



Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

**MASTER**

En Génie Mécanique

**Option : Construction Mécanique**

Présenté par :

**HADJI Hicham & . MABROUKI Djelloul**

**Thème**

**EFFET DU TRAITEMENT THERMIQUE SUR LES  
PROPRIETESMECANIQUES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM**

Devant le jury composé de :

<b>NOM et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
SLAMANI Mohamed	MCA	Président
BOUDILMI Aissa	MCA	Encadreur
MAAZOUZ Mourad	MAA	Examineur

*Année Universitaire : 2019 / 2020*

N° d'ordre : GM/...../2020

## Remerciement

*Nous remercions tout d'abord le directeur de ce mémoire :**BOUDILMI Aissa** pour ses orientations et pour le temps qu'il m'a consacré. Maître de Conférences à l'Université Med Boudiaf de M' Sila Département de Génie Mécanique.*

*Il est avec plaisir que nous remercions responsable de l'entreprise d'ALGAL+ **Mustapha Hadji** et **Yucef Benjoudi** ,Qui nous a donner de la guidance et l'aide et les conseils pour terminer notre mémoire ,aussi nous voulons remercier tous les travailleurs de ce usine .*

*Nous remercions tous les responsables de laboratoire universitaire à faculté de technologie M'sila Monsieur ,Qui m'a aidé dans toute la partie pratique et m'a conseillé en vertu de son expérience.*

*Nous exprimons de tous les profondeurs reconnaissance à l'université Med Boudiaf de M' Sila En particulier, le Département de génie mécanique .nous remercions le monsieur **Chawki Farsi**, Maître de Conférences, et tous les personnes de cette Département .*

*Nous aimerions à exprimer mes remerciements à mes parents et mes famille ceux qui m'ont apporté leurs soutiens et leurs aides précieuses tout au long de l'étude.*

*Nous souhaitons exprimer ma reconnaissance et mes remerciements aux personnes qui m'ont soutenu à la réalisation de ce travail, les membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter ce travail.*

- merci -

## *Dédicaces*

*Dieu merci, Seigneur des Mondes. à la fin du mémoire*

*Je dédie ce mémoire:*

*A ma Chère Mère Cherifa*

*A mon Père Abdelouhab*

*Dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines m'ont permis  
de vivre ce jour.*

*A tous ma famille :à mes sœur ,à mon oncle Mustapha et sa femme  
,à ma grande mère et grand père .*

*À tous les gens m'aiment : Abedelatif , Zouhir, Rodoine ,Hossem  
,Aziz, Rabeh, Hichem ,Adel ,Faoiz,Dahemen, Islam, Nidhal, et tous  
les amés.*



# Liste des figures

<b>Figure I.1 :</b> Principaux la fabrication de produits en.....	13
<b>Figure 2:</b> Diagramme Production de la fonderie BARBAS & PLAILLY des pièces en alliages d'aluminium pour différents secteur d'activités.....	15
<b>Figure I.3 :</b> Désination des aluminiums et alliages – produits corroyés NF EN 573. ....	22
<b>Figure I.4:</b> Désination des aluminiums et alliages pour la fonderie NF EN 1780[12]. ....	24
<b>Figure I.05:</b> déterminer les types d'alliage par la parentages des éléments (Mg, Si). ....	26
<b>Figure I.6:</b> La mise en solution[18].....	32
<b>Figure II.1:</b> Principe de la dureté Brinelle. ....	41
<b>Figure II.2:</b> Essai de la dureté Rockwell (échelle B, bille en acier). ....	43
<b>Figure II.3:</b> Essai de dureté Rockwell (Échelle C),(e≈r).[39] .....	44
<b>Figure II.4:</b> Essai de dureté Vickers.....	46
<b>Figure II.5:</b> Essai de dureté Knoop (Pénétrateur Pyramide à base losange).....	48
<b>Figure II.6:</b> variation nombre de dureté en fonction de la charge appliqu.....	51
<b>Figure III.1:</b> Spectrométrie d'mission optique par étincelle utilisé pour déterminer la composition chimique. ....	55
<b>Figure III.2 :</b> cycle de traitement thermique dans l'entreprise .....	56
<b>Figure III.03 :</b> le traitement thermique applique .....	56

<b>Figure III.4:</b> Four d'extrusion utilisé pour la mise en solution.....	57
<b>Figure III.5:</b> Four d'extrusion utilisé pour la mise en solution.....	58
<b>Figure III.6 :</b> Échantillon de traitement thermique.....	59
<b>Figure III.6 :</b> Répartition de température durant un cycle de revenu. ....	60
<b>Figure III.8</b> Four de revenu.....	61
<b>Figure III.9 :</b> dessin technique de four.....	61
<b>Figure III.10:</b> Tronçonneuse à métaux discotom-2. ....	62
<b>Figure III.12 :</b> Machine polisseuse. ....	63
<b>Figure III.13 :</b> Testeur numérique de dureté Webster W-20. ....	64
<b>Figure III.14 :</b> Structure de micro dureté Webster w-20[46].....	64
<b>Figure III.15 :</b> Microscope optique de de type ZEISS.....	65
<b>Figure IV.1:</b> Microstructure d'un échantillon étudié après la mise en solution à 540° pendant [3h]. ....	56
<b>Figure IV.2 :</b> Microstructure d'un échantillon étudié après la trempe. (X100)[47]. ....	57
<b>Figure IV.3 :</b> Microstructure d'un échantillon étudié après revenu. (X200).....	58
<b>Figure IV.4:</b> L'évolution des valeurs de micro dureté de chaque échantillon par la distances après le revenu et le trempe. ....	59
<b>Figure IV.5:</b> L'effet les déférente types de trempe et revenu sur la micro dureté d'alliages d'aluminium 6063.....	60

## Liste Des Tableaux

<b>Tableau I.1 :</b> Désignations et teneur en masse des alliages de corroyage. ....	21
<b>Tableau I.2 :</b> Indique les groupes de l’alliage d’aluminium. ....	23
<b>Tableau I.3 :</b> comparaison entre les types d’alliage d’aluminium .....	24
<b>Tableau I.4:</b> la composition chimique de l’alliage 6063 en pourcentage de mass.	27
<b>Tableau I.5 :</b> Les Propriétés technologies.....	28
<b>Tableau I.6 :</b> les propriétés physiques d’alliage d’aluminium 6063, en citant [15] : .....	28
<b>Tableau I.7 :</b> Caractéristique mécaniques .....	29
<b>Tableau I .8 :</b> Les conditions pratiques de la trempe structurale pour les alliages d’aluminium. ....	30
<b>Tableau I.9:</b> Le temps maximal de transfert et l’épaisseur des parois[18]. ....	31
<b>Tableau I.10 :</b> Désignation des états métallurgiques de base [23].....	35
<b>Tableau I.11:</b> traitement thermique des alliages d’aluminium. ....	35
<b>Tableau II.1 :</b> Les deux échelles les plus utilisées sont les <i>échelles B et C</i> .[39]. ...	45
<b>Tableau II.2:</b> les application des méthodes et ses symboles .....	50
<b>Le Tableau II.3 :</b> regroupe les définitions des méthodes essais de dureté par pénétration .....	50
<b>Tableau III.1</b> Composition chimique (composition massique %) d’Aluminium 6063. ....	55
<b>Tableau IV.1:</b> Résultats des tests mécaniques obtenus après trempe. ....	57
<b>Tableau IV.2:</b> Résultats des tests mécaniques obtenus après revenu. ....	58

# Sommaire

<b>Introduction général</b> .....	9
<b>Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages</b>	
I.1.L'aluminium : .....	12
I.1.1 Obtention de l'aluminium.....	12
I.1.2 Les différents domaines d'utilisation. ....	13
I.1.3 Histoire d'aluminium.....	15
I.1.4 Les propriétés mécaniques.....	16
I.2 Les alliages d'aluminium : .....	18
I.2.1 Les alliages de corroyage .....	18
I.2.2 Les alliages de moulage.....	19
I.2.3 Désignation des alliages d'aluminium.....	20
I.3 Les alliages d'aluminium de série 6000 : .....	24
I.3.1 L'alliage d'aluminium 6063: .....	26
I.3.2 caractéristiques générale 6063:.....	26
I.4 Les Traitements thermiques.....	29
Introduction.....	29
I.4.1 Les Traitements thermiques de durcissement structural : .....	30
I.4.3 Traitements thermiques d'homogénéisation :.....	33
I.4.4 Les traitements d'adoucissement par restauration ou recuit.....	33
I.5 Désignation des états métallurgiques : .....	34
I.6 Influence des éléments d'additions Sur les propriétés des alliages d'aluminium : .....	36
I.6.1 Excès de magnésium: .....	36
I.6.2 Effet du cuivre dans les alliages d'aluminium Al-Mg-Si.....	36
I.6.3 Excès de silicium .....	37

I.6.4 Les dispersoïdes : .....	37
--------------------------------	----

## **Chapitre II: Méthode de caractérisation par l'essai de dureté**

Introduction.....	39
II.1 Essais et propriétés mécaniques : .....	39
II.2 Essai de dureté Brinell.....	40
II.2.1 Principe de l'essai Brinell .....	40
II.2.2 Dureté Brinell .....	41
II.3. Essais de dureté Rockwell.....	42
II.3.1 Principe de l'essai Rockwell .....	42
II.3.2 Dureté Rockwell.....	43
II.3.3 Différentes échelles de dureté Rockwell.....	44
II.4 Essai de dureté Vickers .....	45
II.4.1 Principe de l'essai Vickers .....	45
II.4.2 Dureté Vickers.....	47
II.5 Essai de dureté Knoop.....	47
II.5.1 Principe de l'essai Knoop.....	47
II.5.2 Dureté Knoop .....	48
II.5.3 Comparaison entre les méthode par pénétration : .....	49
II.6 Domaines de dureté.....	50
II.7 Essai de la micro dureté .....	52

## **Chapitre III :Techniques expérimentales**

III.1 Introduction.....	54
III.2 Choix de Matériau.....	54
III.3 Traitements thermique .....	56
III.3.a Mise en solution: .....	57

III.3.b Trempe .....	58
III.3.C Revenu.....	59
III.5 Méthodes expérimentale utilisées: .....	61
III.5.1 Découpage d'échantillons.....	62
III.5.2 Polissage mécanique .....	62
III.5.3 Essais de micro dureté .....	63
III.5.4 Microscopie métallographique.....	64
<b>Chapitre IV :Résultats et discussion</b>	
IV.1 Introduction.....	56
IV.2 Effet de la mise en solution .....	56
IV.3 L'effet de la trempe : .....	57
IV.4 Effet du revenu: .....	58
IV.5 discussion des résultat : .....	60
Conclusion général.....	61
Résumé :.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Références.....	63

# Introduction général

Les principaux alliages d'aluminium sont fabriqués depuis 1886 à partir des bauxites et de la Cryolithe avec l'invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium. Les alliages à base d'aluminium ont été l'objet de plusieurs travaux de recherches scientifiques, ces alliages sont les plus utilisés justes après les fontes et les aciers. Leurs excellentes propriétés mécaniques et électriques ont permis leur utilisation dans divers secteurs d'activités telle que l'industrie aéronautique, automobile ou le transport électrique.

L'aluminium est peu utilisé à l'état pur, sauf en miroiterie, du fait de sa faible résistance mécanique (au maximum 20kg/mm<sup>2</sup>), d'où son utilisation sous forme d'alliages. En effet, l'addition contrôlée des éléments d'alliages tels que le cuivre, le silicium, le magnésium, le manganèse, le titane, le chrome, le zinc et le cobalt améliorant les propriétés mécaniques,

Nous focalisons dans ce travail sur les alliages de série 6xxx (à base: magnésium et silicium) qui possèdent des propriétés mécaniques intéressantes.

L'objet de ce travail est l'étude de l'effet de traitement thermique (mise en solution, trempe, revenu) sur les propriétés mécaniques d'alliage aluminium 6063, Cet alliage a un grand intérêt vu leur utilisation privilégiée et leurs applications architecturales,

Notre étude est basée essentiellement sur les méthodes expérimentales de visualisation microscopique de la structure d'alliage 6063 et de la mesure de la micro dureté,

Nous avons organisé le travail de ce mémoire en quatre chapitres:

- le premier chapitre présente une étude bibliographique des alliages d'aluminium. On focalise à l'étude de l'alliage d'aluminium 6063 de la série 6000, ses domaines d'application et ses différents traitements thermiques,

-le deuxième chapitre a été consacré à la caractérisation mécanique par l'essai de dureté. Dans ce cas, nous avons présenté : les techniques conventionnelles de mesure de la dureté des matériaux massifs et les dispositions qui s'ensuivent,

-le troisième chapitre a été consacré à la description des méthodes et des techniques expérimentales utilisées de mesure de dureté et de traitements thermiques utilisés,

-le quatrième chapitre est consacré aux résultats expérimentaux obtenus et à leurs interprétations. On terminera par une conclusion générale où on récapitulera tous les résultats obtenus dans ce travail .

# **Chapitre I**

## **Généralités sur l'aluminium et ses alliages**

### Introduction

L'aluminium est l'élément métallique le plus abondant dans la nature, il vient au second rang des métaux les plus employés après l'acier. Il est léger, robuste, facile à usiner, économique et résistant à la corrosion. Il est un métal blanc tirant légèrement sur le bleu, dont on obtient facilement un beau fini poli. .

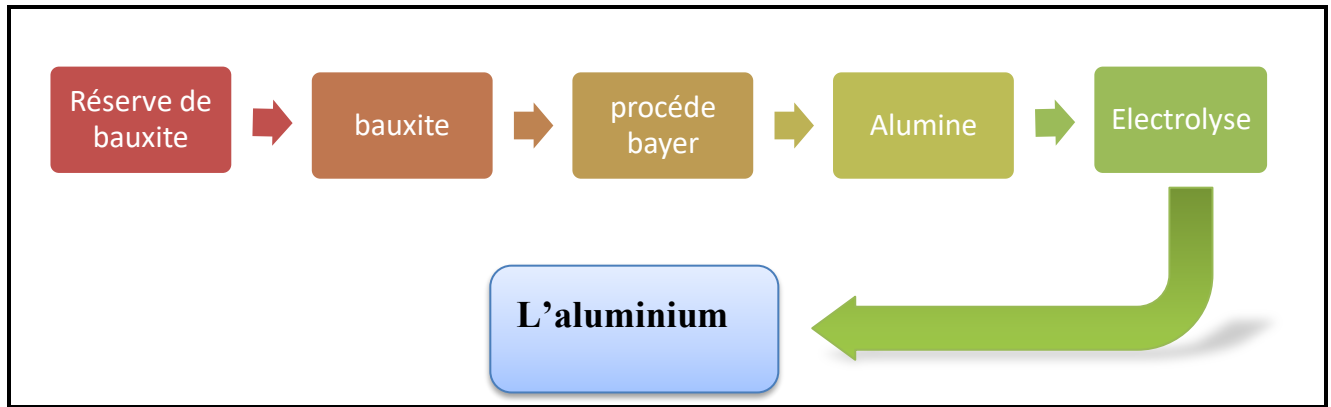
L'aluminium est un élément du troisième groupe de classification de Mendéléiev, dont le nombre atomique est 13, la masse atomique 26.28 et la température de fusion 660°C. Il se cristallise dans le système cubique à faces centrées, avec un paramètre de maille 0.404 nm. Sa masse volumique est 2.7 kg/dm<sup>3</sup>, son coefficient de dilatation thermique linéaire est de l'ordre de  $23.10^{-6}$ , son module de Young de 6600 bar. l'aluminium industriel contient 0.5% d'impuretés (principalement Fe+Si), mais il peut être obtenu presque pur par raffinage électrolytique (Al > 99.99%) [1].

Ces impuretés ont différents effets sur leurs caractéristiques physique, chimiques et mécaniques. Les propriétés d'aluminium peuvent être améliorées par des traitements thermique et mécanique, ainsi par l'addition des éléments comme le Mg, Si, Mn, etc.... A la température ambiante, l'aluminium forme très vite une couche d'oxyde  $Al_2O_3$  (alumine), épaisse et adhérente, qui protège le métal de les effets, mécaniques et physiques et les attaques chimiques [2].

### I.1.L'aluminium :

#### I.1.1 Obtention de l'aluminium

La seule source de ce métal c'est les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%), La bauxite est le minerai le plus utilisé pour obtenir de l'alumine, matière intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium et être la production d'aluminium par électrolyse d'alumine dans la cryolithe ( $Na^3ALF^6$ ) fondue, à environ 1000°C dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone [3] .



