

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA - Béjaia

Faculté de technologie
Département de génie mécanique



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Génie des matériaux

Par :

MANSOURI ABDERRAHIM

REDOUANE NADJIM

Thème

**Caractérisation mécanique d'un alliage d'aluminium 2017A,
Effet des phénomènes de précipitation (vieillessement).**

Soutenu le : 04/07/2022 devant le jury composé de :

Pr. KHELFAOUI Youcef

Dr. AMARI Djamel

Dr. IDIR Abdelhek

Encadreur

Président

Examineur

Année universitaire : 2021 / 2022

Remerciements

Nous remercions tout d'abord le grand puissant Dieu qui m'a éclairé le chemin pour réaliser ce modeste travail.

Nos remerciements vont d'abord à mon Encadreur, Monsieur « Khelfaoui Youcef » qu'il trouve ici ma sincère reconnaissance pour sa patience, ses compétences, ses remarques et suggestions pertinentes.

Nous remercions tous les ingénieurs du les laboratoires de génie mécanique, notamment le docteur « Amari Djamel ». Qui a contribué à la réalisation de notre travail.

Sans oublié de remercier vivement tous les enseignants de département de génie mécanique.

Nous remercions également les membres de jury qui nous font honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail. Mr. Amari en tant que Président de jury, ainsi à Mr. Idir Abdelhek en tant que examinateurs.

Nous sommes également très reconnaissant à ma famille pour son soutien moral et financier et pour son sacrifice durant toutes ces années.

Enfin, on remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DÉDICACE

Dieu merci, Seigneur des Mondes. À la fin du mémoire

Je dédie ce mémoire :

A ma Chère Mère

A mon Père

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

A tous ma famille : à mes sœurs, à mes frères (lounis, abase, soufien, riad)

À tous les gens m'aiment : imad, amer, khaled, houssem, adel, bilel, ramzi,
fahem, nasro, hodna.

M.Rahim

DEDICACES

JE DÉDIÉS CE TRAVAIL À :

Source de tendresse et d'amours pour son soutien tout le long de ma vie scolaire, **ma mère**.

Mon père, qui m'a toujours soutenu et qui a fait tout possible pour m'aider.

Mes frères (Hamza, Walid), Mes sœurs, que j'aime beaucoup.

TABET Samir et ses enfants (Ayoub, Yasser, Younes, Lokman).

A ma grande famille **REDOUANE** et **BAZ**.

La famille YAHI.

Mon copain de chambre Redouane Amor.

Amis de la casa des **500**.

Mon binôme M. Rahim.

Kais, Popi, et mes cher(e)s ami(e)s.

Mes collègues du travail (DJOUDI Ahmed, BOUMAMA Houcine) et leurs familles.

R. NADJIM

Djoudjou. Red 1

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Propriétés physique de l'aluminium.....	3
Tableau I.2 : Subdivision de l'état T (traitement thermique)	9
Tableau II.1 : Composition chimique.....	18
Tableau II.2 : Composition chimique de réactif utilisé.....	22
Tableau III.1 : Paramètre et résultats de l'essai dureté Rockwell (HRB)....	30
Tableau III.2 : Les résultats de l'essai de résilience (Charpy).....	31

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Perspective.....	3
Figure I.2 : Projection.....	3
Figure I.3 : Diagramme d'équilibre d'un alliage Al-Cu entre 0% et 60% de masse de cuivre.....	7
Figure I.4 : Schéma représentatif du traitement thermique de durcissement par précipitation pour les alliages d'aluminium.....	10
Figure I.5 : Précipités cohérents.....	13
Figure I.6 : Précipités incohérents.....	13
Figure I.7 : Illustration schématique des deux types de réactions de précipitation	15
Figure II.1 : Scie électrique.....	19
Figure II.2 : Préparation l'éprouvette d'essai de dureté.....	19
Figure II.3 : La fraiseuse. (Disponible du hall de technologie)	19
Figure II.4 : Préparation de chanfrein de forme V. (disponible du hall de technologie)	20
Figure II.5 : Four électrique à chambre horizontale. (Disponible du hall de technologie) ...	21
Figure II.6 : répartition des échantillons.....	21
Figure II.7 : La polisseuse mécanique utilisée.....	22
Figure II.8 : Microscope optique (disponible du hall de technologie)	23
Figure II.9 : Machine d'essais de dureté Rockwell (disponible du hall de technologie)	24
Figure II.10 : Essai de la dureté Rockwell (bille en acier)	25
Figure II.11 : Pendule mouton Charpy (disponible du hall de technologie)	26
Figure III.1 : Micrographie optique du duralumin (Al-4%Cu) à l'état de livraison (sans traitement thermique) 400X.....	27
Figure III.2 : Micrographie optique 400X du duralumin après un traitement thermique de vieillissement à différents température pendant 2h : a) 300C°, b) 400C°, c) 500C°.....	28

LISTE DES FIGURES

- Figure III.3 :** Micrographie optique 400X du duralumin (Al-4%Cu) après un traitement de vieillissement à différents température pendant 4 heures : a) 300C°, b) 400C°, c) 500C° ...28
- Figure III.4 :** Micrographie optique 400X du duralumin (Al-4%Cu) après un traitement de vieillissement à différents température pendant 6 heures : a) 300C°, b) 400C°, c) 500C° ...29
- Figure III.5 :** Evolution des essais dureté (HRB)..... 30
- Figure III.6 :** Evolution des valeurs de la résilience (KCV) en fonction des températures de traitement thermique et des temps de maintien isotherme..... 32
- Figure III.7 :** Cycle d'un traitement thermique.....33

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I : Eléments Bibliographique

1 Introduction	2
I.1-Historique	2
I.2-Structure et propriétés de l'aluminium	2
I.2.1-Structure de l'aluminium	2
I.2.2-Les propriétés de l'aluminium	3
I.2.2.A-Propriétés physique de l'aluminium	3
I.2.2.B-Propriétés mécanique de l'aluminium	4
I.2.2.B.a. Légèreté	4
I.2.2.B.b. Résistance mécanique.....	4
I.2.2.B.c. Résistance à la corrosion.....	4
I.2.2.B.d. Recyclabilité	4
I.2.2.B.e. Le soudage	5
I.2.2.C. Conductivité thermique et électrique	5
I.2.2.D. Propriétés chimique de l'aluminium	5
I.3.Les alliages d'aluminium	6
I.3.1. Alliages de type A.GS (aluminium magnésium silicium)	6
I.3.2. Alliages de type A.SG (aluminium silicium magnésium)	6
I.3.3. Alliage de type Al /Cu (Aluminium cuivre) : se sont les alliages de la série (2000)	6
I.4.Diagramme d'équilibre des alliages Al-Cu	6
I.5.Traitement thermique	7
I.5.1. Traitement thermique d'homogénéisation	7
I.5.2. Traitement thermique d'adoucissement	8

Sommaire

I.5.3. Traitement de durcissement structural	8
I.5.4. Vieillissement thermique	10
I.5.4.1. Vieillissement naturel	11
I.5.4.2. Vieillissement artificiel	11
I.6. Les différents domaines d'utilisation	11
I.7. Généralités sur les phénomènes de précipitation	12
I.8. Précipité	13
I.8.a. Précipitation continue	14
I.8.b. La précipitation discontinue	15
I.9. Mécanismes de précipitation	15
I.9.1. La germination	16
I.9.2. La croissance	17
I.9.3. La coalescence	17
 CHAPITRE II : Matériaux et Techniques Expérimentale	
II.1 Introduction	18
II.2 Matériaux utilisés	18
II.2.1 Préparation des échantillons	18
II.3. Traitement thermique	20
II.4. Polissage des échantillons	22
II.5. Attaque chimique	22
II.6. Microscopie optique (MO)	22
II.7. Méthode de caractérisation par l'essai de dureté	23
II.7.1. Définition	23
II.7.2. Principe de l'essai	23
II.7.3. Essai de dureté Rockwell (HRB)	24
II.8. Opération d'essai de résilience	25
II.8.1. Définition	25

Sommaire

II.8.2. Mouton Charpy	25
-----------------------------	----

CHAPITRE III : Résultats et Interprétation

III.1. Introduction	27
III.2. Observation micrographique	27
III.3. Résultats des essais de dureté	30
III.4. Résultats des essais de résilience (Charpy)	31
Conclusion Générale.....	34

Introduction générale

Les alliages à base d'aluminium ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherches scientifiques. L'aluminium et ses alliages sont utilisés dans tous les domaines de l'industrie et de la vie quotidienne : construction aéronautique, automobile, ferroviaire et navale, dans le bâtiment (toitures, baies, façades...) ; dans l'industrie électrique (câbles et appareillages) et la décoration.

L'objectif de notre travail c'est de proposer le traitement de vieillissement optimal qui va nous permettre d'assurer une bonne résistance (représentée par les valeurs de dureté) tout en maintenant une ductilité appréciable qui sera représentée dans notre travail par les valeurs de la résilience en J/cm^2 qui représente la résistance à la rupture aux chocs pendant le service.

Est structuré de la manière suivante :

- ✓ Le premier chapitre concerne une étude bibliographique sur les alliages d'aluminium en générale, on se focalise sur la série 2000 (Al-Cu) (propriétés, traitement thermique...).
- ✓ Le deuxième chapitre présente le matériau et techniques expérimentales utilisées pour notre travail.
- ✓ Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus et à leurs interprétations.

En fin, nous terminons par une conclusion et les références bibliographiques.

