REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministre De l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique

Université Dr. Yahia Fares De Médéa



Faculté de science et de la technologie département du Génie de la Matière

Filière : Génie Mécanique

Option : Ingénieure des matériaux et des surfaces

MEMOIRE FIN D'ETUDE

Pour l'obtention du diplôme de Master

THEMES

Durcissement structurale d'un alliage d'aluminium A2017 par écrouissage suivi d'un traitement de recuit d'adoucissement

Présenté Par :

- **ZENAGUI Siham**
- **CHELFI Radhia**

Proposé Par :

- BENIMAM Samir

Année universitaire : 2021-2022.



Remerciement:

Nous saisissons cette opportunité pour adresser nos Profondes gratitudes et nos sincères prières à nos Dieu, Le tout puisant. Nous n'omettrons pas d'exprimer nos vifs Remerciements à tous ceux qui ont contribués de près Ou de loin à la réalisation de ce modeste travail, avec Une attention particulière à notre promoteur Mr.Benimam, qui n'a jamais cessé de prodiguer, Conseils, orientation et encouragements. Nous n'oublierons pas la participation active de Société POVAL Berrouaghia. Et nos professeurs qui nous ont suivis tout au long de Notre parcours universitaire au sein du département De génie mécanique. Merci à vous tous pour votre soutien, votre aide, et Votre compréhension

Dédicace

À celui qui a allumé la première lampe de ma vie, au merveilleux parfum de mon enfance, à la chaleur de ma vie, et à celui qui a enduré chaque moment de douleur que j'ai traversé et qui ne m'a pas quitté, mais l'a transformé en fleurs, à celui qui m'a protégé des orages du destin, et a transformé ma tristesse en roses et en fleurs, celui qui ai fait l'effort des années dans la générosité et formulé des Jours; des échelles vers le ciel pour que je puisse gravir les marches de la vie. « A toi, mon cher père

Que Dieu lui fasse miséricorde et que Dieu fasse de sa tombe un jardin d'enfants des jardins du Paradis»

A celle qui a tissé les fils du soleil pour me protéger de la froideur de la vie A celle qui m'a donné les bénédictions de ses prières à ma mère bien-aimée

Au bouquet de fleurs que j'ai vécu parmi mes frères et sœurs

À ceux que j'ai grandi en m'aimant À ceux qui ont surpassé dans leurs dons les dons de tous les êtres humains, mes oncles et tantes

Siham

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

À mes parents

À mon Cher frère

À mes chères sœurs

À la famille CHELFI et La Famille SALHI

A nos enseignants de l'école Primaire jusqu'à l'université

À toutes nos cher(e)s ami(e)s

À tous ceux qui nous sont chers.

Radhia

Abstract:

Aluminum alloys are used in many industries, in particular for the automotive industry and the aeronautical industry. The properties of these alloys have been significantly modified by a multitude of processes and techniques, including: squeezing, plastic deformation, thermal and thermochemical treatments, etc. The objective of this work is to study the effect of thermomechanical treatments (hardening and malleabilization) on the mechanical properties of the alloy. Aluminum copper standard 2017 widely used in the manufacture of mechanical parts and molds for the production of plastic parts made by the two known processes which are injection or blowing. The mechanical behavior of aluminum 2017 after our treatment is in agreement with other published data for similar alloys. Micrographic examination showed the growth of grain boundaries which is due to plastic deformation by strain hardening, was responsible for the increase in hardness as these prevented and impeded the movement of the dislocations.

Keywords: Aluminum copper alloys, Work hardening, Malleabilization, Microstructure, heat treatment

Résumé :

Les alliages d'aluminium sont utilisés dans de nombreuses Industries, en particulier pour dans l'industrie automobile et l'industrie aéronautique. Les propriétés de ces alliages ont été sensiblement modifiées par une multitude de procédés et techniques dont on peut citer : l'écuissage, la déformation plastique, traitement thermiques et thermochimiques etc.…

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet des traitements thermomécaniques (écrouissage et malléabilisation) sur les propriétés mécaniques de l'alliage Aluminium cuivre de norme 2017 très utilisé dans la fabrication de pièces mécanique et moule pour la production de pièces en plastique réalisées par les deux procédés connus qui sont l'injection ou le soufflage.

Le comportement mécanique de l'aluminium 2017 après notre traitement est en accord avec d'autres données publiées pour des alliages similaires. L'examen micrographique a montré la croissance de joints de grains qui est due à la déformation plastique par écrouissage, était responsable de l'augmentation de dureté car ces derniers ont empêché et gêner le mouvement des dislocations.

Mots clés :

Alliages Aluminium cuivre, Écrouissage, Malléabilisation, Microstructure, traitement thermique.

ملخص

تُستخدم سبائك الألومنيوم في العديد من الصناعات ، لا سيما في صناعة السيارات وصناعة الطائرات . تم تعديل خصائص هذه السبائك بشكل كبير من خلال العديد من العمليات والتقنيات ، بما في ذلك: الجلي ، وتشوه البلاستيكي عن طريق قوة ميكانيكية خارجية ، والمعالجات الحرارية اوالكيميائية الحرارية ، إلخ.

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير المعالجات الحرارية الميكانيكية (التصلب والتطويل) على الخواص الميكانيكية لسبائك الألومنيوم والنحاس 2017 المستخدمة على نطاق واسع في تصنيع الأجزاء الميكانيكية والقوالب لإنتاج القطع البلاستيكية المصنوعة بواسطة عمليتان معروفتان وهما الحقن أو النفخ.

يتوافق السلوك الميكانيكي للألمنيوم 2017 بعد معالجتنا مع البيانات المنشورة سابقا من طرف باحثين اخرين، لسبائك مماثلة. أظهر الفحص المجهري نمو حدود الحبيبات الناتج عن تشوه اللبلاستيكي بسبب تصلب المكانيكي ، والذي يعتبرهو المسؤول عن زيادة الصلابة لأنها تمنع وتعوق حركة الاضطرابات المجهرية الداخلية.

الكلمات مفتاح : سبائك الألومنيوم والنحاس ، تصلب ، التطويع ، البنية المجهرية ، المعالجة الحرارية.

Table des Matières

Abstract: 2

Résumé :..... 3

ملخص 4

Table des Matières..... 5

Liste des figures :..... 8

Liste des tableaux :..... 9

***Introduction Générale* 11**

Introduction Générale..... 11

***Chapitre I :* 12**

***Traitements thermiques* 12**

Chapitre I 13

Traitements thermiques..... 13

I.1. Introduction :.....13

I .2. Principaux types de traitements thermiques.....14

I.4.1. Traitement d'homogénéisation.....16

I.4.2. Traitement d'adoucissement 16

I.4.3. Traitement de durcissement structural.....16

***Chapitre II : l'aluminium et ses alliages* 31**

Chapitre II 20

L'aluminium et ses alliages..... 20

II.1. Introduction..... 20

II.2. Histoire d'aluminium..... 20

II.3. L'aluminium :..... 21

II.3.1. Obtention de l'aluminium.....21

II.3.2. Recyclage.....22

II.3.3 : Les différents domaines d'utilisation.....23

II.4. Propriétés de l'aluminium :..... 25

II.4.1. Propriétés physiques et chimiques 25
II.4.2. Propriétés mécaniques : 26
II.4.3. Propriétés Optiques 27
II.5. Les éléments d'addition dans les alliages d'aluminium 27
II.6. Désignation des différents alliages d'Aluminium 28
II.7. Classification des alliages d'aluminium : 29
II.7.1. Alliages à durcissement structural : 29
II.7.2. Alliages sans durcissement structural : 30
II.8. Effets des éléments d'addition dans les alliages d'aluminium : 31
II.9. Applications de l'aluminium et ses alliages : 32
II.9.1. Alliages Al-Mg-Si : 36
II.9.2. Les alliages corroyés : 37
***Chapitre III :* 20**
***Méthodes Expérimentales* 20**
Chapitre III 39
Méthodes Expérimentales 39
III.1 Introduction 39
III.2 Préparation des échantillons 39
III.2.1 Alliage Utilisé 39
III.3 : Découpage 41
III.4 : Mesure de dureté. 41
III.5 : Examen métallographique. 42
III. 6 : Métallographie Optique 43
III.7: Déformation plastique par écrouissage 44
III.8.Traitement thermique 44
III.8.1 : Traitement de recuit d'adoucissement 44
III.8.2 : Refroidissement lent (recuit) : 45
III.8.3: Four utilisé 45
III.9.Résultats et discussions 46
III.9.1: Caractérisation microstructurale 46
III.9.2.Résultats des duretés 47
Conclusion générale 49

CONCLUSION GENERALE..... 50

Référence bibliographie..... 51

Références bibliographie :..... 52

Liste des figures :

Figure	Titre	Page
Figure. I. 1	Diagramme typique de température de traitement en fonction du temps pour un traitement de durcissement structural	**18**
Figure.II.1	Procédés de fabrication de l'aluminium	**21**
Figure.II.2	Diagramme Production de la fonderie BARBAS & PLAILLY des Pièce1s en alliages d'aluminium pour différents secteur d'activités	**24**
Figure.II.3	Différentes classes d'alliages d'aluminium	**29**
Figure.II.4	Les applications de l'aluminium et ses alliages	**33**
Figure.III.1	Le échantillon d'alliage étudié	**41**
Figure.III.2	Duromètre Brinell	**42**
Figure.III.3	échantillon après l'essai de dureté brinell	**42**
Figure.III.4	Polisseuse labo IMS	**43**
Figure.III.5	Microscope optique du labo IMS	**44**
Figure.III.6	Four traitement thermique	**45**
Figure.III.7	Micrographie du Matériau A 2017 à l'état réceptionné	**46**
Figure.III.8	Micrographie optique de l'aluminium après déformation	**46**
Figure.III.9	Micrographie optique de l'aluminium à température à 250°C	**46**
Figure.III.10	Micrographie optique de l'aluminium à température à 500°C	**46**
Figure.III.11	Résultats des duretés	**48**

