

People's Democratic Republic of Algeria  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
Mohamed Boudiaf University of M'sila  
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة المسيلة  
كلية التكنولوجيا

---

Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

### MASTER

En Génie Mécanique

Option : Fabrication mécanique

Présenté par :

KORICHI Toufik & KORICHI Adel

### Thème

---

## CARACTERISATION D'UNE SURFACE TRAITEE MECANIQUEMENT PAR MALAXAGE DE L'ALLIAGE AA6063

---

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
Moussai Ahmed Toufik	MMA	Président
Debih Ali	MCA	Encadreur
Belhocine Abd Elghani	Doctorant	Examineur

*Année Universitaire : 2022 / 2023*

N° d'ordre : GM/...../2023

## REMERCIEMENTS

*Au terme de ce travail. Nous tenons à remercier en premier  
Allah le tout*

*Puissant miséricordieux qui nous a donné le courage et la force  
pour*

*L'élaboration et la concrétisation de ce modeste travail.*

*Nous exprimons une profonde gratitude envers notre promoteur  
Dr. Debih Ali qui de par sa clair voyance, son vaste savoir et sa  
disponibilité, nous a offert le meilleur*

*Je remercie, également, tous encadrement possible.*

*Ma femme pour son énorme soutien dans l'élaboration de ce  
travail.*

*Les enseignants de la mécanique qui ont  
Contribué à notre éducation intellectuelle.*

*Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance aux  
membres du jury*

*Pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger ce modeste  
travail.*

*Enfin à toutes personnes qui ont contribuées et participées de près  
ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Merci*



## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A Ma très chère Mère qui a toujours été à mes côtés*

*A ma femme et mes enfants*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin*

*Korichi Toufik*



## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A Ma très chère Mère qui a toujours été à mes côtés A ma*

*femme et mes enfants*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin*

*Korichi Adel*

## ملخص

إن خصائص الألمنيوم تسمح له بان يكون مادة أساسية في الصناعات المختلفة، وذلك راجع إلى خصائصه المميزة حيث يتكون من عدة أصناف مختلفة التركيبات الكيميائية، حيث قمنا في هاته الدراسة الى التطرق إلى السبائك AA6063 ذات الصنف 6000, من اجل معرفة خصائص السبائك والسبائك المعالجة بالاحتكاك (FSP) ، ومدى تحملها لإجهادات المطبقة عليها.

معالجة ضجة الاحتكاك (FSP) هي طريقة لتغيير خصائص المعدن عن طريق تشوه بلاستيكي مكثف موضعي. ينتج هذا التشوه عن طريق الإدخال القسري لأداة غير قابلة للاستهلاك في قطعة العمل وتدوير الأداة بحركة موجية عند دفعها جانبيًا. الغرفة

## Résumé

Les propriétés de l'aluminium lui permettent d'être un matériau de base dans différentes industries, en raison de ses propriétés distinctives, car il se compose de plusieurs variétés de compositions chimiques différentes, où nous avons abordé dans cette étude les alliages AA6063 de la série 6000, afin de connaître les propriétés de l'alliage de base et suite aux traitements par frottement de malaxage (FSP), et l'étendue de leur tolérance aux contraintes qui leur sont appliquées.

Le traitement par agitation par friction (FSP) est une méthode permettant la modification des propriétés d'un métal par déformation plastique intense et localisée. Cette déformation est produite en insérant un outil non consommable dans la pièce et en faisant tourner l'outil dans un mouvement d'agitation lorsqu'il est poussé latéralement à travers la pièce.

## Abstract

The properties of aluminum alloy are to be a basic material in different industries, due to its distinctive properties, since it consists of several varieties with different chemical compositions, where in this study we have solicited the alloys of the AA6063 series 6000, to investigate the properties of alloys and examine the effect of friction Stir Processed (FSP) alloys on the mechanical properties, and the extent of their tolerance to the stresses applied to them.

Friction Stir Processing (FSP) is a method of altering the properties of a metal by intense, localized plastic deformation. This deformation is produced by forcibly inserting a non-consumable tool into the work piece and rotating the tool in a waving motion as it is pushed sideways through the work piece.

## Sommaire

Remerciements

Liste des Tableaux

Liste des figures

Introduction Générale..... 1

### **Chabitre I : Généralités sur les alliages d'aluminium**

I. 1 : L'aluminium :.....	2
I. 2 : Historique :.....	2
I. 3 : Minerai :.....	3
I. 4 : Production d'alumine :.....	4
I. 5 : Production de l'aluminium :.....	4
I. 6 : Caractéristiques de l'aluminium :.....	6
I. 6. 1 : Caractéristiques physiques :.....	6
I. 6. 2 : Caractéristiques mécaniques :.....	7
: I. 7 La structure de l'Aluminium :.....	8
I. 8 : Les atouts de l'aluminium :.....	10
I. 8. 1 : La légèreté :.....	10
I. 8. 2 : La conductivité thermique :.....	10
I. 8. 3 : La conductivité électrique :.....	10
I. 9 : Le durcissement des alliages d'aluminium :.....	10
I. 9. 1 : Écrouissage :.....	10
I. 9. 2 : Précipitation :.....	10
I. 10 : Les éléments d'alliage dans les alliages d'aluminium :.....	11
I. 11 : Par ailleurs on distingue :.....	13
I. 12 : Les normes définissant les alliages d'aluminium :.....	13
I. 12. 1 : La désignation normalisée des alliages d'aluminium :.....	13
I. 12. 2 : Le système numérique :.....	13
I. 12. 3 : Le système alphanumérique :.....	14
I. 13 : Les normes de produits :.....	15
I. 14 : Les changements d'état des alliages d'aluminium :.....	15
I. 14. 1 : Solidification :.....	15
I. 15 : Les changements d'état à l'état solide des alliages d'aluminium :.....	16
I. 15. 1 : Au refroidissement :.....	16

I. 15. 2 : Au cours d'un chauffage :	16
I. 16 : Aspects industriels sur les alliages d'aluminium :	18
I. 16. 1 : Les alliages d'aluminium durcis par écrouissage :	18
I. 16. 2 : Les alliages d'aluminium durcis par précipitation :	18
I. 17 : Les désignations codifiées des états métallurgiques des alliages d'aluminium :	22
I. 18 : Classification des alliages d'aluminium :	23
I. 18. 1 : Mise en forme par corroyage :	23
I. 18. 2 : Mise en forme par fonderie :	24
I. 19 : Les domaines d'applications de l'aluminium et ses alliages :	26

## **Chabitre II : Traitements thermiques**

II. 1 : Introduction :	28
II. 2 : Types de traitement s'applique seaux alliages d'aluminium :	29
II. 2. 1 : Traitements thermomécaniques (écrouissage et recristallisation)"Strain-hardenable alloys" :	29
II. 3 : Les traitements thermiques sur les alliages d'aluminium :	31
II. 3. 1 : Les traitements d'homogénéisation :	31
II. 3. 2 : Les traitements d'adoucissement :	32
II. 3. 3 : Le durcissement structural :	32
II. 4 : Le principe du durcissement structural :	33
II. 4. 1 : La mise en solution :	34
II. 4. 2 : La trempe :	34
II. 4. 3 : Le revenu (vieillissement) :	34
II. 5 : Ledurcissementd'Aluminium-Magnésium-Siliciumsérie6000 :	35

## **Chabitre III : Traitement par agitation par friction**

III. 1 : Introduction .....	39
III. 2 : Principe du processus :	39
III. 3 : Transformation de la microstructure pendant le traitement par agitation par friction (FSP).....	40
III. 4 : Parameters de processes:	41
III. 4. 1 : Vitesse de rotation et vitesse d'avance :	41
III. 4. 2 : Géométrie de l'outil.....	42
III. 5 : Angle d'inclinaison de l'outil :	44
III. 5. 1 : Efforts appliqués :	45
III. 6 : Avantages de la technique FSP .....	45

## Chabitre IV : Méthode expérimentale

IV. 1 : Introduction :	46
IV. 2 : Matériau et équipements utilisés	46
IV. 2. 1 : Matériaux	46
IV. 2. 2 : Machine utilisée :	47
IV. 2. 3 : L'outil de malaxage par friction :	48
IV. 3 : Montages utilisés pour le traitement	49
IV. 4 : Paramètres de FSP	49
IV. 5 : Les étapes d'élaboration du procédé FSP :	50
IV. 5. 1 : La pénétration de l'outil :	50
IV. 5. 2 : Le déplacement de l'outil :	50
IV. 5. 3 : Le dégagement de l'outil :	50
IV. 6 : Les surfaces traitées selon chaque configuration	51
IV. 7 : Préparation des échantillons :	52
IV. 8 : Caractérisation mécanique :	53
IV. 8. 1 : Essai de traction :	53
IV. 8. 2 : Essai de micro dureté :	53
IV. 8. 3 : Essais d'impact	54
IV. 9 : La caractérisation optique :	55
IV. 9. 1 : La Microscopie Optique :	55
IV. 10 : Résultats et discussion	56
IV. 10. 1 : Essai de traction	56
IV. 10. 2 : Essais d'impact :	58
IV. 10. 3 : Test de dureté :	59
IV. 10. 4 : Microstructure :	60
Conclusions générales :	62
Références	

## Liste des Tableaux

<b>Tableau I. 1 :</b> Les surfaces traitées selon chaque configuration .....	3
<b>Tableau I.2 :</b> Indication alpha numérique de l’alliage de corroyage .....	14
<b>Tableau I.3 :</b> Certaines données importantes pour la solidification.....	16
<b>Tableau I.5:</b> Phases durcissant, en fonction de la série.....	17
<b>Tableau I.7 :</b> Les séries d’alliage de fonderie selon l’Aluminium Association.....	25
<b>Tableau II.1:</b> Les conditions pratiques de la trempe structurale pour les alliages d’aluminium. .....	35
<b>Tableau IV.1:</b> Chemical composition of the AA 6063. ....	47
<b>Tableau IV.2 :</b> Propriétés mécanique de AA 6063. ....	47
<b>Tableau IV.3 :</b> Paramètres de FSP (vitesse de rotation – vitesse d’avance).....	49
<b>Tableau IV.4 :</b> Les surfaces traitées selon chaque configuration .....	52

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Les stades d'élaboration de l'aluminium.....	5
<b>Figure I.2</b> : La dépendance de la conductibilité électrique en fonction de la température de recuit.....	7
<b>Figure I.3</b> : L'influence du fer et du silicium sur les propriétés mécaniques de l'aluminium ..	8
<b>Figure I.4</b> : Structure cristallin de l'aluminium, (a) maille cubique à face centré (b) projection de la maille. ....	9
<b>Figure I.5</b> : Partie riche en Al du diagramme d'équilibre Al-Zn. ....	11
<b>Figure I.6</b> : Partie du diagramme d'équilibre Al-Cu. ....	12
<b>Figure I.7</b> : Partie riche en aluminium du diagramme d'équilibre Al-Cu. ....	19
<b>Figure I.8</b> : Répartition de la consommation d'aluminium. ....	27
<b>Figure II.1</b> : le cycle thermique.....	28
<b>Figure II.2</b> : Le changement de la taille de grain en fonction de l'écroutissage. ....	29
<b>Figure II.3</b> : Ecroutissage et propriétés mécaniques des alliages 1000 et 3000. ....	30
<b>Figure II.4</b> : Diagramme de recristallisation. ....	31
<b>Figure II.5</b> : Le principe du durcissement structural. ....	33
<b>Figure II.6</b> : La mise en solution. ....	34
<b>Figure II.7</b> : Partie du diagramme d'équilibre Al-Mg <sub>2</sub> Si, coupe pseudo binaire. ....	36
<b>Figure II.8</b> : Effet du temps et de la température sur les caractéristiques mécaniques d'un alliage 6063, 1: résistance mécanique, 2: résistance élastique, 3: la dureté, 4: la ductilité, 5: nombre de cycles rupture .....	38
<b>Figure III.1</b> : Schéma de principe du traitement par agitation par friction (FSP).....	40
<b>Figure III.2</b> : Schematic diagram of FSP and different regions. ....	41
<b>Figure III.3</b> : Dessin schématique de l'outil FSW/FSP.....	42
<b>Figure III.4</b> : Différents profils de broches d'outils FSW/FSP : (a) cylindrique, (b) cylindrique conique (c'est-à-dire le tronc d'un cône), (c) carré, (d) hexagone, (e) cylindrique fileté, (f) came fileté, et (g) triple cannelure fileté.....	43
<b>Figure III.5</b> : Modèles d'épaulement de l'outil FSW : (a) en volute et (b) concentrique. ....	44
<b>Figure IV.1</b> : tôle d'alliage d'aluminium AA 6063. ....	52
<b>Figure IV.2</b> : Fraiseuse automatique vertical.....	48
<b>Figure IV.3</b> : l'outil FSP. ....	48
<b>Figure IV.4</b> : le montage expérimental. ....	49
<b>Figure IV.5</b> : les étapes d'élaboration. A) pénétration de l'outil. B) déplacement de l'outil selon la transversal de la tôle. C) dégagement de l'outil.....	50
<b>Figure IV.6</b> : Les caractéristiques géométriques .....	52
<b>Figure IV.7</b> : GUNT WP 310.....	53

<b>Figure IV.8:</b> WILSON HARDNESS type TUKON .....	54
<b>Figure IV.9 :</b> Charpy impact teste machine. ....	54
<b>Figure IV.10 :</b> schéma du principe d'un microscope optique Nikon Eclipse. ....	55
<b>FigureIV.11 :</b> l'équipement utilisé pour examiner la micrographie des échantillons. ....	56
<b>Figure IV.12 :</b> Échantillons AA6063 testés en traction .....	57
<b>Figure IV.13 :</b> Courbes de force par rapport à la déformation pour l'aluminium AA 6063 ...	57
<b>Figure IV.14 :</b> Spécimen d'essai de choc. ....	58
<b>Figure IV.15 :</b> Courbe de Variation de dureté de la zone d'agitation. ....	59
<b>Figure IV.16 :</b> Microstructure pour la zone Nugget (Stir Zone).....	61

# **INTRODUCTION GENERALE**

### Introduction Générale

La métallurgie de l'aluminium et de ses alliages offre une gamme de possibilités de recours à des pratiques de traitement thermique pour obtenir des combinaisons souhaitables de propriétés mécaniques et physiques.

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 6XXX (un alliage d'aluminium avec un alliage majeur de magnésium et de silicium) peut être traité thermiquement, a une bonne résistance à la corrosion, une bonne extrudabilité et, par conséquent, il a été largement utilisé dans les meubles, l'automobile, les composants structurels et bien d'autres. Dans certaines applications, l'amélioration des propriétés du matériau est nécessaire et cela peut être fait en affinant la granulométrie du matériau.

La technologie de traitement par agitation par friction (FSP) a reçu une attention raisonnable au cours des deux dernières décennies pour traiter une large gamme de matériaux tels que l'aluminium, le magnésium, le titane, l'acier et les superalliages. En raison de sa nature de traitement thermomécanique, le FSP est utilisé pour modifier la structure du grain et améliorer le comportement mécanique et à la corrosion dans une large gamme d'aciers. Le raffinement des grains et des transformations de phase obtenue dans l'acier après FSP affecte la dureté, les propriétés de traction, la ténacité à la rupture, le taux de propagation des fissures de fatigue, la résistance à l'usure et la résistance à la corrosion. Un certain nombre d'articles de synthèse sont disponibles sur le soudage par friction-malaxage (FSW) ou FSP d'alliages non ferreux

De ce fait notre travail est subdivisé en deux parties :

La première partie est bibliographique comprenant deux chapitres : Le premier chapitre traite l'Aluminium et ses alliages. On focalise à l'étude de l'alliage d'aluminium 6063 de la série 6000, ses domaines d'application. Le deuxième chapitre traite les traitements thermiques des alliages aluminium

La deuxième partie comprend le troisième chapitre, traite la présentation des Procédé de FSP et donnons une description du procédé de traitement par friction malaxage, ses paramètres, ses avantages et quatrième chapitre, c'est la méthode expérimentale.

# Chapitre I

---

**L'aluminium et ses alliages**

## Chapitre I : Généralités sur les alliages d'aluminium

### I. 1 : L'aluminium :

L'aluminium est l'élément métallique le plus abondant et le troisième constituant de l'écorce terrestre (après l'oxygène et le silicium). Parmi les matériaux structuraux, il a été l'un des derniers à avoir été mis en œuvre. A l'état naturel, l'aluminium n'est jamais retrouvé sous forme de métal pur mais en combinaison avec l'oxygène et autres éléments, c'est un élément très réactif.

L'aluminium est un élément du III<sup>e</sup> et groupe de la classification de Mendeleïev. Son nombre atomique est 13 et sa masse atomique 26,98 g.mol<sup>-1</sup>. A l'état solide, l'aluminium recristallise dans réseau cubique à faces centrées (CFC) à paramètre de maille 4,049596 Å atout température (de 4 à 933 K). Il ne présente donc pas de variété allotropique comme la plupart des métaux usuels. Sa caractéristique la plus importante est sa faible densité (2,7g.cm<sup>3</sup>) comparée à celle des éléments structuraux comme le fer (7,86 g.mol<sup>-1</sup>) et le cuivre (8,9g/cm<sup>3</sup>). L'aluminium représente environ 7, 5% en masse dans l'écorce terrestre la température de fusion de l'aluminium est relativement basse comparée à celles des éléments structuraux, elle vaut 660°C. Tandis que le point d'ébullition est d'environ 2477°C. Actuellement, l'aluminium et ses alliages sont de plus en plus utilisés dans les différents domaines de l'industrie pour leurs propriétés que sont :

- Faible densité et appréciable résistance qui facilite son utilisation dans la construction mécanique.
- Bonne résistance à la corrosion dans différents milieux, notamment l'atmosphère, formation d'une couche protectrice d'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), très compacte, adhérente et résistante même dans les milieux marins et industriels.
- Conductivité thermique et électrique élevées qui le rend très applicable dans les secteurs des produits électriques et thermomécaniques.
- Facilité de mise en forme grâce à son aptitude à la déformation et au soudage.
- Haute réflectivité qui rend l'aluminium un matériau décoratif idéal.
- Compatibilité alimentaire qui le rend utilisable pour les articles de cuisine et déstockage de certains produits.

### I. 2 : Historique :

L'aluminium a connu un développement spectaculaire depuis sa naissance en 1854 symbolisée par la présentation à l'Académie des Sciences, par le chimiste français Sainte-Claire Deville, d'un petit lingot réalisé par voie chimique. Mais le véritable début du développement industriel de l'aluminium et ses alliages se produit en 1886 avec l'invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium par Paul Héroult en France et Charles Martin Hall aux États-Unis. L'aluminium est aujourd'hui le premier métal non ferreux ; en tonnage, il a supplanté l'étain

dans les années 1920, le plomb dans les années 1940, le zinc puis le cuivre dans les années 1950 (tableau I.1). [1]

**Tableau I. 1 :** Les surfaces traitées selon chaque configuration

Année	KTonne
1900	5.4
1910	44
1930	270
1940	780
1950	1500
1960	4500
1970	10000
1980	16700
1990	19400
2000	22000
2005	23500

La production mondiale annuelle de métal « primaire » franchira les 25 millions de tonnes au cours de la première décennie du *XXI<sup>e</sup>* siècle.

La consommation mondiale annuelle d'aluminium franchira les 40 millions de tonnes dont 15 millions de métal recyclé.

Un tel développement repose bien évidemment sur les propriétés particulières de l'aluminium léger, tenace, résistant à la corrosion, conducteur de la chaleur et de l'électricité, décoratif ;

Les alliages d'aluminium se prêtent également à tous les processus de transformation laminage, filage, matriçage, moulage...

Ceci explique qu'ils soient aujourd'hui utilisés dans la plupart des grands marchés industriels transports terrestres, maritimes ou aérospatiaux, emballage, bâtiment, électricité, mécanique...

### **I. 3 : Minerai :**

L'aluminium est, après l'oxygène et le silicium, le troisième élément de l'écorce terrestre : il constitue 8 % de la lithosphère sous forme de silicates plus ou moins complexes à faible teneur en aluminium. Mais dans certaines régions, sous l'action prolongée de l'eau, l'élimination d'une partie importante de la silice a donné des roches riches en alumine (45 à 60 %), ce sont les bauxites qui constituent actuellement la source quasi exclusive d'aluminium. [1]

**I. 4 : Production d'alumine :**

Le procédé utilisé pour obtenir l'alumine à partir de la bauxite est le procédé Bayer. Après broyage, la bauxite est attaquée à chaud, sous pression, par de la soude, ce qui permet d'obtenir une liqueur d'aluminate de soude avec insolubles en suspension. Cette liqueur est ensuite décantée : les oxydes de fer et de silicium forment une boue rouge, chimiquement inerte, qui est évacuée vers un site de déversement approprié, la liqueur restante est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine, qui est ensuite récupérée par filtration et calcinée.