I. Introduction :

L'aluminium est un métal brillant, blanc-argent, caractérisé par sa faible densité (env. 1/3 du fer), ses hautes conductibilités électriques thermique et sa résistance aux agents chimique.

L'aluminium est le métal le plus rependu dans la croûte terrestre, dont il constitue environ 7,3% [1].

I.1-Historique :

L'aluminium a commencé à être utilisé industriellement que depuis la fin du 19^{ème} siècle. Il a fallu attendre 1825 pour que Hans Christian Oersted obtienne l'aluminium à l'état de corps simple sous forme d'une poudre grise contenant encore une très grande quantité d'impuretés. Ce n'est qu'en 1854 qu'Henri Saint Claire Deville présente le premier lingot d'aluminium obtenu à l'état fondu, par un procédé mis en application en 1859 de façon industrielle par Hyry Merle dans son usine de Salindres (Gard). Mais ce procédé était compliqué ce qui donnait un métal très cher, réservé à des utilisations dans le luxe.

La production de l'aluminium a connu en 100 ans, une croissance prodigieuse le mettant au premier rang des métaux non ferreux et au deuxième de tous les métaux, derrière le fer [1].

I.2-Structure et propriétés de l'aluminium :

I.2.1-Structure de l'aluminium :

La structure de l'aluminium émane de celle du CFC, c'est-à-dire cubique à faces centrées.

Le CFC correspond donc à la maille présentée en figure I.1 qui montre la structure en perspective :

De plus, pour simplifier schématisation, cette maille peut être réalisée en projection afin de faciliter la lecture, et donc se « dessine » sous la forme d'un cube, représentée en figure I.2 [2].

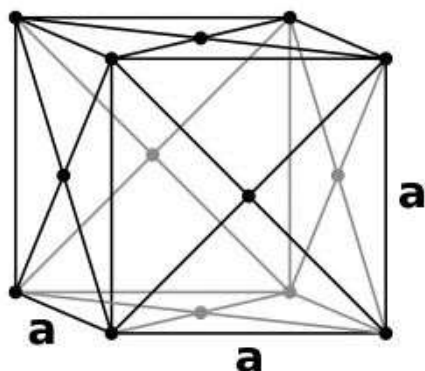


Figure I.1 : Perspective

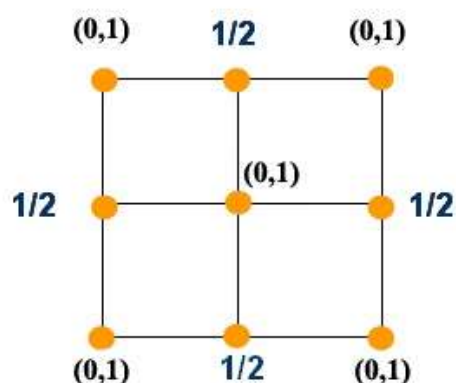


Figure I.2 : Projection

I.2.2-Les propriétés de l'aluminium :

I.2.2.A-Propriétés physique de l'aluminium :

L'aluminium est un élément métallique, ductile très malléable, parmi les métaux les plus abondants dans la croûte terrestre.

Tableau I.1 : Propriétés physique de l'aluminium.

<i>Propriétés</i>	<i>Valeur</i>
Structure cristalline	Cubique à face centré
Masse atomique	26,9815 g/mol
Paramètre de maille (à 298.15°K)	4.05 Å
Point de fusion	660.45°C
Point ébullition	2467°C
Capacité thermique massique C_P (à 298.15°K)	897 J kg ⁻¹ k ⁻¹
Conductivité thermique ($\bar{\lambda}$ à 298.15K)	237 W m ⁻¹ k ⁻¹
Résistivité électrique Γ (à 298.15 K)	26.54810 ⁻⁹ Γ m
Conductivité thermique à 20 °C:	$\lambda = 217.6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Module d'élasticité (MPa)	68 000
Charge de rupture (MPa)	80 à 100
Limite d'élasticité 0.2% (MPa)	30 à 40
A_R (%)	25 à 30

I.2.2.B-Propriétés mécanique de l'aluminium :

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

I.2.2.B.a. Légèreté

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

I.2.2.B.b. Résistance mécanique

Si les caractéristiques de l'aluminium pur sont faibles, comme pratiquement celles de tous les métaux purs, la gamme d'alliage très étendue permet de trouver celui qui correspond aux contraintes d'utilisation envisagée. En effet, les alliages les plus résistants peuvent avoir une charge de rupture supérieure à 700 MPa, donc largement équivalente à celles des aciers trempés.

I.2.2.B.c. Résistance à la corrosion

L'aluminium génère naturellement une couche d'oxyde qui le protège de la corrosion. Différents types de traitement de surface peuvent encore améliorer cette résistance (anodisation).

Anodisation : action de recouvrir une surface métallique d'un revêtement de protection en oxyde (par électrolyse).

I.2.2.B.d. Recyclabilité

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

I.2.2.B.e. Le soudage :

Le soudage est facile si l'on tient compte de la présence de la couche protectrice d'alumine. Les procédés sont donc des procédés sous gaz protecteur (TIG, MIG) ou sous vide (faisceaux d'électrons). Mais s'il n'y a pas de difficulté pour les alliages non trempant, par contre des problèmes peuvent exister pour les alliages trempant ayant une vitesse de trempe élevée (série 2000 ou Al-Cu). Il peut également exister des dangers de corrosion feuilletant après soudage d'alliages de la série 7000 ou Al-Zn.

I.2.2.C. Conductivité thermique et électrique :

L'aluminium est un excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité, puisqu'il se place immédiatement après le cuivre dans les métaux communs avec une résistivité électrique de $2.92 \cdot 10^{-8} \Omega.m$. Les éléments d'addition ont une influence importante sur sa conductivité électrique. Pour le 2017A, la résistivité électrique est multipliée quasiment par deux ($5.1 \cdot 10^{-8} \Omega.m$) ce qui diminue considérablement sa conductivité électrique.

La conductivité thermique de l'aluminium est utilisée dans de nombreuses applications d'évacuation de la chaleur, c'est-à-dire de refroidissement (comme les systèmes d'air conditionné dans les véhicules).et pour un aluminium pur la température de fusion est de $660,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Elle varie entre 560°C et 640°C pour le 2017A.

I.2.2.D. Propriétés chimique de l'aluminium :

À la température ambiante, l'aluminium forme très vite une couche d'oxyde Al_2O_3 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(Al_2O_3) mais poreuse. 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 [3].

I.3. Les alliages d'aluminium :

I.3.1. Alliages de type A.GS (aluminium magnésium silicium) :

Ces alliages ont une teneur en magnésium (0.35-1%) supérieure à celle du silicium (0.25-0.8%). Il n'y a donc pratiquement pas d'excès de silicium par rapport à Mg_2Si . Les alliages représentatifs sont l'alliage 6060 qui peut être filé à de très grandes vitesses (140 m.min^{-1}) et l'alliage 6061 qui a de meilleures propriétés mécaniques (additions de Cu et Cr) et la meilleure résistance à la corrosion des alliages trempant. Une série d'alliages de cette famille est utilisée pour le transport de l'énergie électrique. C'est principalement la nuance AGS/L76, avec 0.55-0.80 Mg, 0.45-0.65 Si, Fe <0.3 et les autres impuretés limitées au maximum, qui est utilisée.

I.3.2. Alliages de type A.SG (aluminium silicium magnésium) :

Dans ces alliages, il y a une teneur en silicium supérieure à celle en magnésium, et le niveau de résistance mécanique est atteint grâce à Mg_2Si et à Si. Des additions de chrome, de manganèse peuvent améliorer la résistance à la rupture fragile.

Les principaux alliages normalisés sont l'alliage 6005 A (A-SG 0.5), 6081 (A-SGM 0.3) ou 6082 (A-SGM 0.7) [4].

I.3.3. Alliage de type Al /Cu (Aluminium cuivre) : se sont les alliages de la série (2000) :

Les alliages de la série 2000, à durcissement structural, forment une gamme importante d'alliages se caractérisant par :

- Une bonne tenue à chaud.
- Une résistance à la corrosion relativement faible en atmosphère corrosive.
- Une bonne stabilité thermique des caractéristiques mécaniques.

I.4. Diagramme d'équilibre des alliages Al-Cu :

Le diagramme de phases Al-Cu est donné dans la figure suivante. Il nous indique qu'entre 500°C et 550°C , l'alliage Al-4%Cu est monophasé : le cuivre fait dans l'aluminium une solution solide désordonnée de substitution.

En dessous de 500°C l'alliage devient biphasé $\alpha + \text{Al}_2\text{Cu}$. Au fur et à mesure que la température diminue, la proportion de Al_2Cu augmente. A la température ambiante, les proportions d'équilibre sont de 93% de phase α et de 7% de Al_2Cu .