Liste des tableaux :

Tableau	**Désignation**	**Page**
Tableau I,1	Produits corroyés : symboles respectifs des différents traitements correspondant à l'état T (État durci par traitement thermique)	15
Tableau I.2	Traitements thermiques de la série T des alliages d'aluminium	15
Tableau II .1	La production d'aluminium secondaire (1973-2004)	22
Tableau II.2	Comparaison entre les propriétés Aluminium – Fer.	26
Tableau II.3	Principales propriétés mécaniques des alliages d'aluminium	27
Tableau II.4	Désignation des séries principales des alliages d'Aluminium .	28
Tableau III.2	Résultats des duretés	47

Introduction Générale

Introduction Générale

Grâce à ses bonnes propriétés mécaniques et à sa légèreté, le duralumin (ancêtre des alliages aluminium-cuivre de la série 2000) est le premier type d'alliage à base d'aluminium ayant joué un rôle essentiel dans le développement de l'aéronautique. Bien que les alliages aluminium-zinc (série 7000) et les matériaux composites soient aujourd'hui majoritaires dans la construction des avions, les alliages de la série 2000 (cuivre comme élément d'alliage principal) étaient encore récemment largement utilisés. L'Airbus A380 est composé à 60% d'alliages à base aluminium, et de nos jours, l'alliage 2024 (équivalent actuel du duralumin A- U4G1) est encore présent dans le fuselage de nombreux avions civils. Des études de la microstructure et de la corrosion du 2024 sont d'ailleurs toujours en cours, mais peu d'entre- elles concernent le 2017 (équivalent actuel du premier duralumin mis au point, l'A-U4G).

Dans le domaine du patrimoine culturel, les métaux et leurs alliages concernent une part très importante des matériaux analysés par des procédés modernes. Les objectifs sont multiples et portent, entre autres, sur les processus de fabrication, les mécanismes d'altération ou l'origine et la nature des minerais. Toutefois, bien que l'aluminium (isolé en 1825) et ses alliages » (duralumin 1906) fassent aussi partie du patrimoine culturel et industriel, peu d'études physico-chimiques y sont consacrées et la plupart d'entre-elles sont focalisées sur les problèmes de corrosion. La conservation et la restauration de ces alliages est une problématique relativement récente (années 1980) et qui encore de nos jours implique peu de personnes.

C'est un domaine de recherche actif où la compréhension de la corrosion des alliages d'aluminium anciens se heurte aux multiples facteurs y intervenant tel que le rôle de la microstructure. C'est une difficulté dans la sauvegarde des collections aéronautiques qui prennent de plus en plus d'importance, que ce soit au musée de l'Air et de l'Espace du Bourget ou dans les nouvelles structures tel qu'Aéroscope à Blagnac dont la mission inclue non seulement la sauvegarde des avions mais également celle de leur histoire industrielle (maquettes de test aérodynamique, documents…)

Chapitre I :
Traitements thermiques

Chapitre I
Traitements thermiques

I.1. Introduction :

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations Combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :

- Augmentation de la résistance à la rupture et de la limitée l'astique Rem, Re, A % en donnant une meilleure tenue de l'élément.
- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.

De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subit une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage). En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité.

En général les traitements thermiques ne Changent pas la composition chimique de l'alliage.

[1]

C'est un traitement thermique qui a pour but de ramener l'alliage à une structure d'équilibre. Il comprend trois étapes :

- Un chauffage à une certaine température dite de recuit.
- Un maintien de durée variable à cette température.
- Un refroidissement lent qui peut se faire à l'air.

I .2. Principaux types de traitements thermiques

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

- Les traitements dits d'homogénéisation généralement pratiqués sur les produits coulés avant leur transformation ou également sur les produits déjà corroyés ;
- Les traitements d'adoucissement par recuit ou restauration, généralement appliqués en cours ou en fin de transformation ;
- Les traitements de trempe structurale comprenant :
    - Une mise en solution,
    - Une trempe,
    - Une maturation ou /et un revenu produisant le durcissement.

La possibilité ou non d'effectuer ce dernier type de traitement permet d'ailleurs de classer les alliages d'aluminium en deux grandes catégories, à savoir :

- Les alliages susceptibles de durcissement structural qui, après trempe, voient leur dureté et leur résistance mécanique augmenter par maturation ou /et revenu : ce sont essentiellement les alliages des familles 6000 [Al-Si-Mg], 2000 [Al-Cu] et 7000 [Al- Zn] ;
- Les alliages non susceptibles de durcissement structural pour lesquels les modifications précédemment énoncées ne sont pas notables : ce sont l'aluminium non allié, les alliages des familles 3000 (Al-Mn) et 5000 (Al-Mg) [2].

Tableau I, 1: Produits corroyés : symboles respectifs des différents traitements correspondant à l'état T (État durci par traitement thermique) [2].

Traitements de base				Symbole
Traité thermiquement *avec* mise en solution séparée	Sans écrouissage	Mûri		T4
		Revenu		T6
		Sur-revenu		T7
	Avec écrouissage	Écroui	Mûri	T3
			Revenu	T8
		Revenu et écroui		T9
Traité thermiquement *sans* mise en solution séparée	Sans écrouissage	Mûri		T1
		Revenu		T5
	Avec écrouissage	Revenu et écroui		T10
		Écroui	Mûri	T11
			Revenu	T12

La numérotation de 1 à 10 suivant le T indique la séquence spécifie que des traitements de base**.**

Tableau I.2 : Traitements thermiques de la série T des alliages d'aluminium **[3].**

Désignation	Traitements thermiques
T1	Refroidi après transformation à chaud et mûri jusqu'à l'obtention d'une condition stable : s'applique aux produits non écrouis après la trempe
T2	Refroidi après transformation à chaud, écroui, et mûri jusqu'à l'obtention d'une condition stable : s'applique aux produits écrouis après la trempe
T4	Traitement thermique de dissolution, trempé, écroui, et mûri jusqu'à l'obtention d'une condition stable : s'applique aux produits écrouis
T4	Traitement thermique de dissolution, trempé et mûri jusqu'à l'obtention d'une condition stable : s'applique aux produits non écrouis
T5	Refroidi après transformation à chaud et revenu : s'applique aux produits non écrouis suivant la trempe
T6	Traitement thermique de dissolution, trempé et revenu : s'applique aux produits non écrouis après la trempe
T7	Traitement thermique de dissolution, trempé et sur revenu : matériau apporté au-delà du point de résistance maximale afin de contrôler une autre propriété du matériau trempe

T8	Traitement thermique de dissolution, trempé, écroui, et revenu : s'applique aux produits écrouis
T9	Traitement thermique de dissolution, revenu et écrouissage: s'applique aux produits écrouis
T10	Refroidi après transformation à chaud, écroui, et revenu : s'applique aux produits écrouis

Les traitements thermiques appliqués aux alliages d'aluminium sont généralement répartis en quatre différents types :

* Traitement d'homogénéisation

* Traitement d'adoucissement

* Traitement de durcissement structural

* Traitement de vieillissement

I.4.1. Traitement d'homogénéisation

Le traitement d'homogénéisation consiste à chauffer le matériau à une température relativement élevée, généralement de 450°C à 500°C pour l'aluminium et 450°C à 590°C pour les alliages d'aluminium [4], et à le maintenir pour une certaine période de temps (généralement quelques heures). Ce traitement pour but de dissoudre les phases présentes au sein de l'alliage, de sorte à réaliser une homogénéisation de celui-ci sous une seule et même phase.

I.4.2. Traitement d'adoucissement

Le traitement d'adoucissement a pour but d'adoucir un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale. On note parmi ces traitements thermiques le traitement de restauration et le traitement de recristallisation utilisés dans le cas de matériaux écrouis, et le traitement de recuit de précipitation dans le cas de matériaux trempés. Ce dernier traitement consiste en un chauffage assez prolongé à température élevée afin d'obtenir un adoucissement de l'alliage produit par l'évolution des précipités provenant des constituants de l'alliage.

I.4.3. Traitement de durcissement structural

Ce type de traitement comprend généralement trois étapes distinctes :

a) Mise en solution solide

Le traitement de mise en solution solide peut être considéré comme un traitement d'homogénéisation et d'adoucissement. Ce traitement est effectué à température assez élevée,et permet de dissoudre les phases qui ont précipité dans l'alliage. Ceci contribue aussi à la diminution de la dureté du matériau.

b) Refroidissement rapide

Le refroidissement rapide, connu sous le nom de trempe a pour but de conserver la solution formée à haute température à la température ambiante. La vitesse de refroidissement varie d'un alliage à un autre. La vitesse critique de trempe dépend de la vitesse de diffusion des éléments constituants l'alliage.

c) Traitement thermique de revenu

Les traitements thermiques de revenu sont constitués d'un maintien à une température constante, ce qui engendre un durcissement important de l'alliage.
Le durcissement obtenu en fonction du temps et de la température de maintien, s'explique par un phénomène de précipitation qui résulte de la décomposition de la solution solide sursaturée.

d) 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 Mg2Si pendant le refroidissement et de préserver la solution soluble solide formée lors de la mise en solution, par un refroidissement rapide (~ 260 °C/s) à basse température, habituellement près de la température de la pièce. Le résultat de cette opération est une solution solide sursaturée en éléments d'alliages, et également en lacunes [5].

