui confère à la soudure des propriétés uniques par rapport à d'autres méthodes d'assemblage telles que le soudage par résistance ou le soudage par étincelles, le soudage par faisceau d'électrons ou le soudage au laser. [9]

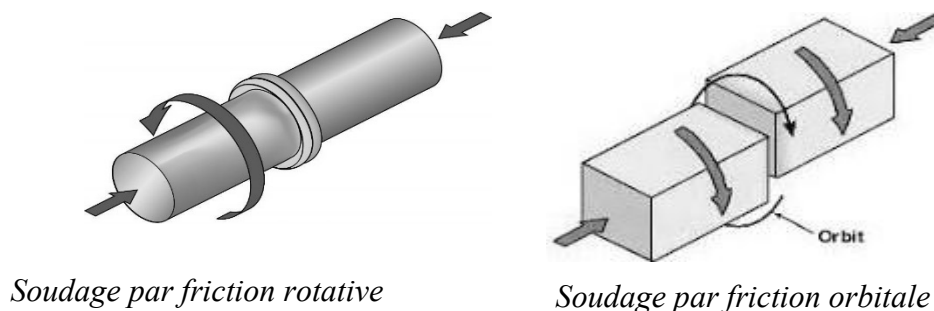


Figure II.1. Soudage par friction rotative et orbitale.

II.2.2 Type de soudage par friction

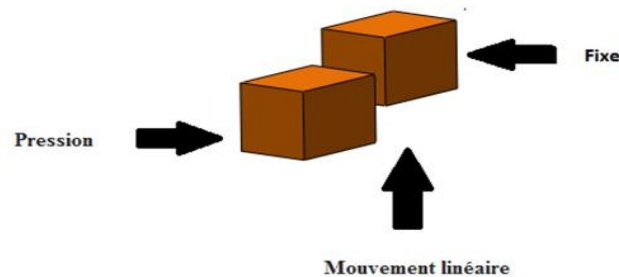
En raison de l'expansion du domaine du soudage et en fonction de la manière dont le frottement est produit, il existe différentes formes et méthodes d'application du soudage par friction, notamment :

- Soudage par friction linéaire.
- Soudage par friction malaxage
- Soudage par friction rotative.

II.2.3 Soudage par friction linéaire

Le soudage par friction linéaire est un processus dans lequel une pièce est immobile et l'autre se déplace dans un mouvement de basculement linéaire sous une pression normale. Le soudage par friction linéaire peut souder des pièces prismatiques (non circulaires) et la génération de chaleur est presque uniforme sur toute la section du joint. [10]

Dans le soudage par friction linéaire, la chaleur nécessaire est générée par le mouvement de va-et-vient des pièces à souder. Avec cette méthode, vous pouvez souder des pièces symétriques et non rotatives. L'application la plus importante du soudage par friction linéaire est la fabrication d'aubes de turbine pour les moteurs d'avion et les turbines. [11]



FigureII.2: Principe de Soudage par friction linéaire.

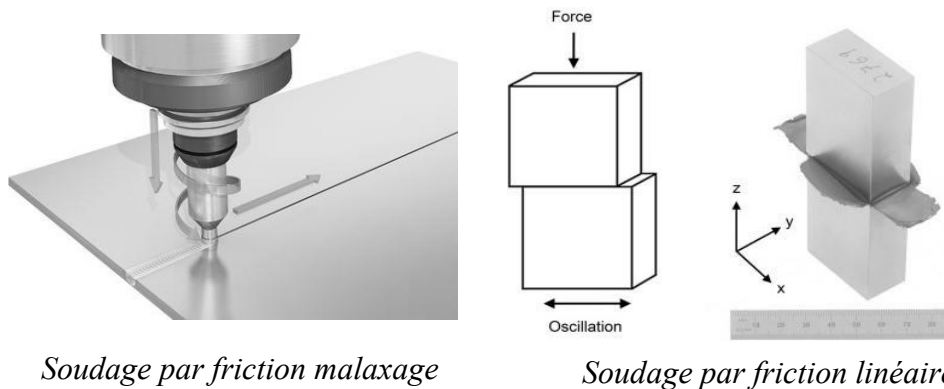
II.2.4 Soudage par friction malaxage

Dans le soudage par friction (FSW), un outil rotatif avec un boulon se terminant par une tige filetée se déplace le long des surfaces de contact de deux plaques rigidement fixées. Le bras touche le dessus des pièces à souder. La chaleur générée par le frottement entre la broche de l'outil en rotation et les deux pièces ramollit le matériau à souder. Lorsque l'outil est déplacé vers la soudure, une déformation plastique importante et un écoulement de ce métal plastifié se produisent.

II.2.5 Soudage par friction rotative

Le soudage par friction rotative est un procédé de soudage par friction dans lequel les pièces à souder sont tournées les unes par rapport aux autres au moyen d'une force axiale afin de générer la chaleur nécessaire à l'assemblage. [12]

Ce type de soudage est utilisé pour les pièces tournantes. Une partie est tournée autour de son axe tandis que l'autre est maintenue en place par une force de compression axiale. Dans le soudage par friction rotative, l'énergie de rotation peut être générée et transférée à la pièce rotative de deux manières pendant la phase de friction. Avec régime moteur constant (soudage par Friction pilotée) ou avec énergie cinétique stockée dans un volant d'inertie en rotation (soudage par friction inertielle) [13]



Soudage par friction malaxage

Soudage par friction linéaire

Figure II.3. Soudage par friction malaxage et linéaire.

II.2.6 Principe du soudage par friction rotative

Le soudage par friction rotative est un processus qui produit une soudure sous l'effet d'une force de compression, mettant en contact deux pièces en rotation l'une par rapport à l'autre afin de produire de la chaleur et de déformer plastiquement le matériau à l'interface de contact. [14]

Le principe du soudage par friction rotative repose sur la rotation des deux pièces à souder à distance l'une de l'autre et commence par le frottement lors de l'application. Une force est appliquée sur l'un des supports des deux pièces, puis de la chaleur est générée qui fait fondre les deux pièces et les assemble en une soudure. En soudage par friction rotative, le mouvement relatif entre les deux pièces et la pression exercée sur celles-ci génèrent de la chaleur aux points de contact.

Une soudure peut être réalisée sans atteindre le point de fusion du matériau ; Cela réduit considérablement les problèmes de fissuration et de déformation importante des soudures lors de la solidification. De plus, le soudage par friction présente d'autres avantages par rapport aux

Chapitre II : Les types de soudage

techniques de soudage. Le soudage par friction est effectué sur des machines spéciales qui permettent d'effectuer le processus avec précision et rapidité. [15]

II.3 Paramètres du soudage par friction

Il existe des paramètres de base et importants qui affectent le processus de friction et sont liés à la qualité des soudures résultant du processus de friction rotationnelle : vitesse de rotation, la pression axiale et le temps nécessaire pour réaliser un cycle de soudage.

II.3.1 Vitesse de rotation :

La vitesse de rotation dépend du type de matériau à souder, car la vitesse a des effets différents sur les propriétés mécaniques des joints soudés par friction. La vitesse crée une grande quantité de chaleur à l'interface, ce qui ramollit les matériaux et augmente la teneur en minéraux. Afin d'obtenir une bonne qualité de soudure, la vitesse doit être appropriée car la variation de vitesse a divers effets sur la qualité du joint.

II.3.2 Pression :

Il lie les métaux et influence la température dans la zone de soudage. La charge axiale et la vitesse de rotation doivent être comprises dans la plage appropriée pour chaque matériau à souder et ne peuvent pas être indépendantes l'une de l'autre afin d'obtenir une soudure de qualité.

II.3.3 Temps :

C'est l'un des facteurs les plus importants affectant le processus de soudage. Des temps de chauffage très courts peuvent entraîner une surchauffe, ce qui conduit à des zones sans espace et donc à de mauvaises soudures. D'autre part, le temps de chauffe très long du peut entraîner un gaspillage de matière. La première méthode consiste à arrêter la rotation après un laps de temps prédéterminé à l'aide d'un système de temporisation approprié. La deuxième méthode est configurée pour utiliser une longueur suffisante pour assurer un chauffage adéquat.

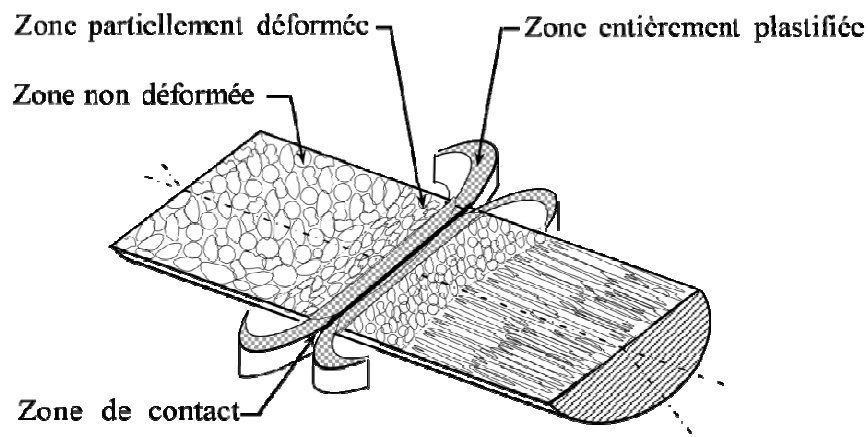


Figure II.4 a) Illustration schématique des différentes zones de la soudure par friction rotative

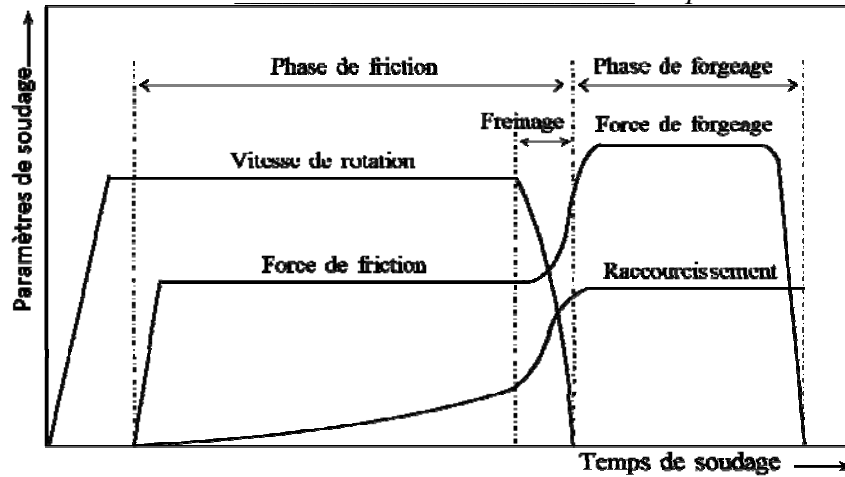


Figure II.4 b) Influence des différentes paramètres sur la soudure par friction rotative

II.3.4 Mécanismes de soudage par friction rotative:

II.3.4.1 Phase de friction :

Dans cette phase, sous l'action de la force de compression axiale, des frottements se produisent entre les surfaces de contact. L'adhérence entre les matériaux se produit dans la zone de contact après une période de cisaillement et de mouvement du métal d'une surface à l'autre en raison du frottement. Lorsque la température de surface et le couple augmentent, la quantité de matériau transporté pendant cette période augmente, le couple augmente, puis diminue jusqu'à une valeur minimale qui reflète le taux de retrait et la force axiale.

II.3.4.2 Phase de forgeage :

La vitesse ayant tendance à diminuer (en fin de phase de chauffe) et la pression à augmenter (en début de phase de forgeage), un deuxième pic de couple se produit lors du collage du métal à l'interface et celle-ci se refroidit. Le couple a donc tendance à diminuer lorsque la vitesse diminue. Avec des métaux dissemblables, plusieurs facteurs peuvent influencer le mécanisme d'assemblage, rendant la prédiction de la soudabilité de métaux dissemblables plus complexe et très difficile. Ces facteurs comprennent les propriétés physiques et mécaniques, la structure cristalline, la solubilité mutuelle et les composés intermétalliques. [16]

II.4 Défauts de soudage

Plusieurs types de défauts de soudage ont été rencontrés au cours de la thèse : le flash, le manque de parallélisme entre les épaulements, les conflits d'écoulement, les cavités et le plan de joint résiduel ¹⁷

II.4.1 Flash

Le flash est une boule en plastique poussée hors du bras. Cela se produit généralement du côté du retrait, du côté de la soudure, où les champs de vitesse sont opposés. La bavure affecte la

finition de surface de la soudure et, dans de nombreux cas, peut être interprétée comme un indicateur que la soudure est trop solide.