**I. 5 : Production de l'aluminium :**

L'aluminium est produit actuellement dans le monde entier par le procédé mis au point par Héroult et Hall en 1886, qui consiste en l'électrolyse de l'alumine dissoute dans la cryolithe fondue à environ 1 000 °C, dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone-cathode. L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve, et l'oxygène de l'alumine réagit avec le carbone de l'anode pour former de l'oxyde de carbone et du gaz carbonique. [1]

I

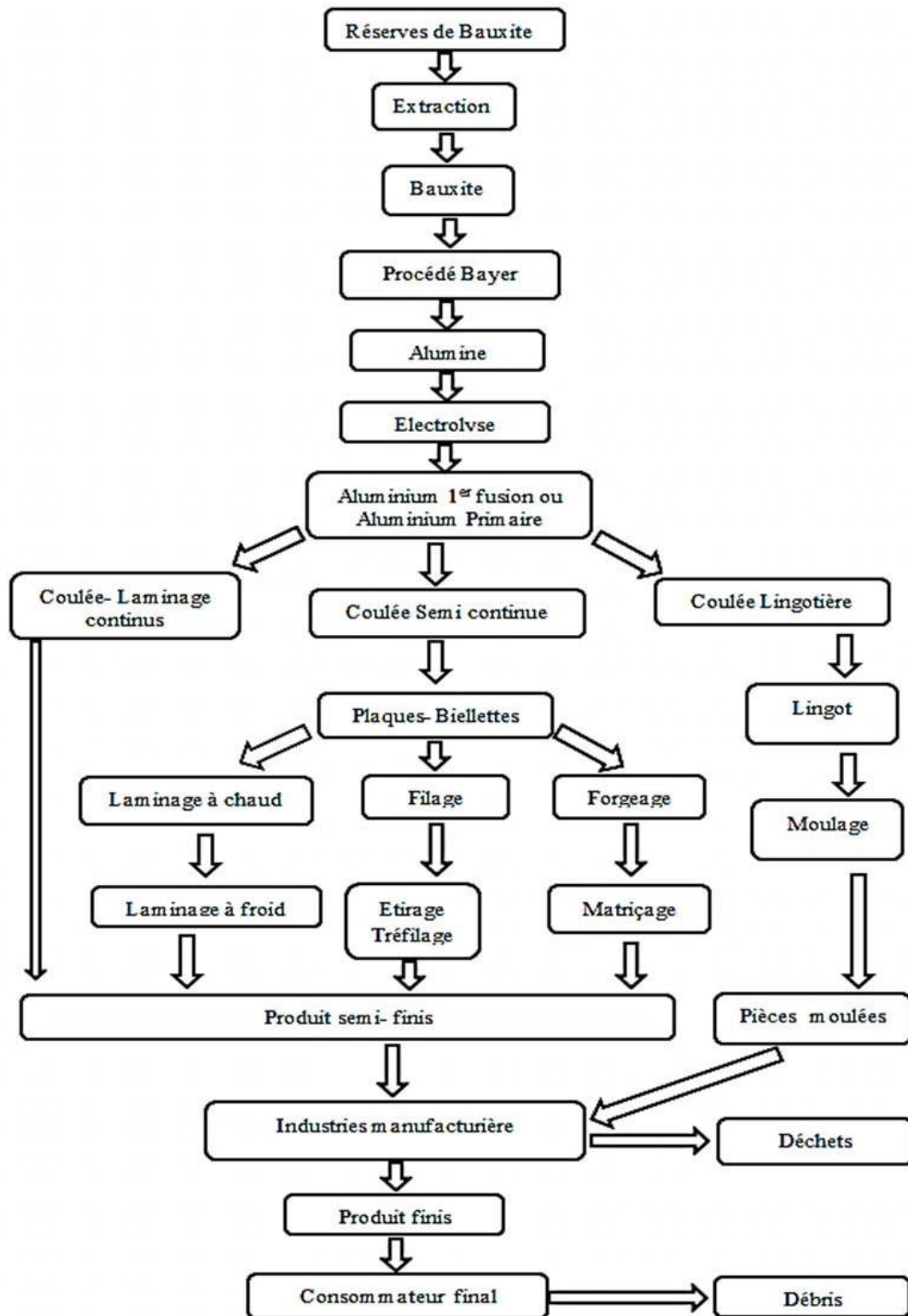


Figure I.1 : Les stades d'élaboration de l'aluminium. [2]

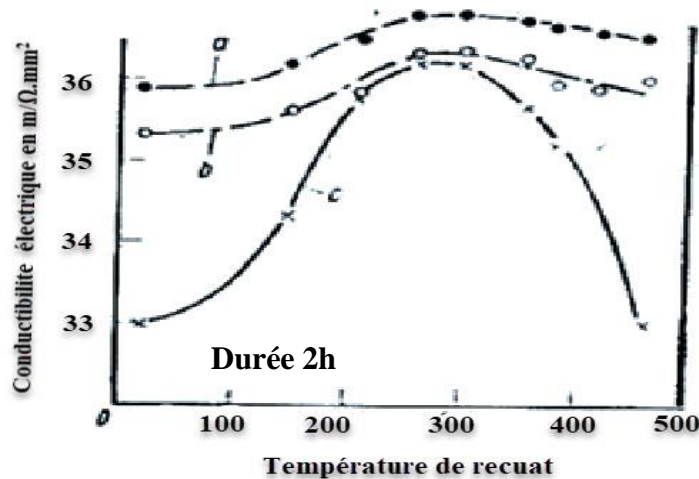
## I. 6 : Caractéristiques de l'aluminium :

### I. 6. 1 : Caractéristiques physiques :

- + Température de fusion : 660°C.
- + Point d'ébullition : 2060°C.
- + Chaleur spécifique :
  - A 20°C : 0,214 cal/g°C.
  - A 100°C : 0,223 cal/g°C.
  - A 500°C : 0,266 cal/g°C.
- + Conductibilité thermique : (c'est un excellent conducteur de chaleur)
  - A 0°C : 0,50 cal/cm. s°C.
  - A 100°C : 0,51 cal/cm. s°C.
  - A 200°C : 0,52 cal/cm. s°C.
- + Résistivité à l'état pur  $2,63 \cdot 10^{-8}$  m.
- + Allongement linéaire : 20 à 100°C :  $24 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  et jusqu'à 600°C :  $28,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ .
- + Densité (à 20°C) : 2,7 g/cm<sup>3</sup>.
- + Conductibilité électrique : (65% de celle du cuivre pour l'aluminium pur à 99,5 %).

La Conductibilité électrique de l'aluminium diminue lorsque les impuretés augmentent, l'aluminium grâce à sa résistivité est surtout utilisé pour la fabrication de chaudière et d'ustensiles de cuisine. Lorsqu'il est poli, c'est un métal blanc et brillant et possède un grand pouvoir de réflexion, on l'utilise comme réflecteur pour chauffage et éclairage ou surface réfléchissante des miroirs de télescopes. La capacité de réflexion peut atteindre jusqu'à 90 %. Un conducteur d'aluminium, comparé avec un autre en cuivre, peut avoir la même résistance, la moitié de son poids, mais 1,3 fois plus grand. Donc l'utilisation de l'aluminium dans l'électrotechnique est très limitée à cause du diamètre des conducteurs. Les figures ci-dessous, montrent : [3]

- + Courbe a : 0,13 % Si et 0,30 % Fe.
- + Courbe b : 0,12 % Si et 0,50 % Fe.
- + Courbe c : 0,64 % Si et 0,10 % Fe.



**Figure I.2 :** La dépendance de la conductibilité électrique en fonction de la température de recuit. [3]

### I. 6. 2 : Caractéristiques mécaniques :

A cause de sa structure du type CFC, l'aluminium pur est très bien déformable à froid et à chaud, il est donc très ductile. Cette plasticité élevée à l'état recuit rend très aisé le corroyage, par contre, son usinage étant mal aisé. L'aluminium se prête bien à toutes les modalités de soudage sous gaz inerte tels que l'argon ou l'hélium (gaz de protection), sinon l'aluminium s'oxyde facilement et forme une pellicule de  $Al_2O_3$ . Sa faible dureté et sa faible limite élastique sont défavorables pour son emploi en mécanique. Les propriétés mécaniques de l'aluminium dépendent : [3]

- ✚ Des traitements mécaniques (forgeage, laminage, etc.).
- ✚ Des traitements thermiques (trempe, recuit, etc.).
- ✚ Des éléments d'addition (Fe, Cu, Mn, Zn, Mg, Si).

#### A titre d'exemple :

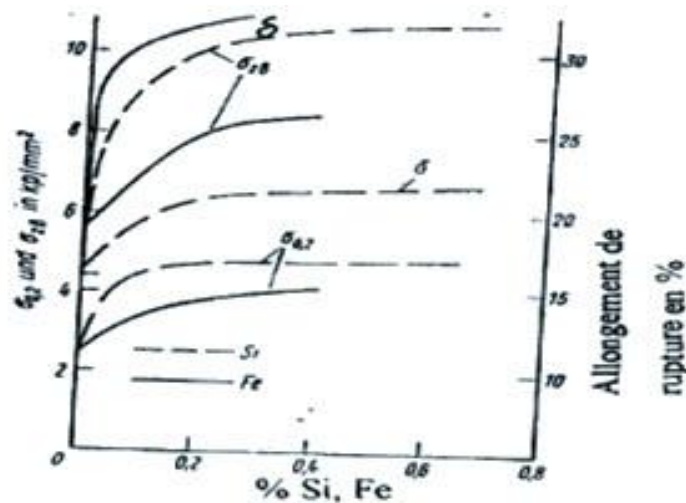
Les propriétés mécaniques de l'aluminium (99,6 %) coulé sont :

- ✚ R (résistances à la traction) = 70 à 100 N/mm<sup>2</sup>.
- ✚ R<sub>0,002</sub> (limite élastique) = 30 à 40 N/mm<sup>2</sup>.
- ✚ A (allongement) = 15 à 25 %.
- ✚ HB (dureté brinell) = 15 à 25 HB.
- ✚ E (module d'élasticité) = 67500 N/mm<sup>2</sup>

Les propriétés mécaniques de l'aluminium (haute pureté) recuit :

- ✚ R = 50 N/mm<sup>2</sup>.
- ✚ R<sub>0,002</sub> = 15 N/mm<sup>2</sup>.
- ✚ A = 50 %.
- ✚ E = 71000 N/mm<sup>2</sup>.

Une déformation plastique à froid de l'aluminium industriel augmente sa charge de rupture jusqu'à 150 N/mm<sup>2</sup> mais l'allongement baisse jusqu'à 6 %. L'influence du fer et du silicium sur les propriétés mécaniques de l'aluminium à l'état de recristallisation (après un traitement thermique de 5 heures à 420°C) est montrée sur la figure I.3. [3]



**Figure I.3 :** L'influence du fer et du silicium sur les propriétés mécaniques de l'aluminium

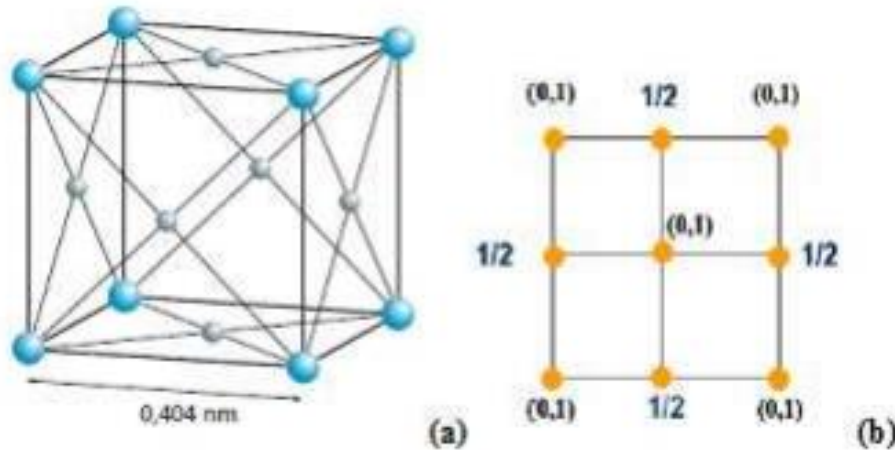
Le silicium augmente la limite d'élasticité et la résistance de l'aluminium plus que le fer. Tandis que le fer améliore l'allongement, cela est expliqué par la précipitation des particules fines et hétérogènes de  $Al_3Fe$  dans l'alliage binaire Al-Fe, qui seront transformés en grain fins lors du recuit de recristallisation. Les grains fins donnent essentiellement une plasticité meilleure que celle des gros grains. Le fer stabilise la grosseur des gros grains de recristallisation et améliore les propriétés mécaniques et surtout la valeur de l'allongement et celle de rupture. Le cuivre aussi améliore la résistance, tandis que le zinc et le magnésium, avec de petites concentrations, ne montrent aucun effet. [3]

A cause de la faible résistance à l'état recuit d'adoucissement, les produits en aluminium pur et très pur subissent un durcissement à froid répété.

- ✚ Al 99,99 % :  $\sigma_{0,2} = 15$  à  $25$  N/mm<sup>2</sup> et  $\sigma_{ZB} = 40$  à  $60$  N/mm<sup>2</sup>.
- ✚ Al 99,5 % :  $\sigma_{0,2} = 35$  à  $45$  N/mm<sup>2</sup> et  $\sigma_{ZB} = 70$  à  $90$  N/mm<sup>2</sup>.

## I. 7 : La structure de l'Aluminium :

Structure de l'aluminium émane de celle du Cubique à Faces Centrées (compact). Le CFC correspond donc à la maille présentée en figure I.4. (a) qui montre la structure perspective, De plus, pour simplifier la schématisation, cette maille peut être réalisée en projection afin de faciliter la lecture, et donc se « dessine » sous la forme d'un cube, représenté en figure. (b).



**Figure I.4 :** Structure cristalline de l'aluminium, (a) maille cubique à face centrée (b) projection de la maille. [4]

En effet, les sphères sont en contact selon les diagonales de face. Cependant, toutes les sphères ne sont pas entières dans la maille, elles sont toutes partagées entre plusieurs mailles. Les 8 particules aux sommets du cube sont partagées en 8 mailles et donc divisées par 8 et les 6 particules aux centres des faces appartiennent à 2 mailles, et sont donc divisées par 2. Ainsi, soit « n » le nombre de motif :

$$n = 8 * \frac{1}{8} + 6 * \frac{1}{2} = 4 \quad (1)$$

Sphères entières par maille. Pour une structure CFC, le lien entre le paramètre de maille et le rayon est :  $a\sqrt{2} = 4r$

La compacité : notée « C », correspond au taux d'occupation réel de l'espace dans la maille. Elle s'obtient en réalisant le rapport du volume occupé par les sphères et du volume total de la maille. L'aluminium étant un cristal métallique, il obtient ainsi une grande compacité. En utilisant le modèle des sphères dures pour représenter les particules, on obtient le calcul suivant :

$$c = n * \frac{V_{\text{sphères}}}{V_{\text{total}}} = 4 * \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{a^3} = 4 * \frac{\frac{4}{3}\pi \left(\frac{a\sqrt{2}}{4}\right)^3}{a^3} = \frac{\pi\sqrt{2}}{6} = 0.74 \quad (2)$$

L'aluminium a une électronégativité de 1.61 et ne possède pas d'électrons localisés, en effet les électrons sont libres de leurs mouvements. La mobilité de ces électrons est à l'origine des propriétés conductrices de ce matériau. C'est pour cela que ce métal possède des liaisons (interaction stabilisante entre deux particules) fortes appelés « liaisons métalliques ». La particularité de cette liaison est qu'elle est l'interaction de groupe entre les cations et un nuage d'électron libre. Ainsi cette liaison est non dirigée (les électrons ne se déplacent pas suivant un axe). De plus, la liaison métallique est caractérisée par une énergie de cohésion en moyenne plus faible que la liaison covalente ou ionique

Les défauts microscopiques : il y a des défauts de fabrication ou de manipulation comme des rayures ou une macro-rugosité (ex : traces délaminage), et encore les défauts liés à la

microstructure tels que les joints de grains intermétalliques. La surface occupée par de tels défauts est faible (0,2%), mais ses grains réduisent la résistance à la corrosion et la durée de vie des alliages. [4]

## **I. 8 : Les atouts de l'aluminium :**

Le développement des applications de l'aluminium et ses alliages, la croissance régulière et soutenue de la consommation s'expliquent par plusieurs propriétés qui sont autant d'atouts décisifs dans le choix des utilisateurs.

### **I. 8. 1 : La légèreté :**

L'aluminium est le plus léger de tous les métaux usuels. C'est le premier des atouts de l'aluminium au quel on pense spontanément, plusieurs domaines d'application tirent profit de légèreté.

### **I. 8. 2 : La conductivité thermique :**

L'aluminium non allié à une excellente conductivité thermique, de l'ordre de 60% de celle de cuivre, le plus performant des métaux usuels

### **I. 8. 3 : La conductivité électrique :**

Est de l'ordre deux tiers de celle de cuivre. L'aluminium ou alliage d'aluminium, sous forme de barres, de tubes, est très utilisé dans les postes de coxions des réseaux aériens haute et moyen tension, dans les câbles téléphoniques, pour la protection contre les champs électrique ou magnétiques.

## **I. 9 : Le durcissement des alliages d'aluminium :**

Le durcissement peut être obtenu par l'un des deux modes suivants : [5]

### **I. 9. 1 : Écrouissage :**

(Possible compte tenu de la grande plasticité initiale de l'aluminium due à sa structure CFC), on peut alors parvenir aux résultats suivants :

Limite d'élasticité  $R_{p0,2}$  ; 120 à 150 N/mm<sup>2</sup>.

Résistance à la traction : 130 à 185 N/mm<sup>2</sup>.

Allongement à rupture : 2 à 8 %.

### **I. 9. 2 : Précipitation :**

Les propriétés chimiques de l'aluminium ne font que la phase durcissant peut-être Une solution solide de l'aluminium dans l'élément d'alliage ; la figure 8.1 en donne un exemple avec un alliage Al-Zn dans lequel peut précipiter une solution solide de Al dans Zn (à 275 °C cette phase contient 0,6 % d'aluminium et environ 0,1 % à 100 °C). Ici la nécessaire mise en

solution des précipités peut se faire dans un vaste domaine de température (au-dessus de ODM mais au-dessous du solidus BN). La solubilité non nulle de Zn dans Al à basse température permet un durcissement complémentaire par effet de solution solide. Un composé intermétallique formé à partir de l'élément d'alliage ; la figure 8.2 en donne un exemple avec un alliage Al-Cu dans lequel peut précipiter  $Al_2Cu$ . Les possibilités de remise en solution des précipités sont limitées par l'eutectique qui fond à  $548\text{ }^\circ\text{C}$  ; il n'est donc pas nécessaire d'ajouter plus de 5,65 % de Cu. Il est même préférable, pour tenir compte des états industriels hors équilibre de ne pas atteindre cette limite.

Cependant il est possible de la dépasser en admettant de conserver des précipités non dissous et en évitant de porter l'alliage à une température qui provoquerait un début de fusion, pour tenir compte des états industriels hors équilibre de ne pas atteindre cette limite. Cependant il est possible de la dépasser en admettant de conserver des précipités non dissous et en évitant de porter l'alliage à une température qui provoquerait un début de fusion. [5]. Figure I.5.

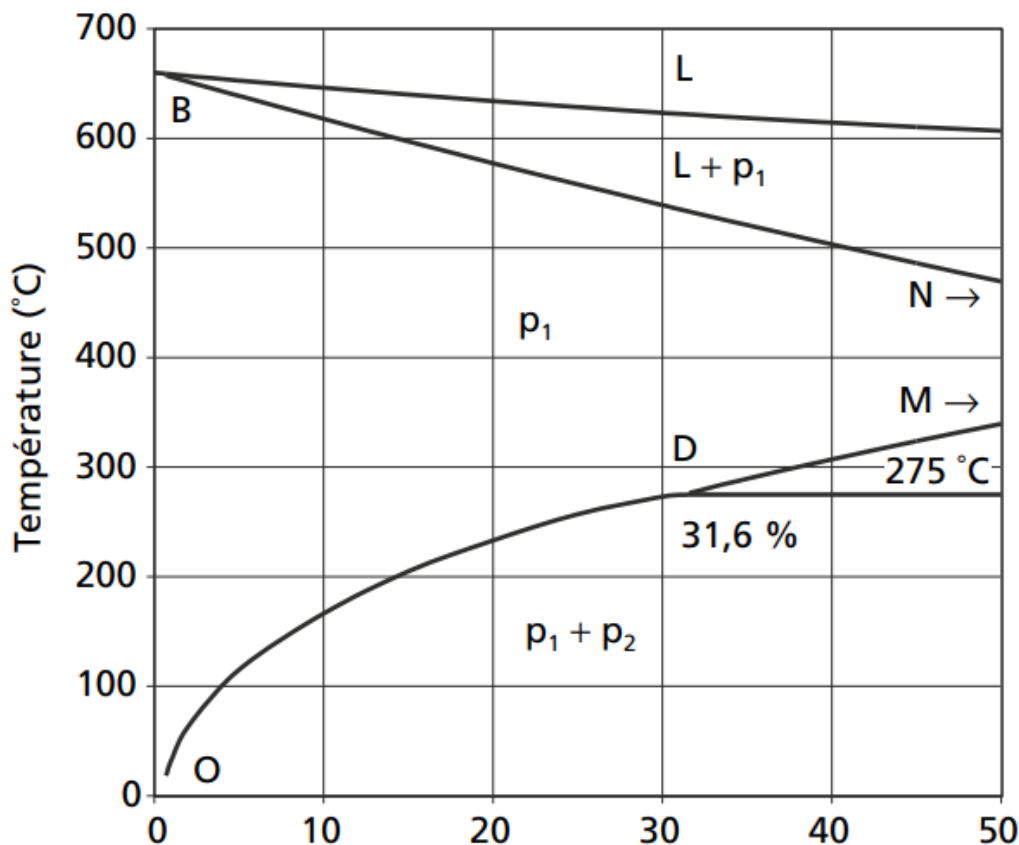
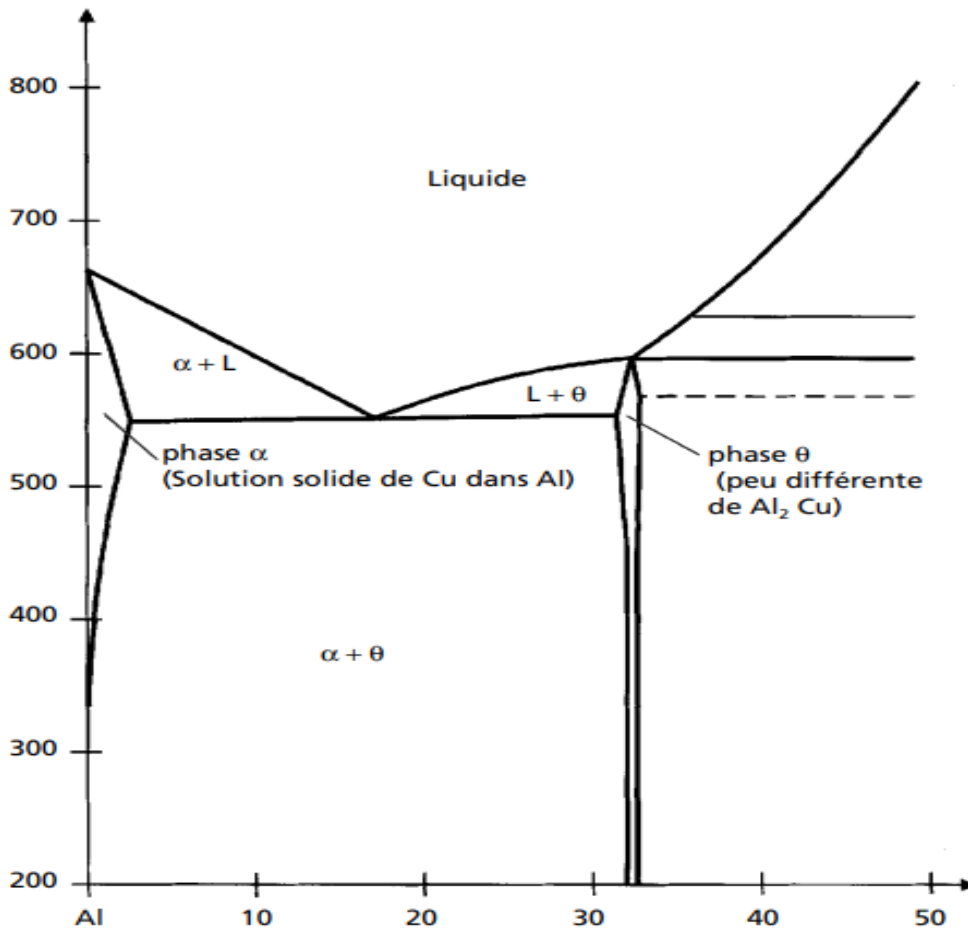


Figure I.5 : Partie riche en Al du diagramme d'équilibre Al-Zn. [5]

## I. 10 : Les éléments d'alliage dans les alliages d'aluminium :

Les principaux éléments d'alliage introduits dans l'aluminium sont le cuivre, le manganèse, le magnésium, le silicium, le zinc et le lithium. Ces éléments peuvent être ajoutés seuls ou associés pourront engendrer. [5], Figure I.6.



