

People's Democratic Republic of Algeria

Ministry of Higher Education and Scientific Research

Mohamed Boudiaf University of M'sila

Faculty of Technology

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة المسيلة

كلية التكنولوجيا



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Génie des Matériaux

Présenté par :

BOURAS SAID & SID HAROUN

Thème

**INFLUENCE DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUR LES
CARACTERISTIQUES MECANIQUE DE L'ALLIAGE D'ALUMINIUM**

Devant le jury composé de :

<i>NOM et Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>
<i>HOCINE MOSTAPHA</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>
<i>BOUDILMI AISSA</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>
<i>BEN HAMADOUCHE LAMIA</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur</i>

Année Universitaire : 2020 / 2021

N° d'ordre : GM/...../2020

Résumé :

Afin de comprendre le comportement de l'alliage d'aluminium 6063, nous avons mené une étude expérimentale, après fabrication d'éprouvettes aux dimensions étudiées, qui ont été traitées thermiquement par différentes méthodes (eau, huile, air, air fort). un essai de traction avec la machine universelle WP310. Cette dernière nous a permis de comprendre le comportement de l'alliage d'aluminium 6063 à travers les propriétés mécaniques et physiques obtenues représentées en (module d'allongement, module d'Young, limite d'élasticité, fin de champ plastique...etc).

Enfin, les informations et les résultats ont été collectés dans des courbes et des valeurs dans des tableaux.

Summary :

In order to understand the behavior of aluminum alloy 6063, we carried out an experimental study, after fabrication of test specimens with the studied dimensions, which were heat treated by different methods (water, oil, air, strong air). a tensile test with the WP310 universal machine. The latter allowed us to understand the behavior of aluminum alloy 6063 through the mechanical and physical properties obtained represented in (modulus of elongation, Young's modulus, elastic limit, end of plastic field ... etc).

Finally, information and results were collected in curves and values in tables.

ملخص:

من أجل فهم سلوك سبائك الألمنيوم 6063 قمنا بإجراء دراسة تجريبية و ذلك بعد تصنيع عينات اختبار بإبعاد مدروسة ثم معالجتها حراريا بطرق مختلفة (الماء، الزيت، الهواء، الهواء القوي)، بعد إجراء هذا العمل قمنا باختبار الشد بالآلة العالمية WP310 هذا الأخير مكننا من فهم سلوك سبائك الألمنيوم 6063 من خلال الخواص الميكانيكية والفيزيائية المتحصل عليها المتمثلة في (معامل الاستطالة، معامل يونغ، قوة الخضوع , نهاية المجال البلاستيكي ...الخ)

في الأخير تم تجميع المعلومات والنتائج في منحنيات وقيم في جداول

Nomenclature

- σ_e : Résistance limite élastique
- σ_r : Résistance à la rupture
- $A\%$: coefficient d'allongement
- F : La force
- ΔL : La Longmont
- S_0 : Section initiale (mm^2)
- L_0 : Longueur initiale
- e : La déformation
- R_e : La résistance limite élastique
- E : Le module d'Young (module d'élasticité longitudinale).
- σ : La contrainte
- F_0 : La force initiale
- ϵ : La déformation
- R_m : La résistance de mécanique
- L_u : Longueur ultime (mesurée en raboutant les deux morceaux de l'éprouvette cassée).
- S_u : Section ultime en mm^2 (mesuré à l'endroit de la cassure de l'éprouvette cassée).
- $Z\%$: Valeurs de Coefficient de striction
- d_0 : Diamètre initial
- L_0 : Longueur de référence
- L_c : Longueur calibrée
- V : La vitesse

Dédicaces

À tous mes amis et collègues

Et particulièrement les plus intimes, en témoignage des moments inoubliables, des sentiments pures, et des liens solides qui nous unissent.

À toutes les personnes Qui me reconnaisse et qui m'ont aidé et contribué à la réalisation de ce travail.

Remerciements

Toute notre gratitude, grâce et remerciement vont à dieu le tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

*Nos vifs remerciements à notre promoteur **Monsieur « BOUDILMI AISSA»***

l'appui scientifique et pour sa disponibilité le long de notre travail, nous lui sommes infiniment reconnaissantes de la bienveillance dont il a fait preuve à notre égard, de ses encouragements incessants et de la confiance dont il nous a témoigné.

Nous remercions également à nos enseignants qui ont contribué à notre formation pendant tout le cursus universitaire.

SOMMAIRE

Résume.....	1
Remerciements.....	2
Sommaire.....	3
liste des figures.....	5
liste des tableaux.....	7
Introduction générale.....	8
 CHAPITRE 1 : Alliages d'aluminium de la série 6000	
I. Introduction.....	9
I.2 Généralités sur l'aluminium.....	9
I.3 Elaboration de l'aluminium et de ses alliages.....	11
I.4. Normalisation des alliages d'aluminium	14
I.5. Production mondiale de l'aluminium primaire et secondaire.....	15
I.6 Famille des alliages d'aluminium	15
I.7 Les applications de l'aluminium et ses alliages.....	18
I.8 CARACTERISTIQUES DES ALLIAGES Al-Mg-Si.....	19
 CHAPITRE II : Alliage d'aluminium 6063	
II. Introduction.....	23
II.1.1 L'alliage d'aluminium 6063.....	24
II.1.2 Caractéristiques générale 6063	25
II.2 Les Traitements thermiques	28
II.3 Désignation des états métallurgiques.....	32
II.4 Influence des éléments d'additions Sur les propriétés des alliages d'aluminium.....	34
II.4.1 Excès de magnésium.....	34
II.4.2 Effet du cuivre dans les alliages d'aluminium Al-Mg-Si	35
II.4.3 Excès de silicium.....	35
II.4.4 Les dispersoïdes.....	35
 CH APITRE III : Techniques expérimentales	
III. Introduction.....	37
III.1. Description générale de la machine de traction.....	37
III.2. Matériau utilisé	39
III.3. L'éprouvette pour l'essai	39
III.4. Fabrication d'éprouvettes.....	41
III.5. Traitement thermique Appliqués	41
III.5.1. Processus d'homogénéisation.....	42
III.5.2. Processus de trempe	43
III.5.3. Revenu.....	43

III.6.Essai de traction	45
III.6.1. principe de l'essai de traction	45
III.6.2.Description de l'essai de traction.....	45
III.6.3.Diagramme de traction.....	46
III.6.4.Déformation élastique	46
III.6.5.Déformation plastique	47
III.6.6.Déformation dans une seule direction.....	47
III.7. Caractéristiques mécanique.....	48
III.7.1. Module d'élasticité longitudinale (Module d'Young) (E)	48
III.7.2. Limite d'élasticité (la résistance limite élastique) (R_e).....	48
III.7.3. Résistance à la rupture (R_r) ou (à la traction R_m).....	48
III.7.4. Allongement (A%).....	49
III.7.5. Coefficient de striction (Z%).....	49
III.7.6. Striction.....	49
III.7.7.Vitesses d'essai	50
III.7.8. Déroulement d'un essai de traction.....	51

CH APITRE IV: Résultats et discussion

IV. Introduction.....	52
IV.2.Courbes de traction.....	52
IV.3.Les calculs des résultats	54
IV.4.Caractéristiques mécaniques.....	55
IV.4.1. Résistance à la rupture (R_r) ou (à la traction R_m).....	56
IV.4.2.Limite élastique	56
IV.4.3 Allongement (A%) e conventionnelle Re0.2.....	56
IV.4.4.Coefficient de striction (Z).....	57
IV.5. Discussion des résultats.....	57
IV.5.1.Courbes.....	57
IV.5.1.1.Zone élastique	58
IV.5.1.2. Zone de déformation plastique	58
IV.5.2.Tableaux.....	58
Conclusion	59
Reference bibliographie	60

Liste des figures

<i>Figure</i>	<i>N° page</i>
Figure I.1 : Alliage de la famille 6000.courbe d'iso charge de rupture Rm.....	10
Figure I.2 : Exploitation en carrière à ciel ouvert.....	12
Figure I.3 : Obtention de l'alumine technique (Procédé Bayer).....	13
Figure I.4 : Obtention de l'aluminium Technique (Hall-Héroult).....	14
Figure I.5 : Production mondiale de l'aluminium primaire et secondaire en milliers de tonnes métriques durant 1927-2006	15
Figure I.6 : Caractéristiques mécaniques de différentes séries alliages aluminium....	16
Figure I.7: Traitement thermique de durcissement structural des alliages d'aluminium : diagramme d'équilibre schématique, température de mise en solution et microstructure initiale (température ambiante) et microstructure de l'état mis en solution.....	18
Figure I.8 : Diagramme d'équilibre ternaire Aluminium-Magnésium-Silicium.....	21
Figure I.9 : Coupe pseudo binaire Al-Mg ₂ Si de l'alliage Al-Mg-Si.....	22
Figure II.1: La mise en solution.....	31
Figure III.1: vue globale de la machine WP 310.....	39
Figure III.2: Forme d'éprouvette cylindrique.....	41
Figure III.3: Des éprouvettes en aluminium 6063.....	41
Figure III.4: Four d'homogénéisation.....	43
Figure III.5: Variation de la température des éprouvettes pendant l'homogénéisation et le refroidissement.....	43
Figure III.6: four de revenu.....	44
Figure III.7: Schéma représentatif du traitement thermique de durcissement par précipitation pour les alliages d'aluminium.....	45
Figure III.8: Schéma représentant 2 types différents de courbes de traction.....	47
Figure III.9: Forme d'éprouvette cylindrique après rupture.....	51

Figure IV.1: Courbe de traction d'alliage 6063 traitée à L'air forcé.....	51
Figure IV.2: Courbe de traction d'alliage 6063 traitée à L'eau.....	52
Figure IV.3: Courbe de traction d'alliage 6063 traitée à l'huile.....	53
Figure IV.4: Courbe de traction d'alliage 6063 traitée tés à l'air.....	53
Figure IV.5: Courbes des tractions d'alliage 6063 après les traitements thermiques....	54

Liste des tableaux

Tableau	N°
	page
Tableau I.1: Propriétés mécaniques d'aluminium pur.....	11
Tableau I.2: Séries d'alliages d'aluminium de corroyage.....	16
Tableau I.3: Solubilité maximale du magnésium et du silicium dans la phase α riche en aluminium, en équilibre avec Si et Mg_2Si	22
Tableau II.1: la composition chimique de l'alliage 6063 en pourcentage de mass.....	25
Tableau II.2: Les Propriétés technologies.....	26
Tableau II.3: les propriétés physiques d'alliage d'aluminium 6063, en citant	27
Tableau II.4: Caractéristique mécaniques [40].....	27
Tableau II.5: Les conditions pratiques de la trempe structurale pour les alliages d'aluminium.....	28
Tableau II.6: Le temps maximal de transfert et l'épaisseur des parois.....	30
Tableau II.7 : Désignation des états métallurgiques de base.....	33
Tableau II.8 : traitement thermique des alliages d'aluminium.....	34
Tableau III.1: composantes chimiques d'alliage 6063.....	39
Tableau IV.1: tableau représenté les paramètres de l'éprouvette traitée à L'air	54
Tableau IV.2: tableau représenté les paramètres de l'éprouvette traitée à L'eau.....	55
Tableau IV.3: tableau représenté les paramètres de l'éprouvette traitée à L'huile....	55
Tableau IV.4: tableau représenté les paramètres de l'éprouvette traitée à l'air.....	55
Tableau IV.5: tableau représenté Résistance à la rupture.....	56
Tableau IV.6: tableau représenté Allongement (A%).....	57
Tableau IV.7: tableau représenté Coefficient de striction (Z%).....	57

INTRODUCTION

GENERALE



INTRODUCTION GENERALE

L'aluminium est le principal métal non ferreux fortement utilisé dans les différentes industries (mécanique, aéronautique, alimentaire, le matériel électroménager et industrie du médicale). De part sa légèreté et sa facilité à la mise en forme, sa résistance à la corrosion et sa bonne conductivité électrique, l'aluminium et ses alliages ont acquis une place importante dans la plupart des domaines suscités. En plus de ses caractéristiques, celui-ci détient une forte affinité à réagir avec l'oxygène.

La première apparition de l'aluminium était 1854 lors d'une présentation à l'académie des sciences par le chimiste français Sainte –Claire sous la forme de lingot .cette pièce avait été obtenue par voie chimique .en 1886 il y'a eu l'invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium par Paul Héroult (France) et Charls Martin Hall (USA).

Depuis le développement du premier alliage industriel, le Duralumin en 1916, les alliages d'aluminium durcis par précipitation ont acquis, depuis cette date, une importance pratique considérable grâce aux améliorations continues de leurs caractéristiques physiques et mécaniques spécifiques.

Dans le premier chapitre, nous présentons de façon générale les alliages d'aluminium de la série 6000 Propriétés de l'aluminium, Elaboration de l'aluminium et de ses alliages, Famille des alliages d'aluminium, Les applications de l'aluminium et ses alliages et caractéristiques des alliages Al-Mg-Si.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les caractéristiques spécifiques des alliages de la série 6063 (Al-Mg-Si), Les Traitements thermiques de durcissement structural et Désignation des états métallurgiques et Influence des éléments d'additions Sur les propriétés des alliages d'aluminium.

Le troisième chapitre a été consacré à des techniques expérimentales utilisées et la procédure de travail suivi. Description générale de la machine de traction, Fabrication d'éprouvette, Traitement thermique Appliqués et Description de l'essai de traction

Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté les courbes de traction résultantes et le calcul de différentes propriétés mécaniques .Selon les différents résultats obtenus, La loi d' Hooke a été vérifiée, ainsi que l'identification de différentes zones de traction. Diverses observations graphiques validant la discussion ont été présentées.

En fin, par une conclusion générale.

CHAPITRE I:

Alliages d'aluminium de la série 6000

I. Introduction

L'aluminium est un métal blanc tirant légèrement sur le bleu, il est présent en grande quantité dans la croûte terrestre, avec une masse de minerai représentant 8% de la masse de cette dernière. IL vient au second rang des métaux les plus employés après l'acier. Il est léger, robuste, facile à usiner et économique .Techniquement, l'aluminium est un métal pur (faiblement allié),

Les alliages d'aluminium diffèrent par leurs principaux éléments d'addition, il s'agit de la série 2000 (Al-Cu), la série 3000 (Al-Mn), la série 4000 (Al-Si), la série 5000 (Al-Mg), la série 6000 (Al-Mg-Si) et la série 7000 (Al-Mg-Zn). Dans ce travail on s'intéresse aux produits de corroyage de la série 6000. Les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium dépendent de divers paramètres microstructuraux comme la composition chimique, les traitements thermiques, la mise en forme à chaud et les mécanismes de germination/croissance/coalescence. [1]-[2]

I.2 Généralités sur l'aluminium

I.2.1 Propriétés de l'aluminium

I.2.1.1 Propriétés générales

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 (O) et, à un degré moindre, trempé mûri (T4).
- caractéristiques moyennes à l'état trempé revenu (T6).
- 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) [3].