Si le laitier s'accumule de manière excessive, la perte de matière peut entraîner d'autres types de défauts.

II.4.2 Manque de parallélisme entre les épaulements

Lorsque les efforts sur le galet deviennent trop importants, la rigidité de l'arbre n'est plus suffisante pour assurer un parallélisme parfait entre les deux bras. Les soudures ainsi réalisées ont un aspect dissymétrique. Cette défaillance est plus fréquente à des forces de cisaillement très élevées et précède généralement la défaillance du mandrin qui est en tension lors de la flexion rotative.

II.4.3 Conflits d'écoulement

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

II.4.4 Défaut de type cavité

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

II.4.5 Plan de joint résiduel ou Joint Line Remnant

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

II.5 Applications du soudage par friction rotative

Le soudage par friction rotative fonctionne sur la possibilité de coller et de souder des matériaux différents tels que l'acier, la céramique ou le cuivre. Il existe également de nombreux domaines d'utilisation du procédé de soudage comme les domaines de l'aviation, la navigation spatiale, la pétrochimie et l'industrie automobile.

II.5.1 Avantages et limites du soudage par friction rotative

Le soudage par friction rotative présente les avantages suivants

- Aucune préparation particulière n'est nécessaire pour les pièces à souder.
- Un rapide.
- Moins de déformations des pièces après l'opération.
- Possibilité de combiner des matériaux différents.
- Exempt de gaz, de vapeurs ou de rayonnement.
- Obtenez un bon cadre en métal.
- Cependant, le soudage par friction rotative a certaines limites, telles que :
- Certains matériaux ne peuvent pas être soudés en raison du faible coefficient de frottement.
- Coûts élevés du matériel et des outils de soudage.

II.6 Caractéristiques d'un joint soudé

II.6.1 Microstructure

L'étude de la microstructure d'un joint soudé a fait l'objet d'un très grand .L'examen macrographique d'une section transverse d'un joint soudé, permet de mettre en évidence le caractère hétérogène du joint. les trois zones caractéristiques d'un joint soudé : la zone affectée thermiquement, la zone affectée thermo-mécaniquement et le noyau soudé. Le procédé FSW étant dissymétrique de part et d'autre de l'axe de soudage, le joint ne présente pas exactement la même morphologie à l'dancing sidénaurecréationSidé. A. Métal de base (MB) Dans le métal de base, loin du passage de l'outil, le matériau n'est pas affecté par le cycle de soudage. Il conserve sa microstructure et ses propriétés initiales. B. Zone affectée thermiquement (ZAT) Dans la ZAT, le matériau est soumis à un cycle thermique mais n'est pas déformé plastiquement. Généralement, la microstructure reste similaire à celle du matériاعدة base. En revanche, la ZAT est le siège de modifications importantes de l'état de précipitation du matériau ; on observe en particulier un grossissement des précipités mais également l'apparition de zones dénuées de précipités. C. Zone affectée thermo-mécaniquement (ZATM ou TMAZ) La ZATM désigne la zone de transition entre la ZAT et le noyau soudé. Dans cette zone, le matériau est soumis à d'importantes déformations plastiques et à un cycle thermique. La ZATM est caractérisée par une microstructure fortement déformée

mais les taux de déformations insuffisants ne permettent pas d'engager le processus de recristallisation.

D. Noyau soudé Le noyau soudé est soumis à de hautes températures et de très grandes déformations. Il est le siège d'un phénomène de recristallisation dynamique continue, dont le résultat est une microstructure à grains fins, de l'ordre de 1 à 10 microns, équiaxes, avec une faible densité de dislocation . [18]

II.6.2 Écoulements de matière

La microstructure si particulière d'un joint soudé par FSW est fortement liée aux écoulements de matière au cours du soudage. Leur cinématique est peu ou mal connue car très complexe à étudier. À ce jour, la méthode d'insertion de marqueurs constitue un des seuls moyens de caractérisation de ces écoulements. Elle consiste à insérer un ou plusieurs marqueurs de composition diverse (cuivre, aluminium, titane, acier...) dans le matériau et à utiliser ces marqueurs comme traceurs. Le matériau doit idéalement posséder des caractéristiques semblables à celles du matériau de base, en particulier en ce qui concerne sa capacité à se déformer et ses caractéristiques thermiques. Ces marqueurs peuvent être continus, sous la forme de feuillets ou fils, ou bien discrets, billes, poudre... Deux techniques d'investigation permettent après soudure d'exploiter la distribution des traceurs dans la soudure :

- les coupes métallographiques, longitudinales ou transverses, permettent après attaque chimique de révéler la répartition des marqueurs dans le plan de coupe,
- les méthodes de radiographie ou de tomographie permettent d'évaluer la densité du marqueur dans les différentes zones du joint.

Un certain nombre de tentatives expérimentales de visualisation des écoulements de matière Colligan a utilisé des billes d'acier de faible diamètre pour mettre en évidence deux types de comportements. À proximité immédiate de l'épaulement, les écoulements sont chaotiques et le matériau est poussé vers la racine du joint sous l'effet de l'épaulement. [19]

Plus loin de l'épaulement, la distribution des billes à l'arrière de l'outil est linéaire, avec un léger décalage vertical. Les résultats de ces travaux sont illustrés.

Dans les travaux de Seidel et Reynolds, des marqueurs en aluminium ont été positionnés transversalement au joint soudé alternativement à l'dancingSidé et au releasingSidé. Les écoulements observés montrent une dissymétrie par rapport à l'axe de soudage. Des mouvements importants de matière ont été constatés verticalement

à proximité de l'épaulement. Enfin, le déplacement du marqueur le long de l'axe de soudage n'excède pas le diamètre du pion. Combine deux clichés longitudinaux du joint soudé, provenant de l'*dancingSidé* et *durecréationSidé*. D'autres auteurs ont mis en évidence les taux de déformation importants subis par le matériau à l'*dancingSidé* alors que ceux-ci sont moindres au *recréationSidé*. Enfin, des déformations importantes à proximité de l'épaulement sont observées dans une grande majorité des travaux menés. Cette zone est généralement désignée par le terme *flow arm*. [20]

II.7 La zone de fusion ZF :

II.7.1 Méthode de la zone fondue :

La méthode de la zone fondue (également appelée technique de la zone fondue, fusion de zone ou raffinage par zone fondue et désignée en anglais par les termes *zone melting* et *zone refining*) est une technique permettant de purifier des composés cristallisés stables à la fusion. L'avantage de cette technique est qu'elle peut permettre d'obtenir de très hauts degrés de pureté (99,999 % en masse pour le silicium¹, par exemple). Elle a été inventée dans les années 1950 par W. G. Pfann..

La méthode est principalement appliquée aux métaux, semi-conducteurs, ou autres composés inorganiques (oxydes, intermétalliques, etc.). Quelques applications existent pour les composés organiques, mais elles restent toutefois peu nombreuses en raison de leur faible stabilité à l'état fondu.

Le phénomène physicochimique sur lequel se fonde la méthode existe dans la nature, mais de façon extrêmement limitée.

II.7.2 Principe de la technique :

La fusion de zone consiste à générer une zone fondue sur un échantillon de solide à purifier (appelé "lingot"), et à déplacer de façon très lente cette zone d'une extrémité à l'autre du lingot. L'échantillon à purifier présente généralement une géométrie cylindrique ou parallélépipédique.

Selon la différence de solubilité des impuretés de l'échantillon entre la phase fondue et la phase solide, elles peuvent être déplacées aux différentes extrémités du lingot. À chaque déplacement élémentaire de la zone fondue, la fraction élémentaire de solide qui recristallise présente une concentration en impureté différente de la phase fondue, d'où la possibilité de déplacer les impuretés dans l'échantillon grâce au déplacement de la zone liquide.

Généralement, un passage unique de zone fondue ne permet pas d'obtenir une purification intéressante pour les applications visées. Néanmoins, des passages répétés permettent d'accentuer

le phénomène de concentration des impuretés aux extrémités du lingot, permettant de rendre la partie centrale de l'échantillon beaucoup plus pure.

Dans les échantillons inorganiques, la zone fondue est généralement créée par induction électromagnétique ou chauffage laser/infrarouge. Pour les échantillons organiques, le lingot est généralement fondu et ré-solidifié dans un tube cylindrique de verre amorphe ou cristallin. La zone fondue est ainsi souvent générée par une résistance électrique annulaire qui entoure le cylindre.²¹

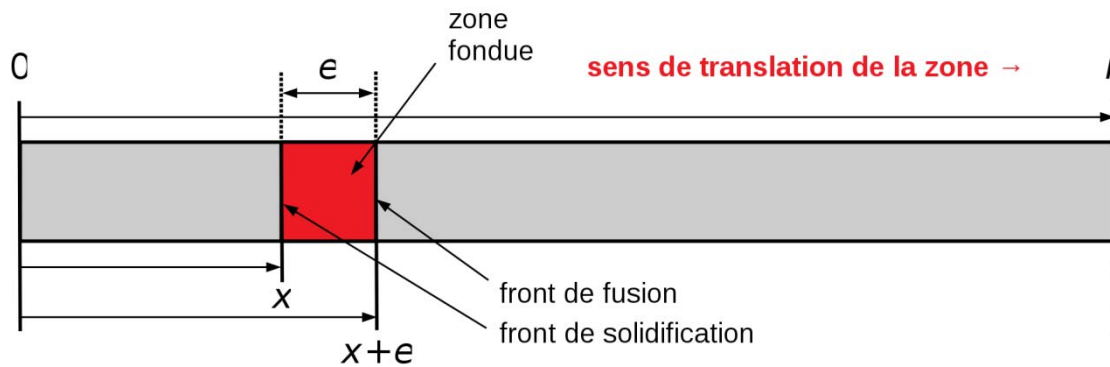


Figure II.5. La zone fondue.

II.8. La zone affectée thermiquement ZAT :

II.8.1 Définition

Sous l'action d'une source de chaleur à haute température pendant le soudage de la fusion, la zone où la structure et les propriétés changent dans une certaine plage près des deux côtés de la soudure est appelée "HEAT Affected Zone ", ou la zone "près de la zone de soudure "(Près de la zone de soudure).). Le joint soudé est principalement composé de deux parties, la couture de soudure et la zone d'ombre chaude, et il y a une zone de transition entre les deux, qui est appelée zone de fusion. Par conséquent, afin d'assurer la qualité des joints soudés, il est nécessaire de faire la structure et les propriétés de la soudure et la zone affectée par la chaleur répond aux exigences en même temps. Avec l'utilisation continue de divers aciers à haute résistance, des aciers inoxydables, des aciers résistants à la chaleur et des matériaux spéciaux en production, les problèmes existants dans la zone de soudage affectée par la chaleur deviennent plus compliqués et sont devenus la zone faible des articulations soudées. Par conséquent, les chercheurs de nombreux pays ont accordé une grande attention à la zone affectée par la chaleur de soudage.

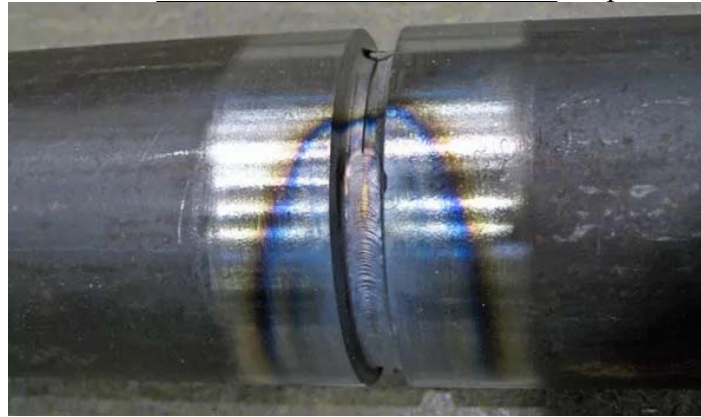


Figure II.6. Les zones ZAT et ZF.

II.8.2 Distribution des tissus :

Selon les caractéristiques de traitement thermique de l'acier, l'acier pour le soudage est divisé en deux catégories, l'une est l'acier avec une petite tendance exhaliteuse, comme l'acier à faible teneur en carbone et un acier à faible alliage, qui est appelé acier à relâchement dur; L'autre est la tendance du durcissement. Les catégories en acier plus grandes, telles que l'acier moyen en carbone, l'acier allié à faible et moyen en carbone, en alliage, etc., sont appelés acier facilement éteint. En raison de la tendance différente de l'extinction, la structure de la zone affectée par la chaleur de soudage des deux types d'aciers est également différente.