**Figure I.6** : Partie du diagramme d'équilibre Al-Cu. [5]

Un durcissement complémentaire par effet de solution solide s'ils ne sont pas totalement intégrés aux précipités. Certains autres éléments sont ajoutés ou, au contraire exclus plus ou moins, pour améliorer une propriété particulière. Ainsi la ténacité des alliages magnésium et silicium est fortement améliorée par des additions de manganèse et de chrome en teneurs limitées (souvent  $Cr < 0,4 \%$  et  $Mn < 1 \%$ ) et par une limitation sévère des teneurs en éléments nocifs tel le fer.

La présence des éléments d'alliage provoque une légère augmentation du module d'élasticité. Ainsi les impuretés de l'aluminium commercial suffisent à le porter de 66 600 N/mm<sup>2</sup> à 69 000 N/mm<sup>2</sup> alors que, par exemple, 5 % de Si le font croître de 3 000 N/mm<sup>2</sup>. Le coefficient de Poisson reste de l'ordre de 0,34. avec Les différentes classes d'alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium corroyés sont classés suivants le (ou les) élément(s) d'alliage principal. On distingue ainsi :

- Les alliages aluminium + cuivre.
- Les alliages aluminium + manganèse.
- Les alliages aluminium + silicium.

- Les alliages aluminium + magnésium.
- Les alliages aluminium + magnésium + silicium.
- Les alliages aluminium + zinc.
- Les alliages aluminium + autres éléments.

### **I. 11 : Par ailleurs on distingue :**

Les alliages dits non-trempant (ne durcissant pas par traitement thermique) qui sont les alliages aluminium + manganèse et les alliages aluminium + magnésium (souvent dénommés alliages durcis par écrouissage).

Les alliages dits à durcissement structural (durcissant par traitement thermique) qui sont les alliages aluminium + cuivre, les alliages aluminium + magnésium + silicium et les alliages aluminium + zinc.

### **I. 12 : Les normes définissant les alliages d'aluminium :**

#### **I. 12. 1 : La désignation normalisée des alliages d'aluminium :**

La norme NF EN 573 définit deux systèmes européens de désignation des alliages d'aluminium qui, tous deux, font référence à la composition chimique. [5]

- Un système numérique
- Un système alphanumérique

#### **I. 12. 2 : Le système numérique :**

Ce système met en jeu un code à 4 chiffres et fait indirectement référence à la composition chimique. Selon ce système 8 familles sont référencées à partir du chiffre des dizaines de milliers et la désignation d'un alliage comporte successivement : [5]

**4 lettres : EN AW**

**EN** : fait référence à la normalisation européenne.

**A** : indique qu'il s'agit d'aluminium.

**W** : précise qu'il s'agit de métal corroyé.

**4 chiffres :**

-Le premier indique le groupe d'alliages (tableau)

**Tableau I.2 :** Indication alpha numérique de l'alliage de corroyage

1 <sup>er</sup> Chiffre	Élément(s) d'alliage	1 <sup>er</sup> Chiffre	Élément(s) d'alliage
1 <sup>***</sup>	Sans ( $Al \geq 99,00 \%$ )	5 <sup>***</sup>	Magnésium
2 <sup>***</sup>	Cuivre	6 <sup>***</sup>	Magnésium + silicium
3 <sup>***</sup>	Manganèse	7 <sup>***</sup>	Zinc
4 <sup>***</sup>	Silicium	8 <sup>***</sup>	Autres éléments

- le second chiffre peut être :

- 0 s'il s'agit du métal original,
- 1 à 9 si l'alliage présente des particularités (pureté d'un aluminium non allié, variante d'un alliage...)

- le troisième et le quatrième chiffre ont une signification différente selon qu'il s'agit :

- D'un aluminium non allié : ce sont alors les deux premières décimales du nombre exprimant la teneur minimale en Al,
- D'un alliage : ces deux nombres, choisis par le normalisateur, servent seulement à différencier les nuances d'un même groupe

### Exemples :

- EN AW-1098 = aluminium à, au moins, 99,98 %.
- EN AW-4015 = alliage à 1,8 % Si et 0,9 % Mn.
- EN AW-4045 = alliage à 10 % Si.
- EN AW-4343 = alliage à 7,5 % Si.

### I. 12. 3 : Le système alphanumérique :

Dans ce système on distingue l'aluminium non allié et les alliages d'aluminium :

#### I. 12. 3. 1 : Aluminium non allié :

La désignation débute par le symbole chimique de l'aluminium Al suivi de la teneur minimale en % du métal exprimée avec une ou deux décimales.

**Exemple :** EN AW- Al 99,98 = aluminium à, au moins, 99,98 %.

Normalement cette désignation doit être précédée de la désignation numérique et être alors placée entre crochets, soit ici EN AW-1098 [Al 99,98].

### I. 12. 3. 2 : Alliages d'aluminium :

La désignation débute par le symbole chimique de l'aluminium Al suivi du ou des symbole(s) chimique(s) du ou des principaux éléments d'alliage suivis chacun par un nombre représentant la teneur moyenne (%) arrondie de l'élément indiqué.

#### Exemples :

- Al Si<sub>2</sub>Mn = alliage à 1,8 % Si et 0,9 % Mn
- Al Si<sub>10</sub> = alliage à 10 % Si.
- Al Si<sub>7,5</sub> = alliage à 7,5 % Si.

Normalement cette désignation doit être précédée de la désignation numérique et être alors placée entre crochets, soit ici, respectivement :

- EN AW-4015 [AlSi<sub>2</sub>Mn].
- EN AW-4045 [AlSi<sub>10</sub>].
- EN AW-4343 [AlSi<sub>7,5</sub>].

### I. 13 : Les normes de produits :

De nombreuses normes décrivent les produits en alliages d'aluminium.

La plus grande partie des compositions chimiques (17 nuances 1\*\*\*, 17 nuances 2\*\*\*, 13 nuances 3\*\*\*, 12 nuances 4\*\*\*, 44 nuances 5\*\*\*, 31 nuances 6\*\*\*, 27 nuances 7\*\*\* et 11 nuances 8\*\*\*) est répertoriée dans la partie 3 de la norme NF EN 573 qui, dans sa partie 4 décrit les formes de ces produits. [4]

### I. 14 : Les changements d'état des alliages d'aluminium :

#### I. 14. 1 : Solidification :

En présence des principaux éléments d'alliage (Cu, Mn, Si, Mg et Zn) la solidification s'accompagne d'une réaction eutectique après formation de cristaux de solution solide (CFC) des éléments d'alliage dans l'aluminium et enrichissement progressif du liquide restant. Ce fait a deux conséquences importantes :

-La phase riche en éléments d'alliage qui participe à la constitution de l'eutectique ne pourra pas être remise en solution à l'état solide et ne participera donc pas au durcissement optimum par re-précipitation. Celui-ci serait obtenu, dans ces conditions, en n'ajoutant que les quantités d'éléments d'alliage susceptibles d'être remises en solution à l'état solide c'est-à-dire celles qui correspondent généralement aux solubilités aux températures des réactions eutectiques. Le tableau I.3 rappelle certaines de ces données : [5]

**Tableau I.3 :** Certaines données importantes pour la solidification

Élément d'alliage	$T_e(1)$	A (2) à $T_e$	A à 20 °C	Précipité
Cuivre	548 °C	5,65 %	< 0,1 %	$Al_2Cu$
Manganèse	659 °C	1,82 %	< 0,1 %	$Al_6Cu$
Silicium	577 °C	1,65 %	< 0,02 %	Si (> 99,8 %)
Magnésium	451 °C	14,9 %	< 0,4 %	$Al_3Mg_2$
Zinc	382 °C	82,8 %	< 1 %	Sol.sol. Al (< 1 %) dans Zn

-La solidification dans les conditions industrielles telle qu'elle a été décrite au bibliographie (« Cas où, en conditions d'équilibre, intervient une réaction eutectique ») provoquant des ségrégations et un décalage de la réaction eutectique vers des températures plus basses que les températures d'équilibre, il sera nécessaire de limiter la température de mise en solution des précipités pour éviter un début de fusion dans les plages fusibles du pseudo-eutectique (début de fusion dénommé « brûlure » qui rend le métal quasiment inutilisable). Dans ces conditions il sera encore possible de diminuer un peu les teneurs en élément d'alliage pour ne conserver que la part qui peut participer au durcissement par traitement thermique. [5]

## I. 15 : Les changements d'état à l'état solide des alliages d'aluminium :

### I. 15.1 : Au refroidissement :

Au cours d'un refroidissement, les éléments d'alliage en solution solide peuvent précipiter généralement sous forme de composés intermétalliques (ou de solution solide très pauvre en Al – cas de Si et Zn). Il faut noter que cette précipitation faisant intervenir la diffusion d'éléments d'alliage en solution solide de substitution peut être gênée voire empêchées par un refroidissement rapide qui conduit alors à une structure métastable. [5]

### I. 15.2 : Au cours d'un chauffage :

#### ➤ À partir d'un état voisin de l'équilibre

**Tableau I.4 :** Certaines données importantes pour la solidification

Élément d'alliage	$T_e(1)$	A (2) à $T_e$	A (3) à 20 °C
Cuivre	548 °C	5,65 %	< 0,1 %
Manganèse	659 °C	1,82 %	< 0,1 %
Silicium	577 °C	1,65 %	< 0,02 %
Magnésium	451 °C	14,9 %	< 0,4 %
Zinc	382 °C	82,8 %	< 1 %

Selon l'évolution de la solubilité des éléments d'alliage, les précipités pourront se mettre en solution. Il faut noter ici que la phase riche en éléments d'alliage qui participe à la constitution de l'eutectique ne peut pas être remise en solution à l'état solide ; elle ne concourt donc pas au durcissement optimum par ré-précipitation. Celui-ci sera obtenu, dans ces conditions, en n'ajoutant que les quantités d'éléments d'alliage susceptibles d'être remises en solution à l'état solide c'est-à-dire celles qui correspondent généralement aux solubilités aux températures des réactions eutectiques. Encore sera-t-il nécessaire de limiter la température de mise en solution des précipités pour éviter un début de fusion dans les plages fusibles du pseudo-eutectique (début de fusion dénommé « brûlure » qui rend le métal quasiment inutilisable). **Le tableau I.4** rappelle certaines de ces données. [5]

➤ **À partir d'un état métastable**

L'état métastable de départ peut résulter ici d'un refroidissement rapide qui aurait empêché toute précipitation ; l'alliage est donc à l'état de solution solide sursaturée. À la température ambiante cette solution peut déjà évoluer, les éléments d'alliage en sursaturation diffusant vers les défauts du réseau, essentiellement vers les dislocations. En se rassemblant, ils forment autour de ces dernières des « nuages » d'atomes de soluté (on les appelle des zones de GUINIER-PRESTON) qui rendent leurs déplacements ultérieurs plus difficiles ; il apparaît ainsi un durcissement important en l'absence de toute précipitation (on parle parfois de pré-précipitation). Ce processus est plus ou moins rapide selon la température ; des différences importantes apparaissent pour de faibles variations de la température ambiante.

Néanmoins ce durcissement s'établit assez lentement ; il peut demander quelques jours avec certains alliages de la série 2\*\*\*, quelques semaines avec des alliages de la série 6\*\*\* et quelques mois avec des alliages de la série 7\*\*\*. Un réchauffage à des températures variables selon les alliages mais généralement comprises entre 100 et 200 °C (durée de l'ordre de 5 à 24 heures) provoque la précipitation de la phase durcissant voir tableau I.5.

À plus haute température les précipités coalescents. [5]

**Tableau I.5:** Phases durcissant, en fonction de la série

Élément d'alliage	Série	Précipité
Cuivre	2***	$Al_2Cu$
Manganèse	3***	$Al_6Cu$
Silicium	4***	Si (> 99,8 %)
Magnésium	5***	$Al_3Mg_2$
Zinc	7***	Sol. Sol. Al (< 1 %) dans Zn

## I. 16 : Aspects industriels sur les alliages d'aluminium :

### I. 16. 1 : Les alliages d'aluminium durcis par écrouissage :

Ce sont les alliages des séries :

3\*\*\* : l'élément d'alliage principal est le manganèse associé éventuellement au magnésium.

5\*\*\* : l'élément d'alliage principal est le magnésium.

Ces alliages sont parfois utilisés à l'état non écroui ; leurs performances mécaniques ne sont pas très élevées mais elles bénéficient d'un léger effet de durcissement dû aux éléments d'alliage (précipitation avec le manganèse, effet de solution solide pour le magnésium); elles sont ainsi supérieures à celles des alliages de la série 1\*\*\*. Elles atteignent les niveaux suivants :

- Limite d'élasticité  $R_{p0,2}$  : 40 à 160 N/mm<sup>2</sup>
- Résistance à la traction : 110 à 300 N/mm<sup>2</sup>
- Allongement à rupture : 18 à 30 %

L'état écroui les performances de résistance sont d'autant plus augmentées que l'écrouissage est plus important mais en contrepartie la ductilité est plus abaissée. Avec l'écrouissage le plus important il est possible alors d'atteindre les ordres de grandeur suivants :

- Limite d'élasticité  $R_{p0,2}$  : 180 à 400 N/mm<sup>2</sup>
- Résistance à la traction : 200 à 430 N/mm<sup>2</sup>
- Allongement à rupture : 3 à 5 %.

Pour retrouver une ductilité plus élevée on peut réaliser un début de restauration à l'aide d'un léger réchauffage ; on reviendra ainsi, par exemple, aux niveaux suivants :

- Limite d'élasticité  $R_{p0,2}$  : 140 à 200 N/mm<sup>2</sup> ;
- Résistance à la traction : 170 à 250 N/mm<sup>2</sup> ;
- Allongement à rupture : 5 à 8 %.

### I. 16. 2 : Les alliages d'aluminium durcis par précipitation :

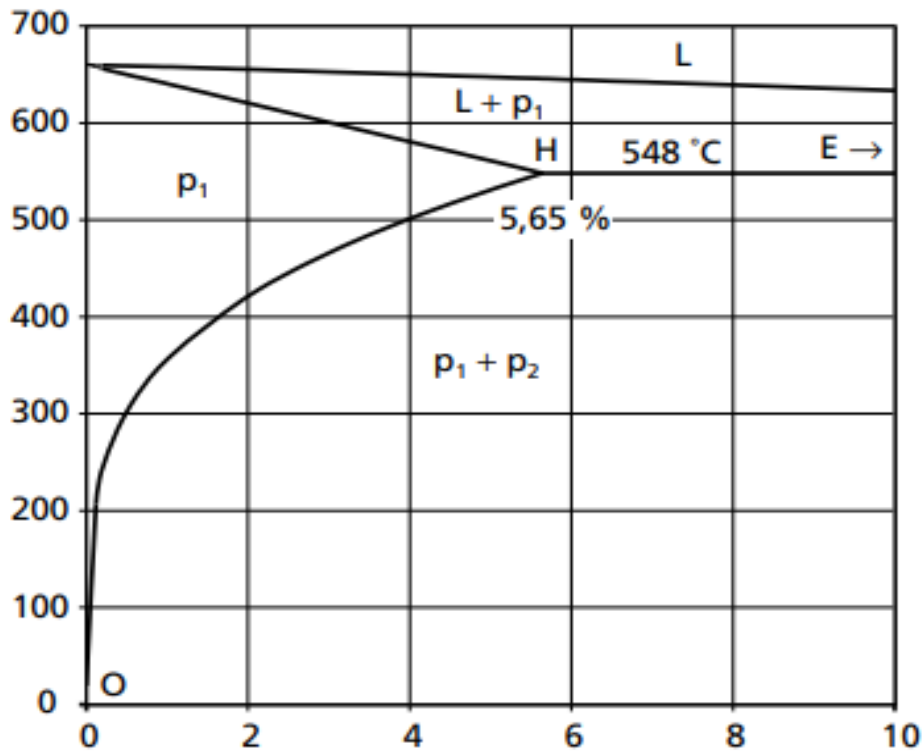
Le durcissement par précipitation exige que soient introduits dans l'alliage des éléments susceptibles d'être mis en solution solide à haute température mais qui sont insolubles ou très faiblement solubles à la température ambiante. Le durcissement est alors obtenu à l'aide d'un traitement thermique ; c'est la raison pour laquelle les alliages correspondants sont appelés « alliages à traitement thermique »

L'exemple d'un tel alliage est donné par un des plus anciens alliages d'aluminium : le duralumin (4 % Cu, 0,7 % Mg, 0,7 % Mn, 0,7 % Fe, 0,5 % Si). Une partie du diagramme d'équilibre Al-Cu (Figure II.1) montre que :

- par chauffage à une température supérieure à 500 °C on transforme l'alliage en une solution solide homogène de cuivre dans l'aluminium :

- à la température ambiante la solubilité du cuivre dans l'aluminium est inférieure à 0,1 % et que le cuivre excédentaire doit précipiter sous forme du composé intermétallique auquel on attribue la formule  $Al_2Cu$ .

Une telle situation permet bien de réaliser un traitement thermique de durcissement par précipitation. [5]



**Figure I.7** : Partie riche en aluminium du diagramme d'équilibre Al-Cu. [5]

Les alliages qui relèvent de ce mode de durcissement sont classés dans les séries :

2\*\*\* : l'élément d'alliage principal est le cuivre.

6\*\*\* : les éléments d'alliage principaux sont le magnésium et le silicium.

7\*\*\* : l'élément d'alliage principal est le zinc souvent associé au magnésium et au cuivre.

Ils sont durcis par un traitement thermique qui comporte :

- un chauffage pour mettre en solution le ou les élément(s) d'alliage qui participe(nt) à la formation des précipités. Ce chauffage doit permettre d'atteindre une température :

- Assez élevée pour autoriser la mise en solution totale (ou au moins très avancée) des éléments d'addition,

- Pas trop élevée pour éviter « la brûlure du métal » c'est un début de fusion qui intervient dans des zones ségréguées dont l'enrichissement en certains éléments abaisse la température de fusion au-dessous de la température du solidus d'équilibre.

- un refroidissement assez rapide pour empêcher toute précipitation et permettre donc de conserver les éléments d'addition en sursaturation dans l'aluminium (en vue d'une précipitation réalisable ultérieurement et d'une manière contrôlée par revenu).

Pour chaque alliage on détermine des conditions critiques de refroidissement qui caractérisent la loi de refroidissement la plus lente qui permet encore d'éviter toute précipitation. Cette caractéristique est parfois exprimée en termes de vitesse moyenne de refroidissement et R. DEVELAY donne (Techniques de l'Ingénieur M1290), par exemple, les limites suivantes :

- 0,5 °C/s pour un alliage 7020 (4,5 % Zn, 1,2 % Mg).
- 1 °C/s pour un alliage 6060 (0,47 % Mg, 0,45 % Si, 0,25 % Zn).
- 6 °C/s pour un alliage 6082 (1 % Si, 0,9 % Mg, 0,7 % Mn).
- 10 °C/s pour un alliage 6061 (1 % Mg, 0,6 % Si).
- 18 °C/s pour un alliage 2017 (4 % Cu, 0,7 % Mn, 0,6 % Mg).
- 100 °C/s pour un alliage 7075 (5,6 % Zn, 2,5 % Mg, 1,6 % Cu).

Le plus souvent les alliages d'aluminium sont refroidis par trempe à l'eau à 20 °C; si les pièces ont des formes complexes il peut être utile, pour diminuer les déformations et les contraintes, de porter préalablement l'eau à une température supérieure à l'ambiante (de 50 à 100 °C). Souvent la qualité d'un refroidissement est appréciée à partir des performances mécaniques obtenues après achèvement du traitement thermique (voir plus loin); il ne faut pas oublier en effet qu'à l'état brut de trempe les alliages considérés ici sont adoucis puisque les précipités sont dissous. [5]

- une opération de durcissement qui peut prendre deux formes : le mûrissement (ou maturation) ou le revenu.

- Durcissement par mûrissement : à la température ambiante. La solution solide sursaturée a la possibilité d'évoluer. Les éléments d'alliage en sursaturation diffusent vers les défauts du réseau, essentiellement vers les dislocations. En se rassemblant, ils forment autour de ces dernières des « nuages » d'atomes de soluté (on les appelle des zones de GUINIER-PRESTON) qui rendent leurs déplacements ultérieurs plus difficiles ; il apparaît ainsi un durcissement important en l'absence de toute précipitation (on parle parfois de pré-précipitation). Ce processus est plus ou moins rapide selon la température ; des différences importantes apparaissent pour de faibles variations de la température ambiante. Néanmoins ce durcissement s'établit assez lentement ; il peut demander quelques jours avec certains alliages de la série 2\*\*\*, quelques semaines avec des alliages de la série 6\*\*\* et quelques mois avec des alliages de la série 7\*\*\*.

- Le revenu : il s'agit ici d'un réchauffage classique qui se fait à des températures variables selon les alliages mais généralement comprises entre 100 et 200 °C (durée de l'ordre de 5 à 24 heures). Cette opération a pour but de précipiter la phase durcissant. Il faut noter qu'au cours d'un revenu à température donnée, le durcissement se fait progressivement en atteignant un maximum au bout d'un certain temps ; au-delà le durcissement diminue (il y a coalescence des précipités). Quand la température de revenu est abaissée le temps nécessaire pour atteindre le durcissement maximum croît et, simultanément le niveau maximum du durcissement augmente. On préférera donc des revenus longs à des températures relativement basses.

À la suite du traitement thermique des alliages considérés on obtient des performances mécaniques élevées dont on trouvera ci-après des ordres de grandeur.

Alliages de la série 2\*\*\* après trempe et mûrissement :

- Limite d'élasticité  $R_{p0,2}$  ; 160 à 330 N/mm<sup>2</sup>.
- Résistance à la traction : 300 à 470 N/mm<sup>2</sup>.
- Allongement à rupture : 20 à 24 %.

Alliages de la série 2\*\*\* après trempe et revenu :

- Limite d'élasticité  $R_{p0,2}$  ; 300 à 420 N/mm<sup>2</sup>.
- Résistance à la traction : 400 à 480 N/mm<sup>2</sup>.
- Allongement à rupture : 10 à 13 %.

Alliages de la série 6\*\*\* après trempe et mûrissement :

- Limite d'élasticité  $R_{p0,2}$  ; 130 à 210 N/mm<sup>2</sup>.
- Résistance à la traction : 220 à 360 N/mm<sup>2</sup>.
- Allongement à rupture : 18 à 28 %.

Alliages de la série 6\*\*\* après trempe et revenu :

- Limite d'élasticité  $R_{p0,2}$  ; 200 à 360 N/mm<sup>2</sup>.
- Résistance à la traction : 220 à 400 N/mm<sup>2</sup>.
- Allongement à rupture : 10 à 17 %.

Alliages de la série 7\*\*\* après trempe et revenu :

- Limite d'élasticité  $R_{p0,2}$  ; 320 à 630 N/mm<sup>2</sup>.
- Résistance à la traction : 370 à 680 N/mm<sup>2</sup>.
- Allongement à rupture : 5 à 12 %.