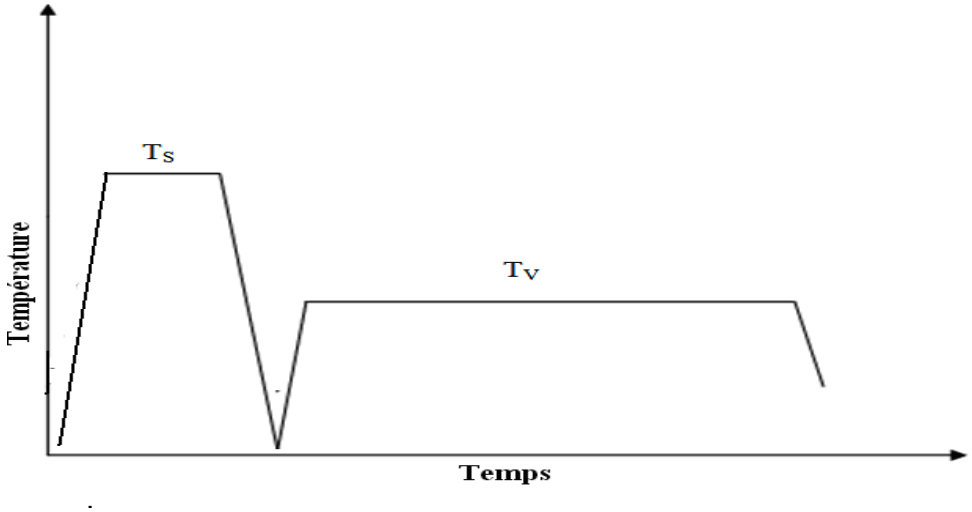


Figure I.1 : Diagramme typique de température de traitement en fonction du temps pour un traitement de durcissement structural

T_S : la température minimale de mise en solution

T_V: la température de durcissement structural.

Chapitre II : l'aluminium et ses alliages

Chapitre II
L'aluminium et ses alliages

II.1. Introduction

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

L'aluminium est un élément du troisième groupe de classification de Mendéliev, dont le nombre atomique est 13, la masse atomique 26.28 et la température de fusion 660°C.
Il se cristallise dans le système cubique à faces centrées, avec un paramètre de maille 0.404 nm. Sa masse volumique est 2.7 kg/dm3, son coefficient de dilatation thermique linéaire est de l'ordre de 23.10-6, son module de Young de 6600 bar. L'aluminium industriel contient 0.5% d'impuretés (principalement Fe+Si), mais il peut être obtenu presque pur par raffinage électrolytique (Al > 99.99%) [8].

Ces impuretés ont différents effets sur leurs caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques. Les propriétés d'aluminium peuvent être améliorées par des traitements thermique et mécanique, ainsi par l'addition des éléments comme le Mg, Si, Mn, etc.… A la température ambiante, l'aluminium forme très vite une couche d'oxyde $Al2O3$ (alumine), épaisse et adhérente, qui protège le métal des effets mécaniques et physiques et les attaques chimiques [9].

II.2. Histoire d'aluminium

En 1807, Humphry Davy, après avoir découvert que le sodium et le potassium entraient dans la composition de l'alun, suppose qu'il s'y trouve aussi un autre métal, qu'il baptise « aluminium » (en latin, « alun » se dit alumen) [13] Pierre Berthier découvre dans une mine près des Baux-de- Provence en 1821 un minerai contenant plus de 50 % d'oxyde d'aluminium. Ce minerai sera appelé bauxite.
On attribue généralement la découverte et l'isolement de l'aluminium à Friedrich Wöhler en 1827. Toutefois, deux ans plus tôt, le chimiste et physicien danois Hans Christian Ørsted avait réussi à produire une forme impure du métal. Wöhler fut le premier à mettre en évidence les propriétés chimiques et physiques de l'aluminium, dont la plus notable est la légèreté.
Le chimiste français Henri Sainte-Claire Deville améliore en 1846 la méthode de Wöhler en réduisant le minerai par le sodium. Il publie ses recherches dans un livre en 1856. Cette méthode est utilisée à travers toute l'Europe pour la fabrication de l'aluminium, mais elle reste

extrêmement coûteuse. Le métal est d'ailleurs utilisé pour fabriquer des bijoux, dont la valeur sera évidemment réduite à néant quelques décennies plus tard (11].

II.3. L'aluminium :

II.3.1. Obtention de l'aluminium

La seule source de ce métal c'est les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%), La bauxite est le minerai le plus utilisé pour obtenir de l'alumine, matière intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium et être la production
d'aluminium par électrolyse d'alumine dans la cryolithe (Na3ALF6) fondue, à environ 1000°C dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone [12] .

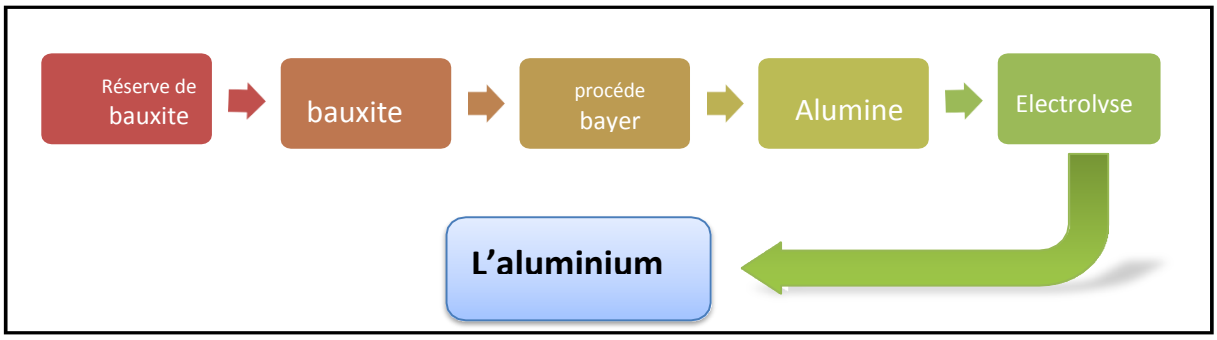


Figure II.1 : Procédés de fabrication de l'aluminium

*** Obtention de l'aluminium**

L'aluminium est un métal très répandu sur terre ; il constitue le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%) constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal. L'élaboration de l'Al consiste à extraire l'alumine pure de la bauxite, puis à réduire cette dernière en aluminium pur. Le cycle de fabrication est celui du procédé Bayer, breveté en 1887 et toujours en service [13].

- La Bauxite

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre, le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%) constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal.

- L’alumine

L'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer : la bauxite est broyée puis attaquée à chaud par de la soude. On obtient une liqueur qui après séparation des oxydes de fer et de silicium est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine.

- L'aluminium

L'aluminium est obtenu à partir de l'alumine par électrolyse dans une cuve comportant un garnissage en carbone (cathode). L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve.

II.3.2. Recyclage

L’aluminium a une excellente recyclabilité théorique, mais il faut le collecter, le trier et le faire fondre, ce qui nécessite une quantité importante d’énergie, cependant, en plus des bénéfices environnementaux, le recyclage de l’aluminium est beaucoup moins coûteux que l’extraction à partir du minerai de bauxite. Il nécessite 95 % d’énergie en moins et une tonne d’aluminium recyclé permet d’économiser quatre tonnes de bauxite. En sautant l’étape de l’électrolyse, qui réclame beaucoup d’énergie, on évite les rejets polluants qui lui sont associés.

La production mondiale d’aluminium secondaire à partir du recyclage s’est élevée à 7,6 Mt en 2005, soit 20 % de la production totale de ce métal. [14]

Tableau II .1: La production d’aluminium secondaire (1973-2004)

Année	Afrique	Amérique du Nord	Amérique latine	Asie	Europe et Russie	Océanie	Total
1973	249	5 039	229	1 439	2 757	324	10 037
1978	336	5 409	413	1 126	3 730	414	11 428
1982	501	4 343	795	1 103	3 306	548	10 496
1987	572	4 889	1 486	927	3 462	1 273	12 604
1992	617	6 016	1 949	1 379	3 319	1 483	14 763
1997	1 106	5 930	2 116	1 910	6 613	1 804	19 479
2003	1 428	5 945	2 275	2 457	8 064	2 198	21 935
2004	1 711	5 110	2 356	2 735	8 433	2 246	22 591

II.3.3 : Les différents domaines d'utilisation.

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

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

Les transports : Aéronautique, automobile, train, bateau…

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

***Le bâtiment :** Facilement malléable et résistant en alliages, l'aluminium permet de réaliser des formes complexes dans une gamme étendue de coloris. Il est donc très apprécié en architecture moderne et ne nécessite que très peu d'entretien.