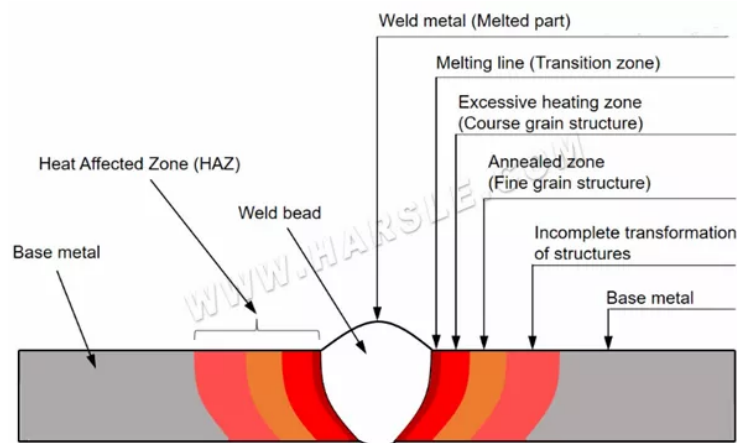


Figure II.7. Les zone de soudage.

II.8.3 Performance

La distribution de microstructure de la zone de soudage affectée par la chaleur n'est pas uniforme, et donc les performances sont également non uniformes. La zone de soudage touchée par la chaleur est différente de la couture de soudage, et la couture de soudage peut répondre aux exigences de performance en ajustant la composition chimique et en correspondant au processus de soudage approprié. Les performances de la zone touchée par la chaleur ne peuvent pas être ajustées en composition, et c'est un problème de non-uniformité qui se produit sous l'action des cycles thermiques de soudage. Pour les structures soudées générales, le durcissement, la fragilisation, le durcissement et le ramollissement de la zone touchée par la chaleur, ainsi que les propriétés mécaniques complètes, la résistance à la corrosion et les propriétés de fatigue sont

Chapitre II : Les types de soudage

principalement considérées, qui sont déterminées en fonction des exigences d'utilisation spécifiques de la structure soudée.

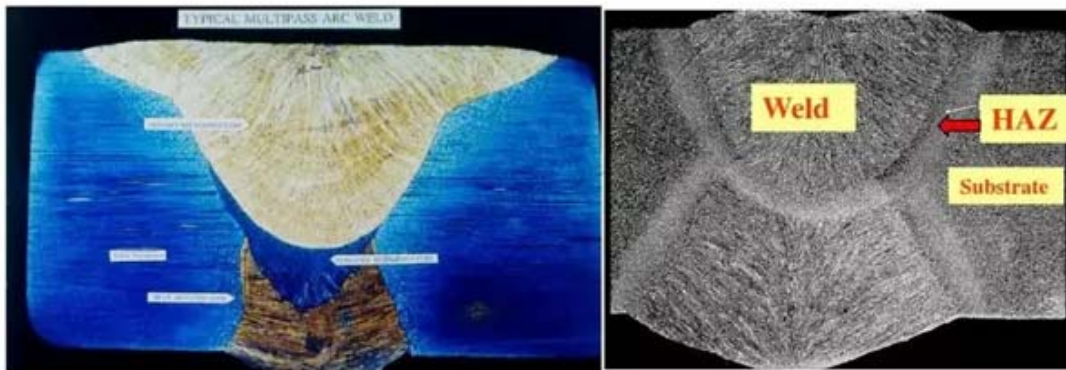


Figure II.8. Les zones de soudage.

II.8.4 Durcissement

La dureté de la zone affectée par la chaleur dépend principalement de la composition chimique et des conditions de refroidissement de l'acier à souder, et son essence est de refléter les performances de différentes structures métallographiques. Parce que le test de dureté est plus pratique, le H_{max} de dureté la plus élevée de la zone touchée par la chaleur est souvent utilisé pour juger des performances de la zone touchée par la chaleur, qui peut indirectement prédire la ténacité, la fragilité et la résistance aux fissures de la zone touchée par la chaleur. Dans la mémoire, le H_{MAX} de la zone touchée par la chaleur a été utilisé comme un indice important pour évaluer la soudabilité. Il convient de souligner que même la même structure a une dureté différente, qui est liée à la teneur en carbone de l'acier et de la composition en alliage. Par exemple, la dureté de la martensite à haute teneur en carbone peut atteindre $600H_V$, tandis que la dureté de la martensite à faible teneur en carbone n'est que de 350 à $390 H_V$.

CHAPITRE III

Matériaux et Procédures Expérimentales



III.1. Matériau de base :

Les matériaux utilisés dans cette étude expérimentale sont : l'alliage d'Aluminium 6063

• Catégorie d'aluminium 6063 :

L'aluminium 6063 appartient à la série d'alliages d'aluminium 6000. Il est souvent appelé aluminium architectural car c'est un excellent choix pour les matériaux architecturaux. L'aluminium 6063 est appelé H9 dans la norme britannique (BS) et EN AW-6063 dans les normes européennes. La désignation chimique EN pour l'aluminium 6063 est AlMg0.7Si. L'aluminium 6061 est sur le marché depuis 1944 et a reçu sa désignation standard en 1954. En raison de ses excellentes propriétés d'extrusion, l'aluminium 6063 est souvent utilisé pour dessiner des formes de profilés solides. Des exemples de telles formes sont des tubes, des tiges et bien d'autres. Il est connu pour sa haute résistance à la corrosion et sa bonne finition de surface. Sa composition en éléments principaux comprend Al, Mg et Si par ordre décroissant de numéros. Alors que l'aluminium 6063 n'est pas différent de l'aluminium 6061, son excellente résistance à la corrosion et sa faible résistance en font un meilleur choix pour l'extrusion.

Le tableau III.1 donne la composition chimique de l'alliage d'aluminium utilisé dans notre travail a été analysé à l'unité Algal+ de M'sila, en utilisant la méthode de spectroscopie.

Elément	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Pb	Sn	Na	Al
(Wt%)	0.40	0.38	0.082	0.66	0.52	0.17	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	98.31

Tableau III.1. Composition chimique de l'alliage d'aluminium 6063.

• **MACHINE A SOUDER :**

Le tableau suivant contient les caractéristiques des machines de soudage par friction.

Effort maximal en forgeage (daN)	3000	6000	12000	25000	50000	100000	200000
Capacité maximale sur acier mi-dur (*) (mm ²)	200	400	800	1600	3200	6400	13000
Diamètre de barre correspondant (mm)	16	22,5	32	46	64	90	129
Vitesse de rotation nominale de broche (**) (tr/min)	3000 et 1500	3000 et 1500	2200 et 1100	1460 et 730	1200 et 900	1000 et 500	350 et 700
Puissance du moteur de broche (kW)	11	14,7	22	29,5	51,5	73,6	89

(*) La puissance minimum (effort minimum et vitesse maximum) peut être de 1/10 ou 1/20 de la puissance maximum.
(**) Sur les machines standard, la vitesse est réglée en faisant varier le rapport de démultiplication

Tableau III.2. Caractéristiques des machines utilisées dans le soudage par friction.

Dans les figures III.1. et III.2. on représente un exemple d'une machine de soudage par friction.

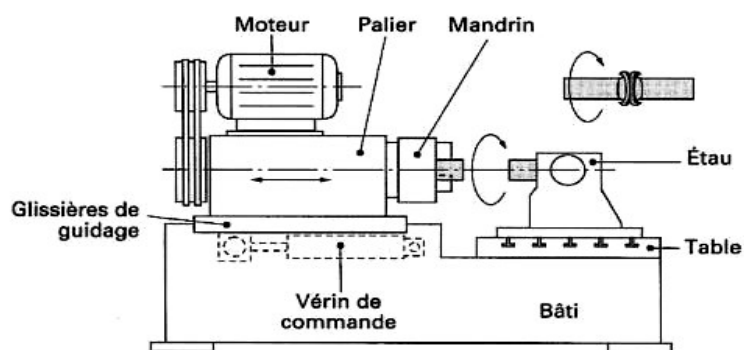


Figure III.1. Schéma d'une machine de soudage.



Figure III.2. La machine de soudage par friction rotative utilisée.

Les données d'orientation sur la machine sont les suivantes :

Espace machine :	Tour parallèle universel
Constructeur :	TST groupe d'entreprise, TOS Trenčín
Type :	E3N-03
Longueur totale de la machine (mm) :	1000 × 1500 × 2000
Largeur totale (mm) :	1100 × 1100 × 1100
Hauteur totale (mm) :	1410 × 1435 × 1460
Poids de la machine :	1620 kg
Puissance absorbée :	6,6 kW \hat{R} 50 Hz

Tableau III.3. Les caractéristiques de machine de soudage

III.3. Procédures de soudage :

III.3.1. Préparation des pièces à souder par friction :

Avant le début du processus de soudage par friction rotative, des barres des matériaux utilisés (aluminium 6063) sont découpées en échantillons d'une longueur de 80 mm. Les extrémités des échantillons ont été polies et nettoyées pour réduire l'influence des contaminants, en particulier de la graisse.



Figure III.3. Les barres d'alliage d'aluminium.

III.3.2. Soudage des éprouvettes

Nous avons choisi le soudage par friction rotative pour notre mise en œuvre pour les raisons suivantes:

- Possibilité d'exécution sur tour parallèle E3N-01.
- Facilité d'utilisation.
- Moins cher

Pour chaque lot de pièces, on a appliqué les régimes de rotation et durée suivants :

- Eprouvette 1 : $N = 750 \text{tr/min}$ et $t=10 \text{ s}$;

- *Eprouvette 2 : $N = 750 \text{ tr/min}$ et $t=20 \text{ s}$;*
- *Eprouvette 3 : $N = 750 \text{ tr/min}$ et $t=30 \text{ s}$;*
- *Eprouvette 4 : $N = 1060 \text{ tr/min}$ et $t=10 \text{ s}$;*
- *Eprouvette 5 : $N = 1060 \text{ tr/min}$ et $t=20 \text{ s}$;*
- *Eprouvette 6 : $N = 1060 \text{ tr/min}$ et $t=30 \text{ s}$;*
- *Eprouvette 7 : $N = 1500 \text{ tr/min}$ et $t=10 \text{ s}$;*
- *Eprouvette 8 : $N = 1500 \text{ tr/min}$ et $t=20 \text{ s}$;*
- *Eprouvette 9 : $N = 1500 \text{ tr/min}$ et $t=30 \text{ s}$;*

<i>Eprouvette</i>	<i>La rotation (Tr/mn)</i>	<i>La durée (s)</i>
<i>1</i>	<i>750</i>	<i>10</i>
<i>2</i>	<i>750</i>	<i>20</i>
<i>3</i>	<i>750</i>	<i>30</i>
<i>4</i>	<i>1060</i>	<i>10</i>
<i>5</i>	<i>1060</i>	<i>20</i>
<i>6</i>	<i>1060</i>	<i>30</i>
<i>7</i>	<i>1500</i>	<i>10</i>
<i>8</i>	<i>1500</i>	<i>20</i>
<i>9</i>	<i>1500</i>	<i>30</i>

Tableau III.4. Les paramètres de soudage.

• **Processus :**

Le principe du soudage par friction est illustré aux figures ci-dessous. Supposons que deux planches ou deux tubes doivent être soudés bout à bout .L'une des pièces est serrée tandis que l'autre est entraînée en rotation par rapport à l'autre à vitesse constante au moyen d'un moteur (soudage par proximité). Lorsque deux pièces entrent en contact, un couple de traînée est créé par des forces de frottement.



Figure III.4. Le principe du soudage

Les deux côtés sont verrouillés et l'un d'eux est rotatif. L'énergie résultante est convertie en chaleur à la surface de contact. La chaleur générée amène la température à la température de soudage (température de forgeage) en peu de temps. La partie tournante est alors séparée de la poignée et freinée jusqu'à l'arrêt.

Les pièces sont en contact les unes avec les autres du fait de la force de frottement F_1 : la température à la surface de contact augmente. Une force de forgeage axiale est appliquée pour créer une soudure entre deux pièces. Pendant la phase de chauffage et la phase de soudage, une quantité de métal ductile est forcée sous la force de compression axiale pour former une bavure de soudure par friction caractéristique.

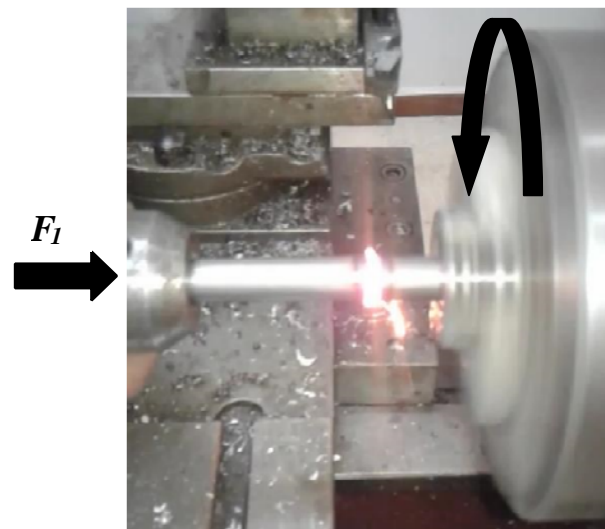


Figure III.5. Le principe du soudage.