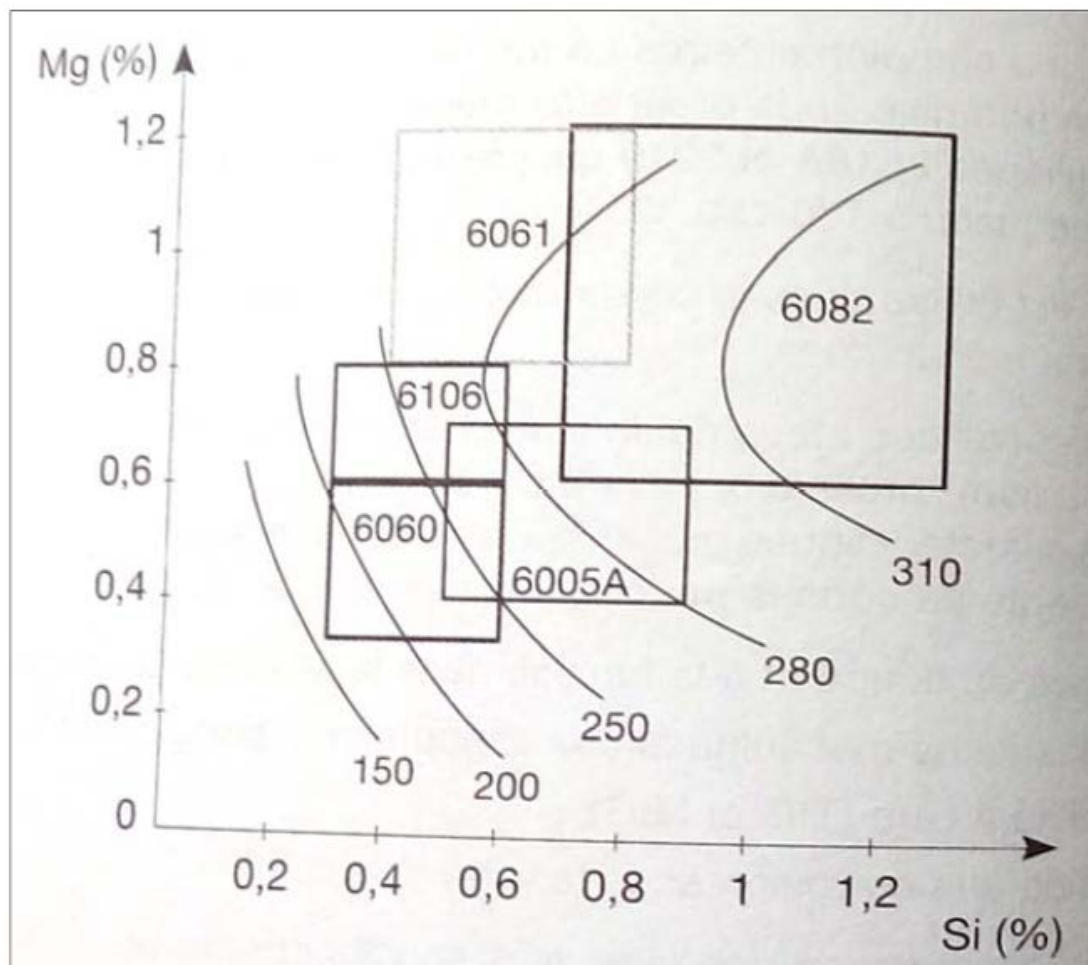


Figure I.1. Alliages de la famille 6000. courbe d'iso charge de rupture Rm [4].

I.2.1.2 Propriétés physiques de l'aluminium

L'aluminium est un élément métallique, ductile très malléable, parmi les métaux les plus abondants dans la croûte terrestre. C'est un élément du troisième groupe de la classification de Mendeleïev avec un numéro atomique de 13, une masse atomique de 26,28 et une température de fusion d'environ 660°C qui dépend de la teneur des impuretés. Il se cristallise dans le système cubique à faces centrées, avec un paramètre de maille 4,04 Å. Son coefficient de dilatation thermique linéaire est de l'ordre de $23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. La liste des propriétés physiques et chimiques de l'aluminium est donnée sur (Tableau I.1)

I.2.1.3 Propriétés mécaniques de l'aluminium

L'aluminium commercialement pur possède, à l'état recuit, des propriétés mécaniques faibles. On peut toutefois améliorer considérablement ces propriétés par écrouissage, addition d'éléments d'alliage ou traitements thermiques, selon les cas.

L'aluminium et ses alliages ont une structure cristalline cubique à faces centrées. Ils font donc preuve, à l'état recuit, d'une excellente ductilité à toute température.

Etat du métal	Charge à la traction	Allongement de rupture à la traction
Coulé	5 à 9 kg/mm ²	0 à 5%
Laminé et recuit	8 à 10 kg/mm ²	30 à 40%
Laminé et écroui	20 à 25 kg/mm ²	2 à 5%

Tableau (I.1): Propriétés mécaniques d'aluminium pur [5]

I.2.1.4 Propriétés électriques et thermiques de l'aluminium

Ce métal est un bon conducteur de la chaleur et de l'électricité où sa conductibilité électrique est 2,6548 ohm³ et sa conductivité thermique est de 237 W m⁻¹ K⁻¹. Ce qui correspond à 65% de celle du cuivre. Il est utilisé de plus en plus pour les lignes à haute tension, et aussi il offre un fort pouvoir caloporteur comme l'utilisation dans des dispositifs de refroidissement. On note que sa conductibilité électrique dépend largement des éléments d'alliages en présence. [6].

I.2.1.5 Propriétés chimiques de l'aluminium

À la température ambiante, l'aluminium forme très vite une couche d'oxyde Al₂O₃ épaisse adhérente et protectrice. Bien que ce film d'alumine résiste bien dans les solutions d'acide chlorhydrique, sulfurique et nitrique mais elle a une résistance chimique limitée et qui peut être améliorée par anodisation. Ce traitement permet d'obtenir une couche épaisse de l'alumine (Al₂O₃) mais poreuse. [7].

L'aluminium a une bonne aptitude aux traitements de surface qui présente un rôle important pour la protection de certains alliages d'aluminium, quand leur résistance à la corrosion « naturelle » est jugée insuffisante, et la modification des propriétés de surface comme la dureté superficielle. [8]

I.3 Elaboration de l'aluminium et de ses alliages :

L'Aluminium est fabriqué en deux temps :

I.3.1. obtention de l'alumine à l'état pur,

Le minerai utilisé est la bauxite rouge (hydrate double d'aluminium, de fer, de silice et d'oxyde de titane). La bauxite est constituée d'environ 75 % d'alumine hydratée ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ et

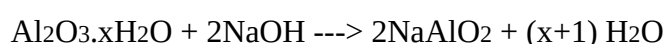
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Le minerai est d'abord concassé et ensuite broyé.



Figure I.2 Exploitation en carrière à ciel ouvert

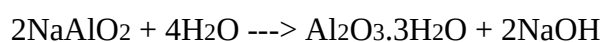
I.3.2. obtention de l'aluminium à partir de l'alumine.**I.3.2.1. Obtention de l'alumine : Procédé Bayer.**

La bauxite calcinée et broyée est attaquée à la soude caustique (NaOH) dans des autoclaves où sous l'action de la pression (30 atm) et de la température (200 à 240°C) l'alumine contenue dans la bauxite se transforme en une solution d'aluminate de sodium.



Les autres composants (oxydes de fer et de silice) ou "boues rouges" sont retirés par décantation et filtration. Le fer précipite ainsi que le titanate de soude; la silice précipite également sous forme de silico-aluminate de soude. Il reste un liquide clair qui est composé d'une solution de soude contenant de l'aluminate de sodium.

La solution d'aluminate de sodium obtenue est ensuite pompée dans des décomposeurs de 25 à 30 m de haut dans lesquels on ajoute du tri hydrate d'alumine pur très fin, qui sert à amorcer la réaction. Sous l'effet de l'agitation et du refroidissement graduels, le tri hydrate d'alumine en solution précipite et forme d'autres cristaux. Ceux-ci sont ensuite séparés de la solution de soude caustique par sédimentation et filtration. La solution de soude caustique est renvoyée aux autoclaves pour être réutilisée.



L'alumine Al_2O_3 est déshydratée par chauffage à 1100°C en vue d'éliminer l'eau combinée chimiquement (dans un four rotatif) et devient une poudre blanche qui titre à 99%.

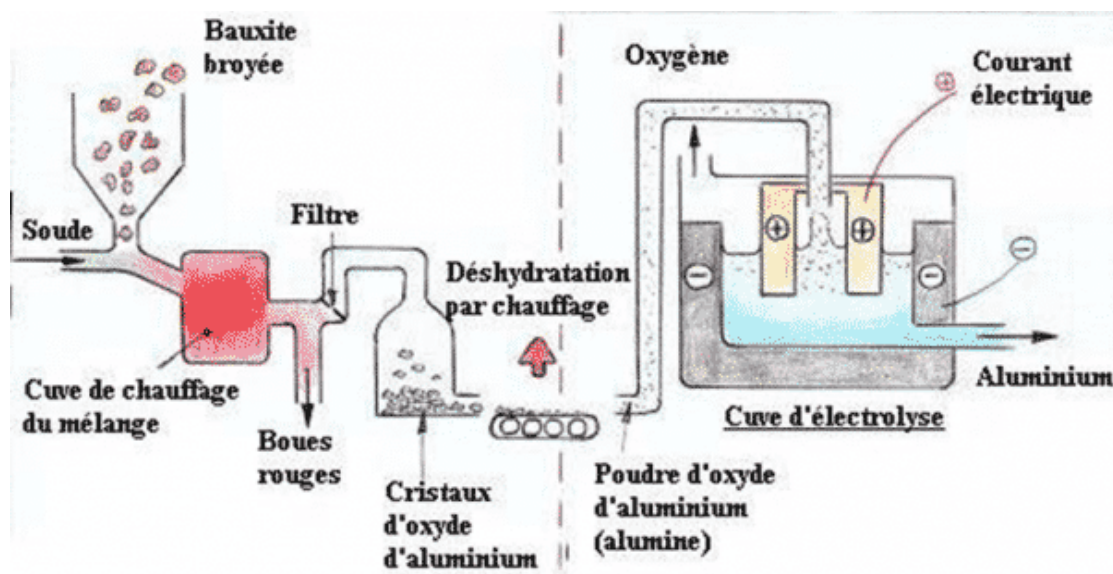


Figure I.3. Obtention de l'alumine technique (Procédé Bayer)

Le procédé le plus utilisé est le procédé "Hall-Héroult", du nom de leurs inventeurs, l'américain Charles Martin Hall et le français Paul Héroult. Il consiste à dissoudre l'alumine calcinée dans de la cryolite (Na_3AlF_6 , qui est un sel fondu, aluminofluorure de sodium). Le courant de l'électrolyse sert à la fusion du mélange entre 900 et 1000°C .

L'alumine ne fondrait qu'au dessus de 2000°C si elle n'était pas en présence de cryolithe et de fluorure de calcium.

Pour produire un kilo d'aluminium, il faut compter en moyenne 15 kWh.

Le four servant à l'électrolyse est un four en acier revêtu de briques réfractaires dont la cuve est en charbon aggloméré constituant la cathode sur laquelle se dépose l'aluminium fondu et il y a un dégagement d'oxygène sur l'anode en coke de pétrole + brai qui est oxydée.

Il faut compter l'équivalent de huit tonnes de charbon pour produire une tonne d'aluminium.

Les cuves sont entièrement capotées afin de capter les gaz qui s'échappent du bain lors de l'électrolyse (ces gaz contiennent notamment du fluor) et de les envoyer vers un dispositif d'épuration où le fluor est récupéré par fixation sur de l'alumine.

La combustion du carbone oblige à remplacer régulièrement les anodes.

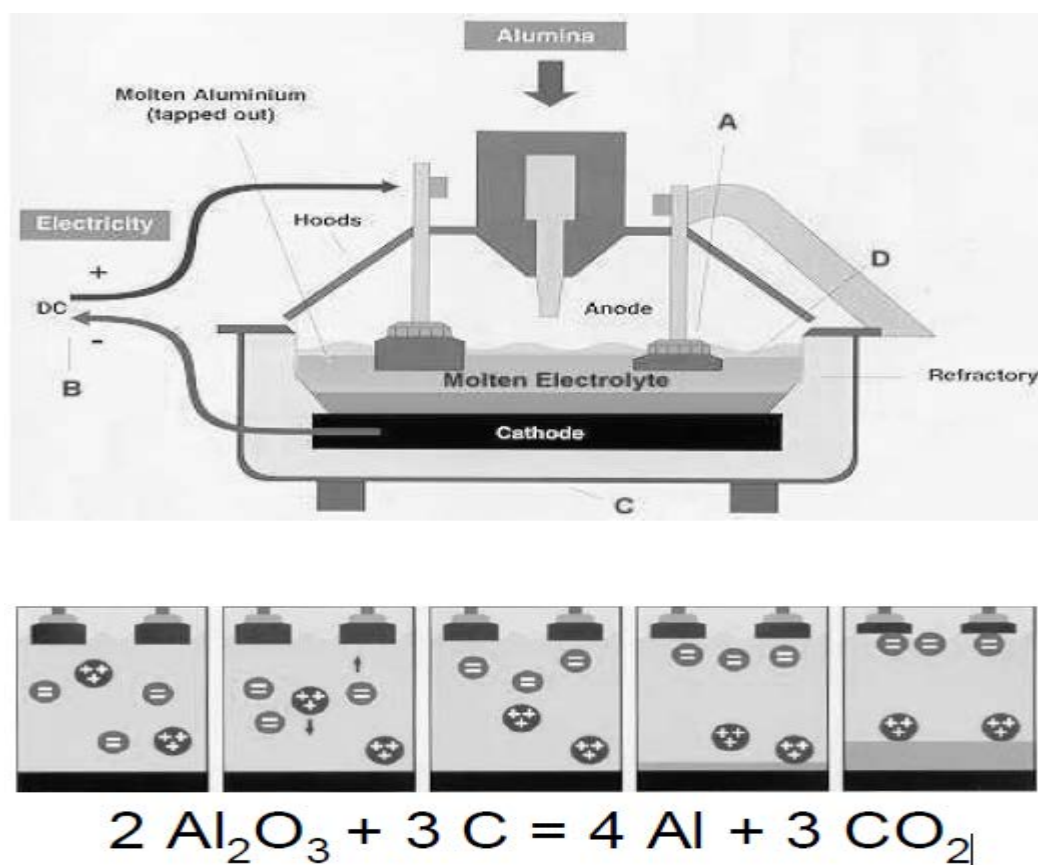


Figure I.4 Obtention de l'aluminium Technique (Hall-Héroult)

À intervalles réguliers, l'aluminium en fusion est siphonné dans des poches de coulée ou creusets et transféré dans des fours d'attente à la fonderie.

L'aluminium obtenu est pur à 99% et doit être raffiné pour éliminer les impuretés (fer, silicium, zinc, titane, cuivre,...). On emploie pour cela un procédé électrolytique proposé par Betts en 1905, mis au point par la société ALCOA en 1922 et perfectionné par le français Robert Gadeau en 1933.

L'aluminium obtenu est pur à 99,998%.

I.4. Normalisation des alliages d'aluminium :

Les alliages d'aluminium sont référencés par une désignation à 4 chiffres. Cette désignation est conforme aux directives d'Aluminium Association (Washington DC 2006, USA). Le premier chiffre désigne les principaux éléments ajoutés, le 2ème chiffre peut être : 0 s'il s'agit du métal original, 1 à 9 : si l'alliage présente des particularités (pureté d'un aluminium non allié, variante d'un alliage...), le troisième et le quatrième chiffre choisis par le normalisateur, servent seulement à différencier les nuances d'un même groupe. En outre, on retrouve la désignation à 4 lettres : EN

AW où EN fait référence à la normalisation européenne; A indique qu'il s'agit d'aluminium; W

précise qu'il s'agit de métal corroyé.[9]

I.5. Production mondiale de l'aluminium primaire et secondaire

L'aluminium de 1ère fusion conserve encore un taux de croissance appréciable (1 à 2 % par an) par rapport à l'aluminium de 2ème fusion, bien que cette dernière voie est beaucoup moins dépendante des conditions de fourniture d'énergie comme celui de la 1ère fusion. En effet, le procédé de la purification par électrolyse consomme beaucoup d'énergie. L'évolution de la production d'aluminium primaire et secondaire est montrée dans la figure I.2.