**Figure I.1** : Procédés de fabrication de l'aluminium

### I.1.2 Les différents domaines d'utilisation.

L'aluminium est malléable et ductile ce qui permet un usinage facile. Avec un point de fusion bas 660°C contre 1500°C pour le fer – il se prête facilement au moulage de petites pièces, de plus l'économie d'énergie faite lors de sa fabrication est considérable.

Depuis l'apparition de l'électrolyse en 1887 le coût de production de l'aluminium a chuté. Les secteurs des transports, de la construction, de l'emballage et de la vie quotidienne constituent les marchés les plus importants pour les produits en aluminium. Les autres utilisations concernent les équipements électriques, la mécanique, la chimie et la pharmacie.

**Les transports** : Aéronautique, automobile, train, bateau...

Il est apprécié dans ce domaine grâce à sa légèreté qui permet de réduire la consommation et les émissions de carburant. De plus il se lie facilement avec du cuivre de silicium ou de magnésium pour former des alliages résistants qui évacuent bien la chaleur, idéal pour les moteurs. Son utilisation réduit également le bruit et les vibrations.

**Le bâtiment** : Facilement malléable et résistant en alliages, l'aluminium permet de réaliser des

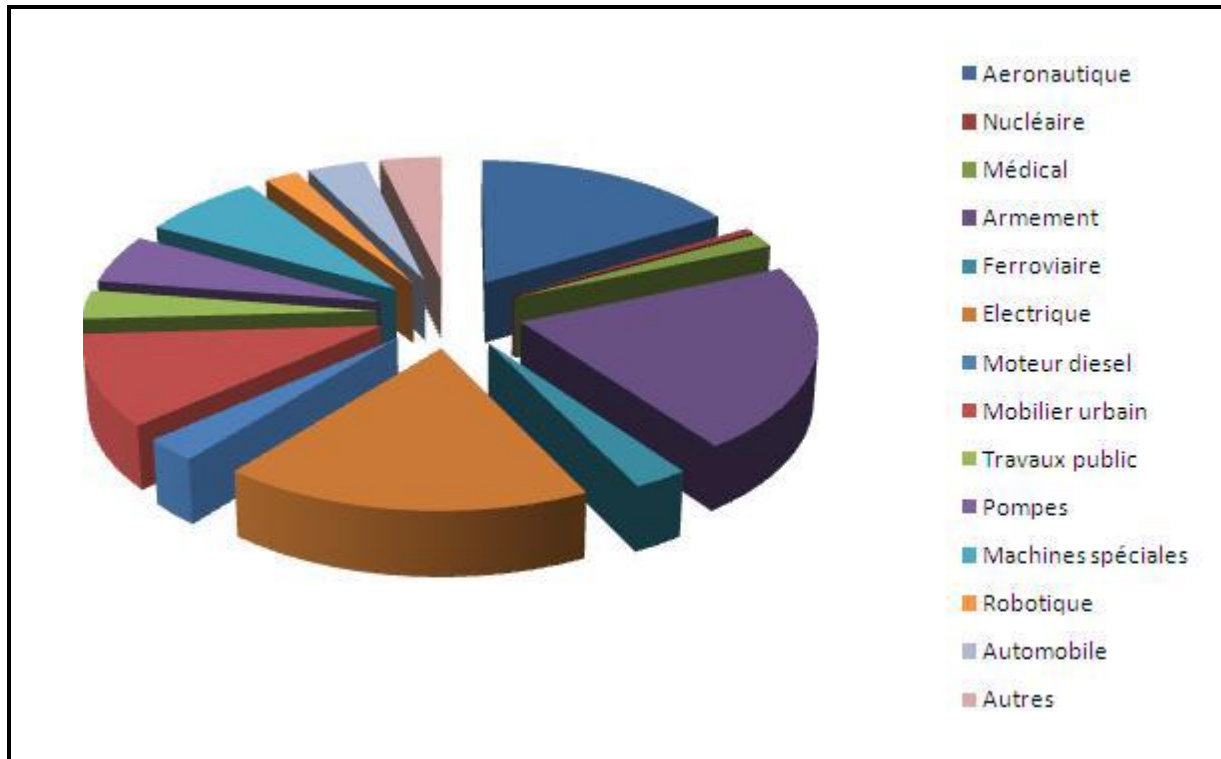
## Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages

formes complexes dans une gamme étendue de coloris. Il est donc très apprécié en architecture moderne et ne nécessite que très peu d'entretien.

**L'électricité :** L'aluminium est particulièrement apprécié dans ce domaine grâce à sa conductivité électrique élevée, son absence de magnétisme et son inertie chimique. L'aluminium a remplacé le cuivre dans les lignes à haute tension et est aujourd'hui la manière la plus économique de transmettre l'énergie électrique.

**L'alimentation :** L'emballage en aluminium est largement répandu du fait de son faible coût de production, sa légèreté et son caractère isolant. Une mince feuille d'aluminium (0.1 mm environ) suffit à isoler le produit du monde extérieur : Imperméabilité à la lumière, à l'air, aux rayons ultraviolets,

**Autres utilisations :** Filtrant dans les crèmes solaires, texturant et colorants alimentaires dans les laitages, immunisant dans les vaccins et purifiant dans le traitement des eaux, l'aluminium est également utilisé à plus faibles quantités dans l'industrie chimique [4].



**Figure 2:** Diagramme Production de la fonderie BARBAS & PLAILLY des pièces en alliages d'aluminium pour différents secteur d'activités

### I.1.3 Histoire d'aluminium

En 1807, Humphry Davy, après avoir découvert que le sodium et le potassium entraient dans la composition de l'alun, suppose qu'il s'y trouve aussi un autre métal, qu'il baptise « aluminium » (en latin, « alun » se dit *alumen*) [5] Pierre Berthier découvre dans une mine près des Baux-de-Provence en 1821 un minerai contenant plus de 50 % d'oxyde d'aluminium. Ce minerai sera appelé bauxite.

On attribue généralement la découverte et l'isolement de l'aluminium à Friedrich Wöhler en 1827. Toutefois, deux ans plus tôt, le chimiste et physicien danois Hans Christian Ørsted avait réussi à produire une forme impure du métal. Wöhler fut le premier à mettre en évidence les propriétés chimiques et physiques de l'aluminium, dont la plus notable est la légèreté.

Le chimiste français Henri Sainte-Claire Deville améliore en 1846 la méthode de Wöhler en réduisant le minerai par le sodium. Il publie ses recherches dans un livre en 1856. Cette méthode est utilisée à travers toute l'Europe pour la fabrication de l'aluminium, mais elle reste

## Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages

extrêmement coûteuse. Le métal est d'ailleurs utilisé pour fabriquer des bijoux, dont la valeur sera évidemment réduite à néant quelques décennies plus tard [6].

- 1855 : Les nouveaux métaux sont exposés à l'exposition universelle de Paris. La société Pechiney est créée en France.
- Le premier site industriel producteur d'aluminium au monde s'installe à Salindres dans le Gard, et commence son activité dès 1860.
- 1876 : William Frishmuth réalise la première coulée d'aluminium. En 1884, il réalise la coiffe du Washington Monument en ce métal.
- 1886 : de manière indépendante, Paul Héroult et Charles Martin Hall découvrent une nouvelle méthode de production de l'aluminium en remarquant qu'il est possible de dissoudre l'alumine et de décomposer le mélange par électrolyse (procédé Héroult-Hall) pour donner le métal brut en fusion. Pour cette découverte, Hall obtient un brevet (400655) la même année. Ce procédé permet d'obtenir de l'aluminium de manière relativement économique. La méthode mise au point par Héroult et Hall est toujours utilisée aujourd'hui.
- 1887 : Karl Josef Bayer décrit une méthode connue sous le nom de *procédé Bayer* pour obtenir de l'alumine à partir de la bauxite. Cette découverte permet de faire entrer l'aluminium dans l'ère de la production de masse.
- 1888 : les premières sociétés de production d'aluminium sont fondées en Suisse, France et aux États-Unis.

### I.1.4 Les propriétés mécaniques

La demande pour des produits en aluminium ou intégrant de l'aluminium dans leur composition ne cesse de croître année après année. Au-delà de la croissance démographique mondiale et de l'augmentation du pouvoir d'achat dans les pays émergents, la consommation d'aluminium augmente aussi en Europe et en France par l'effet de substitution (l'aluminium remplaçant progressivement d'autres matériaux) grâce à une combinaison unique de propriétés telles que légèreté, résistance mécanique et résistance à la corrosion, conductivité, ductilité, recyclabilité et de nombreuses autres propriétés.

## **Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages**

### **Légèreté**

L'aluminium est un métal très léger dont la densité spécifique est de  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , soit environ un tiers de celle de l'acier ( $7-8 \text{ g/cm}^3$ ) ou du cuivre ( $8,96 \text{ g/cm}^3$ ).

### **Résistance mécanique**

L'aluminium est utilisé très majoritairement sous forme d'alliages dont le constituant principal est l'aluminium, les éléments d'addition pouvant représenter jusqu'à 15% de son poids. La résistance de l'alliage d'aluminium est adaptée à l'application requise.

A titre d'exemple, on considère qu'un kilogramme d'aluminium peut remplacer deux kilogrammes d'acier dans des applications automobiles.

### **Résistance à la corrosion**

Sa résistance à la corrosion est élevée car le métal, bien que très oxydable, se couvre, au contact de l'air, d'une couche d'oxyde protectrice (couche naturelle étanche d'alumine  $< 0,1 \mu\text{m}$ ). Les éléments d'addition diminuent plus ou moins cette résistance.

### **Conductivité thermique et électrique**

L'aluminium est un excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité.

La conductivité thermique de l'aluminium est utilisée dans de nombreuses applications d'évacuation de la chaleur, c'est-à-dire de refroidissement (comme les systèmes d'air conditionné dans les véhicules).

A poids égal, l'aluminium offre une conductivité électrique deux fois supérieure à celle du cuivre, ce qui explique son emploi privilégié dans les applications de transport d'électricité à haute tension sur grande distance.

### **Ductilité, malléabilité**

L'aluminium peut être facilement travaillé à basse température et déformé sans se rompre, ce qui permet de lui donner des formes très variées, une ductilité élevée ( $A\% \approx 40\%$ ),.

### **Recyclable**

## Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages

L'aluminium est recyclable à 100% sans dégradation de ses propriétés. Son recyclage ne nécessite que peu d'énergie : 5% seulement de l'énergie utilisée pour la production de métal primaire.

### **Imperméabilité, effet barrière**

Même à très faible épaisseur, une feuille d'aluminium est totalement imperméable et ne laisse passer ni lumière, ni micro-organismes, ni odeurs. De plus le métal lui-même ne libère ni odeur ni goût, ce qui en fait un élément de choix pour l'emballage alimentaire ou pharmaceutique.

### **Propriétés réfléchissantes**

L'aluminium possède un pouvoir réfléchissant élevé de la lumière ainsi que de la chaleur ce qui, ajouté à son faible poids, en fait un matériau idéal pour les réflecteurs dans les matériels d'éclairage ou les couvertures de survie [7].

## I.2 Les alliages d'aluminium :

Dans ses principales applications, l'aluminium est utilisé sous forme d'alliages, ce qui augmente sa résistance mécanique, mais souvent au détriment d'autres propriétés telle que la ductilité. Pour le meilleur compromis entre les propriétés pour un usage donné, les métallurgistes agissent sur la composition de l'alliage, mais aussi sur les traitements thermiques ou thermomécaniques[8].

On peut distinguer deux grandes classes des alliages d'aluminium :

- les alliages de déformation ( corroyés ) : produits obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou à froid tels que le filage, le laminage
- les alliages de fonderie (moulage) : obtenus par fonderie seulement écrouer.

### I.2.1 Les alliages de corroyage

Obtenus par (corroyage = déformation à chaud), coulés en plaques ou billettes puis transformés à chaud par laminage, filage, forgeage, matriçage...

Les principales propriétés requises de ces alliages sont, selon les applications :

- Résistance mécanique

## Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages

- Ductilité
- Résistance à la propagation des fissures
- Résistance à la fatigue (efforts alternés)
- Résistance aux multiples formes de corrosion
- Conductibilité électrique [9]

### les familles d'alliages :

#### a) Les alliages à durcissement par écrouissage :

Les séries 1000 , 3000 , 5000 et la plupart des 4000 ne peuvent pas être traitées, sont dites non trempantes ou sans durcissement structural. Cependant, leurs caractéristiques peuvent être modifiées par écrouissage ("durcissement mécanique") ou par modification de la grosseur du grain. De plus, comme la solubilité des éléments d'alliage est faible dans l'aluminium à température ambiante, leur capacité de durcissement par mise en solution ou maturation est très limitée.

#### b) Les alliages à durcissement par traitement thermique :

Les séries 2000 , 6000 et 7000 peuvent être traitées et sont dites trempantes ou avec durcissement structural.

Bien qu'il soit possible d'avoir un bon rapport résistance/poids avec ces alliages, leur capacité à précipiter ou à se transformer reste modérée. De plus, en utilisation au-dessus de 175°C les traitements disparaissent[10].

## I.2.2 Les alliages de moulage

La plupart des nuances sont faciles à mouler (moule métallique permanent ou moulage sable) en moyenne ou en grande série et en pièce unitaire. Inconvénient : grand retrait au moulage (3,5 à 8,5% en volume) qui peut être minimisé par un bon tracé de la pièce.

Beaucoup des alliages usuels contiennent suffisamment de silicium pour entraîner une réaction eutectique, ce qui donne aux alliages un bas point de fusion, une bonne fluidité et une bonne mouillabilité.

## Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages

Le moulage en moule métallique ("en coquille", sous pression...) amène un refroidissement plus rapide que les autres procédés (sable...),

ce qui provoque un affinage du grain et une amélioration des propriétés mécaniques.

Les additions de bore et de titane provoquent également un affinage du grain.

Le cuivre, le magnésium et le zinc engendrent ou favorisent le phénomène de maturation.

### I.2.3 Désignation des alliages d'aluminium

#### I.2.3.1 Désignation des alliages corroyés

##### I.2.3.1.2 Désignation numérique (Norme européenne EN 485-2) :

La désignation, conforme à la norme Afnor NF EN 573 ainsi qu'aux spécifications internationales de l'Aluminium Association, est numérique à quatre chiffres dans la premier chiffre indique la famille (ou la série) à laquelle appartient l'aluminium ou l'alliage d'aluminium [11].

le premier chiffre désigne la famille d'alliage comme la suite :

- Aluminium sans élément d'addition : (série 1000)
- .-Aluminium + cuivre : (série 2000)
- .-Aluminium + manganèse : (série 3000).
- Aluminium + silicium (alliages de moulage) : (série 4000).
- Aluminium + magnésium : (série 5000).
- Aluminium + magnésium + silicium : (série 6000).
- Aluminium + zinc + magnésium :( série 7000)
- Autres alliages d'aluminium : (série 8000)

Le deuxième chiffre : pour famille d'aluminium non allié (1000) indique les limites de certaines impuretés, mais pour les autres familles représente les modifications successives de l'alliage

Le troisième chiffre : indique pour la famille 1000, le pourcentage d'aluminium au-delà de 99% et pour les autres familles, l'identification de l'alliage.

Le quatrième chiffre indique comme le troisième.

## Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages

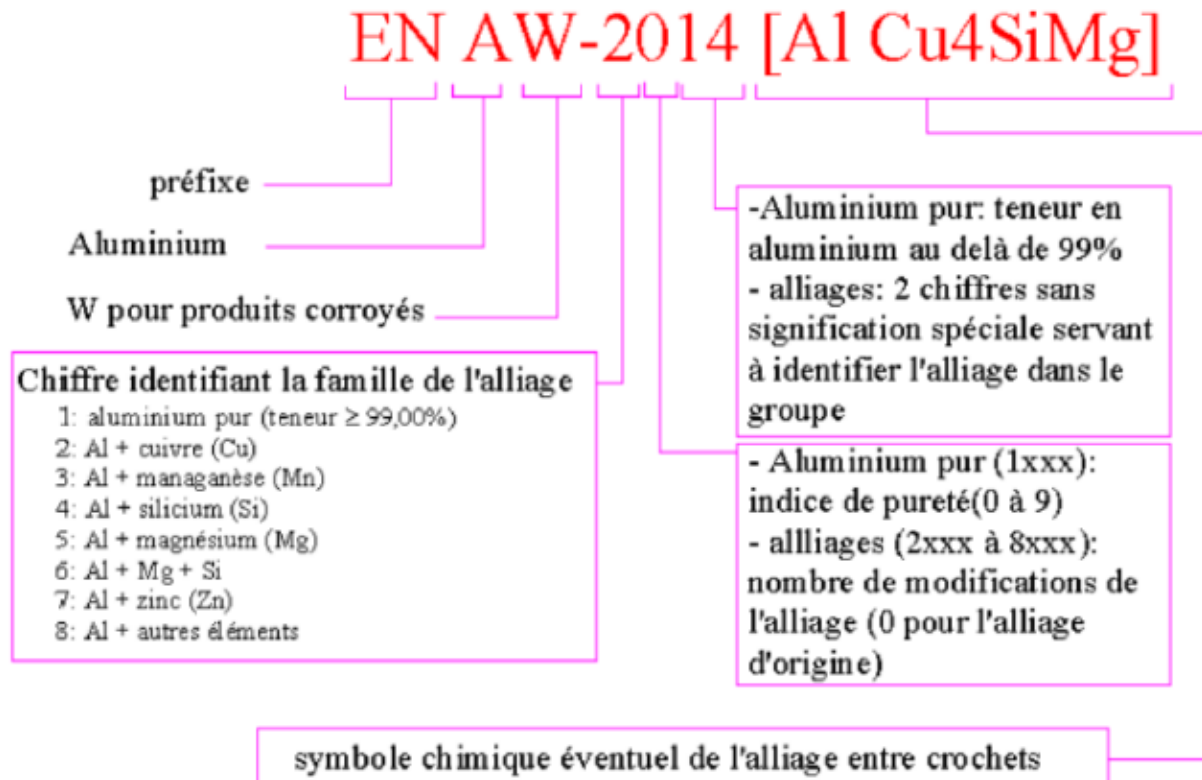
	Durcissement par écrouissage A sans traitement thermique Alliages non trmpant				Durcissement structural Alliages trempant A traitement thermique			
<b>Famille</b>	1000	3000	5000	8000	2000	4000	6000	7000
<b>Eléments d'alliage</b>	aucun	Mn	Mg	Si+Fe	Cu	Si	Mg+Si	Zn+Mg
<b>Teneur en masse (%)</b>	0	0.5-1.5	0.5-5	Si: 0,3-1 Fe: 0,6-2	2-6	0.8-1.7	Mg : 0,5- 1,5 Si: 0,5-1,5	Zn : 5-7 Mg : 1-2

**Tableau I.1** : Désignations et teneur en masse des alliages de corroyage.

### I.2.3.3 Désignation symbolique (Norme européenne) :

Elle est destinée à compléter la précédente.

La désignation de l'aluminium non allié destiné au corroyage est constituée du symbole chimique du métal (Al) suivi d'un espace et du pourcentage de pureté exprimé avec une ou deux décimales. Par Exemples : EN AW-2014 [Al Cu4siMg (Figure I.3 ) [11].



**Figure I.3 :** Désignation des aluminiums et alliages – produits corroyés NF EN 573.

### I.2.3.2 Désignation des alliages de moulage

#### I.2.3.2.1 Désignation numérique (Norme européenne)

La désignation alphanumérique, autre fois en usage en France, a été remplacée par une désignation numérique, comme pour les alliages de corroyage, mais en 5 chiffres, suivant la norme Afnor NF EN 1780-1. On trouvera au (tableau I.3) la correspondance entre le premier chiffre et l'élément d'alliage [12].

Pour faciliter la compréhension du texte concernant les alliages de moulage, nous avons indiqué les deux désignations : l'ancienne alphanumérique et la nouvelle, numérique, en vigueur depuis 1998.

Le premier chiffre indique l'élément d'addition principal de l'alliage :

-Aluminium + cuivre : (série des 20000)

## Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages

-Aluminium + silicium : (série des 40000)

-Aluminium + magnésium : (série des 50000)

-Aluminium + zinc : (série des 70000)

Le deuxième chiffre indique le groupe de l'alliage, il présente un ensemble de caractéristiques mécaniques et/ou physiques similaires. Les trois chiffres suivant indiquent une variante deux alliages, dans des proportions similaires). Les trois chiffres suivant sont des numéros d'ordre et servent à identifier la composition chimique de l'alliage.(exemple : 43100 comporte 0,10 % de cuivre et le 43200 plus pur comporte 0,35% de cuivre, les proportions de zinc et nickel, de plomb et de titane varient aussi entre ces.

Élément d'alliage	famille
Aucun	10000
Cuivre	20000
silicium	40000
magnésium	50000
Zinc et cuivre	70000

**Tableau I.2** :Indique les groupes de l'alliage d'aluminium.

### I.2.3.2.2 Désignation symbolique (Norme européenne) :

La désignation comporte les éléments suivants :

- le préfixe EN suivi d'un espace
- la lettre A qui représente l'aluminium
- la lettre C qui représente les produits moulés
- un tiret
- les symboles chimiques des éléments d'addition, successivement suivis de leur teneur dans l'ordre décroissant de celle-ci. Par Exemple : EN AB -45400 [AL Si5Cu3], ( Figure I.4).

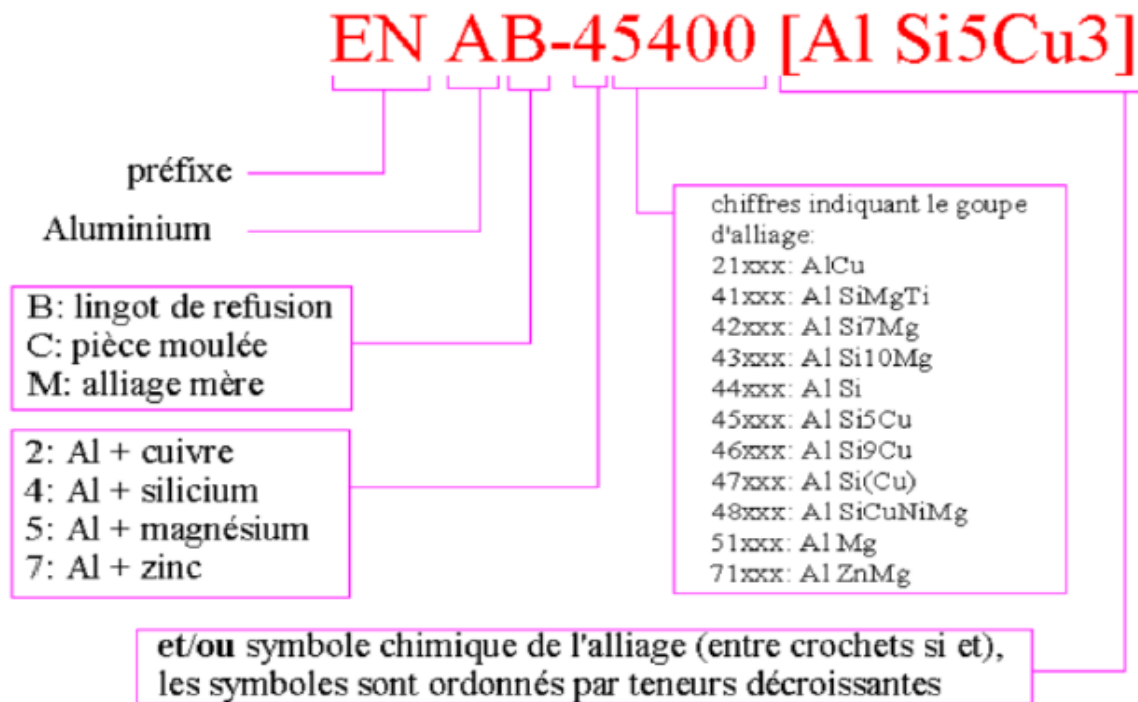


Figure I.4: Désignation des aluminums et alliages pour la fonderie NF EN 1780[12].

Série d'aluminium de fonderie	Série d'aluminium corroyé
1xx.x Aluminium pur (>99,0%)	1xxx Aluminium pur (>99,0%) E
2xx.x Cu (4% à 4,6 %) TT	2xxx Cu (1,9% à 6,8 %) TT
3xx.x Si (5% à 17 %) +Cu et/ou Mg(TT)	3xxx Mn (0,3% à 1, 5%) E
4xx.x Si (5% à 12 %)	4xxx Si (3,6% à 13, 5%) E
5xx.x Mg (4% à 10 %)	5xxx Mg (0,5% à 5, 5%) E
6xxx Mg (0,4%...1,5%)	6xxx Si (0,2%...1,7 %) TT
7xx.x Zn (6,2% à 7,5%) TT	7xxx Zn (1 % à 8, 2%) TT
8xx.x Sn	8xxx Autre

Tableau I.3 : comparaison entre les types d'alliage d'aluminium.

### I.3 Les alliages d'aluminium de série 6000 :

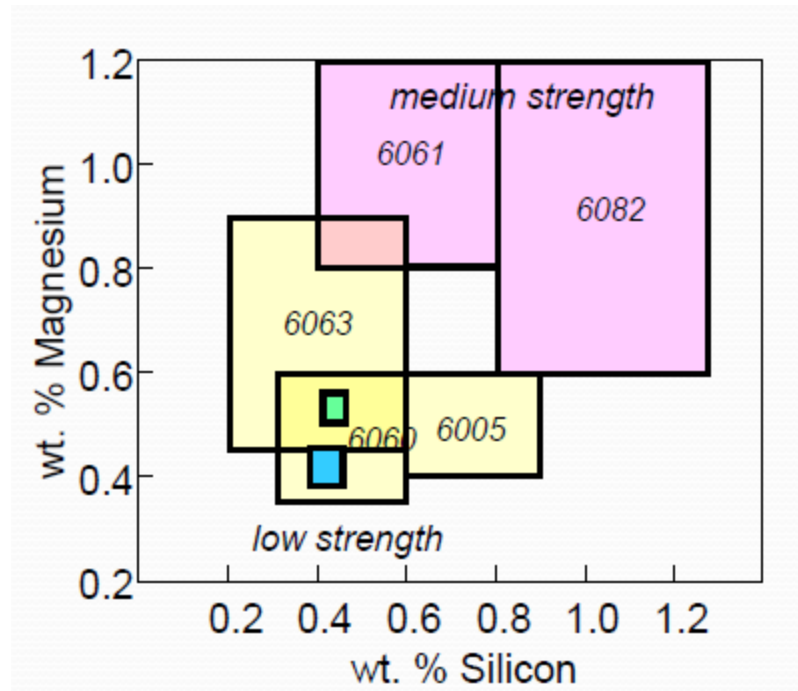
## Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages

La série 6000 contient des additions de magnésium et de silicium et parfois un peu de cuivre, de chrome ou de manganèse. Les alliages sont fait pour à obtenue les plus grands niveaux de résistance par la précipitation de la phase  $Mg_2Si$  [13].

Les alliages aluminium-magnésium-silicium de la série 6000, à durcissement structural, ont un poids industriel important, en particulier dans le domaine des produits obtenus par filage : 80 % des alliages d'aluminium utilisés dans le monde pour la fabrication des profilés appartiennent à cette série .

Les alliages de la série 6000 commercialisés sont nombreux : ils se différencient par leurs teneurs en Mg (elle peut varier entre 0,3 et 1,5 %), en Si (elle peut varier de 0,3 à 1,4 %) et par la présence d'additions secondaires (Mn, Cr, Cu, Pb, Bi...). Ils présentent néanmoins les propriétés générales ci-après :

- très bonne aptitude à la déformation à chaud par laminage et surtout par filage et matriçage ;
- bonne aptitude à la mise en forme à froid (par cintrage par exemple) en particulier dans les états recuits (et, à un degré moindre, trempé mûri ;
- caractéristiques moyennes à l'état trempé revenu;
- très bonne résistance à la corrosion pouvant être renforcée par des traitements d'anodisation;
- possibilité d'obtenir de beaux états de surface dès la sortie de la presse à filer, états de surface qui peuvent être améliorés par brillantage et anodisation ;
- bonne aptitude au soudage ;
- bon comportement aux basses ou très basses températures mais résistance à chaud limitée à partir de 150 à 200 °C suivant la durée du maintien à chaud (par exemple, 150 °C pour une durée supérieure à 10 000 h, 175 °C pour une durée d'une centaine d'heures, 200 °C pour une durée de quelques heures) [14].



**Figure I.05:** déterminer les types d'alliage par la parentages des éléments (Mg, Si).

### I.3.1 L'alliage d'aluminium 6063:

Cet alliage très demandé appartient à la catégorie des alliages pouvant recevoir un traitement thermique. Avec une structure de grain plus fine que le 6061, l'alliage 6063 présente les meilleures caractéristiques esthétiques après anodisation. Il a une très bonne résistance à la corrosion, une bonne usinabilité et une bonne soudabilité.

Il est couramment utilisé pour les tubes cylindriques les conducteurs électriques à barres bus et les applications architecturales.

### I.3.2 caractéristiques générale 6063:

Puisque le produit 6063 est de la famille d'alliage d'aluminium sérié 6000, alors il a des propriétés de celle-ci de l'alliage (aluminium-magnésium-silicium). Alliage pour extrusion directe avec des caractéristiques mécaniques légèrement .

Il est utilisé dans la menuiserie métallique le bâtiment, l'ameublement e l'automobile[15].

## Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages

En générale, cet alliage est connu par une excellence malléabilité, une résistance moyenne, une bonne résistance à la corrosion .

### I.3.2.1 Propriété chimique:

La composition chimique de l'aluminium et des alliages aluminium est fournie en pourcentage de masse sont comprises entre : 0,10 % du cuivre et une valeur tolérée entre : 0,45 et 0,9 % du Magnésium. Les limites sont exprimées en tant que maximum saufs si elles indiquent un ordre de grandeur ou un minimum.)

L'alliage aluminium 6063 est un alliage de force moyenne. Connu plus communément comme alliage architectural .

<b>COMPOSITION CHIMIQUE % en poids réf. UNI EN 573-3</b>	Silicium Si	0,20 – 0,60
	Fer Fe	0.35max
	Cuivre Cu	0.10max
	Manganèse Mn	0.10max
	Magnésium Mg	0.45-0.90
	Chrome Cr	0.10max
	Zinc Zn	0.10max
	Titane Ti	0.10max
	Autres	Chaque 0.05
		Total 0.15
	Aluminium	RESTANT

**Tableau I.4:** la composition chimique de l'alliage 6063 en pourcentage de mass.

### I.3.2.2 Propriétés technologies :

En général, l'alliage 6063 présente une bonne finition de surface, une résistance élevée à la corrosion, convient facilement au soudage et peut être facilement anodisé

## Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages

CARACTERISTIQUES TECNOLOGIQUES	Trempe	T4	T5	T6	T64	T66
	Attitude à l'anodisation	O	O	O	O	O
	Résistance à la corrosion	B	B	B	B	B
	Maniabilité plastique à froid	B	S	S	B	I
	Usinabilité	I	S	B	S	B
	Attitude à la soudure	B	B	B	B	B
	Capacité de création du profil	O	O	O	O	O

**I=insuffisant, S=suffisant, B=bon, O=optimal**

Tableau I.5 : Les Propriétés technologies.

### I.3.2.3 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES :

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	Densité (kg/dm <sup>3</sup> )	2.7
	Point de fusion (°C)	600/655
	Coefficient de Poisson	0.33
	Module d'élasticité (MPa)	69.000
	Module d'élasticité tangentiel (MPa)	26.000

Tableau I.6 : les propriétés physiques d'alliage d'aluminium 6063, en citant [15] .

## Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages

### I.3.2.4 Les Caractéristiques mécanique:

CARACTERISTIQUES MECANIQUES réf. UNI EN 755-2*	Trempe	T4	T5	T6	T64	T66
	Épaisseur (mm)	≤ 25	≤ 3	≤ 10	≤ 15	≤ 10
	Rm (MPa) min.	120	175	215	180	245
	Rp0,2 (MPa) min.	65	130	170	120	200
	A % min.	14	8	8	12	8
	A50 mm % min.	12	6	6	10	6
	HBW (Brinell) - typique	50	65	75	65	80

Tableau I.7 :Caractéristique mécaniques[16] •

## I.4 Les Traitements thermiques

### Introduction

Les Traitements thermiques C'est une succession d'opérations ou cours desquelles un matériau est soumise en totalité ou partiellement à des cycles thermique pour but de modifier la nature et la répartition des constituants d'un matériau. Selon le domaine d'application du matériau les traitements peuvent améliorer ou détériorer les propriétés mécaniques de ce dernier.

En général, les traitements thermiques en métallurgie sont : l'homogénéisation, le revenu, le recuit et le vieillissement[17].

### I.4.1 Les Traitements thermiques de durcissement structural :

Le durcissement structural a une importance primordiale dans la métallurgie des alliages d'aluminium car c'est le processus par excellence qui permet d'améliorer les propriétés mécaniques. Ce type de traitement, spécifique aux alliages à durcissement structural.