III.3.3. Les paramètres d'usinage :

Les éprouvettes sont normalisées suivant la norme NF EN ISO 6892-1 et ont les dimensions représentées dans la figure III.6

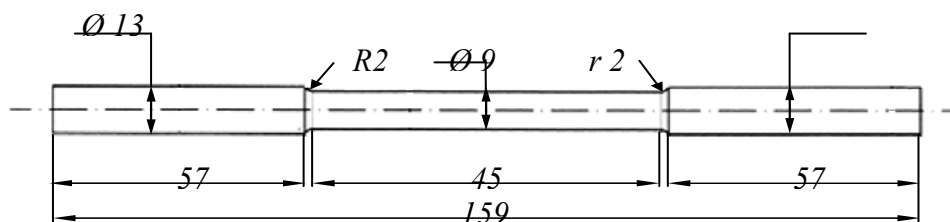


Figure III.6. Montre l'opération d'usinage d'une éprouvette.

• Usinage des éprouvettes :

L'usinage des éprouvettes a été réalisé comme suit :

- Phase 1 : obtention de brute
- Phase 2 : dressage des faces
- Phase 3 : chariotage $\varnothing 13$

- Phase 4 : chariotage $\varnothing 9$ pièce du milieu dans la zone 45 mm avec le R4
- Phase 5 : contrôle finale des dimensions

La figure III.7 montre l'opération d'usinage d'une éprouvette.



Figure III.7. Les éprouvettes après usinage.

III.5. Caractérisation mécaniques des éprouvettes soudées:

Pour évaluer la résistance des joints soudés par friction rotative, des essais mécaniques ont été réalisés.

III.5.1. Essai de dureté vickers :

L'essai de dureté est généralement réalisé en mesurant la taille de l'empreinte laissée par le pénétrateur (Vickers).

La méthode d'essai de dureté la mieux adaptée dépend de la microstructure du matériau de la soudure, par exemple son homogénéité. Il est important que le matériau soumis à l'empreinte de l'appareil d'essai de dureté soit représentatif de l'intégralité de la microstructure, (pour le cas de macro dureté), sauf si l'objectif est d'étudier les différentes composantes de la microstructure. Cela signifie que si la microstructure est très grossière ou hétérogène, l'empreinte requise devra être plus grande que pour un matériau homogène.

Les critères de choix de la méthode d'essai :

Lors de la sélection d'une méthode, il faut tenir compte des points suivants :

- Le type de matériau à tester
- L'exigence de se conformer à une norme
- La dureté approximative du matériau
- L'homogénéité/hétérogénéité du matériau
- La taille de l'échantillon
- La nécessité de procéder à un enrobage
- Le nombre d'échantillons à tester
- La précision de résultat requise

La méthode de Vickers : La dureté Vickers (HV) est calculée en mesurant les longueurs des 2 diagonales d'une empreinte laissée par l'application d'un pénétrateur diamant pyramidal à une charge donnée dans le matériau de l'échantillon. Les longueurs des diagonales de l'empreinte sont lues de manière optique afin de déterminer la dureté à partir d'une table ou formule [21].



Figure III.8 Appareil de mesure de dureté.

III.5.2. Essai de Traction :

L'essai le plus fréquemment utilisé afin de déterminer le comportement mécanique de la soudure. Cet essai est caractérisé par sa facilité de mise en œuvre et par la richesse des informations fournies.

On exerce une force de traction sur un barreau de dimension standardisée, jusqu'à sa rupture, en suivant un processus de mise en charge à une vitesse de déformation constante. L'éprouvette d'essai est prélevée dans le matériau à caractériser et usinée à des dimensions normalisées, afin d'assurer une meilleure comparaison des essais effectués dans différents laboratoires. Pour chaque type de matériau, il existe un type d'éprouvette.

Les paramètres remarquables de l'essai de traction :

- *Le module d'élasticité E : donné par la pente du domaine élastique du diagramme contrainte-déformation.*
- *La limite d'élasticité R_e : correspond à la contrainte à partir de laquelle le matériau commence à se déformer plastiquement.*
- *La résistance à la traction R_m : se définit comme la contrainte maximale atteinte durant l'essai de traction.*
- *L'allongement à la rupture ϵ_r : que l'on peut lire sur le diagramme ou sur l'éprouvette rompue.*

On peut également définir certaines caractéristiques déterminées par l'essai de traction

- *La rigidité est fonction de l'énergie des liaisons entre les atomes ou les molécules constituant le matériau. On mesure la rigidité principalement par le module d'YOUNG. Plus ce module est élevé, plus le matériau est rigide.*
- *La résistance caractérise la contrainte maximale qu'un matériau supporte avant de se rompre. Cette résistance est fonction de l'intensité des liaisons mais également de la forme des pièces ou de ses défauts.*
- *La ductilité correspond à la capacité d'un matériau à se déformer de façon permanente avant de se rompre. Plus l'allongement à la rupture est élevé, plus le matériau est considéré comme ductile. A l'opposé, lorsque la déformation permanent est très réduite ou nulle, on parle d'un matériau fragile. Un matériau fragile peut présenter une résistance très élevée*
- *La ténacité qui représente la quantité d'énergie absorbée à la rupture par un matériau. Elle caractérise la résistance à la propagation brutale de fissures. Sa valeur est égale à l'aire de la surface sous la courbe contrainte-déformation. Cette caractéristique est importante pour les céramiques[22,23]*

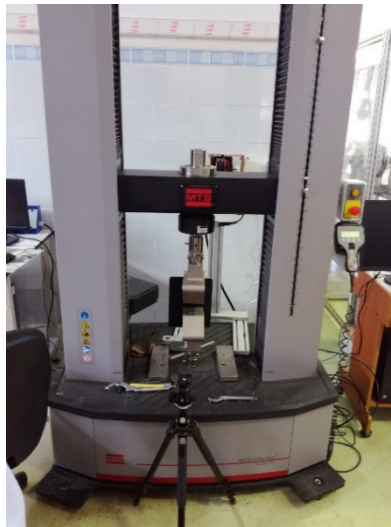


Figure III.9. Machine de traction.

CHAPITRE IV

Résultats & Discussions



Ce chapitre présente les résultats de notre travail, ainsi que leurs interprétations et discussion. Il se divise en deux parties. La première partie est consacrée aux résultats des expériences des essais et techniques de caractérisation mécaniques tel les mesures de dureté et les essais de traction des éprouvettes soudées par friction rotative. La deuxième partie est consacrée à utiliser le logiciel « Minitab » pour l'optimisation des paramètres de soudage par friction (durée et la rotation) afin d'aboutir aux meilleures caractéristiques mécaniques.

IV.1. La première partie :

Résultats des expériences des essais et techniques de caractérisation mécaniques

Les différentes éprouvettes soudées en Aluminium 6063 avec les différents paramètres de soudage ont été subdivisées comme représenté sur le tableau suivant :

<i>les éprouvettes</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>A "rotation (tr/mn)"</i>	750	750	750	1060	1060	1060	1500	1500	1500
<i>B "durée (s)"</i>	10	20	30	10	20	30	10	20	30

Tableau IV.1. La distribution des paramètres de soudage par friction sur les éprouvettes.

IV.1.1 Les résultats de l'essai de dureté :

L'essai de dureté est généralement réalisé en mesurant la profondeur de pénétration du pénétrateur ou en mesurant la taille de l'empreinte laissé par le pénétrateur.

Dans notre expérience, nous avons choisi la résistance de la dureté Hv = 10 Kgf.

Nous avons choisi 6 points de chaque éprouvette ou entre chaque point et 1mm :

- 2 points en MB (métal de base)
- 2 points en ZAT (zone affectée thermiquement)
- 2 points en ZF (zone fondue)

IV.1.1.1 Les éprouvettes 1/2/3 :

Le diagramme suivant représente la dureté (Hv) par dénomination de distance (mm) des courbes de dureté des éprouvettes avec la même vitesse de rotation que les données suivantes :

- Rotation de la broche N=750 tr/mn.
- La résistance de la dureté Hv = 10 Kgf.

	Ep1	Ep2	Ep3	MOYEN
MB	50,7	54,4	58	54,37
ZAT	65,4	56,1	44,4	55,30
ZF	69,8	10,5	53,4	44,57
ZAT	76,7	57,1	47,5	60,43
MB	50,6	54,3	60	54,97

Tableau IV.2. La dureté des éprouvettes 1/2/3.

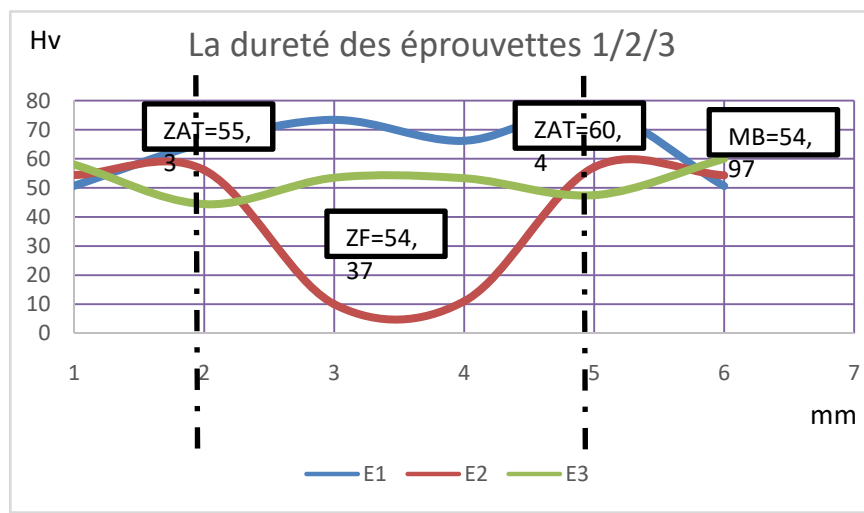


Figure IV.1. Graphique de dureté des ép 1/2/3.

D'après le graphique précédent, nous remarquons que l'exemple de paramètres d'éprouvette 3 sa dureté est supérieure à celle des autres éprouvettes, quant à l'éprouvette no 1, il est un peu faible que le reste des éprouvettes, où sa dureté dans la zone fondue est tombée à $Hv = 10$ Kgf.

IV.1.1.2. Les éprouvettes 4/5/6:

Le diagramme suivant représente la dureté (Hv) par dénomination de distance (mm) des courbes de dureté des éprouvettes avec la même vitesse de rotation que les données suivantes :

- Rotation de la broche $N=1060$ tr/mn.
- La résistance de la dureté $Hv = 10$ Kgf.

	Ep4	Ep5	Ep6	MOYEN
MB	62,5	55,3	56,5	58,1
ZAT	43	41,8	52,3	45,7
ZF	56,65	58,25	49,25	54,7
ZAT	46,6	43,5	51,7	47,3
MB	61,9	55,4	56,6	58,0

Tableau IV.3. La dureté des éprouvettes 4/5/6.

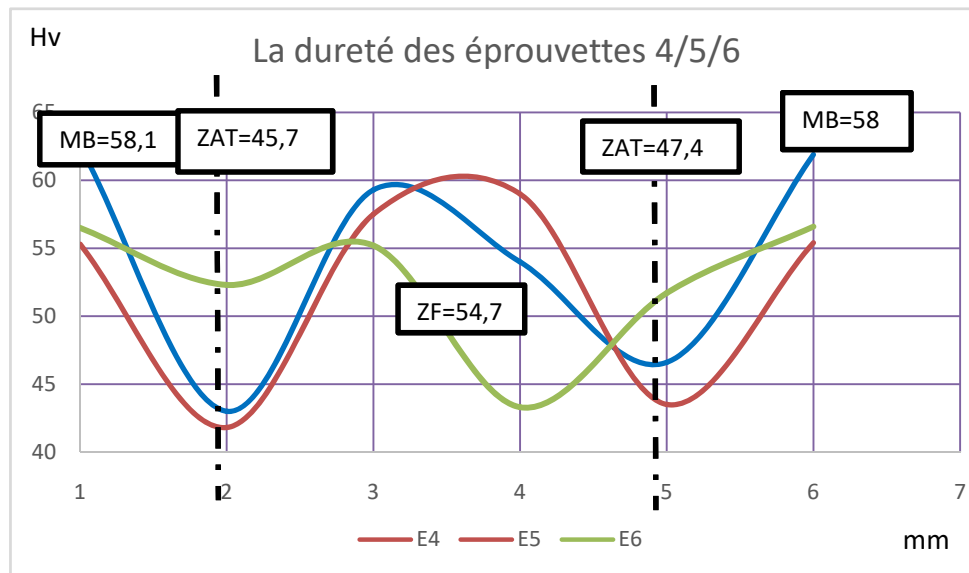


Figure IV.2. Graphique de dureté des ép 4/5/6.