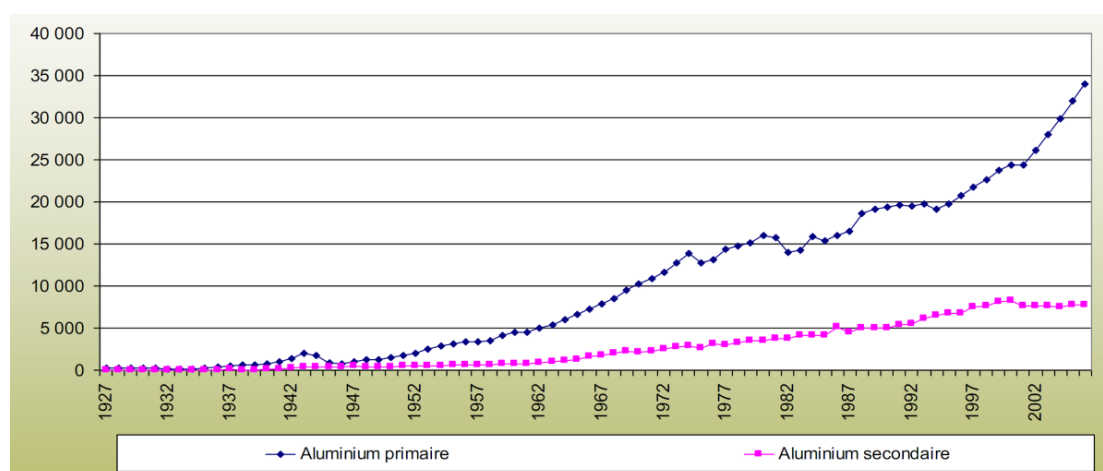


Figure I.5 Production mondiale de l'aluminium primaire et secondaire en milliers de tonnes métriques durant 1927-2006 [10]

I.6. Famille des alliages d'aluminium :

De nos jours, les alliages d'aluminium sont utilisés dans la construction, les transports, l'emballage et les biens de consommation, occupant la deuxième position des matériaux métalliques les plus utilisés après les alliages ferreux. Les principales caractéristiques physico-chimiques des alliages d'aluminium justifiant leur emploi sont leur densité, leur conductivité thermique et électrique, leurs propriétés mécaniques et leur bonne tenue à la corrosion atmosphérique de manière générale.

Une description détaillée des différentes formes de corrosion et des mécanismes associés sera donnée dans ce chapitre.

Il existe plusieurs familles d'alliages d'aluminium de propriétés différentes. Selon les normes de l'Aluminium Association et la norme européenne, les alliages d'aluminium sont groupés en fonction de leurs éléments chimiques principaux d'addition. Les alliages d'aluminium dits de corroyage sont divisés en deux groupes distincts (Tableau I-1) : les alliages à durcissement par écrouissage (3xxx, 5xxx, 8xxx), les alliages à durcissement structural (2xxx, 4xxx, 6xxx, 7xxx).

Tableau I-2 : Séries d'alliages d'aluminium de corroyage.

	Durcissement par écrouissage				Durcissement structural			
Séries	1000	3000	5000	8000	2000	4000	6000	7000
Eléments d'alliage principaux	Al	Mn	Mg	Si+Fe	Cu	Si	Mg+Si	Zn+Mg
Etendue de la teneur (% mass.) des éléments d'alliage principaux	Al ~99%	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
Eléments d'addition complémentaires	Cu	Mg, Cu	Mn, Cu	Autres (Cu, Mn, Si, Mg, Zn)	Si, Mg		Cu, Cr	Cu
mécanique moyenne (MPa)	50- 160	100- 240	100- 340	130- 190	300- 480	150- 400	200- 320	310- 600

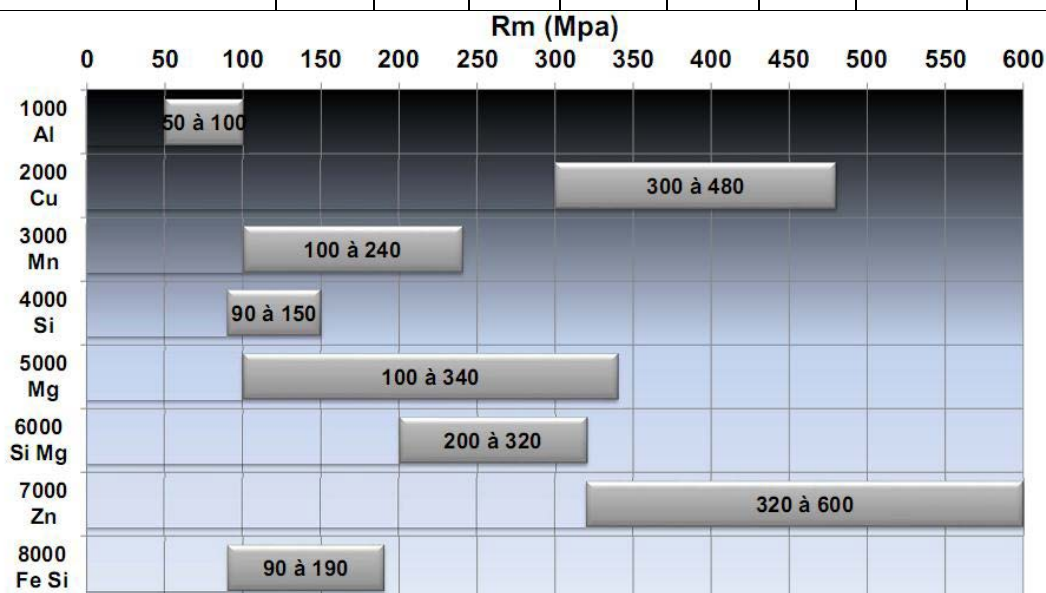


Figure I.6 Caractéristiques mécaniques de différentes séries alliages aluminium [11]

I.6.1 Durcissement par écrouissage :

Le premier groupe est constitué des alliages à durcissement par écrouissage. Ce sont les familles 1000, 3000, 5000 et 8000. Les propriétés mécaniques de ces alliages sont obtenues par le durcissement plastique qui correspond à une modification

structurale du métal. En effet, le mécanisme de déformation plastique va créer de nombreux défauts cristallins, sources d'une énergie interne stockée hors d'équilibre, et qui peuvent augmenter les caractéristiques mécaniques au cours de sa mise en forme causé par blocage des dislocations. [12]

L'influence considérable des éléments d'alliage sur l'écrouissage est liée à l'état métallurgique du matériau : éléments en solution solide (de substitution ou d'insertion) ou éléments sous forme d'une dispersion de deuxième phase. [13]

I.6.2 Durcissement structural des alliages d'aluminium

Le durcissement structural des alliages d'aluminium, appelé aussi durcissement par précipitation, provient de la formation contrôlée dans l'alliage d'une seconde phase de module de cisaillement supérieur à celui de la matrice. Les particules précipitées offrent donc par nature une meilleure résistance au déplacement des dislocations, mais au-delà de leur caractéristique cristallographique, leur taille et leur distribution dans la matrice jouent un rôle fondamental dans le durcissement. La précipitation résulte d'une séquence de traitement thermique. Seuls les alliages d'aluminium des séries 2000 (AlCu), 4000 (AlSi) ; 6000 (AlMgSi) et 7000 (AlMgZn) ont la capacité de durcir par précipitation.

En relation avec leur diagramme d'équilibre, les alliages sont biphasés à l'état de livraison. La solubilité des éléments d'alliages, quels qu'ils soient, étant très limitée à température ambiante dans l'aluminium, les alliages sont constitués d'une solution solide en aluminium quasi pur (phase $\square$) et d'une seconde phase, sous forme de précipités grossiers préférentiellement localisés le long des joints de grains (phase $\square$) [14].

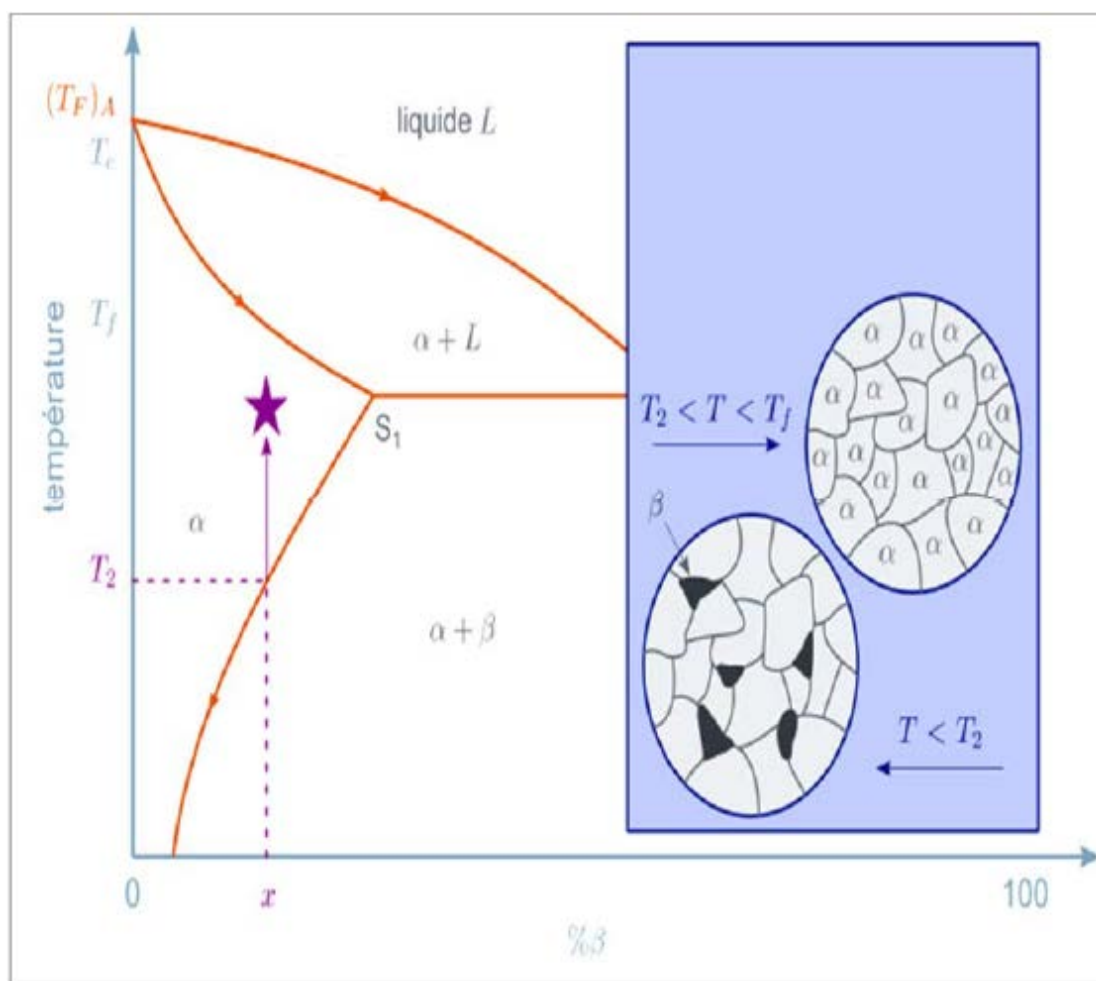


Figure I.7. Traitement thermique de durcissement structural des alliages d'aluminium : diagramme d'équilibre schématisé, température de mise en solution et microstructure initiale (température ambiante) et microstructure de l'état mis en solution [14].

I.7 Les applications de l'aluminium et ses alliages

I.7.1 Domaine de transport

En raison de sa légèreté, l'aluminium et ses alliages est utilisé dans le domaine de construction automobile, des véhicules ferroviaires (trains, tramways, métros) et de l'aéronautique (avions). Il réduit les émissions de carburant et leurs consommations, les vibrations (le bruit) en absorbant les chocs et augmente la résistance à la corrosion. Le poids des structures des voitures a été réduit jusqu'à 45 % par rapport à la structure en acier, et 50 % des moteurs hors-bords sont fait d'aluminium. [6], [8].

I.7.2 Domaine agroalimentaire

L'aluminium a un grand champ d'utilisation dans la construction des boîtes de conserve, les papiers aluminium, les canettes, les barquettes, les ustensiles de cuisine. Cependant, l'aluminium en cas d'ingestion importante peut parfois avoir des effets

néfastes pour le système nerveux. Il a été reporté que des personnes aient développé une encéphalopathie (forme de démence). [15]

I.7.3 Domaine de l'énergie électrique

L'aluminium est particulièrement utilisé dans les lignes aériennes et les câbles d'alimentation de la distribution et la transmission de l'énergie électrique, les câbles électriques à usage industriel, en raison de sa conductivité électrique élevée, une faible densité et une bonne résistance à la corrosion [16].

I.8 CARACTERISTIQUES DES ALLIAGES Al-Mg-Si

I.8.1 Alliages du système Al-Mg-Si

Les alliages Al-Mg-Si sont des alliages à solution solide type Al-Mg₂Si, de la série 6000 faisant partie de la catégorie des alliages corroyés à durcissement structural. En plus des éléments Mg et Si des additions secondaires sont courantes lors de l'élaboration. L'ensemble de ces additions d'éléments conditionne les caractéristiques microstructurales de l'alliage. Les éléments d'addition des alliages corroyés de la série 6000 se divisent en deux familles :

- les éléments participant au durcissement de l'alliage (il s'agit du magnésium et du silicium),
- les éléments secondaires qui permettent d'améliorer certaines propriétés physiques (les principaux sont le fer, le cuivre, manganèse et le chrome).

Ces alliages sont généralement livrés après homogénéisation, trempe et vieillissement. Les alliages

Al-Mg-Si sont largement utilisés comme des alliages structuraux de moyenne résistance qui allient les avantages suivants et très utilisée pour les profilés. Ils ont une de très bonne aptitude à la déformation (filage, matriçage principalement) et à la mise en forme à froid à l'état recuit. Leurs caractéristiques mécaniques sont moyennes et sont inférieures à celles des alliages 2000 et 7000.

Ces caractéristiques peuvent être améliorées par addition de silicium qui formera avec le Mg, le précipité durcissant Mg₂Si. Ils présentent une bonne résistance à la corrosion notamment atmosphérique (passivation à la corrosion sous tension). Ils se soudent très bien (soudure à l'arc ou brasage). On peut les classer en deux groupes [17] :

- Un groupe dont les compositions sont plus riches en magnésium et silicium tel que les alliages

6061 et 6082, qui sont utilisés pour des applications de structure (charpente, pylône) avec une résistance R_m d'environ 260 MPa.

- Une deuxième catégorie renferme une faible teneur en silicium qui par conséquent aura des caractéristiques mécaniques plus faibles tel que le cas du 6060 et 6063 qui permettra de grandes

vitesse de filage mais qui aura des caractéristiques mécaniques plus faibles avec $R_m \approx 215$ MPa. [18]

I.8.2. Précipitation dans les alliages Al-Mg-Si :

Les alliages Al-Mg-Si sont le plus fréquemment, utilisés comme étant des alliages structuraux à contrainte moyenne. Ils conçoivent des avantages cumulés d'une bonne soudabilité et d'une bonne résistance à la corrosion, notamment à la corrosion sous contraintes [19].