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

**Tableau I .8 :** Les conditions pratiques de la trempe structurale pour les alliages d'aluminium[18].

#### I.4.1. 1 : Mise en solution :

L'obtention d'une solution solide à l'aide de la réaction du durcissement par précipitation est très importante dans l'opération du traitement thermique. L'objectif de ce traitement est d'amener dans la solution solide la quantité maximale de l'élément de durcissement soluble ou élément d'alliage (ex. Cu, Mg, Si) dans la matrice. La procédure consiste à maintenir l'alliage à une température suffisamment élevée et pour une période de temps assez long afin d'obtenir une solution solide homogène. Les domaines des températures de mise en solution s'étendent le plus souvent de 450°C à 500°C pour l'aluminium et de 450°C à 590 °C pour ses alliages [19].

#### I.4.1.2 : Trempe :

La trempe est une opération nécessaire pour effectuer un traitement thermique. Cette opération consiste en un refroidissement suffisamment rapide de la solution solide obtenue dans la première étape, pour que les précipités intermétalliques stables n'aient pas le temps d'être

## Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages

formés. Elle ne prend pas de temps, puisqu'elle a une très courte durée. Elle peut être faite à l'eau, à l'air, à l'huile ou dans des métaux en fusion à différents intervalles. Son but est de supprimer la formation de la phase à l'équilibre  $Mg_2Si$  pendant le refroidissement et de préserver la solution soluble solide formée lors de la mise en solution, par un refroidissement rapide ( $\sim 260$  °C/s) à basse température, habituellement près de la température de la pièce. Le résultat de cette opération est une solution solide sursaturée en éléments d'alliages, et également en lacunes [19].

### Le principe de trempe

Le principal élément qui peut influencer la trempe est le temps de transfert entre le four (à la température de mise en solution) et le bassin de trempe. Si celui-ci est trop long, il y aura début de précipitations des éléments mis en solution. Le bac de trempe doit se trouver à proximité du four. Il doit avoir un volume d'eau de 5 à 7 fois supérieur à celui des pièces trempées et le médium de trempe doit être agité.

Épaisseur des parois ou $\varnothing$ (mm)	Temps maximal de transfert (seconde)
Sous 5	5
Entre 6 et 8	7
Entre 9 et 22	10
23 et plus	15

**Tableau I.9:** Le temps maximal de transfert et l'épaisseur des parois[18].

### I.4.2.1 Traitement de vieillissement

Le but principal des traitements de vieillissement est de modifier les propriétés mécaniques des alliages après trempe. Ces propriétés mécaniques sont convenables pour plusieurs applications.

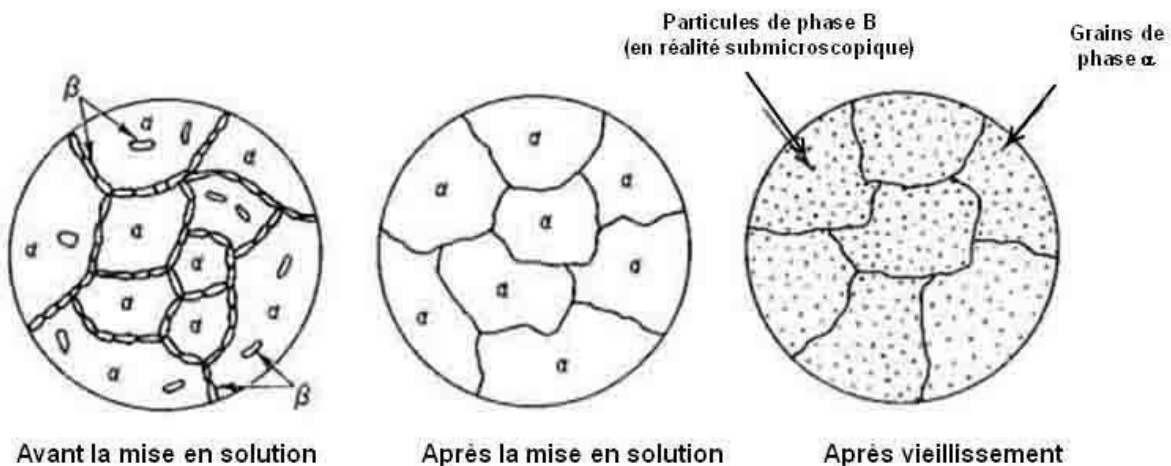
## Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages

### I.4.2.1.1 Vieillessement naturel (Maturation) :

Les alliages traités thermiquement voient leurs propriétés changées une fois revenus à la température ambiante après leur traitement thermique. Ceci est appelé vieillissement naturel. Le taux de vieillissement change selon le type d'alliage et également dans un type d'alliage, de sorte que le vieillissement naturel est stable pouvant durer de quelques jours jusqu'à plusieurs années. Certains alliages de la série 6000 qui sont durcissant et peuvent atteindre une dureté maximale après un mois à la température ambiante.

### I.4.2.1.2 Vieillessement artificiel (Revenu) :

Il consiste en un chauffage à une température au-dessus de la température ambiante, et en maintient selon les objectifs désirés et la nature du matériau traité, la précipitation s'accélère et la dureté augmente encore par comparaison au vieillissement naturel. Ceci est appelé vieillissement artificiel et il est effectué à des températures allant jusqu'à 240°C (100 à 240°C dans le cas de la série 6000) Pendant le vieillissement artificiel à une température donnée, la dureté augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale après un temps de maintien donné [20].



**Figure I.6:** La mise en solution[18].

### I.4.3 Traitements thermiques d'homogénéisation :

Les traitements dits d'homogénéisation consistent à maintenir à une température assez élevée (le plus souvent entre 450 et 610 °C) et pendant des temps prolongés (en général durant 6 à 48 h) les plaques ou billettes coulées, afin de faciliter leur transformation ou d'améliorer les propriétés des produits obtenus. Ces traitements ont pris depuis ces dernières années une ampleur considérable, si bien qu'à l'heure actuelle ils sont extrêmement répandus et tendent à se généraliser non seulement dans le cas des alliages d'aluminium mais également dans le cas de l'aluminium non allié.

Les effets de l'homogénéisation peuvent être plus ou moins complexes suivant l'alliage auquel ils s'appliquent et également suivant les conditions de coulée de cet alliage. D'une façon générale, plusieurs types d'évolution aisément observables dans les alliages d'aluminium peuvent être retenus à savoir :

- la dissolution de phases intermétalliques en excès ;
- le nivellement des concentrations dans la solution solide ;
- la coalescence de phases intermétalliques déjà présentes ;
- la précipitation de nouvelles phases intermétalliques[21].

### I.4.4 Les traitements d'adoucissement par restauration ou recuit

Ils ont pour but principal d'adoucir et de régénérer la plasticité d'un métal ou un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale. Dans le cas de l'écrouissage, se sont les traitements de restauration et les recuits de recristallisation. Ces traitements ont des effets semblables à ceux pour l'aluminium.

Seules les températures de traitement sont plus élevées pour les alliages :

-le traitement de restauration est effectué entre 200 à 300 °C pendant 1 à 8 heures, permettant le réarrangement des dislocations et une diminution de la densité des dislocations dans le métal en conservant la structure de grains d'origine.

## Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages

La restauration favorise l'état d'équilibre et est facilitée par une augmentation de la température puisqu'elle est basée sur la diffusion à l'état solide.

-le traitement de recristallisation est effectué entre 300 à 400 °C pendant 0,5 à 3 heures et refroidissement lent (10°C/heure) permettant d'éliminer la microstructure écrouie obtenue suite au travail à froid (laminage, étirage etc.) par la formation de nouveaux grains (phénomène de recristallisation). Ce traitement contribue à abaisser la limite d'élasticité et la limite ultime et à augmenter la ductilité de l'alliage [20].

### I.5 Désignation des états métallurgiques :

L'état métallurgique d'un alliage, en lien avec ses propriétés mécaniques, résultant de l'application d'un traitement thermique, est représenté par une désignation standard, décrite pour les alliages corroyés dans la norme NF EN 515 [22].

Un traitement thermique est désigné par les lettres suivantes :

Les états F et O ne comprennent pas de subdivision. Les états H et T sont définis de façon plus précise par des chiffres complémentaires.

#### Subdivisions de l'état H :

- Le premier chiffre indique le moyen principal d'obtention du produit.

H1 : Écrouissage.

H2 : Écrouissage puis restauration.

H3 : Écrouissage puis stabilisation.

- Le second chiffre indique le niveau de dureté du métal.

2 : État quart dur/

4 : État demi dur/

6 : État trois-quarts dur/

## Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages

8 : État dur/9 : État extra-dur.

Par exemple : H24 : écroui 1/2 dur et recuit.

**Tableau I.10** : Désignation des états métallurgiques de base [23].

Désignation	Etats métallurgiques
<b>F</b>	Tel que fabriqué à chaud
<b>O</b>	Etat Recuit ou recristallisé
<b>H</b>	Ecroui par déformation à froid
<b>T</b>	Traité thermiquement

### Subdivision de l'état T:

- Le premier chiffre derrière le symbole T précise le type de traitement thermique Appliqué.

Designation	Descriptive de treatment
<b>T1</b>	Pas de mise en solution, maturation
<b>T2 et T6</b>	Mise en solution, trempe, revenu
<b>T3</b>	Mise en solution, trempe, écrouissage, maturation
<b>T4</b>	Mise en solution, trempe, maturation
<b>T5</b>	Pas de mise en solution, revenu
<b>T7</b>	Mise en solution, trempe, sur revenu
<b>T8</b>	Mise en solution, trempe, écrouissage, revenu
<b>T9</b>	Mise en solution, trempe, revenu, écrouissage

**Tableau I.11**: traitement thermique des alliages d'aluminium.

- Parfois, on rencontre derrière ces symboles des chiffres de complément

## Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages

supplémentaires. Ils précisent des variantes ou des combinaisons des traitements avec une opération à froid (p. ex. T41, T61, T651)[ 24].

### **I.6 Influence des éléments d'additions Sur les propriétés des alliages d'aluminium :**

Les éléments d'addition tels que le cuivre, le magnésium, le manganèse, le silicium, le fer, le nickel, le chrome et le cobalt peuvent être soit en solution ou sous forme de précipités suite aux traitements thermiques appropriés. Elles jouent un rôle très important dans la métallurgie car ils peuvent améliorer ou détériorer les propriétés physiques, chimiques et technologiques de l'aluminium pur [25 ,26].

#### **I.6.1 Excès de magnésium:**

La présence de magnésium améliore la trempabilité du matériel, augmente la résistance mécanique sans modifier la déformabilité, facilite la précipitation dans les joints de grains. L'introduction de Mn réduit la proportion de Si en solution dans les alliages AlMgSi par la formation des précipités Al Mn Si et réduit ainsi la précipitation de Si et de Mg<sub>2</sub>Si dans les joints de grains [27].

#### **I.6.2 Effet du cuivre dans les alliages d'aluminium Al-Mg-Si**

Généralement le cuivre est toujours présent, dans les alliages d'aluminium industriels de la série 6xxx, au moins en tant qu'impureté. Les études de la précipitation dans le système Al- Mg- Si-(Cu) ont longtemps considéré que le cuivre ne changeait pas la séquence de précipitation s'il était présent dans l'alliage comme élément d'addition secondaire. L'effet d'une faible teneur en cuivre (0,1%) est affiné la précipitation et augmenté le durcissement après revenu. En générale l'addition du cuivre s'avère pour augmenter la cinétique du précipitation durcissant et amélioré la microstructure. Le Cu change la morphologie des précipités en lattes plus fines [27].

### I.6.3 Excès de silicium

Les alliages d'aluminium Al-Mg-Si dits "à excès de silicium" ont un rapport  $Mg/Si$  inférieur à 2. Ils ont un pic de dureté supérieur aux alliages dits stœchiométriques [28]. Un excès de silicium augmente également le durcissement par maturation à l'ambiante. Il semble cependant que, dans ce cas, le silicium n'influe pas sur la cinétique, mais uniquement sur la dureté de départ [29]. Comme dans le cas de la présence de cuivre, la composition de ses précipités durcissants est également affectée par un excès de silicium. La séquence de précipitation est également modifiée par un excès de silicium.

### I.6.4 Les dispersoïdes :

#### a) Cr et Mn

modifie de façon générale la forme et éventuellement la taille des grains et améliore la ductilité et la ténacité, ils sont utilisés dans les alliages d'aluminium pour éviter la recristallisation ou cours de la mise en solution [30][31].

#### b) Le manganèse

utilise pour neutraliser les effets néfastes du fer et modifier la morphologie des intermétalliques. Il est également considéré comme le plus efficace comparativement au Chrome, au Nickel, au Cobalt et au Molybdène [32].

#### c) Fer

Favorisent la formation des particules insolubles, qui facilitent la rupture des alliages d'aluminium [33].

## **Chapitre II**

### **Méthode de caractérisation par l'essai de dureté**

## Introduction

La dureté est une propriété très importante dans la caractérisation mécanique des matériaux solides, elle indique l'opposition à la pénétration, c'est-à-dire une résistance superficielle de matériau solide. Alors, la dureté est définie comme la résistance du matériau à la pénétration par un corps plus dur. La mesure de dureté statique d'un matériau est par l'intermédiaire de l'essai de dureté, celui-ci consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal à tester sous l'effet d'une charge constante, puis en mesurant la dimension de l'empreinte

### II.1. Essais de dureté et propriétés mécaniques :

Il s'agit des essais les plus couramment pratiqués. Le principe est toujours identique : un pénétrateur indéformable laisse une empreinte dans le matériau à tester. On mesure les dimensions de l'empreinte et on en déduit la dureté. Dans une première approche, on peut relier de manière assez simple la limite d'élasticité  $R_e$  avec la surface de l'empreinte. [48-51] .

Plus l'objet pénétrant s'enfonce, plus la surface  $S$  de pression s'agrandit, donc la force  $F$  étant constante, plus la contrainte diminue. Lorsque la contrainte n'est plus suffisante pour déformer plastiquement le solide à tester, l'objet pénétrant s'arrête, et on a donc : Les valeurs de dureté obtenues grâce aux différents protocoles et dispositifs d'essais indiqués ci-dessous sont cette limite d'élasticité  $R_e$  mais les résultats ne sont pas identiques car ces calculs simplifiés prennent en compte la surface de la projection de l'empreinte (comme un disque ou un carré) au lieu de prendre en compte la vraie surface de l'empreinte (comme la surface de la calotte sphérique ou des facettes de l'empreinte pyramidale). Un essai Brinell et un essai Vickers sur la même éprouvette ne donnent pas la même valeur en résultat, mais en ramenant par le calcul la valeur de la force à la vraie surface de l'empreinte (respectivement un calotte sphérique ou une pyramide), on tombe dans les deux cas sur la même valeur qui est la valeur « de pression » du matériau solide. Elles ne prennent pas en compte l'écroûissage qui est différent pour chaque type d'essai. Il existe une grande variété d'essais de dureté possibles :

- Dureté Vickers (HV) qui a l'échelle la plus large ;
- Dureté Brinell (HB) ;
- Dureté Knoop (HK), pour des mesures de petite surface ;
- Dureté Janka, pour le bois ;

- Dureté Rockwell (HR), principalement aux États-Unis d'Amérique ;
- Dureté Shore, surtout pour les polymères ;
- Dureté Barcol, surtout pour les matériaux composites [34].

## II.2 Essai de dureté Brinell

### II.2.1 Principe de l'essai Brinell

L'essai Brinell est effectué sous les conditions suivantes [35-36] :

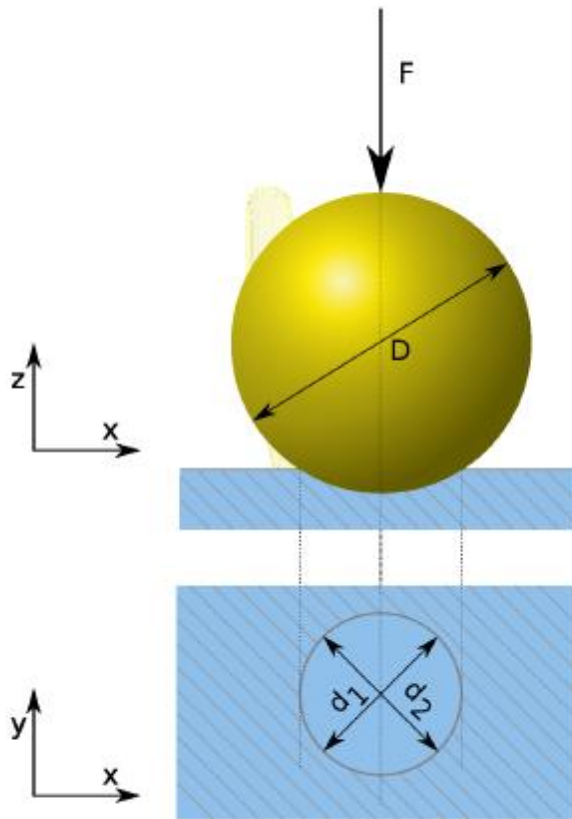
- pénétrateur : forme sphérique (bille bien polie),
- matériau : acier trempé ou carbure de tungstène,
- diamètre : 1, 2.5, 5 et 10mm selon la grosseur de la pièce et la charge appliquée,
- charge appliquée : selon le matériau à tester et la grosseur de la pièce,
- maintien sous charge : 10 à 30 secondes selon la nature du matériau,
- forme de l'empreinte : calotte à base circulaire permanente de diamètre  $d$ ,
- mesure : diamètre dans deux directions perpendiculaires.