Par rapport aux premières éprouvettes, nous remarquons une escalade marquée dans les graphiques parce que nous avons augmenté la vitesse de rotation. Dans l'éprouvette no 4, qui a une durée $t=10$ (s) la dureté a atteint $Hv=56.65$ Kgf au la zone fondue.

IV.1.1.3. Les éprouvettes 7/8/9 :

Le diagramme suivant représente la dureté (Hv) par dénomination de distance (mm) des courbes de dureté des éprouvettes avec la même vitesse de rotation que les données suivantes :

- Rotation de la broche $N=1500$ tr/mn.
- La résistance de la dureté $Hv = 10$ Kgf.

	Ep7	Ep8	Ep9	MOYEN
MB	53,8	53,7	60,9	56,1
ZAT	44,1	52	46	47,4
ZF	46,35	48,35	51,4	48,7
ZAT	50,8	55,3	44,8	50,3
MB	54,4	55,1	60,1	56,5

Tableau IV.4. La dureté des éprouvettes 7/8/9.

- **Observation :**

Malgré le changement de paramètres de soudage (rotation et la durée), la valeur de dureté n'a pas beaucoup changé par rapport aux éprouvettes précédant, éprouvette no 9 c'est celui qui a le plus de valeur, où la dureté a atteint $Hv=51.4$ Kgf au la zone fondue.

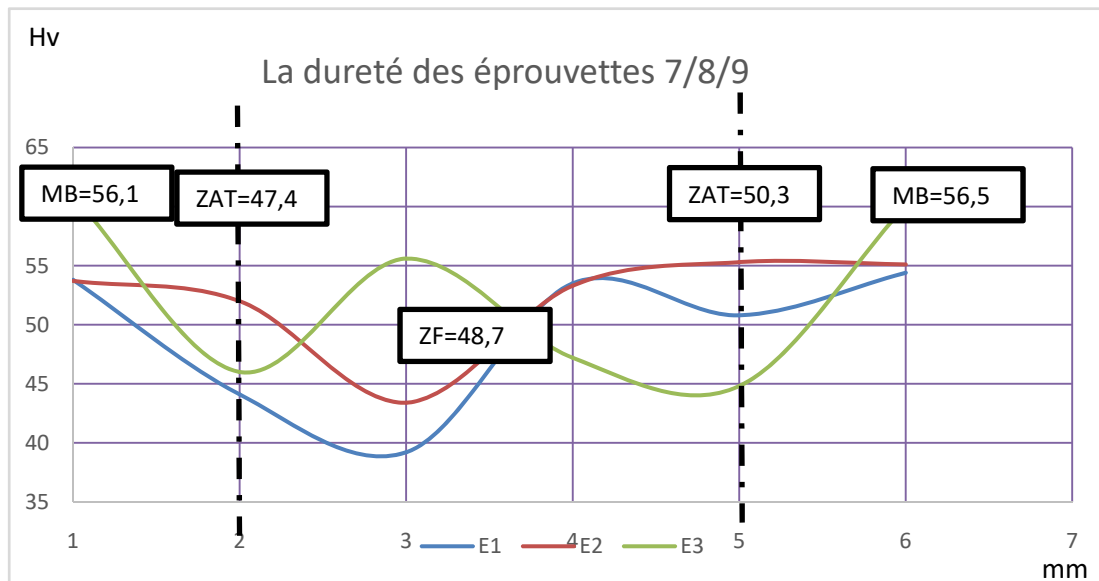


Figure IV.3. Graphique de dureté des ép 7/8/9.



Figure IV.4. Exemple d'essai de dureté.

La figure IV.4 est un exemple de l'essai de dureté par un appareil de dureté.

• **Résultat :**

D'après les figures précédentes, on constate que la dureté des différents assemblages est élevée dans la zone fondue, puis diminue progressivement, puis devient constante vers le matériau de base. Cela s'explique par le fort échauffement du matériau dans les couches de fusion du matériau et le durcissement ultérieur de la surface de la couche adjacente. Ces chiffres montrent également que la dureté des encoches diminue à mesure que le RPM augmente.

IV.1.2. Les résultats de l'essai de traction :

Les figures IV.5 / IV.6 / IV.7 montre les courbes graphiques de l'essai de traction a la fraction des éprouvettes.

Grace à les courbes, nous pouvons extraire les « E » et « Rm » dont :

- **Elasticité (E) :** Une déformation élastique est une déformation réversible, c'est-à-dire qui disparaît quand ses causes (les contraintes) disparaissent.
- **Résistance mécanique (Re) :** La résistance à la traction (tensile strength) est la contrainte de traction mécanique maximale avec laquelle une éprouvette peut être chargée. Lorsque la résistance à la traction est dépassée, le matériau défaille: L'absorption des forces diminue jusqu'à ce que l'échantillon de matériau se déchire.

IV.1.2.1. Des éprouvettes 1/2/3 :

Le diagramme suivant représente la contrainte (Mpa) par dénomination de déformation (%) des courbes de traction des éprouvettes avec la même vitesse de rotation que les données suivantes :

- Rotation de la broche $N=750$ tr/mn.
- La vitesse de traction $V=0.3$ mm/mn.

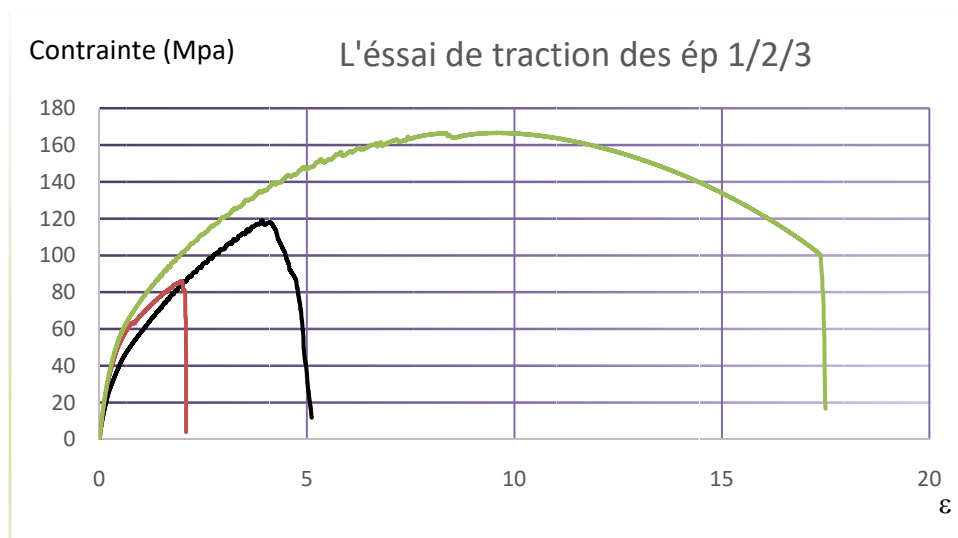


Figure IV.5. L'essai de traction des ép 1/2/3.

Note dans la courbe 2 résistance à la traction faible ceci est dû à la durée 20s par rapport la durée 30s.

IV.1.2.2. Des éprouvettes 4/5/6 :

Le diagramme suivant représente la contrainte (Mpa) par dénomination de déformation (%) des courbes de traction des éprouvettes avec la même vitesse de rotation que les données suivantes :

- Rotation de la broche $N=1060$ tr/mn.
- La vitesse de traction $V=0.3$ mm/mn.

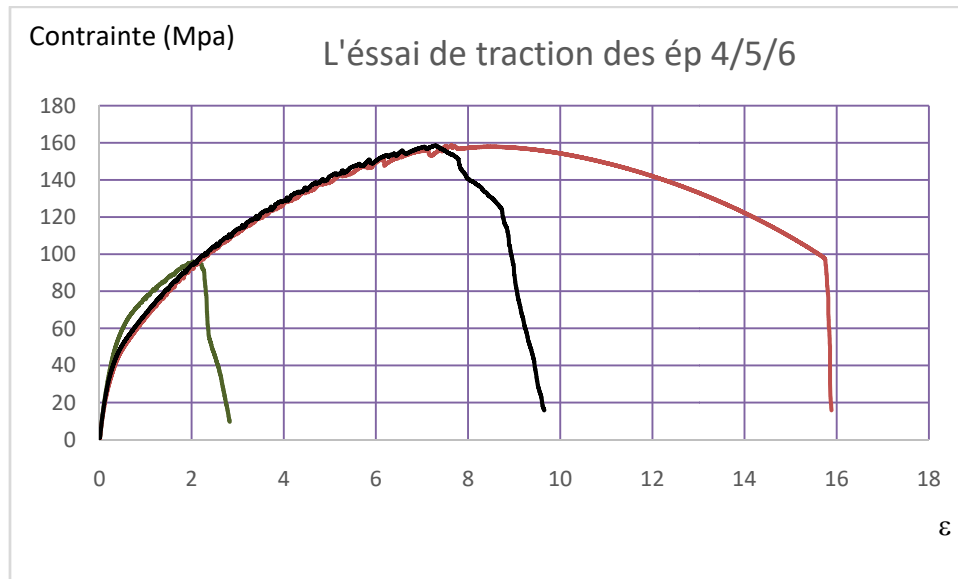


Figure IV.6. Graphique d'essai de traction des ép 4/5/6.

Note dans la courbe 4 résistance à la traction faible ceci est dû à la durée 10s par rapport aux autres durées.

IV.1.2.3. Des éprouvettes 7/8/9 :

Le diagramme suivant représente la contrainte (Mpa) par dénomination de déformation (%) des courbes de traction des éprouvettes avec la même vitesse de rotation que les données suivantes :

- Rotation de la broche $N=1500$ tr/mn.
- La vitesse de traction $V=0.3$ mm/mn

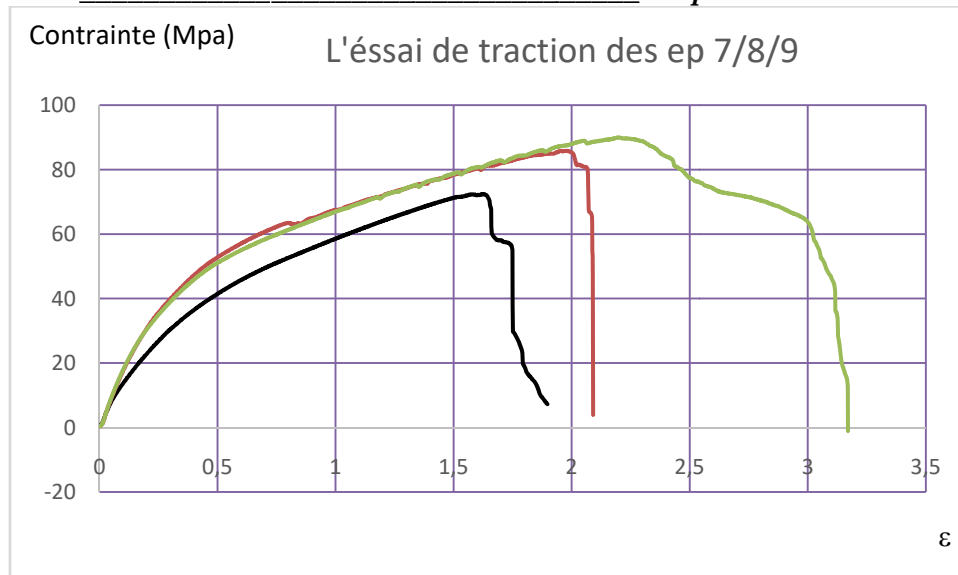


Figure IV.7. Graphique d'essai de traction des ép 7/8/9.

Note dans la courbe 7 résistance à la traction faible ceci est dû à la durée 10s par rapport aux autres durées.

La figure IV.8 montre les échantillons soudés après les tests de traction. Tous les échantillons soudés, sous différents paramètres, étaient fracturés dans l'aluminium avec uniforme rétreinte (neckingshape), sauf un seul qui été fracturé à l'interface du joint.



Figure IV.8. Les éprouvettes après l'essai de traction

• **Interprétation de résultats :**

Une augmentation de la vitesse de rotation lors du soudage entraîne :

- Une diminution de la résistance élastique (R_e) des pièces soudées. Cette réduction peut être exprimée comme une réduction du frottement.

