

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Génie matériaux
Génie mécanique

**Etude microstructurale et mécanique sur l'alliage AA 5083
traite par FSP (friction stir processing)**

Réalisé par :

Makrelouf Abd elghani
Djermouni mohamed amine

Proposé et encadré par :

Dr. Benamor Abdessabour

Année universitaire 2020/2021

Remerciement :

Mes remerciements à dieu tout puissant pour
Plu volonté, la santé et la patience qu'il m'a donnée toujours.
Je tiens à remercier chaleureusement mon promoteur : Docteur
Benamor Abdessabour d'avoir accepté de diriger ce travail et de
m'avoir prodigué des
Conseils scientifiques, ont été précieux et des orientations pour la
réalisation de ce travail.

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

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

patience et ses conseils qu'ils ont prodigué.

Mes remerciements vont aussi à tous mes parents, mes
enseignants, mes amis et mes collègues de la
promotion 2021.

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

Résumé:

Le présent travail de fin d'études a pour objectif de friction malaxage FSP (friction stir processing) d'alliage d'aluminium 5083 en tenant compte de l'effet de certains paramètres comme la vitesse de rotation de l'outil, la vitesse d'avance (outil/ ou pièce) est étudié pour optimiser les vitesses les plus approprier pour mieux opérer. La microstructure avant et après traitement par FSP.

Abstract

The objective of this end of study work is friction stir processing FSP (friction stir processing) of aluminum alloy 5083 taking into account the effect of certain parameters such as the speed of rotation of the tool, the speed of The feed (tool / or part) is studied to optimize the most appropriate speeds for better operation. The microstructure before and after treatment with FSP.

ملخص :

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة تأثير ضجة الاحتكاك FSP (معالجة ضجة الاحتكاك) على سبائك الألومنيوم 5083 مع مراعاة تأثير بعض المعلمات مثل سرعة دوران الأداة وسرعة التقدم (أداة / أو السبيكة) لتحسين أنسب السرعات من أجل تأثير أفضل. البنية المجهرية قبل وبعد العلاج بـFSP .

Liste des figures :

Chapitre I

- Figure I-1** : subdivisions de l'état T (Traité thermiquement avec mise en solution séparée)...11
- Figure I-2** : subdivisions de l'état T (Traité thermiquement sans mise en solution séparée)...12
- Figure I-3** : L'alliage 5083.....13

Chapitre II

- Figure [II-1]** : schéma de procédé FSP. [II-1].....17
- Figure II-2** : Forme générale d'un outil . [II-4].....18
- Figure II-3** : Présentation des différentes géométries possibles d'outils [II-4].....19
- Figure II-4**: Outils de FSP [II-7].....20
- Figure II-5** : Schématisation de l'outil de soudage et de quelques géométries des pions et de l'épaulement [II-9].....21
- Figure II-6** : Les différentes technologies de soudage [II-10].....22
- Figure II. 7** :l'angle d'inclinaison de l'outil [II-11].....23
- Figure II. 8** : Effet de la vitesse de rotation sur la microstructure. [II-12].....24
- Figure II. 9** : Effet de la vitesse de rotation sur la macrostructure des alliages d'aluminium (Vitesse de Soudage = 0.8 à 1.6 mm/tr). [II-14].....25
- Figure II. 10** : Présence des macro-pores dans les cordons FSW d'un alliage de magnésium AZ31 obtenus par une vitesse de soudage de 250mm /min (e), 300 (f), 400 (g), et 600 mm/min(h), avec la même vitesse de rotation et le même effort de forgeage. [II-15]...26
- Figure II-11** : (a)-distribution de la chaleur durant le FSW [II-20], (b)-effet du rapport ω/v sur différent alliages d'Al (c et d)-l'effet de ω et v sur le pic de température et sa distribution au long du joint soudé en FSW [II-8].....28
- Figure II-12** : l'effet de la vitesse de rotation et d'avance sur la résistance maximale en traction. [II-22].....29
- Figure II. 13** : Microstructure des différentes zones dans un joint pendant le FSP [II-8].....30

Chapitre III

Figure III. 1 : tôle d'alliage d'aluminium 5083.....	33
Figure III. 2 : scie sauteuse	34
Figure III. 3 : Fraiseuse verticale automatique FSP utilisées.....	34
Figure III.4 : Schéma des différentes composantes de l'outil FSP.....	35
Figure III.5 : Réglage de la vitesse de rotation de l'outil(V_r).....	36
Figure III.6 : Réglage de la vitesse d'avance (V_a).....	37
Figure III-7 : Le malaxage des tôles.....	37
Figure III.8 : Les empreintes existantes sur FSP.....	38
Figure III. 9 : a) les coupes des zones traitées. b) les coupes des échantillons.....	39
Figure III.10 : Polisseuse utilisée.....	40
Figure III.11 : la pâte diamantée	41
Figure III.12 : papier velour.....	41
Figure III.13 : l'Etat miroir.....	41
Figure III.14 : acide phosphorique (H_3PO_4 85%).....	42
Figure III.15 : Euve	42
Figure III.16 : Ethanol.....	42
Figure III.17 : Eau distillée.....	43
Figure III.18 : permanganate de potassium	43
Figure III.19 : hydroxyde de sodium.....	43
Figure III.20 : réactif de Wick.....	44
Figure III.21 : Microscope optique.....	45
Figure III.22 : tribomètre.....	46
Figure III.23 : duromètre.....	47

Chapitre IV

Figure IV-1 : la microstructure du métal de base.....	49
Figure IV-2 : La microstructure du zone traite à une vitesse ($1120/8 \omega/v$).....	50
Figure IV-3 : microstructure du noyau dans la variante I.....	50
Figure IV-4 : microstructure de la ZAT et la ZATM dans la variante I.....	51
Figure IV-5 : tribologie différents vitesse d 'avance et vr stable (710 tr/min).....	52
Figure IV-6 : tribologie différents vitesse d 'avance et vr stable (900 tr/min).....	52
Figure IV-7 : tribologie différents vitesse d 'avance et vr stable (1120 tr/min).....	53
Figure VI-8 : la dureté dans différents vitesse d 'avance et vr stable.....	55
Figure VI-9 : la dureté dans différents vitesse d 'avance et vr stable.....	56
Figure VI-10 : la dureté dans différents vitesse d 'avance et vr stable.....	57
Figure VI-11 : la dureté dans différents vitesse d 'avance et differents vitesses de rotation.....	58

LISTE DES TABLEAU

Chapitre I

Tableau I-1 : propriétés de l'aluminium [I-2].....4

Tableau I-2 : désignation des alliages d'aluminium [I-2].....9

Tableau 1-3 : La COMPOSITION chimique d'alliage AL 5083.....14

Chapitre III

Tableau III-1 : composition chimique d'alliage d'aluminium 5083.....33

Tableau III-2 : Les composantes de l'outil FSP.....35

Tableau III-3 : la variation des vitesses durant l'expérience.....38

Tableau III-4 : conditions et paramètres opératoires.....47

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Valeurs moyennes du coefficient d'usure pour une charge applique de 10N.....54

Tableau VI -2 : la dureté dans différents vitesse d'avans et vr (710).....55

Tableau VI -3 : la dureté dans différents vitesse d'avance et vr (Vr=900).....56

Tableau VI -4 : la dureté dans différents vitesse d'avans et vr (Vr=1120).....57

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I	
I.1. Introduction	3
I.1.2 Propriétés mécaniques.....	4
I.1.3 Propriétés physico-chimiques de l'aluminium.....	4
I.2 L'aluminium et ses alliages.....	5
I.2.1 Les alliages de moulage	5
I.2.2 Les alliages de corroyage.....	5
I.2.2.1 Les alliages à durcissement structurales.....	6
I.2.2.2 Les alliages sans durcissement structural.....	7
I.2.3 Classification et désignation de l'aluminium.....	9
I.3 Etats métallurgiques.....	10
I.3.1 Subdivisions de l'état T	10
I.3.2 Les états H : écrouis.....	12
I.4 Alliages Al-Mg de la série 5000.....	13
I. 5 Caractérisation de l'alliage 5083	14
Chapitre II	
II. 1. Introduction.....	16
II. 2 Principe de procédé FSP.....	17
II 3. Paramètres du procédé FSP.....	18
II.3.1 Géométrie de l'outil.....	18
II.3.1.1 Différents types d'outils.....	22
II.3.2 L'angle entre l'outil et la pièce.....	23
II. 3. 3. Vitesse de rotation.....	23

II. 3. 4. Vitesse d'avance.....	25
II.4 Effet de la vitesse d'avance et la vitesse de rotation.....	26
II. 5 Les différentes zones d'une pièce traitée par le procédé FSP.....	29

Chapitre III

III.1. Matériels utilisé dans ce travail	33
III.1. 1. Métal de base (matériaux à traiter)	33
III.1. 2 Machine utilisé dans le procédé.....	33
III.2 Le procédé FSP.....	36
III.2 .1 Condition de l'expérience.....	36
III.2 .2 Paramètres utilisés	38
III.3 Découpage de la tôle.....	39
III.4 Microscopie optique.....	40
III.4.1 Polissage.....	40
III.4.2 L'attaque chimique.....	42
III.5 Caractérisations tribologiques.....	45
III.6. Essai dureté	47

Chapitre IV

IV.1. Introduction.....	49
IV.2 L'évolution de la microstructure.....	49
IV.3 Evaluation Tribologique	52
IV.4 .1 Evaluation du taux d'usure	53
IV-5 Essai de dureté	55
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	59

INTRODUCTION GENERALE

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une caractérisation mécanique et métallurgique d'un procédé de traitement surfacique par déformation plastique communément appelé FSP (Friction Stir Processing) d'un alliage d'aluminium 5083, Ces alliages, qui contiennent Mg comme principaux élément d'addition, possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques et bénéficient d'un bon durcissement structural, via une décomposition complexe faisant intervenir aussi bien des phases stables que métastables.

Les plus récentes recherches scientifiques s'intéressent à l'amélioration de l'ensemble des propriétés mécaniques de ces alliages, principalement la tribologie. Cette dernière ne peut être améliorée que par des traitements surfaciques comme les traitements thermo-chimiques, ou la fabrication de composites à matrice métallique.

Le FSP s'opère à différents paramètres, ces paramètres dépendent des propriétés mécaniques et métallurgiques du matériau, dimensions des tôles à souder, etc... La moindre variation de l'un de ces paramètres affecte sensiblement la qualité du joint soudé, pour cela nous optons dans ce mémoire de chercher le rapport des vitesses le plus convenable, sur des tôles en AA5083 traité.

Quatre parties importantes forment le document.

-La première partie correspondant au chapitre I, comprend des généralités sur les alliages d'aluminium.

-Le deuxième chapitre est consacré au procédé de « FSP », un état de l'art est établi pour montrer l'importance des paramètres de l'FSP et leurs influences sur la microstructure, et les propriétés mécaniques.

-Le Chapitre III concerne la présentation des techniques expérimentales de FSP et les techniques utilisées pour la caractérisation métallurgiques et mécaniques des zones traitées.

-Le Chapitre IV traite des caractéristiques mécaniques et métallographiques de zones obtenues avec le procédé FSP. Une optimisation des paramètres de FSP est effectuée et les caractéristiques mécaniques et métallographiques des cordons obtenus après l'attaque chimique.

Ce travail de fin d'études est clôturé par une conclusion générale.

Chapitre I

L'aluminium et ses alliages

I.1. Introduction :

L'aluminium représente le troisième élément de l'écorce terrestre en quantité, après l'oxygène et le silicium. Ce métal est connu depuis le début du 19ème siècle, et fût longtemps considéré comme un métal précieux en raison de la difficulté de réduction de l'oxyde d'aluminium, une forme sous laquelle il est présent dans la nature. C'est en 1886 que Héroult en France et Hall aux Etats-Unis découvrirent simultanément le procédé d'électrolyse de l'oxyde d'aluminium dissous dans un bain de cryolithe en fusion.[I-1]

Depuis, l'aluminium a connu un développement très important grâce notamment à son utilisation dans les industries ayant attrait au transport : aviation, automobile, marine. Il est aussi employé dans l'emballage, le bâtiment, l'électricité, la mécanique...

La bauxite est le minerai le plus utilisé pour obtenir de l'alumine, matière intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium. La bauxite contient de 40 à 60% d'oxyde d'aluminium hydraté mélangé à de la silice et à de l'oxyde de fer. [I-1]

L'aluminium est produit par électrolyse de l'alumine dans de la cryolithe (Na_3AlF_6) fondue, à environ 1000°C dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone.

L'aluminium se dépose au fond de la cuve avec un titre de 99,7% (les principales impuretés étant le fer et le silicium). Plusieurs procédés de raffinage permettent d'obtenir un titre plus élevé sachant que pour fabriquer une tonne d'aluminium, il faut deux tonnes d'alumine et quatre tonnes de bauxite. [I-1]

En tonnage, la production d'aluminium ne représente que 2% environ de celle des aciers. Cependant, ce métal et ses alliages arrivent en seconde position dans l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qu'en font un matériau remarquable. L'aluminium et ses alliages prennent encore aujourd'hui une place importante dans les différents domaines de l'industrie. Son utilisation s'accroît de jour en jour grâce à ses propriétés particulières. [I-1]

Les alliages de l'aluminium apparaissent suivant les deux catégories : [I-2][I-3]

- Les alliages non trempant : les différents niveaux de résistance sont atteints en agissant sur les phénomènes d'érouissage et d'adoucissement par recuit ou restauration série 1000, 3000, 5000 ;
- Les Alliages trempant (à durcissement structural) : les différents niveaux de résistance sont atteints en agissant sur les différents paramètres de la trempe structurale : série 2000, 6000, 7000.

I.1.2 Propriétés mécaniques

L'aluminium commercialement pur possède, à l'état recuit, des propriétés mécaniques faibles. On peut toutefois améliorer considérablement ces propriétés par écrouissage, addition d'éléments d'alliage ou traitements thermiques, selon les cas. L'aluminium et ses alliages ont une structure cristalline cubique à faces centrées. Ils font donc preuve, à l'état recuit, d'une excellente ductilité à toute température. [I-5]

I.1.3 Propriétés physico-chimiques de l'aluminium :

Les Propriétés physico-chimiques de l'aluminium non allié sont résumées dan le tableau I.1

Propriété	Valeur	Unité	Remarque
Numéro atomique	13		
Masse volumique ρ	2698	Kg.m⁻³	Pureté comprise entre 99.65% et 99.99%
Température de fusion	660.45	°C	Sous 10 ⁵ Pa
Température d'ébullition	2056	°C	Sous 10 ⁵ Pa
Capacité thermique massique C_p	897	J. Kg⁻¹. K⁻¹	à 25°C
Conductivité thermique λ	237	W.m⁻¹. K⁻¹	à 27°C
Coefficient de dilatation linéique α	23.1	10⁻⁶. K⁻¹	à 25°C
Résistivité électrique ρ	26.548	10⁻⁹ Ω .m	à 25°C
Module de Young E	69	G Pa	
Coefficient de poisson ν	0.33		

Tableau I.1 : propriétés de l'aluminium [I-2]

I.2 L'aluminium et ses alliages [I-2]

Seuls neuf éléments sont capables de s'allier à l'aluminium parce qu'ils ont une solubilité dans l'aluminium à l'état solide supérieure à 0,5 %. Ce sont : l'argent, le cuivre, le gallium, le germanium, le lithium, le manganèse, le magnésium, le silicium et le zinc. Pour diverses raisons de coût (l'argent), de disponibilité (le gallium, le germanium) et de difficultés de mise en œuvre (le lithium), la métallurgie de l'aluminium est fondée, depuis son début, sur uniquement cinq éléments d'alliage qui sont :

- Le cuivre
- Le manganèse
- Le magnésium
- Le silicium
- Le zinc

Ces cinq éléments sont à la base des huit familles d'alliages d'aluminium. L'action d'un élément sur les propriétés de l'aluminium dépend bien évidemment de sa nature et de la quantité ajoutée. Mais, pour certains d'entre eux, leur influence sur les propriétés de l'alliage peut aussi dépendre de la présence d'un, ou plusieurs autres éléments, parce qu'ils peuvent

Il existe deux grands types d'alliage d'aluminium : les alliages de moulage et les alliages de corroyage.