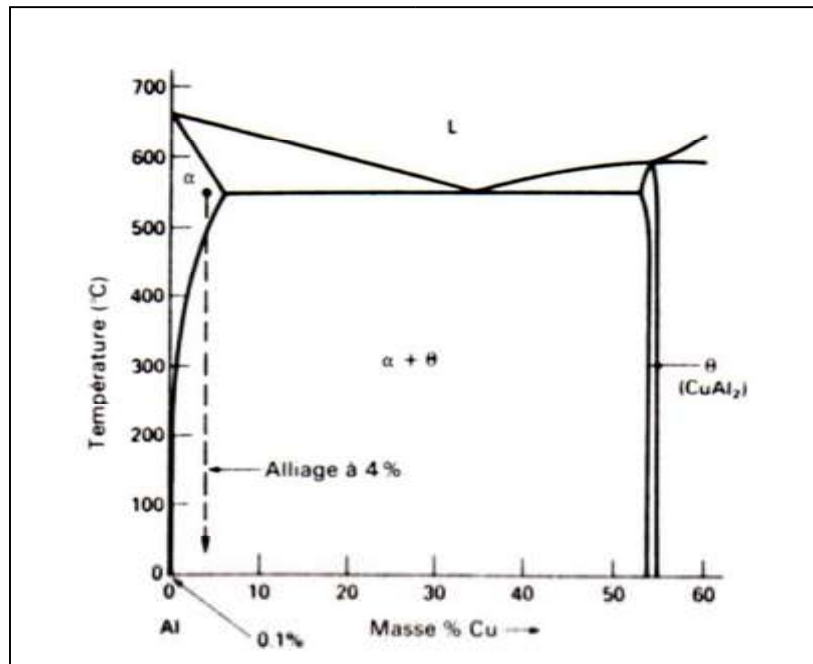


Figure I.3 : Diagramme d'équilibre d'un alliage Al-Cu entre 0% et 60% de masse de cuivre [5].

I.5. Traitement thermique :

Certains alliages d'aluminium peuvent recevoir un traitement thermique permettant une amélioration des propriétés mécaniques (résistance à la traction, dureté...etc.).

En général, les traitements thermiques en métallurgie sont : l'homogénéisation, l'adoucissement et le durcissement structural et le vieillissement.

I.5.1. Traitement thermique d'homogénéisation :

Ce sont des traitements comportant un chauffage à des températures relativement élevées appliqués à certains produits bruts de fonderie et corroyés, et destinés le plus souvent à en faciliter la transformation à chaud ou à froid (filage, étirage, laminage, forgeage). Ils consistent en général en des maintiens de 6 à 48 heures à des températures

allant de 450° C à 610° C, qui ont pour but de dissoudre les phases métalliques en excès et de réaliser une homogénéisation de la composition de la solution solide [6].

I.5.2. Traitement thermique d'adoucissement :

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

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

- Le traitement de restauration est effectué à 200-300°C pendant une à 8 heures ; la structure ne se modifie pas, pourtant les caractéristiques mécaniques évoluent d'autant plus que la température est plus élevée et le temps de maintien est plus long. Au niveau atomique il n'y a qu'une réorganisation des dislocations engendrées par l'écrouissage : certains s'annihilent, d'autre se réarrangent au joint et sous joints de grains d'où la malléabilité de l'alliage.
- Le traitement de recristallisation est effectué à 300-400°C pendant 0.5 à 3 heures ; les atomes se regroupent suivant des nouvelles directions pour former un petit cristal d'orientation quelconque. Avec le temps de nouveaux atomes viennent s'agglutiner autour du petit cristal jusqu'à ce que les nouveaux grains se rejoignent pour donner la structure macrographique de recristallisation primaire. Si l'on augmente la température ou la durée de maintien, on obtient des structures de recristallisation secondaire à très gros grains. Au contraire, Si l'on stoppe ce traitement de recuit par un temps trop court, on obtient des états partiellement recristallisés.

Dans le cas de la trempe structurale, c'est un recuit de précipitation qui consiste en un chauffage assez prolongé à température comprise entre la température de revenu et la température de mise en solution d'un produit trempé et mûri ou revenu dans le but d'obtenir un adoucissement relativement important par évolution des précipités provenant des constituants de l'alliage [7].

I.5.3. Traitement de durcissement structural :

Le principe du durcissement structural est basé sur la précipitation, c'est-à-dire la diminution de la solubilité d'élément d'alliage avec la température. L'élément d'alliage cuivre permet, lors des processus thermomécaniques, la précipitation de phases appelées phases durcissantes, à l'origine des bonnes propriétés mécaniques.

Le phénomène de « durcissement structural », découvert en 1906 par Wilm [8], dans le cas des alliages légers, a abouti au premier alliage industriel, le duralumin en 1916 (l'alliage 2017A). Il existe de nombreux protocoles de traitement thermique, désigné par la lettre T dans la nomenclature des alliages (T1 à T10). Le tableau (I.2) résume les différents traitements thermomécaniques et leurs désignations [9].

Tableau I.2 : Subdivision de l'état T (traitement thermique) [9].

T1	Refroidi après transformation à chaud et mûri
T2	Refroidi après transformation à chaud, écroui et mûri
T3	Mise en solution, écroui et mûri
T4	Mise en solution et mûri
T5	Refroidi après transformation à chaud et mûri
T6	Mise en solution puis revenu
T7	Mise en solution puis sur revenu
T8	Mise en solution, écroui puis revenu
T9	Mise en solution, revenu puis écroui et mûri
T10	Ecroui après refroidissement et transformation à chaud et mûri

Le traitement thermique de durcissement structural comporte les étapes suivantes :

- **Mise en solution** : Consiste à porter l'alliage à une température supérieure à la température de solvus de manière à ce que tous les atomes de soluté (éléments d'alliages et d'addition) se retrouvent en solution [10].
- **Trempe** : La trempe est le traitement consécutif à la mise en solution. Le but de la trempe est d'annuler la précipitation lors du refroidissement de la température de traitement en solution élevée à la température ambiante [11]. Ce résultat est obtenu grâce à un refroidissement à l'eau froide, à l'air ou à l'huile [12].
- **Maturation** : est le maintien, après la trempe, à température ambiante ou inférieure. Cette étape permet une décomposition lente de la solution solide sursaturée et la formation de petits amas d'atomes de soluté, les zones de « Guinier-Preston » ou GP.

- **Revenu** : est un chauffage ultérieur à des températures inférieures aux températures de mise en solution, typiquement de l'ordre de 100°C à 200°C. Cette étape permet d'accélérer les phénomènes de décomposition de la solution solide sursaturée et donc la précipitation, responsable du durcissement de l'alliage [13].

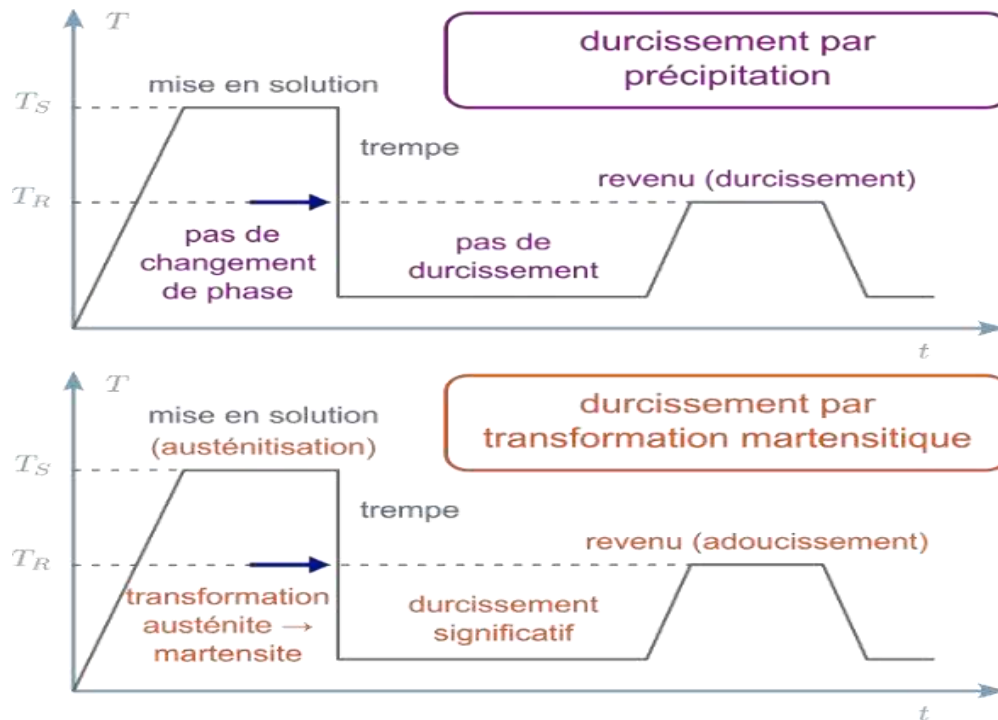


Figure I.4 : Schéma représentatif du traitement thermique de durcissement par précipitation pour les alliages d'aluminium [14].

I.5.4. Vieillissement thermique :

Le terme vieillissement désigne l'évolution (généralement défavorable) des propriétés d'un matériau au cours du temps par interaction en volume avec un facteur physique environnant, bien que la distinction soit parfois difficile, le terme de corrosion désigne plus spécifiquement une dégradation et/ ou une perte de matière par réaction chimique du matériau avec son environnement, réaction qui se produit en surface de la pièce considérée. L'usure est une perte de matière d'origine mécanique, consécutive au mouvement relatif de deux surfaces solides en contact.

L'évolution des propriétés mécaniques d'un métal écroui soumis à une température supérieure ou égale à environ 0.5 T fusion par restauration ou recristallisation constitue un exemple typique de vieillissement thermique.

I.5.4.1. Vieillessement naturel :

Les alliages traités thermiquement voient leurs propriétés changées une fois revenus à la température ambiante après leur traitement thermique. Ceci est appelé vieillissement naturel, Le taux de vieillissement change selon le type d'alliage et également dans un type d'alliage,

De sorte que le vieillissement naturel est stable pouvant durer de quelques jours jusqu'à plusieurs années.

Certains alliages de la série 6000 qui sont durcissant et peuvent atteindre une dureté maximale après un mois à la température ambiante.