- Diminution de la déformation unitaire (ϵ).
- L'augmentation de la vitesse diminue la résistance des joints soudés.

IV.1.3. Tableau des résultats :

Dans le tableau suivant nous avons enregistré tous les résultats obtenus dans les essais pratiques (dureté et traction) :

	Rotation (tr/mn)	Durée (s)	Hv MB	Hv ZAT	Hv ZF	E(Mpa)	Rm(Mpa)
1	750	10	50.5	71.05	69.8	77.99	118.93
2	750	20	54.35	56.6	10.5	19.66	24.64
3	750	30	59	45.95	53.4	106.56	166.65
4	1060	10	62.2	40.8	56.65	121.29	95.91
5	1060	20	55.35	42.65	58.25	92.36	158.58
6	1060	30	56.55	52	49.25	100.94	138.47
7	1500	10	54.1	47.45	46.35	82.41	72.48
8	1500	20	54.4	53.65	48.35	107.93	85.85
9	1500	30	60.5	45.4	51.4	123.02	90.01

Tableau IV.5. Les résultats pratiques.

IV.2. La deuxième partie : l'optimisation des paramètres de soudage par friction :

Afin d'avoir des résultats optimales pour les facteurs qui contrôlent l'opération de soudage par friction, à extraire des différentes essais pratiques, un recours à l'utilisation d'un logiciel de calcul statistique tel le cas de « Minitab »

IV.2.1. Définition du logiciel « MINITAB »

Minitab est un logiciel de calcul des statistiques dans lequel vous entrez vos données expérimentaux, lesquelles pourront être ensuite analysées sous différents angles. Vous pourrez également obtenir différents tableaux et graphiques, faire des calculs... à l'image de ce qu'on peut faire avec Excel. Minitab est un véritable outil pour faire « parler » les statistiques.

IV.2.2. Les analyses de Taguchi :

La méthode de Taguchi est une méthode introduite par Genichi Taguchi (Taguchi et Wu, 1980) qui est une méthode de plans d'expériences apportant une amélioration aux plans factoriels complets et fractionnaires.

Elle consiste à utiliser des tables orthogonales, qui ont été préétablies par G. Taguchi, ces tables dépendent du nombre d'essais à réaliser, du nombre de facteurs composant le modèle, et du nombre de niveaux par facteurs.

Dans notre mémoire, l'application de la méthode de Taguchi pour deux facteurs « durée, rotation » avec 3 niveaux les résultats sont représentés par les figures suivantes, qui représentent la dureté au niveau métal de base (MB) :

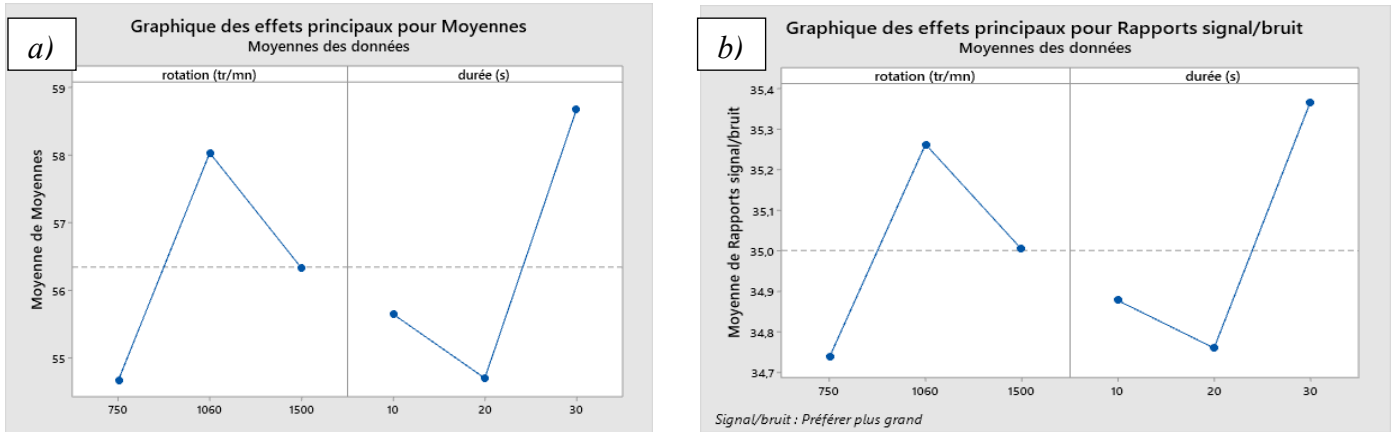


Figure IV.9. Représentation a) des principales moyennes et (b) rapport S/B pour Hv MB.

Dans la figure IV.9 nous constatons en lisant les courbes que l'éprouvette n°6 a des paramètres parfaits au Hv MB et que les paramètres de l'éprouvette n°2 ne sont pas appropriés.

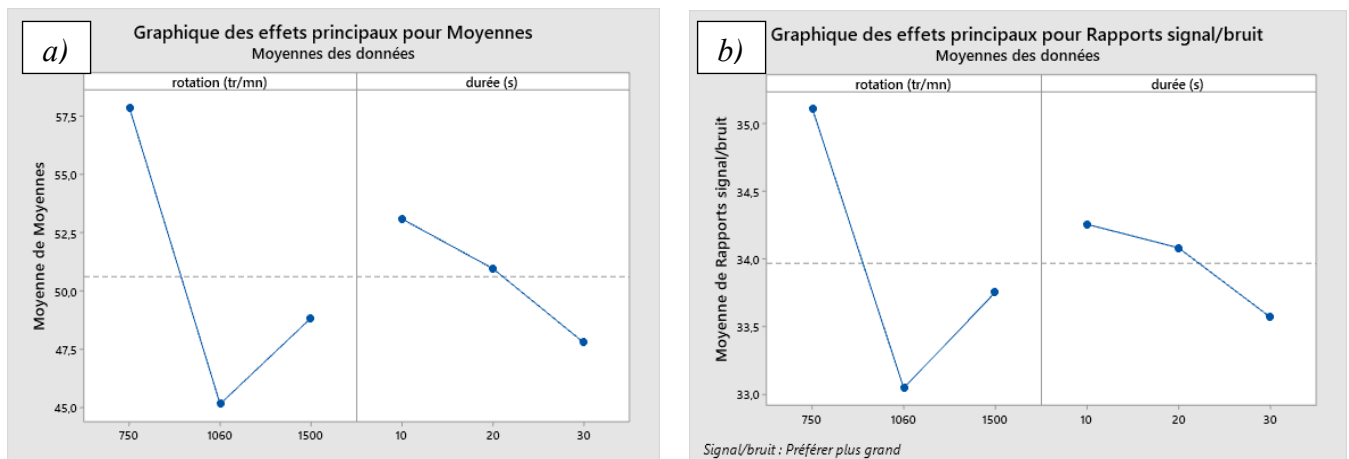


Figure IV.10. Représentation a) des principaux moyennes et (b) rapport S/B pour Hv ZAT.

Dans la figure IV.10 nous constatons en lisant les courbes que l'éprouvette n°1 a des paramètres parfaits au Hv ZAT et que les paramètres de l'éprouvette n°6 ne sont pas appropriés.

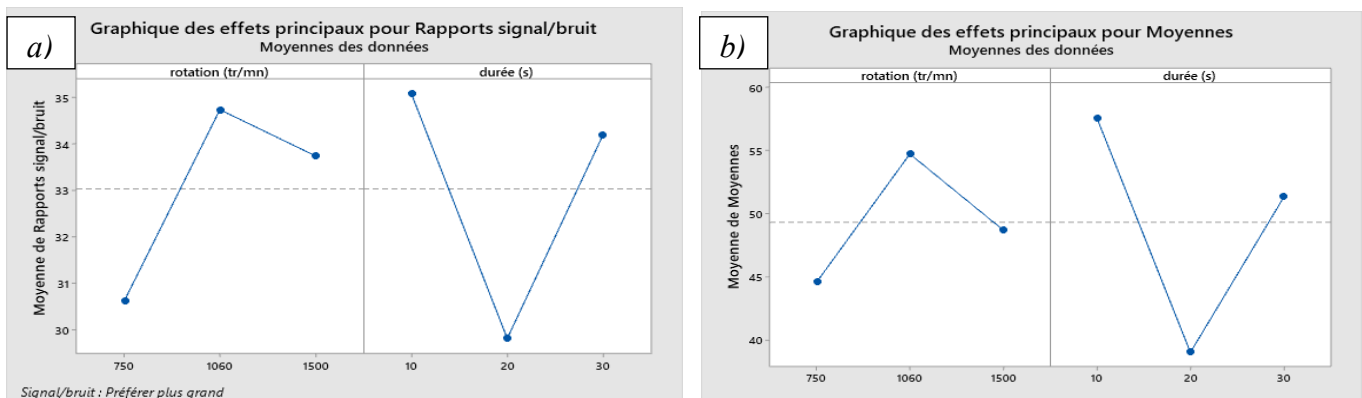


Figure IV.11. Représentation b) des principaux moyennes et (a) rapport S/B pour Hv ZF.

Dans la figure IV.11 nous constatons en lisant les courbes que l'éprouvette n°4 a des paramètres parfaits au Hv ZF et que les paramètres de l'éprouvette n°2 ne sont pas appropriés.

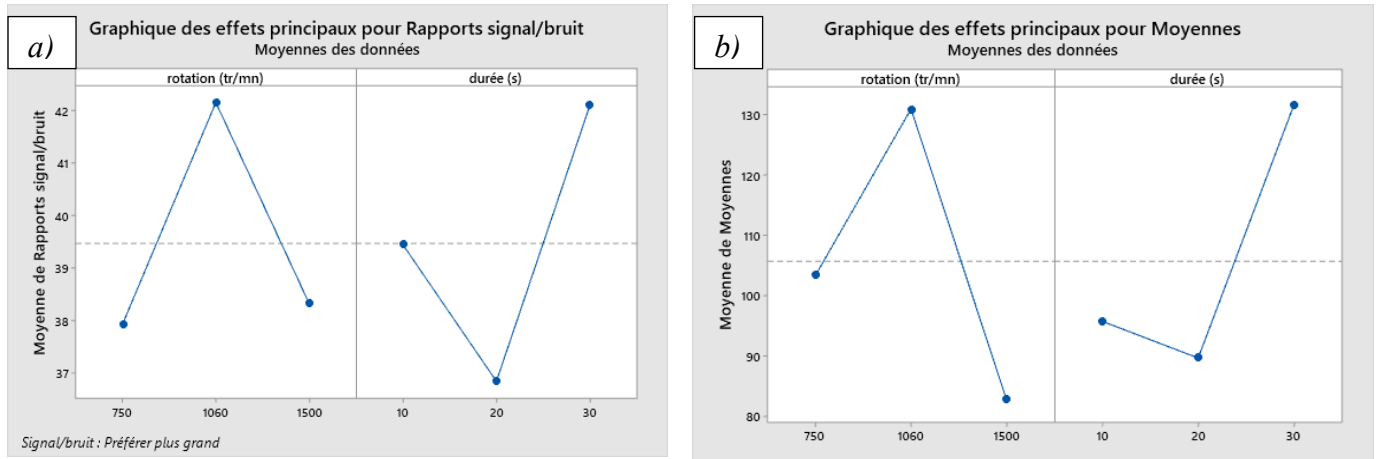


Figure IV.12. Représentation b) des principales moyennes et (a) rapport S/B pour E (Mpa). Dans la figure IV.12 nous constatons en lisant les courbes que l'éprouvette n°6 a des paramètres parfaits au E (Mpa) et que les paramètres de l'éprouvette n°2 ne sont pas appropriés.

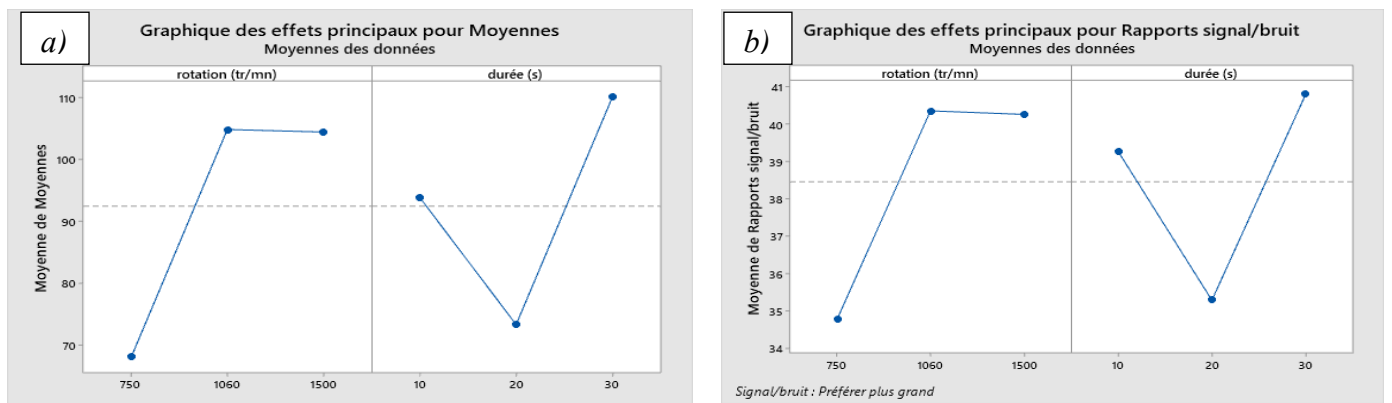


Figure IV.13. Représentation a) des principaux moyennes et (b) rapport S/B pour Rm (Mpa).