Certains alliages subissent parfois un léger écrouissage (quelques %) après la trempe et avant le revenu. Ce traitement apporte un petit supplément de durcissement si le revenu ne provoque pas une restauration totale et si l'écrouissage n'engendre pas une précipitation trop grossière ; il n'est réalisable que sur certains alliages. Ainsi la limite d'élasticité d'un alliage 2024 (4,3 % Cu, 1,5 % Mg, 0,6 % Mn) pourra passer de 370 N/mm<sup>2</sup> après trempe et revenu à 430 N/mm<sup>2</sup> après trempe, écrouissage léger (2 %) et revenu. [5]

## I. 17 : Les désignations codifiées des états métallurgiques des alliages

### d'aluminium :

La norme NF EN 515 définit la désignation symbolique des états métallurgiques de l'aluminium et de ses alliages :

- états recuits – symbole 0 – avec, notamment, 01 recuit à haute température et refroidissement lent – états écrouis – symbole H

- avec, notamment H1 (état brut d'écrouissage) ou H2 (état écroui et partiellement restauré) suivi d'un chiffre (de 1 à 9) qui caractérise le niveau de durcissement dû à l'écrouissage (8 correspondants à l'état le plus dur normalement produit – 9 est utilisé pour un durcissement plus important encore – les chiffres de 1 à 7 sont employés pour des durcissements intermédiaires – ainsi 4 désigne un durcissement moitié de celui repéré 8). Ces symboles sont souvent suivis par des chiffres supplémentaires qui complètent la désignation et traduisent des différences sensibles au niveau des caractéristiques acquises (exemple : H111, état obtenu à la suite d'un léger écrouissage après recuit, écrouissage qui donne un durcissement suffisant pour que les propriétés du métal ne soient plus celles de l'état recuit sans que, toutefois, elles atteignent le niveau de celles correspondant à l'état H11) [5]

- états obtenus par traitement thermique – symbole T – avec de nombreuses variantes

- T4 mis en solution et mûri.
- T5 refroidi après mise en forme à chaud et revenu.
- T6 mis en solution et revenu.
- T7 mis en solution et sur-revenu.
- T8 mis en solution, écroui et revenu.
- T9 mis en solution, revenu et écroui.
- T1 refroidi après mise en forme à chaud et mûri.
- T2 refroidi après mise en forme à chaud, écroui et mûri.
- T3 mis en solution, écroui et mûri.

Ces symboles sont généralement suivis par des chiffres supplémentaires qui complètent la désignation et traduisent des différences sensibles au niveau des caractéristiques acquises (exemple ; T5511, état obtenu après mise en solution ou transformation à chaud, refroidissement, allongement par traction – 1 à 3 % pour les barres et profilés – et éventuellement dressage). [5]

## I. 18 : Classification des alliages d'aluminium :

Vue la température de fusion relativement basse, d'environ 660°C. Les alliages d'aluminium présentent un avantage certain pour les opérations de fonderie. Et vue leurs ductile (coefficient d'érouissage  $n = 0.2$  à  $0.3$ ), on peut aisément les mettre en forme à l'état solide, par déformation plastique.

Les alliages peuvent être mis en forme selon deux techniques :

- Mise en forme par corroyage (déformation à chaud),
- Mise en forme par fonderie. [2]

Le nombre total des alliages élaboré est plus de 3000 alliages industriels

### I. 18. 1 : Mise en forme par corroyage :

C'est un mode d'obtention des produits semi fini et fini par déformation à chaud des lingots, des billettes ou des brames de coulée continue. Elle se devise en deux catégories :

- Alliages, mis en forme par corroyage, non trempant : catégorie apte seulement pour le traitement mécanique dit "érouissage" afin d'améliorer leur caractéristique mécanique. Séries 1000, 3000, 5000, 4000 partiellement.
- Alliages, mis en forme par corroyage, trempant : catégorie apte pour le traitement thermique dit "durcissement structural" pour l'amélioration de leurs caractéristiques mécaniques. Série 2000, 6000, et 7000.

**Tableau I.6 :** Familles d'alliages d'aluminium et type de durcissement associé. Mise en forme par fonderie. [2]

Famille	Élément d'alliage	Etendue de teneur (En % de masse)	Additions possibles	Résistance Mécanique RM(MPa)
Durcissement par écrouissage				
1000	Aucun		Cuivre	50-150
3000	Manganèse	0.5-1.5	Magnésium-cuivre	100-200
5000	Magnésium	0.5-5	Magnésium-Chrome	100-340
8000		Si : 0.3-1, Fe : 0.62	Nickel	130-190
Durcissement structural				
6000	Mag-Silicium	Mg : 0.5-1.5, Si : 0.5-1.5	Cuivre-Chrome	150-310
2000	Cuivre	2-6	Si-Mg-Li	300-450
7000	Zinc-Magnésium	Zn : 5-7 Mg : 1-2	Cuivre	Sans cuivre : 320-350 Avec cuivre : 430-600
4000	S5+2ilicium	0.8-1.7		150-400

### I. 18. 2 : Mise en forme par fonderie :

Ce mode a pour but l'obtention des produits semi fini et fini par fusion et moulage des lingots, avec une qualité différente de celle des produits corroyés, et l'absence des zones de déformations plastiques dans les pièces moulées, les qualités demandées pour le mode d'obtention par fonderie sont :

- Aptitude du métal liquide à bien remplir l'empreinte du moule est satisfaite par la coulabilité des alliages d'aluminium.
- Fissuration à chaud causée par le retrait du métal est évité par l'absence de formation de criques.
- Le peu de retrait qui accompagne la solidification engendrée par la bonne répartition de la porosité.
- L'emploi des moules métalliques convenant à la basse température de fusion des alliages d'aluminium.

Selon la même normalisation de l'Aluminium Association INC ; les alliages d'aluminium de fonderie sont désignés par un nombre à quatre chiffres avec un point séparant les deux derniers. Tableau I-7. Le premier chiffre indique l'élément principal d'addition. Certains alliages de fonderie sont aptes aux traitements thermiques et dites trempant, ce sont de série :

200.0, 300.0, 400.0 et 700.0, l'écrouissage n'est généralement pas utilisé sur ces alliages

Les alliages de fonderie sont obtenus de deux façons :

- Soit à partir d'aluminium provenant directement des cuves d'électrolyse auquel on ajoute les éléments d'addition de l'alliage (alliages dits de première fusion) :
- Soit à partir de rebuts récupérés, assortis et purifiés. Ils sont dits de deuxième fusion et assurent pratiquement 50% de la production totale des pièces de fonderie. [2]

**Tableau I.7 :** Les séries d'alliage de fonderie selon l'Aluminium Association

CODE	Elément(s) d'addition
1xx.x	Moins de 1% (aluminium à 99.00%ou plus)
2xx.x	Cuivre
3xx.x	Silicium avec l'ajout de cuivre et/ ou de Magnésium
4xx.x	Silicium
5xx.x	Magnésium
7xx.x	Zinc
8xx.x	Etain
9xx.x	Autres éléments
6xx.x	Série no utilisé

Il existe, en plus de l'aluminium non allié, quatre grandes familles d'alliages d'aluminium de fonderie, qui sont fonction des éléments d'alliages ajoutés. Ceux-ci se retrouvent soit en solution solide soit sous forme de précipités. Ces familles sont les alliages au silicium, au cuivre, au magnésium et au zinc. On distinguera les additions principales déterminantes pour les propriétés du matériau et les additions secondaires, en plus faibles quantités, qui ont une action spécifique.

- Le silicium pour (Alliages Al/Si, Al/Si/Mg et Al/Si/Cu) confère à l'alliage d'excellentes propriétés de fonderie, telles qu'une augmentation de la coulabilité, une diminution de la criquabilité et de l'aptitude à la retassure (il se dilate à la solidification). On note aussi une augmentation de la résistance à l'usure (le silicium est très dur), de l'étanchéité des pièces, mais une diminution de l'allongement à rupture.
- Le cuivre pour (Alliages Al/Cu) augmente les propriétés mécaniques par durcissement structural, principalement la dureté (donc l'usinabilité) et la tenue à chaud sans perte au niveau de la coulabilité mais diminue la résistance à la corrosion et augmente l'aptitude à la crique.
- Le magnésium augmente la résistance à la corrosion, aux dommages, L'allongement à rupture et engendre un nouveau système durcissant après traitement thermique ( $Mg_2Si$ ) mais diminue les propriétés de fonderie et d'usinabilité (les copeaux ont tendance à coller aux outils, ce qui augmente leur usure).
- Le zinc très peu utilisé à cause de ses médiocres capacités en fonderie et ses faibles propriétés mécaniques, il se trouve sous forme ternaire de Al-Zn-Mg, ce qui donne un alliage à durcissement structural avec des précipités  $MgZn_2$ , atténue le gazage de

l'alliage, améliore la coulabilité (faiblement), diminue l'allongement, augmente la tendance à la micro retassure et l'agressivité chimique de l'alliage fondu.

### **I. 19 : Les domaines d'applications de l'aluminium et ses alliages :**

Les caractéristiques physiques et chimiques de l'aluminium expliquent ses succès industriel et commercial. En effet, l'aluminium avec sa légèreté, (presque trois fois plus léger que l'acier), sa résistance aux sollicitations mécaniques ; son aptitude à l'amélioration de ses caractéristiques par traitement ou à froid, sa résistance à la corrosion, sa bonne tenue justifient ses utilisations dans le bâtiment, l'équipement des territoires ou la construction navale.

La variété des alliages d'aluminium en nombre, famille et composition a élargi ses champs d'utilisation, vue la conductivité électrique de l'aluminium (de l'ordre de deux tiers de celle du cuivre) ; en utilisant comme conducteur électrique l'aluminium plutôt que le cuivre, on réalise une économie de 50% sur le poids. La conductivité thermique de l'aluminium est de l'ordre de 60% de celle du cuivre, ce qui est remarquable et justifie son utilisation pour les ustensiles de cuisine, les capteurs solaires, les éléments frigorifiques, les disques de frein etc. L'utilisation de l'aluminium est aussi importante dans l'électronique, dans le dessalement de l'eau de mer ; dans tous ces domaines, il est question d'échanges thermiques. L'aluminium est un excellent réflecteur de la chaleur, de la lumière et des ondes électromagnétiques. Dans les alliages d'aluminium avec le fer, celui-ci n'a pratiquement plus aucun effet magnétique. L'aluminium est facile à mis en forme suivant la plupart des méthodes, cette qualité est exploitée lors du filage des profilés en aluminium et du laminage de bandes et de feuilles. L'aluminium peut être soudé ou collé. Son aptitude aux traitements de surface de tous genres permet la réalisation de solutions esthétiques. L'aluminium permet un grand choix de demi-produits selon les applications à réaliser.

Il existe environ 80 alliages couramment utilisés. Les feuilles d'aluminium et de profilés peuvent être standardisés ou personnalisés à la demande du client utilisateur. L'aluminium est indéfiniment recyclable. Sa réintroduction dans le circuit n'utilise que 5 % des quantités d'énergie nécessaires à la production d'aluminium de première fusion. En usine, les chutes de production sont recyclées à 100 %. Le taux de recyclage des produits en aluminium en fin de vie est de 85 % dans le bâtiment, 80 % dans le transport, 70 % dans les applications mécaniques et électriques, et 65 % dans l'électroménager. L'ensemble de ces atouts de l'aluminium en font aujourd'hui le métal le plus utilisé après le fer. La combinaison des diverses propriétés de l'aluminium explique la vaste gamme d'applications économiques de ce produit.

L'aluminium est très utilisé dans le transport. En effet dans l'aéronautique et l'aérospatiale, grâce à l'aluminium et à ses alliages, le poids de la structure d'un avion a été divisé par deux.

La prépondérance de l'aluminium dans l'aéronautique n'a pu être conservée que par une évolution considérable au fil des ans des alliages utilisés. Aujourd'hui encore l'aluminium représente près de 80 % de la masse à vide des avions civils modernes (Airbus, Boeing, Tornado).

L'aluminium est utilisé pour les pièces de moteurs en automobile, il a un emploi dans les éléments de châssis, de carrosserie et d'équipements. L'allègement des véhicules automobiles par l'utilisation de l'aluminium est synonyme d'économies de carburant pour les utilisateurs.

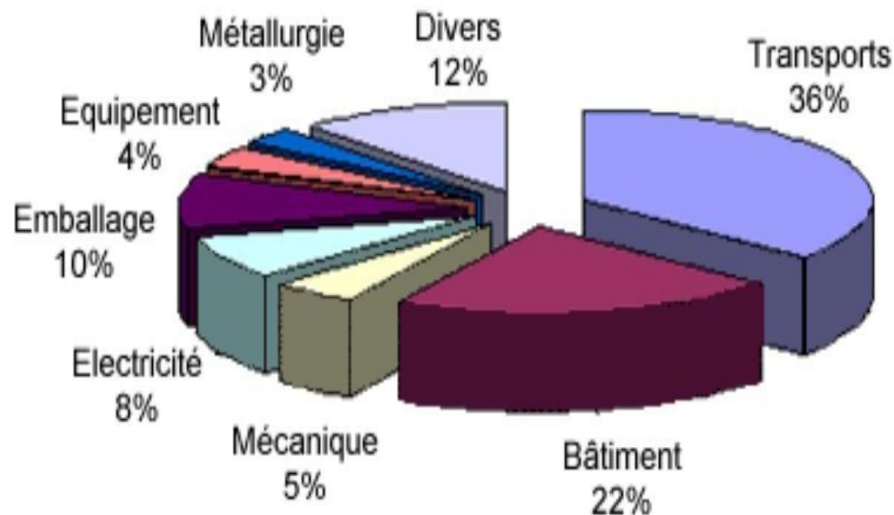
L'aluminium est aussi très utilisé dans le bâtiment. Après la seconde guerre mondiale, son utilisation dans la fabrication des fenêtres puis des façades a débouché sur la naissance d'une nouvelle architecture de murs rideaux, symbole de l'architecture moderne. Aujourd'hui, il se rencontre partout dans le bâtiment : toitures, bardages, panneaux d'isolation, fenêtres, portes, volets, vérandas, pare-soleil, cloisons, faux plafonds, cabines de douche.

Le secteur de l'emballage apprécie les multiples propriétés de l'aluminium, en particulier ses propriétés de barrières aux liquides, aux gaz et à la lumière. L'emballage constitue un débouché important pour l'aluminium.

L'aluminium sert à la fabrication de câbles de transport et de distribution d'énergie : lignes haute tension, câbles souterrains, fils de bobinage pour transformateurs... L'excellente conductivité de l'aluminium, mais aussi sa légèreté et sa solidité expliquent son développement dans ce domaine.

L'aluminium est présent dans l'équipement des maisons (ustensiles de cuisine, appareils électroménagers, réfrigérateurs, radiateurs), le revêtement des disques compacts laser, le mobilier urbain, la signalisation routière.

Les spécificités physico-chimiques de l'aluminium en font donc un métal très demandé par les industriels et les ménages pour beaucoup d'objets de la vie quotidienne. Figure I.8 [2]



**Figure I.8** : Répartition de la consommation d'aluminium. [2]

# Chapitre II

---

Traitements thermiques

## Chapitre II : Traitements thermiques :

### II. 1 : Introduction :

Les traitements thermiques se définissent comme étant « l'ensemble des opérations de chauffage et de refroidissement contrôlé » appliqués à des métaux et alliages.

De manière générale, les traitements thermiques s'agissent au niveau microstructural des métaux (matrice, précipités, distribution, etc.).

Ils permettent de modifier les propriétés mécaniques (en les augmentant ou en les diminuant), les propriétés physiques (par exemple, les conductibilités thermiques et électriques) et les propriétés chimiques (par exemple, la résistance en corrosion).

En somme, les traitements thermiques sont des opérations qui consistent à faire varier la température des métaux qui reste néanmoins à l'état solide.

La variation de la température en fonction du temps est appelée cycle thermique (chauffage, maintien et refroidissement). Figure II.1.



**Figure II.1:** Le cycle thermique (TTT)

## II. 2 : Types de traitement s'applique seaux alliages d'aluminium :

### II. 2. 1 : Traitements thermomécaniques (écrouissage et recristallisation)"Strain-hardenable alloys" :

Tous les métaux et alliages peuvent être traitées par déformation plastique, dans le domaine de l'aluminium cette désignation est réservée pour certaines familles comme : 1000, 3000,4000partiellement, 5000, et8000.

#### A- Durcissement par traitement mécanique

Afin de modifier les caractéristiques mécaniques de certains alliages d'aluminium sans traitement thermique, on les sollicite à la déformation plastique macroscopique (consolidation), ou microscopiques (écrouissage), Figure II.2, ces deux phénomènes multiplient le nombre des dislocations. Le déplacement et l'interaction de ces dislocation sen gendent une force de résistance appelée de **Peierls** donnée par :

$$F_p = [(2G \cdot b)/1 - \nu] \exp(-2\pi w/b) \quad (3)$$

**G**: module de cisaillement, **v**:coefficient de poisson

**W**:largeur de dislocation, **b**:vecteur de burger

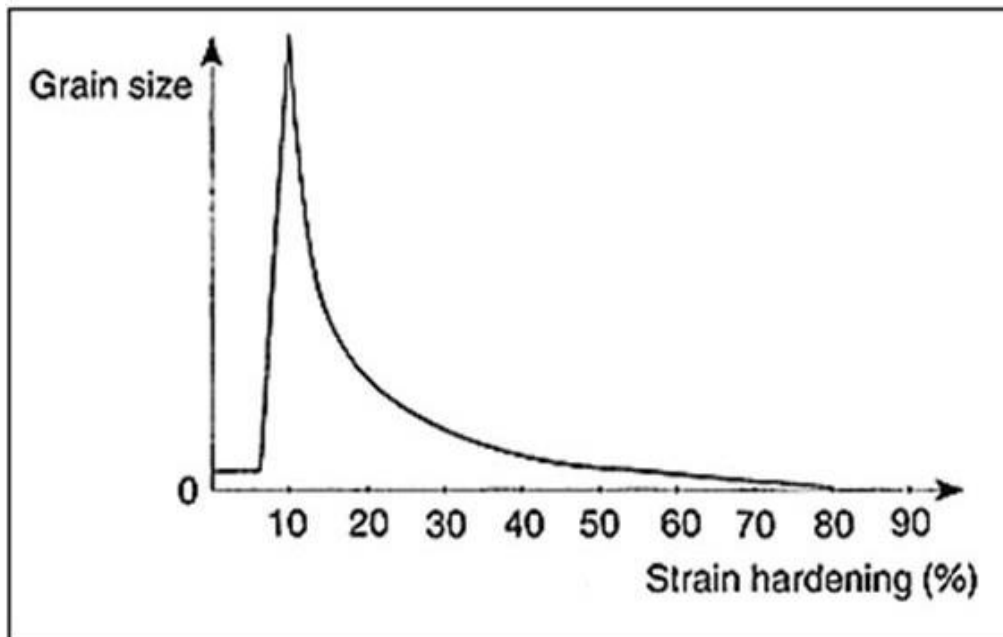


Figure II.2 : Le changement de la taille de grain en fonction de l'écrouissage. [5]

#### B- Coefficient d'écrouissage

Le coefficient d'écrouissage est mesuré lors de l'essai de traction. La relation de **Holloman** a été proposée pour rendre compte de la forme de la courbe de traction, cette relation est valable uniquement pour les métaux doux, cette relation est donnée par l'équation :

$$\sigma = K \cdot \epsilon^n \quad (4)$$

$n$ : représente le coefficient d'écroutissage,  $\sigma$ : représente la contrainte vraie et  $\epsilon$  représente la déformation vraie, le coefficient d'écroutissage est calculé à partir du tracé de courbe rationnelle en coordonnées logarithmique. Figure II.3

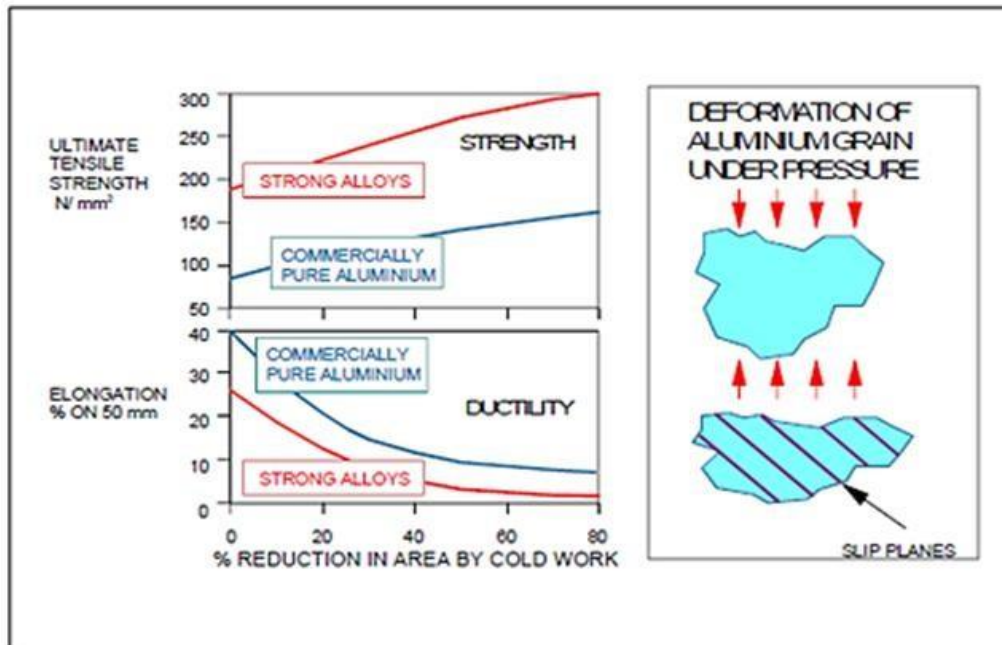


Figure II.3 : Ecrouissage et propriétés mécaniques des alliages 1000 et 3000.