- **I.2.1 Les alliages de moulage** : sont des alliages d'aluminium destinés à être modifiés par des techniques de fonderie. Dans cette famille, deux familles se distinguent. Il y a la famille des alliages de première fusion qui sont élaborés à l'aide de l'aluminium primaire et d'un autre côté la famille de seconde fusion où les alliages sont obtenus par refusions des déchets

- **I.2.2 Les alliages de corroyage** : La famille des alliages d'aluminium de corroyage peut être découpée en deux familles distinctes autant au niveau des propriétés que de la fabrication :
 - ✓ Les alliages à durcissement structural.
 - ✓ Les alliages à durcissement par écrouissage.

Dans l'état d'équilibre tous ces alliages forment une solution solide faiblement alliée et des phases intermétalliques telles que Mg_2Si (phase β). Il existe deux grandes classes d'alliages d'aluminium déformés plastiquement.

I.2.2.1 Les alliages à durcissement structurales [I-2] [I-3]

Les caractéristiques mécaniques maximales de ces alliages sont obtenues par un traitement en trois étapes : chauffage, refroidissement et maintien.

Le durcissement structural obtenu par un processus comporte

- **La mise en solution** : solubiliser les éléments durcissement précipités.
- **La trempe** : c'est à dire un refroidissement rapide interdisant toute diffusion afin d'amener cette solution solide dans un état sursaturé métastable.
- **Vieillessement** : à une température inférieure à la température d'homogénéisation, afin de faciliter le retour partiel vers les conditions d'équilibre.

Les principales familles d'alliages à durcissement structural sont : 2xxx, 6xxx, 7xxx.

➤ **Série 2000 : (Al-Cu et Al-Cu-Mg)**

- Durcissement dû à la précipitation de formes transitoires des composés d'équilibre CuAl_2 et CuMgAl_2 .
- Excellentes propriétés mécaniques (descendent pour les zones adjacentes aux cordons de soudure).
- En rajoutant Fe + Ni, nous obtenons une précipitation de Al_9FeNi qui nous donne une bonne tenue mécanique jusqu'à 230°C (fabrication des moteurs à turbine et structures d'avions supersoniques).
- À l'état trempé et vieilli, on a une résistance médiocre à la corrosion.

➤ **Série 6000 : (Al-Mg-Si)**

- Normalement on a un rapport massique $\text{Mg/Si}=1.73$, si on a un excès de silicium on augmente les propriétés mécaniques, mais on diminue la résistance à la corrosion.
- En rajoutant Mn + Cr on augmente la résistance mécanique, la ténacité,
- Et on affine la taille des grains.
- En rajoutant Cu (< 0.5%) on monte les propriétés mécaniques.
- Excellente aptitude à la mise en forme à chaud.
- Bonne soudabilité

- Excellente résistance à la corrosion.

➤ **Série 7000 : (Al-Zn)**

- Propriétés mécaniques les plus élevées (après traitement thermique)
- Cu (<2%) durcit les alliages, descendre trempabilité, soudabilité et ténacité.
- Cr (<0.3%) : on augmente leur résistance à la corrosion sous tension.
- Grand intervalle de températures de mise en solution
- Faible résistance à chaud.

I.2.2.2 Les alliages sans durcissement structural [I-2] [I-4]

Différent mécanisme de durcissement intervient dans ces alliages (1xxx, 3xxx, 5xxx) pour moduler les propriétés mécaniques tels que :

- **Le durcissement par écrouissage** : est la modification de l'état structural d'un métal ou d'un alliage résultant d'un corroyage ou d'une déformation plastique localisée à température ordinaire. Vous pouvez obtenir de restaurer les propriétés initiales de l'alliage après traitement thermique approprié.
- **Le durcissement par addition en solution** : la présence dans le réseau cristallin de l'aluminium d'addition en substitution ou en insertion constitue un obstacle à la déformation et confère à l'alliage des propriétés de résistance mécanique. On peut superposer à ce durcissement un écrouissage.
- **Le durcissement par l'effet de phase dispersée** : lorsque les teneurs des éléments d'addition dépassent leur limite de solubilité, les éléments d'addition se séparent de la matrice riche en aluminium pour former une seconde phase dont l'effet durcissant est d'autant plus marqué lorsque les particules sont plus dispersées dans la matrice et que leur taille est petite.

➤ **Série 1000 : (99% Al au moins)**

- Propriétés faibles à l'état recuit ECROUISSAGE
- Mise en forme par déformation plastique à froid.
- Excellente tenue en atmosphère humide et marine
- Grande conductibilité électrique et thermique.
- Excellente tenue aux très basses températures.

➤ **Série 3000 : (Al-Mn)**

- Très facile à déformer.
- Bonne résistance à la corrosion.
- Facilement soudable
- Remplacent l'aluminium non allié de la série 1000 quand on veut des meilleures propriétés mécaniques.

➤ **Série 5000 : (Al-Mg)**

Un séjour prolongé à la température ambiante ou à une température un peu plus élevée provoque une précipitation de Mg_2Al_3 aux joints de grains, ce qui a des conséquences néfastes sur la résistance à la corrosion. Pour pallier cette tendance, on soumet les alliages à un écrouissage suivi d'un recuit de stabilisation.

- Grande aptitude aux transformations à chaude et à froid.
- Excellente soudabilité.
- Très bonne résistance à la corrosion (on peut le monter encore plus par anodisation)
- Grande qualité de leurs états de surface après polissage et anodisation.

I.2.3 Classification et désignation de l'aluminium : [I-6] [I-7]

Les alliages sont subdivisés en groupes sur base de leur propriétés telles que traitement thermique et mécanique et éléments d'alliages principaux. Les alliages (corroyés) sont désignés par un nombre de quatre chiffres et les alliages de fonderie par nombre de trois chiffres suivi d'un point et d'un chiffre indiquant s'il s'agit d'une pièce moulée ou d'un lingot.

Signification des désignations :

- Le premier chiffre indique l'élément d'alliage principal.
- Le deuxième chiffre indique une variante de l'alliage initial. Souvent il s'agit d'une fourchette plus petite dans un ou plusieurs éléments de l'alliage.
- Les troisième et quatrième sont des numéros d'ordre et servent à identifier l'alliage. La seule exception est la série 1000 ces deux chiffres indiquant le pourcentage d'aluminium.

Série	Désignation	Élément d'alliage principal	Phases
Série 1000	1xxx	99% d'aluminium au minimum	-
Série 2000	2xxx	Cuivre (Cu)	Al ₂ Cu - Al ₂ CuMg
Série 3000	3xxx	Manganèse (Mn)	Al ₆ Mn
Série 4000	4xxx	Silicium (Si)	-
Série 5000	5xxx	Magnésium (Mg)	Al ₃ Mg ₂
Série 6000	6xxx	Magnésium (Mg) et Silicium (Si)	Mg ₂ Si
Série 7000	7xxx	Zinc (Zn)	MgZn ₂
Série 8000	8xxx	Autres éléments	-

Tableau I-2 : désignation des alliages d'aluminium [I-2]

I.3 Etats métallurgiques : [I-4]

On peut obtenir des alliages d'aluminium sous divers états : recuits, écrouis, ou trempés et vieillis.

On désigne le plus souvent ces différents états par des symboles. Ces désignations s'appliquent aussi bien aux alliages corroyés qu'aux alliages de fonderie. On distingue cinq états fondamentaux symbolisés comme suit :

- **F** : état brut de livraison : ce symbole s'applique aux produits fabriqués par déformation plastique sans que soient particulièrement maîtrisés les taux de durcissement ou d'adoucissement par déformation ou traitement thermique éventuel.
- **O** : état recuit : c'est l'état le plus ductile. Il est généralement obtenu par le traitement dit de recuit, ce traitement n'étant suivi d'aucun écrouissage, même par planage ou dressage.
- **H** : état écroui et éventuellement partiellement adouci : ce symbole s'applique aux produits durcis par déformation avec ou sans maintien ultérieur à une température suffisante pour provoquer un adoucissement partiel du métal.
- **W** : état trempé non stabilisé : c'est un état métallurgique instable : il s'applique aux alliages qui ont subi une mise en solution suivie de trempe et qui continuent d'évoluer à la température ambiante.
- **T** : état durci par traitement thermique : les traitements thermiques considérés sont des combinaisons de tout ou une partie des traitements de mise en solution, trempe, maturation, revenu avec application éventuelle de déformations plastiques.

I.3.1 Subdivisions de l'état T : [I-4]

Les subdivisions de l'état T sont représentées dans les figures (I-1) et (I-2). Le symbole T est toujours suivi d'un ou de plusieurs chiffres.

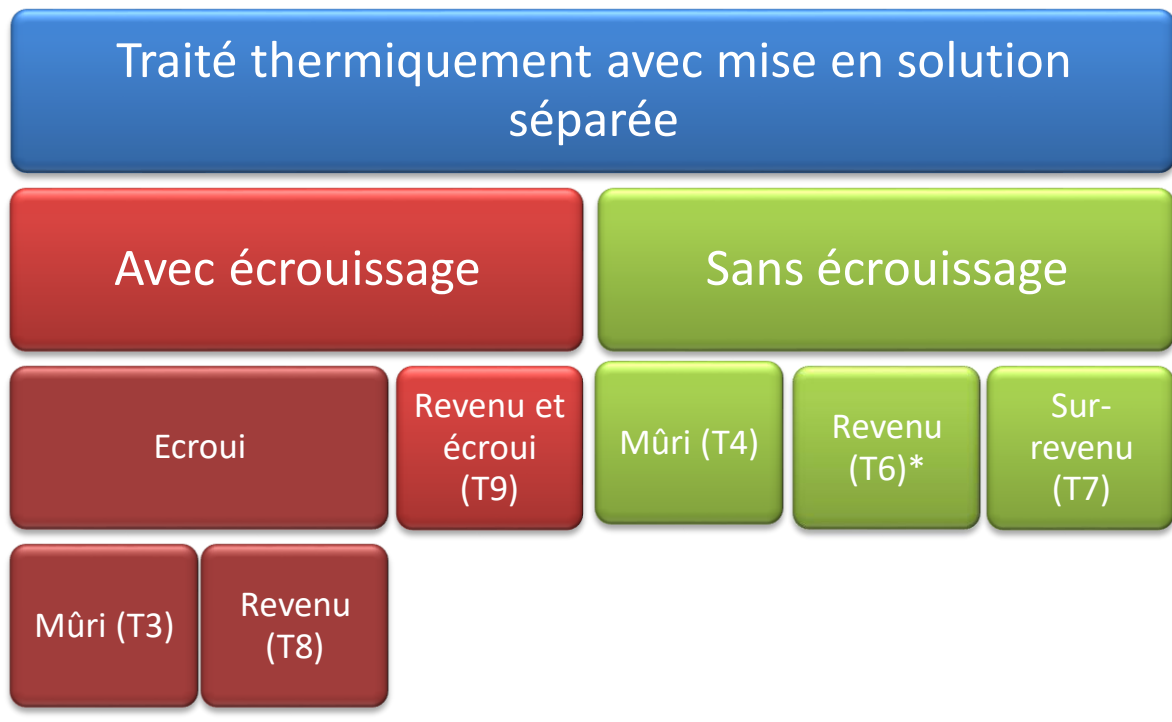


Figure I-1 : subdivisions de l'état T (Traité thermiquement avec mise en solution séparée)

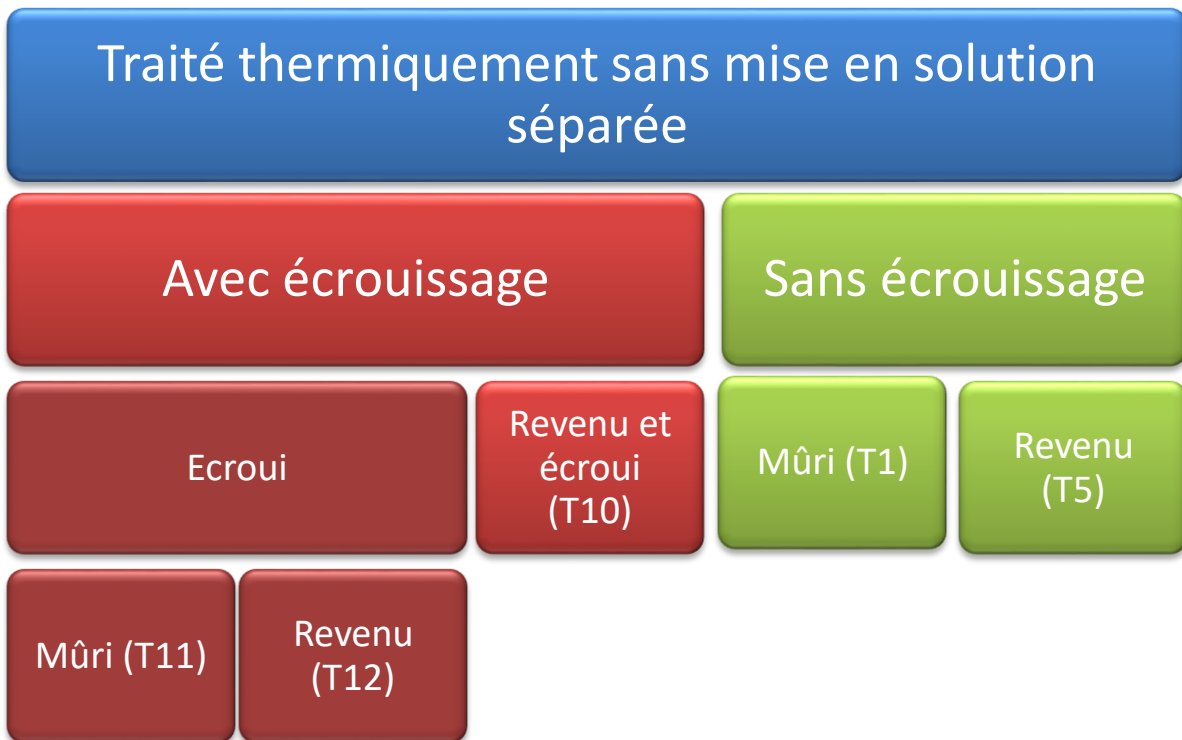


Figure I-2 : subdivisions de l'état T (Traitement thermique sans mise en solution séparée)

I.3.2 Les états H : écrouis [I-8]

La lettre H est suivie par 2 ou dans certains cas 3 chiffres.

Exemples : 5086 H16, 5083 H112.

Le premier chiffre indique le type de gamme thermomécanique.

Le deuxième chiffre donne le degré d'écrouissage et donc le degré de caractéristique mécanique.

Ce deuxième chiffre a généralement les valeurs suivantes :

- 2 : Quart dur (écrouissage $\approx 12\%$) ;
- 4 : Demi dur (écrouissage $\approx 30\%$) ;
- 6 : Trois quart dur (écrouissage $\approx 50\%$) ;
- 8 : Dur (écrouissage $\approx 75\%$).

L'éventuel troisième chiffre désigne une variante

I.4 Alliages Al-Mg de la série 5000 [I-9]

Ces alliages forment, en fonction de leur teneur en magnésium, toute une gamme d'alliages présentant un poids industriel important en raison de l'ensemble performant des propriétés suivantes :

- résistance mécanique qui est fonction de la teneur en magnésium,
- bonne aptitude à la déformation et au soudage,
- excellent comportement aux basses et très basses températures,
- très bonne résistance à la corrosion à l'état soudé ou non, et ceci en particulier en atmosphère marine ou dans l'eau de mer,
- possibilité de présenter de beaux états de surface par brillantage et anodisation lorsqu'ils sont élaborés à partir d'aluminium suffisamment pur.