I.5.4.2. Vieillessement artificiel :

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 2000) Pendant le vieillissement artificiel à une température donnée, la dureté augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale après un temps de maintien donné [15].

I.6. Les différents domaines d'utilisation :

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

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

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

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

Le bâtiment : Facilement malléable et résistant en alliages, l'aluminium permet de réaliser des formes complexes dans une gamme étendue de coloris. Il est donc très apprécié en architecture moderne et ne nécessite que très peu d'entretien. Ces atouts en font un matériau polyvalent utilisé dans tous types de bâtiments, il entre par exemple dans la composition des structures vitrées, des cloisons, des portes, des gouttières...

L'électricité : L'aluminium est particulièrement apprécié dans ce domaine grâce à sa conductivité électrique élevée, son absence de magnétisme et son inertie chimique. L'aluminium a remplacé le cuivre dans les lignes à haute tension et est aujourd'hui la manière la plus économique de transmettre l'énergie électrique. Depuis les années 50 l'aluminium a pratiquement remplacé le laiton comme base standard pour l'ampoule électrique. Des milliers d'antennes de télévision et beaucoup d'antennes paraboliques sont également faites d'aluminium.

L'alimentation : L'emballage en aluminium est largement répandu du fait de son faible coût de production, sa légèreté et son caractère isolant. Une mince feuille d'aluminium (0.1 mm environ) suffit à isoler le produit du monde extérieur : Imperméabilité à la lumière, à l'air, aux rayons ultraviolets, à la vapeur d'eau, à l'oxygène et aux micro-organismes. Autant de facteurs pouvant diminuer la durée de conservation des aliments. En outre, la résistance à la corrosion et la stabilité métallurgique de l'aluminium le protège des détériorations infligées par certains produits. L'exemple majeur de l'emballage en aluminium est la canette, elle n'altère nullement le goût des aliments, robuste, légère et recyclable, elle est le type d'emballage le plus répandu pour les boissons. Prudence néanmoins, plusieurs études scientifiques ont démontré que l'aluminium n'est pas éliminé par l'organisme, à forte dose il a un effet néfaste sur le système nerveux et le tissu osseux. Dans l'alimentation les doses ingérées sont jugées négligeables, néanmoins son utilisation comme conduite d'eau est prohibée [2].

I.7.Généralités sur les phénomènes de précipitation :

Pour améliorer les propriétés mécaniques d'un métal pur [16], le métallurgiste dispose de plusieurs méthodes qui toutes consistent à créer des obstacles à l'intérieur du métal qui s'opposeront à la création de nouvelles dislocations ou au déplacement des dislocations existantes.

Dans la plupart des solutions solides métalliques, la solubilité limite diminue avec la température. Il en résulte qu'un alliage, dont l'état d'équilibre correspond à un système monophasé à une température déterminée, peut devenir biphasé à des températures plus basses [17]. Ce processus qui correspond à une transformation à l'état solide avec augmentation du nombre de phases, est habituellement désigné par le terme de précipitation. Les phénomènes de précipitation revêtent dans les solutions solides métalliques une importance pratique considérable, car ils modifient profondément les propriétés parfois dans un sens favorable.

Donc en général le phénomène de précipitation consiste en la décomposition d'une solution solide sursaturée (phase homogène possédant au moins deux constituants) en un mélange de deux phases de composition différente [18].

I.8.Précipité :

C'est la formation d'une phase dispersée hétérogène dans une phase majoritaire. En général les précipités se localisent aux joints de grains, et au cœur des grains quand ils sont plus nombreux. la formation d'un précipité est dit précipitation.

- Rôle des précipités :
 - ✓ Ils créent des distorsions d'autant plus importantes que le précipité est gros.
 - ✓ Ils bloquent le glissement des dislocations (obstacles sur le plan de glissement), d'où un durcissement du matériau [19].
- Type des précipités :
 - ✓ **Les précipités cohérents** (figure I.5) possèdent les mêmes orientations cristallines que le cristal de base.
 - ✓ **Les précipités incohérents** (figure I.6) ne présentent aucune relation d'orientation entre leur réseau et celui du grain dans lequel ils ont germés.

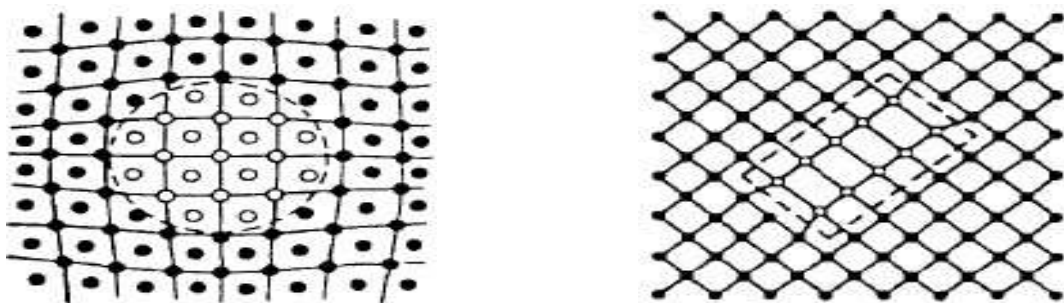


Figure I.5 : Précipités cohérents

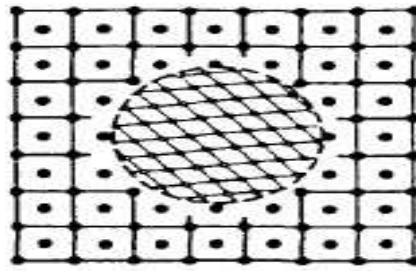


Figure I.6 : Précipités incohérents

La précipitation dans les solutions solides qui est basée sur les phénomènes de diffusion est généralement classée en deux catégories principales : Précipitation homogène « continue » et hétérogène « discontinue » [20].

I.8.a. Précipitation continue :

La précipitation continue (Figure.I.7. a) résulte des mécanismes mettant en jeu simultanément, tout au long de la transformation, l'ensemble des atomes concernés ; une des caractéristiques de la transformation continue et la variation continue du paramètre de réseau de la phase mère durant le vieillissement [21]. La précipitation continue est caractérisée par une croissance relativement lente des cristaux β individuels, les cristaux de la matrice conservent leur structure, mais leur concentration change continuellement.

La précipitation est continue lorsque la saturation des cristaux mixtes métastables est faible. Elle est appelée aussi précipitation localisée ou hétérogène. D'où la solution solide sursaturée commence à s'appauvrir d'une manière continue aléatoire et théoriquement homogène dans toute la matrice. On observe alors un seul paramètre du réseau dont l'évolution sera continue. Parfois la précipitation continue apparaît principalement dans les Joints de grains et les plans de glissement.

De fait, pratiquement toute précipitation en milieu solide est hétérogène : la germination se fait presque toujours sur des défauts du réseau cristallin, que ces défauts soient ponctuels (par exemple les lacunes), linéaires (dislocations), ou planaires (joints de grains, interfaces de précipités existants). Par la suite nous appellerons par convention précipitation homogène la précipitation qui ne garde pas de trace des défauts sur lesquels elle a germé [22].

I.8.b. La précipitation discontinue :

La précipitation est dite discontinue (Figure.I.7. b) lorsqu'au cours de la transformation il y a l'apparition de deux régions :

- ✓ Une où la transformation est complète,
- ✓ Et l'autre où la solution solide est encore sursaturée.

La transformation s'amorce en général sur les joints de grains en développant des cellules (d'où l'appellation précipitation cellulaire). Lors de cette précipitation le paramètre de la maille varie d'une manière discontinue avec deux valeurs distinctes.

Dans le cas de la précipitation hétérogène, le produit de la réaction ne se forme qu'en certains sites ; parfois on confond la précipitation hétérogène et la précipitation discontinue qui n'en est en fait qu'un cas particulier [4].

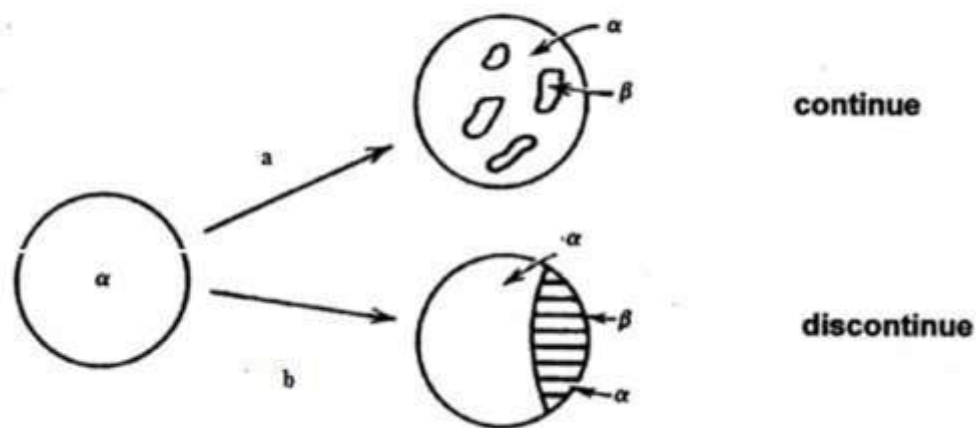


Figure I.7 : Illustration schématique des deux types de réactions de précipitation [23].

I.9.Mécanismes de précipitation :

La science des matériaux et en particulier la métallurgie s'intéresse à deux phénomènes :

- ✓ La formation des premiers cristaux lors de la solidification.
- ✓ La formation d'une nouvelle phase solide.

Dans ces deux cas, la formation de la phase hétérogène (précipité) se fait en deux étapes :

- ✓ Germination désigné aussi par nucléation.
- ✓ Croissance (augmentation de la taille des domaines de la nouvelle phase).