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

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

***Autres utilisations :** Filtrant dans les crèmes solaires, texturant et colorants alimentaires dans les laitages, immunisant dans les vaccins et purifiant dans le traitement des eaux, l'aluminium est également utilisé à plus faibles quantités dans l'industrie chimique [15] **.**

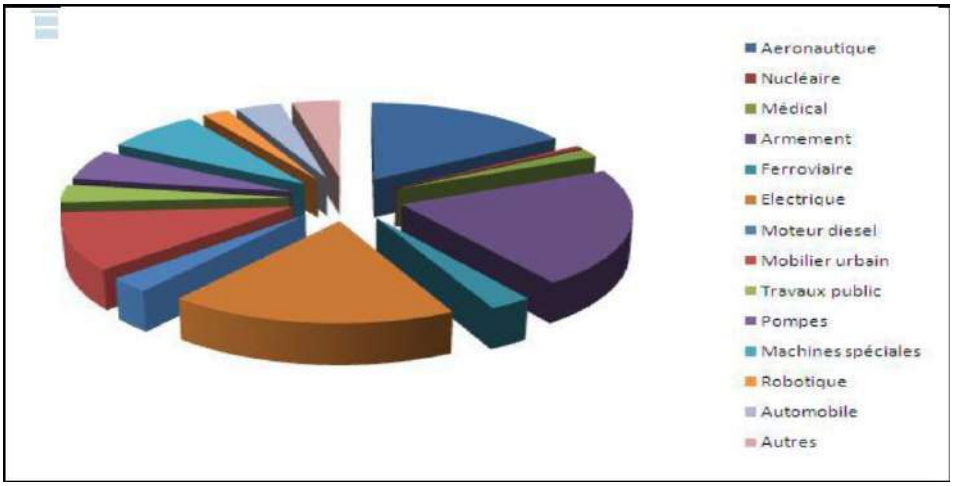


Figure. II.2 : Diagramme Production de la fonderie BARBAS & PLAILLY des pièces en alliages d'aluminium pour différents secteurs d'activités [15]

Historiques des utilisations de l'aluminium

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

Utilisation d'aluminium et de ses alliages :

- L'aluminium et ses alliages sont utilisés dans tous les domaines que ce soit industriel ou dans l'usage quotidien :construction aéronautique ,automobile ,ferroviaire et navale (superstructures et équipements),dans le bâtiments (toitures ,façade ,aménagements

- intérieur), dans l'industrie électrique (câble et appareillage) pour la fabrication des appareils ménagers, emballage, la décoration.

- L'aluminium est peu utilisé à l'état brut sauf miroiterie du fait de sa faible résistance mécanique (au maximum 20Kg/mm2), d'où son utilisation sous forme d'alliages. En effet l'addition contrôlé des éléments d'alliages tels que, le cuivre, le silicium, le magnésium, le manganèse, le titane, le chrome, le zinc et le cobalt améliore les propriétés mécaniques [16]

II.4. Propriétés de l'aluminium :

II.4.1. Propriétés physiques et chimiques

Les alliages d'aluminium ont pris, au cours des 60 dernières années, une place importante dans beaucoup de domaines et occupent la deuxième place parmi les métaux utilisés, après les matériaux en acier et en Ti. C'est dans le domaine de transport que se situe leur principale application, suivis de ceux du bâtiment et de la construction de machines. Depuis de nombreuses années également, l'aluminium est un matériau attrayant pour l'industrie de l'emballage.

L'essor économique et technique de l'aluminium est dû à une combinaison intéressante de propriétés, dont :

- La faible densité.
- La conductibilité thermique et électrique élevées.
- La grande ductilité même à basses températures.
- La stabilité chimique.
- La conformité avec les prescriptions d'hygiène.

Souvent aussi, on choisit l'aluminium en raison d'autres propriétés, comme l'absence d'étincelles, la neutralité magnétique ou l'incombustibilité. On distingue entre l'aluminium de grande pureté, l'aluminium pur et les alliages d'aluminium à base de manganèse, de silicium, de cuivre ou de zinc, dont la principale fonction est d'augmenter la résistance mécanique.

L'augmentation de la résistance mécanique ne s'obtient pas seulement par solidification de cristaux mixtes, mais également par écrouissage ou par durcissement structurale.

On note la densité nettement plus faible, le point de fusion très bas, mais également la chaleur de fusion élevée et le point de fusion très élevée de l'oxyde d'aluminium. L'aluminium ne présente pas de couleur incandescente au point de fusion.

Ces caractéristiques conjuguées avec un coefficient de dilatation élevé et une bonne conductibilité thermique font que le soudage de matériaux en aluminium est plus compliqué que celui du fer (tableau II.2).

A température ambiante, les cristaux d'aluminium sont à mailles cubiques à faces centrées et ne sont pas sujet à transformation, si bien que l'aluminium ne peut pas développer de structure de trempe comme la martensite. Une fragilisation à froid ne se produit pas sur l'aluminium. (17)

Tableau II.2: Comparaison entre les propriétés Aluminium – Fer.

Propriétés	Unité	Aluminium	Fer
Masse atomique.	g/mol	29.98	55.84
Masse volumique.	g/cm^3	2.70	7.87
Module d'élasticité.	N/mm^2	71.10^3	210.10^3
Coefficient de dilatation.	1/ÄK	24.10^{-6}	12.10^{-6}
Chaleur de fusion.	KJ/kg	396	270
Limite élastique.	N/mm^2	Env.10	Env.100
Résistance à la traction.	N/mm^2	Env.50	Env.200
Oxydes.		Al_2O_3	FeO, Fe_2O_3, Fe_3O_4
Point de fusion des oxydes.	ÄC	2046	1400, 1455, 1600.
Point de fusion de métal.	ÄC	658	1536

II.4.2. Propriétés mécaniques :

- **Résistance à la traction :** Les propriétés mécaniques d'aluminium non allié recuit sont très limitées, il est moins rigide que les aciers. Son module de Young est de l'ordre de 65 000 à 70 000 MPa (comparèrent à celui des aciers de construction qui est égal à 210 000 MPa). L'allongement à la rupture vari de 23 à 43%, les caractéristiques de traction dépendent de la nature de l'alliage et de son état métallurgique (recuit, écroui ou trempé). Malgré que les éléments d'addition offrent à l'aluminium non allié recuit une multitude de propriétés, mais la plus part d'eux n'influent pas sur le module de Young, du fait que leurs masses ne dépassent pas 8% du composé.

- **Coefficient de Poisson :** Le coefficient de Poisson des alliages d'aluminium varie de 0,33 à 0,35. Généralement on prend la valeur de 0,35 [18].

Les principales caractéristiques retenues sont regroupées dans le tableau II.3.

Tableau II.3 : Principales propriétés mécaniques des alliages d'aluminium

Propriété	Valeur
Module d'élasticité	70000 MPa
Module de cisaillement (Coulomb)	27000 MPa
Coefficient de Poisson ν	0,35
Masse volumique ρ	2700 Kg. m^{-3}
Coefficient de dilatation linéique α	2700 Kg. m^{-3}

II.4.3. Propriétés Optiques

Le pouvoir réflecteur de l'aluminium poli est excellent et varie avec la longueur d'onde. Dans le spectre visible il est de l'ordre de 85% à 90%, seul l'argent peut faire mieux. Cette propriété peut être améliorée par des traitements de surfaces comme le polissage et le brillantage. Le pouvoir émissif de l'aluminium revêtu de sa couche naturelle d'oxyde est très faible, de l'ordre de 5% du corps noir à l'état poli. Cette propriété est utilisée en isolation [19].

II.5. Les éléments d'addition dans les alliages d'aluminium

Les éléments d'addition et, en particulier, les éléments de transitions, jouent un rôle très important dans la métallurgie de l'aluminium [20].

La teneur des éléments d'addition est limitée par le facteur de solubilité. Les éléments d'addition les plus répandus dans les alliages d'aluminium sont le cuivre, le magnésium, le manganèse, le zinc, le fer et le silicium. Ces derniers ont plus ou moins une influence sur les caractéristiques de l'AlMgSi. Ils peuvent en même temps améliorée ou détériorée les propriétés physiques, chimiques et technologiques de l'aluminium pur [21]. Un certain nombre d'éléments d'addition sont rajoutés dans certains alliages pour donner une propriété particulière [22].

Les alliages à base d'aluminium contiennent habituellement une certaine quantité de cuivre, de manganèse. Ces éléments peuvent être aussi ajoutés délibérément pour fournir les propriétés matérielles spéciales. La présence de magnésium améliore la trempabilité du matériel. Le manganèse est habituellement ajouté pour réduire les effets néfastes des impuretés comme le

fer. Les éléments d'alliages peuvent entrer partiellement dans la solution solide α et former en partie les particules intermétalliques.

La composition des composés intermétalliques dépend du procédé de solidification lors de l'élaboration de l'alliage

Parmi tous les éléments présents, le fer est probablement le plus important parce qu'il a une affinité avec plusieurs éléments d'addition tel que Mn, Cr et Si. Il peut former ainsi une large gamme de composés intermétalliques lors du procédé de fabrication tels que α-Al15 (Mn, Fe)3Si2 et β-Al5FeSi. Ces composés intermétalliques sont nuisibles aux propriétés mécaniques des alliages lorsque leur taille excède 3 óm [19]. En revanche, ils présentent l'avantage de la résistance au fluage à hautes températures.

Les éléments Mn et Cr se caractérisent par une faible solubilité dans les alliages d'aluminium. L'introduction de Mn et Cr modifie de façon générale la forme, éventuellement la taille des grains [24], améliore la ductilité et la ténacité. Mn et Cr sont souvent utilisés dans les alliages d'aluminium pour éviter la recristallisation au cours de la mise en solution.

L'addition de Mn dans les alliages d'aluminium facilite la précipitation dans les joints de grains. L'introduction de Mn réduit la proportion de Si en solution dans les alliages Al-Mg-Si par la formation des précipités de type AlMnSi et réduit ainsi la précipitation de Si et de Mg2Si dans les joints de grains [25].

II.6. Désignation des différents alliages d'Aluminium

La désignation des alliages d'aluminium s'effectue suivant un système de 4 chiffres [26]. Le premier chiffre de la série indique le principal élément alliant en présence et les chiffres subséquents indiquent la composition (voir tableau (II.4).

Nous désignerons les alliages d'aluminium corroyés suivant les normes de l'association d'aluminium. Ces normes affectent à chaque type d'alliage un nombre de quatre chiffres qui permet de les classer en séries.

Tableau II.4: Désignation des séries principales des alliages d'Aluminium [26].