Ils sont surtout utilisés comme profile de structure (radelles de camions, pylônes, panneaux de signalisation routière), dans l'industrie automobile. Ils sont aussi utilisés dans la fabrication des câbles aériens pour les lignes de transport et de distribution d'électricité.

Les alliages Al-Mg-Si possèdent des propriétés mécaniques moyennes par rapport aux autres alliages d'aluminium à durcissement structural. En plus, ils ont une excellente aptitude à la mise en forme à chaud et une bonne soudabilité. Leur comportement à basses températures est acceptable malgré leur résistance à chaud limitée à 150° C [20]. Ils font preuve d'une excellente résistance à la corrosion atmosphérique, tout en étant insensibles à la corrosion sous tension.

Les alliages Al-Mg-Si font partie de la famille des alliages à durcissement structural, qui peuvent durcir par précipitation de plusieurs phases métastables, la compréhension et le contrôle du processus de précipitation durant le chauffage du matériau, sont très importants dans la recherche et l'acquisition des propriétés mécaniques et thermodynamiques optimales.

Même si la séquence de précipitation a été extensivement étudiée, il existe néanmoins, beaucoup de zones d'incompréhension sur la nature de la structure, et sur la composition des phases présentes lors de la décomposition de la solution solide sursaturée.

Le durcissement structural des alliages d'aluminium de la série 6xxx est du principalement à la formation de phase durcissant Mg_2Si [21]. La figure I.8 représente le diagramme d'équilibre ternaire des alliages Al-Mg-Si déterminant le domaine de la formation de la phase d'équilibre β (Mg_2Si).

L'excès de silicium améliore les propriétés mécaniques au détriment de la résistance à la corrosion, certains alliages comportent d'autres éléments d'addition tels que Fe, Cu, Si, Mn et Cr. Les éléments Mn et Cr ont pour effet d'augmenter leur résistance mécanique et leur ténacité, et d'affiner la taille des grains [21,22], Le fer est

l'élément le plus présent dans la plupart des composés intermétalliques, Il facilite la formation de la plupart des composants

intermétalliques à cause de sa grande affinité avec le Si, Mn et Cu [23,24]. L'addition du cuivre améliore également les propriétés mécaniques ces alliages en affinant la taille des grains, mais nous limitons sa teneur à 0,5 % masse car il diminue leur résistance à la corrosion [25]

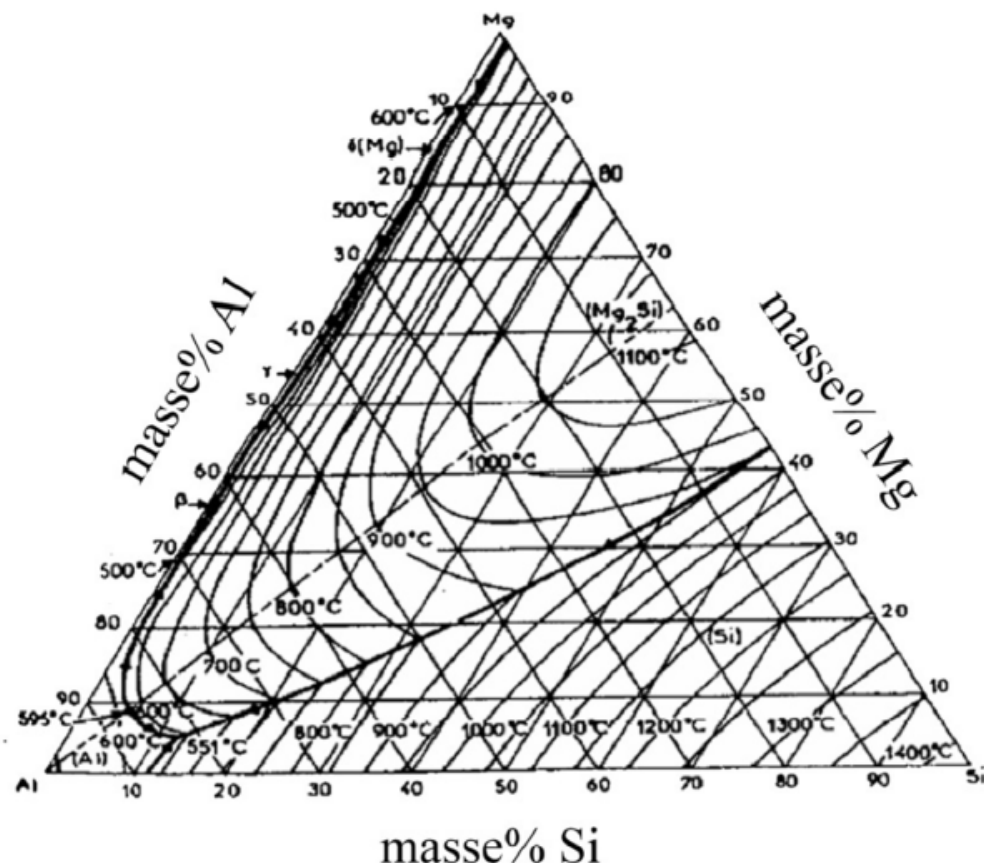


Figure I.8 Diagramme d'équilibre ternaire Aluminium-Magnésium-Silicium,

I.8.3 DIAGRAMME D'EQUILIBRE Al-Mg₂Si

Le fait d'obtenir comme précipité d'équilibre le composé Mg₂Si on utilise la coupe pseudo binaire

Al-Mg₂Si du diagramme de phase ternaire de l'alliage Al-Mg-Si (**Figure II-2**).

La température de l'eutectique appelé pseudobinaire est 595 °C. La composition du liquide eutectique est de 8,15 % poids Mg et de 4,75 % poids Si en équilibre, avec une solution solide d'aluminium contenant 1,13 % poids Mg et 0,67 % poids Si pour un total d'environ 1,85 % poids

Mg₂Si. La figure II-2 représente le système binaire aluminium et Mg₂Si.

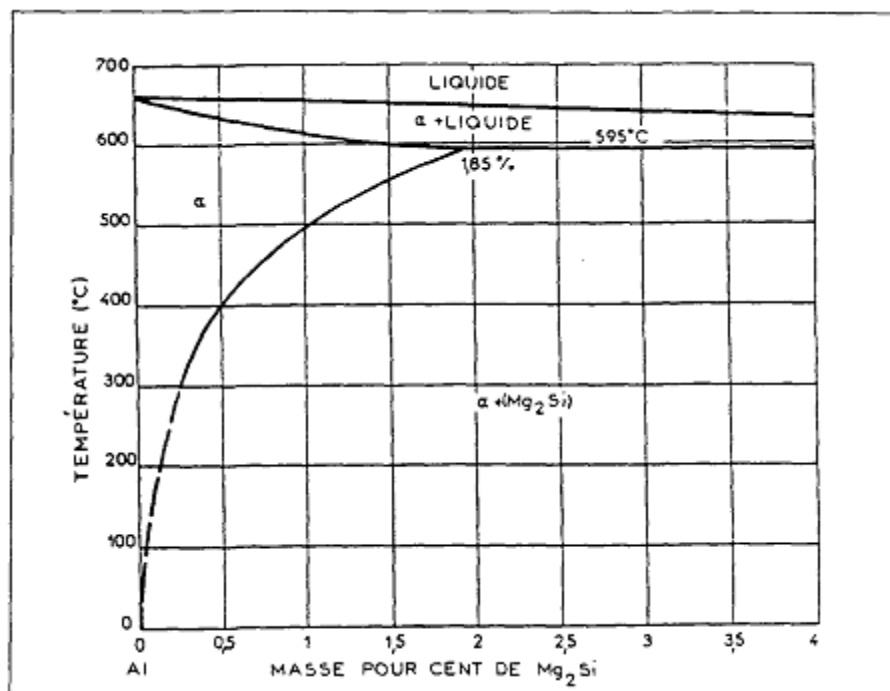


Figure I.9 : Coupe pseudo binaire Al-Mg₂Si de l'alliage Al-Mg-Si.

La division du système selon cette ligne permet de constater que l'extrémité riche en aluminium du diagramme de phase peut être considérée comme deux systèmes eutectiques tertiaires ; Al-Mg-

Mg₂Si à une température de 450 °C et Al-Si-Mg₂Si à 555 °C. La solubilité à l'état solide de la phase Mg₂Si dans l'aluminium diminue avec l'excès de silicium et encore plus avec l'excès de magnésium.

Température Élément	559 °C	500 °C	400 °C	200 °C
Mg	0,68 %	0,54 %	0,28 %	0,05 %
Si	1,16%	0,60 %	0,24 %	0,04 %

Tableau I.3 : Solubilité maximale du magnésium et du silicium dans la phase α riche en aluminium, en équilibre avec Si et Mg₂Si [26]

Les réactions de précipitation qu'on retrouve dans ce système se traduisent comme suit dans des conditions de solidification normales :

Solution solide sursaturée => bâtonnets semi-cohérents (β'' parallèles à {001} Al
=> aiguilles semi cohérentes β' s' parallèles à {001} Al => plaquettes semi- cohérentes β parallèles à {001} Al => β
Mg₂Si non cohérent

CHAPITRE II :
Alliage d'aluminium
6063

II. Introduction

L'alliage 6063 Al-Mg-Si est largement utilisé dans la fabrication de profilés en aluminium façonnés produits par extrusion. Les billettes sont obtenues par la méthode de coulée par refroidissement direct (DC). Pendant le casting DC, le métal liquide est versé dans un moule refroidi à l'eau (refroidissement primaire). Alors que la peau du lingot devient solide, l'intérieur reste toujours semi-solide / liquide. Un refroidissement supplémentaire de la masse du lingot est obtenu par trempe de la coque solide directement à l'aide de jets d'eau (refroidissement secondaire) [27]. Le taux de refroidissement (dT / dt) varie de 1 K / s au centre de la billette à environ 20 K / s dans sa zone de surface [28]. Les phases formées dans les différentes zones de la billette dépendent de leur composition chimique et de leur vitesse de refroidissement. Par ailleurs, la formabilité par extrusion ainsi que les propriétés mécaniques et extrudées de surface dépendent de la composition chimique et degré d'homogénéité de la billette [29,30]. Par conséquent, les alliages d'aluminium 6063 sont généralement soumis à un traitement thermique d'homogénéisation avant l'extrusion [31]. Ce traitement thermique provoque une réduction de la micro ségrégation des atomes de soluté et une solution partielle de Mg et Si à partir de particules de Mg_2Si préexistantes. Les précipités fins de siliciure de magnésium (β - Mg_2Si) sont responsables de la résistance potentielle de l'alliage [32–33]. Après traitement thermique, les barres homogénéisées sont découpées en limaces, préchauffé puis forcé dans une presse d'extrusion. Les extrusions peuvent être hyper-trempées et vieilles, en fonction de l'épaisseur d'extrusion [34]. Le profil est ensuite soumis à une gravure avant anodisation.

Pendant la gravure, des piqûres de gravure sont produites en raison des différentes vitesses de réaction entre les particules (Mg_2Si et $AlFeSi$) et la matrice en aluminium. Enfin, les profils sont soumis à un processus d'anodisation, au cours duquel une couche d'oxyde est formée au-dessus de la surface en aluminium. N'importe quelle surface les imperfections à l'interface de l'oxyde métallique augmenteront la partie diffuse de la lumière réfléchie et donc entraînent des défauts de stries [35].

Les fosses de gravure, les rainures de limite de grain et les étapes de gravure de grain sont les défauts de surface les plus courants créés pendant le processus de gravure. La présence d'imperfections de surface n'entraîne pas toujours stries. Les

défauts de stries ne sont observés que lorsqu'il y a une distribution inégale de la surface imperfections.

Qualité des billettes, y compris la microstructure des billettes, la composition chimique et les billettes la contamination peut influencer ou entraîner directement la distribution inhomogène de la surface microstructure. Les processus d'extrusion imparfaits peuvent générer un mélange d'alliages avec différents produits chimiques compositions résultant en une microstructure inhomogène produisant des régions de différents intermétalliques particules [36]. Des stries peuvent également se produire lorsque le piston s'approche trop près de l'extrudât à la fin de la course. La surface de la billette d'origine peut couler dans le noyau de l'extrusion et s'étirer vers la surface de l'extrudât, entraînant finalement des stries [37]. Également écoulement et chaleur non uniformes du métal la génération due au frottement et à la déformation plastique lors de l'extrusion peut entraîner une microstructure de surface non homogène telle que la taille des grains, l'orientation des grains et les précipités qui ont été signalés comme une source de défauts de stries qui peuvent être observés après anodisation.

Cet article rapporte l'effet de plusieurs étapes du processus lors de la fabrication de 6063 extrusions, analyse des propriétés mécaniques et de l'aspect de surface des profilés extrudés. L'étude prend en compte toutes les étapes de traitement de la chaîne de processus. Les variables du processus de coulée analysées comprennent la teneur chimique en Mg, Si et Fe. En ce qui concerne le processus d'homogénéisation, les variables étaient l'évolution microstructurale et les propriétés mécaniques, obtenues par essai de traction, après traitement de la billette. Plus loin dans la ligne de processus, l'extrusion et l'anodisation ont été analysées en termes de morphologie, taille et distribution des particules de Mg_2Si et $AlFeSi$, et leur influence particules sur l'aspect de surface et les propriétés mécaniques, en particulier la micro dureté [38].

II.1.1 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 barresbus et les applications architecturales.

II.1.2 Caractéristiques générale 6063 :

Puisque le produit 6063 est de la famille d'alliage d'aluminium série 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 et l'automobile [38]. En générale, cet alliage est connu par une excellente malléabilité, une résistance moyenne, une bonne résistance à la corrosion.

II.1.2.1 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 maximums 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.

COMPOSITION CHIMIQUE % en poids réf. UNI EN 573-3	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 II.1 : la composition chimique de l'alliage 6063 en pourcentage de mass.

II.1.2.2 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

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 II.2 : Les Propriétés technologies

II.1.2.3 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES :

Parmi les propriétés physiques d'alliage d'aluminium 6063, en citant [38] :

- ✓ La densité à la température ambiante vaut : $2,7 \text{ g/cm}^3$
- ✓ La température de fusion vaut : 600°C
- ✓ Module d'élasticité à la température ambiante vaut : 69500 N/mm^2
- ✓ Résistivité (à 20°C) vaut : $3,5 \mu\Omega \text{ cm}$
- ✓ Conductivité thermique : 200 W/m.K

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	Densité (kg/dm³)	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 II.3 : les propriétés physiques d'alliage d'aluminium 6063, en citant [38].

II.1.2.4 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 II.4 : Caractéristique mécaniques [40].

II.2 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 thermiques 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 [41].

II.2.1 Les Traitements thermiques de durcissement structural :

Le durcissement structural a une importance primordiale dans la métallurgie des alliage 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 II .5 : Les conditions pratiques de la trempe structurale pour les alliages d'aluminium [42].

II.2.1.1 : 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'ame 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 [43]

II.2.1.2 : 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 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 solide soluble formée lors de la mise en solution, par un refroidissement rapide ($\sim 260^\circ C/s$) 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 [43].

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 II.6: Le temps maximal de transfert et l'épaisseur des parois [42].

II.2.2.1 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.

II.2.2.1.1 Vieillissement 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.

II.2.2.1.2 Vieillissement 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 [44].