Après la croissance des précipités, les précipités peuvent continuer d'évoluer par coalescence (fusion des petits précipités pour créer de plus gros) [19].

I.9.1. La germination :

La germination est l'étape initiale de la précipitation, suppose la formation, à partir de la matrice, de germes stables, riches en soluté et dotés d'une interface définie avec la matrice.

La germination semble se faire au hasard et être due aux fluctuations naturelles de concentration de la phase mère.

On distingue deux types de germination :

- **La germination homogène** : qui ne peut théoriquement exister que dans un cristal parfait. Les germes peuvent résulter de fluctuations statistiques de composition de taille suffisante (de l'ordre du nanomètre) au sein de la solution solide avec une cinétique de formation très rapide en présence de lacunes en sursaturation. La variation d'énergie libre associée à la formation d'un germe s'écrit sous la forme

Suivante :

$$\Delta G = \Delta G_v + \Delta G_s + \Delta G_p$$

Où : ΔG_v : la variation d'enthalpie libre volumique.

ΔG_s : la variation d'enthalpie libre superficielle.

ΔG_p : la variation d'enthalpie plastique.

Le terme ΔG_p est négligeable en première approximation vu sa faible contribution au premier stade de la germination (germe de très petite dimension).

Les deux autres termes de variations d'enthalpie libres sont étroitement liés aux dimensions du germe.

- **La germination hétérogène** : la germination démarre presque toujours sur des hétérogénéités de la phase mère qui abaissent l'enthalpie libre de formation des germes en réduisant, soit l'énergie superficielle, soit l'énergie de déformation, soit les deux. Ces imperfections peuvent être les joints de grains, les surfaces de polygonisation, les dislocations isolées, les défauts d'empilement et les défauts ponctuels [24].

I.9.2. La croissance :

La différence entre le réseau cristallin de la matrice et celui du précipité, provoque d'un changement de volume qui a pour conséquence une déformation élastique dans l'une ou l'autre des deux phases. L'apparition d'une surface entre le précipité et la matrice entraîne une différence entre les énergies de liaison atomique dans deux milieux en cet endroit qui donne l'énergie d'interface. Ces deux termes énergétiques (énergie de déformation et énergie d'interface) jouent un rôle important sur le type d'interface séparant le germe de la phase mère, et sur la forme du précipité.

I.9.3. La coalescence :

A la fin de la croissance, les proportions de phase dans un alliage polyphasé tendent vers les rapports prévus par le diagramme d'équilibre. La croissance des gros précipités se fait au détriment de plus petits qui finissent par disparaître. Ce phénomène est expliqué comme suit : au voisinage des petits précipités qui sont plus dispersés, la concentration des atomes de soluté est plus grande que celle dans le volume adhérent aux grosses particules. Cette différence en concentration confirme que les atomes de soluté diffusent depuis la surface de séparation des particules fines vers la surface de séparation des grosses particules. Et les atomes du composant de diffusion de base de la grosse particule à la particule fine. Une telle distribution des composants de diffusion s'effectue près des gros cristaux de la seconde phase la solution solide alpha devient sursaturée, ce qui conduit à leur croissance. Ce phénomène est appelé coalescence. Par contre, au voisinage des particules plus dispersées, la solution solide devient pauvre et les particules se dissolvent [25].

II.1 Introduction :

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

L'objectif de notre travail est d'étudier l'évolution des caractérisations engendré par les phénomènes de précipitation dans ce type d'alliage d'aluminium (2017A) après des traitements thermiques de vieillissement pour avoir une idée claire sur le comportement du matériau pendant son exploitation en fonction du temps.

II.2 Matériaux utilisés :

Le matériau étudié est un alliage d'aluminium type (2017A) dont la composition chimique et donné dans le tableau suivant :

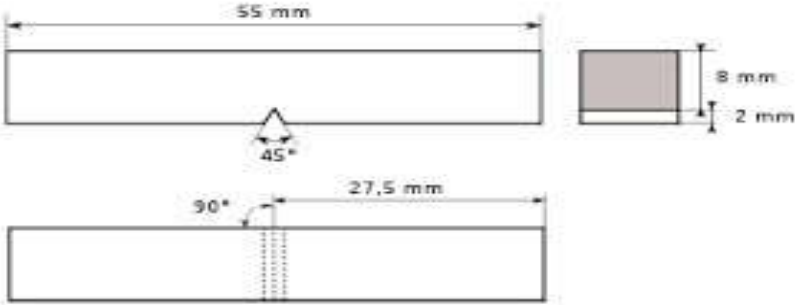
Tableau II.1 : Composition chimique du matériau étudié.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.2à0.8	Max 0.7	3.5à4.5	0.4à1.0	0.40à1.0	0.1	0.25		Solde

II.2.1 Préparation des échantillons :

Les échantillons utilisés dans notre travail, ont été usinés au niveau du hall de technologie à l'aide d'une scie électrique pour la découpe et une fraiseuse pour l'usinage des éprouvettes de résilience :(figure II.1)

- ✓ Des échantillons sous forme cylindrique.
- ✓ Des échantillons de petit diamètre (20 mm) ont été coupés par 1cm à partir du début des barres afin de tester la dureté. (Figure II.2)
- ✓ Des éprouvettes normalisées, pour l'essai de résilience, ont été usinés au niveau du hall de technologie par une fraiseuse Universelle pour réaliser les opérations de fraisage avec vitesse de 355mm/min. (figure II.3)
- ✓ Etape de chanfrein : On trace un angle de 45° sur la longueur de l'éprouvette et de 2mm de profondeur pour créer un chanfrein en V. (figure II.4)



Eprouvette de résilience.



Figure II.1 : Scie électrique.



Figure II.2 : préparation l'éprouvette d'essai de dureté.



Figure II.3 : La fraiseuse. (Disponible au hall de technologie)



Figure II.4 : Préparation de chanfrein de forme V. (disponible au hall de technologie)

II.3. Traitement thermique :

Les traitements thermiques ont été effectués dans un four électrique. Les éprouvettes ont subi les traitements thermiques avec une vitesse de chauffage de $30^{\circ}\text{C}/\text{min}$, dont on peut choisir la vitesse de chauffage (montée de température) la température et le temps de maintien du

chauffage à l'aide d'un programme. La régulation de la température et de la vitesse de chauffage est assurée par un régulateur électronique (figure.II.5). Les échantillons ont subi lors du traitement thermique un chauffage a trois températures (300°C, 400°C et 500°C) pendant 2h, 4h et 6h. Après avoir effectué le traitement, nous avons répartis les échantillons en refroidissement à l'air vieillissement à l'air.

Cette étude permet de montrer le temps de maintien de vieillissement optimal qui améliore les caractéristiques mécaniques et le durcissement structural des alliages Al-Cu eutectiques.



Figure II.5 : Four électrique. (Disponible au hall de technologie).

t= 2h, 4h et 6h

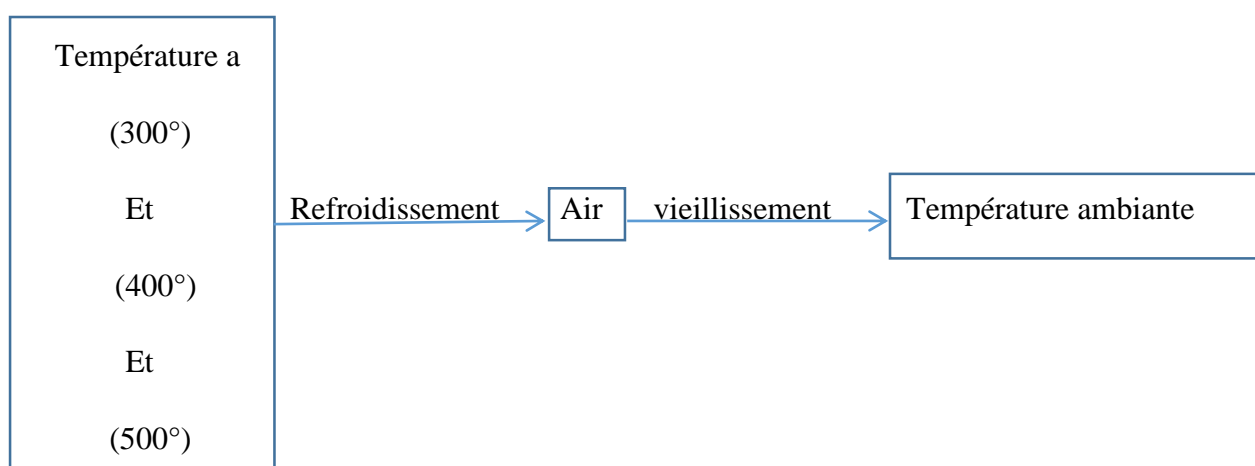


Figure II.6 : répartition des échantillons.

II.4. Polissage des échantillons :

Les échantillons subissent un polissage en utilisant des papiers émeri de granulométrie. On a utilisé les papiers de grade (320) jusqu'au grade (2000), placés sur un disque rotatif. Le polissage de finition est un polissage à la pâte diamantée ($0,32 \mu\text{m}$) soluble dans l'eau, a été utilisé.



Figure II.7. La polisseuse mécanique utilisée.

II.5. Attaque chimique :

L'observation des échantillons en microscope optique nécessite une attaque chimique pour révéler sa structure, on utilise un réactif de Keller dont sa composition est la suivante :

Tableau.II.2 : composition chimique de réactif utilisé.

