République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique
Université Dr. Yahia Farés de Médéa



Faculté de la Technologie

Département du Génie Mécanique

Option ingénierie des Matériaux et des Surfaces

MEMOIRE

Présenté en vue d'obtention de diplôme de

MASTER

THEME

MODIFICATION DES PROPRIETES MECANIQUES D'UN ALLIAGE D'ALUMINIUM A2017 PAR TRAITEMENTS THERMIQUES TREMPE ET REVENU

Présenté Par :

- **BEN CHAA Rabeh**
- **HAMMADI Ahmed**

Directeur de thèse :
Dr.BENIMAM Samir

Année universitaire
2021 /2022

Dédicaces

Je dédie ce Modest travail à :

- ***Mes chers parents.***
- ***Mes sœurs.***
- ***Mes frères.***
- ***Tous mes amis.***

Ahmed

Je dédie ce Modest travail à :

- ***Mes chers parents.***
- ***Mes sœurs.***
- ***Mes frères.***
- ***Tous mes amis.***

Rabah

Remerciements

Au début, Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant, quinous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier tout particulièrement notre encadrant Dr. Samir BENIMAM qui nous a suivi et conseillé pour la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons à remercier toute l'équipe du laboratoire IMS de L'Université Yahia Fares et l'équipe de fonderie POVAL BEROUAGHIA.

Nous tenons à remercier aussi à tous les enseignants du département de Génie Mécanique Option ingénierie des Matériaux et des Surfaces de l'Université de Médéa.

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères aux personnesqui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Je remercie les membres du jury qui ont bien voulu accepter de juger ce modeste travail.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui M'ont apporté leurs conseils ou leurs contributions.

TABLE DES MATIERES

Table des matières 4
resumé 6
ملخص 7
Liste des figures 8
Liste des tableaux 9
Introduction générale 10
Chapitre 1 : L'aluminium et ses alliages 12
I.1. INTRODUCTION 12
I.2. HISTORIQUE 12
I.3. L'ALUMINIUM 13
I.3.1. Fabrication de l'aluminium 14
I.3.2. Les propriétés principales de l'aluminium 15
I.3.3. ALLIAGES D'ALUMINIUM 17
I.3.4. Diagramme des phases de l'alliage Al-Cu 26
Chapitre II : Traitements thermiques 28
II.1 TRAITEMENTS THERMIQUES DES MATÉRIAUX [15]. 28
II.1.1 Vieillissement thermique 28
II.1.2 : Le recuit : 29
II.1.3 Traitement de trempe structurale [18] 30
chapitre III : Techniques expérimentales 35
III.1 INTRODUCTION 35
III.2 FOUR UTILISÉ 36
III.3 PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS 36
III.3.1 Découpage : 36
III.3.2 Trempe 37
III.3.3 Revenu : 39
III.3.4 Polissage : 40
III.3.5 Examens microscopiques : 41
III.3.6 Mesure de la dureté 42

chapitre vi : résultats et discussions 45
IV.1. CARACTÉRISATION MICROSTRUCTURALE 45
Deuxième partie chapitre IV : Interprétation des résultats 48
IV.1 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSIONS 48
IV.1.1 Mise en Solution 48
IV.1.2 Refroidissement rapide 48
IV.1.3 Revenu 48
IV.1.4 Dureté 49
IV.2 RÉSULTATS 51
IV.2.1 Traitement de trempe : 51
IV.2.2 traitement de revenu 52
Conclusion Générale 55
Références Bibliographiques 56

RESUME

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 thermiques (trempe et revenu) 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 concentration des précipités sur les joints de grains qui est due à la saturation des phases α d'élément de cuivre, à cause de la trempe et la vitesse rapide de refroidissement qui n'a pas laissé de temps à reconstruction des grains équilibrée, la cause principale de l'augmentation de la dureté car ces derniers ont empêché et gêner le mouvement des dislocations.

Mots clés :

Alliages Aluminium cuivre, Trempe, Revenu, Microstructure, traitement thermique, dureté.

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 (التبريد والتلطيف) على الخواص الميكانيكية لسبائك الألومنيوم والنحاس لمعيار 2017 المستخدم على نطاق واسع في تصنيع الأجزاء الميكانيكية والقوالب لإنتاج القطع البلاستيك المصنوع بواسطة عمليتين معروفتين وهما الحقن أو النفخ.

يتوافق السلوك الميكانيكي للألمنيوم 2017 بعد معالجتنا مع البيانات المنشورة الأخرى لسبائك مماثلة. أظهر الفحص المجهري تركيز الرواسب على حدود الحبوب والذي يرجع إلى تشبع أطوار العنصر النحاس ، بسبب التبريد السريع الذي لم يترك وقتًا لإعادة بناء الحبوب المتوازنة ،و هو السبب الرئيسي في زيادة الصلابة لأنها تمنع وتعيق حركة الاضطرابات الداخلية.

الكلمات الدالة :

سبائك الألومنيوم والنحاس ، التبريد ، التقسية ، البنية المجهرية ، المعالجة الحرارية ، الصلابة

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: scouring, plastic deformation, heat and thermochemical treatments, etc.

The objective of this work is to study the effect of heat treatments (quenching and tempering) on the mechanical properties of the aluminum copper alloy of the 2017 standard widely used in the manufacture of mechanical and mold parts for the production of aluminum parts. Plastic 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. The micrographic examination showed the concentration of the precipitates on the grain boundaries which is due to the saturation of the α phases of the copper element, because of the quenching and the rapid rate of cooling which did not leave time for reconstruction of balanced grains, the main cause of the increase in hardness because these have prevented and hinder the movement of dislocations.