• L'alliage 5083

Sont les plus performants des alliages Al-Mg. Leurs utilisations industrielles – souvent sous forme de structure soudées – concernent les secteurs suivants :

- la construction navale : bateaux, superstructures, aménagement du littoral...
- les véhicules industriels : citernes, semi-remorques...
- les travaux publics, – l'industrie chimique,
- la cryogénie : cuves de stockage et de transport des gaz liquéfiés (méthaniers), installations de liquéfaction...



Figure I-3 : L'alliage 5083

I-5 Caractérisation de l'alliage 5083

Désignations

Norme européenne : EN AW-5083 [Al Mg4, 5Mn0,7]

Composition chimique

La COMPOSITION chimique est présentée en % dans le **tableau 1.3**

% Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0, 40	0,40	0,10	0,4 1,0	4,00 4,90	0,05 0,25	0,25	0,15	Le reste

Tableau 1.3 : La COMPOSITION chimique d'alliage AL 5083

Caractéristiques mécaniques [I-10]

Etat H116 à température ambiante E=6mm

- Résistance :> 305 Mpa
- Limite d'élasticité à 0,2% : > 215 MPa
- Allongement A% : > 10 %

Chapitre II

Le Traitement par friction malaxage (FSP)

II. 1. Introduction : [II-1] [II-2]

Le FSP (friction stir processing) élargit l'innovation de soudage par friction malaxage "FSW" (Friction Stir Welding) développé par l'Institut de soudure (TWI) du Royaume-Uni en 1991 pour développer les propriétés de surface et à certains endroits. Le FSP est une nouvelle et unique technique de traitement thermomécanique qui modifie la microstructure et propriétés mécaniques du matériau en un seul passage d'atteindre une performance maximale à faible coût de production en moins de temps.

Le principe de cette technologie est basé sur le principe physique par friction en rotation. Plus généralement, le FSP convient particulièrement bien aux alliages à bas point de fusion et malléables à chaud tels que les alliages d'aluminium, de magnésium, voire de cuivre. Ces types d'alliages sont principalement utilisés dans le cadre de l'allègement des structures dans l'industrie des transports terrestre, aéronautique, spatiale et navale. L'avenir de ce procédé paraît particulièrement prometteur pour des applications spécifiques à tous secteurs industriels (transport, aéronautique, spatial, automobile militaire...) Il est d'ailleurs déjà utilisé de manière industrielle pour certaines applications aux Etats-Unis, au Japon et dans les pays scandinaves.

Le FSP offre de nombreux avantages par rapport aux techniques conventionnelles, le traitement des matériaux qui comprennent un processus en une seule étape, l'utilisation de simples et peu coûteux outils, aucune exigence d'un processus de finition coûteuse en temps, utilisation de technologie de machine-outil existante et facilement disponible, aptitude à l'automatisation, adaptabilité à l'utilisation du robot, étant efficace sur le plan énergétique, moins de temps de traitement et respectueux à l'environnement. Bien que les limites du FSP sont étant réduit par la recherche et le développement intensifs, il a encore quelques limitations qui comprennent Serrage rigide des pièces à usiner, exigence de plaque de support, et le trou de la serrure à la fin de chaque passe.

II. 2 Principe de procédé FSP : [II-1]

Pour le traitement d'une tôle par friction, un outil cylindrique spécialement conçu qui est utilisé lors de la rotation est plongée dans la zone sélectionnée. L'outil est constitué d'un pion de petit diamètre avec un plus grand diamètre concentrique appelé l'épaulement. Lorsque l'outil est plongé dans la tôle, la friction entre la tôle et l'épaulement chauffe rapidement et adoucit le métal malaxé, permettant au mouvement transversal de l'outil à travers le matériau. La longueur du pion permet de contrôler la profondeur de pénétration qu'on veut traiter. Le schéma du FSP est illustré à la (Figure [II-1]).

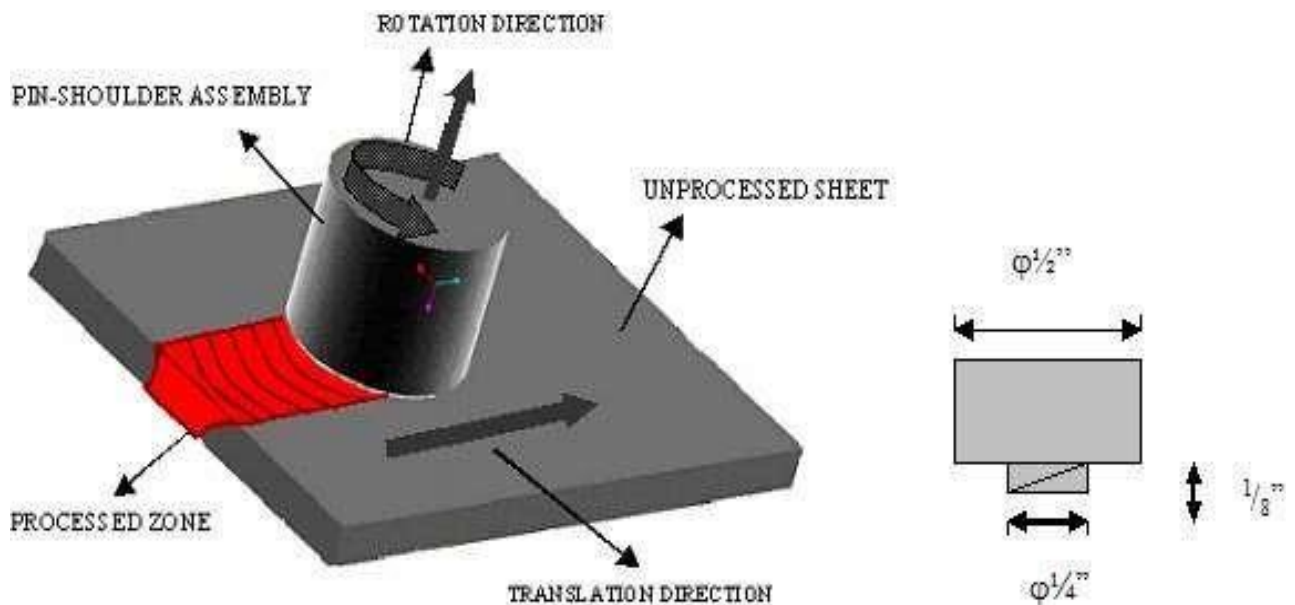


Figure [II-1] : schéma de procédé FSP. [II-1]

Le rôle joué par l'épaulement qui s'appuie avec une force importante sur la surface de pièce est d'abord d'empêcher le métal brassé d'être expulsé et produit un effet de forgeage à l'arrière sur la partie qui vient d'être brassée et déformée.

L'outil en place est maintenu en rotation pendant quelques secondes (phase d'attente) puis est soumis à un mouvement de translation (phase d'avance) à une vitesse définie (jusqu'à 2m/min). Lors du traitement, le matériau est soumis à des variations de températures dues aux frottements du pion et de l'épaulement avec la pièce à traiter et à des déformations plastiques intenses dues au malaxage.

II 3. Paramètres du procédé FSP : [II-3] [II-4]

Le traitement d'agitation par friction malaxage (FSP) utilise les mêmes principes et paramètres de procédé FSW (soudage par friction-malaxage). Le procédé de soudage par friction malaxage est très différent des procédés de soudage conventionnels étant donné qu'aucun métal d'apport et qu'aucune source de chaleur externe ne sont utilisés.

Les quatre principaux paramètres de FSP sont :

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

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

II.3.1 Géométrie de l'outil : [II-4] [II-5] [II-6]

Le principe du soudage consiste à assembler deux tôles qui sont bridées soit bord à bord, soit à une faible distance l'une de l'autre. L'outil est composé d'un épaulement et d'un pion.

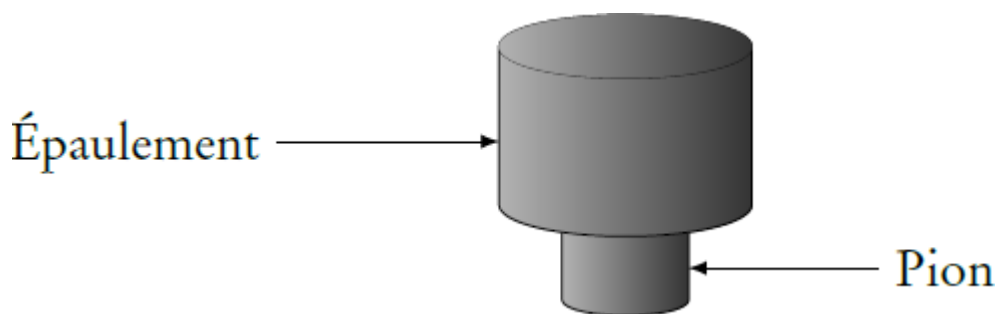


Figure II-2 : Forme générale d'un outil. [II-4]

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

Il existe différentes géométries de pion (cylindrique, conique, fileté) dont les principales caractéristiques sont représentées à la Figure II-3







Tool	Cylindrical	Whorl™	MX triflute™	Flared triflute™	A-skew™	Re-stir™
Schematics						
Tool pin shape	Cylindrical with threads	Tapered with threads	Threaded, tapered with three flutes	Tri-flute with flute ends flared out	Inclined cylindrical with threads	Tapered with threads

Figure II-3 : Présentation des différentes géométries possibles d'outils [II-4]

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

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

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

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

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

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

La surface de l'épaulement peut être lisse ou texturée, dans ce dernier cas elle facilite l'écoulement du matériau par la présence de rainures figure II-4.

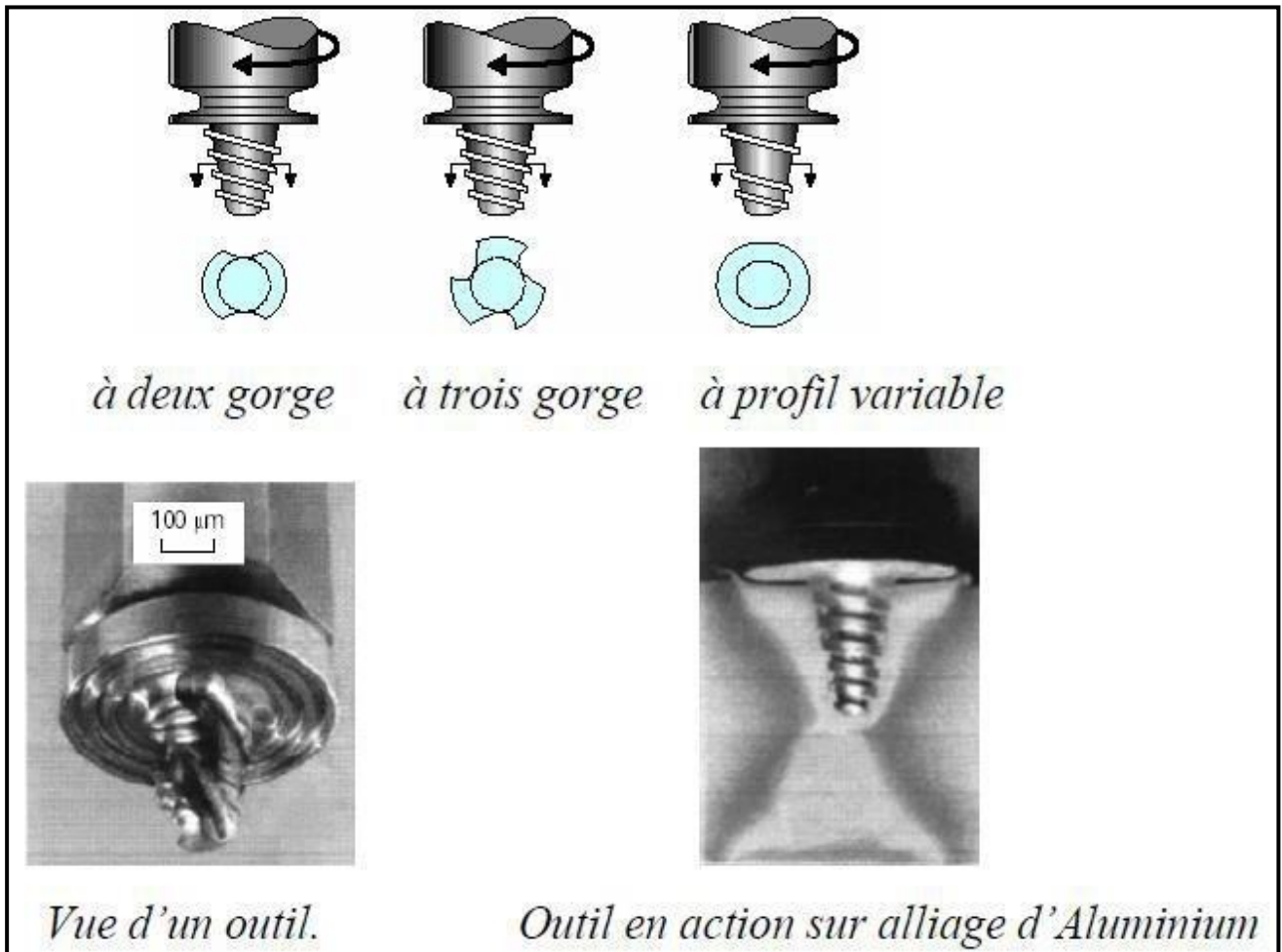


Figure II-4 : Outils de FSP [II-7].

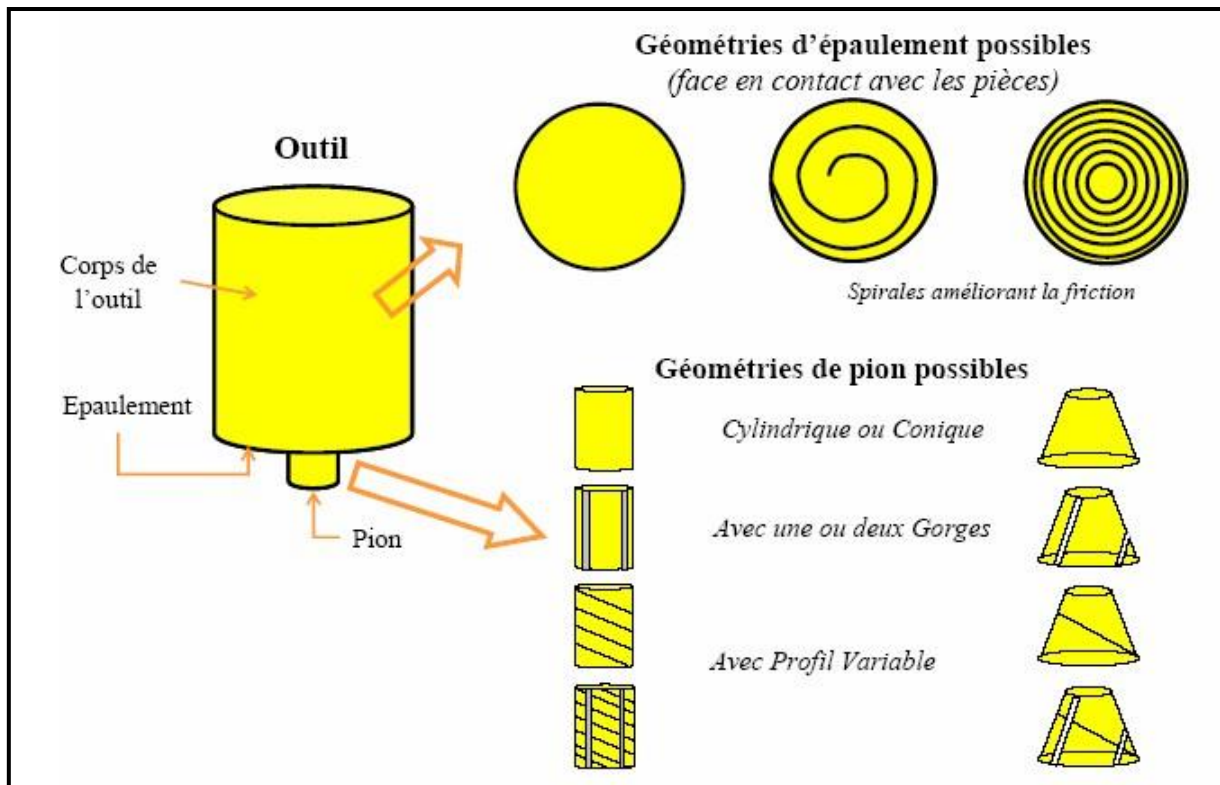


Figure II-5 : Schématisation de l'outil de FSP et de quelques géométries des pions et de l'épaulement [II-9]

Le choix de la géométrie de l'épaulement qui peut être plat, concave ou convexe dépend de la configuration du joint à souder. On utilise généralement un épaulement convexe pour les soudures d'angles alors que l'épaulement concave est plus adéquat pour un soudage de joint bout à bout, enfin l'épaulement plat peut s'avérer préférables lors du soudage de surface courbes telles des tuyaux. Le pion est également un élément très important, deux buts sont recherchés pour une amélioration de l'écoulement de la matière et la minimisation des efforts appliqués [II-8]

L'écoulement peut être amélioré en augmentant :

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

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

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

La comparaison des tiges fileté et lisses montre l'utilité du filetage Pour un ensemble de paramètres donné, une tige mène à un joint montrant des cavités internes, cela conduit à une

réduction importante de la résistance du joint en traction. Les pions filetés ou vrillés engendrant un mouvement vertical du métal déplacé, ce qui améliore la pénétration du soudage et même à une meilleure intégrité du joint. Toutefois les aspérités qui emprisonnent une partie du matériau ont pour effet d'augmenter la force verticale et le couple appliqué sur l'outil lorsque le soudage est effectué en contrôlant la position

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

La forme de l'outil de soudage constitue donc la base du procédé car il ouvre son potentiel d'application en termes de matériaux, d'épaisseurs soudables et de performances techniques et économiques. [II-9]

II.3.1.1 Différents types d'outils :

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

Les trois types d'outil sont schématisés sur la figure II-6.