Elément	NaOH	H ₂ O (distillée)
Quantité	10 g	100 ml

II.6. Microscopie optique (MO) :

Le microscope optique est utilisé pour déterminer et observer l'échantillon microscopique (forme des grains, des précipités, etc.), ainsi que l'évolution de la structure microscopique de l'alliage après avoir subi un traitement thermique. Les microscopes optiques métallographiques permettent l'observation par réflexion d'une surface métallique parfaitement plane.

Pour l'observation de l'AU4G a été réalisée à l'aide d'un microscope optique de type « ZEISS » (Figure II.8), alimenté par une tension de 220V avec une fréquence de 50Hz et une puissance De 100W, Muni d'un appareil photo automatique ayant un pouvoir de résolution allant 50 à 400 fois.



Figure II.8. Microscope optique (disponible au hall de technologie).

II.7. Méthode de caractérisation par l'essai de dureté :

II.7.1. Définition :

La dureté est une propriété très importante dans la caractérisation mécanique des matériaux solide, qui exprime la résistance d'un matériau soumis à une déformation plastique localisée.

Les méthodes de mesure de la dureté sont basées sur la pénétration forcée d'un indenteur à la surface d'un matériau.

II.7.2. Principe de l'essai :

Un pénétrateur, de formes différentes suffisamment dures pour ne pas être déformé par le matériau à essayer entre de force dans la surface de la pièce, les conditions de charge et de vitesse d'application étant contrôlées. La profondeur ou dimension de l'empreinte résultante est mesurée et rapportée à un nombre de dureté.

Les essais de dureté sont relativement économiques pour les raisons suivantes : L'appareillage de l'essai est relativement peu cher ; il n'est pas nécessaire d'utiliser une éprouvette spéciale ; l'essai est non destructif la déformation de l'éprouvette n'est qu'une simple indentation. Les essais les plus courants sont les essais de dureté **Brinell**, **Vickers** et **Rockwell**. Dans notre travail en a réalisé type essai de dureté Rockwell (HRB), (Figure II.9).



Figure II.9. Machine d'essais de dureté Rockwell (disponible au hall de technologie).

II.7.3. Essai de dureté Rockwell (HRB) :

Le pénétrateur est soit une bille en acier (diamètre $D=1.5875$ ou 3.175mm) soit un cône à 120° avec pointe en diamant de rayon 0.2 mm . L'essai se déroule de la manière suivante (figure II.10) :

- Application sur le pénétrateur d'une charge initiale $F_0=981\text{N}$ (100kg), appelé généralement pré charge. Elle permet de « faire le zéro » en fixant la profondeur de mesure de référence, h_0 .
- La surcharge de mesure, F est alors appliquée.
- Après un temps (15 à 30 s), selon le solide. La charge F est retirée et la profondeur de pénétration de l'indenteur, h' , avec la pré charge F_0 maintenue, est mesurée.

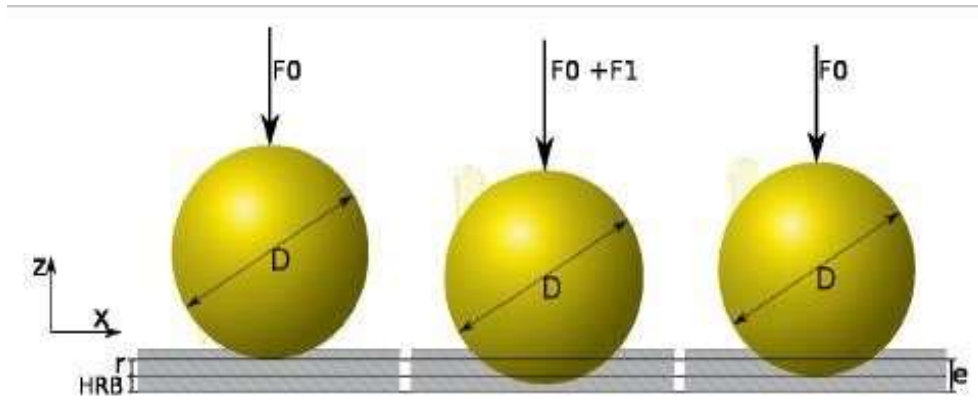


Figure II.10. Essai de la dureté Rockwell (bille en acier).

II.8. Opération d'essai de résilience :

II.8.1. Définition :

La résilience est l'énergie en (Joule/Cm²) nécessaire pour produire la rupture d'une éprouvette placée sur deux appuis.

$$K = W/S \text{ (J/Cm}^2\text{)}$$

K : La résilience.

W : Energie d'impact absorbée.

S : Section à l'entaille de l'éprouvette.

Les essais de résilience permettent de caractériser la fragilisation d'un matériau. Ils consistent à rompre une éprouvette entaillée à la forme d'une barre à section transversale carrée, pour but de mesurer la résistance d'un matériau à la rupture sous l'action d'un choc.

II.8.2. Mouton Charpy :

L'essai de résilience Charpy sur éprouvette avec entaille en V étant le plus couramment utilisé.

La charge résulte d'un choc causé par un mouton pendule libéré d'une position armée à une hauteur fixe (h). L'éprouvette est placée au bas de l'appareil, comme le montre la (figure II.11). Après la libération du mouton pendule, un couteau monté sur celui-ci vient frapper l'éprouvette et la rompt à l'entaille. Le pendule poursuit son mouvement et s'élève à une hauteur maximale

(h'), inférieure à (h). L'énergie absorbée, calculée à partir de la différence entre (h) et (h'), équivaut à l'énergie de rupture.

Donc, l'énergie (W) dépensée pour rompre l'éprouvette vaut :

$$W = W_h - W_{h'} = P (h - h') = mg (h - h')$$

Ou : (m) la masse de marteau en kg, (g) l'accélération de la pesanteur en m/s², (h et h') hauteurs de départ et d'arrivée du marteau.



Figure II.11. Pendule mouton Charpy (disponible au hall de technologie).

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous avons représentés les résultats expérimentaux obtenus pour les différentes techniques expérimentales utilisées dans notre travail telles que l'observation micrographique des pièces au microscope optique, les résultats de la résilience (Essai Charpy) sous forme des tableaux et des histogrammes, et les mesures de duretés des différents échantillons élaborés et traités à différentes températures pour voir l'effet du vieillissement sur les propriétés mécaniques de notre matériau de travail en l'occurrence le duralumin.

III.2. Observation micrographique :

Les micrographies représentées ci-dessous ont été réalisées sur les surfaces polies des différents échantillons à l'aide d'un microscope optique.



Figure III.1 : Micrographie optique du duralumin (Al-4%Cu) à l'état de livraison (sans traitement thermique) 400X.



(a)



(b)

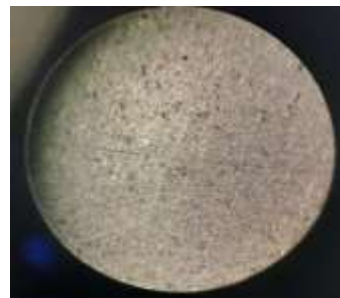


(c)

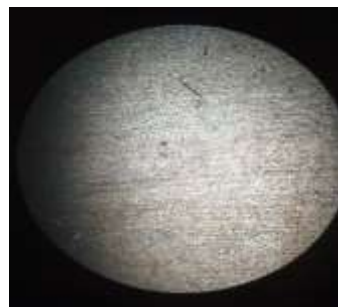
Figure III.2 : Micrographie optique 400X du duralumin après un traitement thermique de vieillissement à différents température pendant 2h : **a)** 300C°, **b)** 400C°, **c)** 500C°.



(a)



(b)



(c)

Figure III.3 : Micrographie optique 400X du duralumin (Al-4%Cu) après un traitement de vieillissement à différents température pendant 4 heures : **a)** 300C°, **b)** 400C°, **c)** 500C°.

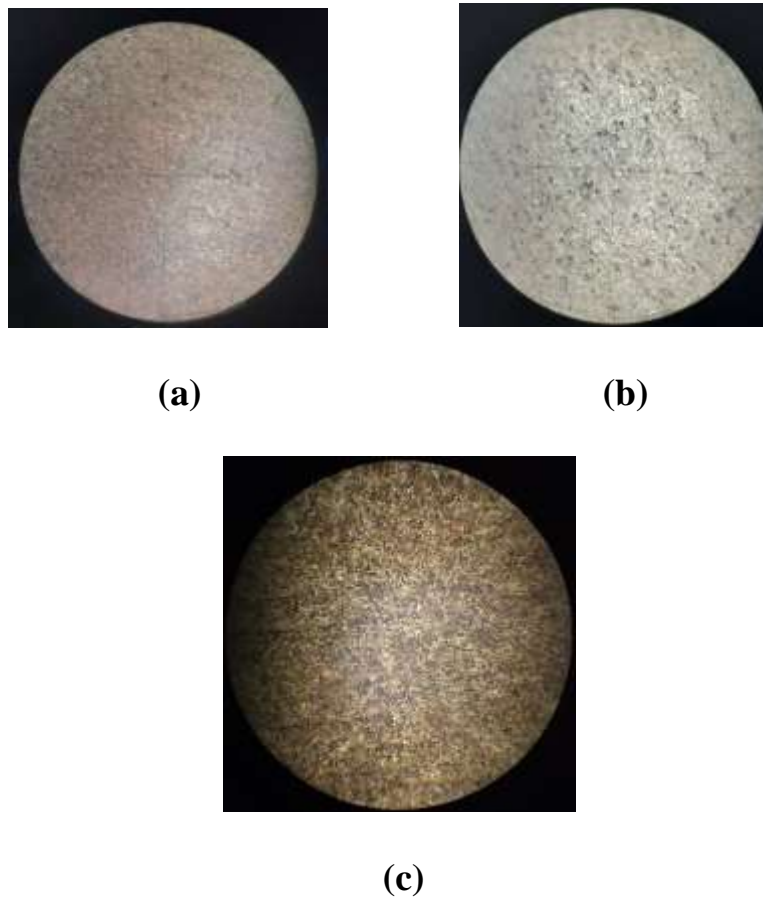


Figure III.4 : micrographie optique 400X du duralumin (Al-4%Cu) après un traitement de vieillissement à différents température pendant 6 heures : **a)** 300C°, **b)** 400C°, **c)** 500C°.