### C- Recristallisation

Pour diminuer le nombre de défauts engendrés par l'écroutissage (état métastable), un traitement thermique à température suffisante ( $T < T_{\text{fusion}}/3$ ) doit être appliqué. La structure écrouie sera remplacée par une nouvelle structure à grains reformés, ce type de traitement ne se produit qu'après une déformation minimale, dite "écrouissage critique", il est caractérisé par une résistance mécanique et dureté minimales et une plasticité maximale "état optimal pour réaliser des déformations ou mises en forme à froid importantes et difficiles" Figure II.4 [2]

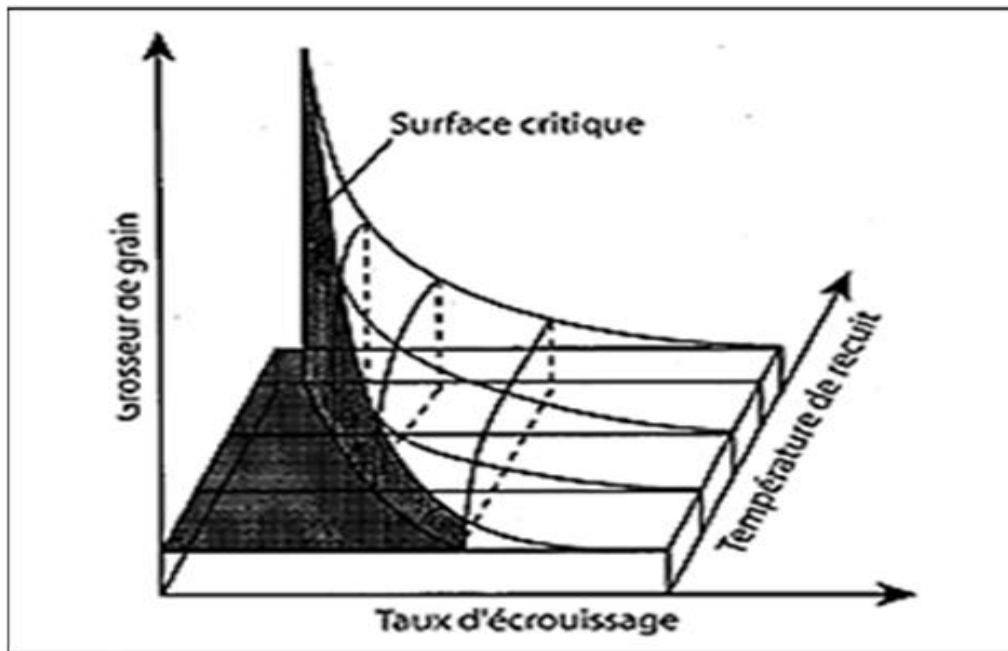


Figure II.4 : Diagramme de recristallisation.

Ces types de traitement concerne les alliages de :

- Série1000 Aluminium pure
- Série3000 : "Al-Mn"
- Série5000 : "Al-Mg"
- Série4000 : "Al-Si"

### II. 3 : Les traitements thermiques sur les alliages d'aluminium :

Les traitements thermiques appliqués aux alliages d'aluminium peuvent être classés en trois groupes :

- Les traitements d'homogénéisation.
- Les traitements d'adoucissement.
- Les traitements de durcissement structural. [6]

#### II. 3. 1 : Les traitements d'homogénéisation :

Ce sont des traitements comportant un chauffage à des températures relativement élevées appliqués à certains produits bruts de fonderie et corroyés, et destinés le plus souvent à en faciliter la transformation à chaud ou à froid (filage, étirage, laminage, forgeage).

Ils consistent en général en des maintiens de 6 à 48 heures à des températures allant de 450° C à 610° C, qui ont pour principal but de dissoudre les phases métalliques en excès et de réaliser une homogénéisation de la composition de la solution solide.

Le corroyage est une opération consistant à déformer un métal avec allongement, généralement mais non obligatoirement dans un sens privilégié. Il est effectué à chaud, à tiède ou à température ambiante et permet par déformation appropriée (forgeage, matriçage, laminage, filage) d'obtenir des produits à la forme désirée. [6]

### **II. 3. 2 : Les traitements d'adoucissement :**

Les traitements d'adoucissement ont pour but d'adoucir un métal ou un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale. Dans le cas de l'écrouissage, ce sont les traitements de restauration ou des recuits de recristallisation.

Le traitement de restauration est effectué à 200-300 °C pendant de 1 à 8 heures.

Le traitement de recristallisation est effectué à 300-400 °C pendant de 0,5 à 3 heures.

### **II. 3. 3 : Le durcissement structural :**

Ce traitement thermique est principalement destiné aux aluminiums et de façon beaucoup moins importante à certains aciers alliés. Ce dernier est de loin le traitement thermique le plus utilisé pour augmenter les propriétés mécaniques des alliages. Il est aussi appelé « durcissement par précipitation ». Il se divise en trois étapes distinctes :

- La mise en solution.
- La trempe.
- Le revenu (vieillessement)

Ce traitement ne peut être appliqué qu'à certains alliages d'aluminium :

#### **Corroyage (déformation à chaud) :**

Série 2000 Al – Cu

Série 6000 Al – Si – Mg et/ou Cu.

Série 7000 Al – Zn.

#### **Fonderie :**

Série 200 Al – Cu.

Série 300 Al – Si – Mg et/ou Cu.

Série 700 Al – Zn.

HT 850 – 851 et 852.

Tous les alliages mentionnés ci-dessus sont caractérisés par une solubilité partielle des éléments d'alliage (solutés) dans la matrice d'aluminium (solvant).

Il existe deux conditions indispensables pour que le durcissement structural soit possible :  
La présence d'éléments d'alliages partiellement solubles.

La solubilité à haute température est très supérieure à celle obtenue à basse température. [6]

#### II. 4 : Le principe du durcissement structural :

Lorsqu'un alliage « durcis sable » refroidit, la solubilité de l'élément (ou des éléments) d'alliage diminue. Il y a alors précipitation de l'élément en excès. Habituellement, cet excès tend à se concentrer dans les zones de chaleur plus importantes (dans les derniers endroits à se solidifier) puisque ce sont à ces endroits que la solubilité est maximale. Très souvent dans un alliage, ceci correspond aux joints de grains.

Supposons qu'on ajoute un « élément B » dans une « matrice A ». La solubilité de « B » dans « A » est de 15 % à 500 °C et 5 % à 20 °C. Lorsque l'alliage coulé refroidit, il y a précipitation de l'élément « B ». À 20° C, environ 10 % en poids de « B » a précipité. L'alliage (solution solide contenant 5 % de  $\alpha$  est donc composé de précipités de B dans une matrice « B » dissout dans « A »).

Supposons maintenant que l'élément « B » forme un composé intermétallique avec « A ». Le précipité formé est donc un composé « AB » contenant des quantités définies de chacun. Et d'un précipité « AB ». Sur la microstructure finale sera donc formée de la solution solide la figure ci-dessous, on remarque bien la tendance naturelle de l'excès à précipiter aux bordures de grain.

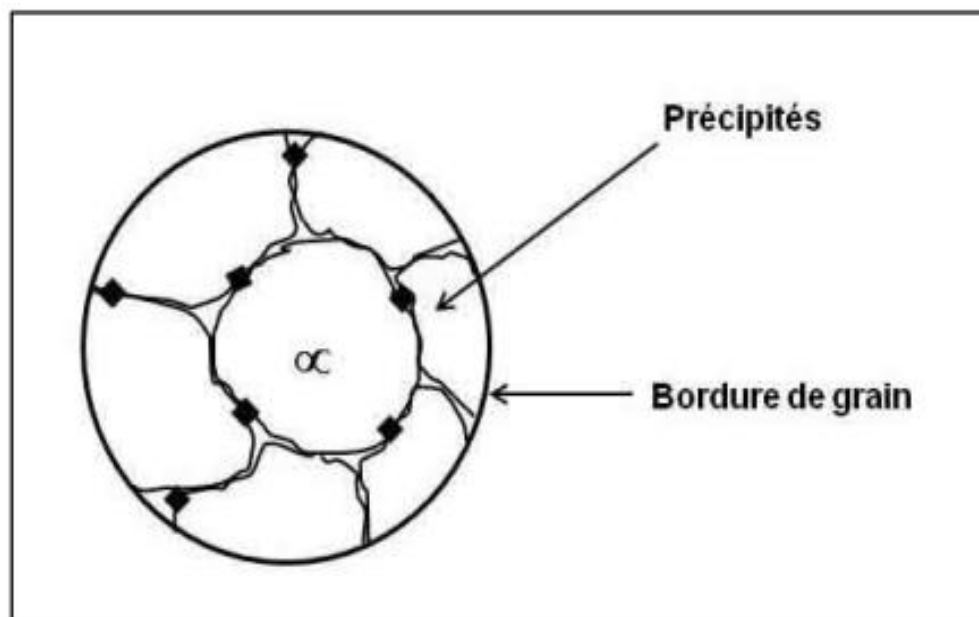


Figure II.5 : Le principe du durcissement structural. [6]

### II. 4. 1 : La mise en solution :

La mise en solution consiste à dissoudre les précipités massifs (à les remettre en solution) dans l'alliage. Puisque la solubilité augmente avec la température du solvant (matrice), la mise en solution est faite à haute température (environ 50 °C sous le solidus). Après la mise en solution, on obtient une solution solide homogène (aucun précipité).

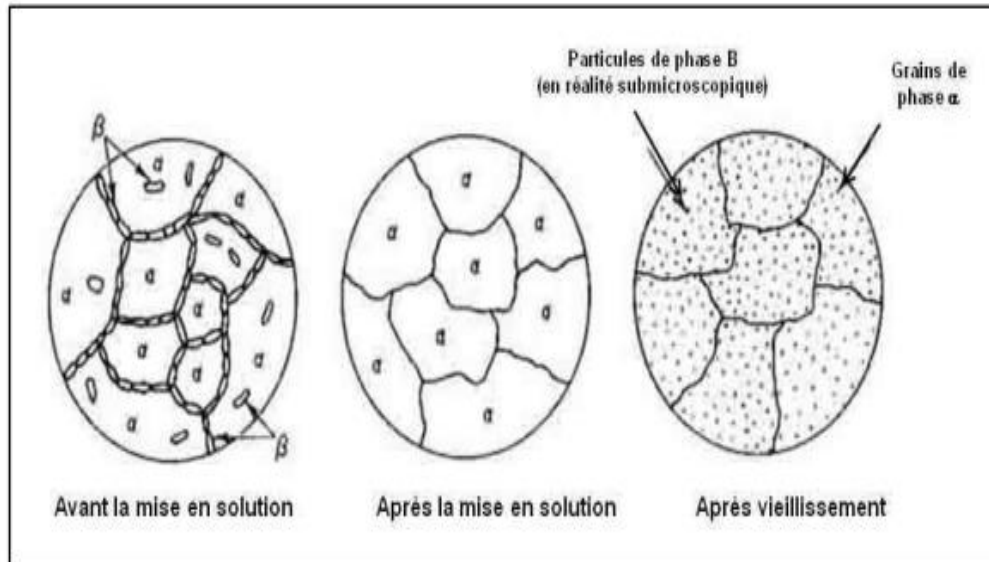


Figure II.6 : Grossement de grain en fonction de la mise en solution. [6]

### II. 4. 2 : La trempe :

Si on laisse refroidir lentement l'alliage mis en solution, la structure obtenue sera formée de précipités massifs dans celle-ci. Ces précipités sont le résultat de la diminution de solubilité lorsque la température diminue. Pour empêcher cela, on a recours à une trempe.

La trempe peut être définie comme un « refroidissement très rapide » à partir d'une température très élevée. Ce refroidissement rapide ralentit la diffusion des atomes pratiquement jusqu'à l'arrêter complètement. Puisqu'on tombe dans des conditions hors équilibre, les transformations normales qui apparaissent au refroidissement n'ont donc pas lieu. La trempe permet de « figer » l'alliage.

La structure obtenue après la trempe est la même que celle obtenue après la mise en solution mais à température ambiante. La solution solide est sursaturée et cherche à atteindre l'équilibre. Si on fournit un apport d'énergie à cet alliage, il y aura diffusion et, par conséquent, précipitation.

### II. 4. 3 : Le revenu (vieillissement) :

Puisque la solution solide de trempe est sursaturée en éléments d'alliage, l'excès a tendance à précipiter. Ce phénomène est appelé « vieillissement ou maturation ». Tous les alliages durcis sable vont subir ce phénomène. Cependant, puisque l'excès en élément d'alliage

est réparti uniformément dans l'alliage, les précipités seront très petits et nombreux. On peut donc dire que plus l'alliage vieillit, plus il durcit jusqu'à un maximum. Au-delà de cette limite, les précipités formés deviennent trop gros et l'alliage devient de plus en plus fragile.

Il existe deux types de vieillissement : le vieillissement naturel et le vieillissement artificiel. Le vieillissement naturel : se fait à température ambiante et sur une période de temps beaucoup plus longue. Seuls les alliages d'aluminium et de zinc sont susceptibles d'être durcis de façon significative par un vieillissement naturel. [6]

Le vieillissement artificiel : est réalisé en chauffant et en maintenant l'alliage à la température de revenu (ou de vieillissement). On crée ainsi une diffusion plus rapide, ce qui favorise une précipitation plus rapide.

**Tableau II.1:** Les conditions pratiques de la trempe structurale pour les alliages d'aluminium.

Famille d'alliage	Température de mise en solution	Durée de Maintien	Medium de trempe
2000	495 ° à 535 °C	2 à 24 heures	Air calme ou soufflé, eau froide à bouillante
6000	530 °C à 550 °C	2 à 4 heures	Eau froide ou tiède, huile, air calme ou soufflé pour les pièces minces
7000	445 °C à 465 °C	4 à 8 heures	Air calme ou soufflé, eau froide à chaude

## II. 5 : Le durcissement d'Aluminium-Magnésium-Silicium série 6000 :

Les alliages de la série 6000, dont les principaux éléments d'addition sont le magnésium (0.4- 1.4) et silicium (0.4- 1.3 en poids), sont traitable thermiquement. Ses alliages sont très utilisés en extrusion des profilés, vue leurs bonnes aptitudes à l'extrusion et la résistance à la corrosion. Les éléments d'addition secondaires sont le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le fer (Fe) et le cuivre en petites quantités, les alliages de la série 6000 peuvent être traités pour améliorer la résistance soit thermiquement par la formation des dispersions des sous formes de précipité  $Mg_2Si$ , ou mécaniquement par la réduction de la taille de grain (UFG). Le système ternaire Aluminium-Silicium-Magnésium est à la base de plusieurs alliages sensibles aux traitements thermiques. Le diagramme de phase obtenu à l'équilibre peut être relativement simplifié si on le considère comme étant binaire c'est-à dire : aluminium et  $Mg_2Si$ , Figure II.7, pour une proportion de magnésium - silicium voisine de 1.73 pour 1, la séquence de précipitation de ce système dans les conditions de solidification normales se traduise par :

Solution solide sursaturée → Zones GP cohérents → bâtonnets semi-cohérents  $\beta''$  parallèles à

$\{001\}$  Al → aiguilles semi-cohérentes  $\beta'$  parallèles à  $\{001\}$  Al → plaquettes semi-cohérentes  $\beta$  parallèles à  $\{001\}$  Al →  $\beta$   $Mg_2Si$  non cohérent. [2]

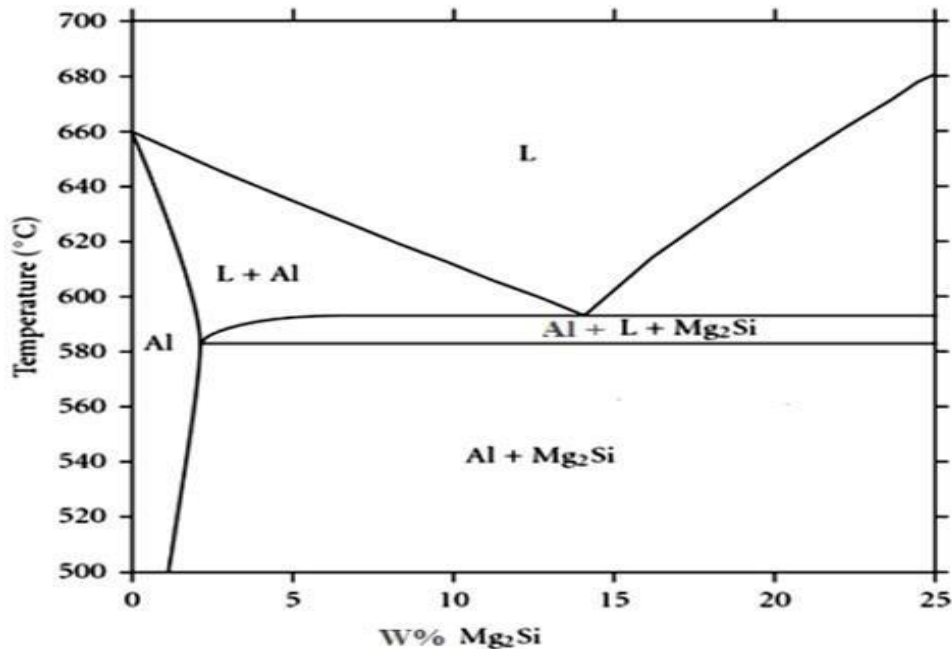


Figure II.7 : Partie du diagramme d'équilibre Al-Mg<sub>2</sub>Si, coupe pseudo binaire. [2]

Les principaux alliages de ce système ternaire sont :

**Les alliages du type A-GS** avec la teneur en magnésium est supérieure à celle du silicium, ce qui implique pratiquement qu'il n'ya pas d'excès de silicium par rapport à  $Mg_2Si$ . Les modèles représentatifs sont :

- L'alliage 6060 qui peut être filé à de très grandes vitesses ( $140 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ).
- L'alliage 6061 qui a de meilleures propriétés mécaniques (additions de Cu et Cr) et la meilleure résistance à la corrosion des alliages trempant.

Une série d'alliages de cette famille est utilisée pour le transport de l'énergie électrique. C'est la nuance 6101A-GS/L76 (Almélec), avec 0.55-0.80Mg, 0.45-0.65 Si,  $Fe \leq 0.3$  et les autres impuretés limitées au maximum.

#### ➤ Excès de magnésium

Les alliages avec excès de Mg ont un rapport  $Mg/Si > 2$ . L'excès de Mg a tendance à favoriser l'apparition de la phase stable au dépend des phases métastables plus intéressantes du point de vue des propriétés mécaniques. Comme les phases métastables du croissant ont une stœchiométrie  $Mg/Si < 2$ , la présence de Mg en excès favorise la phase  $Mg_2Si$  au dépend des phases de rapport  $Mg/Si$  inférieur.

**Les alliages du type A-SG** : dans ces alliages, il y a une teneur en silicium supérieure à celle en magnésium, et le niveau de résistance mécanique est atteint grâce à  $Mg_2Si$  et à Si.

Des additions de chrome, de manganèse peuvent améliorer la résistance à la rupture fragile. Le principal mode les représentatif sont :

- L'alliage **6005**. (A-SG0.5), utilisé aux structures de véhicules routiers et ferroviaires.
- L'alliage **6081**. (A-SGM0.3), utilisé en charpente.
- L'alliage **6082**(A-SGM0.7), utilisé aux mats de bateaux et montant d'échelle.

➤ **Excès de silicium**

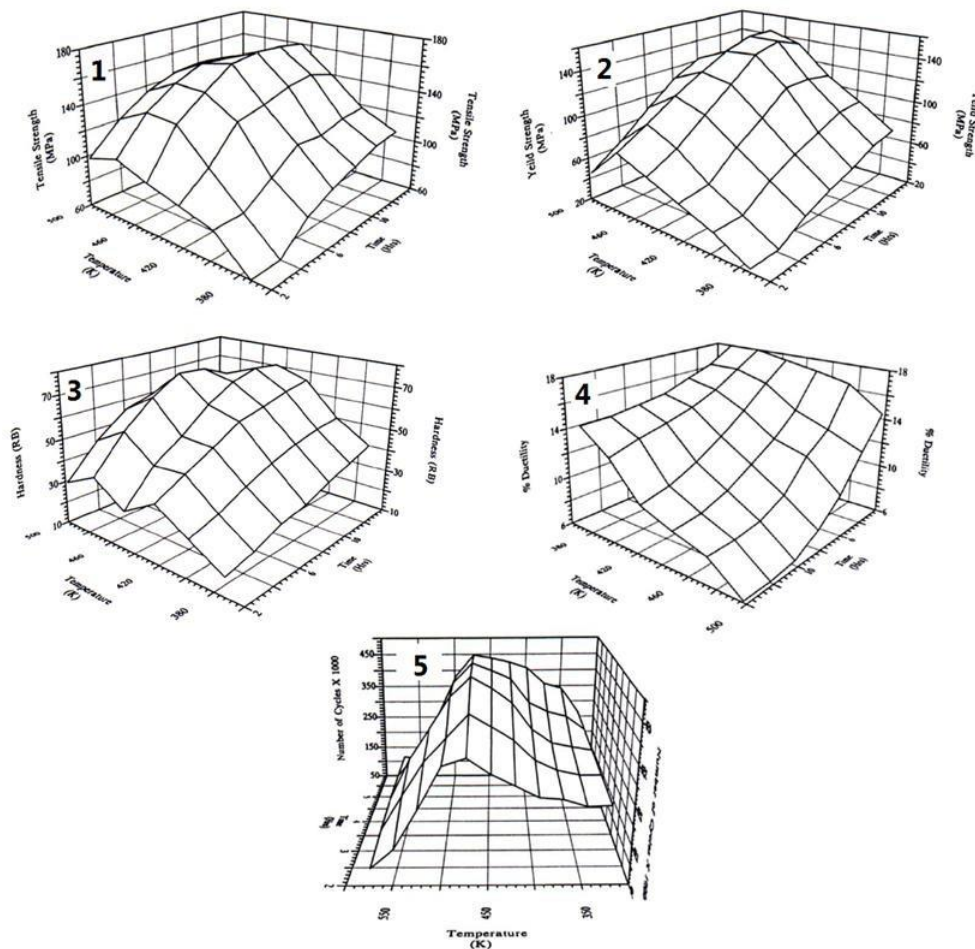
Les alliages à excès de Si ont un rapport Mg/Si < 2. Concernant les premiers stades de précipitation, il semble que l'on puisse considérer que le silicium en excès joue un rôle similaire à celui du cuivre. En effet, les alliages à excès de Si ont un pic de dureté supérieur aux alliages stœchiométriques. Un excès de Si augmente également le durcissement par vieillissement naturel.

Le traitement thermique par précipitation est une fonction bi variable, elle dépend de la température de traitement et le temps de maintien, d'après **RA. Seddiqui and et al** le traitement peut varier la résistance mécanique, l'élasticité, la dureté, la ductilité et la résistance à la fatigue. La **figure II.8** montre l'évolution des derniers paramètres en fonction de la température et le temps de traitement.

**A. L. RIVAS and et al** ont prouvés l'influence de la microstructure, obtenue suite au traitement thermique à 560° pendant 6 heures, sur les propriétés mécaniques ainsi que l'état des surfaces des produits extrudés de l'alliage 6063.

Suite à l'investigation de **P. Juijerm and et al**, le temps de traitement, désigné par l'état non, sous, et sur revenu, peut être primordiale à la détermination des propriétés mécaniques de l'alliage 6110.