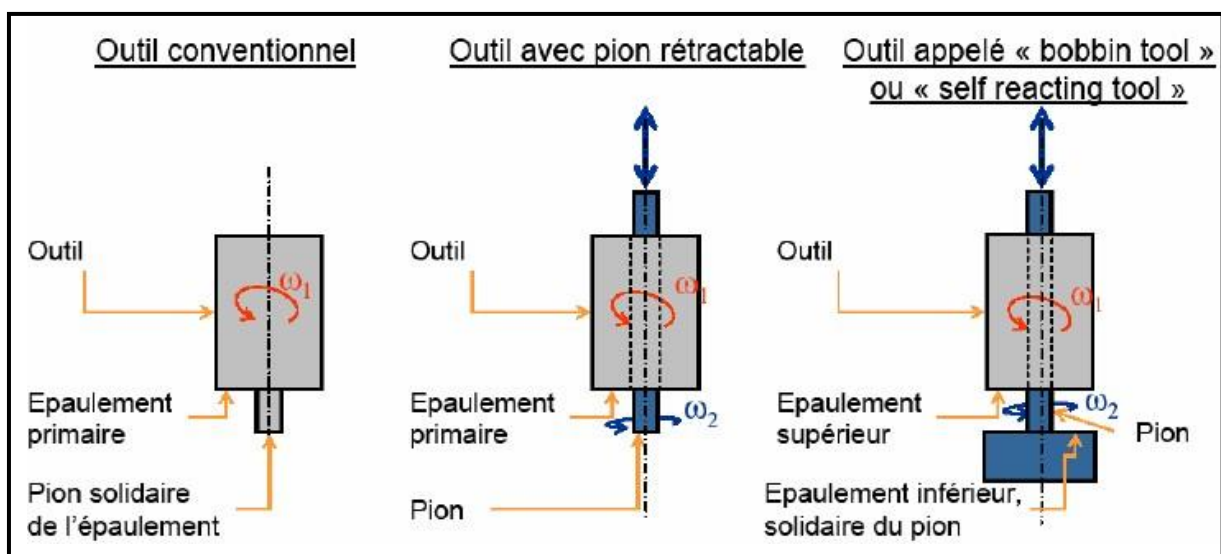


Figure II-6 : Les différentes technologies de soudage [II-10] .

II.3.2 L'angle entre l'outil et la pièce : [II-4]

La rotation de l'outil pousse le métal vers la surface du joint. Une inclinaison de l'outil entre 2 et 4 degrés est nécessaire pour maintenir une quantité de métal suffisante dans la cavité de l'épaulement et pour permettre à l'arrière de l'outil de maintenir la compression nécessaire pour assurer la consolidation du joint (figure II-14).

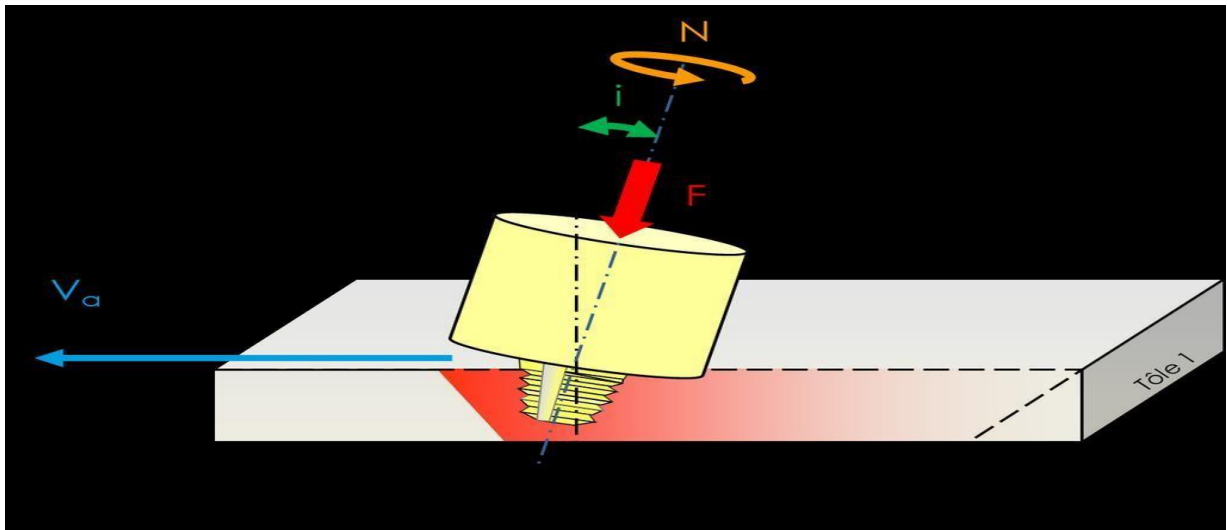


Figure II. 7 :l'angle d'inclinaison de l'outil [II-11].

II. 3. 3. Vitesse de rotation : [II-12] [II-13] [II-14]

Dans le procédé FSW/FSP, le malaxage de la matière est assuré par le mouvement combiné de rotation de l'outil et de sa vitesse d'avance, de même pour la génération de la quantité de chaleur entrante. Il est donc important dans une opération de traitement par friction malaxage de bien choisir la vitesse de rotation de l'outil. Cette vitesse peut prendre des valeurs dans un large intervalle, et dépend de plusieurs critères principalement la nuance des matériaux à souder. Généralement la variation des vitesses de rotation de l'outil est imposée par les caractéristiques de la machine. Parmi les travaux qui montrent que la vitesse de rotation est une variable significative dans le processus de soudage par friction malaxage, on trouve ceux de K. Elangovan Ils expliquent qu'une augmentation de la vitesse de rotation provoque des températures plus élevées au sein du joint de soudure donc un refroidissement plus lent. D'une part, une vitesse de rotation très élevée provoque un excès de formation de bourrelets de matières. D'autre part, une vitesse de rotation moins rapide provoque une faible agitation de matière.

Pour une même géométrie de l'outil, une vitesse d'avance constante égale à 0.76 mm/s et une force axiale de 12KN, trois vitesses de rotation d'outils différents ont été utilisées pour observer

l'influence de cette vitesse. Les joints obtenus avec une vitesse de rotation égale à 1600 tr/min ont présente une meilleure résistance à la traction. Avec cette vitesse on obtient une granulométrie plus fine et une meilleure dureté.

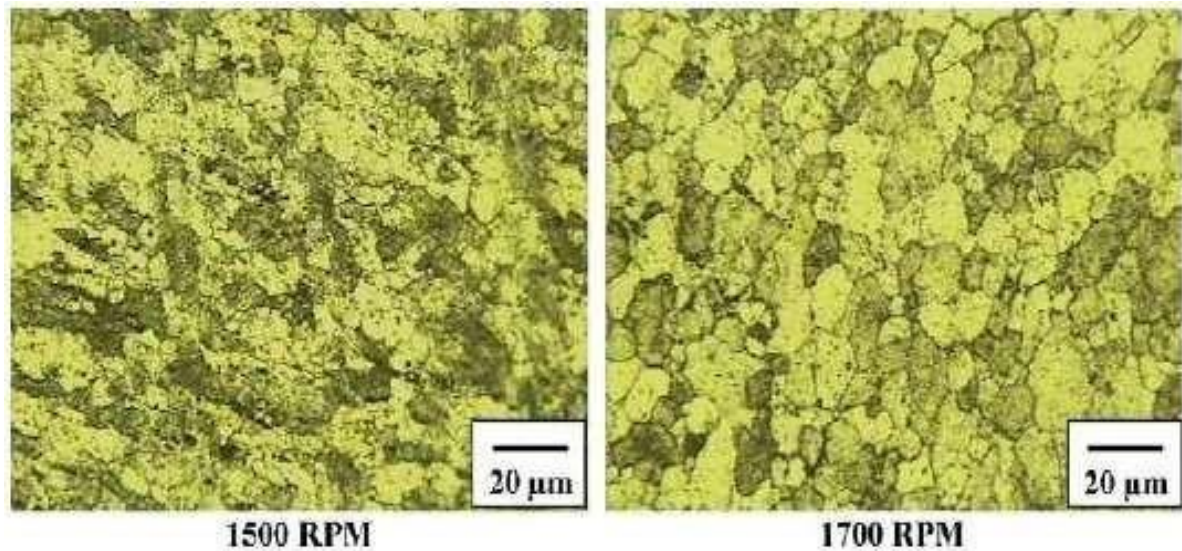


Figure II. 8 : Effet de la vitesse de rotation sur la microstructure. [II-12]

Une autre étude importante de Y.G. Kim et al [II-13] prouve qu'une vitesse de rotation très rapide associée à une force axiale importante et une lente vitesse de soudure provoque un excès de bavures. Ainsi une vitesse de rotation lente provoque des cavités. Leurs travaux ont illustrés que ce dernier type de défaut peut être observé lors d'une agitation anormale (vitesses de rotation Une tentative a été effectuée par V. Balasubramanian pour établir une relation empirique entre la vitesse de rotation de l'outil et les propriétés mécaniques des structures soudées par FSW.

Pour cela V. Balasubramanian [II-14] a étudié l'effet de la vitesse de rotation sur cinq alliages d'aluminium. La force axiale et la vitesse de soudage ont été maintenues constant es respectivement 8KN et 75mm/min.

L'analyse microscopique de la section des soudures montre bien qu'il existe une vitesse optimale qui donne des joints sans défauts (exemple 1100 tr/min pour l'alliage AA6061). (Figure II. 9).

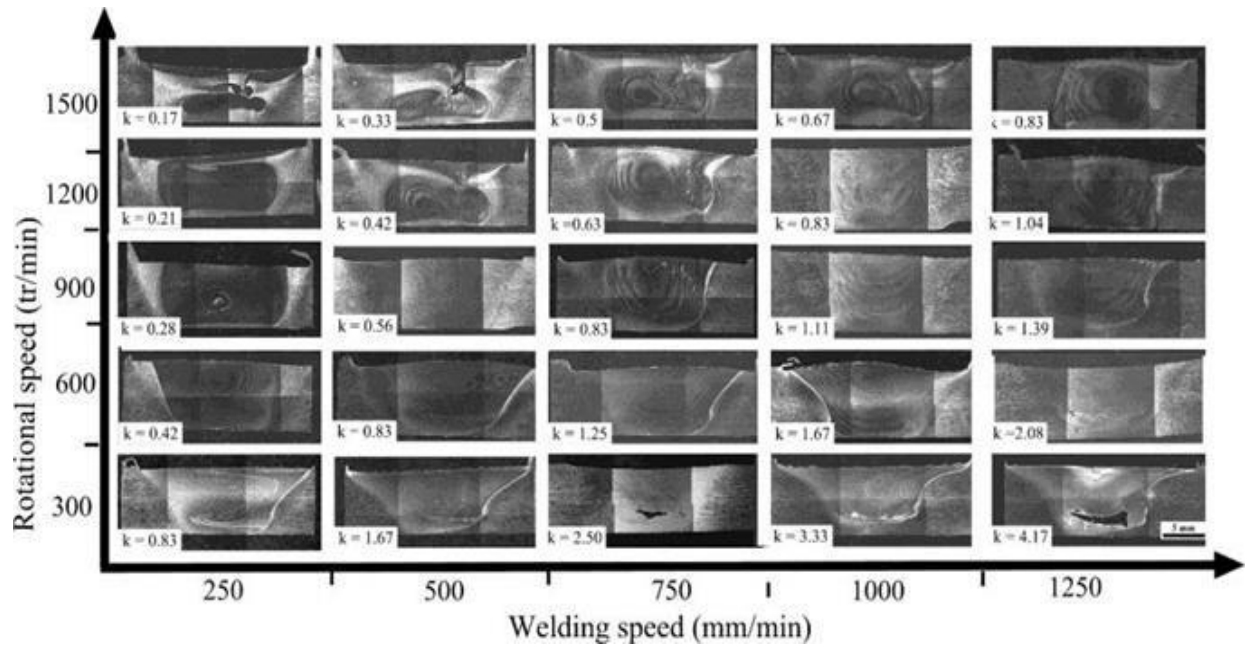


Figure II. 9 : Effet de la vitesse de rotation sur la macrostructure des alliages d'aluminium (Vitesse de Soudage = 0.8 à 1.6 mm/tr). [II-14]

II. 3. 4. Vitesse d'avance : [II-15] [II-16]

Dans la littérature plusieurs recherches ont été l'objet de l'influence de la vitesse sur les caractéristiques mécaniques des joints obtenus par friction malaxage.

La vitesse optimale est limitée et elle est généralement liée à la vitesse de rotation de l'outil. La direction d'avance de l'outil ou celle de la table et le sens de rotation de l'outil définissent deux zones dans la pièce à utiliser. La zone où la vitesse d'avance de l'outil a le même sens que la vitesse de rotation est appelée la zone d'attaque (dancing zone), dans le cas contraire, on l'appelle zone retraitée (recreation zone) (figure II.17).

En effet, une vitesse élevée risque de produire des macro-pores et des défauts sous forme de tunnel. [II-15] [II-16]

Afin d'étudier le rapport entre la vitesse de soudure et les défauts dans un joint obtenu par FSW, H. Zhang et al [II-15] ont effectué des soudures sur un alliage de magnésium AZ31.

Les résultats expérimentaux ont prouvé que avec une vitesse de rotation constante égale à 1000 tr/min, les vides commencent à se produire à partir de la vitesse 200mm/min. Ils se rapprochent de la zone d'attaque et de la partie supérieure du joint au fur et à mesure que la vitesse de soudage augmente. [II-15] [II-16]

Ces défauts peuvent être atténués avec un effort de forgeage optimal. H. Zhang et al. Présentent un modèle analytique qui permet de choisir les paramètres du FSW pour avoir une meilleure qualité du joint dessoudure.