La dureté sera exprimée en  $\text{kgf/mm}^2$  ou MPa selon les unités utilisées de la force appliquée et l'empreinte mesurée. De même, plus la surface est bien préparée (planéité, finition), plus l'empreinte est bien délimitée et par conséquent la mesure de la dureté est fiable et crédible.

La figure 1 donne le principe de l'essai de mesure de dureté Brinell. Ainsi, nous pouvons les précautions qu'il faut prendre pour une mesure précise :

l'épaisseur de la pièce doit être au moins huit fois la profondeur de l'empreinte pour éviter toute déformation sur la face opposée [35-36] .

- distance du centre de l'empreinte au bord de la pièce supérieure ou égale à  $2.5d$  (où  $d$  est le diamètre de la bille utilisée),
- distance entre les centres de deux empreintes voisines supérieure ou égale à quatre fois leurs diameters.



**Figure II.1:** Principe de la dureté Brinelle.

## II.2.2 Dureté Brinell

La dureté Brinell est calculée par la formule suivante depuis son établissement au début du vingtième siècle :

HB = charge appliquée/aire de la calotte sphérique de l'empreinte. Ainsi, l'équation correspondante sera donnée par :

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

Où :

$D$  : diamètre du pénétrateur (mm),

$d$  : diamètre de l'empreinte (mm),

$P$  : charge appliquée au pénétrateur (kg).

Si on prend l'approximation  $d/D$  négligeable, la dureté Brinell subira les simplifications suivantes :

$$D - \sqrt{D^2 + d^2} = D \left( 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d^2}{D^2}\right)} \right) \approx D \left( 1 - \left( 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{d^2}{D^2}\right) \right) \right) = D \left( \frac{1}{2} \left(\frac{d^2}{D^2}\right) \right) = \frac{d^2}{2D}$$

$$\approx 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{d^2}{D^2}\right)$$

Ainsi, l'équation de la dureté de Brinell aboutit à la forme :  **$HB = 4P/\pi d^2$**

### Exemple :

#### 210 HBW 5/250/30

- 210 ...valeur de dureté
- HBW ...selon Brinell avec bille en carbure de tungstène
- 5 ...diamètre de bille 5 mm
- 250 ...avec charge d'essai de 250 kgf (ou force d'essai de 2,452 N)
- 30 ...temps de maintien de la force d'essai hors de la durée recommandée, dans ce cas : 30 secondes.

## II.3. Essais de dureté Rockwell

### II.3.1 Principe de l'essai Rockwell

Les essais de dureté Rockwell sont des essais de pénétration. Il existe plusieurs types de pénétrateurs qui sont constitués :

- d'un cône en diamant d'angle au sommet  $120^\circ$  et d'une pointe de rayon 0.2mm
- d'une bille en acier trempé polie de diamètre 1.588mm ou 3.175mm.

Pour obtenir une valeur de dureté Rockwell, on mesure une pénétration rémanente du

pénétrateur sur lequel on applique une faible charge. Comme il est décrit dans les ouvrages de mécanique de base, l'essai se déroule en trois phases:

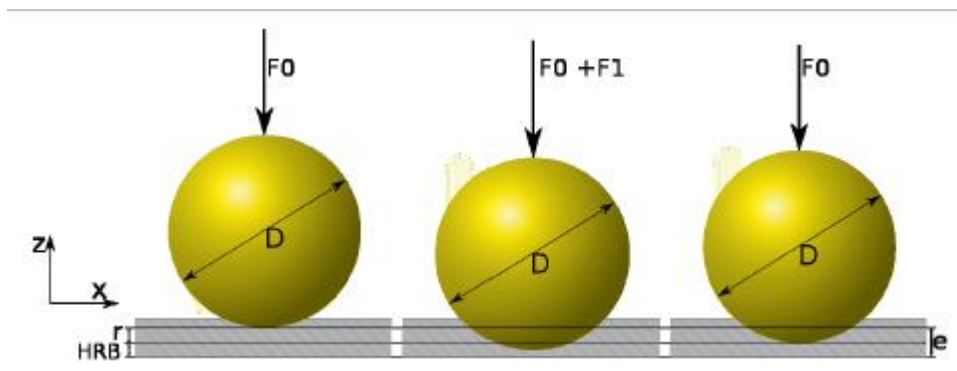
- application sur le pénétrateur d'une charge initiale  $F_0 = 98 \text{ N}$ , appelée généralement Pré charge. Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur initiale  $I$ . Cette profondeur sera considérée comme origine pour la mesure de la dureté Rockwell ;
- application d'une force supplémentaire  $F_1$ . Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur supplémentaire  $P$  ;
- relâchement de la force  $F_1$  et lecture de l'indicateur d'enfoncement. La valeur de  $(r)$  étant l'enfoncement rémanent obtenu en appliquant puis en relâchant la force  $F_1$  [37-38].

Les figures 2 et 3 présentent les trois phases de l'essai Rockwell bille et Rockwell cône respectivement.

### II.3.2 Dureté Rockwell

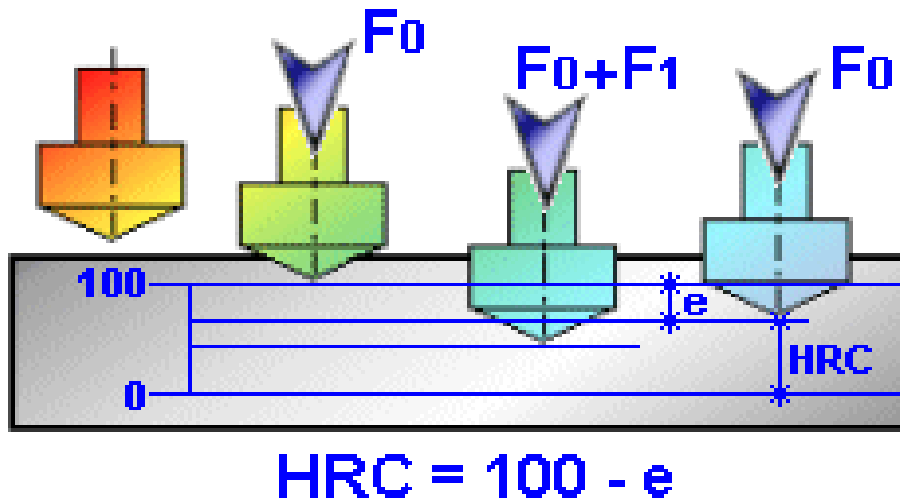
a) Les expressions de différentes échelles de dureté Rockwell (Échelle B, E et F) sont données par la formule suivante :

$$\text{HRB} = 130 - r$$



**Figure II.2:** Essai de la dureté Rockwell (échelle B, bille en acier).

b)



**Figure II.3:** Essai de dureté Rockwell (Échelle C), ( $e \approx r$ ). [39]

Mais pour l'échelle C, l'expression de dureté Rockwell prend la forme suivante :

$$\text{HRC} = 100 - r$$

La valeur  $r$  étant l'enfoncement rémanent est obtenu en appliquant puis en relâchant la force  $F$  appliquée au pénétrateur (Fig. 2). L'unité de dureté Rockwell correspond à une pénétration de 0,002mm.

### II.3.3 Différentes échelles de dureté Rockwell

La dureté Rockwell est classée de l'échelle A où le pénétrateur est un cône en diamant de section circulaire à pointe arrondie sphérique de 0,2 mm à l'échelle G où le pénétrateur a la forme d'une bille en acier de 1,588mm de diamètre (Tab.I).

Échelle	Symbole	Pénétrateur	Valeur de la force totale $F_0 + F_1$ (N)	Application
A	HRA	Cône de diamant de section circulaire à pointe arrondie sphérique de 0,2 mm	588,6	Carbure, acier et en épaisseur mince
B	HRB	Bille d'acier de 1,588 mm (1/16 de pouce) de diamètre	981	Alliage de cuivre, acier doux, alliage d'aluminium Matériaux ayant une résistance à la rupture comprise entre 340 et 1000 MPa
C	HRC	Cône de diamant de section circulaire à pointe arrondie sphérique de 0,2 mm	1471.5	Acier, fonte, titane Matériau ayant une dureté résistance à la rupture supérieure à 1000 MPa
D	HRD	Cône de diamant de section circulaire à pointe arrondie sphérique de 0,2 mm	981	
E	HRE	Bille d'acier de 3,175 mm (1/8 pouce) de diamètre	981	Fonte, alliage d'aluminium et de fonte
F	HRF	Bille d'acier de 1,588 mm de diamètre	588,6	Alliage de cuivre recuit, fine tôle de métal.
G	HRG	Bille d'acier de 1,588 mm de diamètre	1471.5	Cupro-nickel, alliage cuivre-nickel-zinc

**Tableau II.1 :** Les deux échelles les plus utilisées sont les *échelles B et C*. [39].

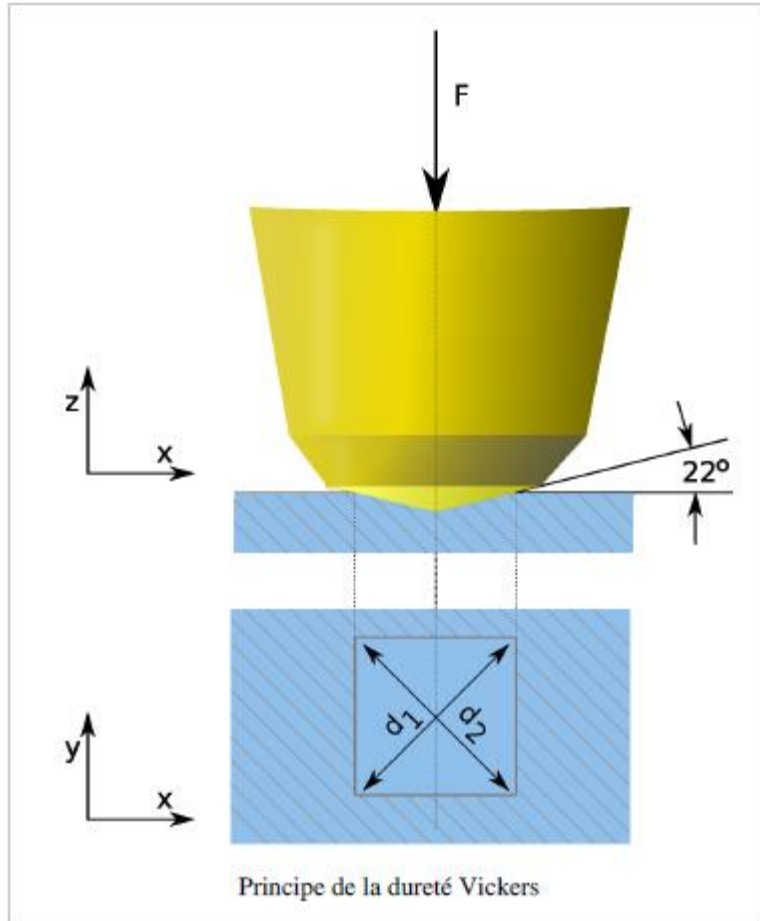
## II.4 Essai de dureté Vickers

### II.4.1 Principe de l'essai Vickers

Pour la détermination de la dureté Vickers (HV), le pénétrateur pyramidal (avec un angle au sommet entre faces de  $136^\circ$ ) est pressé avec une charge d'essai définie à partir d'1 gf contre un échantillon (pièce). sous l'action d'une force connue (Fig. 4). On mesure la diagonale de l'empreinte carrée laissée par le pénétrateur .

La dureté vickers est le rapport de la charge appliquée à la surface de l'empreinte carrée.

L'avantage d'un pénétrateur pyramidal réside dans l'obtention des empreintes géométriquement semblables entre elles, même si on fait varier la charge, donc des valeurs identiques de dureté [40.41].



**Figure II.4:** Essai de dureté Vickers.

Des précautions similaires à celles de la dureté Brinell sont recommandées à l'essai Vickers. Nous citons entre autres le champs d'application de l'empreinte, l'épaisseur nécessaire de la pièce à tester, l'état de surface de la pièce et l'état des arêtes du pénétrateur.

**Exemple : 640 HV30**

- 640 ...valeur de dureté
- HV ...selon VickersHardness
- 30 ...avec charge d'essai 30 kgf (ou force d'essai 300 N).

## II.4.2 Dureté Vickers

Dans l'essai Vickers (Smith et Sandland 1925), une pyramide à base carrée en diamant est utilisée comme pénétrateur. La dureté Vickers HV est définie par :

$HV = \text{charge appliquée} / \text{aire latérale de l'empreinte pyramidale}$

Elle est calculée par :

$$Hv = \frac{\text{la charge appliquée}}{\text{surface de l'empreinte}}$$

$$Hv = \frac{2F \sin 68}{gd^2} = \frac{1.85p}{d^2} = \frac{0.189F}{d^2}$$

$$\text{avec} \quad d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$H$  : dureté Vickers,

$F$  (N) : charge appliquée au pénétrateur,

$d$  (mm) : diagonale moyen de l'empreinte.

## II.5 Essai de dureté Knoop

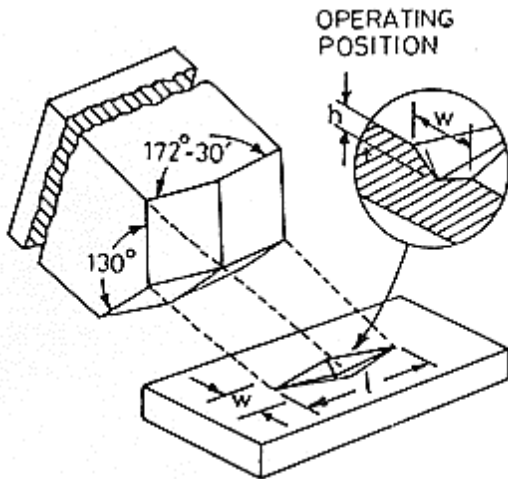
### II.5.1 Principe de l'essai Knoop

Pour la détermination de la dureté Knoop HK (selon ISO 4545), le pénétrateur pyramidal de forme losange (angle de bord longitudinal  $172,5^\circ$ , angle de bord transversal  $130^\circ$ ) est pressé avec une charge d'essai définie (entre 1 gf et 2 kgf) contre un échantillon[41]. (Fig. 5).

Le temps d'application de la force d'essai admis par la norme est de 2 à 8 secondes (durée de consigne 7 s). Le temps de maintien de la force d'essai est de 10 à 15 secondes (durée de consigne 14 s). En cas de temps de maintien plus long, la durée doit être mentionnée en secondes dans la valeur de dureté,

par exemple : 870 HK 1/30 (temps de maintien de 30 s).

Les forces d'essai appliquées dans la méthode Knoop sont très faibles. Les empreintes sont donc elles aussi très petites. C'est pourquoi il est essentiel de veiller à l'absence de chocs et de vibrations lors de l'essai afin de ne pas fausser les valeurs de mesure.