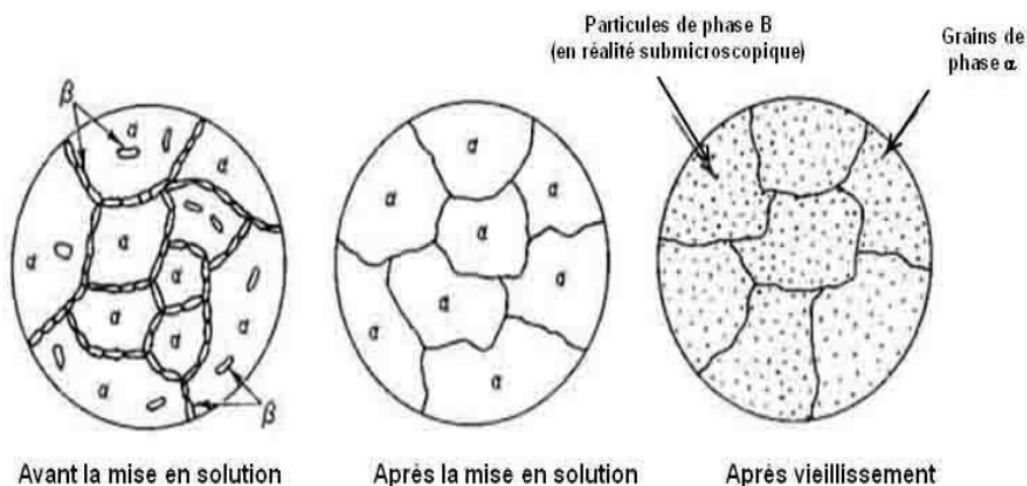


Figure II.1: La mise en solution [42]

II.2.3 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 [45].

II.2.4 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.
- 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 [44].

II.3 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 [46].

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 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/

8 : État dur/9 : État extra-dur.

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

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

Tableau II.7 : Désignation des états métallurgiques de base [47].

Subdivision de l'état T :

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

Appliqué.

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

Tableau II.8 : traitement thermique des alliages d'aluminium

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

Supplémentaires. Ils précisent des variantes ou des combinaisons des traitements avec une opération à froid (p. ex. T41, T61, T651) [48].

II.4 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 [49 ,50].

II.4.1 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 M n 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 Mg₂Si dans les joints de grains .[51]

II.4.2 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-(C u) 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%) a affiné la précipitation et augmenté le durcissement après revenu. En générale l'addition du cuivre s'avère pour augmenter la cinétique de la précipitation durcissant et amélioré la microstructure. Le Cu change la morphologie des précipités en lattes plus fines [51].

II.4.3 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 des précipités durcissants est également affectée par un excès de silicium. La séquence de précipitation est également modifiée par un excès de silicium.

II.4.4 Les dispersoïdes:

- a) **C r et M n** : 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 [54] [55].

b) Le manganèse : utilise pour neutralisée les effets néfaste du fer et modifier la morphologie des intermétallique. Il

est également considère comme le plus efficace comparativement au Chrome, au Nickel, auCobalt et au Molybdène [56].

c) Fer : Favorisent la formation des particules insolubles, qui facilite la rupture des alliages d'aluminium[57].

CHAPITRE III :

Techniques Expérimentales

III. Introduction :

Le principe de l'essai de traction consiste à exécuter sur une éprouvette de matériaux étudiés (de formes cylindriques) des forces croissantes qui vont la déformer progressivement puis la rompre.

L'essai de traction est un essai destructif, son exécution est facile. Il est le plus fondamental pour la caractérisation des matériaux. Il sert à déterminer les caractéristiques mécaniques suivantes : le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction.

Dans notre cas, le but de l'évaluation des caractéristiques d'un matériau en aluminium par l'essai de traction est le contrôle périodique qui nous servons à surveiller la qualité d'aluminium et son alliage 6063.

Dans ce travail, nous avons caractérisé l'aluminium et ses alliages par l'intermédiaire de l'essai de traction réalisée grâce à la machine hydraulique d'essai universelle WP310

Nous donnons ici tout d'abord la description générale d'une machine de traction, puis des éléments concernant les éprouvettes, les mesures des éprouvettes et Traitement thermique Appliqués, Description de l'essai de traction

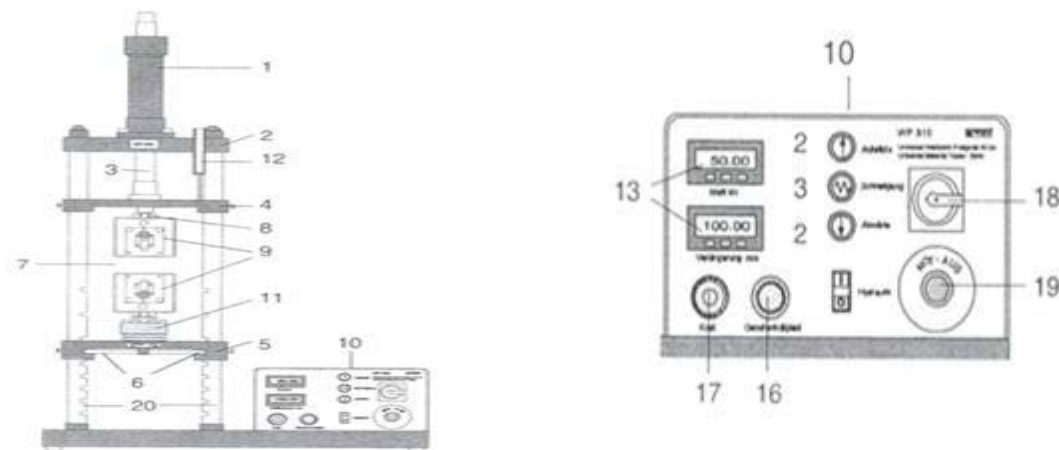
III.1. Description générale de la machine de traction :

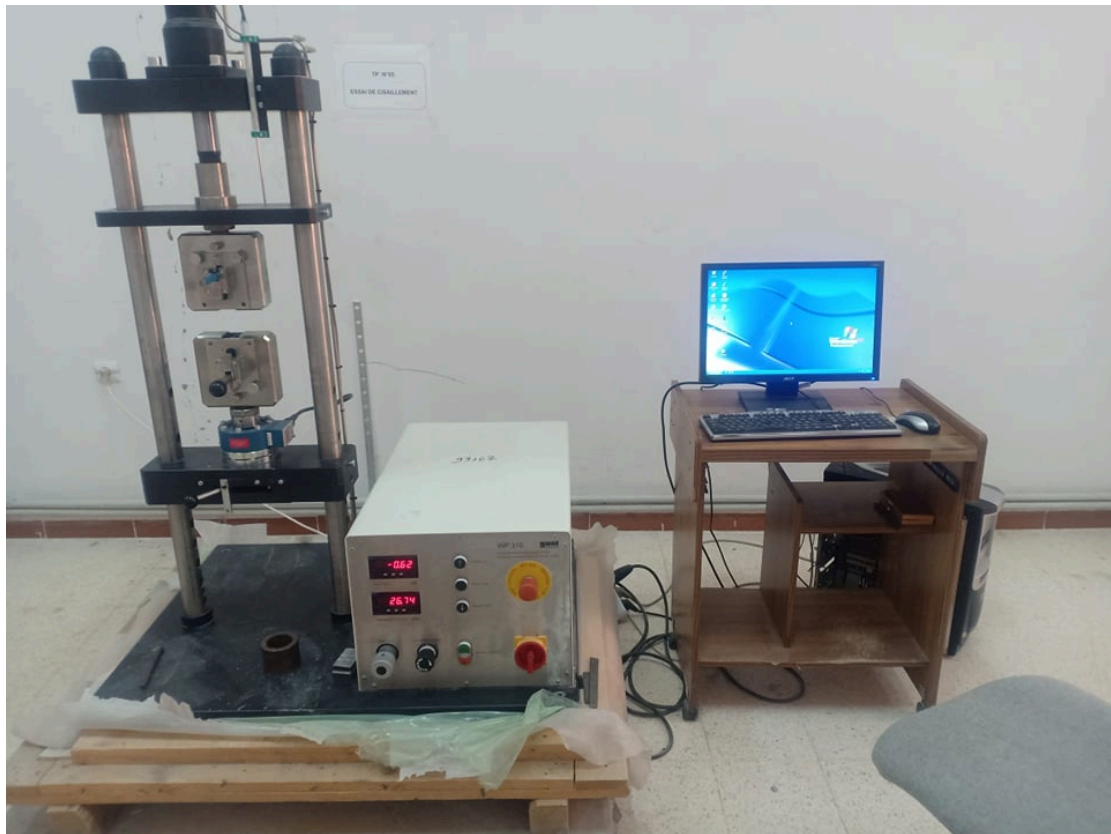
La machine hydraulique d'essai universelle WP310 permet la réalisation d'essai de traction. Grâce à la clarté du montage et à la facilité d'utilisation, nous pouvons observer tous les détails et les phases de l'essai. Des données techniques des matériaux et des lois fondamentales peuvent être vérifiées à l'aide de valeurs de mesure que l'on a déterminées soi-même.

Cette machine est un appareil d'essai vertical à colonne à entraînement hydraulique avec génératrice directe d'énergie. La force de traction maximale peut atteindre 50 KN dans les deux directions.

Cette machine est constituée d'un vérin hydraulique à double effet (1) se trouve sur la traverse (2). La tige de piston (3) agit sur la traverse supérieure (4). La traverse inférieure (5) peut être déplacée en plusieurs positions pour le réglage de la hauteur. Elle est fixée à l'aide de rainures et languettes (6) aux deux colonnes (20). Entre la traverse inférieure et la traverse supérieure se trouve l'espace de travail (7). Les logements cylindriques (8) permettent de changer les différents éléments, comme les têtes de serrage à coin (9). Les indicateurs pour la force et le déplacement, le groupe

hydraulique et la commande de la machine sont logés dans la boîtier (10). La mesure de force se fait via un transducteur de force (11) à la traverse inférieure. A la traverse supérieure, on mesure la course via un capteur de déplacement (12). La force et le déplacement sont affichés numériquement (13) et peuvent être envoyés à ordinateur pour exploitation via une interface série. Le mouvement de déplacement de la traverse supérieure est commandé à l'aide de boutons poussoirs (14). Les deux directions possèdent un circuit d'avance rapide (15). La vitesse de déplacement (16) la force maximale (17) peuvent être réglées en continu. En plus de l'interrupteur principal (18), la machine WP310 possède un bouton-poussoir d'arrêt d'urgence (19).





Figure(III.1): vue globale de la machine WP 310

III.2. Matériau utilisé :

Dans notre étude, nous avons utilisé un alliage d'aluminium de la série 6000 (alliage 6063) et analysé les composants chimiques dans l'usine (Algal+) et obtenu les résultats suivants :

Eléments	Al	Si	Fe	Cu	Zn	Ti	Autre
Teneur en masse (%)	98.7405	0.42363	>0.3353	0.03053	0.04883	0.01303	0.05849

Tableau (III .1) : composantes chimiques d'alliage 6063

III.3. L'éprouvette pour l'essai :

Les éprouvettes de l'essai de traction sont de formes cylindriques de sections transversales circulaires de diamètre 10 mm et longueur 140 mm.

Pour rendre comparables les résultats d'essais, on a défini le nombre de promotions à respecter dans les éprouvettes d'essai de tractions. Puisque, on utilisant des éprouvettes cylindrique, on doit respecter un rapport bien précis entre la longueur de référence (L_0) et le diamètre initial (d_0) de la section droite de l'éprouvette.

La longueur calibrée (L_c) de l'éprouvette est toujours supérieur à la longueur de référence (L_0). La partie utile de l'éprouvette est terminée par deux têtes d'amarrages destinées à la fixation et ayant la longueur, D pour éviter la rupture dans les parties fixées dans la machine hydraulique à traction.

Les arrondis à l'extrémité de la longueur calibrée (L_c) sont prenaient pour éviter les concentrations de contraintes à la traction entre les deux parties de section.

La fixation de l'éprouvette est réalisée au moyen de dispositifs (les têtes de serrage à coin) assurant le centrage de la charge et évitant la flexion transversale de l'éprouvette.

L'allongement de l'éprouvette peut être mesuré en enregistrant le déplacement relatif des têtes de serrage à coin.

Généralement on prend : $L_0 = 5d_0$ (norme ISO 6892-1)

Sachant que la section $S_0 = \pi \cdot d_0^2/4$, Donc : $d_0 = 1,13 \sqrt{S_0}$

Alors, On peut exprimer la longueur de référence L_0 comme suite :

On a : $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$

$d_0 = 10\text{mm}$: Diamètre initiale de l'aire de la section droite de l'éprouvette

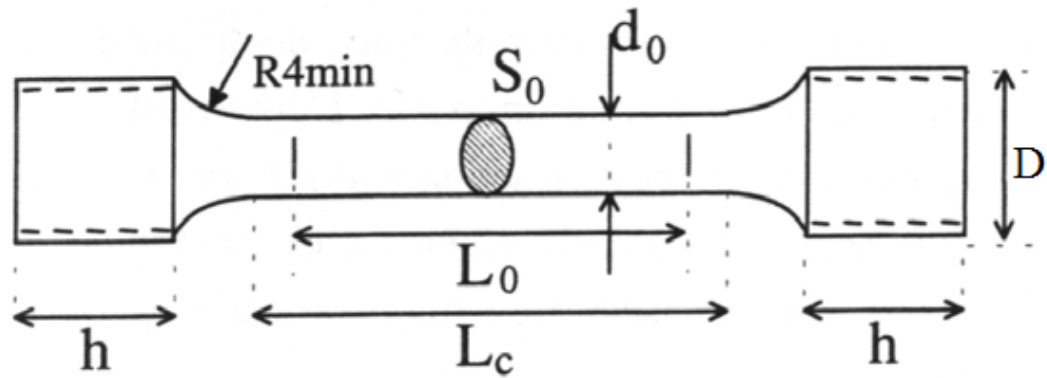
$L_0 = 50\text{mm}$ La longueur de référence

La longueur calibrée, L_c est donnée par la formule suivante :

$$L_0 + 2d_0 \geq L_c \geq L_0 + 0.5d_0$$

Le diamètre de la tête d'amarrage l'éprouvette est :

$$2d_0 \geq D \geq d_0$$



$d_0 = \varnothing$ partie calibrée

$D = \varnothing$ des têtes filetées

$L_0 =$ longueur entre repère $= 5 d_0$

$L_c =$ longueur calibrée

$h =$ longueur des têtes

Figure (III.2) : Forme d'éprouvette cylindrique

III.4.Fabrication d'éprouvettes

Afin de réaliser des expériences de traction, des éprouvettes spéciales ont été fabriquées pour la machine (WP310) en tournant un tube cylindrique plein en aluminium 6063 d'un diamètre de 18 mm et en le coupant en longueur 140 mm à l'aide d'une scie à découper spéciale.

Photos d'éprouvettes après tournage :



Figure (III.3) : Des éprouvettes en aluminium 6063

III.5. Traitement thermique Appliqués :

Les alliages d'aluminium de la série 6000. Constituent une catégorie importante d'alliages industriels à propriétés mécanique moyennes, qui sont obtenues par application de différents traitements thermiques. Ces traitements thermique jouent un rôle fondamentale dans l'amélioration des caractéristiques des notre alliage étudié (6063). Initialement, les échantillons sont soumis a un traitement d'homogénéisation, qui est un traitement comportant un chauffage de l'alliage 6063 en état brut (corroyé) à des températures relativement élevées 560°C et le maintien pendant 8 heures.