Une Corrélation des propriétés mécaniques et le comportement de précipitation de l'alliage Al-0.6Mg-0.7Si a été présentée par **O Kessler et M Reichof**, cette recherche a montré que le facteur la plus important à la détermination de cette corrélation est bien la vitesse de refroidissement. [5]



**Figure II.8 :** Effet du temps et de la température sur les caractéristiques mécaniques d'un alliage 6063, 1 : résistance mécanique, 2 : résistance élastique, 3 : la dureté, 4 : la ductilité, 5: nombre de cycles rupture. [2]

Suite à une étude par **DSC** et **MET** de l'alliage **6022**, **W.F. Miao** and **D.E. Laughlin** ont identifiés la présence de précipités  $\beta''$ , sous forme de d'aiguille de diamètre 2-5 nm et de longueur de 20-40 nm dirigés selon  $\langle 010 \rangle$ , précipités  $\beta'$ , de forme bâtonnet dans la plan  $\{001\}$  et en fin des précipites plates dans la plan  $\{100\}$ , larges et de différentes morphologies correspondante aux précipités  $\beta$ , ainsi que la relation entre ces précipités et le temps de traitement d'un cote, et ses influences sur les caractéristiques mécaniques de l'alliage d'autre cote. [2]

# Chapitre III

---

Traitement par agitation par friction

---

## Chapitre III : Traitement par agitation par friction

### III. 1 : Introduction

Le traitement par friction-malaxage (FSP) est dérivé du soudage par friction-malaxage (FSW). Il s'agit d'une nouvelle technologie de traitement des matériaux proposée par Mishra. En 1999 qui était à l'origine utilisée dans la préparation de matériaux superplastiques. Le traitement par agitation par friction et FSW ont des processus et des principes similaires. Les deux font subir au matériau une déformation plastique sévère conduisant à une microstructure raffinée homogène via la chaleur de friction et l'agitation pendant le traitement. En tant que méthode de traitement à l'état solide, il n'y a pas de fusion des matériaux pendant le FSP. Cela évite efficacement les défauts tels que les porosités et les fissures thermiques qui sont générés lors de la fusion et de la solidification des matériaux. Le traitement à l'état solide réduit également le taux de dilution des matériaux et améliore considérablement la microstructure et les propriétés du métal de base. Les chercheurs ont utilisé le FSP pour la modification de matériaux et la fabrication de composites à matrice métallique. Le traitement par agitation par friction présente de nombreux avantages par rapport aux technologies traditionnelles de traitement des matériaux, en particulier par rapport aux matériaux non ferreux à bas point de fusion qui sont difficiles à traiter. Au cours des 20 dernières années, la technologie FSP a été largement étudiée et a évolué vers de nombreuses nouvelles applications, notamment les matériaux superplastiques et les composites de surface. [7]

### III. 2 : Principe du processus :

Le principe du processus de FSP est illustré à la figure III.1. Le traitement par agitation par friction peut être mis en œuvre sur des machines FSW conventionnelles. Le métal de base est traité via un outil rotatif non consommable avec une broche et un épaulement. Pendant le FSP, l'outil tourne à grande vitesse et plonge dans la pièce sous une force axiale jusqu'à ce que l'épaulement entre en contact avec la surface de la pièce, ce qui entraîne un frottement. L'outil se déplace alors par rapport à la pièce le long de la direction d'usinage. Une chaleur importante est générée par le frottement entre l'épaulement et la pièce. Le métal de base dans la zone de traitement se ramollit lorsque la température augmente sous l'action de la chaleur de friction entraînant une déformation plastique intense avec rotation et mouvement de la broche. Enfin, la matière est remoulée par flux de matière plastique. [7]

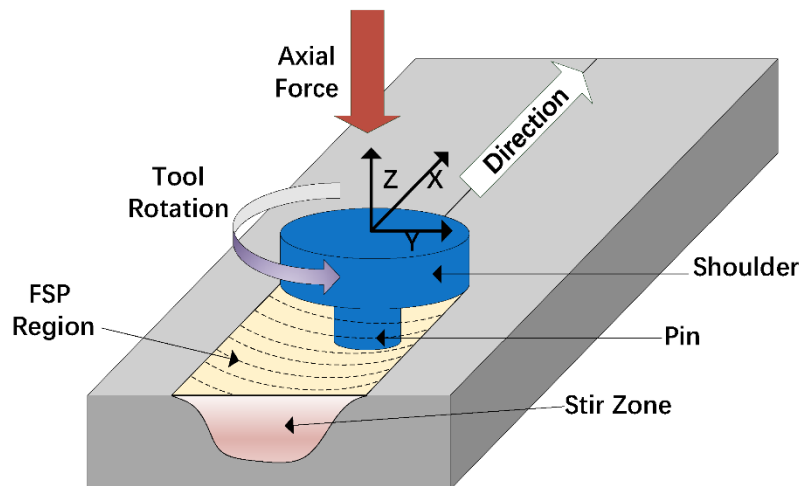


Figure III.1 : Schéma de principe du traitement par agitation par friction (FSP).

### III. 3 : Transformation de la microstructure pendant le traitement par agitation par friction (FSP)

La transformation de la microstructure au cours du FSP est due à des effets thermomécaniques. Semblable à FSW, la région de traitement obtenue par FSP est généralement divisée en une zone d'agitation (SZ), une zone affectée thermo mécaniquement (TMAZ), une zone affectée par la chaleur (HAZ) et une zone de métal de base (BM). Le SZ est principalement constitué de grains équiaxes raffinés homogènes dont les tailles sont plusieurs fois diminuées par rapport au métal de base. Au cours du processus FSP, SZ subit une température de pointe élevée et une déformation plastique sévère, ce qui conduit à une évolution de la microstructure due à la recristallisation dynamique.

La proportion de joints de grains à angle élevé (HAGB) dans la région de traitement est augmentée après FSP ce qui favorise le glissement aux joints de grains entraînant une amélioration évidente de la plasticité du métal de base. Un motif de rondelle d'oignon typique est observé dans SZ en raison de l'écoulement de la couche de matière plastique de l'avant de l'outil vers l'arrière de l'outil. Cela peut caractériser l'écoulement de la matière. Le TMAZ est affecté par le cycle thermique et l'agitation mécanique où se produisent la déformation des grains et la recristallisation partielle. Une dissolution de la phase précipitée est observée dans cette zone. Lorsque des particules de renfort sont ajoutées à la matrice métallique, la nucléation stimulée par les particules favorise la formation de grains lors de la recristallisation. Selon le mécanisme de Zener-Hollomon, les particules fines uniformément réparties peuvent inhiber la croissance des grains au cours du processus de recristallisation dynamique. Cela se produit via l'action d'épinglage sur les joints de grains entraînant un raffinement significatif de la microstructure. [7], Figure III.2.

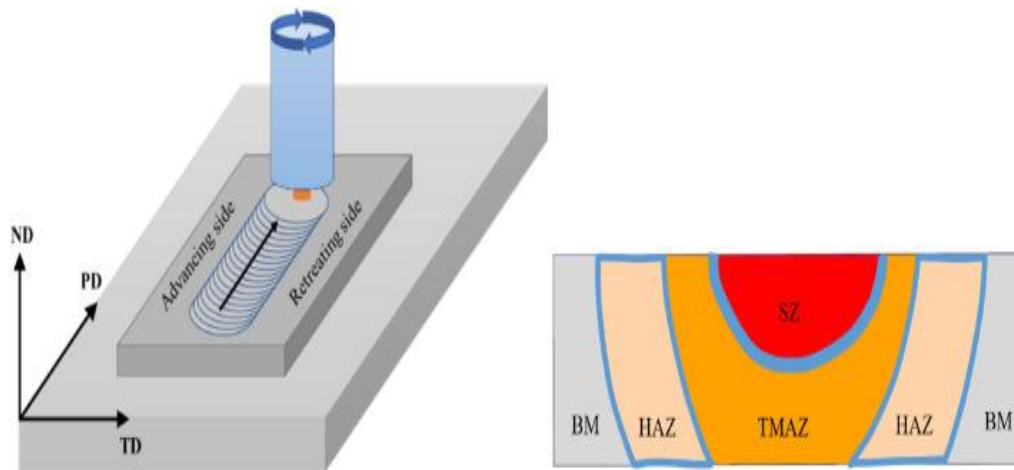


Figure III.2: Schematic diagram of FSP and different regions.

### III. 4 : Parameters de processes:

Le traitement d'agitation par friction malaxage (FSP) utilise les mêmes principes et paramètres de procédé FSW (soudage par friction-malaxage) Plusieurs paramètres influencent le mouvement de la matière et les caractéristiques microstructurales et mécaniques de la zone traité. Les paramètres les plus déterminants sont les vitesses de rotation et d'avance de l'outil. Mais aussi l'outil lui-même, sa géométrie, le matériau dont il est conçu et sa dureté. On note également d'autres paramètres comme la force appliqué sur l'outil, l'angle d'inclinaison de l'outil ou encore la profondeur de plongée de l'outil dans le matériau à traiter.

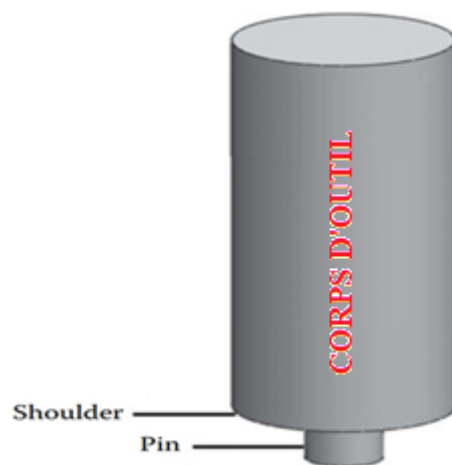
#### III. 4. 1 : Vitesse de rotation et vitesse d'avance :

La vitesse de rotation et la vitesse de déplacement de l'outil sont les paramètres les plus importants - ils peuvent contrôler l'apport de chaleur et l'écoulement de la matière plastique pendant le FSP. Cela a une influence remarquable sur la microstructure et les propriétés du matériau traité. Il y a plus de génération de chaleur avec une vitesse de rotation élevée et une faible vitesse de déplacement, ce qui peut conduire à une plus grande région traitée. À un rapport inférieur de la vitesse de rotation à la vitesse de déplacement, l'apport de chaleur diminue, affinant la microstructure et augmentant la dureté.

Une vitesse de déplacement inférieure dans le FSP multi passe peut inhiber la croissance anormale des grains. Lorsque les composites sont fabriqués via FSP, un apport de chaleur accru et une déformation plastique plus importante sont causés par la vitesse de rotation plus élevée ou la vitesse de déplacement plus faible. Ces caractéristiques sont bénéfiques pour le mélange des particules renforcées et de la matrice. Un temps d'exposition à la chaleur plus long peut favoriser la réaction in situ, ce qui entraîne la formation de plus de phases de renforcement dans la réaction in situ avec une distribution homogène dans la matrice. Toutes ces étapes améliorent les propriétés des composites. De plus, le rapport plus élevé de la vitesse de rotation à la vitesse de déplacement diminue la densité de dislocations. En conséquence, la conductivité électrique du cuivre traité augmente. [7]

### III. 4. 2 : Géométrie de l'outil

La géométrie de l'outil est l'aspect le plus influent du développement de processus. La géométrie de l'outil joue un rôle essentiel dans le flux de matière et régit à son tour la vitesse de déplacement à laquelle le FSW peut être effectué. Un outil FSW/FSP se compose d'un épaulement et d'une goupille comme illustré schématiquement à la (Figure III.3 ). Comme mentionné précédemment, l'outil a deux fonctions principales : (a) le chauffage localisé et (b) le flux de matériau. Au stade initial de la plongée de l'outil, l'échauffement résulte principalement du frottement entre la broche et la pièce. Un échauffement supplémentaire résulte de la déformation du matériau. L'outil est plongé jusqu'à ce que l'épaulement touche la pièce. Le frottement entre l'épaulement et la pièce entraîne la plus grande composante d'échauffement. Du point de vue du chauffage, la taille relative de la broche et de l'épaulement est importante,



**Figure III.3** : Morphologie schématique de l'outil FSW/FSP.

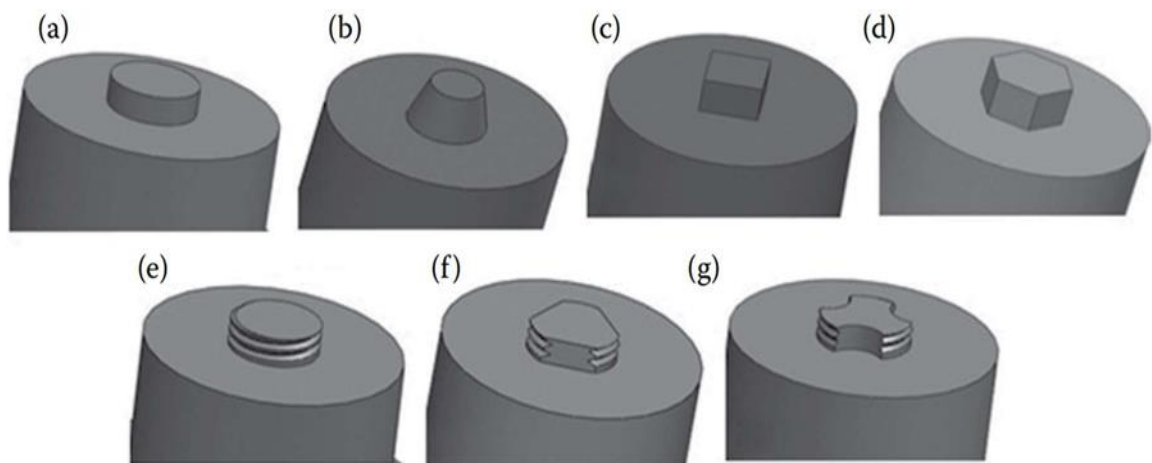
Et les autres caractéristiques de conception ne sont pas critiques. L'épaulement assure également le confinement du volume de matériau chauffé. La deuxième fonction de l'outil est de « remuer » et de « déplacer » le matériau. L'uniformité de la microstructure et des propriétés ainsi que les charges de processus sont régies par la conception de l'outil. [8]

#### III. 4. 2. 1 : Géométrie du pion « goupille » d'outil :

La géométrie de la goupille de l'outil comprend la forme et la taille de la goupille. La taille de la goupille est liée au diamètre de l'épaulement car leur taille relative affecte la génération de chaleur et la déformation plastique. Le profil de la broche régit principalement le mouvement matériel. Le flux de matériau plastifié est considérablement influencé par le type de goupille d'outil. Lors de la plongée de l'outil dans la surface de contact, la chaleur est principalement générée par le frottement et déformation plastique du matériau à l'interface goupille-pièce, qui ramollit le matériau à proximité de la goupille et déplace celui-ci autour d'elle par action de collage. Le processus FSW utilise une combinaison de procédés d'extrusion et de forgeage pour assembler les matériaux. La broche extrude le matériau ramolli autour il de mener au côté de fuite et à l'épaulement forge le matériau qui coule derrière la goupille pour sa

consolidation. La taille de l'outil et la forme de la broche ont un effet important sur la production de chaleur et le flux de matière pendant le traitement FSP. Lorsqu'un outil avec un diamètre d'épaulement plus grand est utilisé, la chaleur de friction est plus concentrée et la déformation plastique du matériau est plus sévère. Il en résulte une microstructure stable et un meilleur raffinement des particules de seconde phase.

Différents profils de goupilles sont utilisés dans les outils FSW/FSP, tels que les goupilles cylindriques et cylindriques coniques (c'est-à-dire le tronc de cône, le carré, l'hexagone, les goupilles cylindriques filetées, les goupilles à came filetées et les goupilles à trois cannelures filetées, comme l'illustre Dans la figure III.4. Chaque profil remplit des fonctions différentes en termes de mouvement et de mélange des matériaux. Les goupilles cylindriques et cylindriques coniques déplacent la matière autour de la goupille, tandis que les goupilles filetées la déplacent autour de la goupille. La goupille filetée déplace la matière autour de la goupille ainsi que dans la direction verticale. Les goupilles carrées, hexagonales et à came produisent une action pulsatoire grâce à leurs faces planes lors de l'agitation de la matière en mouvement. Un bon mélange est obtenu par l'action pulsatoire de la goupille, ce qui améliore la résistance du joint. En même temps, les profils de goupilles autres que les goupilles. En même temps, les profils de goupilles autres que cylindriques ont tendance à s'user avec le temps, ce qui conduit à une forme conique. à une forme conique. En cas d'utilisation prolongée, les goupilles profilées s'usent et acquièrent une forme cylindrique ou cylindrique conique. Cylindrique. Par conséquent, pour les longues séries et un grand nombre de séries avec la même broche, il convient d'utiliser un profil de broche optimal qui peut conserver sa forme. Il faut donc utiliser un profil de goupille optimal, capable de conserver sa forme et d'assurer une meilleure action d'agitation. [9]



**Figure III.4 :** Différents profils de broches d'outils FSW/FSP : (a) cylindrique, (b) cylindrique conique (c'est-à-dire le tronc d'un cône), (c) carré, (d) hexagone, (e) cylindrique fileté, (f) came fileté, et (g) triple cannelure fileté.

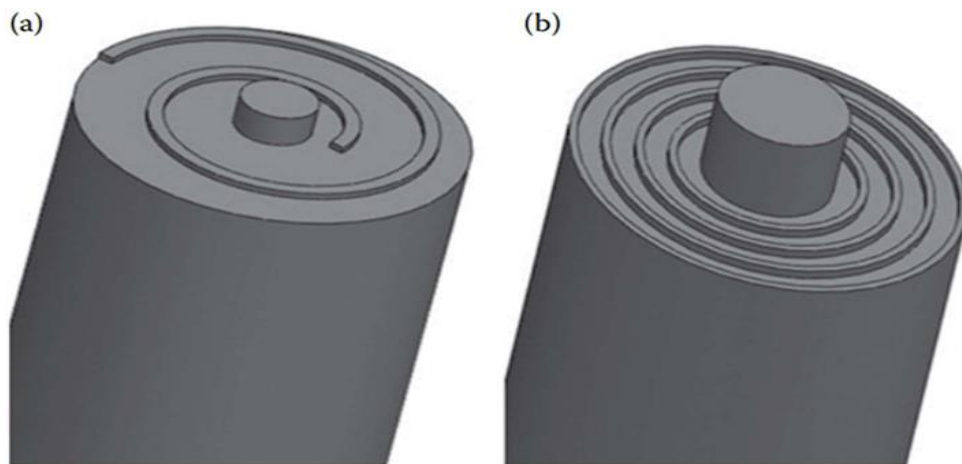
### III. 4. 2. 2 : Diamètre de l'épaulement

Dans FSW/FSP, la chaleur est générée par le frottement et la déformation plastique du matériau et l'épaulement produit de la chaleur par frottement et glissement du matériau en dessous. Un grand diamètre d'épaulement génère plus de friction et augmente par conséquent l'apport de

chaleur. Le collage du matériau est responsable de flux de matière dans la zone agitée. Le diamètre de l'épaule de l'outil régit la génération de chaleur par frottement entre l'épaule de l'outil et la pièce à usiner car il augmente la zone de contact. Aussi, grand diamètre d'épaule affecte une grande partie de la pièce, ce qui entraîne une augmentation de la HAZ entraînant une détérioration de la propriété mécanique post-soudure. Une génération de chaleur excessive n'est pas souhaitable car elle dégrade la qualité du joint soudé par grossissement du grain et dissolution du précipité de renforcement (en cas de matériaux durcissant par précipitation) et la perte de travail à froid.

On observe également que le plus petit outil le diamètre de l'épaule conduit à moins de chaleur de frottement et, par conséquent, la consolidation du métal soudé peut ne pas être approprié dans la SZ. Il affecte par conséquent la résistance du joint en raison d'un ramollissement insuffisant de matériau causant un mauvais mélange de matériaux dans SZ. De toute évidence, un diamètre d'épaule optimal est requis pour générer suffisamment de chaleur et favoriser un mouvement correct du matériau, minimiser le couple et la force transversale et produisent une petite HAZ.

Le diamètre de l'outil est important car l'épaule génère la majeure partie de la chaleur et il contient le matériau extrudé à partir d'AS. De plus, l'épaule de l'outil forge le matériau qui coule derrière la goupille empêchant le matériau plastifié de s'échapper hors de la zone de soudure et par conséquent assurant une bonne consolidation du joint. Il a été établi par plusieurs constatations que le diamètre de l'épaule ne doit être ni trop petit ni trop grand. Par exemple, Padmanaban et Bal asubramanian (2009) dans leur enquête ont considéré trois diamètres d'épaule (15, 18 et 21 mm) et a démontré que le joint fabriqué à l'aide d'un diamètre de 18 mm donnait un résultat sans défaut et fin. [9] ; Figure III.5.



**Figure III.5 :** Modèles d'épaule de l'outil FSW : (a) en volute et (b) concentrique.

### III. 5 : Angle d'inclinaison de l'outil :

Pendant le FSW, un petit angle d'inclinaison de l'outil peut former une région traitée avec moins de défauts via une charge d'impact axiale et un flux de matériau accru. De nombreux chercheurs du FSP se sont inspirés de ce concept pour que les particules renforcées se

répartissent plus uniformément dans la matrice. L'angle d'inclinaison de l'outil dans le procédé FSP est généralement inférieur à 5°

### III. 5. 1 : Efforts appliqués :

Les efforts appliqués sont de trois types :

- Effort appliqué en phase de pénétration.
- Effort appliqué en phase transitoire d'échauffement.
- Effort appliqué en phase de soudage.

### III. 6 : Avantages de la technique FSP

Les atouts recensés sur cette technique sont : [10]

- La durée du traitement en un point est courte conduisant à une densification et une homogénéité de la microstructure
- Le contrôle précis de la microstructure et des propriétés mécaniques de la zone traitée est obtenu en optimisant la conception de l'outil, les paramètres du procédé et les paramètres connexes de refroidissement/chauffage.
- La profondeur de la zone traitée peut être réglée en changeant la longueur de la broche de l'outil. Celle-ci peut varier entre plusieurs centaines de micromètres et des dizaines de millimètres.
- La technique est écologique (sans utilisation de gaz néfaste pour l'environnement, sans bruit) et économiquement satisfaisante (économe en énergie, la chaleur provient de la friction et de la déformation plastique).
- Aucune modification de la forme et la taille des composants traités.

# Chapitre IV

---

**Démarche expérimentale**

---

## Chapitre IV : Méthode expérimentale

### IV. 1 : Introduction :

L'alliage d'aluminium est un matériau d'ingénierie important en raison de ses bonnes propriétés mécaniques et de sa recyclabilité. Il a été recyclé depuis sa première production commerciale et sa qualité n'est pas altérée après recyclage. L'alliage d'aluminium 6XXX (un alliage d'aluminium avec un alliage majeur de magnésium et de silicium) peut être traité thermiquement, a une bonne résistance à la corrosion, une bonne extrudabilité et, par conséquent, il a été largement utilisé dans les meubles, l'automobile, les composants structurels et bien d'autres. Dans certaines applications, l'amélioration des propriétés du matériau est nécessaire et cela peut être fait en affinant la granulométrie du matériau. Ces derniers temps, il existe une technique économe en énergie et respectueuse de l'environnement qui peut améliorer les propriétés du matériau en affinant la granulométrie du matériau, et cette méthode est connue sous le nom de traitement par friction-malaxage (FSP). Le FSP est une technique d'ingénierie de surface qui a été développée à partir du soudage par friction-malaxage (FSW) et inventée par le Welding Institute (TWI) en 1991. Le FSP modifie les propriétés des matériaux en utilisant un outil d'agitation par friction spécialement conçu pour générer de la chaleur de friction avec des paramètres de traitement optimaux.

Les paramètres du FSP sont très importants car ils peuvent affecter les résultats de ce processus.

Selon des études antérieures, les paramètres les plus importants qui ont été étudiés sont la vitesse de rotation et le débit d'alimentation car ils contrôlent la génération de chaleur qui entraîne le flux de plastification et de matière au cours du processus.