**Figure II.5:** Essai de dureté Knoop (Pénétrateur Pyramide à base losange).

## II.5.2 Dureté Knoop

La dureté Knoop HK s'exprime par le rapport de la charge appliquée  $F$  à la surface projetée  $A$  de l'empreinte, elle s'écrit par la formule suivante :

$$HK = \frac{F}{A} = \frac{F}{EL^2} = \frac{F}{0,07028l^2} = \frac{14.23F}{l^2}$$

Avec  $E = 7,028 \cdot 10^{-2}$

Où

$F$  (N) : charge appliquée au pénétrateur,

$A$  ( $mm^2$ ) : surface de l'empreinte,

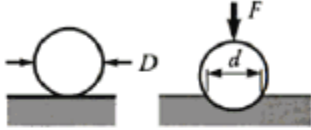

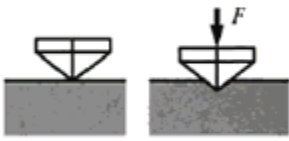


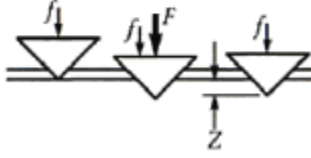
$l(mm)$  : longueur de la plus grande diagonale imprimée,

E : rapport constant

### II.5.3 Comparaison entre les méthodes de pénétration :

Type de contrôle	Application	Symbole de dureté
Essai Brinell	Les essais selon Brinell s'appliquent au fer et à l'acier d'une résistance de 1000 à 1500 N/mm <sup>2</sup> et à tous les métaux non-ferreux.	HB
Essai Vickers	Cet essai consiste à appliquer à la surface d'un matériau préalablement préparé (surface plane, polie et dépourvue d'écaillage), une charge prédéfinie, à l'aide d'un pénétrateur.	HV
Essai Knoop	L'essai Knoop vise à tester des matériaux très durs mais néanmoins très fragile.	HK
Essai Rockwell	Les essais de dureté Rockwell sont des essais de pénétration en mécanique. Il existe en fait plusieurs types de pénétrateurs qui sont constitués d'un cône en diamant ou d'une bille en acier trempé polie. Pour obtenir une valeur de dureté Rockwell, on mesure une pénétration rémanente du pénétrateur sur lequel on applique une faible charge.	HR

**Tableau II.2: les application des méthodes et ses symboles [42]**

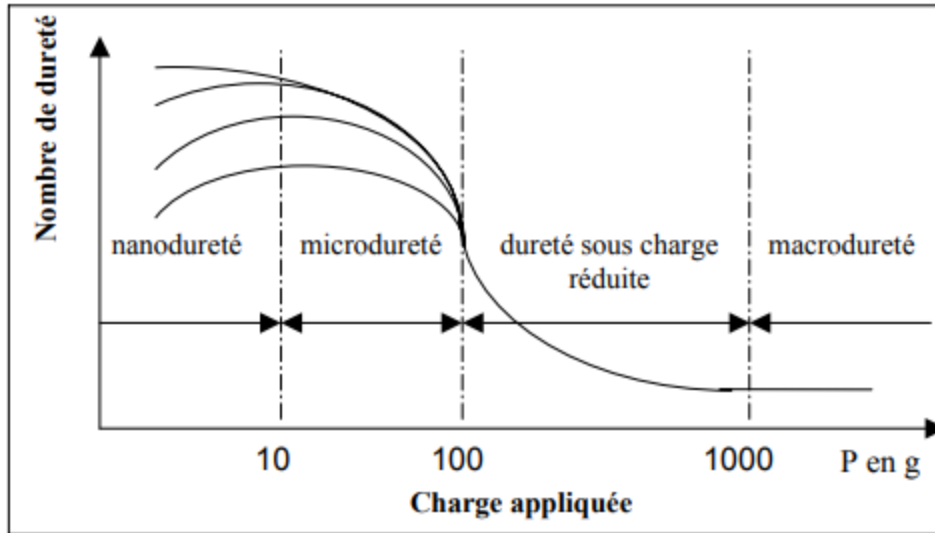
Méthode d'essai	Géométrie du pénétrateur	Charge $F$	Principe de l'essai	Paramètre mesuré	Dureté
<b>Brinell</b>	Bille d'acier dur ou de carbure (10 mm de diam.)	500 ou 3000 kgf		Diamètre de l'empreinte ( $d$ )	$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
<b>Vickers</b>	Pyramide de diamant à base carrée; angle entre les faces opposées: 136° 	5 à 100 kgf (microdureté: 5 à 1000 gf)		Diagonale de l'empreinte ( $d$ ) 	$HV = \frac{1,854 F}{d^2}$
<b>Rockwell C</b>	Cône de diamant d'angle au sommet de 120° 	Précharge $f$ de 10 kgf; $F = 150$ kgf		Profondeur de l'empreinte ( $Z$ )	$HRC = f(Z)$
<b>Rockwell B</b>	Bille d'acier dur (1,59 mm de diam.)	Précharge $f$ de 10 kgf; $F = 100$ kgf	Même principe que Rockwell C	Profondeur de l'empreinte ( $Z$ )	$HRB = f(Z)$

**Tableau II.3 :** regroupe les définitions des méthodes essais de dureté par pénétration [42].

## II.6 Domaines de dureté.

En pratique, nous pouvons constater que la dureté mesurée varie en fonction de la charge appliquée. On distingue généralement quatre domaines de mesure de dureté : nano dureté, micro dureté, dureté sous charge réduite et macro dureté. Les limites de ces domaines sont déterminées suivant l'allure de la courbe de dureté en fonction de la charge d'indentation.

Elles ne sont pas définies de manière très précise. Cependant, on peut en donner un ordre de grandeur, qui représente la variation de la dureté en fonction de la gamme de chargement, comme cette figure :



**Figure II.6** : variation du nombre de dureté en fonction de la charge appliquée.

On remarque sur cette figure que, selon le domaine de charge, la dureté dépend ou non de la charge d'indentation. Ceci permet de proposer trois grandes régions :

- La macro dureté pour laquelle le nombre de dureté ne varie pas avec la charge.
- La micro dureté sous charge réduite où le nombre de dureté augmente généralement quand la charge diminue.
- La nano dureté, correspondant aux plus petites charges d'indentation, est une région où le nombre de dureté peut croître ou décroître selon les cas.

La variation de la dureté, qui correspond le plus souvent à une augmentation de la valeur pour les faibles charges, est un phénomène largement décrit dans la littérature. Ce phénomène est appelé

en anglais Indentation Size Effect (ISE) ou Effet de Taille d'Empreinte. Du fait de son existence, le seul nombre de dureté ne suffit pas pour caractériser un matériau. Le problème se pose surtout lorsqu'on veut comparer des valeurs de dureté entre elles. Il est recommandé alors d'indiquer la charge avec laquelle la dureté est mesurée ou mieux, d'exprimer la variation de la dureté avec la charge appliquée [43].

## II.7 Essai de la micro dureté

Cette méthode permet de se libérer de la dispersion et de l'imprécision des déterminations des duretés des matériaux rencontrées avec les mesures classiques de dureté.

Elle a le même principe que la méthode statique, mais avec une charge appliquée au pénétrateur inférieure à 100g, 1N, et l'intervalle (0.1-1N), et la taille de l'empreinte laissée par la pointe sur la surface peut varier de quelques centaines de micromètres. Elle permet de résoudre de nombreux problèmes tels que : la mesure de la dureté des couches minces, évaluation de l'écrouissage local, exploration d'alliages à phases multiples etc [44-45].

Des phénomènes influençant les mesures des micros duretés nécessitent certaines précautions opératoires :

L'empreinte doit être suffisamment nette pour permettre une lecture précise, ce qui exige un bon état de surface de la pièce testée ;

La légère croissance de la valeur de la dureté, jusqu'à la charge de 1N, montre la nécessité de spécifier la charge sous laquelle la mesure a été fait pour obtenir des résultats comparables ;

Prendre en considération la charge maximale à appliquer de manière que la dureté du métal support n'intervienne pas dans les mesures [45].

# Chapitre III

## Techniques expérimentales

## III.1 Introduction

Dans l'industrie de la mise en forme, comme celle de l'extrusion de l'aluminium, le traitement thermique joue un rôle très important, cependant qu'un mauvais traitement augmente d'une manière significative le coût de production du profilé extrudé, le retraitement engendre une perte énergétique et temporelle.

L'objet de ce travail est l'étude de l'effet de traitement thermique sur propriétés mécaniques et la microstructure de l'alliage d'aluminium 6063. Dans ce travail on a étudié seulement la propriété mécanique de dureté, afin de réaliser cette dernière, nous avons conçu quatre échantillons pour chaque type de traitement. Ces échantillons ont subi différents traitements thermiques et ils ont été testés sur un testeur de dureté nommé Webster W-20 (testeur de dureté pour alliage d'aluminium gamme 0-20 Webster Hardness --hW--).

Ce chapitre décrit les différents traitements thermiques réalisés au cours de notre travail de mémoire de fin d'étude, préalablement, en commence par une brève présentation sur le matériau étudié et ses compositions chimiques, puis nous citons les différents traitements thermiques suivis et leurs essais mécaniques de dureté. Ensuite, afin de réaliser une étude microscopique, on a fait des traitements de surface par polissage sur quatre d'éprouvettes différents que les autres, on a également décrit les techniques d'analyse utilisées pour la caractérisation d'échantillons tels que le microscope optique.

## III.2 Choix de Matériau

L'addition des éléments à l'aluminium pur tel que le fer, le silicium, le cuivre, le magnésium, le manganèse et le zinc à des concentrations combinées est appelé un alliage

d'aluminium, ils sont identifiés par un numéro à quatre chiffres dans lequel le premier chiffre identifie une série caractérisée par ses principaux éléments d'alliage.

Le matériau étudié dans ce travail est un alliage d'aluminium 6063 série 6xxx (à base: magnésium et silicium), communément nommé série 6000, il est transformé dans l'industrie sous forme des profilés comme le cas de l'entreprise algérienne (algal+), elle est prête parfaitement à

l'anodisation, thermo laquage et utilisé dans de nombreux domaines non spécialisés. Les propriétés chimiques données par la société Algal+ sont présentées dans le Tableau III.1.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Pb	Na	Al
0.4679	0.16365	0.0013	0.00267	0.4682	0.0016	0.0078	0.0002	0.0042	0.0030	0.0013	98.858

**Tableau III.1 Composition chimique (composition massique %) d'Aluminium 6063.**

Dans le cadre des essais réalisés au niveau de laboratoire de l'entreprise (algal+) Msila, la détermination de la composition chimique fait par la spectrométrie d'émission optique OES à source étincelle (Figure III.1), c'est un essai rapide et simple à mettre en œuvre pour valider la conformité d'une pièce par rapport à une norme produit. Cette technique est par ailleurs très couramment utilisée dans l'industrie.



**Figure III.1:** Spectrométrie d'émission optique par étincelle utilisé pour déterminer la composition chimique.

### III.3 Traitements thermique

Les traitements thermiques sont des opérations de chauffage et de refroidissement faites pour améliorer les propriétés mécaniques comme (Figure III.2) . Les alliages sont plus résistants et ils ont une meilleure ductilité. Dans le présent travail, on a suivi les traitements thermiques illustré dans la figure ci-dessous (figure III.3), mise en solution, trempe et revenu.

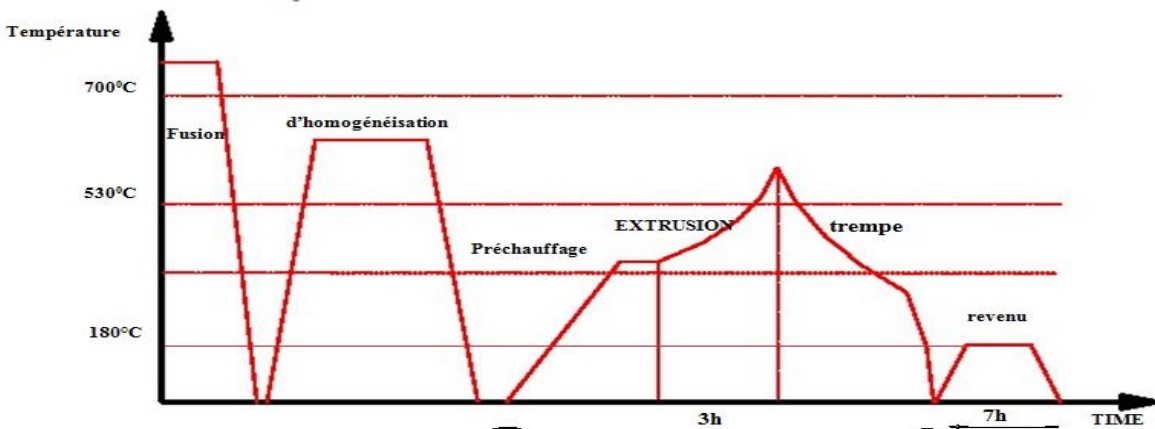


Figure III.2 : cycle de traitement thermique dans l'entreprise.

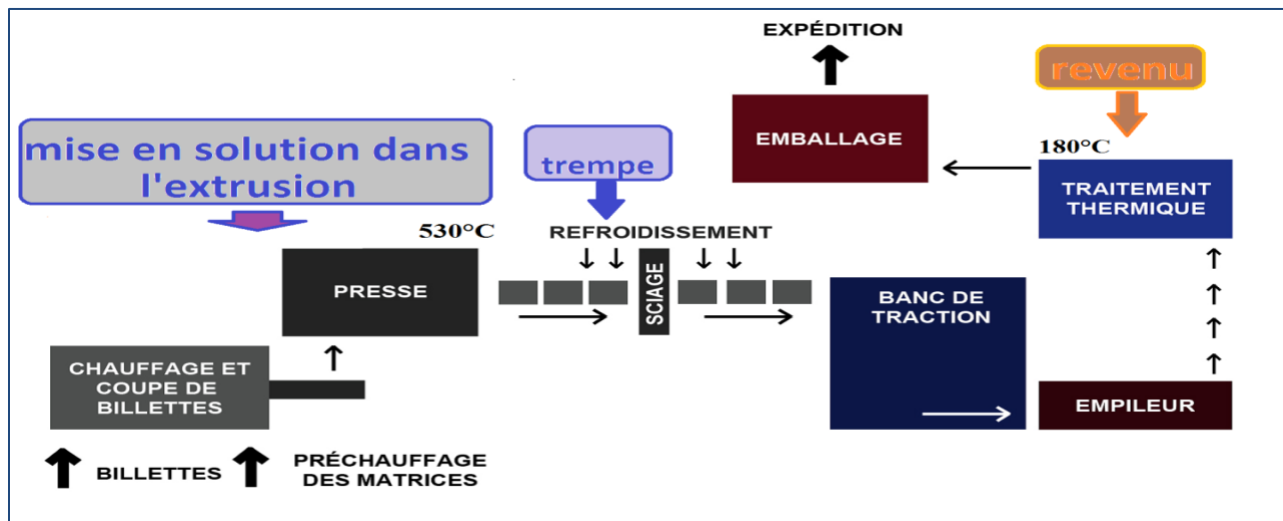


Figure III.03 :le traitement thermique appliqué .

### III.3.a Mise en solution:

La mise en solution concerne notamment les alliages 6063, comme mentionné précédemment, l'objectif de ce traitement est d'amener dans la solution solide la quantité maximale et solution sursaturé de l'élément de durcissement soluble ou élément d'alliage (ex. Cu, Mg, Si) dans la matrice d'alliage aluminium. Cette opération est réalisée à l'aide d'un four d'extrusion d'entreprise algal+ (figure III.4).



**Figure III.4:** Four d'extrusion utilisé pour la mise en solution.

L'extrusion est un procédé de mise en forme de l'alliage d'aluminium, par une presse d'extrusion (figure III.5) sous forme de billette à l'origine, est poussé sous forte pression par l'action d'un piston à travers une filière, pour en sortir sous la forme d'un profilé, nous effectuait le traitement de la mise en solution sur la billette par échauffement totalement à une température 530°C pendant 3h et la pression d'extrusion égale à 147 bar .la vitesses d'extrusion 15 mm/s , pour obtient à la sortie de la presse d'extrusion une solution solide homogène des profilés d'alliage d'aluminium .



**Figure III.5:** Four d'extrusion utilisé pour la mise en solution.

### III.3.b Trempe

Pour notre étude nous avons appliqué un traitement thermique de trempe, cette opération consiste à un refroidissement suffisamment très rapide ( $\sim 260$  °C/s) de la solution solide, pour que les précipités intermétalliques stables n'aient pas le temps d'être formés. Elle ne prend pas de temps, puisqu'elle a une très courte durée.

Après la sortie de la presse d'extrusion une solution solide homogène des profilés d'alliage d'aluminium à température  $530^{\circ}\text{C}$  directement formé, nous avons coupé la profile d'aluminium à l'aide d'une cisaille automatiquement en quatre échantillons à longueur 15cm en très peu de temps 5s, et après ça nous avons effectués un traitement de trempe et ses types (figure III.6) comme suit :

#### III.3.b.1 Trempe par huile

Nous mettons l'échantillon de profilé d'alliage d'aluminium rapidement dans le bassin d'huile et on laisser Pendant 15sec.

#### III.3.b.2 Trempe par eau

Nous mettons l'échantillon de profilé d'alliage d'aluminium rapidement dans le bassin d'huile et on laisse Pendant 15sec.

### III.3.b.3 Trempe à air ambiant

Nous laisserons l'échantillon pendant 15min en température ambiante.

### III.3.b.4 Trempe air comprimé

Nous mettons l'échantillon de profilé d'alliage d'aluminium sous l'air comprimé à l'aide d'une pompe à air pendant 15sec.



Figure III.6 : Échantillon de traitement thermique.