Série	Désignation	Elément d'alliage principal	Phase principale présente dans l'alliage
1000	1XXX	99% d'Al au minimum	-
2000	2XXX	Cuivre (Cu).	Al_2Cu, Al_2Cu/Mg
3000	3XXX	Manganèse (Mn).	Al_6Mn

4000	4XXX	Silicium (Si).	-
5000	5XXX	Magnésium (Mg).	Al_3Mg_2
6000	6XXX	Magnésium (Mg) et Silicium (Si).	Mg_2Si
7000	7XXX	Zinc (Zn).	$MgZn_2$
8000	8XXX	Autres éléments.	-
9000	-	Non utilisé.	-

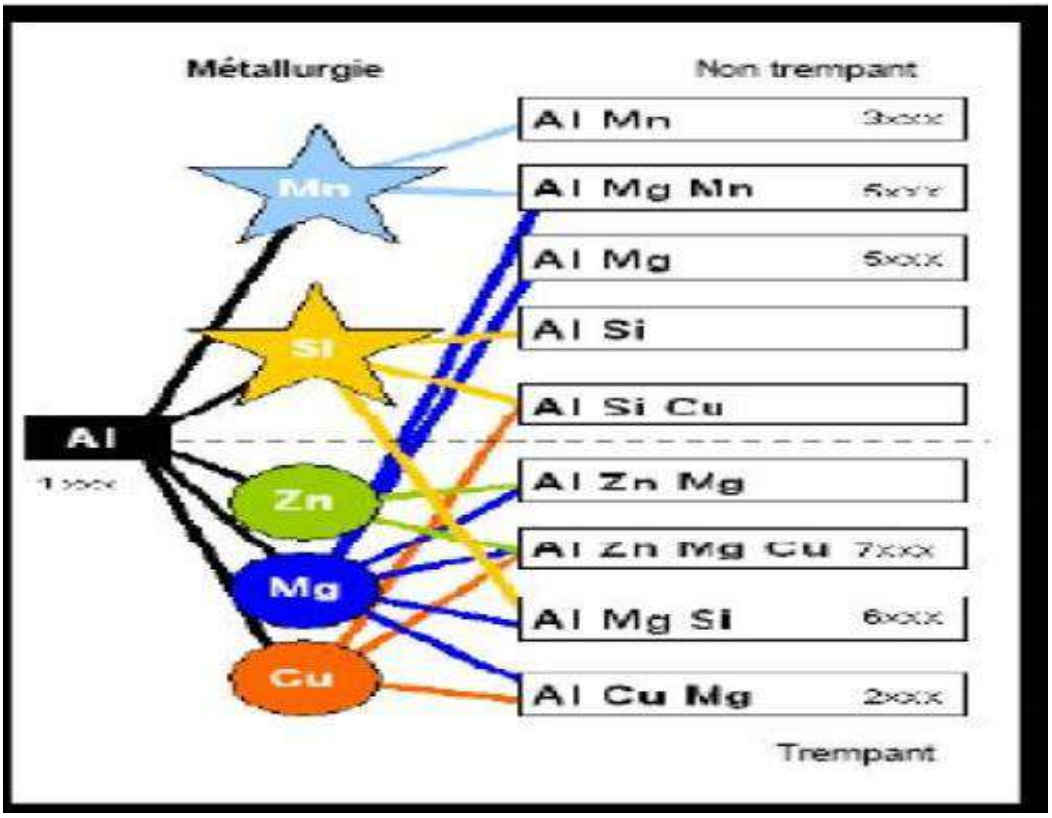


Figure II.3 : Différentes classes d'alliages d'aluminium

II.7. Classification des alliages d'aluminium :

Il existe deux grandes catégories d'alliages d'aluminium, qui sont :

Les alliages à durcissement structural (alliages trempants) et les alliages sans durcissement structural (alliages non trempants) [27].

II.7.1. Alliages à durcissement structural :

Joue un rôle majeur dans la métallurgie des alliages d'aluminium, car c'est le meilleur processus qui permet d'obtenir des niveaux élevés de résistance mécanique.

Ce processus contient :

Mise en solution	traitement dans lequel un alliage est chauffé à une température convenableet maintenu à cette température pendant un temps suffisant pour permettreaux constituants solubles d'entrer en solution solide où ils seront retenus en état sursaturé après la trempe(28].
Trempe	La trempe, c'est un refroidissement rapide qui stoppe toute diffusion pour amener cette solution solide dans un état sursaturé métastable [27].
Vieillissement	Le vieillissement est un traitement thermique à une température inférieure à la température d'homogénéisation, afin de faciliter le retour partiel vers les conditions d'équilibre [29].

Les séries d'alliages : 2xxx, 4xxx, 6xxx, 7xxx, sont les fameuse familles d'alliages à durcissement structural [29]

II.7.2. Alliages sans durcissement structural :

Différent mécanismes de durcissement contribue dans ces alliages pour moduler les propriétés mécaniques tels que [16] :

Durcissement par écrouissage	Avec augmentation de la résistance mécanique de l'aluminium et de tousses alliages par déformation à froid ou écrouissage. L'écrouissage a des effets sur plusieurs propriétés de l'alliage : Il conduit à l'augmentation de la charge de rupture, la limite élastique etla dureté. Il diminue l'allongement à la rupture, la capacité de déformation à froid, la conductivité électrique et la résistance à la corrosion [31].

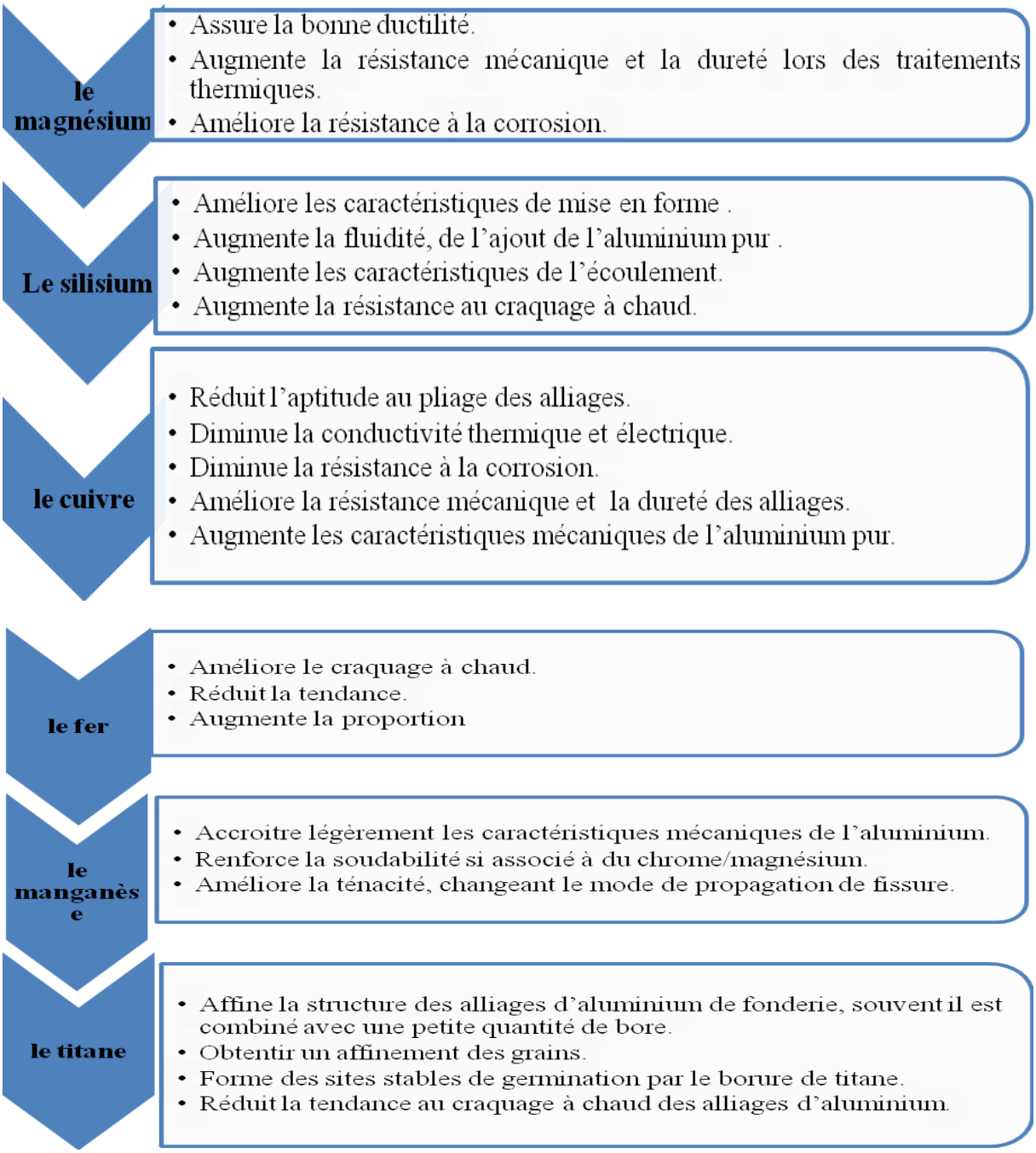
Durcissement par addition en Solution	Par leur nature et leur teneur, les éléments d'addition donnent des alliages différents ayant un éventail de propriétés permettant de satisfaireplusieurs applications. Chaque série d'alliages satisfait un

	domaine d'application ou des séries permettent un recouvrement de propriétés. Différentes études ont été réalisées sur le durcissement structural des alliages d'aluminium par ajout d'éléments d'alliage et/ou traitement thermique spécial. Nous pouvons citer : La précipitation de phases secondaires dans les systèmes Al-Mg-Si, Al- Cu, Al-Zn, Al-Li, tels que l'augmentation de la dureté par les différents précipités à différents stades d'évolution microstructurale. Les solutions solides dans les systèmes, tels que les différentes interactions solutés dislocations [31].
Durcissement par l'effet de phase dispersée	lorsque les teneurs des éléments d'addition dépassent leur limite de solubilité, les éléments d'addition se séparent de la matrice riche en aluminium pour former une seconde phase dont l'effet durcissant est d'autant plus marqué lorsque les particules sont plus dispersées dans la matrice et que leur taille est petite [29].