Concernant le traitement central des échantillons d'essai a été fait en (algal +) comme suit :

III.5.1.Processus d'homogénéisation

L'opération est réalisée dans un four dit d'homogénéisation à 560 °C pendant 11 heures. Il a comme objectif l'homogénéisation de la structure des billettes ayant une concentration de Mg₂Si non homogène et la dispersion des précipités (Mg₂Si, AlFeSi). Une homogénéisation est prévue pour :

- assurer la mise en solution de la phase Mg₂Si grossière formé dans la structure de coulée,
- uniformiser la concentration en Mg et Si,
- assurer la transformation et la coalescence de AlFeSi.

Les caractéristiques du four d'homogénéisation selon les constructeurs sont :

- Température maximale: 600°C.
- Demande maximale de gaz : 1,85 M3/h
- Pression de l'alimentation de gaz : 70 kPa.
- Pression de l'air à la soufflante : 3,45 kPa.

Les vitesses de chauffage lors de l'homogénéisation sont (calculées par moi-même durant la production):

25 à 125 °C ----- 0.625°C/min

125 à 290 °C ----- 1.375°C/min

290 à 560 °C ----- 4.16°C/min



Figure (III.4) : Four d'homogénéisation :

Après, nous avons le suivre par des traitements thermiques comportant les trois étapes suivantes :

Trempe direct après sa sortie du four d'homogénéisation de quatre manières différentes :

III.5.2.Processus de trempe

✓ A l'air forcé :

Après homogénéisation, les éprouvette sont introduites dans la chambre de refroidissement pendant 4 heures et sont soumises au refroidissement formé par des ventilateurs sur les deux côtés, l'air chaud est évacué de la chambre vers le toit.

Les vitesses de refroidissement des éprouvettes sont :

560 à 455 °C ----- 0.833 °C/min

455 à 350 °C ----- 1.750 °C/min

350 à 45 °C ----- 3.833 °C/min

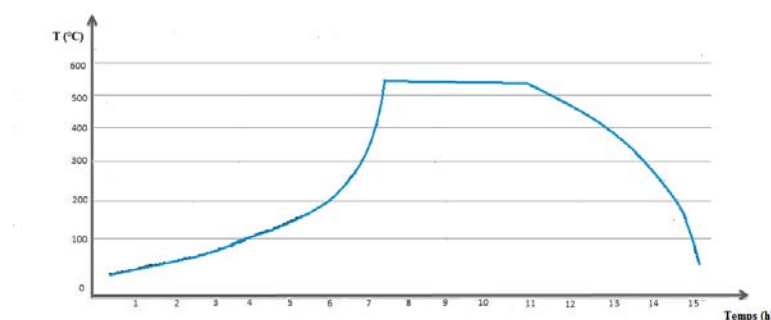


Figure III.5 : Variation de la température des éprouvettes pendant l'homogénéisation et le refroidissement

- ✓ air normal (naturel).
- ✓ l'eau.
- ✓ huile (naftal).

III.5.3. Revenu

Après 13 heures et 15 minutes, ils sont placés les éprouvettes dans le four de revenu à 194 ° C, Temps maintien d'une 1 heure, afin d'améliorer leurs duretés et leurs résistances mécaniques par une série des précipitations microscopique amenant à la formation de la phase durcissant Mg_2Si .

Les principales caractéristiques du four de normalisation (revenu) sont les suivantes :

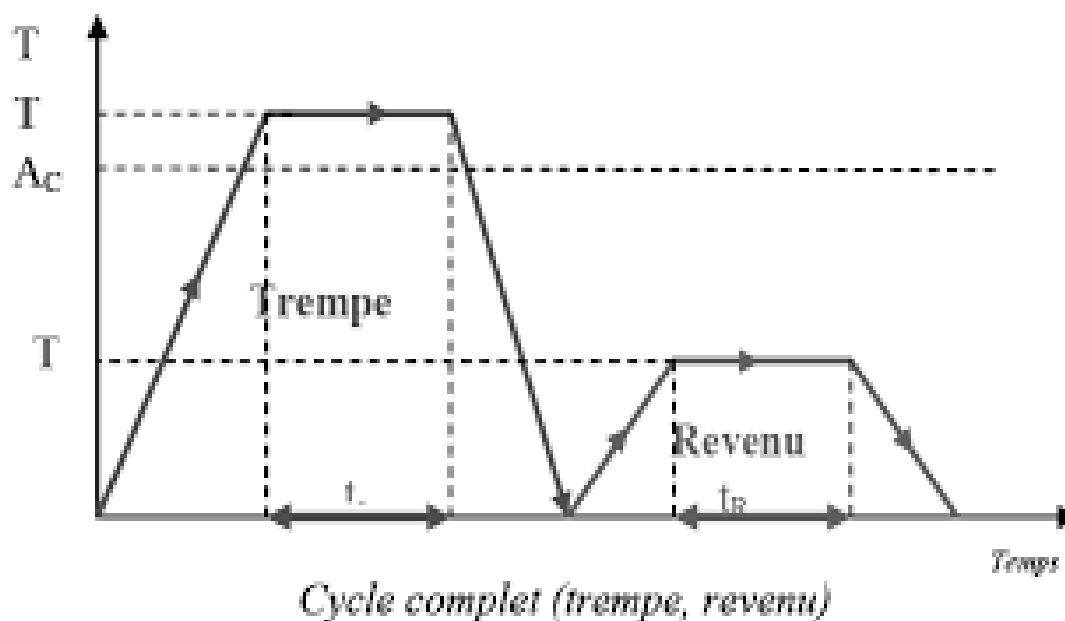
- Température maximales : 194°C.
- Demande maximale de gaz : 8 M3 /h.
- Pression de l'alimentation de gaz : 70 kPa.
- Pression de l'air à la soufflante : 3,45 kPa.



Figure (III.6) : four de revenu

Ensuite, les échantillons ont été sortis du four et le processus de refroidissement direct a été effectué tout en maintenant les échantillons refroidis de la même manière :

- ✓ air normal (naturel).
- ✓ Air forcé.
- ✓ l'eau.
- ✓ huile (naftal).



Figure(III.7) : Schéma représentatif du traitement thermique de durcissement par précipitation pour les alliages d'aluminium.

III.6.Essai de traction :

III.6.1. principe de l'essai de traction :

L'essai le plus courant pour déterminer le comportement mécanique d'un matériau est l'essai de traction. Ce test est facile à réaliser et fournit une abondance d'informations. Une force de traction est exercée sur une barre de taille standard, jusqu'à sa rupture, après une opération de chargement à taux de contrainte constant.

Dans notre travail appliqué, l'échantillon d'essai a été prélevé à partir de matériaux en aluminium 6063 et façonné selon des dimensions étudiées.

Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité (Module d'Young) E , le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité R_e , la résistance à la rupture R_r ou R_m , l'allongement après rupture $A\%$ et le coefficient de striction $Z\%$etc.

III.6.2.Description de l'essai de traction :

L'essai uni axial le plus classique est l'essai de traction simple. On soumet une éprouvette de traction à une force dans une direction fixe. L'éprouvette, le plus souvent plane ou cylindrique de section circulaire, est typiquement constituée de deux zones : les têtes d'éprouvette servent à accrocher l'éprouvette et à lui transmettre l'effort extérieur, tandis que la partie centrale, dite partie utile, est la zone où l'on peut raisonnablement considérer que l'état de déformation est homogène et sert aux mesures de déformations. On mesure cette déformation par différents moyens (jauges

de déformation, extensomètre, corrélations d'image...). La contrainte $\sigma = F / S$ se déduit de la mesure de la force appliquée et de la mesure de la section S de la partie utile de l'éprouvette. Nous nous limiterons aux (relativement) petites déformations et nous placerons dans le cadre de l'hypothèse des petites perturbations (H.P.P.). En conséquence, la section S est la section initiale de l'éprouvette et les différentes mesures de la contrainte (contrainte nominale, contrainte de Cauchy) et de la déformation (Green-Lagrange, déformations logarithmiques) coïncident.

L'essai peut être piloté en contrainte (on impose une valeur à la force F donc la contrainte σ) ou en déformation (on applique un déplacement aux têtes d'éprouvette de façon à atteindre une déformation prescrite ε dans la zone utile de l'éprouvette). Une histoire de chargement (en contrainte ou en déformation) est appliquée à l'éprouvette et les résultats des mesures sont portés dans un diagramme (σ, ε). Différents types de chargement permettent de mettre en évidence différents aspects du comportement des matériaux testés.

En simplifiant, les trois grands types de comportement qu'un matériau est susceptible d'exhiber (en fonction de la température, de la vitesse de déformation et du niveau des contraintes) sont le comportement élastique, le comportement plastique et le comportement visqueux.

III.6.3. Diagramme de traction :

Les valeurs mesurées directement lors d'un essai de traction sont la force F et l'allongement L , plutôt que les contraintes et la déformation. La contrainte, rapportée dans un diagramme de traction est la force divisée par la section initiale s_0 de l'éprouvette (contrainte nominales) $\sigma = \frac{F}{s_0}$

De même la déformation se réfère à la longueur initiale L_0 de la partie délimitée par l'extensomètre (déformation nominale). $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$.

On parle de diagrammes rationnels quand on détermine les contraintes et les déformations vraies. Ils sont obtenus en divisant la force ou l'allongement par la section, respectivement la longueur instantanée. Ici nous nous contentons du premier type de diagramme qui est d'ailleurs le diagramme d'usage commun. (**Figure.III.3**)

illustre l'allure que peuvent avoir les courbes de traction de différents matériaux.

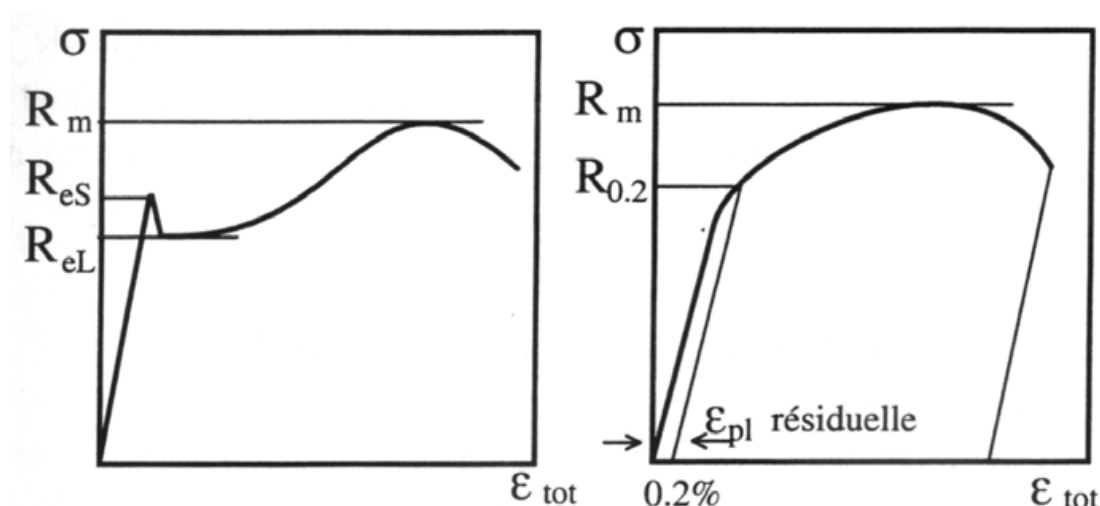


Figure. III.8: Schéma représentant 2 types différents de courbes de traction

III.6.4. Déformation élastique :

Lorsqu'un corps solide est soumis à des forces extérieures, il peut se déplacer et /ou se déformer. Une déformation est dite élastique si, conformément à l'intuition, le solide reprend spontanément sa forme de départ lorsque les contraintes extérieures sont supprimées (Il peut éventuellement avoir subi un déplacement d'ensemble). Ainsi, les déformations des solides élastiques sont par définition réversibles. Nous admettrons en outre que l'état naturel d'un solide élastique, c'est-à-dire son état en l'absence de toute force extérieure, est caractérisé par une forme bien déterminée ainsi que par l'annulation de toutes les contraintes internes. Pratiquement, ce n'est pas toujours aisé à réaliser. Les matériaux présentent souvent ce que l'on appelle des contraintes résiduelles qui trouvent leur origine dans les procédés de fabrication ou de mise en forme par exemple. Quand le matériau se déforme élastiquement le déplacement des atomes est inférieur à la distance interatomique [58].

De ce fait la théorie de l'élasticité classique Dont l'origine remonte aux années 1800-1850. Les grands noms des débuts de cette théorie sont Cauchy, Kirchhoff, Green, Navier, Poisson. Les observations préliminaires de Hooke sont bien antérieures (1660), s'intéresse à l'étude des déformations de ces solides élastiques sous l'effet de forces extérieures.

On peut dire que l'élastique linéaire est caractérisé par le fait que les configurations du système déformé restent toujours voisines d'une configuration de référence qui est un état naturel du système, c'est-à-dire un état d'équilibre dans lequel toutes les

contraintes s'annulent. Dans ce contexte, on pourra donc faire l'hypothèse des petites perturbations (HPP) et confondre les descriptions eulérienne et lagrangienne. [59].

III.6.5.Déformation plastique :

La déformation plastique se caractérise par une modification de la position des atomes du matériau auquel on applique une force. Lorsque cette force cesse, les atomes ne retrouvent pas leur position d'origine : la déformation est irréversible.

La déformation plastique accompagne la déformation élastique. Elle se manifeste lorsque la contrainte atteint un seuil de plasticité. Alors la relation entre la contrainte appliquée et la déformation n'est plus linéaire. Ainsi, en assimilant le solide au modèle du ressort, celui-ci va se déformer de façon plastique si on lui applique une force qui dépasse sa capacité de déformation élastique. [60]

III.6.6.Déformation dans une seule direction :

On dit qu'une déformation est dans une seule direction lorsque le tenseur de contrainte est porté e par une direction. L'état de contrainte est caractérisée par le seul champ scalaire σ . le cas des essais uni axiaux.

III.7. Caractéristiques mécanique :

En général, l'essai de traction nous a permis de déterminer les propriétés mécaniques suivantes :

III.7.1. Module d'élasticité longitudinale (Module d'Young) (E) :

Le module d'élasticité ou module de Young est défini comme la pente de la partie droite partant de l'origine du diagramme. Sa détermination par un essai de traction nécessite impérativement un extensomètre de bonne précision car la rigidité finie, même de la machine la plus robuste, est susceptible de modifier cette pente. Lorsque l'éprouvette n'est pas proprement alignée, la première partie de la courbe est arrondie. Il est défini par la loi de Hooke (l'effort F de traction est proportionnel à l'allongement ΔL) [61-62] :

$$E = \frac{F_0 L_0}{S_0 \Delta L} = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Avec :

$$\Delta L = L - L_0 : L' \text{allongement}$$

$$\sigma = \frac{F_0}{S_0} : \text{La contrainte}$$

$e = \frac{\Delta L}{L_0}$: La déformation

III.7.2. Limite d'élasticité (la résistance limite élastique) (R_e) :

Correspond à la contrainte à partir de laquelle le matériau commence à se déformer plastiquement. En pratique, bien que la définition soit simple, cette limite est difficile à apprécier car le passage du domaine élastique au domaine plastique se fait de façon progressive. La difficulté de lecture donnerait des interprétations erronées de cette limite d'un laboratoire à l'autre. Pour s'en affranchir, on a déterminé une limite conventionnelle d'élasticité à 0,2% ($R_{e0,2\%}$). C'est la contrainte pour laquelle on mesure une déformation plastique de 0,2%.

III.7.3. Résistance à la rupture (R_r) ou (à la traction R_m) :

C'est la charge appliquée au maximum de la courbe $F = f(\Delta L)$ divisée par la section initiale

(= maximum de la contrainte nominale).