### III.3.C Revenu

Le revenu est réalisé pour connaître l'effet du traitement thermique sur les propriétés mécaniques. Dans ce travail des traitements de revenu sur les différents échantillons des profils d'alliage aluminium sont effectués, et cela à une température de 180°C pendant de temps de revenu qui est 7h (figure ci-dessous), les cinq courbes pour.

temperature four de revenu					
Date		Operator Name	Hicham HADJI		
Batch Name	ALGAL PLUS	Batch Start	07:00:00		
Batch End	14:50:00	Batch Serial			
Batch Part No		Group Name	GROUP-1		
Tag-1	Z1	Tag-2	Z2		
Tag-3	Z3	Tag-4	Z4		
Page	1/1				
AIN_SIC1	AIN_SIC2	AIN_SIC3	AIN_SIC1	AIN_SIC2	AIN_SIC3
250 °C	181 °C	184 °C	182 °C	181 °C	177 °C

**Figure III.6 :** Répartition de température durant un cycle de revenu.

Le four de revenu utilisé au traitement du vieillissement des profilés aluminium en vue d'améliorer leur dureté et leurs performances mécanique, nous mettons en évidence le four de revenu installé au niveau de l'entreprise Algal+ (figures III.8 et III.9), il est fourni des températures allant jusqu'à 240°C (100 à 240°C), ces températures génère par un bruleur 800 à 880 KW de capacité de libération de chaleur, il sont avec une distribution uniforme à l'aide de ventilateur de circulation d'air chaud, cette dernière assurer une température à l'intérieur de la four supérieur à 50°C.

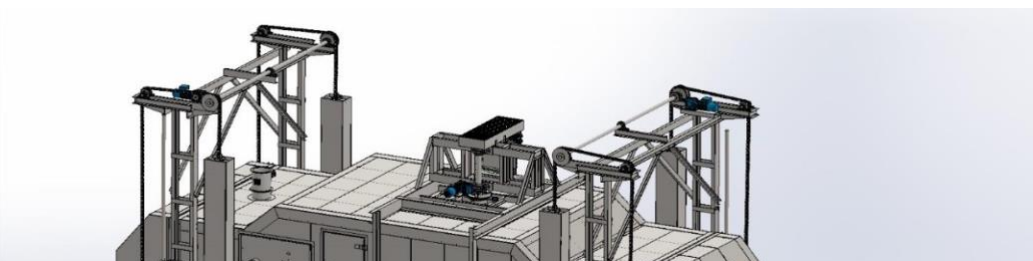


Figure III.8 Four de revenu.

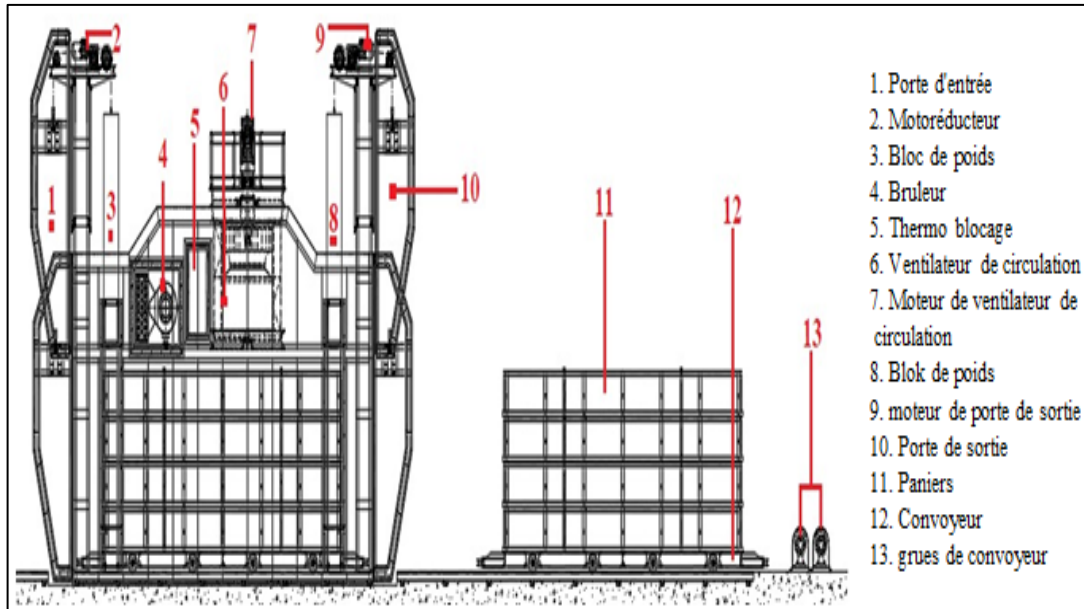


Figure III.9 : dessin technique de four.

### III.5 Méthodes expérimentale utilisées:

### III.5.1 Découpage d'échantillons

Le découpage a été automatiquement fait à l'aide d'une tronçonneuse à métaux discotom-2 (figure III.10) dans laboratoire avec une vitesse lente et sous une coulée d'eau pour le refroidissement. Les échantillons destinés à l'essai de dureté sont découpés à une longueur de 2 cm et une épaisseur de 0.8cm (figure III.11).



Figure III.10: Tronçonneuse à métaux discotom-2.



Figure III.11: Les échantillons d'alliage aluminium.

### III.5.2 Polissage mécanique

Les échantillons subissent un polissage au niveau de laboratoire à l'aide d'une polisseuse mécanique KNUTH-ROTOR2 (figure III.12), Les échantillons sont polis sur du papier abrasif aux carbures de silicium de différentes granulométries.

On a utilisé les papiers 1000, 1200, 2000.5000 placés sur un disque rotatif, Pour le polissage de finition un papier feutre, imprégné d'une pate diamantée ( $0,32 \mu\text{m}$ ) soluble dans l'eau.



**Figure III.12** : Machine polisseuse.

### III.5.3 Essais de micro dureté

La micro dureté d'un matériau caractérise sa résistance à la déformation. Sa mesure est basée sur la détermination des dimensions d'empreintes produites dans le matériau par enfoncement d'un poinçon en diamant très dur appelé pénétrateur pendant un temps donné, sous l'action d'une charge appliquée.

Au cours de ce travail, nous avons utilisé le testeur numérique de dureté Webster W-20 qui se trouve dans l'entreprise (Algal+) Msila pour suivre l'évolution de la micro dureté des échantillons étudiés durant les différents traitements thermiques appliqués (Nb. Après trempe et revenu).

#### III.5.3.1 Testeur numérique Webster

Nous avons utilisé un instrument portable Webster W-20 (figure.13), selon la norme américaine ASTM B647 il peut effectuer des tests de dureté sur des pièces ou assemblages longs ou lourds, dans les spécifications suivantes :

- ✓ Portée de mesure: 0-20 HW
- ✓ Poids: 0.5 kg
- ✓ Gamme de dureté : 25-110HRE, 58-131HRV
- ✓ Dimension de l'échantillon : Épaisseur 0.4-6 mm



Figure III.13 : Testeur numérique de dureté Webster W-20.

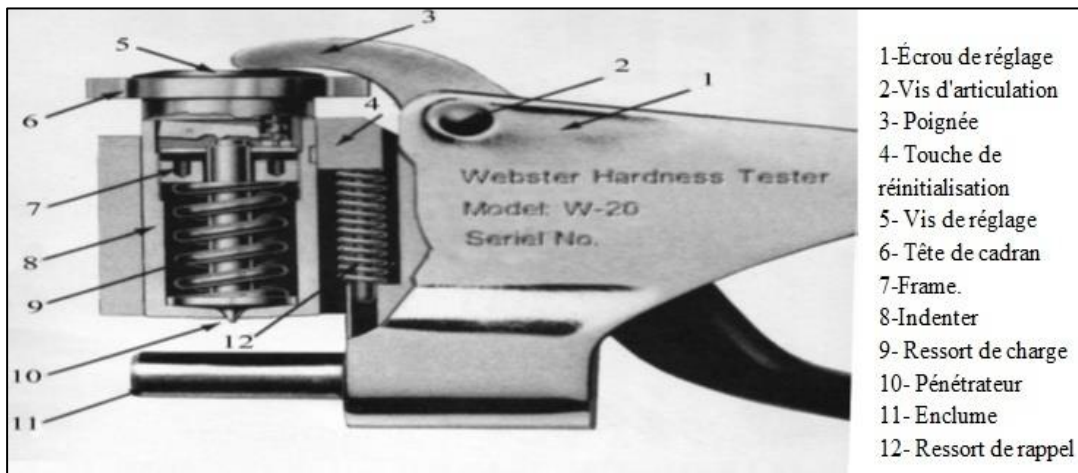


Figure III.14 : Structure de micro dureté Webster w-20[46].

### III.5.4 Microscopie métallographique

### III.5.4.1 Microscopie optique

Le microscope optique est utilisé pour déterminer et observer l'échantillon microscopique (forme des grains, des précipités, etc.), ainsi que l'évolution de la structure microscopique de l'alliage après avoir subi un traitement thermique (isotherme et isochrone). La structure peut être modifiée par un traitement mécanique, thermique et chimique passant par le métal, quelles que soient les changements physico-chimiques qui peuvent résulter de ces traitements.

Les microscopes optiques métallographiques permettent l'observation par réflexion d'une surface métallique parfaitement plane, obtenue par polissage mécanique et ayant subi des traitements thermiques voulus. On colore différemment les phases composant des alliages étudiés par un réactif.

Pour l'étude métallographique. Les échantillons sont observés avec un microscope optique universel de type ZEISS (Figure III.15), alimenté par une tension de 220V avec une fréquence de 50Hz [2].



**Figure III.15 :** Microscope optique de type ZEISS.

## IV.1 Introduction

Ce travail de recherche est réalisé pour connaître l'influence des traitements thermiques de durcissement structural sur les propriétés mécaniques de l'alliage 6063, Pour cela nous avons concentré notre recherche sur l'étude de l'évolution de la micro dureté en utilisant le traitement thermique trempe et ses types.

Dans ce chapitre nous avons représentés les résultats obtenus à partir d'échantillons étudiés au cours de ce travail à trois états. Ces résultats expérimentaux sont obtenus à l'aide de différentes techniques expérimentales telles que la mesures de micro dureté et microscopie optique.

## IV.2 Effet de la mise en solution

Le traitement par la mise en solution est à la température 530°C pendant 3h comme mentionné précédemment, la mise en solution permet surtout de dissoudre les composant intermétallique (IMF) qui piègent les éléments tels que Si, Mg et Cu , nous avons observé aussi des grandes particules ont une taille pouvant excéder quelque  $\mu\text{m}$  comme présenté sur la figure ci-dessous.



**Figure IV.1:** Microstructure d'un échantillon étudié après la mise en solution à 540° pendant [3h].

### IV.3 L'effet de la trempe :

L'évolution des valeurs de micro dureté de chaque échantillon est présentée dans le tableau IV.1. La microstructure obtenue après le traitement de trempe d'un échantillon de l'alliage aluminium 6063 est présentée dans la figure IV.2

Le raffinement de la microstructure résultant de la trempe, impliquant une augmentation du nombre d'interfaces, est systématiquement accompagné d'une petite augmentation de la micro dureté, sachant que chaque interface est susceptible de constituer une entrave au mouvement des dislocations.

Après trempe à 530°C/7h	Les valeurs de la dureté Webster-20				
	X <sub>m</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
Air	1.3 HW	1.32	1.25	1.27	1.30
Air comprimé	1.08 HW	1	1.11	1.2	0.98
Eau	0.92 HW	0.9	0.92	0.91	0.89
Huile	0.7 HW	0.7	0.68	0.71	0.72

**Tableau IV.1:** Résultats des tests mécaniques obtenus après trempe.



**Figure IV.2 :** Microstructure d'un échantillon étudié après la trempe. (X100)[47].

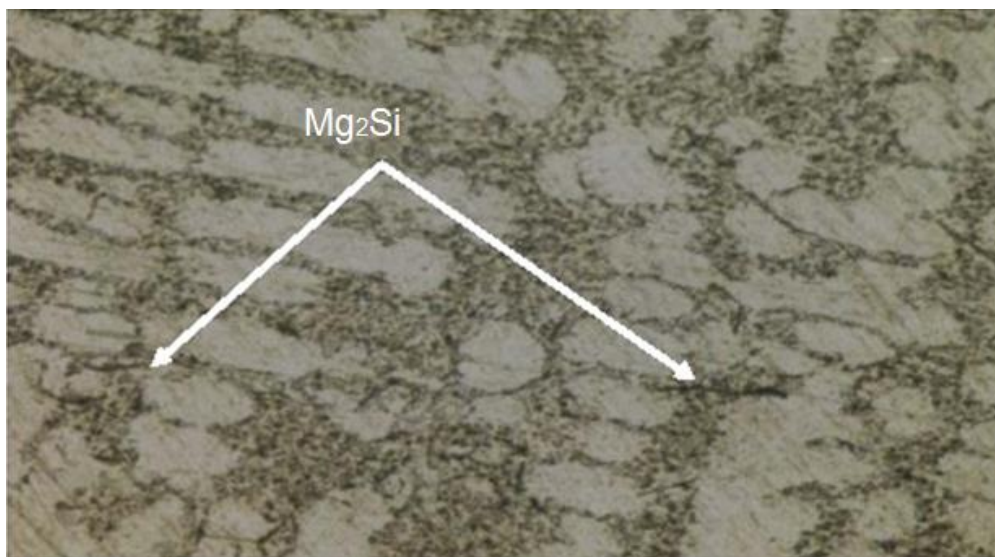
## IV.4 Effet du revenu:

La microstructure obtenue après le revenu est présente dans la figure IV.3, nous avons observé une diminution de leur taille qui entraîne la migration d'une partie des éléments alliés tels que Si et Mg vers les dislocations à (IMF). Ces dernières, étant notamment concentrées au niveau des joints de grains et des interfaces, favorisent la formation des précipités  $Mg_2Si$  qui sont déposés le long de ces interfaces, révèle quelques particules de  $Mg_2Si$  se formant au niveau des joints de grains.

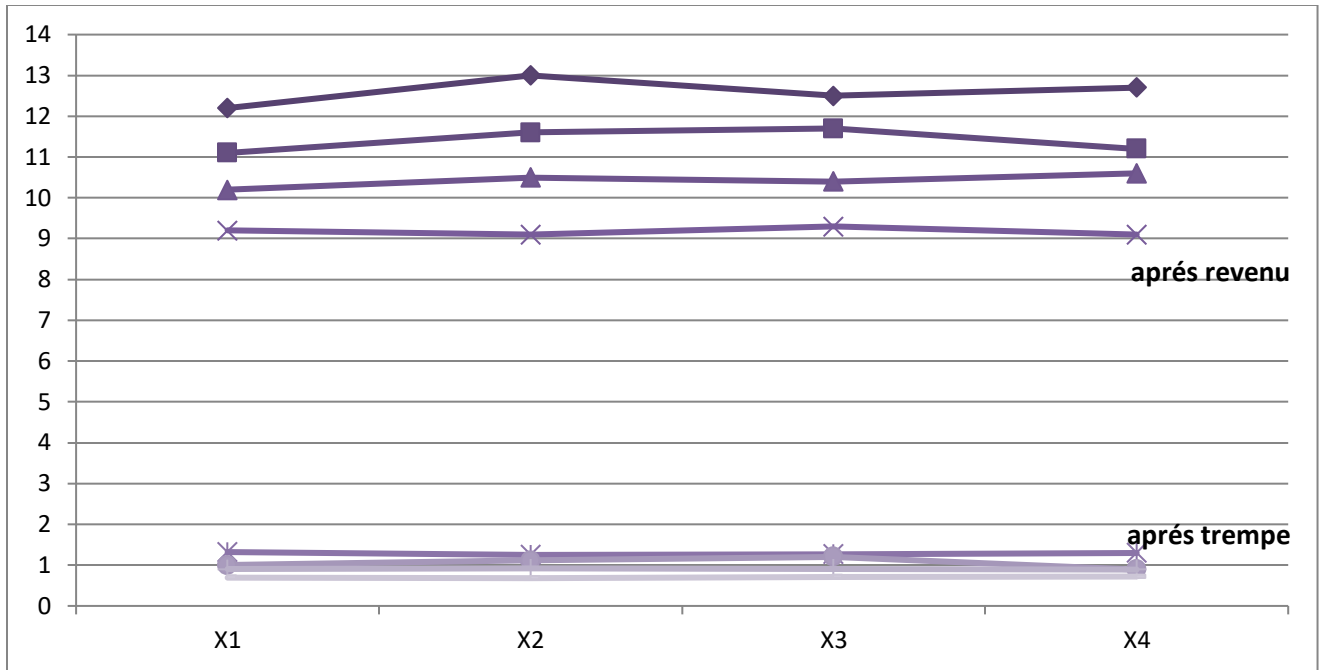
L'évolution des valeurs de micro dureté de chaque échantillon est présentée dans le tableau IV.2.