Les séries d'alliages : 3xxx, 5xxx sont les fameuse familles d'alliages sans durcissement structural. (29)

II.8. Effets des éléments d'addition dans les alliages d'aluminium :

Les éléments d'addition peuvent être ajoutés pour augmenter et améliorer les propriétés des alliages d'aluminium notamment les propriétés mécaniques. Une liste non exhaustive des éléments d'alliage les plus couramment rencontrés est ici proposée [32,33] :



II.9. Applications de l'aluminium et ses alliages :

En tenant compte des caractéristiques mécaniques et électriques de l'aluminium et ses alliages on peut citer la principale utilisation de l'aluminium et ses alliages [34,35] :

Transports (25 %)	Construction automobile, aéronautique, ferroviaire [35], etnavale (superstructures équipements) [36]
Bâtiment (21 %)	Toitures, façade, aménagements intérieurs.

Emballage (21 %)	les boîtes de boisson, les feuilles minces pour l'emballagealimentaire.
Équipements électriques (9%)	Câble et appareillage pour la fabrication des appareilsménagers, emballage et décoration. [36]
Équipements mécaniques (7 %)	Les rivets, boulons, renforts de portières ou de capots devoitures.
Applications(17 %)	Il s'agit d'un grand nombre d'applications diverses qui constituent individuellement de faibles tonnages (meubles de bureau, panneaux de chaînes Wifi, panneaux designalisation routière) [35]

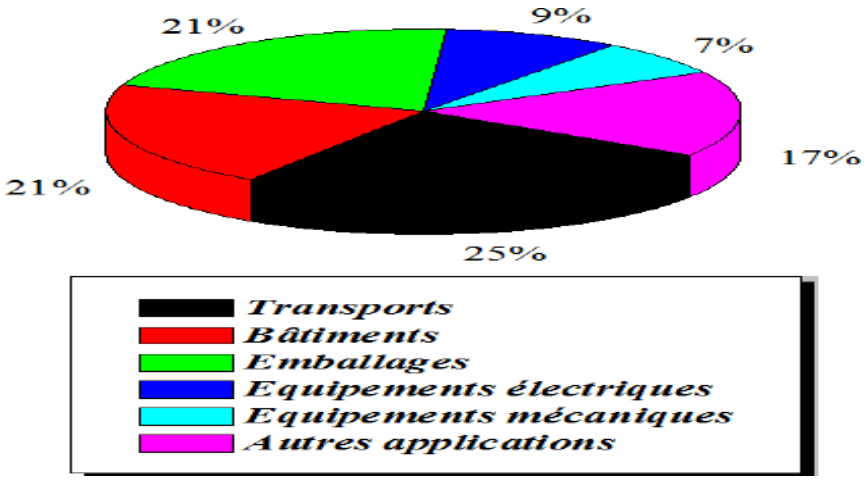


Figure II :4: Les applications de l'aluminium et ses alliages[35]



Aluminium en construction automobile



Aluminium en construction aéronautique



Aluminium en construction ferroviaire



Aluminium en construction navale

Bâtiments



Toiture en aluminium



Façade en aluminium



Aménagements intérieurs en aluminium

Emballages



Boîtes de boisson en aluminium



Feuilles minces pour l'emballage alimentaire en aluminium

Équipements électriques



Câble en aluminium aluminium



Appareils ménagers en aluminium



Emballage et décoration en

Équipements mécaniques



Rivets en aluminium



Boulons en aluminium

Autres applications



Des meubles de bureau en aluminium



Panneaux de chaînes Wifi en aluminium



Panneaux de signalisation routière

Alliages Al-Mg-Si sont des alliages d'aluminium de la série 6000, où le magnésium et le silicium se combinent pour former le composé Mg_2Si. [36]

Le durcissement, dans ces alliages, est assuré principalement par la précipitation de la phase métastable β''(Mg_2Si). [35] Ces alliages sont utilisés, essentiellement, à l'état trempé mûri ou trempé revenu, ce qui leur confère de bonnes propriétés mécaniques. Ils ont une très bonne aptitude à la déformation (filage, matriçage) et à la mise en forme à froid en état recuit.

Leurs caractéristiques mécaniques sont moyennes et inférieures à celles des alliages 2xxx et 7xxx. Les caractéristiques des alliages Al-Mg-Si peuvent être améliorées par addition de silicium qui forme avec le magnésium, le précipité durcissant Mg_2Si [36]. Ils présentent une bonne résistance à la corrosion surtout atmosphérique. Ils se soudent très bien (soudure à l'arc ou brasage). On peut les classer en deux catégories **:**

- La première catégorie dont les compositions sont plus riches en magnésium et silicium comme les alliages 6061 et 6082, qui sont utilisés pour des applications de structure (charpente, pylône…).
- La deuxième catégorie renferme une faible teneur en silicium qui aura par conséquent des caractéristiques mécaniques plus faibles tel que le cas du 6060 qui permettra de grandes vitesses de filage**.** Il faut également noter l'existence du 6101 anciennement appelé Almélec. Cet alliage a été énormément utilisé pour ces aptitudes de conducteur électrique. Il a notamment été utilisé pour la fabrication de lignes moyenne et haute tension [35].

II.9.2. Les alliages corroyés :

- Le corroyage est une déformation à chaud. Après la coulée de ces alliages en plaques ou billettes, ils subissent une transformation à chaud par laminage, filage, forgeage...etc. Suivant le processus par lequel les différents niveaux de caractéristique mécaniques sont obtenus, on distingue les alliages à durcissement structural (trempant) et les alliages non susceptibles de durcissement structural (non trempant). Ces alliages se montrent avec des bonnes résistances mécaniques, une bonne ductilité, une résistance à la propagation des fissures, appréciable résistance à la fatigue, résistant aux corrosions et ayant une bonne conductibilité électrique. (36)

Chapitre III :
Méthodes Expérimentales

Chapitre III
Méthodes Expérimentales

III.1 Introduction

L'aluminium est un matériau très bénéfique, il est très demandé dans les différentes industries à cause de ses propriétés que l'on retrouve uniquement en lui, comme (sa légèreté, sa résistance à la corrosion, sa conductivité thermique et électrique etc…

Le problème majeur de ce matériau précieux c'est dureté, elle est très faible en la comparant à celle de l'acier. Des recherches permanentes sont faites pour essayer d'en modifier cette propriété.et de le rendre ainsi dure en gardant toutes les autres caractéristiques.

Ce chapitre est consacré pour l'identification de l'alliage d'aluminium utilisé, les préparations des échantillons, l'examen métallographique avant et après déformation plastique par écrouissage. A la fin on pratique un traitement thermique de recuit d'homogénéisation pour essayer d'atténuer les effets néfastes de l'écrouissage, et de rendre le matériau plus ductile avec un dureté plus élevée.

III.2 Préparation des échantillons

III.2.1 Alliage Utilisé

AW2017 -T451 Alliage aluminium-cuivre à usinabilité améliorée)

a) Normes équivalentes internationales

Europe EN 573	France AFNOR	Allemagne DIN	Grande Bretagne BS	Italie		USA ASTM	Japon JIS
2017 A (AlCu4MgSi)	2017 A	AlCuMg1	2017 A	3579	9002/2	2017 A	A 2017

b) Composition nominale svt EN 573-1

Silicium (Si)	>0,2 à <0,8 %
Fer (Fe)	<0,7 %
Cuivre (Cu)	>3,5 à <4 %
Manganèse (Mn)	>0,4 à <1 %
Magnésium (Mg)	>0,4 à <1 %
Chrome (Cr)	<0,1 %
Zinc (Zn)	<0,25 %
Aluminium (Al)	Reste
Densité	2,8

c) Avantages

- Bonnes caractéristiques mécaniques (idem S235JRG2)
- Bonne conductivité thermique
- Bonne usinabilité

d) Précautions d'usage
Non soudable, non pliable, difficilement cintrable

Comme tout alu de la série 2000, requiert un traitement anti-corrosion Comme tout alu contenant du cuivre, n'est pas alimentaire. Eviter l'emploi en atmosphère saline

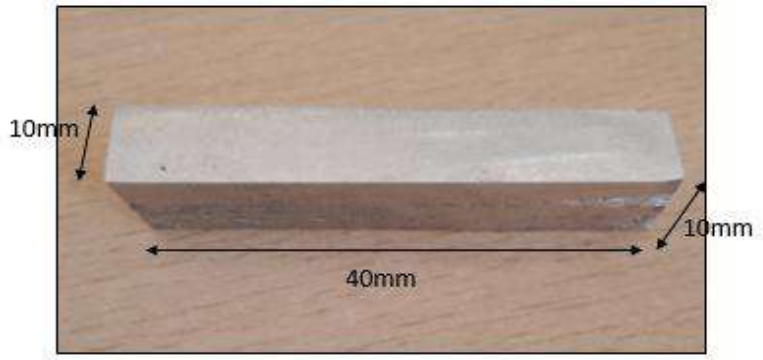
e) Domaines d'application

Pièces de mécanique. Pièces de machine. Plaques de base. Plaques chauffantes .