L'observation des micrographies des différents échantillons révèle des microstructures avec des grains de formes à circulaires en présence de précipité finement dispersés.

Après analyse de ces micrographies on constate que le nombre de particule des précipités augmente d'une part avec l'augmentation du temps de maintien et d'autre part avec l'augmentation de la température.

Effet donné que notre matériau c'est du duralumin (Al-4%Cu), on peut faire correspondre ces précipités aux particules Al_2Cu au zone de « Guinier-Preston ».

Il s'agit bien du phénomène de vieillissement de cette famille d'alliage. Et ces phénomènes de vieillissement améliorent les propriétés mécaniques du duralumin.

III.3. Résultats des essais de dureté :

Après les observations au microscope optique, nous avons fait subir à nos échantillons des tests de dureté HRB avec les paramètres suivants :

- ✓ La charge : 100kg
- ✓ La force : 981N
- ✓ Le temps (t) : 30s

Les valeurs de dureté obtenues en moyenne de trois essais sur les surfaces polies, sont résumées dans le tableau (III.1) et l'histogramme de la figure III.5.

Tableau III.1 : valeurs des essais de dureté (HRB).

Traitement thermique	T= 300 C°			T= 400 C°			T= 500 C°			
Maintien	2h	4h	6h	2h	4h	6h	2h	4h	6h	Témoin
Essai n°1	113	125	105	113	110	115	92,3	88,6	91,5	55
Essai n°2	128	120	115	106	115	118	85,2	88	81,3	50
Essai n°3	125	124	110	110	112	113	76,6	85,3	87,8	48
Moyenne	122	123	110	109,67	112,33	115,33	84,7	87,3	86,87	51

- Ces différentes valeurs de dureté sont traduites sur l'histogramme suivant (figure III.5).

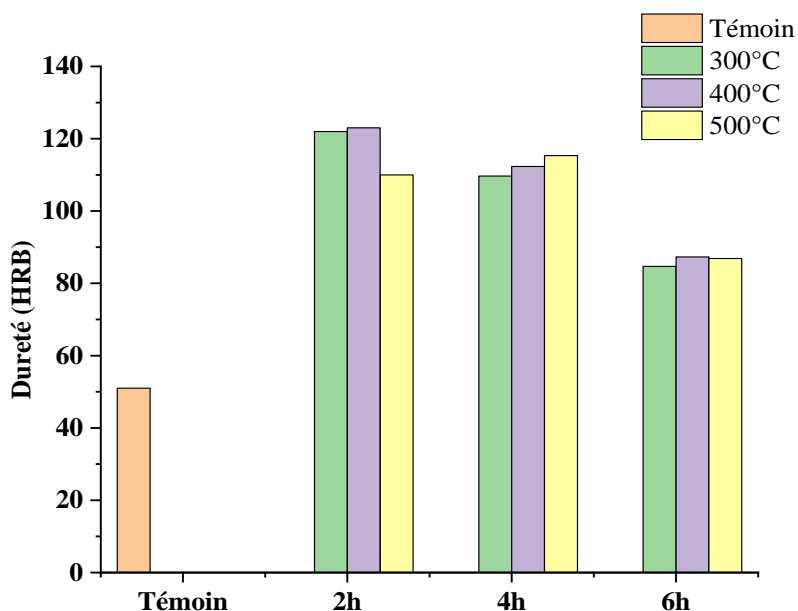


Figure III.5 : Evolution des valeurs des essais dureté (HRB).

D'après l'analyse des résultats de dureté nous constatons une évolution des valeurs de dureté bien mise en évidence dans l'histogramme de la figure III.5.

La première constatation qui il bien claire c'est l'augmentation de la dureté de 100% en passant le l'échantillon témoin (état de livraison) aux échantillons traité à différents température pendant les trois temps de maintien isotherme utilisés 2h, 4h ,6h.

Cette augmentation considérable de la dureté peut trouver comme explication, la formation des zones de Guinier et Preston et particules Al_2Cu qui sont distribués d'une manière uniforme au niveau des joints de grains cristalline, Ces particules dispersés jouent le rôle d'obstacle aux mouvements de dislocations ce qui diminue la plasticité et augmente les propriétés de résistance. L'histogramme de la (figure III.5) montre aussi paradoxalement que pour un temps de 6h, la dureté commence à rechuter, ce phénomène peut trouver comme explication, le grossissement du grain cristallin d'une part et la coalescence des précipités d'autre part après une longue exposition des échantillons à la température de traitement.

III.4. Résultats des essais de résilience (Charpy) :

Dans le tableau (III.2) et la figure (III.5), nous présenteront les résultats de l'essai de Charpy (résilience) de différentes éprouvettes.

Tableau III.2 : résultats de l'essai de résilience (Charpy).

Température	Témoin	T= 300 C°			T= 400 C°			T= 500 C°		
		2h	4h	6h	2h	4h	6h	2h	4h	6h
Maintien	4.5	1.1	1.4	1.9	1.7	1.5	0.9	1.2	0.6	0.4
Force de coupe (N.m)	4.5	1.1	1.4	1.9	1.7	1.5	0.9	1.2	0.6	0.4
KCV (J/cm ²)	5.625	1.375	1.75	2.375	2.125	1.875	1.125	1.5	0.75	0.5

KCV(J/cm²)

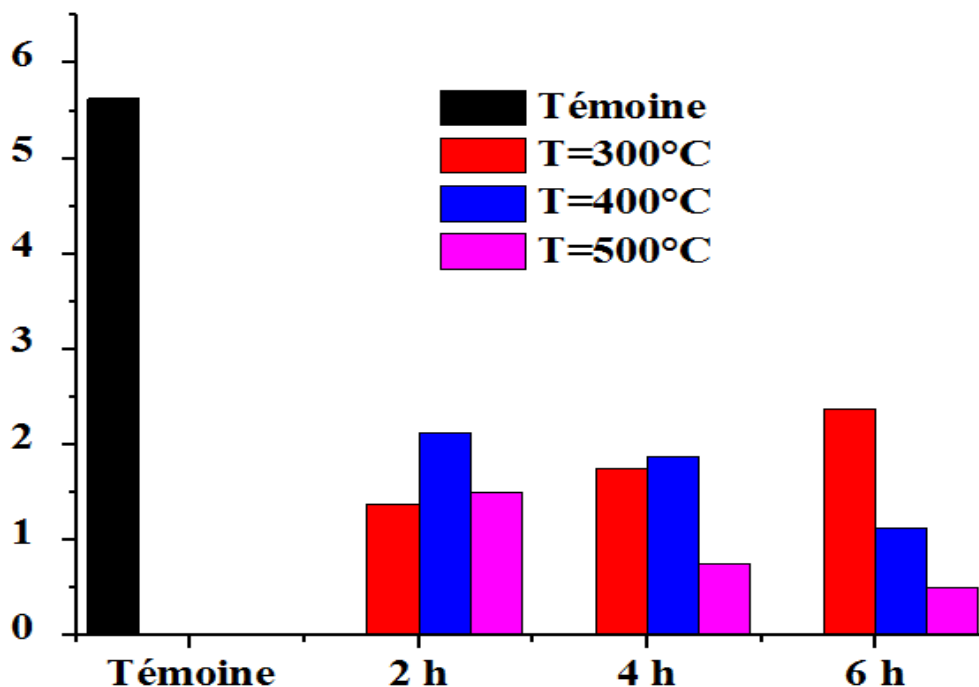


Figure III.6 : Evolution des valeurs de la résilience (KCV) en fonction des températures de traitement thermique et des temps de maintien isotherme.

D'après l'analyse des résultats obtenus des valeurs de résilience (KCV), nous constatons une évolution logique de la résilience qui va dans le sens inverse de l'évolution des valeurs de dureté.

En effet l'histogramme de la figure III.6, montre une diminution presque de 100% en passant de l'éprouvette témoin (état de livraison) vers les valeurs des éprouvettes qui ont subies des traitements thermiques (vieillissement).

Si seulement on prend l'éprouvette correspondant au traitement à 400°C pendant 2h, la résilience qui était de 5,625 J/cm² pour l'état de livraison devient 2,125 J/cm² ce qui correspond à une diminution de 3,5 J/cm².

Après ces résultats, ces constatations et les conclusions retrouvées, le but de ce travail c'est de proposer le traitement de vieillissement optimal qui va nous permettre d'assurer une bonne résistance (représentée par les valeurs de dureté) tout en maintenant une ductilité appréciable

qui sera représentée dans notre travail par les valeurs de la résilience en J/cm^2 qui représente la résistance à la rupture aux chocs pendant le service.

Dans notre cas on retient bien un meilleur compromis de ces deux paramètres antagonistes (dureté – résilience) pour un traitement de vieillissement à une température de $300^{\circ}C$ pendant 4h.

NB : cette proposition pour évoluer en fonction de domaine d'utilisation.