Après trempe et revenu à 180°C et 7h	Les valeurs de la dureté Webster-20				
	$X_m$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
air	12.8 Hw	12.2	13	12.5	12.7
air comprime	11.4 Hw	11.1	11.6	11.7	11.2
Eau	10.4 Hw	10.2	10.5	10.4	10.6
huile	9.2 Hw	9.2	9.1	9.3	9.1

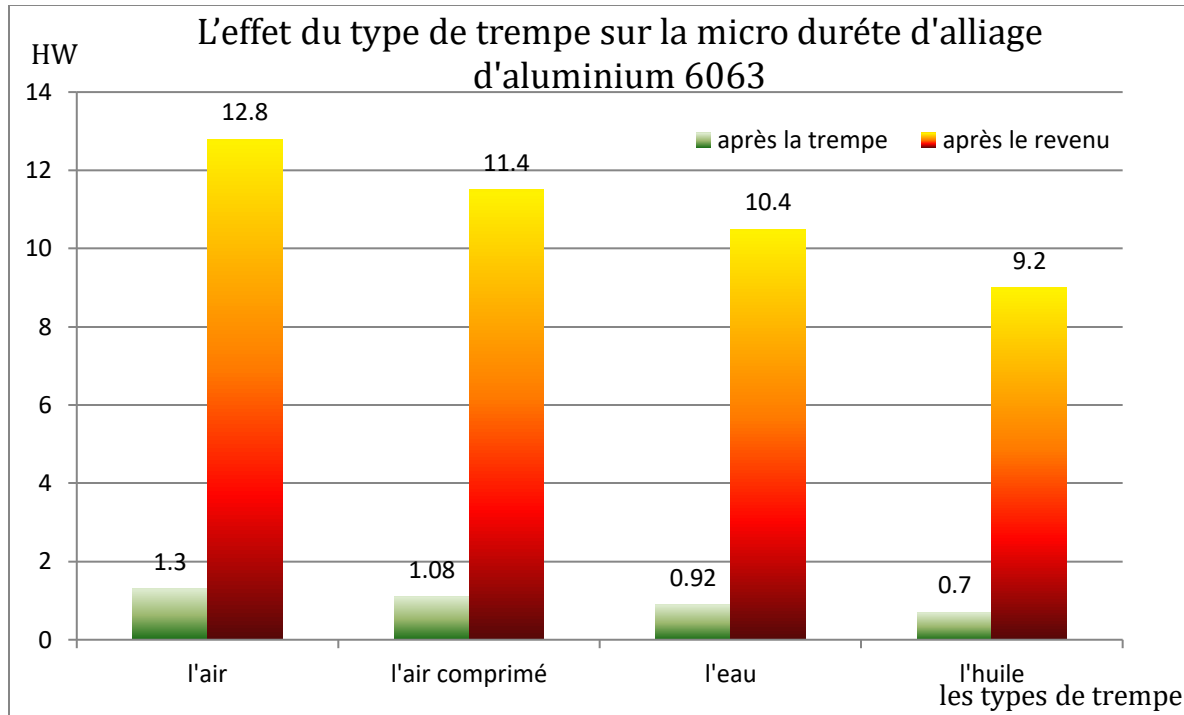
**Tableau IV.2:** Résultats des tests mécaniques obtenus après revenu.



**Figure IV.3 :** Microstructure d'un échantillon étudié après revenu. (X200)[2].



**Figure IV.4:** L'évolution des valeurs de micro dureté de chaque échantillon par la distances après le revenu et le trempe.



**Figure IV.5:** L'effet des différents types de trempe et revenu sur la micro dureté d'alliages d'aluminium 6063.

## IV.5 discussion des résultats :

La variation de la micro dureté en fonction du traitement thermique pour les échantillons étudiés explique comment agir la valeur de la température sur la structure de l'échantillon et sur le type de traitement.

A travers les figures et les tableaux ci-dessus, nous observons qu'après le traitement de mise en solution en température de 530°C et pendant 5h, les échantillons perdent leurs propriétés mécaniques (la dureté).

Le traitement de la trempe résulte une petite augmentation de la valeur de la micro-dureté, on trouve qu'elle variera en fonction du type de milieu de refroidissement. Nous avons trouvé la plus grande valeur de dureté est qui obtenue par le refroidissement à l'air, puis à l'air comprimé puis à l'eau et enfin à l'huile.

Aussi, après avoir appliqué le revenu, nous observons une augmentation significative de la valeur de micro dureté. Selon la méthode de refroidissement, la dureté est graduée selon le

milieu de refroidissement ( à l'air ( 12.8HW), puis à l'air comprimé ( 11.4HW) , puis à l'eau (10.4 HW) et enfin à l'huile ( 9.2HW)).

## **Conclusion générale**

De ce mémoire nous déduisons les conclusions et les remarques suivantes

-le travail que nous avons réalisé dans le cadre de ce mémoire a pour but de mieux comprendre l'influence des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques (la dureté statique) d'alliages d'aluminium 6063 (à base: magnésium et silicium) qui contenant différentes teneurs des éléments d'additions.

-Cet alliage est important dans les différents secteurs technologiques dans le monde, à cause de ses propriétés physique, chimique. Pour cela, Nous avons étudié les évolutions des valeurs de microdureté à l'aide d'un technique expérimental où on a utilisé le testeur de la microdureté (webster-20), et pour voir la microstructure on a utilisé un microscope optique, ensuite nous avons mis les résultats dans des tableaux et les représenter dans des figures.

- L'observation au microscope optique montre que pendant le traitement en (mise en solution) dans 530°C et 5h , les grandes particules qui ont été formées durant l'élaboration des

alliages étudiés sont disparues tandis qu'on marque la présence des particules fines qui ont une distribution uniforme dont elles peuvent être des précipités intermétalliques au fer (IMF).

-Nous observons qu'après le traitement (mise en solution) les échantillons perdent leurs propriétés mécaniques (la dureté).

- Après appliquant la trempe, à travers le microscope optique, nous avons observé la trempe a entraîné un raffinement de la microstructure comparée à celle des alliages n'ayant subi que le traitement de mise en solution. Ce traitement mis en œuvre les grandes particules qui ont été formées durant l'élaboration d'alliage étudié.

- Nous observons une petite augmentation de la valeur de la dureté dans le cas de refroidissement en air. Elle variera en fonction du milieu de refroidissement, elle est dégradée successivement selon les milieux ; air, air comprimé, l'eau et l'huile.

- le traitement de revenu entraine la migration d'une partie des éléments alliés tels que le SI et MG, vers les dislocations, qui vont se combine pour former des précipités concernant les alliages aluminium. Et nous avons vu l'intensification des particules.

- après avoir appliqué le revenu, nous observons une augmentation significative de la valeur de micro dureté et varions selon la méthode de refroidissement. la plus grande valeur de la dureté par refroidissement à l'air est 12.8 HW, puis air comprimé est 11.4 HW, l'eau est 10.4 HW, l'huile est 9.2HW.

-on peut conclure que les différents traitements thermiques des échantillons de l'alliage d'aluminium 6063 ont un rôle très important de changement de la dureté et la structure des échantillons.

## **. Références**

[1] JM. DORLOT JP. BAILON J. MASOUNAVE. Des Matériaux. Montréal, Editions de L'Ecole Polytechnique de Montréal, 1986.

[2] Develay, R., Données numériques sur l'aluminium non allié, Les Techniques de l'ingénieur. M443.

[3] [www.educreuse23.ac-limoges.fr/loewy/aa/voisin](http://www.educreuse23.ac-limoges.fr/loewy/aa/voisin).

[4] Document technique de l'ingénieur: "L'aluminium non Allié" Par Roger DEVELAY Ingénieur de l'École Nationale Supérieure d'Électrochimie et d'Électrometallurgie de Grenoble

[5] Paul Depovere, La classification périodique des éléments. La merveille fondamentale de l'Univers, De Boeck Supérieur, 2002, p. 98.

[6] Georges Chaudron, in « La préparation industrielle de l'aluminium et la découverte de ses propriétés par un illustre savant français, Henry Sainte-Claire Deville », Revue de l'aluminiumno 211, juin 1954, p. 97, publié par l'Institut d'histoire de l'aluminium.

[7] I. Grinberg, *L'aluminium. Un si léger métal, Découvertes Gallimard, 2003.*

[8] D.J.Chakrabartia,DavidE.Laughlinb, Phase relations and precipitation in Al-Mg-Si Alloys with Cuadditions, Progress in Materials Science49,p.389-410,2004

[9] J.P Baïllon, J.M.Dorlot. Des Matériaux, troisième édition, Montréal : EcolePolytechnique de Montréal, 480p, 2000.

[10] RAMOUL Chems Eddine - Elaboration et caractérisation électrochimique des alliages d'aluminium de fonderie , THÈSE

[11]:Michelle Colombié, matériaux métallique, Fabrication de l'aluminium et de ses alliages, page (343 - 376).

[12] : Michelle Colombié, matériaux métallique, Fabrication de l'aluminium et de ses alliages, page (343 - 376).

13]Marc- Jan de Haas. Université de Groningen (2002).

[14] Roger Develay, Propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés M440.

[15] D.J.Chakrabartia,DavidE.Laughlinb ,Phase relations and precipitation in Al-Mg- Si Alloys with Cuadditions, Progress in Materials Science 49, p.389 410, 2004

[16]:Anodall extrusion, estrusione e lavorazionealluminio.

[17] Hadid, M-D, Etude et caractérisation de la microstructure et la texture d'un fil d'aluminium (tréfilé/recuit) Thèse de doctorat, Université Biskra (2017).

[18]. De grands pans de cette section proviennent du document suivant : Centre de formation professionnelle de La Baie, Cahier de notes de cours du DEP Fonderie – Module 18 section 3 –Traitements thermiques sur alliages d'aluminium, 2012. Ces extraits ont été reproduits avec la permission du Centre de formation professionnelle de La Baie.

[19]:S. Vyazovkin, D. Dollimore, J. Chem. Inf. Comput. Sci., 36 p42-55(1996).

[20] : M. Dupeux, Aide mémoire science des matériaux, Dunod, (Paris 2004), pp.105-148.

[21],: Hadid, M-D, Évolution de la microstructure et des propriétés mécaniques au tréfilage des alliages d'aluminium, Mémoire de magistère, École national de polytechnique, (2012).

[22] S. Esmaili, X. Wang, D. J. Lloyd, W. J. Poole., Metall. Mater. Trans. A, 34 (2003) 751-763.

[23].A .As serin -Lebret, Thèse doctorat, Ecole national supérieur des mines de paris.(2005).

[24].J. Zhang, Z. Fan, Y. Q. Wang and B. L. Zhou, materials sciences and technology 17 (2001) 494-497.

[25] J. Lanthony, L'aluminium et les alliages légers. Ed. Presses Universitaires de France, Paris (1984) 55.

[26 ] C. Varel. Le comportement de l'aluminium et de ses alliages. Ed. Dunod technique, Paris (1994) 25.]

[28] A.K. Gupta, D.J. Lloyd et S.A. Court, ater. Sci. Eng., A, 316, 2001, pp.11-17.

- [29] S.M. Hirth, G.J. Marshall, S.A. Court et D.J. Lloyd, Mater. Scie. Eng., A, 319-321 ; 2001, pp. 452-456.
- [30] D. M. Laughlin and W. F. Miao. J. Mater. Sci. Lett, 21 (2001) 320-329.
- [31] JaenBaralis, Gérard Maeder, Précis de Métallurgie :( Elaboration ,structure propriétés, normalisation),p232,1ere édition, Afnor – Nathan, Paris(1997).
- [32] G. W. Lorimer., Fizika 2 suppl. 2 (1970) 0116.
- [33] F. Serradj, R. Geumini, H. Farh and K. Djemmal; Algerian of Advanced Materials.
- [34] P.S. Follansbee, G.B. Sinclair, Quasi-Static Normal Indentation of an ElastoPlastic Half-Space by a Rigid Sphere, Part I: Analysis, Int. J. Solids Structures V20 N°1(1984) pp. 81-91.
- [35] P.S. Follansbee, G.B. Sinclair, *Quasi-Static Normal Indentation of an ElastoPlasticHalf-Space by a Rigid Sphere*, Part I: Analysis, Int. J. Solids Structures V20N°1(1984) pp. 81-91.
- [36] E.R. Kral, K. Komvopoulos, D.B. Bogy, *Finite Element Analysis of RepeatedIndentation of an Elastic-Plastic Layered Medium by a Rigid Sphere* Part I : Surfaceresults, Transactions of the ASME, V62 (March 1995) .
- [37] E.Felder, *Analyse mécanique des essais d'indentation avec des Cônes*, ColloqueSF2M Section-Ouest : Surfaces et Interfaces, indentation, rayage et abrasion, Angers(16-17 mars 2005) .
- [38] P. Lavel, E. Felder, *Caractérisation de l'adhérence des revêtements par indentation normale*, Matériaux et techniques N°1-2 (1993).
- [39] [www.emcotest.com](http://www.emcotest.com).20.05.2020.

- [40] W. C. Oliver and G. M. Pharr, *An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments*, Journal of Material Research, Vol. 7, No. 6 (1992) pp. 1564-1583
- [41] K.wadwo, O. Kese , *Relaxation and Nanomechanical Studies of the Vickers ResidualStress Field in Glass*, Doctoral Thesis Department of Materials Science andEngineering Royal Institute of Technology SE-100 44 Stockholm, Sweden, 2004.
- [42] ConcepTEC.net – Essais et contrôles – 16 décembre 2016 .
- [43] d'Alberto P., l'indentation vickers et knoop des materiaux massifs ou revetus. titre de docteur en mécanique. université des sciences et technologies de lille 2003.
- [44] G. Olivier, L. Bernard, B. Jean-Michel, O. Laetitia, Caractérisation mécanique de reconstitutions osseuses après comblement par un Biomatériau injectable, Matériaux 2002.
- [45] A.Thomas, Microhardness measurement as a quality control technique for thin, hard coatings, Surface Engineering 1987 Vol 03 N°:02.
- [46] PCE Instrument UK, Test Instrument 20/05/220,
- [47] Sersour ,Z, Influence d'elements d'adition sur les caractéristiques mécaniques et microstructurales des alliages 6063 .Mémoire de master ,Université de m'hamedbougara –Boumerdes2010 .
- [48]. A. Boudilmi, K. Loucif, Strength of Materials,48 (2016) 419-425.
- [49]. A. Boudilmi, K. Loucif, , *Trans Indian Inst Met*,70(2017)1527-1531
- [50]. A. Boudilmi and K.Loucif, Metallofiz. Noveishie Tekhnol.,40(2018)1689-1697
- [51]. A. Boudilmi, These de doctorat , Université Ferhat Abbas- Sétif1 ,2017

## **Résumé.**

Ce travail de mémoire de master aborde l'étude bibliographique d'alliage aluminium de série 6xxx (à base: magnésium et silicium) qui possède des propriétés mécaniques intéressantes, et l'étude de l'effet de milieu de refroidissement sur la propriété mécanique (dureté) de l'alliage 6063.

Alors, l'objectif de ce travail est l'étude de l'effet du traitement thermique (mise en solution, trempe, revenu) sur la propriété dureté d'alliage aluminium 6063. Cette étude est expérimentale et théorique, d'où la partie expérimentale est basée sur la visualisation microscopique des structures de l'alliage 6063 et la mesure de la dureté.

**Mots de clés :** Alliage d'aluminium série 6000 type 6063, la micro dureté, traitement thermique.

## **Summary**

In this master's study, there is a bibliographical study about the aluminum alloys (based on: magnesium and silicon) which have an interesting mechanical properties. Also, seeing the effect of cooling medium on the mechanical property (hardness) the of alloy 6063.

therefore, the objective of this work is the study of the heat treatment effect (solution, quenching, tempering) on the hardness property of the aluminum alloy 6063. This study is experimental and theoretical; hence the part experiment is based on the microscopic visualization of the structures of alloy 6063 and the measurement of the hardness

## ملخص

تتناول هذه الأطروحة الماجستير الدراسة الببليوغرافية لسبائك الألومنيوم من سلسلة 6000 والتي لها خصائص ميكانيكية مثيرة للاهتمام ، ودراسة تأثير وسيط التبريد على الخاصية الميكانيكية (صلابة) للسبيكة لذلك ، فإن الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير المعالجة الحرارية (المحلول ، التبريد ، التقسية) على خاصية الصلابة لسبيكة الألومنيوم 6063. هذه الدراسة تجريبية ونظرية ، و الجزء التجريبي يعتمد على دراسة مجهرية لهياكل السبيكة 6063 وقياس الصلابة