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

III.7.4. Allongement ($A\%$) :

L'allongement ($A\%$) indique l'aptitude d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre, donc l'allongement est un indicateur de la ductilité du matériau. Elle est caractérisée par l'allongement pour cent $A\%$ (plus $A\%$ est grand, plus le matériau est ductile.) [63-64]

- - si $A\% > 5\%$ le matériau est considéré comme ductile.
- - si $A\% < 5\%$ le matériau est considéré comme fragile «cassant».

On définit un indicateur sur la ductilité du matériau en calculant le coefficient d'allongement noté ($A\%$)

$$A\% = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$$

L_u : Longueur ultime (mesurée en raboutant les deux morceaux de l'éprouvette cassée).

L_0 : Longueur initiale ou référence (la distance entre deux repères tracés sur l'éprouvette avant l'essai).

Remarque : La ductilité est une propriété déterminante pour les matériaux devant être déformés à froid (emboutissage, pliage...).

III.7.5. Coefficient de striction (Z%) :

Le coefficient de striction (Z%) est aussi considéré comme un autre indicateur de ductilité du matériau.

En calculant le coefficient de striction noté Z%.

$$Z\% = \frac{(S_0 - S_u)}{S_0} \times 100$$

s_0 : Section initiale (calculée en mm^2 à partir du diamètre « d_0 » mesuré entre deux repères tracés sur l'éprouvette avant l'essai).

s_u : Section ultime (calculée en mm^2 à partir du diamètre « d_u » mesuré à l'endroit de la cassure de l'éprouvette cassée).

III.7.6. Striction :

Le domaine de la striction est considéré à partir que la section d'une partie de l'éprouvette se réduit considérablement jusqu'à la rupture

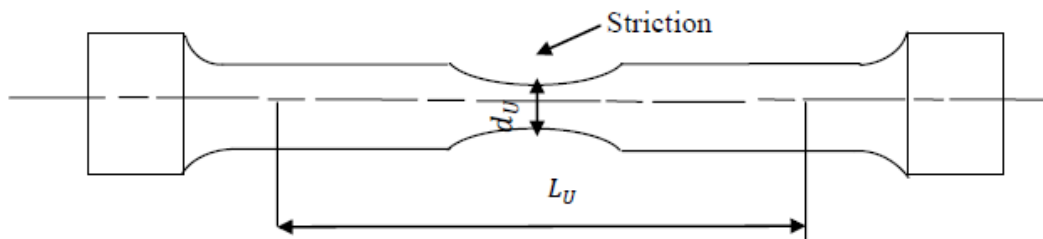




Figure (III.9) : Forme d'éprouvette cylindrique après rupture

L_U : Longueur ultime entre deux repères (après rupture de l'éprouvette et reconstitution de celle-ci en rapprochant soigneusement les deux fragments)

d_U : Diamètre de la Section ultime (la section minimale après la rupture de l'éprouvette).

III.7.7. Vitesses d'essai :

Elle désigne la vitesse d'éloignement de deux têtes d'amarrage, elle peut être lente et constante. Elle conduit à la rupture de l'éprouvette.

Dans notre cas, le matériau des éprouvettes utilisé dans l'essai de traction est d'aluminium,

Alors la vitesse de traction est inférieure ou égale à la valeur de $0,009L_0$ ($v \leq 0,009 L_0$ mm/min).

III.7.8. Déroulement d'un essai de traction :

Nos essais de traction sont réglementés par la norme EN 10002-1. Chaque essai de traction consiste à exercer, sur une éprouvette normalisée cylindrique lisse et bien calibrée dans le matériau à tester (**Figure.III.9**) La traction s'exerce légèrement

suivant l'axe géométrique de l'éprouvette, qui va s'allonger. A un moment donné, un endroit de la tranche médiane se ternit, l'éprouvette s'étrangle et le métal semble s'écouler à la façon d'un liquide très visqueux. C'est le phénomène de striction qui est rapidement suivi de la rupture.

Un ordinateur enregistre la courbe de traction qui mesure l'allongement de l'éprouvette en fonction de la contrainte (σ). On obtient une courbe de traction (contrainte-déformation) ($\sigma = f(\epsilon)$)

CHAPITRE IV :

Résultats et discussion

IV.. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats et comparaisons obtenus à partir de l'expérience de traction qui a été menée dans le laboratoire de la Faculté de Technologie de l'Université de M'Sila et l'effet de différents traitements thermiques sur les propriétés mécaniques représentées dans :

Le module d'élasticité (Module d'Young) E , le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité R_e , la résistance à la rupture R_r ou R_m , l'allongement après rupture $A\%$ et le coefficient de striction $Z\%$etc.

IV.2.Courbes de traction :

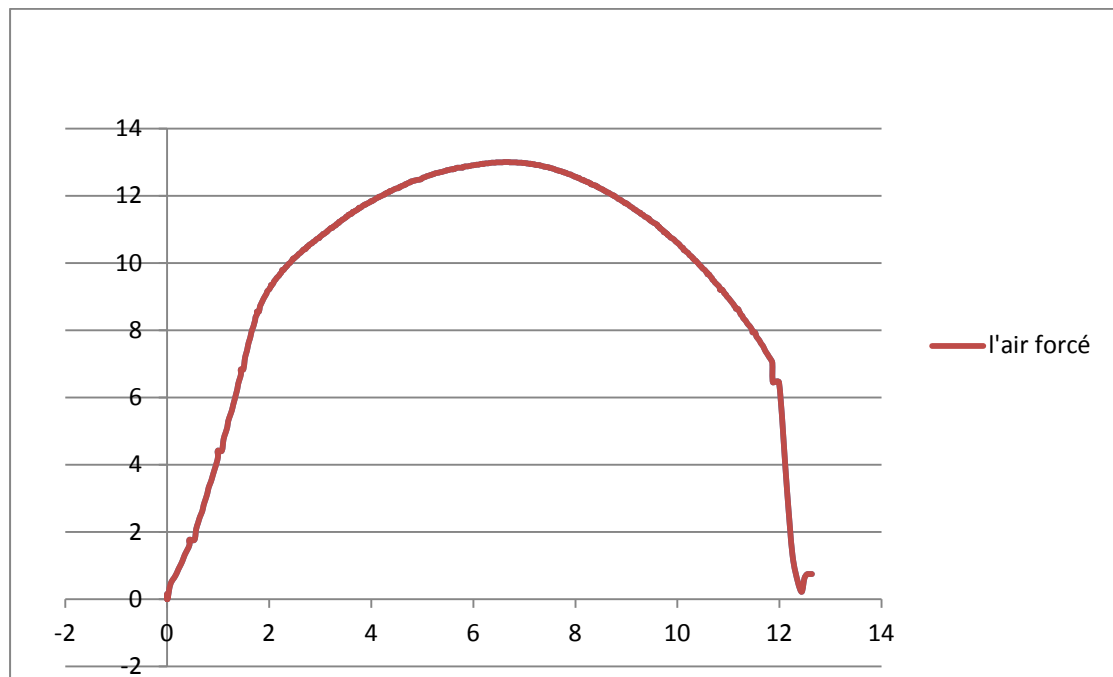


Figure (IV.1) : Courbe de traction d'alliage 6063 traitée à L'air forcé

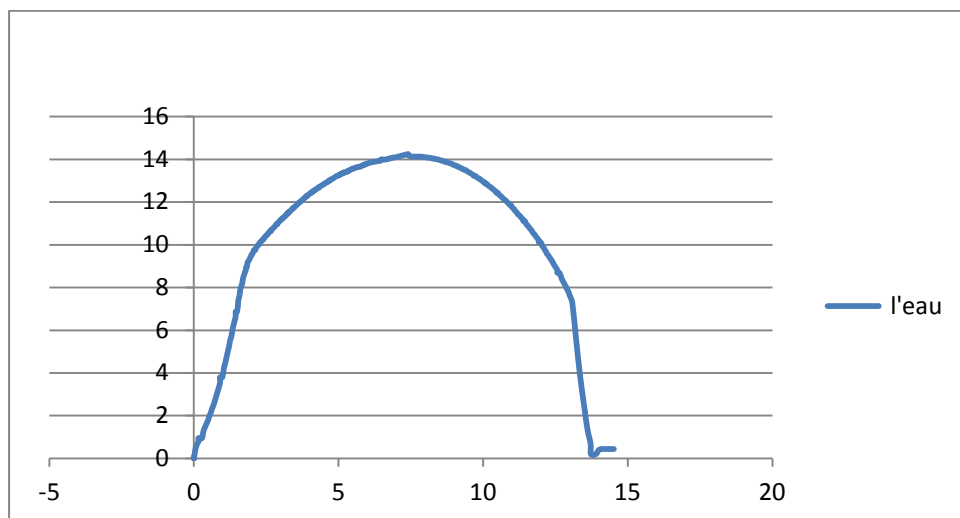


Figure (IV.2) : Courbe de traction d'alliage 6063 traitée à L'eau

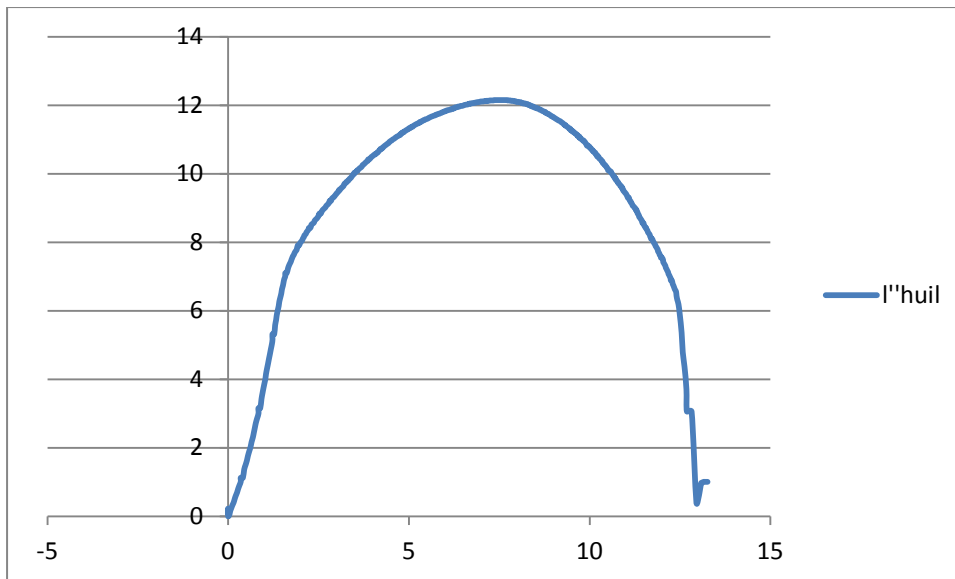


Figure (IV.3) : Courbe de traction d'alliage 6063 traitée à l'huile

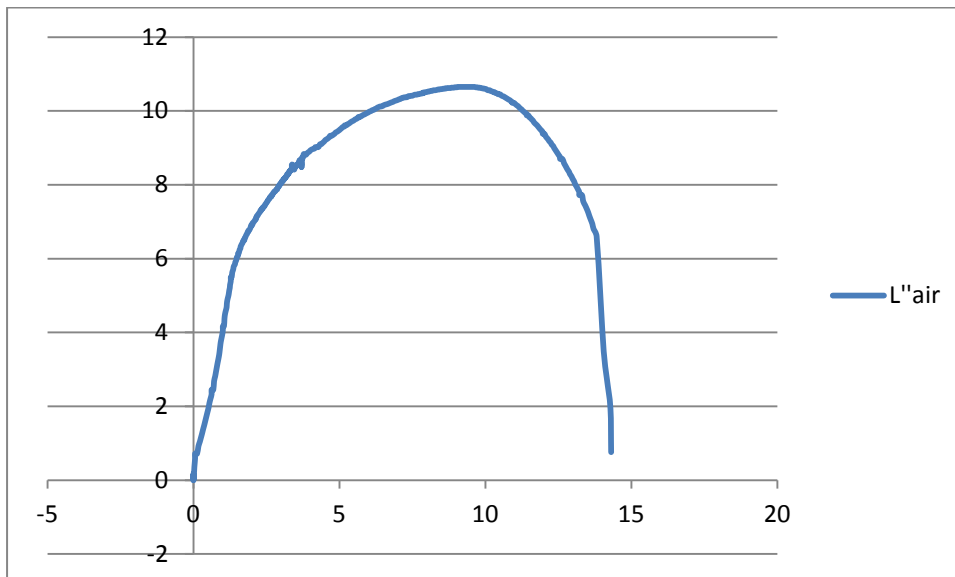


Figure (IV.4) : Courbe de traction d'alliage 6063 traitée à l'air

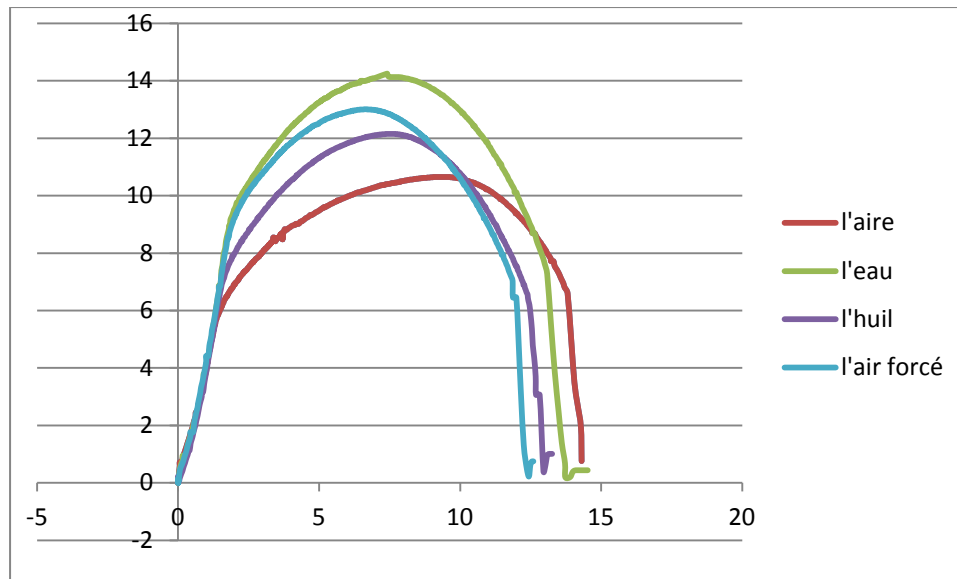


Figure (IV.5) : Courbes des tractions d'alliage 6063 après les traitements thermiques

IV.3.Les calculs des résultats :

L (mm)	d ₀ (mm)	S ₀ (mm ²)	L ₀ (mm)	ΔL (mm)	ε	A (%)
61,9185	10	78,50	50,0591275	11,8594	0,19153233	23,6907844

Z (%)	R _m (KN/mm ²)	R _e (KN/mm ²)	d _s (mm)	S _u (mm ²)	F _m ; σ _m (KN)	F _e ; σ _e (KN)	E (KN/mm ²)
80,20	0,16573248	0,10904459	4,45	15,5449625	13,0100	8,5600	0,5693273

Tableau (IV.1) : tableau représenté les paramètres de l'éprouvette traitée à L'air

L (mm)	d ₀ (mm)	S ₀ (mm ²)	L ₀ (mm)	ΔL (mm)	ε	A (%)
63,0567	10	78,50	50,0591275	12,9976	0,20612551	25,9644957

Z (%)	R _m (KN/mm ²)	R _e (KN/mm ²)	d _s (mm)	S _u (mm ²)	F _m ; σ _m (KN)	F _e ; σ _e (KN)	E (KN/mm ²)
84,00	0,18152866	0,10751592	4	12,56	14,2500	8,4400	0,52160417

Tableau (IV.2) : tableau représenté les paramètres de l'éprouvette traitée à L'eau

L (mm)	d ₀ (mm)	S ₀ (mm ²)	L ₀ (mm)	ΔL (mm)	ε	A (%)
62,4479	10	78,50	50,0591275	12,3888	0,19838609	24,7483338

Z (%)	R _m (KN/mm ²)	R _e (KN/mm ²)	d _s (mm)	S _u (mm ²)	F _m ; σ _m (KN)	F _e ; σ _e (KN)	E (KN/mm ²)
85,02	0,15477707	0,08828025	3,87	11,7568665	12,1500	6,9300	0,44499217

Tableau (IV.3) : tableau représenté les paramètres de l'éprouvette traitée à L'huile

L (mm)	d ₀ (mm)	S ₀ (mm ²)	L ₀ (mm)	ΔL (mm)	ε	A (%)
57,2191	10	78,50	50,0591275	7,1600	0,12513298	14,3030859

Z (%)	R _m (KN/mm ²)	R _e (KN/mm ²)	d _s (mm)	S _u (mm ²)	F _m ; σ _m (KN)	F _e ; σ _e (KN)	E (KN/mm ²)
81,08	0,13566879	0,07159236	4,35	14,8541625	10,6500	5,6200	0,57213019

Tableau (IV.4) : tableau représenté les paramètres de l'éprouvette traitée à l'air

IV.4.Caractéristiques mécaniques :

Après avoir effectué l'essai de traction, les valeurs de propriétés mécaniques suivantes ont été obtenues.