Température

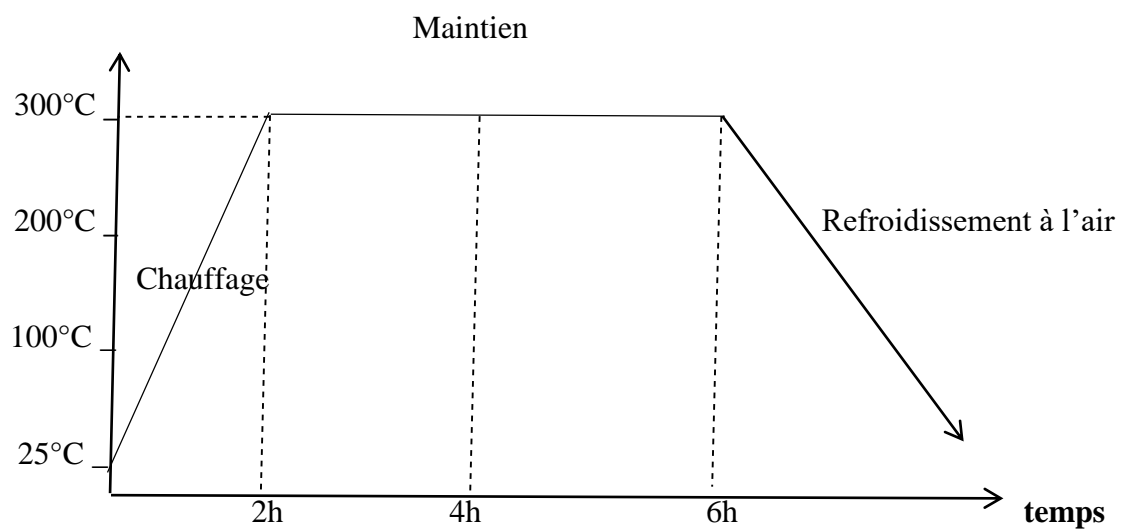


Figure III.7 : Cycle d'un traitement thermique

Conclusion générale

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressées aux alliages d'aluminium 2017A. Ces alliages contiennent du Cu et du Mg comme principaux éléments d'addition. Le suivi de l'évolution de la microstructure et de propriétés mécaniques a été essentiellement basé sur l'observation par microscopie optique (MO), la résilience (Charpy) et la mesure de dureté Rockwell (HRB).

D'après l'analyse des résultats obtenus :

- ✓ 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.
- ✓ La microstructure de l'alliage (2017A), présente des grains de forme a circulaires en présence de précipités finement dispersés, et nous constatons que le nombre de particule des précipités augment d'une part avec l'augmentation de temps de maintien et d'autre part avec l'augmentation de la température.
- ✓ Les essais mécaniques de dureté Rockwell ont montré que la dureté la plus élevée est obtenue pour les échantillons traités à différents température pendant les trois temps de maintien utilisés (2h, 4h et 6h) par rapport l'échantillon témoin (état de livraison).
- ✓ Les essais mécaniques charpy ont montré une diminution de résilience en passant de l'éprouvette témoin (état de livraison) vers les valeurs des éprouvettes qui ont subies des traitements thermiques (vieillessement).

Dans notre cas on retient bien un meilleur compromis de ces deux paramètres antagonistes (dureté-résilience) pour un traitement de vieillissement à une température de 300°C pendant 4h.

N.B : Cette proposition pout évoluer en fonction de domaine d'utilisation.

Références bibliographiques

- [1]. Histoire de l'aluminium, [www.intexal.com /aluminium/alu/htm](http://www.intexal.com/aluminium/alu/htm).
- [2]. Projet tutoré : aluminium TUT Saint-Jérôme.
- [3].Mémoire master, Lakanal khaoula : effet de la trempe, lors des traitements thermiques sur les comportements mécaniques de l'aluminium.
- [4]. Mémoire doctorat, Ines Hamdi : phénomène de précipitation des phases dans l'alliage d'aluminium (série 6000).Université Mohamed khider-biskra.
- [5].Mémoire master, Lazizi Hakim : Influence de la variation de la température de revenu sur l'évolution des caractéristiques mécaniques et structurales de l'alliage Al-4%Cu trempe dans un fluide à 70% h₂O et 30% d'huile soluble, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou (2012/2013).
- [6]. Mémoire master, Ben Abderrahmane Aissa et Hadj Belkacem Abdelfetteh : Influence de traitement thermique sur les caractéristiques mécaniques des alliages d'aluminium en traction, Université Mohamed Boudiaf M'sila.
- [7]. Mémoire master, Sara Mechri : Etude des réactions des transformations de phase dans les alliages d'aluminium sous forme des tôles, Université mentouri-Constantine.
- [8]. C.wolverton.Crystale structure and stability of complex precipitate phases in Al-Cu-Mg-(Si) and Al-Zn-Mg alloys, Acta materialia, 49,3129-3142,2001.
- [9]. [Develay, 1996]: Develay R: Données numériques sur les alliages d'aluminium de transformation : Technique de l'ingénieur Editions T.I.M445(1996).
- [10]. [Dubost 1991]: Dubost B, Sainfort p.: Durcissement par précipitation des alliages d'aluminium, Techniques de l'ingénieur Edition T.I.M240 (1991).

Références bibliographiques

- [11]. C.zhixing : L'identification de la calorimétrie à balayage différentiel (DSC) des conditions de traitements thermiques des alliages d'aluminium, Thèse de doctorat université du Québec, Chicoutimi (2019).
- [12]. F.serradj : Etude de la cinétique de précipitation dans les alliages Al-Mg-Si contenant différents teneurs des éléments d'additions. Thèse de doctorat, Université mentouri Constantine (2014).
- [13]. F.chanez : Contribution à l'analyse expérimentale et à la modélisation du comportement mécanique des alliages d'aluminium anodisés, Thèse de doctorat, Université Houari Boumediene(2014).
- [14]. R. Devlay : Traitement thermique des alliages d'aluminium, Technique de l'ingénieur M1290(1986).
- [15]. Mémoire master, Bourenane Hichem et Haddaden Billal: Influence des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un alliage d'aluminium de nuance AU4G Université Abderrahmane Mira 2019.
- [16]. A.Hässner, Leipzig, p41, (1970).
- [17]. M.Hillert, serie N°33, Institute of Metals, London, p.231, (1969).
- [18]. M. Hiller, Mot, Trans, 3, p.2729, (1972).
- [19]. Des matériaux : Jean-Paul Bailon et Jean-Marie Dorlot.
- [20]. Mémoire master, Bourzam Saida : Etude de la précipitation dans le système Al-Zn-Mg, Université USTHB Houari Boumediene, 2011.
- [21]. T-H.chuang.Doctorat beit-Universitat Stuttgart, (1983).
- [22]. A.Dechamp, thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble(1997).

Références bibliographiques

- [23]. W. Kurz, J.p.Mercier, G.zanbili, 2éme édition, presse polytechnique et Universitaires Romandes, Suisse lansane, (1955).
- [24]. C.Y.zahra, A.M. Zahra, thermochim Acta, 276(1996) 161-174.
- [25]. Mémoire master, Yahi Sihem: Contribution à l'étude microstructurale des alliages d'aluminium AlMgSi, Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi.

Résumé

Dans ce travail de mémoire de master, nous avons étudié la caractérisation mécanique des phénomènes de précipitation de l'alliage d'aluminium de type 2017A, causés par vieillissement à l'air, cet alliage utilisés dans l'industrie aéronautique et automobile pour leur faible densité alliée à de très bonnes propriétés mécaniques. L'alliage d'aluminium 2017A a été utilisé et soumis à un traitement thermique pendant différent de maintien isotherme (2h, 4h et 6h) à différentes températures (300°C, 400°C et 500°C).

Des éprouvettes ont été fabriquées pour effectuer les essais de résilience et des autres échantillons ont été utilisés pour les tests de dureté et l'observation microscopique.

Les résultats obtenus ont montré par des observations micrographiques de particule des précipités finement dispersés augment avec l'augmentation du temps de maintien et de la température. Dans notre cas on retient bien un meilleur compromis de deux paramètres antagonistes (dureté-résilience) pour un traitement de vieillissement à une température de 300°C pendant 4h.

Mots clé : Alliage d'aluminium, vieillissement, résilience, dureté, microstructure.

Abstract

In this master thesis work, we studied the mechanical characterization of the precipitation phenomena of the aluminum alloy type 2017A, caused by aging in the air, this alloy used in the aeronautical and automotive industry for their low density combined with very good mechanical properties. The 2017A aluminum alloy was used and subjected to heat treatment for different isothermal holding (2h, 4h and 6h) at different temperatures (300°C, 400°C and 500°C).

Of the specimens were fabricated to carry out the impact tests and of the other samples were used for the hardness tests and the microscopic observation.

The results obtained showed by micrographic observations of particles of the finely dispersed precipitates increase with the increase in the holding time and the temperature. In our case we retain a better compromise of two antagonistic parameters (hardness-resilience) for an aging at a temperature of 300°C for 4h.

Key-words: Aluminum alloy, aging, toughness, hardness, microstructure.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Propriétés physique de l'aluminium.....	3
Tableau I.2 : Subdivision de l'état T (traitement thermique)	9
Tableau II.1 : Composition chimique.....	18
Tableau II.2 : Composition chimique de réactif utilisé.....	22
Tableau III.1 : Paramètre et résultats de l'essai dureté Rockwell (HRB)....	30
Tableau III.2 : Les résultats de l'essai de résilience (Charpy).....	31