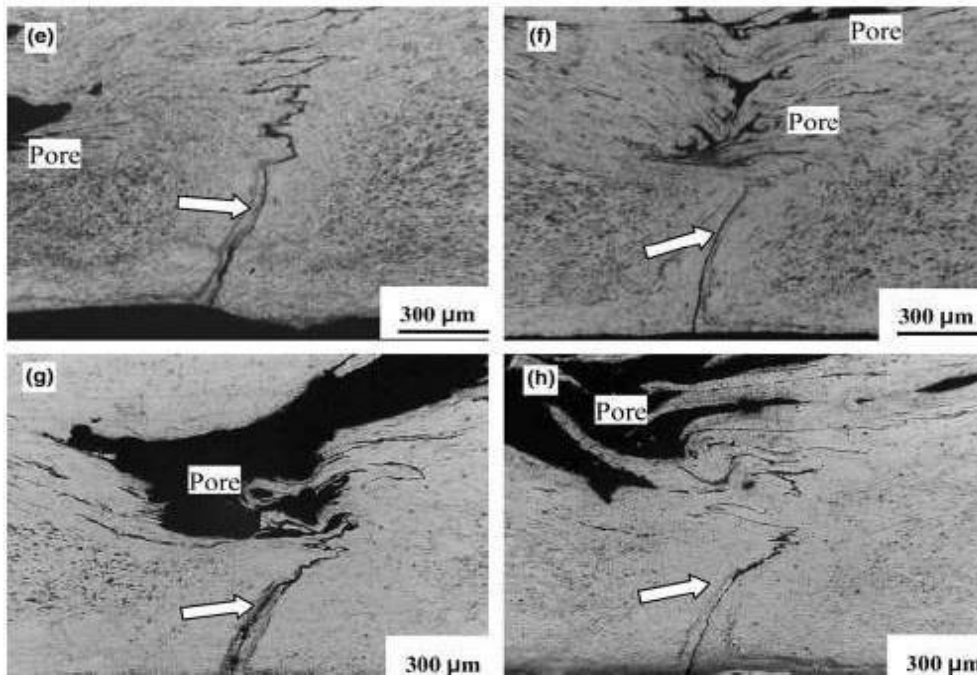


Figure II. 10 : Présence des macro-pores dans les cordons FSW d'un alliage de magnésium AZ31 obtenus par une vitesse de soudage de 250mm/min (e), 300 (f), 400 (g), et 600 mm/min(h), avec la même vitesse de rotation et le même effort de forgeage. [II-15]

II.4 Effet de la vitesse d'avance et la vitesse de rotation : [II-4]

Il faut différencier la notion du pic de température « Peak Temperature » (qui est la température maximale enregistré dans le joint soudé), et l'apport de chaleur « Heat Input » (qui est la quantité de chaleur générée et distribuée dans le matériau traité).

Reynolds et al. (2005) [II-17] Le pic de température dans le centre du soudage est une complexe combinaison entre la vitesse de rotation et d'avance. Plus précisément, Mishra et al. (2005) [II-8] ont reporté que le pic de température augmente avec l'augmentation du rapport (ω/v). Comme il est montré dans la figure **(II-11-b)**. La figure **(II-11-c)** montre que la vitesse d'avance a une influence insignifiante sur le pic de température tandis que l'augmentation de la vitesse de rotation augmente le pic de température

Reynolds et al. (2005) [II-17] Plus la vitesse d'avance est grande plus la montée et la descente de la température est rapide durant le FSW. Ceci résulte à un apport de chaleur faible. R.Nandan et al. (2008) [II-18] ont eu la même observation.

Menhta et al. (2011) [II-19] Il a été conclu que pour des vitesses de rotation optimaux le pic de température a été enregistré entre un écart de 0.94 à 0.96 TS (432-446°C) ou TS est la température du solidus qui est à 476°C pour un alliage A7075-T6.

Puisque la distribution de la température influence directement la microstructure de la soudure, citons la taille des grains, le caractère des joints de grains, le grossissement et la dissolution des précipités, et la résultante des propriétés mécanique du joint, Mishra et al. [II-8] Il est important d'acquérir des informations sur la distribution de la chaleur pendant le FSW.

Mahoney et al. (1998) Ont établis un soudage de tôles en 7075-T651 avec une épaisseur de 6.35, et ont mesuré la distribution de la température pendant le procédé, la figure **(II-11-a)** montre que le pic de température se trouve à une zone adjacente du cordon. Les figures **(II-11-c)** et **(II-11-d)** montre que la température diminue en s'éloignant du centre de soudage

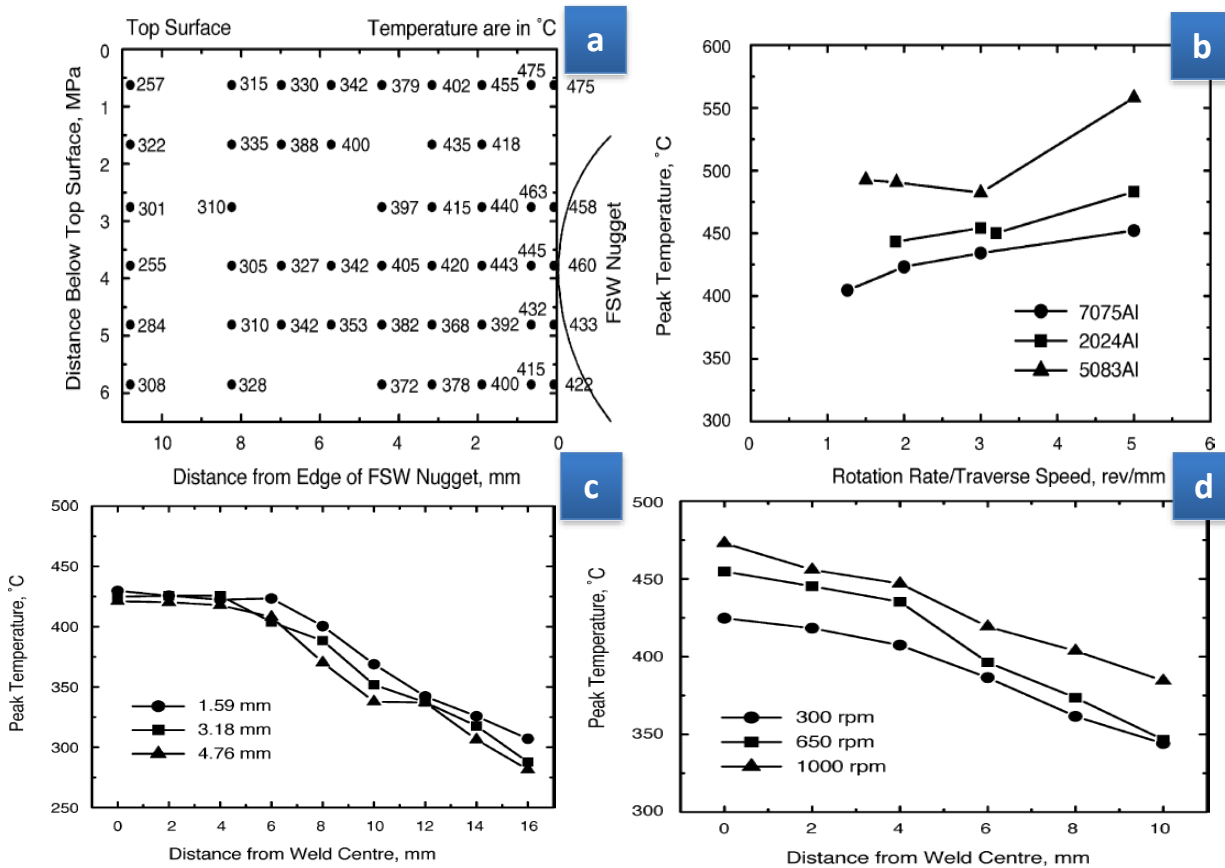


Figure II-11 : (a)-distribution de la chaleur durant le FSW [II-20], (b)-effet du rapport ω/v sur différent alliages d'Al (c et d)-l'effet de ω et v sur le pic de température et sa distribution au long du joint soudé en FSW [II-8].

Mishra et al. [II-8] Ont reporté une variation de la taille des grains du centre vers la surface (au long de l'épaisseur de la pièce) et du centre du cordon vers le métal de base, qui est due à la distribution de chaleur qui est inégal dans tous les directions du matériau. Voir figure (II-11). Azimzadegan et al. (2010) [II-21] Ont montrés que la vitesse de rotation et d'avance affecte sensiblement la microstructure ainsi que le comportement mécanique du matériau soudé, alors qu'un raffinement de grains s'est produit lors d'un grand rapport ω/v . Il a été remarqué qu'une zone de 1 mm n'a pas été affecté durant le soudage, une grande vitesse d'avance signifie un apport de chaleur minimal qui a causé une réduction de la profondeur du soudage. Cela signifie que la quantité de l'apport de chaleur joue un rôle prépondérant sur la forme de la zone déformé.

Azimzadegan et al. [II-21] ont assignés que pour une vitesse longitudinale donnée, il y a une vitesse de rotation optimale qui procure la plus grande résistance à la traction ainsi que l'élongation sur le joint soudé. Ces résultats sont présentés dans la figure II-12

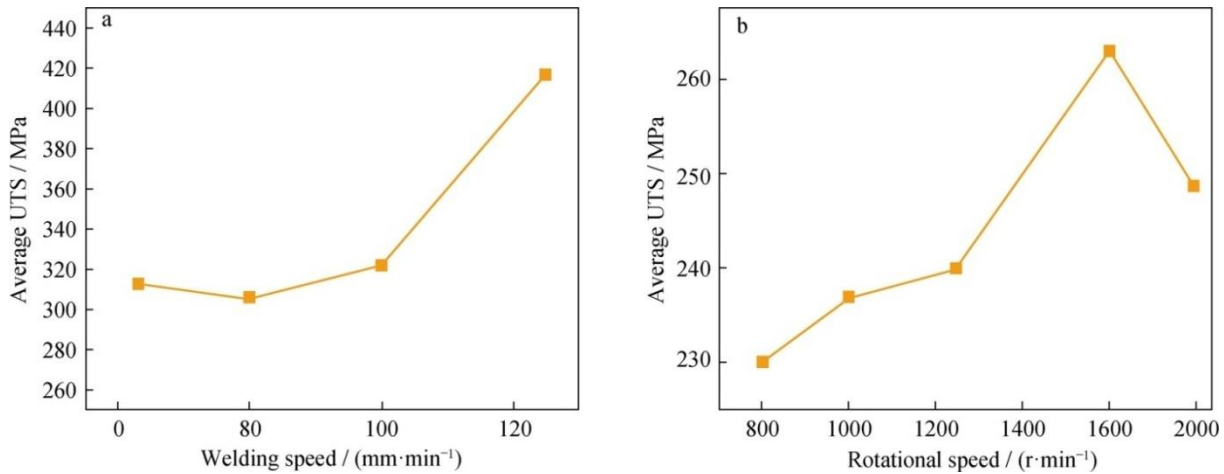


Figure II-12 : l'effet de la vitesse de rotation et d'avance sur la résistance maximale entrainement. [II-22]

II. 5 Les différentes zones d'une pièce traitée par le procédé FSP :

La microstructure est caractérisée par trois zones distinctes: Le noyau de la soudure (appelé "Nugget" en anglais), la zone affectée thermo-mécaniquement (TAMZ : Thermo Mechanically Affected Zone) et la zone affectée thermiquement (HAZ : Heat Affected Zone).

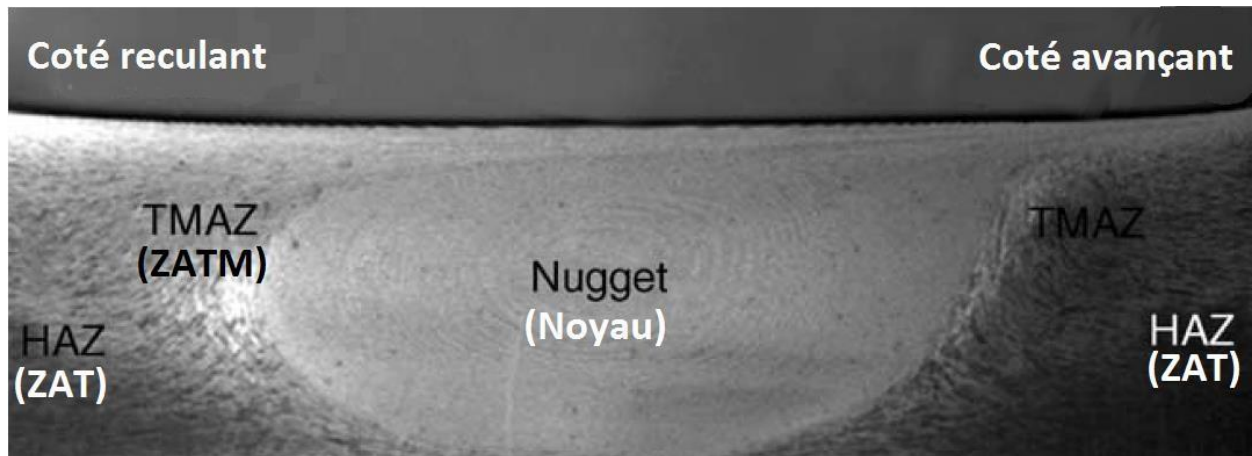


Figure II. 13 : Microstructure des différentes zones dans un joint pendant le FSP. [II-8]

II. 5.1 Métal de Base (MB) : [II-8]

Au-delà de la ZAT, l'élévation de la température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale.

II. 5.2 Zone Affectée Thermiquement (ZAT) : [II-8]

zone adjacente à la zone fondue sur une largeur plus ou moins étendue qui a été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

II. 5.3 Zone Noyau (ZN) : [II-8]

Suite à l'opération de friction/malaxage, la matière subit une très grande déformation plastique et une très importante élévation de température sans atteindre la fusion, c'est la région de recristallisation complète (fully recrystallized area) et c'est aussi la zone occupée précédemment par le pion d'outil FSW au cours de son mouvement.

II. 5.4 Zone Affectée Thermo-Mécaniquement (ZATM) : [II-8]

Cette zone encadre la zone noyau où le matériau subit une déformation plastique liée aux mouvements de la matière combinés à l'élévation de température. Dans le cas de l'aluminium, il est possible d'obtenir des déformations plastiques significatives sans recristallisation. La microstructure et les propriétés dans cette zone sont aussi changées.

Chapitre III

Méthode expérimentale.

III.1. Matériels utilisé dans ce travail :

III.1. 1. Métal de base (matériaux à traiter) :

Le matériau utilisé dans ce travail est l'alliage d'Aluminium 5083, sa composition chimique est indiquée dans le tableau III. 1, sous forme de tôle 250x250x10 mm³ pour un traitement par friction malaxage, la tôle est représentée dans la figure III. 1.



Figure III. 1 : tôle d'alliage d'aluminium 5083.

% Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0,40	0,40	0,10	0,4 1,0	4,00 4,90	0,05 0,25	0,25	0,15	Le reste

Tableau III. 1 : composition chimique d'alliage d'aluminium 5083.

III.1. 2 Machine utilisé dans le procédé :

- **Scie sauteuse** : pour découper la tôle (figure III.2)
- **Fraiseuse verticale automatique** : pour effectuer notre procédé FSP (figure III. 3)



Figure III.2 : Scie sauteuse



Figure III. 3 : Fraisese verticale automatique FSP utilisées

- **Les outils de friction** : un outil non consommable en acier qui contient un épaulement (20mm Ø) sans borne qui contient un pion de (3 mm Ø) et de 2.8 mm de longueur réalisé au niveau de l'atelier d'usinage au département de Génie Mécanique.