IV.4.1. Résistance à la rupture (R_r) ou (à la traction) :

C'est la charge appliquée au maximum de la courbe $F = f(L)$ divisée par la section initiale (maximum de la contrainte nominale).

Éprouvettes	Alliage d'aluminium 6063 après traitement thermique			
	Eprouvette traitée à l'air forcé	Eprouvette traitée à l'eau	Éprouvette traitée à l'huile	Eprouvette traitée à l'air
Résistance à la rupture () en	165 N/mm ²	181 N/mm ²	154 N/mm ²	135 N/mm ²

Tableau (IV.5) : tableau représenté Résistance à la rupture

IV.4.2.Limite élastique conventionnelle $Re_{0.2}$:

La fixation d'un seuil d'écoulement plastique n'est pas possible sans convention car, même à des contraintes largement en dessous de $Re_{0.2}$, on observe à l'aide des instruments hautement précis des déformations irréversibles. Pour la plupart des constructions mécaniques des déformations aussi faibles sont insignifiantes. On préfère donc une limite plus élevée et aussi plus facilement déterminable. Ainsi on fixe la limite conventionnelle d'élasticité à la contrainte maximum applicable qui laisse, après décharge, une déformation permanente (plastique) de 0,2 %. Pour la mécanique de précision les exigences sont plus poussées, et on détermine parfois de manière analogue $Re_{0.02}$. La valeur s'obtient en augmentant graduellement la force de traction jusqu'à ce qu'après déchargement, l'allongement résiduel atteigne la valeur cherchée ou on peut aussi tracer une ligne parallèle à la droite élastique passant par 0.2%.

IV.4.3 Allongement (A%) :

C'est la déformation nominale (allongement divisé par la longueur initiale) après rupture exprimée en %. En raison de la localisation de la déformation, la majeure partie de l'allongement ne provient que d'une fraction de la longueur L_0 . La valeur de A est donc d'autant plus petite que l'éprouvette est longue.

Éprouvettes	Alliage d'aluminium 6063 après traitement thermique			
	Eprouvette traitée à L'air forcé	Eprouvette traitée à L'eau	Éprouvette traitée à l'huile	Eprouvette traitée à l'air
Allongement (A%) :	23 %	25 %	24 %	14 %

Tableau (IV.6) : tableau représenté Allongement (A%)

IV.4.4.Coefficient de striction (Z%) :

Éprouvettes	Alliage d'aluminium 6063 après traitement thermique			
	Eprouvette traitée à L'air forcé	Eprouvette traitée à L'eau	Éprouvette traitée à l'huile	Eprouvette traitée à l'air
Coefficient de striction (Z%) :	80%	84%	85%	81%

Tableau (IV.7) : tableau représenté Coefficient de striction (Z%)

IV.5. Discussion des résultats :

IV.5.1.Courbes :

D'allures des courbes de traction de différents échantillons des éprouvettes, on peut observer :

IV.5.1.1. Zone élastique :

Des zones élastiques de courbes des différentes éprouvettes on déduit :

- L'allongement des éprouvettes ayant subi un traitement thermique (eau, huile, air fort, air) est très proche.
- L'allongement est plus important dans l'échantillon traité thermiquement avec de l'eau
- Limite d'élasticité (la résistance limite élastique) (R_e) :: Très proche pour les échantillons traités thermiquement à l'eau et à l'air fort et espacés pour les échantillons traités thermiquement à l'huile et à l'air

IV.5.1.2. Zone de déformation plastique :

- L'allongement avant rupture varie d'un échantillon à l'autre
- L'allongement avant rupture est plus grands dans l'échantillon traité thermiquement à l'air puis diminue dans les échantillons traités thermiquement à l'eau, puis à l'huile et enfin à l'air fort
- La plus grande force prend les plus grandes valeurs dans l'échantillon traité thermiquement avec de l'eau, suivi de l'échantillon traité thermiquement avec de l'air fort, suivi de l'échantillon traité thermiquement avec de l'huile et enfin de l'air

IV.5.2. Tableaux :

Des tableaux de différents échantillons des éprouvettes, on peut déduire :

- La valeur de la résistance à la traction (R_m) pour l'échantillon traité thermiquement dans l'eau est la plus grande, suivie par le traitement thermique dans l'air fort et l'huile et enfin l'air
- L'allongement ($A\%$) est très proche pour les échantillons traités thermiquement en (eau, huile, air fort) et prend des valeurs plus importantes que l'échantillon traité thermiquement avec de l'air.
- Le coefficient de striction ($Z\%$) prend la plus grande valeur dans l'échantillon traité thermiquement avec de l'huile, puis de l'eau, puis de l'air fort, et enfin de l'air

CONCLUSION

GENERALE



Conclusion Générale

Grâce à notre travail dans ce mémoire de master, nous avons atteint ce qui suit :

- Nous avons appris à utiliser la machine d'essai hydraulique universelle WP310, ses composants et les capteurs appliqués, et avons également enregistré les courbes de traction de l'alliage d'aluminium 6063.-Ce travail nous a permis de mieux comprendre le comportement de l'alliage d'aluminium 6063 en traction.
- Manière correcte de faire le traitement thermique de l'alliage d'aluminium 6063.
- Les résultats des valeurs de comportement de l'aluminium que nous avons obtenus expérimentalement sont très proches des valeurs théoriques et des recherches antérieures
- Nous avons conclu que les traitements thermiques ont un rôle très important de change plusieurs propriétés mécaniques des matériaux telles que ; les coefficients d'allongement et de la striction, la résistance à la rupture et la limite d'élasticité
- Le traitement thermique de l'aluminium et de ses alliages est une question d'actualité qui a déjà fait l'objet de nombreuses recherches, car il permet de modifier les propriétés du matériau pour lui donner de nouvelles possibilités.
- A travers nos recherches bibliographiques et expérimentales, nous avons conclu que les essais de traction sont très importants pour caractériser les matériaux et déterminer leurs propriétés mécaniques (dureté, module d'allongement, résistance à la traction, limite élastique et module de Young, etc...).
- Les essais de traction réalisés au cours de l'expérience ont montré la différence entre les propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium 6063 après différents traitements thermiques.

Enfin, nous pensons avoir apporté une contribution au domaine de la caractérisation de l'alliage d'aluminium 6063 traité thermiquement par les méthodes montrées à travers nos travaux qui peuvent accroître la connaissance du comportement de l'alliage d'aluminium 6063.

REFERENCE

BIBLIOGRAPHIE

Reference bibliographique

Référence :

- [1]- AlgalPlus.com/presentation.
- [2]- Aouabdia youcef, Thèse doctorat, Université Constantine 1, Algérie (2007) Etude de la décomposition et de la précipitation dans des tôles des alliages Al-Mg-Si.
- [3]- article Phase formation in 6060/4043 aluminum weld solidification N. Coniglio, C.E. Cross , I. Dörfel b,W.Österleb.
- [4]- article: Continuous cooling precipitation diagrams of Al-Mg-Si alloys: Milkereit Nelia Wanderka, Christoph Schick 2012.
- [5]- AYADI SOUAD, mémoire d'ingénieur, ENSMM ANNABA, Algérie (2016) Influence de la température et du mode de coulée sur la microstructure et les propriétés mécaniques des alliages AS13 et AS10G.
- [6]- C. Baret-Blanc : Etude comparative de la sensibilité à la germination et à la propagation des piqûres des alliages d'aluminium 2024 et 6056. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, (1997).
- [7]- C.Vargel, corrosion de l'aluminium, paris : dunod, mars 2000, 501 p.isbn 2-100-04191-6.
- [8]- C.Vargel, corrosion de l'aluminium, paris p501 (1999).
- [9]- D. Dumon, Thèse de doctorat, Laboratoire de Thermodynamique et de Physico-Chimie Métallurgiques-ENSEEG GRENOBLE, 2001.
- [10]- D.E.laughlin and W.F.Miao ,Automotive Alloys .II.Edited by S.K.Das, The Minerals Metals and materials society (1980), p63–80.
- [11]- Elasticite et plasticite (D. Francois,A.Pineau et A.Zaoui),Hermes Science Publications.ISBN 978-2-7462-2347-9.
- [12]- FRANÇOIS D., PINEAU A. EtZAOUI A,– Comportement mécanique des matériaux,Vol.1 : élasticité et plasticité. Vol. 2 : viscoplasticité, endommagement, mécanique de la rupture, mécanique du contact. Paris, Hermès, 1992.
- [13]- G. Duvaut,Mecanique des milieux continus,Masson, Paris, 1990.
- [14]- G. K. Batchelor, An Introduction to Fluid Dynamics,Cambridge University Press,1967.
- [15]- G.B.Gurgen.A.K.Gupta ;P.W.Jeffrey,and D.J.Lloyd,Mater 35(1995)23–39.
- [16]- G.W.Lorimer, précipitation in aluminium alloys in precipitation processus in solids, TEM-AIME Warrendale ,p.A,(1978)87–119.
- [17]- Gérard. Hartmann. L'Aluminium historique. Larousse des industries, 2004.

Reference bibliographique

<http://nte.mines-albi.fr/SciMat/co/SM6uc5-2.html>.

- [18]- J.P Baillon, J.M.Dorlot, troisième édition, Montréal . Ecole Polytechnique de Montréal, p480(2000).
- [19]- Juan Asensio-Lozano*, Beatriz Suárez-Peña and George F. Vander Voort, *Effect of Processing Steps on the Mechanical Properties and Surface Appearance of 6063 Aluminium Extruded Products*, Materials 2014, 7, 4224–4242.
- [20]- K. Boulemzaoud. Mémoire de Magister, Université de Constantine, Algérie, (2012).
- [21]- L. F. Mondolfo, Aluminum Alloys: Structure and Properties, Butter worths, London (1976).
- [22]- Livre aide-mémoire en métallurgie Guy Murry 2ème édition 2004.
- [23]- M. Murayama, K. Hono, W.F. Miao et D.E. Laughlin, Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 32A, 2001, 239–246.
- [24]- M. Nicolas, Thèse de doctorat, Laboratoire de Thermodynamique et de Physico-Chimie (2002).
- [25]- Marion Fourneau, *Caractérisation et modélisation du comportement anisotrope*
- [26]- Mémoire du magister FILALI HICHEM : *Effet de vieillissement naturel et artificiel sur les propriétés mécaniques de deux tôles Al-Mg-Si*.
- [27]- mémoire master DJABRI KHAOULA : *Etude l'influence des traitements thermiques sur les propriétés des alliages Al-Mg-Si contenant différents teneur des éléments d'additions* 2016.
- [28]- Michel Dupeux, AIDE-MÉMOIRE SCIENCE DES MATÉRIAUX, Dunod, 2004.
- [29]- O.Beffort, C.Solemthaler and P.J.Uggowitzer .Mat.Sci.Eng,191(1951)121–130.
- [30]- Philippe Lours, Fabien Baillon, Au Coeur des Matériaux Cristallins" Durcissement par traitement thermique".
- [31]- R. Develay, Propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés, Techniques de l'ingénieur, (1991) Doc. M 440.
- [32]- R. Develay, Techniques de l'ingénieur, (1991) Doc. M 1290.
- [33]- R. Guemini. Mémoire de Magister, Université de Constantine, Algérie, (1981).
- [34]- Roger Develay, Propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés M440.
- [35]- Roger Develay, Traitements thermiques des alliages d'aluminium Techniques de l'ingénieur M 1290.

Reference bibliographique

- [36]- S Payan, Thèse science chimique Bordeaux ,Université de Bordeaux,p203 (2001).
- [37]- S.G.Shabestari Materials,science and EngeningA383(2004)289–298.
- [38]- S.Hamamda,A.Boubertakh and R.Guemini,Eur,phy.JAP.13(2001)167–170.
- [39]- SEB Groupe : Emaillage d'aluminium PDF
- [40]- SÉBASTIEN MORIN mémoire d'ingénieur : effet du magnésium, des traitements thermiques et de la porosité sur les propriétés mécaniques de traction et de fatigue de l'alliage sous pression a380.1 universite du quebec a chicoutimi (2002).
- [41]- Site Web Euralliage.com/6063 (AW-AlMg0,7Si)-6061(AWAlMg1SiCu).
- [42]- T. Abid, Thèse Doctorat, Université Constantine 1, Algérie, (2014).
- [43]- T. Abid, Thèse magister, Université Constantine 1, Algérie (2007) Etude et Caractérisation des Tôles en Alliages Al-Mg-Si-(Cu)
- [44]- Techniques de de l'ingénieur *Écrouissage d'alliages d'aluminium* [M230].
- [45]- thèse de doctorat Bruno BARLAS : *Etude du comportement et de l'endommagement en fatigue d'alliages d'aluminium de fonderie* (5 février 2004).
- [46]- thèse de doctorat Bruno BARLAS : *Etude du comportement et de l'endommagement en fatigue d'alliages d'aluminium de fonderie* (5 février 2004).
- [47]- thèse de doctorat Camille Flament : Etude des évolutions microstructurales sous irradiation de l'alliage d'aluminium 6061-T6 l'université grenoble alpes (7 août 2006).
- [48]- thèse de doctorat NEMOUR HANÈNE: Etude des cinétiques de précipitation, de recristallisation et du durcissement structural dans un alliage Al-Mg-Si sévèrement déformé par laminage à UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA (2017).
- [49]- thèse de doctorat YANG SHEN: *Comportement et endommagement des alliages d'aluminium 6061-T6 : Approche micromécanique* 2012.
- [50]- thèse doctorat: Guillaume WANTE: *Influence des paramètres microstructuraux sur le comportement mécanique d'alliages d'aluminium 6005A et de leurs assemblages soudés* 1999.
- [51]- US Geological Survey (Prix nominal); US Bureau of Labor Statistics (Indice de prix à la production, Métaux et produits métalliques); Traitement : CRDT-UQAC.