L'alliage d'aluminium 6063 (AA 6063) a une bonne soudabilité et a été largement utilisé dans FSW et FSP. Il a été noté que la production de matériaux FSP avec les performances nécessitent des paramètres de traitement appropriés pour une génération de chaleur suffisante.

### IV. 2 : Matériau et équipements utilisés

#### IV. 2. 1 : Matériaux

Le matériau utilisé dans ce travail est l'alliage d'Aluminium de série 6000 de type AA 6063 sa composition chimique et les propriétés mécaniques indiquée dans le tableau IV.1 et tableau IV.2, sous forme de tôle (250x120x5) mm<sup>3</sup> pour un traitement par friction malaxage, la tôle est représentée dans la figure IV.1.

**Tableau IV.1:** Chemical composition of the AA 6063.

Elément	Zn	Mg	Cu	Si	Fe	Al
wt%	0.0019	0.869	0.010	1.555	0.259	97.214

**Tableau IV.2 :** Propriétés mécanique de AA 6063.

Résistance à la traction	Limite élasticité	Contrainte de cisaillement maximale	Allongement (16 mm (1/16 po))
185MPa	145MPa	115MPa	12

**Figure IV.1 :** Tôle en alliage d'aluminium AA 6063.

#### IV. 2. 2 : Machine utilisée :

Les essais expérimentaux ont été réalisés au niveau de l'atelier mécanique de l'Institut de Technologie d'université **Mohamed Boudiaf de M'sila** à l'aide d'une fraiseuse de marque **almo (FV1.5)**, illustrée sur la figure. IV.2.

La fraiseuse utilisée a les caractéristiques suivantes :

- Vitesse d'avance maximale :  $V_a \text{ max} = 315 \text{ mm /min}$ .
- Vitesse de rotation maximale : 2000 tr/min.
- Plaque support de longueur maximale :  $L \text{ max} = 1000 \text{ mm}$ .



Figure IV.2 : Fraiseuse vertical PMO « almo ».

### IV. 2. 3 : L'outil de malaxage par friction :

L'outil de FSP utilisé dans cette étude était un outil rotatif non consommable en acier rapide (HSS) illustré à la Figure IV.3. La goupille de l'outil est un cylindre avec un diamètre d'épaulement de 16 mm, une longueur de pointe de broche de 4 mm et un rapport D/d de 4.



Figure IV.3 : L'outil FSP en HSS Cr5.

### IV.3 : Montages utilisés pour le traitement

Dans notre travail on utilise une fraiseuse verticale automatique pour effectuer notre procédé FSP (friction stir processing) le traitement par friction malaxage).

Le montage nécessaire pour l'élaboration du procédé FSP est représenté dans la Figure IV.4 et pour cela on fixe la tôle d'aluminium sur la table de la fraiseuse à l'aide d'un bridage, avec le montage de l'outil qui doit être fixe dans le mandrin de la fraiseuse à l'aide d'un porte-outil.

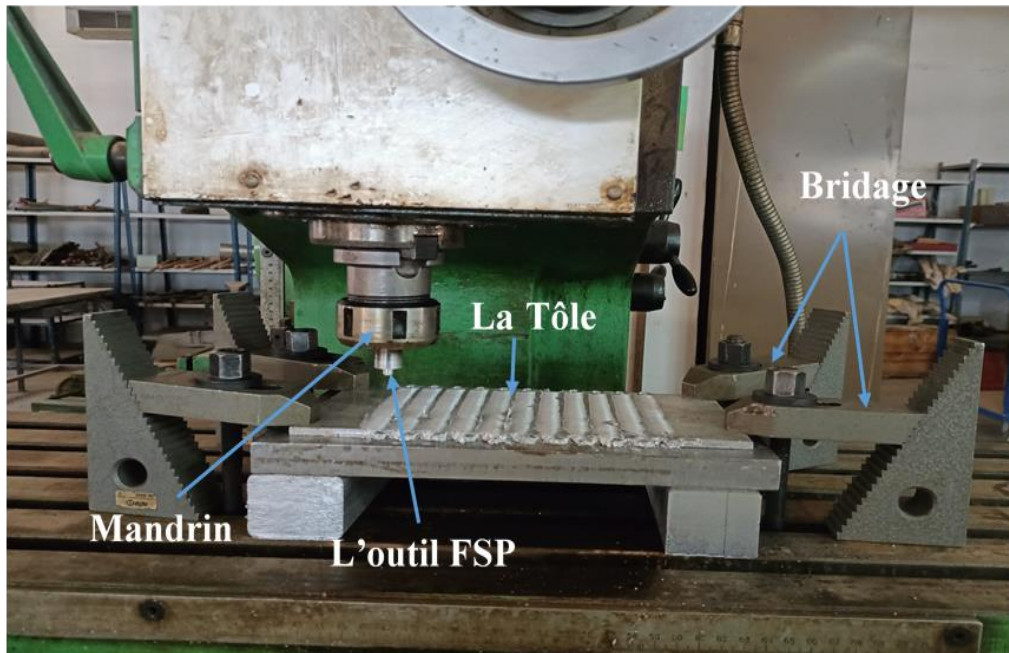


Figure IV.4 : Le montage expérimental.

### IV.4 : Paramètres de FSP

Les paramètres de FSP sont représentés dans le Tableau IV.3. Les valeurs maximales sont dictées par la capacité de la machine et l'usure prématurée de l'outil. De plus, nous avons travaillé sur trois vitesses de rotation d'outils différentes en gardant la vitesse d'avance constante de 40 mm/min.

Tableau IV.3 : Paramètres de FSP (vitesse de rotation – vitesse d'avance)

Essai $N^{\circ}$	Vitesse de rotation [tr/min]	Vitesse d'avance V [mm/min]	Angule de tilt( $\theta^{\circ}$ )
01	710	40	2°
02	1000	40	2°
03	1400	40	2°

## IV. 5 : Les étapes d'élaboration du procédé FSP :

### IV. 5. 1 : La pénétration de l'outil :

Pendant que l'outil tourne une vitesse de rotation de 1400 rpm, le pion de l'outil est forcé dans la tôle (pénétrant dans la tôle pour une épaisseur de 4 mm) et l'épaulement entre en contact avec la surface de la tôle. Le frottement entre l'outil et la surface de la tôle génère une chaleur qui ramolli le matériau (AA6063) sans atteindre la température de fusion du matériau (une déformation plastique du matériau).

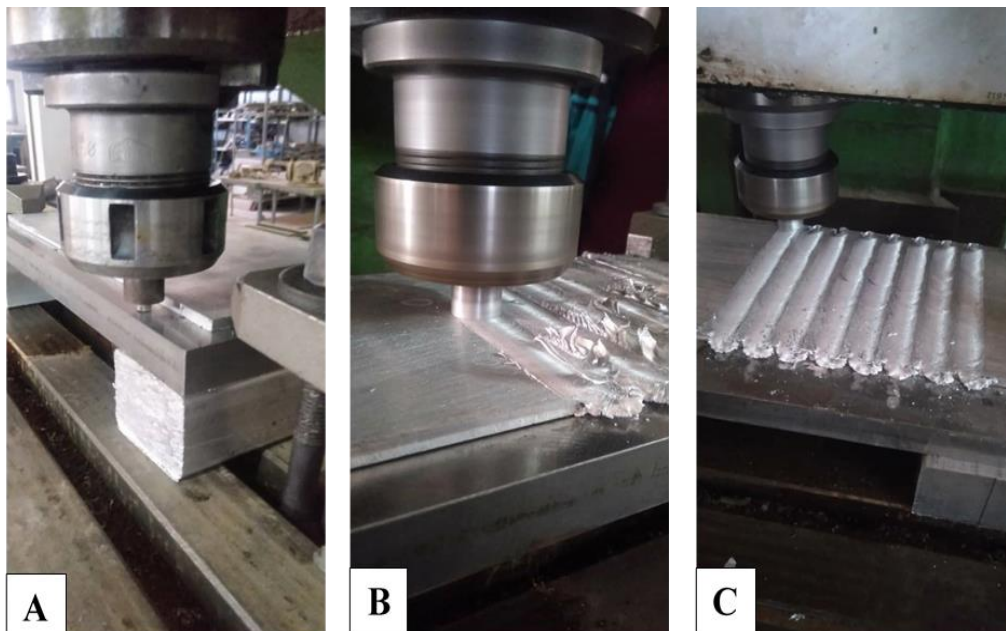
### IV. 5. 2 : Le déplacement de l'outil :

L'outil FSP rotatif est transversal selon la direction souhaitée avec une vitesse d'avance de 40 mm/s selon le long de la tôle. La rotation du pion fait l'action d'agitation du métal de base ramolli et un chauffage est produit par le frottement de l'épaulement rotatif et la surface de la tôle ce qu'il rend le matériau subi une déformation plastique intense produisant une dynamique structure cristalline fine.

### IV. 5. 3 : Le dégagement de l'outil :

À la fine de la zone traitée (extrémité de la tôle) l'outil remonte verticalement à la même vitesse de rotation initiale.

Les étapes d'élaboration sont schématisées dans la Figure IV.5.



**Figure IV.5 :** Les étapes d'élaboration. A) Pénétration de l'outil. B) Déplacement de l'outil selon la transversal de la tôle. C) Dégagement de l'outil.

---

## IV. 6 : Les surfaces traitées selon chaque configuration

Le tableau IV.4 illustre la surface du processus d'agitation appliqué à l'alliage d'aluminium AA 6063 à différentes vitesses de rotation. Les surfaces des zones agitées sont décrites comme lisses et uniformément mélangées. L'analyse de ces surfaces après l'utilisation d'un traitement d'agitation par friction révèle un motif synchronisé dans les zones agitées

A une vitesse de rotation de 1400 rpm, le fond de la zone agitée pénètre bien sans aucune fissure. La surface traitée à cette vitesse présentait un certain niveau de rugosité, qui est probablement influencé par la chaleur générée lors de l'agitation causée par la vitesse de rotation

Lorsque la vitesse de rotation a été réduite de 1400 à 710 tr/min, la chaleur générée lors de l'agitation a augmenté la plasticité du matériau, le mettant dans un état hautement déformable. Cela a conduit à une diminution de la résistance interne, car les zones les plus faibles du matériau ont été agitées, ce qui a entraîné une rugosité de surface moindre dans la zone agitée. Cette diminution de la rugosité de surface est corrélée à la diminution de la vitesse de rotation.

À l'inverse, l'augmentation de la vitesse de rotation de 710 à 1400 tr/min a entraîné une augmentation de la génération de chaleur lors de l'agitation. Cela a provoqué des déformations plus importantes dans le matériau, entraînant une déformation plastique, une résistance interne réduite et, par conséquent, une rugosité de surface moindre dans la zone agitée.

En résumé, la vitesse de rotation pendant le traitement d'agitation par friction de l'alliage d'aluminium AA 6063 affecte les caractéristiques de surface de la zone agitée. Des vitesses de rotation plus élevées génèrent plus de chaleur, ce qui entraîne une plasticité accrue, une résistance interne réduite et des surfaces agitées plus lisses. Des vitesses de rotation plus faibles entraînent un niveau de résistance interne plus élevé, entraînant une rugosité de surface accrue dans la zone agitée.

Tableau IV.4 : Les surfaces traitées selon chaque configuration

Les configurations	Surfaces des zones traitées
710 tr/min	
1000 tr/min	
1400 tr/min	

#### IV. 7 : Préparation des échantillons :

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques globales de la zone traitée, des essais de traction monotone sur des éprouvettes malaxées prélevées dans le plan transversal de la zone de traitement sont réalisés. Les caractéristiques géométriques de ces éprouvettes en sens transversal sont données sur la Figure (IV.6).

**Le découpage des zones traitées :** pour le découpage des zones traitées on a utilisé une machine électroérosion par fil, au niveau d'atelier d'usinage du MEI.

Le découpage a été fait dans le plan transversal de la zone de traitement par friction-malaxage.

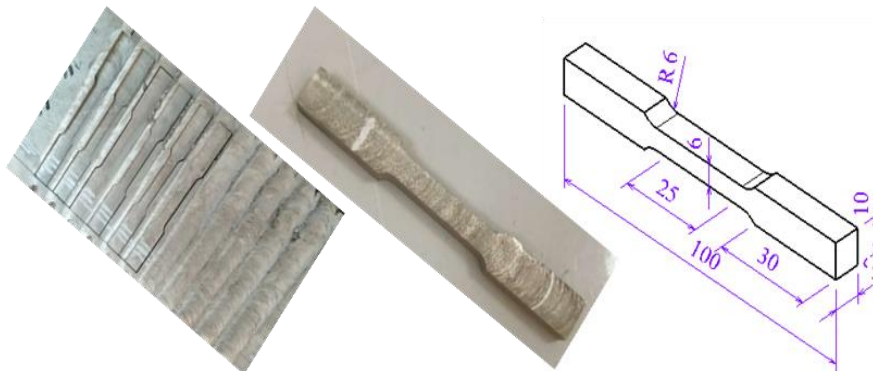


Figure IV.6 : Les caractéristiques géométriques

## IV. 8 : Caractérisation mécanique :

### IV. 8. 1 : Essai de traction :

Les essais de traction ont été réalisés à température ambiante au laboratoire de département de génie mécanique de m'sila. Sur une machine de traction électromécanique de type GUNT WP 310 (Figure IV.7).

Les essais de traction s'effectuent à titre comparatif sur des échantillons non normalisés. Notre but s'était de faire une comparaison entre le comportement des échantillons traite vis-à-vis d'un échantillon non traité de même taille prise comme échantillon référence. Les conditions opératoires de traction (écart entre mors, vitesse de l'essai) appliquées sur tous les échantillons traite et l'échantillon référence sont identiques.



Figure IV.7 : Banc d'essais de traction (GUNT WP 310).

### IV. 8. 2 : Essai de micro dureté :

Pour le test de dureté, nous avons utilisé des testeurs de dureté automatisés WILSON HARDNESS de type ZWICK/Roell, illustrés à la Figure IV.8.



**Figure IV.8:** Micro durometer (WILSON HARDNESS type ZWICK/Roell)

### IV. 8. 3 : Essais d'impact

Les essais d'impact ont été effectués à température ambiante à l'aide d'une machine d'essai d'impact de type pendule, Figure, d'une capacité maximale de 300 J. Des éprouvettes d'impact Charpy ont été préparées conformément aux normes ASTM E23-04. L'essai Charpy a été réalisé avec une machine d'essai d'impact pour déterminer la quantité d'énergie absorbée à la rupture, qui a été enregistrée. L'énergie absorbée est définie comme la résistance aux chocs du matériau.

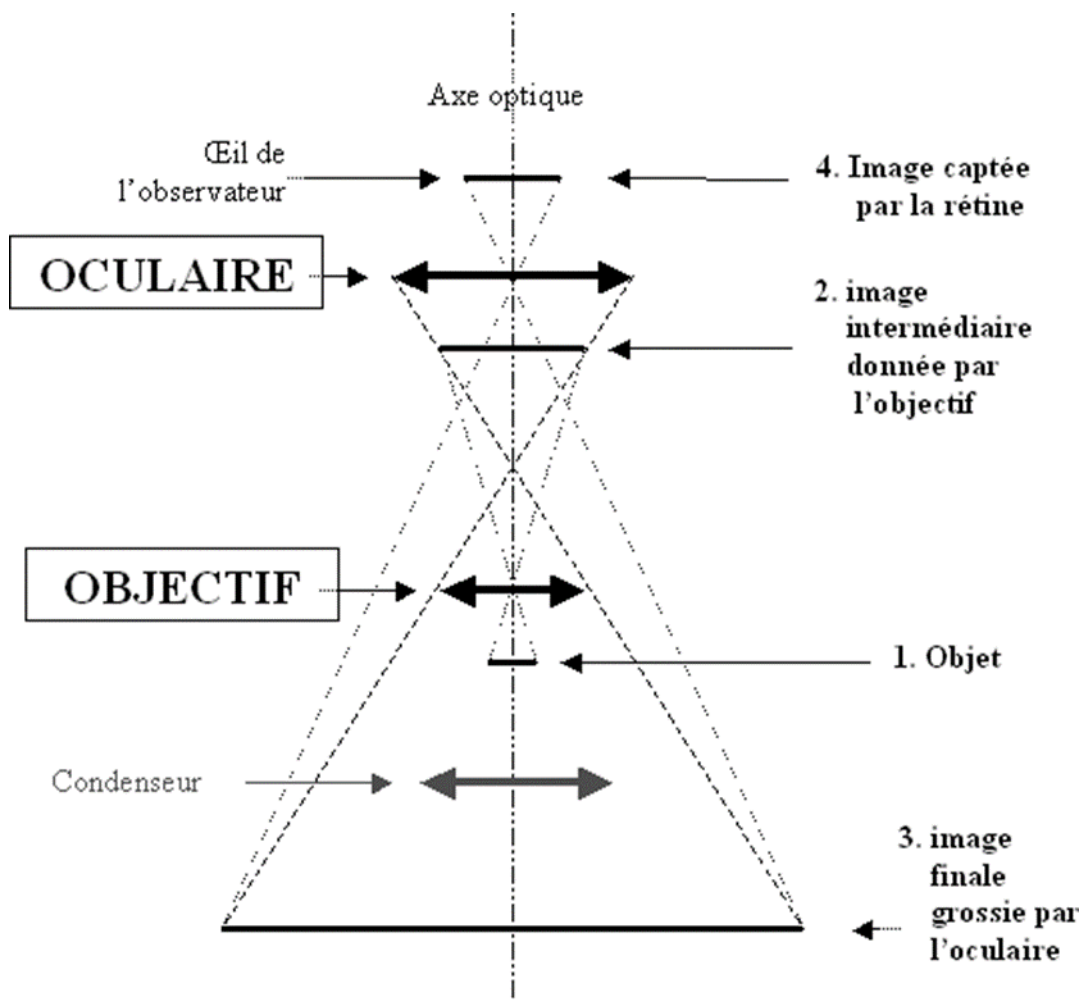


**Figure IV.9 :** Charpy impact teste machine.

## IV. 9 : La caractérisation optique :

### IV. 9. 1 : La Microscopie Optique :

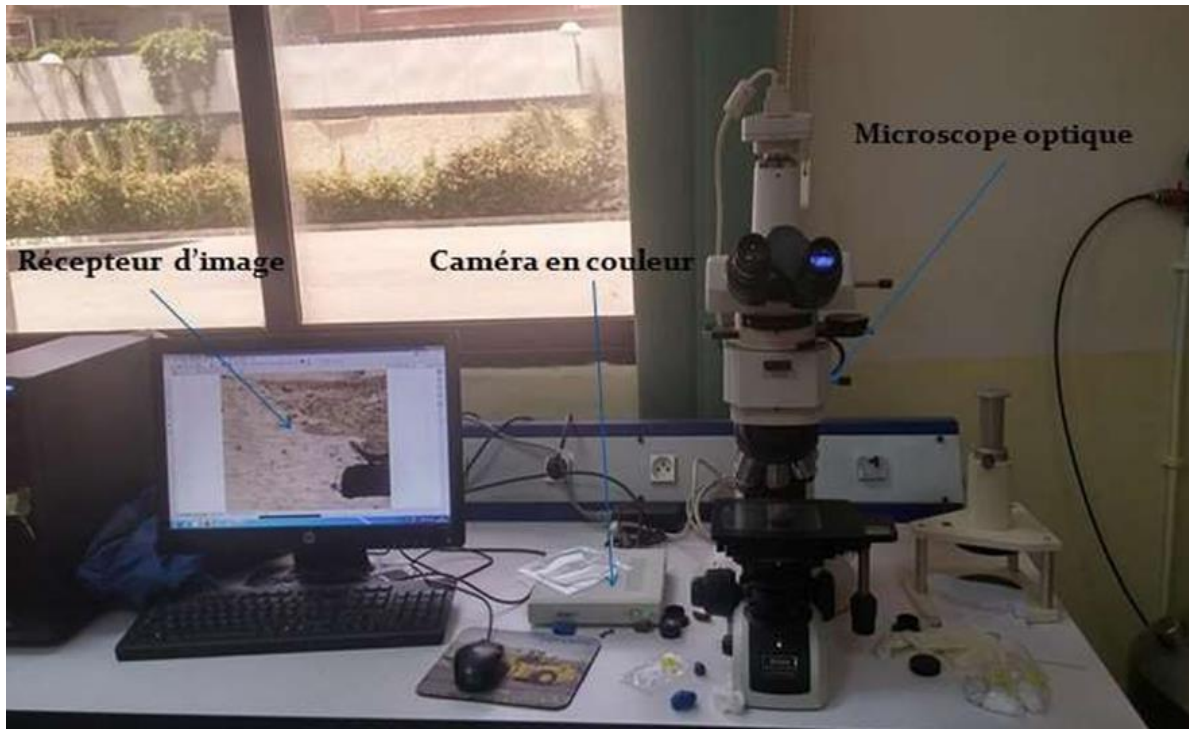
Il s'agit d'une observation de la surface moyennant des agrandissements allant de 50 à 1000. Dans un microscope optique la lumière (composée de photons) passe à travers un condenseur enfin lumineux en un rayon de lumière. La lumière ainsi focalisée traverse l'échantillon. La lentille de l'objectif permet un premier agrandissement (entre  $\times 5$  et  $\times 100$ ) puis la lentille l'oculaire apporte un deuxième grossissement (en général  $\times 10$ ) et l'œil reçoit enfin l'image agrandie. L'agrandissement final correspond au produit des deux grossissements des deux lentilles de verre la figure 3.8 représente le principe d'un microscope optique.



**Figure IV.10 :** Schéma du principe d'un microscope optique Nikon Eclipse.

La qualité de l'image dépend du pouvoir de résolution du microscope qui est en grande partie liée à la qualité des lentilles grossissantes et également à la longueur d'onde de la lumière ( $0.4\mu\text{m} - 0.7\mu\text{m}$ ). La limite de résolution du microscope standard est de  $0.22\mu\text{m}$ , ce qui permet au final un agrandissement possible de 1000 fois sans perte de qualité. En dessous de cette limite de résolution le microscope optique ne permet pas d'avoir une image correcte.

L'examen micrographique des échantillons a été effectué à l'aide d'un microscope optique Nikon ECLIPSE LV100ND. Les clichés sont obtenus par l'intermédiaire d'une caméra en couleur Nikon. Figure IV.11.



**Figure IV.11** : Microscope optique pour caractérisation structurale

## IV. 10 : Résultats et discussion

### IV. 10. 1 : Essai de traction

Nous avons utilisé GUNT WP 310 pour trouver la limite d'élasticité, la résistance à la traction, le pourcentage d'allongement des surfaces traitées par FSP dissimilables. Six éprouvettes sont testées pour chaque vitesse de rotation et la moyenne des résultats est présentée sur la figure IV.13. Comme nous pouvons le voir, toutes les surfaces ont une limite d'élasticité, une résistance à la traction et un pourcentage d'allongement supérieurs à ceux du matériau de base.

Tous les joints sont fracturés le long du côté reculant, comme le montre la figure IV.12. Cela s'est produit en raison de la plus petite limite d'élasticité et de la valeur de dureté minimale du matériau traité par rapport au matériau de base côté avance AA6063.