.

III.3 : Découpage

On a reçu une barre d'aluminium de dimensions en millimètre (40x30x1000), on l'a coupé en morceau de (40x10x10). forme rectangle , utilisant à lame avec humide , Chaque morceau est considéré comme échantillon pour notre travail.



:**Figure III.**1 : Les échantillon d'alliage étudié

III.4 : Mesure de dureté.

III.4.1 : Définition

La dureté peut être définie comme la résistance qu'oppose un matériau a sa pénétration par un corps plus dur que lui. L'appareil utilisé et de marque SKF-MAB, permet de travailler en marche manuelle ou automatique.

III.4.2 : Dureté Brinell

L'essai consiste à imprimer dans le métal sous une charge P, une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre D, selon la norme NF A 03 – 152.
Après suppression de la charge et enlèvement de la bille, on mesure les diamètres d de l'empreinte obtenue.la dureté est représenté par HB qui est égale au rapport de la charge P sur la surface, exprimée en daN.

$$H\,B = \frac{p}{s} = \frac{2P}{\pi D(d - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

- **HB** : dureté brinell ;

- **P** : charge d'essai (N) ;
- **D** : diamètre de la bille (mm) ;
- **d** : diamètre de l'empreinte (mm).

La dureté d'un métal est la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un autre matériau plus
dur que lui. Plusieurs types d'essais de dureté normalisés sont couramment utilises, leur principe est le même, ils ne diffèrent que par la forme, le matériau du pénétrateur, et la valeur de la charge appliquée. Dans notre étude nous allons utiliser l'essai de BRINELL dans le quelle on utilise une bille en acier trempé, de diamètre 2.5 mm, et une charge de 30 Kg Fig (III 2).



Figure.III.2 : Duromètre Brinell



Figure III.3 :échantillon après l'essai de dureté brinell

III.5 : Examen métallographique.

III.5.1 : Polissage :

Les échantillons destinés à la métallographie et à l'essai de dureté brinell, sont polis sur du

papier abrasif aux carbures de silicium de différentes granulométries (1000, 1200 et 2400). Le polissage de finition est pratiqué par un papiers feutre, imprégné ,d'une pate diamantée (1 μm) soluble dans l'eau.

III.5.2 : Les polisseuses :

Pour obtenir une surface plane et la qualité de surface miroir, on a utilisé une polisseuse présentée dans la Figure III.4 Un liquide diamanté est représenté dans la Figure III.4.



Figure III.4 : La polisseuse labo IMS.

III.5.3 : Attaque chimique

L'observation des échantillons au microscope optique nécessite une attaque chimique pour

révéler la structure. Le réactif utilisé est le Keller dont la composition est la suivante :

- Acide fluorhydrique (HF) : 1ml
- Acide chlorhydrique (HCl) : 1.5ml
- Acide nitrique (NHO3) : 2.5m
- Eau distillée (H2O) : 95ml

Les échantillons sont nettoyés à l'eau distillée, séchés à l'aide d'un séchoir électrique, puis attaqués chimiquement par le keller pendant 20 s à 30s.

III. 6 : Métallographie Optique

L'examen métallographique a pour but la mise en évidence des structures métallographiques. Les échantillons destinés à l'observation sont polis successivement sous

eau par meulage mécanique sur papiers abrasifs de granulométrie décroissante, puis suivis d'un polissage de finition par une suspension l'alumine sur un drap fine . Les différentes structures sont révélées par une attaque chimique au Keller .

L'observation microscopique est réalisée avant et après traitement thermique pour chaque échantillon sous grossissement X100, à l'aide d'un microscope optique de type ZEISS AXIOVER T40 MAT équipé d'une caméra photo numérique (figure 5).



Figure III.5 : Microscope optique du labo IMS.

III.7: Déformation plastique par écrouissage

La technique utilisée dans notre travail est de donner des coups très violents avec un marteau sur l'échantillons sans arrêt durant une durée de 5 minutes, jusqu'à la sa déformation, on remarque que ses dimensions sont changées ainsi il est devenu plus long et plus aplatis.

III.8.Traitement thermique

III.8.1 : Traitement de recuit d'adoucissement

Le but principal d'adoucir un matériau est 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.

III.8.2 : Refroidissement lent (recuit) :

Il faut éviter de refroidir lentement l'aluminium mise en solution, c'est-à-dire de passer lentement de l'état (Al+Al cu) à l'état (Al). En occurrence, il se forme de gros précipités aux joints de

grains et les propriétés ne sont pas maximales **,** on obtient ainsi des propriétés équivalentes a celles de l'état recuit. Pour avoir un effet maximal sur les propriétés, les précipités doivent se produire partout dans les grains et ils ne doivent pas êtres trop gros.

III.8.3: Four utilisé

Pour les traitements thermiques nous avons utilisé le four Nabertherm, qui est alimenté sous une tension de 220/240V avec une puissance P de 3,3 KW. Il est constitué d'une chambre isolée thermiquement appelée moufle et protégé extérieurement par une carcasse métallique. Sur les murs internes de four on trouve des résistances métalliques destinée produire la chaleur nécessaire pour le chauffage, dont la température maximale attient 1300°C. Afin d'assurer la régulation de la température de chauffage, la vitesse de chauffage et la durée de séjour le four est équipé d'un régulateur de type OMRAN et un thermocouple placé dans la chambre du four permettant ainsi la mesure instantanée de la température.



Figure III.6: Four de traitement thermique

Nous avons réglé le four de traitement thermique à une température de 250 C°, et ils sont entrés dans l'échantillon pendant 2 heures, et après l'avoir sorti, nous l'avons laissé refroidir, et nous avons répété les mêmes étapes sur un autre échantillon, mais à une température de 500 C°

III.9.Résultats et discussions

III.9.1: Caractérisation microstructurale

Après le polissage et l'attaque chimique , les échantillons ont été observés au microscope optique . Les micrographies obtenues sont présentées dans les figures (III.7 – III.10) avec un grossissement de X100

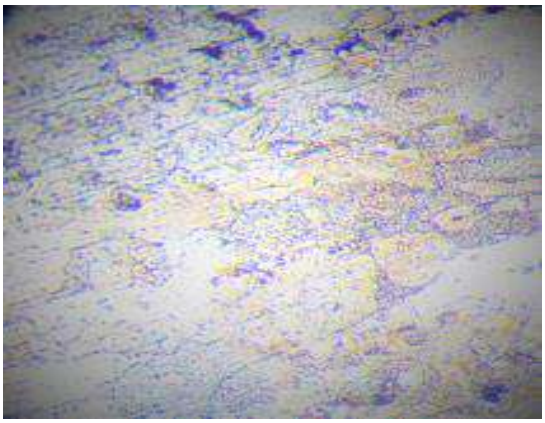


Figure III.7 : Micrographie du Matériau A 2017 à l'état réceptionné

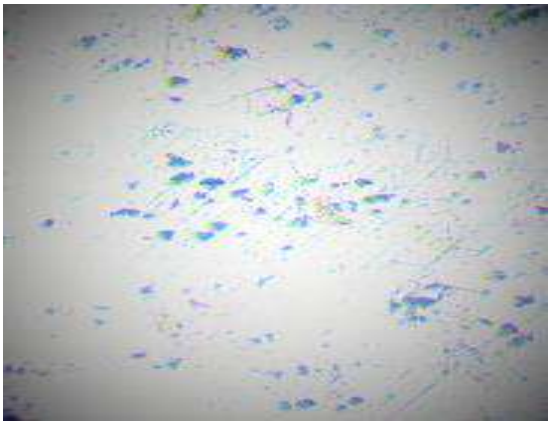


Figure . III.8: Micrographie optique de l'aluminium après déformation

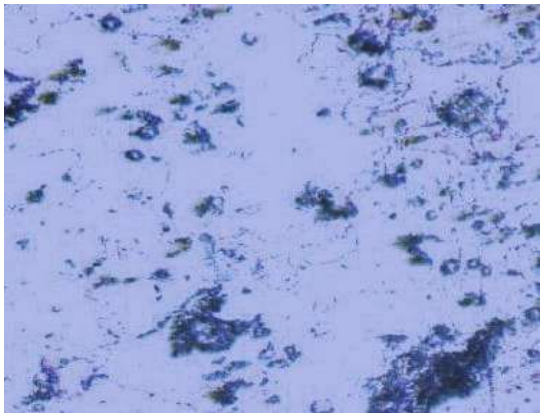


Figure III.9: Micrographie optique de l'aluminium à température à 250°c

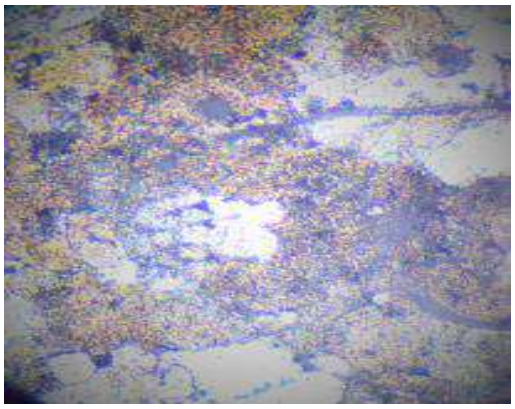


Figure III.10: Micrographie optique de l'aluminium à température à 500°C

* La figure III.7, représente la microstructure optique de l'échantillon de l'alliage étudié à l'état de réception. On observe une hétérogénéité de la taille des grains et des particules à l'intérieur de ces grains. Ces particules sont reparties de façon aléatoire.