Dans la figure IV.13 nous constatons en lisant les courbes que l'éprouvette n°6 a des paramètres parfaits au Rm (Mpa) et que les paramètres de l'éprouvette n°2 ne sont pas appropriés.

IV.2.3. Les analyses de régression :

L'analyse de régression calcule la relation estimée entre une variable dépendante et une ou plusieurs variables explicatives. Elle vous permet de modéliser la relation entre les variables choisies et de prévoir des valeurs en fonction du modèle.

Par la méthode de régression on a obtenu les équations de régression suivante :

$$Hv MB = 51,31 + 0,00181 \text{ rotation (tr/mn)} + 0,152 \text{ durée (s)} \dots\dots \text{équation (1)}$$

$$Hv ZAT = 67,7 - 0,0107 \text{ rotation (tr/mn)} - 0,266 \text{ durée (s)} \dots\dots \text{équation (2)}$$

$$Hv ZF = 50,9 + 0,0042 \text{ rotation (tr/mn)} - 0,313 \text{ durée (s)} \dots\dots \text{équation (3)}$$

$$E (Mpa) = 26,3 + 0,0452 \text{ rotation (tr/mn)} + 0,81 \text{ durée (s)} \dots \text{équation (4)}$$

$$Rm (Mpa) = 106,2 - 0,0330 \text{ rotation (tr/mn)} + 1,80 \text{ durée (s)} \dots \text{équation (5)}$$

Grace aux diagrammes de Pareto, nous pouvons identifier le paramètre le plus influent sur la qualité de la soudure :

- *Hv MB* : La durée
- *Hv ZAT* : La rotation
- *Hv ZF* : La durée
- *E (Mpa)* : La rotation
- *Rm (Mpa)* : La durée

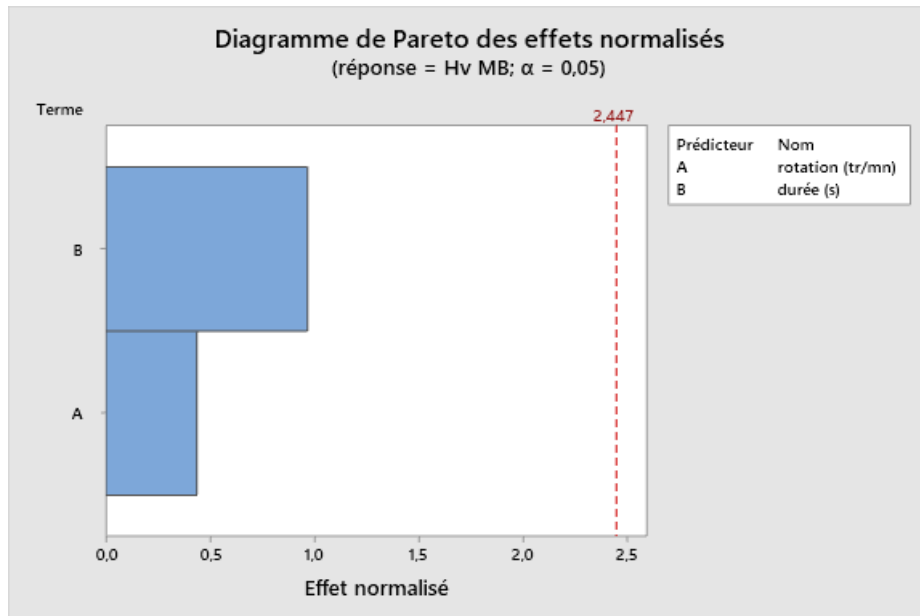


Figure IV.14. Diagramme de Pareto des effets normalisés (*Hv MB*).

La figure IV.14 montre le paramètre le plus influent sur *Hv MB* est la durée.

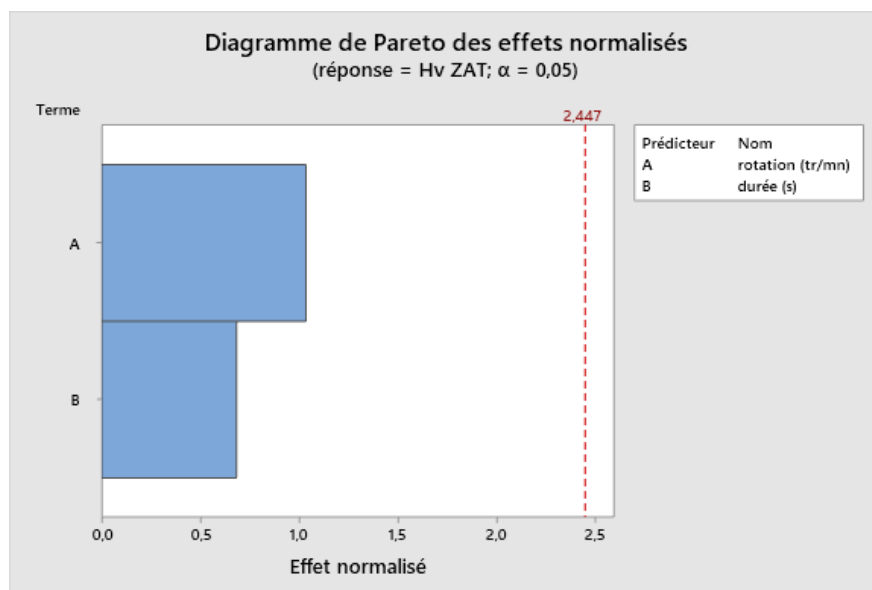


Figure IV.15. Diagramme de Pareto des effets normalisés (*Hv ZAT*).

La figure IV.15 montre le paramètre le plus influent sur $H_v ZAT$ est la rotation.

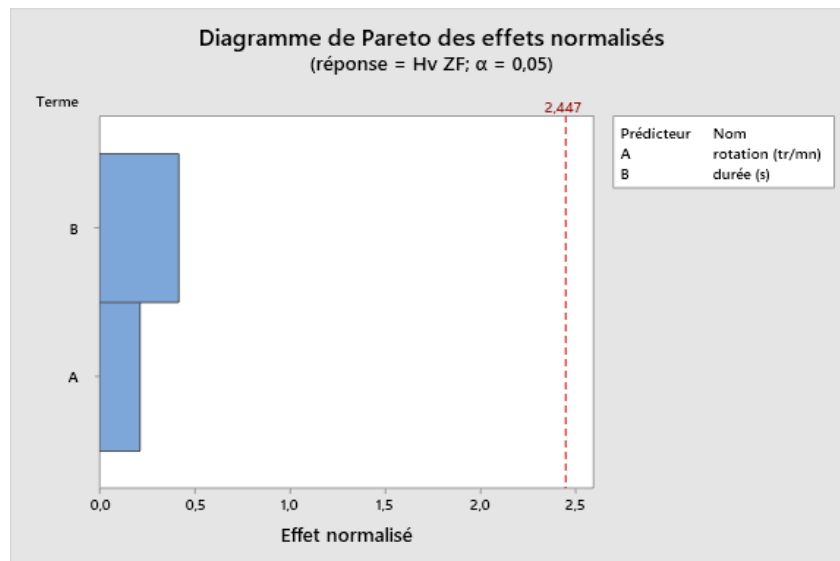


Figure IV.16. Diagramme de Pareto des effets normalisés ($H_v ZF$).

La figure IV.1 montre le paramètre le plus influent sur $H_v ZF$ est la durée.

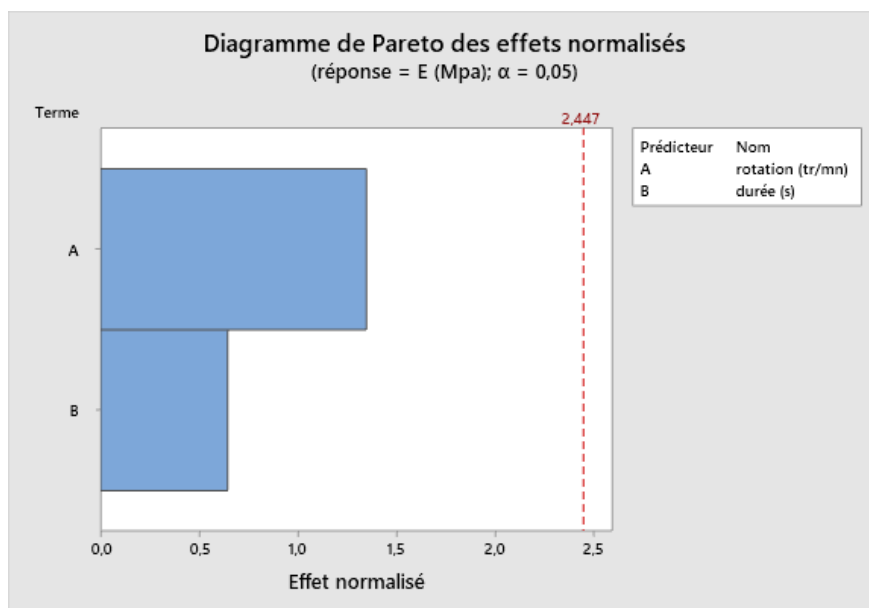


Figure IV.17. Diagramme de Pareto des effets normalisés (E).

La figure IV.17 montre le paramètre le plus influent sur E (Mpa) est la rotation.

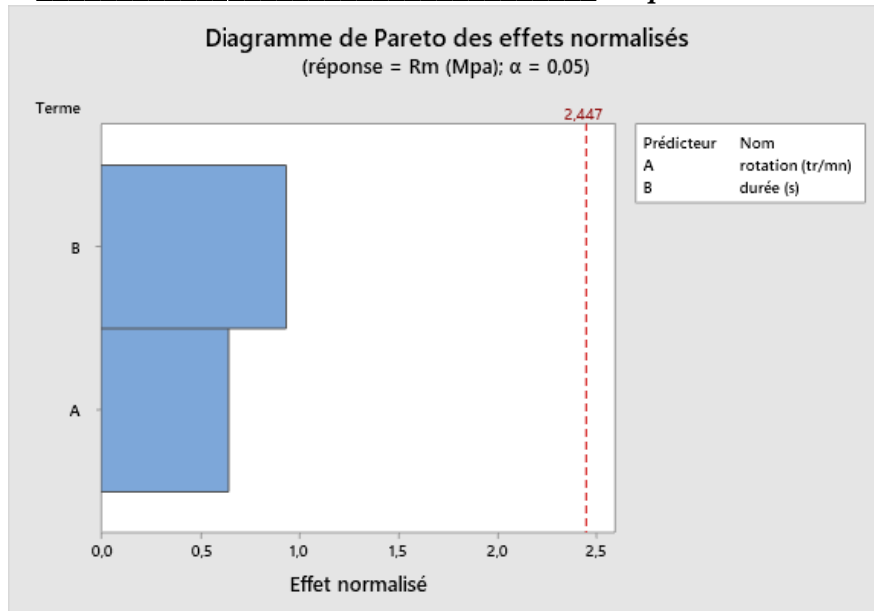


Figure IV.18. Diagramme de Pareto des effets normalisés (Rm)

La figure IV.18 montre le paramètre le plus influent sur Rm (Mpa) est la durée.