L'influence de la vitesse de soudage sur les propriétés de traction des surfaces FSP est déduite par le test de traction et nous avons vu les résultats dans la figure IV.13 et le spécimen dans la figure IV.12, et donc, en fonction des trois vitesses de rotation, nous avons trouvé un spécimen de 1400 tr/min à une propriété de traction supérieure. Ceci est le résultat de l'effet d'un apport de chaleur plus élevé lors du soudage car il en résulte une bonne ductilité.

Cela montre qu'une augmentation de la vitesse de rotation de l'outil augmente les propriétés de traction d'un joint. L'observation générale était que la nature essentielle de

l'utilisation d'une vitesse de rotation plus élevée pour la fourniture bon apport calorifique, les surfaces obtenues présentent ainsi une bonne résistance à la traction. Ceux-ci révèlent que la ductilité de la zone d'agitation est inférieure à celle des matériaux de base.

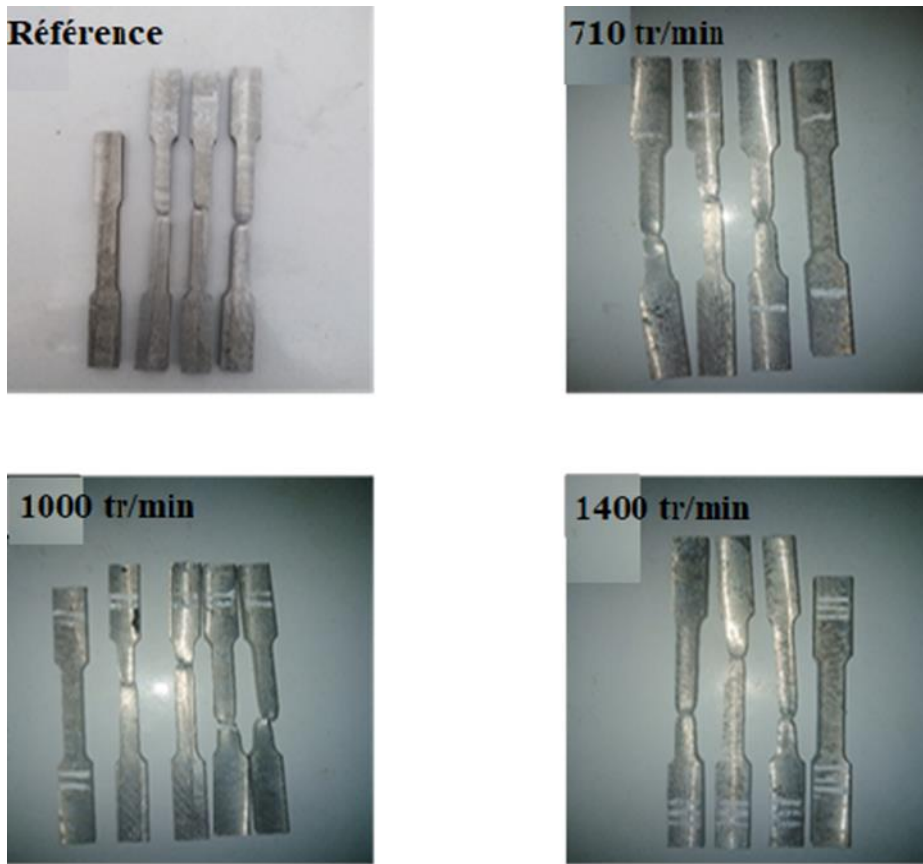


Figure IV.12 : Échantillons AA6063 testés en traction

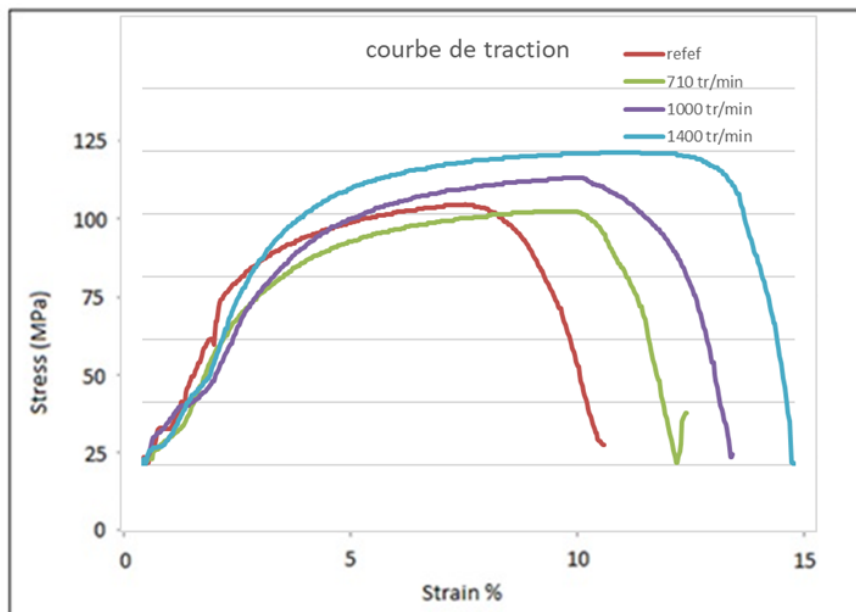


Figure IV.13 : Courbes de force par rapport à la déformation pour l'aluminium AA 6063

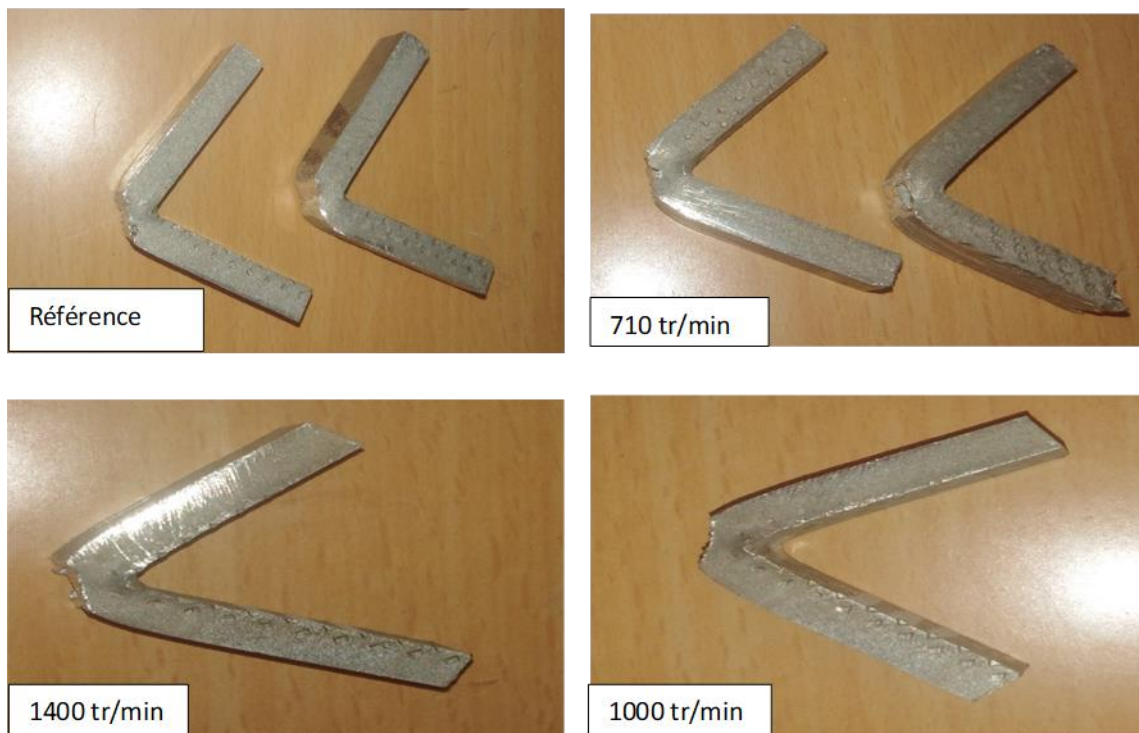
### IV. 10. 2 : Essais d'impact :

Des échantillons de sous-taille de dimensions (55x10x5) mm<sup>3</sup> ont été préparés pour mesurer la résistance aux chocs des échantillons traités par FSP (Friction Stir Processing) à trois vitesses de rotation de l'outil, puis comparés à la résistance aux chocs de l'échantillon non traité. Le tableau IV.5 indique qu'une augmentation de la vitesse de rotation de l'outil entraîne une dégradation de la résistance aux chocs des échantillons traités en raison de la forte ductilité produite par la forte chaleur engendrée à la zone de friction.

La résistance aux chocs des échantillons non traités est de 0.32 Joule/mm<sup>2</sup>, tandis qu'elle est de 0,30 Joule/mm<sup>2</sup> pour l'échantillon traité à 710 tr/min, de 0,29 Joules/mm<sup>2</sup> et de 0,28 Joule/mm<sup>2</sup> pour les échantillons traités à 1000 tr/min et 1400 tr/min respectivement.

**Tableau IV.5** : Résultats de résistance aux chocs

VITESSE DE ROTATION DE L'OUTIL (RPM)	RÉSISTANCE AUX CHOCS (J/mm <sup>2</sup> )
Référence	0.32
710 tr/min	0.30
1000 tr/min	0.29
1400 tr/min	0.28

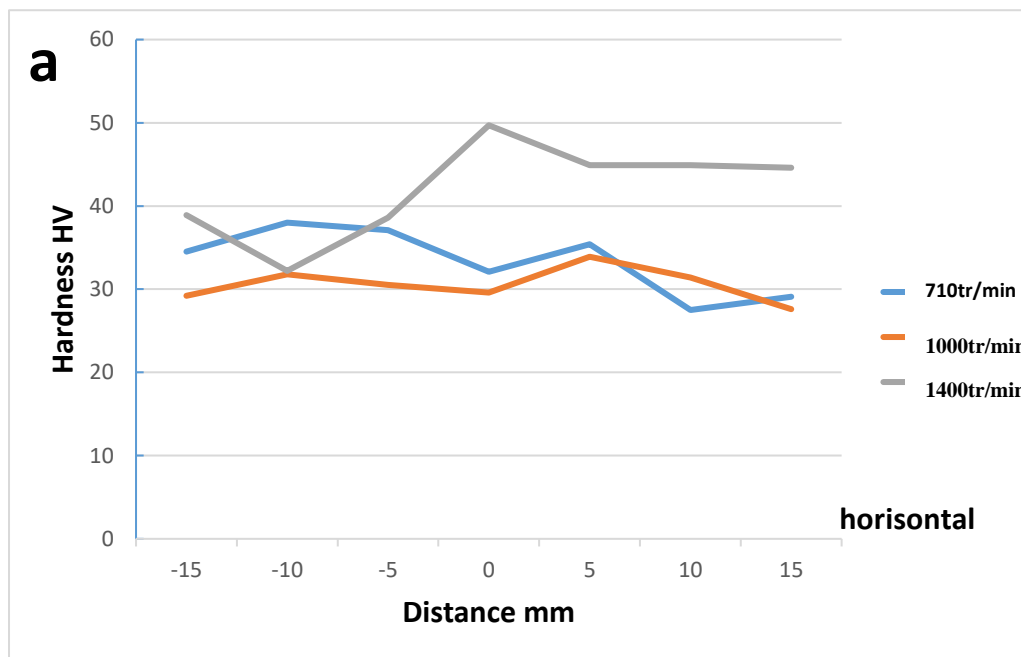


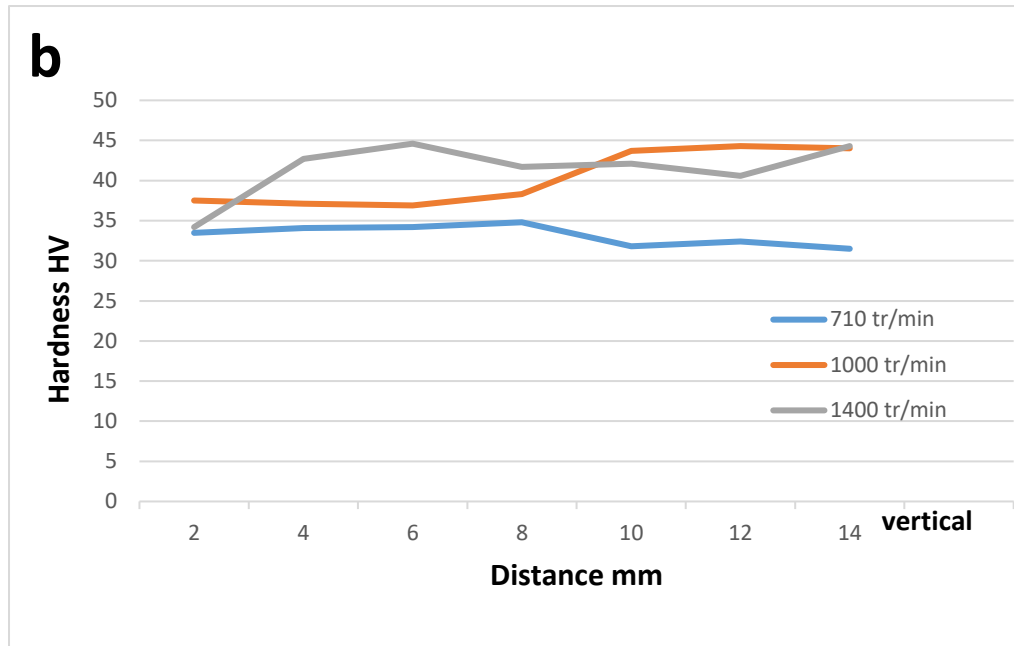
**Figure IV.14** : Spécimen d'essai de choc.

### IV. 10. 3 : Test de micro dureté :

La micro-dureté de la zone de malaxage est testée pour les échantillons traités à trois vitesses de rotation de l'outil et comparée à la dureté de l'échantillon non traité, Pour les échantillons non traités et traités, la dureté est mesurée le long de l'axe vertical (du haut vers le bas) et de l'axe horizontal (de la ligne médiane du traitement jusqu'à l'extérieur de la zone malaxage). On observe que les valeurs de dureté sont plus élevées au centre de la zone remuée et qu'elles diminuent en s'éloignant de la ligne médiane et de haut en bas sur l'axe vertical. Lorsque la vitesse de rotation augmente, elle tend à entraîner une augmentation moyenne de la dureté.

La dureté à 710 tr/min est observée à 34.8 HV au sommet de la ligne médiane de la zone malaxage, puis elle diminue à 31.8 HV vers l'extérieur de la zone remuée, la même diminution est observée sur l'axe vertical jusqu'à 31.5 HV au bas de la zone de malaxage. La dureté des échantillons traités à 1000 tr/min est observée à 38.3 HV avec le même phénomène de diminution que l'échantillon traité à 710 tr/min, avec des valeurs de 37.5 HV à l'extérieur de la zone remuée sur l'axe horizontal et 36.9 HV au bas de la zone remuée sur l'axe vertical. Une amélioration maximale de la dureté a été observée pour l'échantillon traité à 1400 tr/min avec une valeur de dureté de 44.6 HV au sommet de la ligne médiane de la zone remuée, et la dureté diminue à 42.7 HV à l'extérieur de la zone remuée sur l'axe horizontal et à 40.6 HV au bas de la ligne médiane de la zone de malaxage.



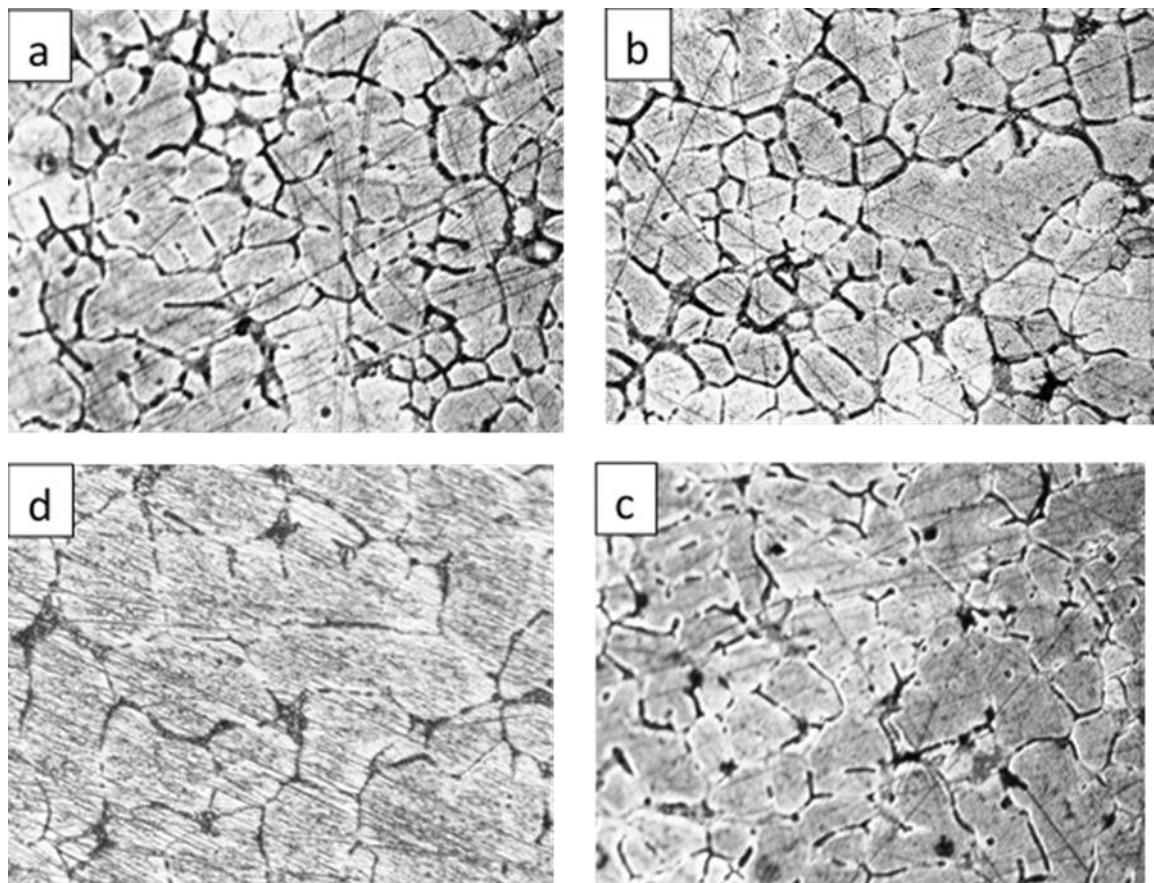


**Figure IV.15 :** Courbe de Variation de dureté de la zone d'agitation.(a) micro dureté horizontale, (b) micro dureté verticale

#### IV. 10. 4 : Microstructure :

Le métal de base, l'alliage AA 6063 dans son état initial avec une surface non traitée, présente des grains globulaires d'une taille uniforme, comme illustré dans la Figure IV.16 a. La zone de malaxage (SZ) est formée lors du traitement par friction stir, ce qui conduit à une structure de grains plus fine par rapport au métal de base. Les figures IV.16 (b, c et d) montrent des microstructures typiques des zones traitées par FS développées en utilisant différents niveaux de paramètres de vitesse de rotation de l'outil.

De plus, la taille des grains présente une diminution en dimension de la zone traitée par FSP. Ces résultats indiquent que la taille des grains de l'alliage AA 6063 à l'état initial est d'environ 45  $\mu\text{m}$  et que la zone traitée montre un affinement significatif des grains après le traitement par FS. Il est observé à partir de ces figures que, lorsque la vitesse de rotation de l'outil diminue de 1400 à 710 tr/min, la taille des grains augmente de 9 à 17  $\mu\text{m}$ . Les grains les plus fins sont observés dans la couche supérieure de la région traitée par FSP, là où l'épaulement est en contact direct avec la pièce. Cette variation significative de la taille des grains le long de la direction verticale de la région traitée par FSP est due à la variation du taux de déformation et de la température du haut vers le bas.



**Figure IV.16 :** Microstructure of the Nugget zone (Stir Zone nugget).

# **Conclusions générales**

### Conclusions générales :

Cette étude est une tentative qui a été faite pour étudier l'effet des vitesses de rotation de l'outil sur la formation de la surface de traitement par friction-malaxage de traité 6063. De cette enquête, ce qui suit conclusion sont dérivés :

- 1- Aluminium alliage AA6063 peut être avec succès utilisé pour friction remuer processus pour outil rotationnel vitesses variant depuis 710 tr/min pour 1400 tr/min.
- 2- Il est évident de le données obtenu ce traitement par friction par malaxage positivement affecte la propriété de le AA 6063 alliage d'aluminium.
- 3- Le AA 6063 aluminium alliage montre mieux propriétés quand traité à 1400 tr/min.
- 4- Il y a des relations entre l'outil rotatif vitesse et la qualité du processus.
- 5- La dureté est de haute valeur dans la zone d'agitation et il augmenté avec l'augmenter rotation parce que le SZ est bien dans le grain taille.
- 6- La traction, rendement force augmenter avec l'augmenter rotation vitesse, mais et élongation diminuer et toujours inférieur que l'élongation de base métal.
- 7- Les résultats montrer que l'incidence force augmente du tout le trop rotationnel vitesse comme par rapport au des métaux de base.

# Référence

## Références :

- [1] Michel Colombié et coll. Matériaux Métalliques. 2<sup>ème</sup> édition. [2001,2008]. Dunod. Paris.
- [2] Ali Debih. Thèse de Doctorat. Contribution à l'Etude de la Fatigue des Alliages Légers. Université Ferhat Abbas-Setif-1.
- [3] Said BenSaada- N. BenDrihem- Oumaima BenSaada. Science Des Matériaux. 2<sup>ème</sup> Partie.
- [4] Ouadouri Chafia. Touati Ouahiba. These de Master. Etude de la corrosion de l'alliage AIS10Mg en présence d'un champ magnétique de faible intensité. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou 2016 /2017.
- [5] Guy Murry. Aide-mémoire. Metallurgie . 2<sup>ème</sup> édition. [2004,2010]. Dunod. Paris.
- [6] Raymond Langevin. Guide D'auto-Apprentissage pour les opérateurs en traitement thermique. Le Comité Sectoriel de La Main-D'œuvre Dans La Fabrication Métallique Industrielle [PERFORM]. Septembre [2015]. Québec. Canada.
- [7] Research Status and Prospect of Friction Stir Processing Technology by Kan Li, Xuemei Liu \* and Yi Zhao. Received: 31 December 2018 / Revised: 10 February 2019 / Accepted: 16 February 2019 / Published: 19 February 2019
- [8] Mishra, R.S. and Z.Y. Ma, 2005. Friction stir welding and processing. Mater. Sci. Eng.: R: Rep., 50: 1-78.
- [9] HAMIDI Youssef & FOURA Abdelmalek. These de Master. FRICTION STIR WELDED JOINTS OF DISSIMILAR AA6061 AND AA5083 ALUMINUM ALLOYS. Universités de Mohamed Boudiaf M'sila : 2020/2021
- [10] Chancie HUANG : Thèse de Doctorat ; Réalisation et caractérisation des revêtements à base de laiton. (Université de Technologie de Belfort-Montbéliard)