– Les éléments de l'outil FSP

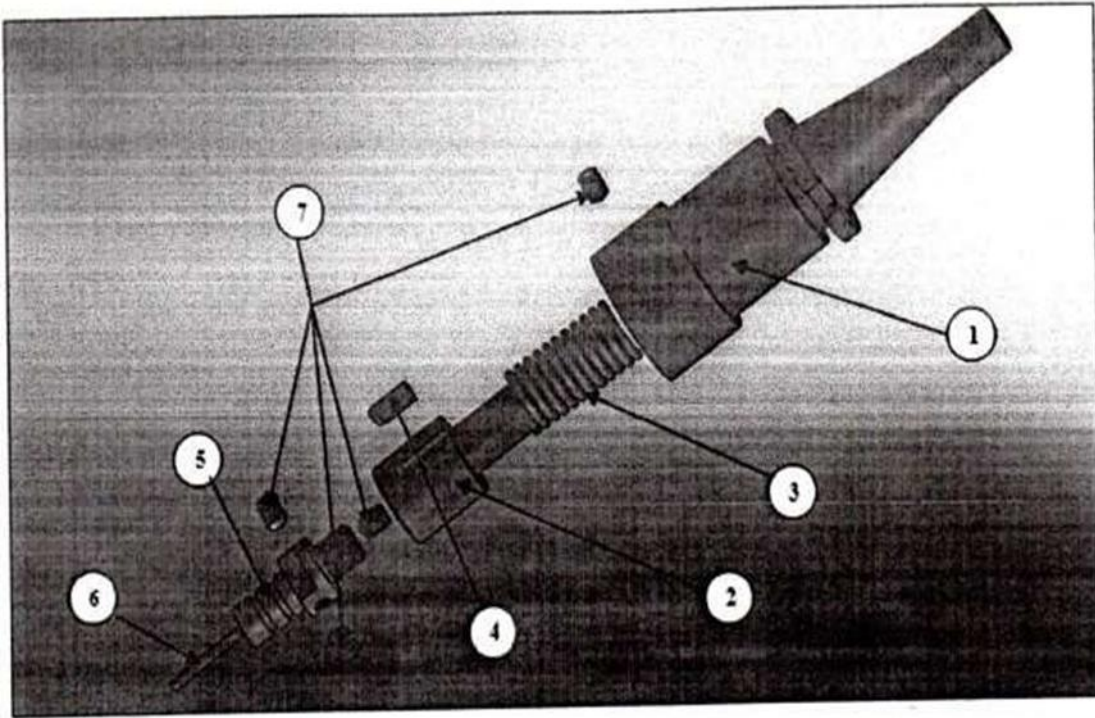


Figure III.4 : Schéma des différentes composantes de l'outil FSP

Numéro des pieces	Nom des pieces
1	Porte outil
2	Arbre
3	Ressort
4	Clavette
5	Epaulement
6	Pion
7	Vis sans tête

Tableau III.2 : Les composantes de l'outil FSP

La manipulation expérimentale :

III.2 Le procédé FSP :

Dans notre travail on utilise une fraiseuse verticale automatique pour effectuer notre procédé FSP (friction stir processing le traitement par friction malaxage) a été faite au niveau de l'atelier defabrication de département mécanique à l'Université SAAD DAHLEB de Blida.

III.2 .1 Condition de l'expérience Avant le traitement, il faut :

- Placer la porte outil dans la machine de fraisage,
- Découpages et nettoyage des tôles à souder avec l'alcool puis les polir sur les surfaces et les bords,
- Positionner la tôle de telle façon que le bord à traite soit bien parallèle à l'avance dupion pendant le traitement,
- Vérifier la planéité des tôles,
- Fixer les deux tôles sur la table de la machine à l'aide d'un système de bridage et posersur une tôle de Titane.



Figure III.5 : Réglage de la vitesse de rotation de l'outil(V_r)

- Régler les paramètres :
 - Vitesse de rotation de l'outil V_r .
 - Vitesse d'avance de soudage V_a .
 - l'angle d'inclinaison α



Figure III.6 : Réglage de la vitesse d'avance (V_a)

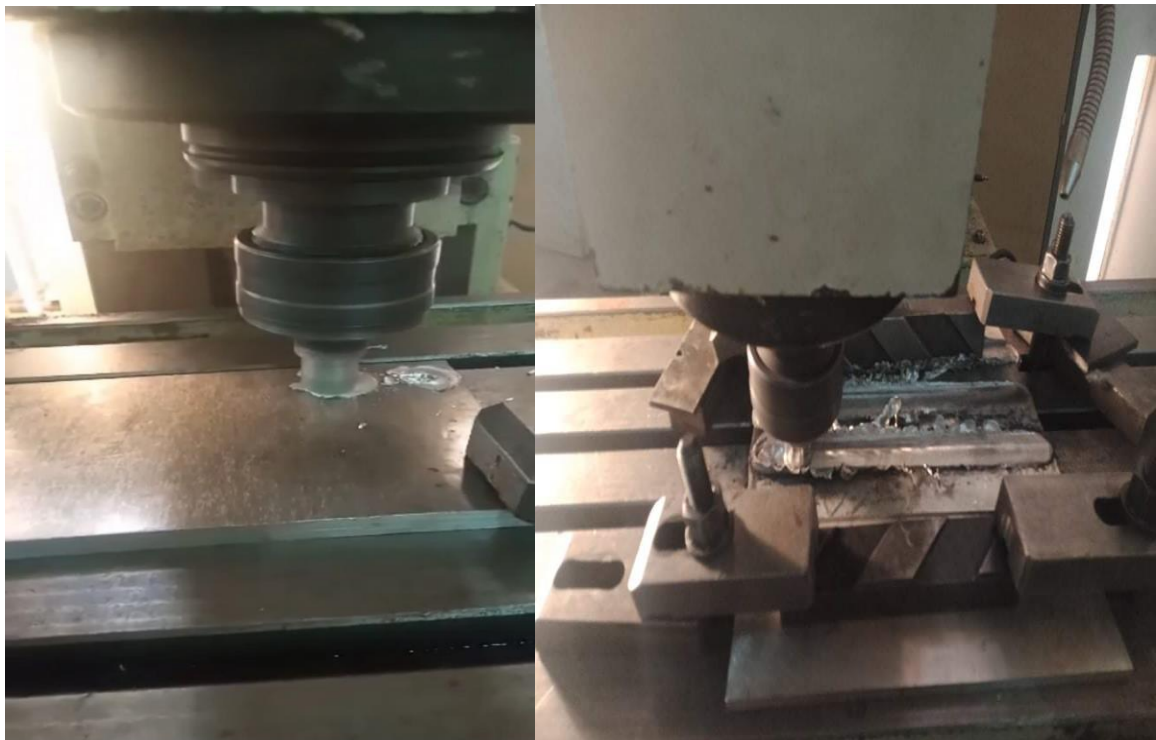


Figure III-7 : Le malaxage des tôles

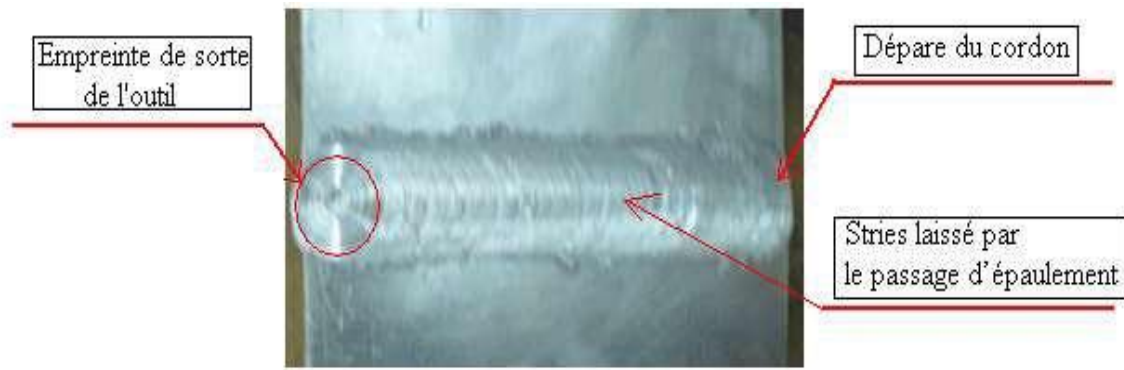


Figure III.8 : Les empreintes existantes sur FSP

III.2 .2 Paramètres utilisés :

Le but de l'expérience faite c'est de déterminer l'effet du rapport : (vitesse de rotation/vitesse d'avance) sur les qualités des joints. Pour cela il est évident de fixer les autres paramètres (angle d'inclinaison, diamètre du pion et l'épaulement, et la plongée de l'outil).

Variante	Vitesse
A	Vitesse de rotation = 710 tr/min Vitesse d'avance = 25 mm/min
B	Vitesse de rotation = 710 tr/min Vitesse d'avance = 40 mm/min
C	Vitesse de rotation = 710 tr/min Vitesse d'avance = 8 mm/min
D	Vitesse de rotation = 900 tr/min Vitesse d'avance = 25 mm/min
E	Vitesse de rotation = 900 tr/min Vitesse d'avance = 40 mm/min
F	Vitesse de rotation = 900 tr/min Vitesse d'avance = 8 mm/min
G	Vitesse de rotation = 1120 tr/min Vitesse d'avance = 25 mm/min
H	Vitesse de rotation = 1120 tr/min Vitesse d'avance = 40 mm/min
I	Vitesse de rotation = 1120 tr/min Vitesse d'avance = 8 mm/min

Tableau III-3 : la variation des vitesses durant l'expérience

Les autres paramètres utilisés sont :

- L'angle d'inclinaison : 2°
- Le diamètre de l'épaulement : $D = 20 \text{ mm}$
- Le diamètre du pion : $d = 3 \text{ mm}$
- La longueur du pion : $L = 2.8 \text{ mm}$
- La forme du pion : conique fileté en Z200 trempé et revenu
- La forme de l'épaulement : circulaire simple

Il faut noter que ces paramètres sont fixes pour tous les variantes soudés.

III.3 Découpage de la tôle :

Dans cette opération, on découpe la tôle en neuf parties par Scie sauteuse (disponible au niveau de l'atelier du département de mécanique).

Le découpage a été fait dans le plan transversal de la zone de traitement par friction-malaxage (figure III. 9. a). Après avoir découpé chaque zone de traitement selon chaque configuration on découpe les échantillons. Le début et la fin de la zone traitée ont été évités car ils présentaient des irrégularités les échantillons sont représentés dans la figure III. 9. b.



Figure III. 9 :a) les coupes des zones traitées. b) les coupes des échantillons.

Prélèvement des échantillons :

Après les opérations de soudage des plaques d'aluminium, on prélève des échantillons pour contrôler la qualité du joint et appliquer des essais mécaniques.

Des échantillons des neuf variantes ont été pris pour déterminer l'évolution de la microstructure ainsi que l'effet de la vitesse et des différents apports de chaleur que procure.

III.4 Microscopie optique :

Avant l'utilisation de la microscopie optique, une préparation des échantillons devait être établie au préalable de la manière suivante :

- Polissage,
- Attaque chimique

III.4.1 Polissage

Cette opération a été réalisée sur une surfaceuse a disque abrasif (polisseuse) .Cette étape permet d'obtenir une surface avec un effet de miroir (la plus lisse possible et sans rayure).

Ce polissage a été effectué en plusieurs étapes avec des disques en papier abrasif en carbure de silicium (de plus gros au plus fin : 80, 120, 180, 220, 320, 500, 800,1000 et 1200), cette opération a été faite sous aspersion d'eau pour éviter l'échauffement de l'échantillon. La figure montre la polisseuse utilisée au laboratoire SDM.



Figure III.10 : Polisseuse utilisée

Le polissage de finition a été réalisé avec la pâte diamantée sur un papier feutre afin d'avoir une surface à l'état miroir.



Figure III.11 : la pâte diamantée



Figure III.12 : papier velour

Les échantillons en état miroir après la finition de polissage (figure III. 13).



Figure III.13 : l'Etat miroir

III.4.2 L'attaque chimique :

Le réactif chimique utilisé pour notre aluminium ces échantillons seront attaqués chimiquement par acide phosphorique (concentration 10%) à 50°C



Figure III.14 : acide phosphorique (H₃PO₄ 85%)

Pour prépare 10% de l'acide phosphorique en ajouter :

- 6.6 ml d'acide phosphorique (H₃PO₄ 85%).
- 50 ml d'eau distillée (H₂O).

Les échantillons seront immergés durant 4 minutes à 50°C, lavés à l'eau et l'éthanol



Figure III.15 : Etuve



Figure III.16 : Ethanol

Après immerger les échantillons durant 5-15 seconde dans réactif de weck (colorant) constitué de :

- 1g de hydroxyde de sodium (NaOH)
- 4g de permanganate de potassium (KMnO_4)
- 100ml d'eau distillée (H_2O).



Figure III.17 : Eau distillée



Figure III.18 : permanganate de potassium



Figure III.19 : hydroxyde de sodium

Après avoir mélangé ces produits, on obtient réactif de wick



Figure III.20 : réactif de Wick

Microscopie optique :

L'utilisation d'un microscope optique de type Carl Zeiss ayant un agrandissement variant de 50 à 1000, Doté d'une caméra numérique au niveau de laboratoire de département mécanique nous a permis de prendre des micrographies de la microstructure dans le métal de base, la ZAT, ZATM, et le noyau pour les échantillons.



Figure III.21 : Microscope optique.

III.5 Caractérisations tribologiques:

Le comportement tribologique n'est pas une propriété intrinsèque des matériaux mais dépend des caractéristiques mécaniques et structurales de matériaux. Les essais d'usure ont été réalisés à l'aide d'un tribomètre rotatif (TRB3 ANTHON PAAR, Germany) au laboratoire études et recherche en technologie industrielle au département génie mécanique.

Les résultats exploitables sont la courbe du coefficient de frottement correspondant aux matériaux du couple surface d'échantillon-bille, les pistes usés qui vont être le point de départ pour l'étude de l'usure. La courbe du coefficient de frottement donnée par le logiciel renseigne notamment sur les variations au cours de l'essai, ce qui doit permettre d'identifier différentes phases de l'essai, le taux d'usure est calculé à l'aide du logiciel couplé avec le tribomètre. Et d'autre part on calcule la valeur de la perte en masse après avoir pesé l'échantillon avant et après chaque test à l'aide d'une balance numérique.

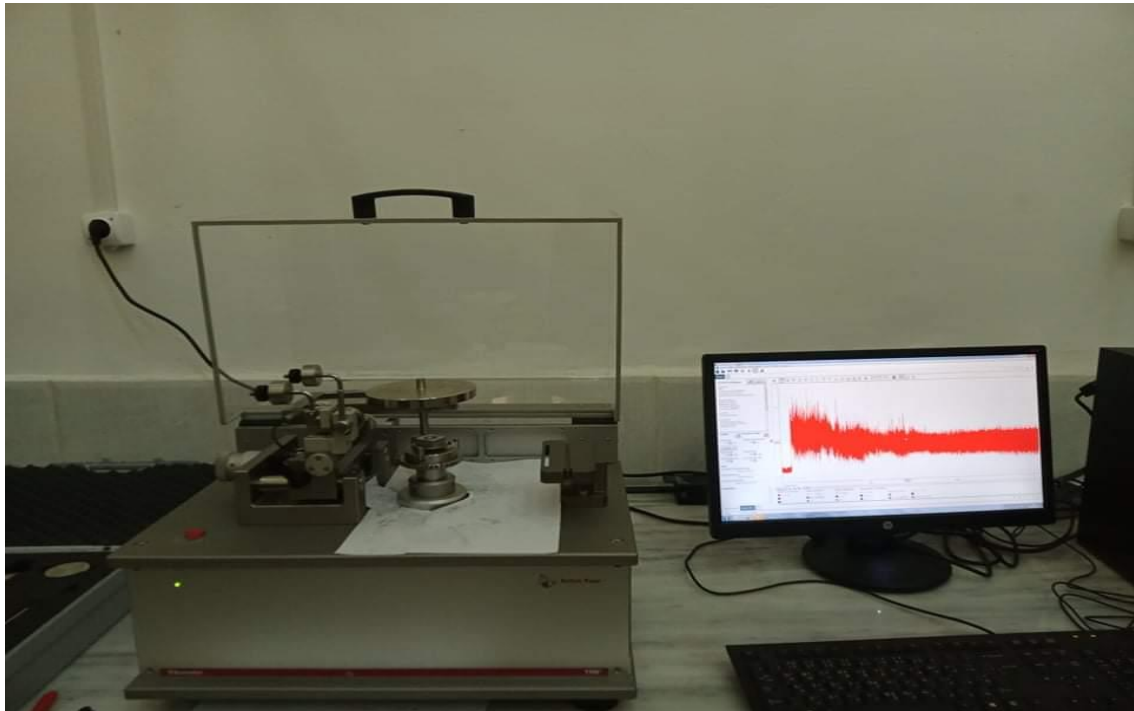


Figure III.22 : tribomètre

Le tribomètre utilisé pour étudier la tenue à l'usure des échantillons est un dispositif de frottement « bille sur plan ». Ce dispositif possède deux mouvements possibles, le mouvement alternatif et un mouvement de rotation classique employé pour notre étude. Le bras supérieur (porte-billet) peut être motorisé par un système de positionnement vertical avec un capteur de position et un système de positionnement latéral avec un autre capteur de position.