IV.2.4. La méthode ANOVA totalement emboîtée :

ANOVA emboîtée montre les pourcentages de contribution des facteurs que nous avons enregistré le diagramme IV.18 :

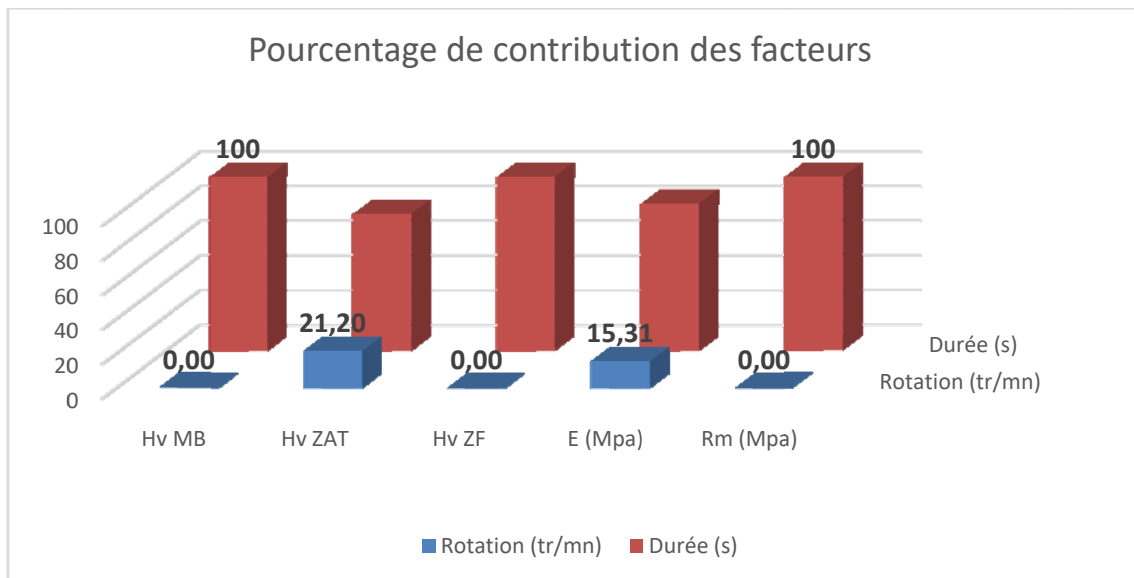


Figure IV.19. Diagramme 3D de pourcentage de contribution des facteurs.

A travers la figure IV.19 nous concluons que la durée un grand rôle dans le contrôle de la qualité du soudage.

IV.2.5. Le test de conformité :

Après avoir entré tous les résultats de stage pratique dans le programme « MINITAB », nous avons été en mesure de trouver les meilleurs paramètres pour le procédé de soudage par friction des alliages d'aluminium 6063 :

- *Hv MB* : Epreuve n°6 (A6 B6).
- *Hv ZAT* : Epreuve n°1 (A1 B1).
- *Hv ZF* : Epreuve n°4 (A4 B4).
- *E (Mpa)* : Epreuve n°6 (A6 B6).
- *Rm (Mpa)* : Epreuve n°6 (A6 B6).

Puis nous avons utilisé l'option de Les analyses de régression pour être en mesure de conclure les fonctions de chaque meilleur paramètre pour obtenir les résultats suivants :

Les résultats théoriques obtenus par les équations de régression sont :

- *Hv MB*=57.788
- *Hv ZAT*=57.015
- *Hv ZF*=52.222
- *E (Mpa)*=98.515
- *Rm (Mpa)*=125.22

Nous comparons les résultats précédents avec les résultats de mesure pour conclure le pourcentage des ERREURS en utilisant la loi suivant :

$$((\text{théorique-Mesurée})/\text{théorique})*100$$

		<i>théorique</i>	<i>Pratique</i>	<i>ERREUR (%)</i>
<i>Hv MB</i>	<i>A6B6</i>	57,788	56,55	2,128
<i>Hv ZAT</i>	<i>A1B1</i>	57,015	56,05	4,87
<i>Hv ZF</i>	<i>A4 B4</i>	52,222	56,65	8,47
<i>E (Mpa)</i>	<i>A6B6</i>	98,515	100,94	2,46
<i>Rm (Mpa)</i>	<i>A6B6</i>	125,22	138,47	9,56

Tableau IV.6. Test de conformité.

Du test précédent, nous pouvons déduire la valeur de l'ERREUR entre la théorique et la mesurée, nous remarquons que les résultats sont proches au *Hv MB* et *E*.



Conclusion générale

Cette mémoire est consacrée à l'étude du soudage par friction des alliages d'aluminium spécifiquement A6063 et à la présentation d'un moyen simple et viable d'effectuer le processus sur un tour parallèle.

Nous avons montré l'importance de préparer les pièces pour le soudage par friction qui nécessitent un nettoyage de surface en profondeur et de faire les ajustements nécessaires avant le soudage pour obtenir une bonne soudabilité.

L'objectif était d'étudier l'influence des paramètres de soudage par friction (vitesse de rotation, temps de frottement) sur la rigidité des pièces à souder afin d'introduire ce procédé dans nos ateliers avec des moyens simples.

Après avoir obtenu tous les résultats de nos expériences et dans le but de connaître les meilleurs facteurs affectant le processus de soudage par friction rotatif, on a recouru au logiciel de calcul statistique « Minitab », les résultats obtenus ont été comparé aux résultats expérimentaux pour en déduire les ERREURS.

La qualité du soudage des alliages d'aluminium par friction est fonction de la durée de contact.

Enfin, cette étude peut être vue comme une simple contribution à l'étude de ce type de soudage et comme une nouvelle méthode d'assemblage utilisée dans les travaux pratiques de soudage, permettant aux entreprises et les ateliers de chaudronnerie de bénéficier de cette manipulation avec tous les avantages constructifs de ce type de soudage.

Bibliographie:

- [1]Référance :Totten, G. E., &MacKenzie, D. S. (Eds.). (2003). *Handbook of Aluminum: Volume 2: Alloy production and materialsmanufacturing*. CRC press.¹
- [2]almet-metal.com a été indexé pour la première fois par Google il y a plus de 10 ans²
- [3]CARACTERISATION D'UN ALLIAGE D'ALUMINIUM DE SERIE 6000 (Doctoral dissertation, Université M'sila).³
- [4]Référance :Totten, G. E., &MacKenzie, D. S. (Eds.). (2003). *Handbook of Aluminum: Volume 2: Alloy production and materialsmanufacturing*. CRC press.⁴
- [5]Référance : expertisemetallurgique.wordpress.com a été indexé pour la première fois par Google en February 2016⁵
- [6]Merry, G., *Soudage et soudabilité métallurgique des métaux. Technique de l'ingénieur*, 10janvier 1994 (M715).⁶
- [7]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).⁷
- [8]Mezrag Bachir, *Etude De L'influence Des Paramètres De Soudage Sur La Microstructure Et Le Comportement Mécanique Des Assemblages Acier-Aluminium Obtenu Par Soudage L'arc Mig-Cmt*, 10 /09/2015, These En Cotutelle Pour Obtenir Le Grade De Docteur, Université Abou BekrBelkaid Tlemcen⁸
- [9]Foca, M., Racineux G., Et Stainier L., *Developpement D'une Approche "Maximum Entropy"*
- [10]Demouche Mourad, *Etude De L'influence Des Parametres De Soudage Par Friction Sur La Qualite Des Joints Soudes*, 28 / 11/ 2019. These Doctorat En Sciences, Optique Et Mecanique De Precision, Universite Ferhat Abbas – Setif 1-Algerie¹⁰
- [11]Dr. Ir. Koen Faes, *Le Soudage Par Friction, Un Procédé De Soudage Multiple Et Innovateur*¹¹
- [12]Kautz, D. D., *Fundamentals Of Friction Welding,welding Fundamentals And Processes*, Vol 06a, *AsmHandbook*, Asm International, 2011. P. 179-185¹²
- [13]Demouche Mourad, *Etude De L'influence Des Parametres De Soudage Par Friction Sur La Qualite Des Joints Soudes*, 28 / 11/ 2019. These Doctorat En Sciences, Optique Et Mecanique De Precision, Universite Ferhat Abbas – Setif 1-Algerie¹³
- [14]Larry Jeffus, *"Welding : Principles And Applications"*, DelmarCengage Learning, SeventhEdition, 2012, Usa¹⁴
- [15]Libin Yang, *" Modelling Of The InertiaWelding Of Inconel 718"*, ThesePhd, UniveristeDeBirmingham, 2010¹⁵
- [16]structure cristalline, la solubilité mutuelle et les composés intermétalliques. M. B. Uday, M. N. Ahmad Fauzi, H. Zuhailawati And A. B. Ismail, *"Advances In FrictionWeldingProcess : A Review"*, *Science And Technology Of Welding And Joining* 2010 Vol 15 N° 7,534-558.

- [17] P.L. Threadgill. *Terminology in friction stirwelding. Science and Technology of Welding and Joining*, 12 :357–360, 2007.¹⁷
- [18] G. Liu, L.E. Murr, C-S. Niou, J.C. McClure, and F.R Vega. *Microstructural aspects of the friction-stirwelding of 6061-t6 aluminum. Scripta Materialia*, 37 :355–361, 1997.
- [19] T. Dickerson, H.R. Shercliff, and H. Schmidt. *A weld marker technique for flow visualization in fsw. 4th Symposium on FSW, Park City*, 2003.
- [20] M. Guerra, C. Schmidt, J.C. McClure, L.E. Murr, and A.C Nunes. *Flow patterns during friction stirwelding. Materials Characterization*, 49 :95–101, 2003.
- [21] A. LOST, R. BIGOT, L. BOUDREAU -matériaux et techniques, *l'essai de dureté Vickers : applications et influence de la charge*, 1995.
- [22] D. FRANÇOIS -Essais Mécaniques des Métaux- Détermination des lois de Comportement-. *Techniques de l'Ingénieur*, 2004.
- [23] J. MANDEL -propriétés mécanique des matériaux, Editions Eyrolles, 1978.

ملخص:

هذا العمل يتناول دراسة عملية اللحام بواسطة الاحتكاك لسبائك الألمنيوم 6063. يتميز هذا النوع من اللحام بتطبيقات متعددة في مجالات صناعية مختلفة. تعتبر الفوائد المترتبة على هذه العملية هي تجميعات عالية الجودة يمكن إنجازها بسرعة ويمكن الاعتماد على جودة اللحام من الناحية الفيزيائية، ينتج عملية اللحام بواسطة الاحتكاك تسخيناً نسبياً بسيطاً يؤدي إلى تلحيم القطعتين. ولذلك، من الضروري مراقبة جميع الأساليب المعتمدة في هذه العملية، مثل قوة التماس بين القطعتين، وسرعة الحركة النسبية بينهما، وزمن الاحتكاك، وقوة الضغط المطبقة. الجزء الثاني من الدراسة خصص لإنجاز عينات من المنيوم 6063 ثم قمنا بإجراءات الاختبار لدراسة مدى متانة القطع الملحمة (اختبار الشد. اختبار الصلابة).

باستعمال برنامج Minitab تمكنا من استنتاج أحسن العوامل "مدة التلحيم. سرعة الدوران المستعملة في التلحيم بالاحتكاك الكلمات المفتاحية: تلحيم بالاحتكاك, المقاومة الميكانيكية, سبائك الألمنيوم 6063, تحسين العوامل.

Resumé :

Ce travail porte sur l'étude du procédé de soudage par friction des alliages d'aluminium 6063. Ce type de soudage se caractérise par de multiples applications dans différents domaines industriels. Les avantages de ce processus sont des assemblages de haute qualité qui peuvent être réalisés rapidement et une qualité de soudure fiable.

D'un point de vue physique, le procédé de soudage par friction produit un échauffement relativement sensible qui conduit au soudage des deux pièces. Par conséquent, il est nécessaire de surveiller toutes les méthodes adoptées dans ce processus, telles que la durée de contact entre les deux pièces, la vitesse de rotation de mouvement entre elles.

La deuxième partie de l'étude a été consacrée à la réalisation d'échantillons d'aluminium 6063, puis nous avons réalisé des procédures d'essais pour étudier la durabilité des pièces soudées (essai de traction, essai de dureté).

En utilisant le programme Minitab, nous avons pu déduire les meilleurs facteurs "durée de soudage. Vitesse de rotation utilisée dans le soudage par friction".

Mots clés : soudage par friction ; Résistance mécanique ; Alliage d'aluminium 6063 ; Facteurs d'amélioration.

Abstract:

This work deals with the study of the process of friction welding of aluminum alloy 6063. This type of welding is characterized by multiple applications in different industrial fields. The benefits of this process are high quality assemblies' that can be completed quickly and weld quality can be reliable.

From a physical point of view, the friction welding process produces a relatively simple heating that leads to the welding of the two pieces. Therefore, it's necessary to monitor all the methods adopted in this process, such as the contact force between the two pieces, the relative speed of movement between them, the friction time, and the applied pressure force.

The second part of the study was devoted to the completion of samples of aluminum 6063, then we carried out testing procedures to study the durability of the welded pieces (tensile test, hardness test).

By using the Minitab program, we were able to derive the best factors "welding duration; Rotational speed used in friction welding."

Keywords: friction welding; Mechanical resistance; Aluminum alloy 6063; Improving factors.