L'analyse micrographique du facies de l'échantillon sollicité, Fig.III.8 : a montré la présence d'une zone pré-superficielle avec une Taille réduite de grain ,c'est la cause principale qui a amélioré les propriétés mécaniques en produisant une compression à la surface des grains qui vout en pêcher le mouvement des dislocations

-À température 250°C

Après traitement thermique à une température de 250°C pendant 2 heures, dans ce cas on remarque l'apparition de petites particules et granulés.

Et on remarque qu'il y a 2 phase α et AlCu .

À température à 500°c :

Après traitement thermique de l'échantillon à une température de 500 C° pendant 2 heures, dans ce cas, on observe une augmentation de la taille des grains et une forte densité de particules.

Et on remarque qu'il y a 2 phase α et AlCu Pour revenir à l'état initial.

III.9.2.Résultats des duretés

Tableau III.1 : Résultats des duretés

Etat de l'aluminium	Avant déformation	Après déformation	Température de chauffage 250°C	Température de chauffage 500°C
Dureté HB	118	145	127	111

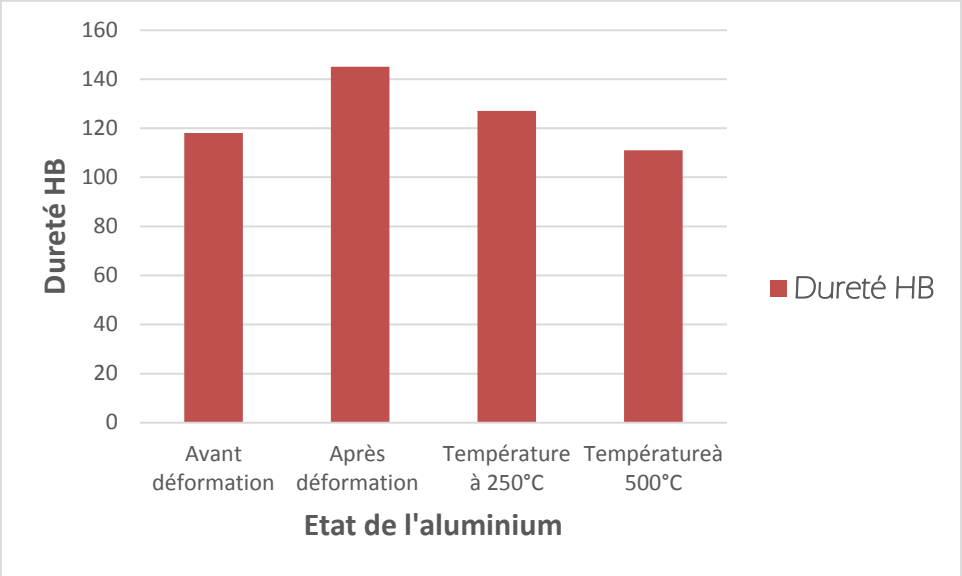


Figure III.11: Résultats des duretés

La dureté a été mesuré après la déformation on a remarqué qu'elle a augmenté ce qui signifie qu'il Ya un changement dans le matériau, et ce résultat explique le résultat de transformation de l'état microscopique du matériau.

La dureté a été mesuré après de traitement thermique on a remarqué qu'elle a diminué ce qui signifie qu'il Ya un changement dans le matériau, et ce résultat explique le résultat de transformation de l'état microscopique du matériau.

Après déformation, la valeur de dureté augmente, et cela est dû à l'augmentation de la pression, et après traitement thermique, la valeur de dureté diminue, et cela est dû au manque de pression interne de l'alliage, et donc à une modification de la structure d'origine du matériel et son amélioration.

Nous concluons à travers cette étude que le traitement thermique affecte la microstructure de l'alliage d'aluminium cuivre et donc les propriétés mécaniques (dureté).

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail était de focaliser plus de lumière sur l'influence des changements microstructurales pendant les traitements thermomécaniques d'un alliage d'aluminium cuivre (A2017) sur ses propriétés mécaniques.

1. La technique utilisée était la déformation à froid par forgeage manuel. La microstructure a montré que les grains ont changé de forme, par conséquence une augmentation de la dureté est constatée, alors que le matériau est devenu difficilement usinable.
2. Pour résoudre ce problème, on a pratiqué un traitement de recuit d'adoucissement qui comporte un chauffage à une température de 250°C, suivi d'un maintien de 2h à cette même température puis un refroidissement long dans l'air à la température ambiante 22 °C.
3. Ce traitement a attenu la dureté Brinell, elle est passée de 130 à 122, mais elle est assez importante que celle avant déformation. .

Référence bibliographie

Références bibliographie :

1. Cours Traitements thermiques, Classification et Désignation des aciers et fontes, Pr. Bensaada Said Professeur Chef d'équipe de recherche, Laboratoire LARRHYS, Faculté des sciences et de la technologie, Univ. de Biskra.
2. Hadid, M-D, Évolution de la microstructure et des propriétés mécaniques au tréfilage des alliages d'aluminium, Mémoire de magistère, École national de polytechnique, (2012
3. A .As serin -Lebret, Thèse doctorat, Ecole national supérieur des mines de paris.(2005). 20 I. Lakhtine.
4. Métallographie et traitements thermiques des métaux, 2eme édition revue Edition Mir. Moscou. 1986, pp. 367 - 386.
5. S. Vyazovkin, D. Dollimore**,** J. Chem. Inf. Comput. Sci., 36 p42-55(1996)
6. A.I.Morley, M.W.Zandbergen, A.Cerezo, G.D.W.Smith, Materials Science Forum. 519-521, 2006, pp. 543-548.
7. P. Achon. Comportement et ténacité d'alliages d'aluminium à haute résistance. PhDthesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1994.
8. JM. DORLOT JP. BAILON J. MASOUNAVE. Des Matériaux.Montréal, Editions de L'Ecole Polytechnique de Montréal, 1986.
9. Georges Chaudron, in « La préparation industrielle de l'aluminium et la découverte de ses propriétés par un illustre savant français, Henry Sainte-Claire Deville », Revue de l'aluminiumno 211, juin 1954, p. 97, publié par l'Institut d'histoire de l'aluminium.
10. Develay, R., Données numériques sur l'aluminium non allié, Les Techniques de l'ingénieur. M443.
11. www.educreuse23.ac-limoges.fr/loewy/aa/voisin
12. Document technique de l'ingénieur: "L'aluminium non Allié" Par Roger DEVELAY Ingénieur de l'École Nationale Supérieure d'Électrochimie et d'Électrométallurgie de Grenoble
13. Paul Depovere, La classification périodique des éléments. La merveille fondamentale de l'Univers, De Boeck Supérieur, 2002, p. 98.
14. Totten, G. E. and D. S. MacKenzie (2003). Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes, CRC Press.
15. http://www.world-aluminium.org/statistics/.
16. M. Colombie et all : Matériaux industriels, Matériaux métalliques.(proprieté chimique)
17. M. Murayama, K. Hono, W.F. Miao et D.E. Laughlin, Metallurgical and Materials Transactions *A*, vol. 32A, 2001, 239–246.
18. F. Serradj, mémoire de Magister, Université de Constantine, Algérie (2005).
19. C.Varel, Le comportement de l'aluminium et de ses alliages, Ed. Dunod technique, Paris (2004) 25.
20. George E. Tot ten, D. S. M. (2006). "handbook of aluminium volume 2 Alloy Production and materials manufacturing."
21. J. Lanthony, l'aluminium et les alliages légers. Ed. Presses Universitaires de France, Paris (1984) 55.

22. D. M. Laughlin and W. F. Miao, Journal of Materials Science Letters, 21 (2001) 320-329
23. R., P. C. Varley, Factors influencing drittleness in AlMgSi alloys, J. I. Metals 82
24. (1953Harris-1954) 379-393.
25. The Aluminum Association, 1525 Wilson Boulevard, Arlington, VA 2220 www.aluminum.org . Revised: April 2006.
26. W. F. Miao, D. E. Laughlin, Met. Mater. Trans, 31(A) (2000) 361-371
27. M. Bayarassou : Effet des traitements de vieillissement sur l'évolution de la structure et les propriétés mécaniques des fils en alliages d'aluminium (AGS) tréfilés à L'ENICAB. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, (2018).
28. F. Serradj : Etude de la cinétique de précipitation dans les alliages Al-Mg-Si contenants différentes teneurs des éléments d'additions. Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, (2014).
29. k. Djabri : Etude de l'influence des traitements thermiques sur les propriétés des alliages Al-Mg-Si contenants différentes teneurs des éléments d'additions. Mémoire de Master, Université de Larbi Tebbesi, Tebessa, (2016).
30. F. Z. Lemmadi : Caractérisations des alliages à base d'aluminium et étude de l'effet des traitements thermiques sur la microstructure et la taille des grains. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, (2014).
31. L. R. Loewy : Aluminium et alliages d'aluminium. Vol 2 (2014).
32. H.Fareh : Etude de l'évolution de la microstructure et des propriétés thermomécaniques d'une série d'alliage d'aluminium. Thèse de doctorat, Université de Larbi Ben M'hidi , Oum El Bouaghi, (2012).
33. S.Yahi : Contribution à l'étude microstructurale des Alliages d'aluminium AlMgSi. Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi,(2012).
34. Bouchelaghem : Etude des phénomènes de précipitation dans un alliage Al-Mg-Si à excès de Si. Mémoire de Master, Université 8 mai 1945, Guelma,(2019).
35. Boudilmi : Contribution à la caractérisation des revêtements et des matériaux stratifiés par microdureté et tenue à l'usure. Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif, (2017).
36. T.Abid : Etude calorimétrique et dilatométrique d'un alliage Al-Mg-Si. Mémoire de magister, Université Mentouri, Constantine (2007).