Sur ce micro-tribomètre, la force de frottement dynamique et le coefficient de frottement instantanés ont été mesurés en fonction de nombre des cycles des tests.

Les propriétés tribologiques d'usure (mouvement rotation) pour les différents échantillons ont été évaluées à l'aide d'un tribomètre (bille sur plan) muni d'un logiciel tribotester software . La bille en acier 100Cr6 de 6 mm de diamètre, et de module d'Young 205 GPa a été choisie comme antagoniste afin d'éviter des réactions chimiques supplémentaires. Pour nos essais, les paramètres expérimentaux sont représentés (Tableau III. 4).

Les principaux composants du système Anthon Paar sont les suivants :

- Table porte-échantillons en mouvement rotation.
- Capteur de température et d'humidité.
- Bille en Acier.
- Masses correspondantes à la charge appliquée.

Conditions de travail	Charge (10N)
Rayon (mm)	5
Vitesse de rotation (cm/s)	20
Distance procurer (m)	300
Temperature (°C)	Ambiante
Humidité (%)	60-75
Echantillon	Alliage d'aluminium (AA5083)
Bille	Acier 100Cr6 (Ø 6 mm).

Tableau III. 4 : conditions et paramètres opératoires.

III.6. Essai dureté :

L'essai consiste à déterminer la résistance d'un matériau à une force de pénétration. Le pénétrateur peut être de géométrie pyramidale selon le type de dureté à mesurer.

Le labo dispose d'une machine d'essai de dureté INNOVATEST.

Paramètre : 10s

1 kg



Figure III.23 : duromètre

Chapitre III : méthode expérimental

Chapitre IV

Discussion des Résultats

IV.1. Introduction :

La microstructure de l'aluminium conditionne largement les propriétés des matériaux, qu'elles soient mécaniques, magnétiques, électriques ou autres. Elle dépend de la chimie du matériau mais également de toute la gamme de transformation depuis la solidification, dont les traitements thermomécaniques (laminage à chaud) et les traitements mécaniques et thermiques. Tout au long de la gamme de fabrication, les transformations de phases, la déformation plastique des grains, la restauration et/ou la recristallisation des grains écrouis, les interactions précipitation-recristallisation, la croissance normale ou anormale des grains, influent sur la microstructure finale du matériau.

Ce chapitre va aborder, une optimisation du rapport de différentes vitesses utilisées lors de l'FSP, pour cela une caractérisation mécanique et métallurgique des joints soudés fût indispensable, ainsi que l'effet du traitement thermique qui a subis les différents échantillons.

IV.2 L'évolution de la microstructure :

La figure 1 représente les images optiques du métal de base et la figure 2 représente la zone traitée par FSP. Il a été observé que la taille des grains est devenue plus fine dans les échantillons FSP par rapport au métal de base.

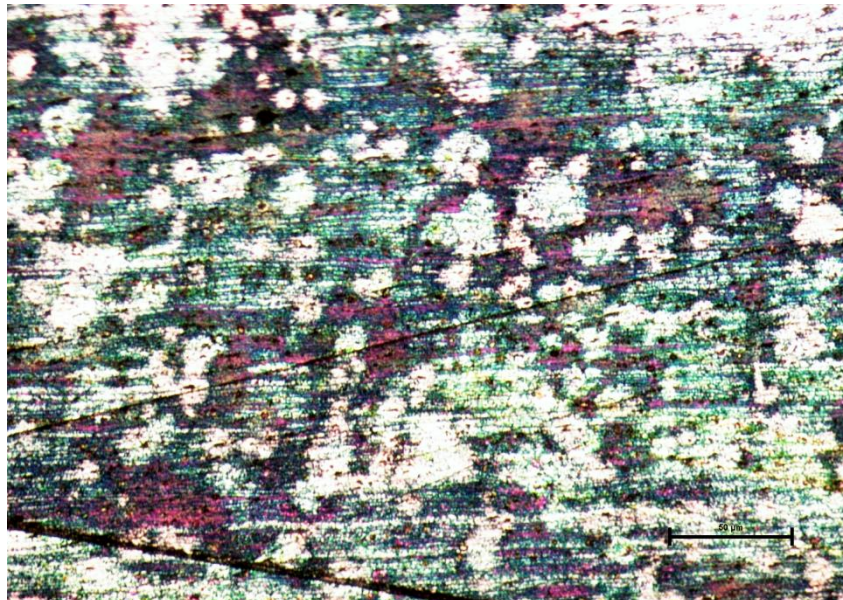


Figure IV-1 : la microstructure du métal de base.



Figure IV-2 : La microstructure du la zone traite à une vitesse (1120/8 ω/v)

La figure IV-2 représente une micrographie d'une coupe transversale de la variante I. Il est observé que la taille des grains diminue en allant vers le noyau, la taille des grains dans le noyau est plus fine que dans la ZAT et la ZATM.



IV-3 : microstructure du noyau dans la variante I

Dans la ZATM et la ZAT les grains présente un caractère moins équiaxes avec une taille supérieure à celle du noyau. Il faut noter que dans la ZATM les grains sont sévèrement déformés.

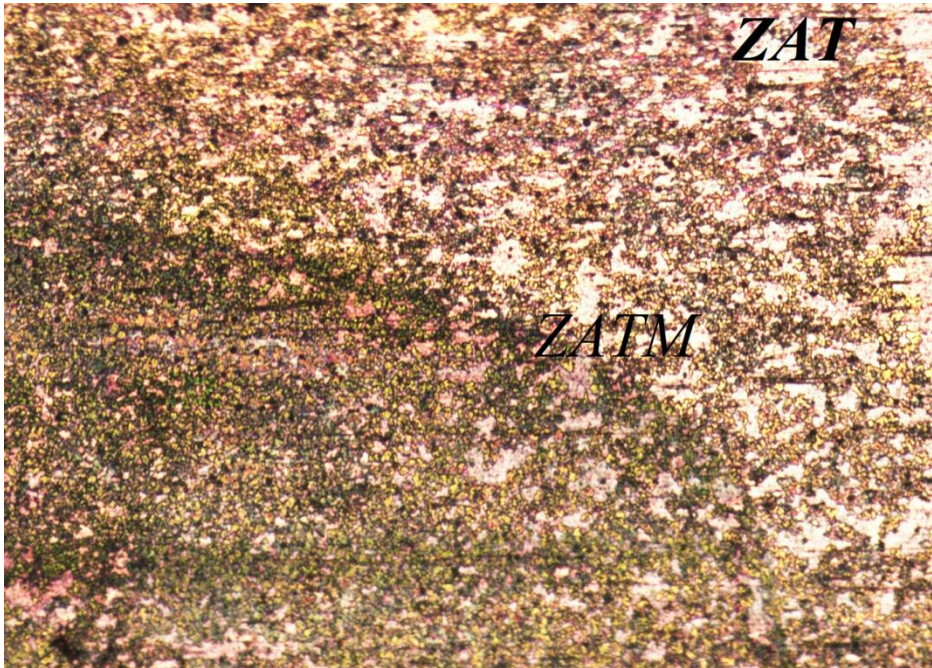


Figure IV-4 : microstructure de la ZAT et la ZATM dans la variante I

Dans le noyau, une microstructure caractérisée par des grains fines et équiaxes est nettement observable, ce résultat est le fruit d'une température élevée et une déformation plastique intense qui ont causé une recristallisation dynamique dans cette région.

La ZATM a une structure moins équiaxe avec une moyenne de taille de grains plus supérieur que celle du noyau, et plus inférieur que celle de la ZAT, il n'y a aucune recristallisation dynamique observé, car le taux de déformation plastique n'été pas favorable pour la recristallisation. De plus, il a été révélé que les grains de la ZATM contiennent généralement une forte densité de sous-limites et qu'il existe une zone affectée par la chaleur (ZAT) au-delà de la ZATM. Cette zone subit un cycle thermique, mais ne subit aucune déformation plastique. Cela signifie que la ZAT conserve la même structure de grain que le métal de base.

IV.3 Evaluation Tribologique :

Tous les résultats de l'évolution du coefficient de friction en fonction de la distance parcourue des différents échantillons pour la charge appliquée $F = 10 \text{ N}$ sont présentés dans la Figures IV-5, Figure IV-6 et la Figure IV-7.

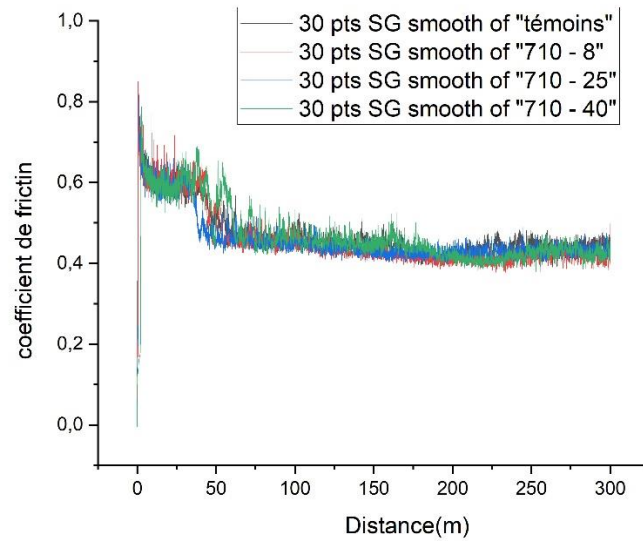


Figure IV-5 : tribologie différents vitesse d 'avance et vr stable (710 tr/min)

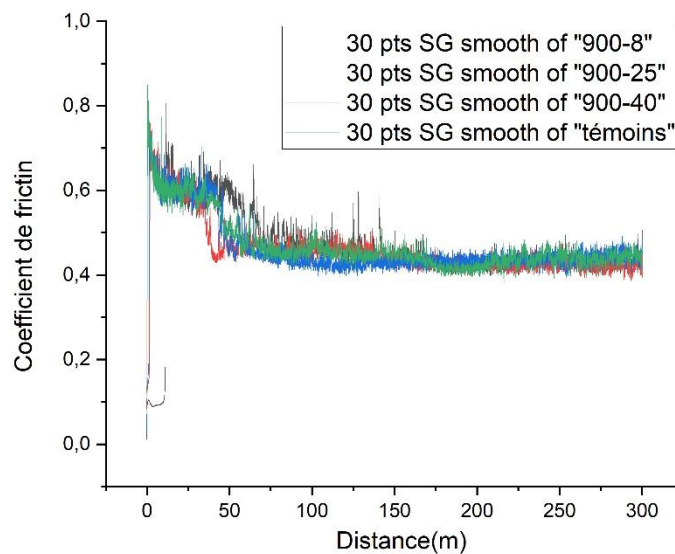


Figure IV-6 : tribologie différents vitesse d 'avance et vr stable (900 tr/min)

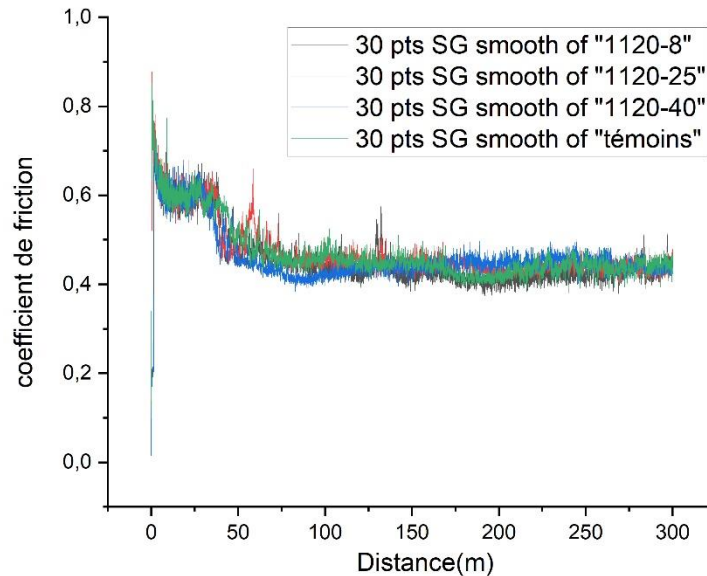


Figure IV-7 : tribologie différents vitesse d'avance et vr stable (1120 tr/min)

Le coefficient de friction des échantillons de AA5083 à l'état initial débute avec une augmentation vers des valeurs 0,6 à 0,85 qui se termine avec stabilité relative d'environ d'une moyenne entre 0.45 à 0.50.

IV.4 .1 Evaluation du taux d'usure :

Le tableau IV.1 résume les valeurs moyennes du taux d'usure Wr pour une charge ($F= 10$) des échantillons de différentes vitesses d'avances et des rotation.

Le Taux d'usure dans le système de contact étudié (AA5083). Il est déterminé à partir de la formule suivante :

$$Wr = \frac{\Delta m}{\rho \cdot F \cdot D}$$

Avec : Δm : La perte en masse (g).

ρ : La densité de l'aluminium. ($\rho= 2.7$ g/cm³).

F : La charge appliquée (N).

D : La distance parcourue. (m)

Les résultats montrent une diminution du taux d'usure pour certain configuration par rapport au témoin AA5083

échantillon	Poids initial (g)	Poids final (g)	Perte en masse Δm (g)	Taux d'usure W_r ($\text{mm}^3/\text{N.m}$)
témoin	13.5448	13.5148	0.03	$3.7 \cdot 10^{-3}$
Vr=710tr/min Va=8mm/min	12.5484	12.5224	0.026	$3.2 \cdot 10^{-3}$
Vr=710tr/min Va=25mm/min	9.3658	9.3438	0.022	$2.7 \cdot 10^{-3}$
Vr=710tr/min Va=40mm/min	8.6856	8.6706	0.015	$1.8 \cdot 10^{-3}$
Vr=900tr/min Va=8mm/min	14.3288	14.2998	0.029	$3.5 \cdot 10^{-3}$
Vr=900tr/min Va=25mm/min	11.2586	11.2336	0.025	$3 \cdot 10^{-3}$
Vr=900tr/min Va=40mm/min	14.5488	14.5268	0.022	$2.7 \cdot 10^{-3}$
Vr=1120tr/min Va=8mm/min	13.9586	13.9326	0.026	$3.2 \cdot 10^{-3}$
Vr=1120tr/min Va=25mm/min	15.3253	15.2983	0.027	$3.3 \cdot 10^{-3}$
Vr=1120tr/min Va=40mm/min	12.8569	12.8349	0.022	$2.7 \cdot 10^{-3}$

Tableau IV.1 : Valeurs moyennes du coefficient d'usure pour une charge appliquée de 10N.

Le tableau IV. 1 résume les valeurs moyennes du Taux d'usure des échantillons de différentes configurations avec une charge appliquée de ($F = 10\text{N}$). Les résultats montrent une diminution du coefficient d'usure pour certaines configurations (par rapport au témoin (AA5083)). On constate que le FSP influe positivement sur le comportement des surfaces.

Vr=710tr/min Va=40mm/min C'est une meilleure vitesse pour l'usure.

IV-5 Essai de dureté :

Les résultats de l'essai de dureté des échantillons ($V_r=710$) sont représentés dans le tableau

Les vitesses	Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3	Valeur 4	Moyenne
$V_r=710\text{tr/min}$ $V_a=8\text{mm/min}$	82,78	84,12	81,5	81,7	82,52
$V_r=710\text{tr/min}$ $V_a=25\text{mm/min}$	85,59	83,85	84,43	81,42	83,82
$V_r=710\text{tr/min}$ $V_a=40\text{mm/min}$	90,17	91,92	88,18	85,37	88,91
Témoin	79,7	80,89	83,59		81,39

Tableau VI -2 : la dureté dans différents vitesse d'avance et v_r (710).

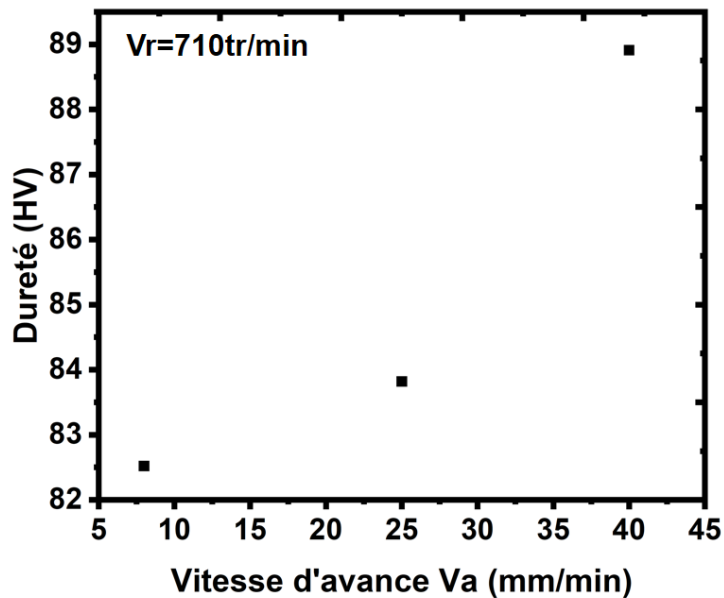


Figure VI-8 : la dureté dans différents vitesse d'avance et v_r stable.

Les résultats de l'essai de dureté des échantillons ($V_r=900$) sont représentés dans le tableau

Les vitesses	Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3	Valeur 4	Moyenne
$V_r=900\text{tr/min}$ $V_a=8\text{mm/min}$	80,12	79,52	82,09	78,79	80 ,13
$V_r=900\text{tr/min}$ $V_a=25\text{mm/min}$	81 ,17	82,90	81,95	82,36	82,09
$V_r=900\text{tr/min}$ $V_a=40\text{mm/min}$	82,09	83,59	80,36	84,92	82 ,74
Témoin	79,7	80,89	83,59		81 ,39

Tableau VI -3 : la dureté dans différents vitesse d 'avance et v_r ($V_r=900$).

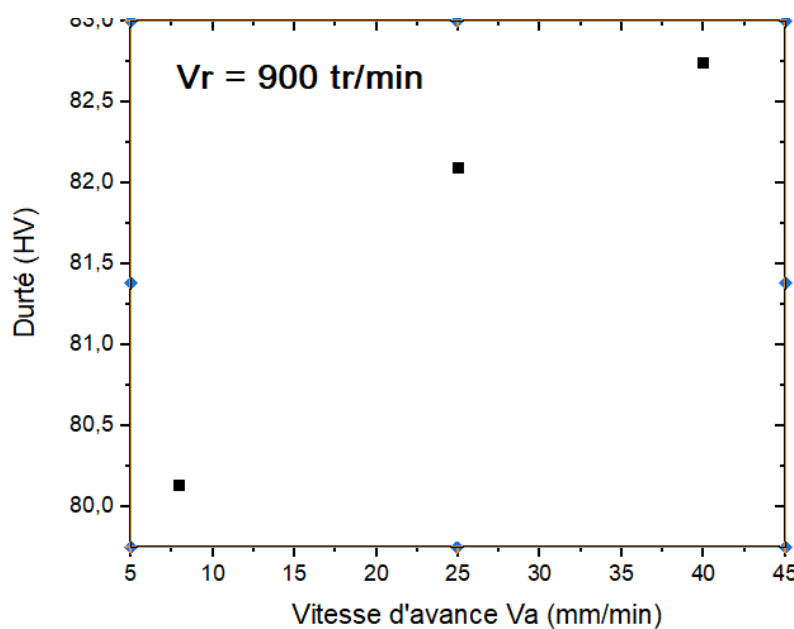


Figure VI-9 : la dureté dans différents vitesse d 'avance et v_r stable.

Les résultats de l'essai de dureté des échantillons ($V_r=1120$) sont représentés dans le tableau

Les vitesses	Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3	Valeur 4	Moyenne
$V_r=1120\text{tr/min}$ $V_a=8\text{mm/min}$	81,91	86,42	83,59		83,97
$V_r=1120\text{tr/min}$ $V_a=25\text{mm/min}$	82,76	85,89	84,71		84,45
$V_r=1120\text{tr/min}$ $V_a=40\text{mm/min}$	86,07	87,30	86,14	88,36	86,96
Témoin	79,7	80,89	83,59		81,39

Tableau VI -4 : la dureté dans différents vitesse d'avance et v_r ($V_r=1120$).

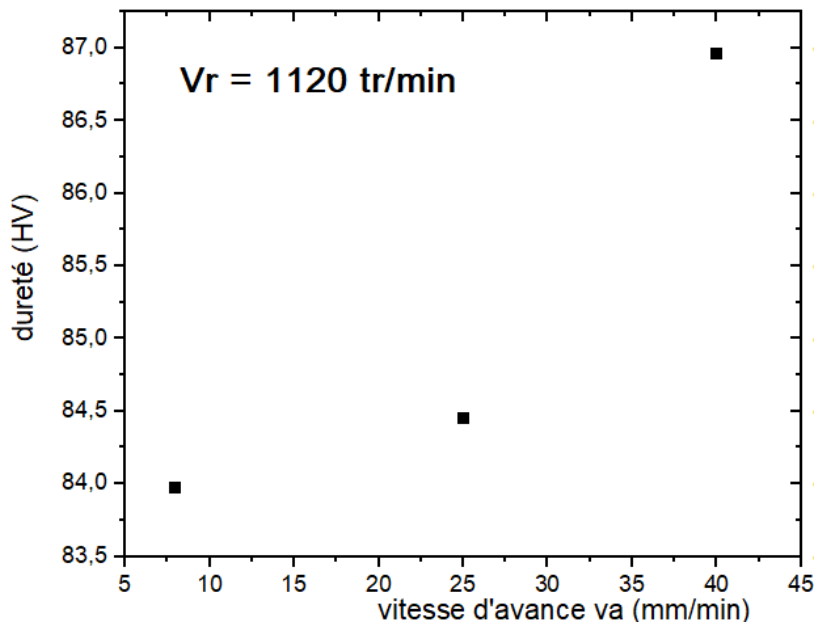


Figure VI-10 : la dureté dans différents vitesse d'avance et v_r stable.

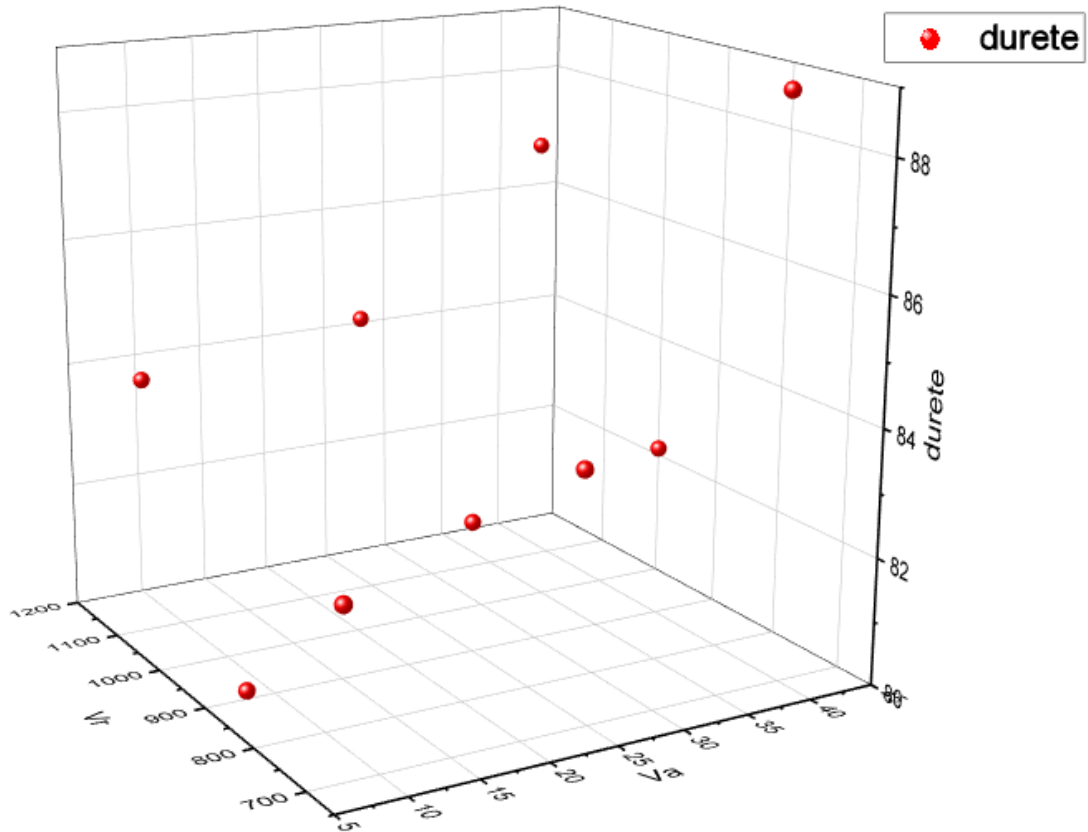


Figure VI-11 : la dureté dans différents vitesses d'avance et différentes vitesses de rotation.

Les figures IV.8-9-10 représentent les différentes valeurs de dureté Vickers Hv lors de nos essais pour chaque échantillon. La valeur moyenne a été calculée à partir de trois ou quatre essais. L'essai de la dureté Hv sur le témoin AA5083 nous a permis d'avoir une référence à laquelle on peut comparer les résultats des autres échantillons, Le traitement par FSP a donné une meilleure dureté. En remarque que la vitesse d'avance élevée la dureté élevée.

Meilleure vitesse $V_r=710\text{tr/min}$ $V_a=40\text{mm/min}$

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est étude la compréhension du procédé FSP utilisé sur l'aluminium 5083.

Les plus importantes remarques dans ce travail, sont :

- Le traitement par FSP à donne meilleure dureté à l'usure par rapport à celle de l'aluminium non traite par FSP
- Le comportement tribologiques d'usure nous montrent que le traitement par FSP a engendre une meilleur résistance à l'usure par rapport à celle de l'aluminium non traite par FSP
- A des différents rapports des vitesses, il a été remarqué une différence de la taille des grains dans le noyau.

Références bibliographique

- [I-1] Dr. GHOMARI Fouad. UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID. SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION
- [I-2] Aide-mémoire Métallurgie. DUNOD
- [I-3] M. AZZOUG, Mémoire de Master, soudage par friction malaxage d'un alliage 2024-T3, Université de SAAD DAHLEB, 2011.
- [I-4] Aide-mémoire, science des matériaux, DUNOD.
- [I-5] Gérard. Hartmann. L'Aluminium historique. Larousse des industries, 2004.
- [I-6] J.R Daus, Aluminium and aluminium alloys, Materials Park (1993) 18
- [I-7] D.J Alterpohl, Aluminium: Technology, application and environment, Metals and Materials Society (1998) 446
- [I-8] Wikipedia. fr.wikipedia.org/wiki/Alliage_d%27aluminium_pour_corroyage
- [I-9] Michel Colombie - Matériaux métalliques-Dunod (2008)
- [I-10] PLANCAST PLUS Alliage 5083

Chapitre II

- [II-1] Charit, I., Ma, Z.Y., and Mishra, R.S., "High strain rate superplasticity in friction stir Processed aluminum alloys", 2003 NSF Design, Service and Manufacturing Grantees and Research Conference Proceedings, Edited by R.G.Reddy, the University of Alabama, Pages 2200-2207.
- [II-2] Sandra Zimmer Friction Stir Welding, Le soudage par Friction Malaxage Bénédicte Da Costa Xavier Stassart Laurent Langlois
- [II-3] M. Thomas, E.D. Nicholas, et al. GB Patent Application No. 9125978.8, 1991.
- [II-4] M.BENAMOR , Mémoire de Master, Caractérisation des alliages d'aluminium 7075 T6 soudés par le procédé desoudage FSW : influence des paramètres de soudage et des traitements thermiques Université de SAAD DAHLEB, 2016.
- [II-5] Kurt, A., Gulenc, B., Uygur, I., Ates, H., 2006. The effect of rotation speed on mechanical properties of commercially pure Aluminium joined by friction stir welding.In:

Materials and Technology Conference, 15–19 October., Fundamentals and Characterisation vol. 1, Ohio, USA, pp. 565–570.

[II-6] Frédéric GEMME, Modélisation numérique des phénomènes physiques du soudage par friction malaxage et comportement en fatigue de joints soudés en aluminium 7075-T6. Université Montréal- Canada. Mars 2011.

[II-7] Roland CAZES, soudage par friction-malaxage, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique BM 7 746.

[II-8]R.S. Mishra, Z. Y. Ma, Friction stir welding and processing. Material science and Engineering R 50 (2005) 1-78

[II-9]Friction Stir welding and processing Material Science and Engineering R 50 (2005) I78 R.S.

Mishra, Z.Y. Ma

[II-10]CEWAC, Centre d'étude Wallon de l'Assemblage et du Contrôle des matériaux <http://cevac.be>

[II-11]M.AZZOUG, Mémoire de Master, soudage par friction malaxage d'un alliage 2024-T3, Université de SAAD DAHLEB,2011.

[II-12]T. Watanabe, H. Takayama and A. Yanagisawa. Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding. J. Mater. Process. Technol. 178 (2006), pp. 342-349.

Y.G. Kim,H. Fujii ,T. Tsumura, T. Komazaki, K. Nakata. Three defect types in friction stir

[II-13]welding of aluminum die casting alloy. Materials Science and Engineering A 415 (2006), pp.250-254.

[II-14]V. Balasubramanian. Relationship between base metal properties and friction stir welding process parameters. Materials Science and Engineering. Volume 480, Issues 1-2, 15 May 2008, pp. 397-403

[II-15]H. Zhang, S.B. Lin, L. Wu, J.C. Feng, Sh.L. Ma. Defects formation procedure and mathematic model for defect free friction stir welding of magnesium alloy.

[II-16]ZHANG Hua, Wu Huiqiang, Huang Jihua, WN Sanbao, and WU Lin, Effect of welding speed on the material flow patterns in friction stir welding of AZ31 magnesium alloy. RARE METALS Vol. 26, No. 2, Apr 2007, p. 158.

[II-17]A. P. Reynolds et al. Relationships between weld parameters, hardness distribution and temperature history in alloy 7050 friction stir welds, Science and Technology of Welding and Joining, (2005), VOL 10 NO 2 190

[II-18]R.Andan et al, Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties, Progress in Materials Science 53 (2008) 980–1023.

[II-19] M. MEHTA et al. Tool Geometry for Friction Stir Welding Optimum Shoulder Diameter, METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, 2716—VOLUME 42A, SEPTEMBER 2011.

[II-20] T. Azimzadegan et al. An Investigation into Microstructures and Mechanical Properties of AA7075-T6 during Friction Stir Welding at Relatively High Rotational Speeds, Journal of Materials Engineering and Performance, 1256—Volume 19(9) December 2010.

[II-21] T. Azimzadegan et al. An Investigation into Microstructures and Mechanical Properties of AA7075-T6 during Friction Stir Welding at Relatively High Rotational Speeds, Journal of Materials Engineering and Performance, 1256—Volume 19(9) December 2010

[II-22] M. Mohammadi-pour et al. Microstructure and mechanical properties of joints welded by friction-stir welding in aluminum alloy 7075-T6 plates for aerospace application, Department of Materials Engineering, University of Islamic Azad, South Tehran Branch, Tehran 1459853849, Iran, 2016.