Key words :

Aluminum copper alloys, quenching, tempering, microstructure, heat treatment, hardness.

LISTE DES FIGURES

Figure	page
Chapitre I : L'aluminium et ses alliages	
Figure I.1 : Lingots d'aluminium	13
Figure I.2 : Le principal minerai d'aluminium est la bauxite	14
Figure I.3 : Fabrication de l'aluminium	15
Figure I.4 : Diagramme d'équilibre d'un alliage Al-Cu entre 0% et 60% de masse de cuivre	27
Chapitre II : Généralités sur les traitements thermiques	
Figure II.1 : Structure cristalline de l'aluminium a différentes états des traitements thermique	33
Figure II.2. : Diagramme des phases d'alliage Al-Cu entre 0 à 10% de masse de cuivre	34
Chapitre III : expérimentale	
Figure III.1. Four programmable	36
Figure III.2. les échenillant	37
Figure III.3. Four programmable ouverte	37
Figure III.4. Diagramme temps température de traitement de trempe pratiquée sur notre échantillon	38
Figure III.5. Refroidissement des échantillons dans l'eau et dans l'huile	39
Figure III.6 : Diagramme temps température de traitement de trempe pratiquée sur notre échantillon	39
Figure III.7. . La polisseuse labo IMS	40
Figure III.8. : Diamonds suspension	41
Figure III.9. : Microscope optique du labo IMS	42
Figure III.10. : : Essai de dureté Brinell	43
Figure III.11. Duromètre POVAL BEROUAGHIA	44
Figure III.12 : Les empreintes essai de dureté sur les échantillons la différance de changement de la dureté trempe et revenu	44

chapitre vi : résultats et discussions	
Figure VI. 1 : Microstructure dans le métal de base 2017, T° = 451	45
Figure VI.2. Microstructure de l'échantillon à microscope optique a) Trempe 520° pendant 2h refroidit a l'eau	46
Figure VI.3. Microstructure de l'échantillon à microscope optique a) Trempe à 520°C pendant 2h et refroidit à huile	46
Figure VI.4. Microstructure de l'échantillon à microscope optiquea) Trempe 520° pendant 1h et refroidit à l'eaub) revenu 2h a 240°c	47
Figure VI.5 Microstructure de l'échantillon à microscope optique	47
Figure VI.6 : transformations structurales pendant les traitements thermiques appliqués	49
Figure . VI.7 : Les empreintes de l'essai de dureté brinell sur échantillon	49
Figure VI.8 .L'histogramme des duretés pour l'échantillon trempé et refroidit à l'eau et à huile	51
Figure IV.9 La dureté des échantillons revenu avec des temps de maintien différents	52
Figure IV.10 l'histogramme représente la comparaison entre les moyennes dureté brinell HB à la trempe et le revenu	54

.

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU	page
Tableau I.1: Quelques Propriétés physiques et mécaniques de l'aluminium	16
Tableau I.2: : Familles d'alliages d'aluminium corroyés	19
Tableau I.3 : Désignation des états métallurgiques de base	19
Tableau I.4 : Familles d'alliages d'aluminium moulés	22
Tableau I.5 : Désignation des états métallurgiques des produits moulés	22
Tableau I.6: : Influence de éléments d'addition	24
Tableau I.7: : Composition chimique de l'alliage 2017A	25
Tableau I.8: Caractéristiques mécaniques typiques de l'alliage d'aluminium 2017	26
Tableau VI. .1: Valeur des différentes duretés pour l'aluminium trempé et refroidi à l'eau ou à l'huile avec des durées de maintiens différentes	50
Tableau VI.2 : Valeur des différentes duretés pour l'aluminium trempé et refroidi à l'eau ou à l'huile et revenu à des durées de maintiens différentes	52
Tableau Tableau IV.3 : Tableau récapitulatif des résultats de dureté pour les deux traitement pratiqués (trempe et revenu)	53

INTRODUCTION GENERALE

L'utilisation des matériaux dépend de leur disponibilité, de leur cout, de leur facilite de mise en forme et de leur compatibilité avec l'environnement (propriétés mécaniques, physiques et chimiques).tout progrès technologique important est souvent lie au développement de matériaux dotes de proprietes améliorées ou de nouveaux matériaux. De toutes les méthodes destinées à améliorer la résistance des métaux, celle qui a eu le plus de succès est le durcissement par précipitation, pour un métal très ductile, tel que l'aluminium ou le cuivre.

Le durcissement par précipitation permet d'atteindre des résistances élevées tout en conservant une ductilité satisfaisante [1]. La technique est fondée sur le fait que certaines phases solubles a haute température peuvent par des méthodes appropriées, de trempe et revenu, être partiellement ou complètement éliminée sous la forme d'une dispersion durcissant a des températures proches de la température ambiante.

Le durcissement par précipitation est devenu la plus technique importante pour accroitre la résistance des alliages, non seulement de ceux qui sont destines a travailler aux températures ordinaires, mais aussi de ceux qui sont utilises sous des températures de 1000 °c et même plus [2].

Les applications du durcissement structural dans les alliages légers sont extrêmement nombreuses et importantes ; elles couvrent un vaste champ industriel.

La précipitation dans les alliages d'aluminium et le phénomène de durcissement structural sont des exemples types d'une problématique scientifique ou l'innovation industrielle, les chercheurs théoriciens, les expérimentateurs et les instruments d'observation et de caractérisation ont progresse ensemble, et progressent encore. La précipitation d'une nouvelle phase, de manière extrêmement fine, a partir d'une solution solide sursaturée est la base du durcissement structural des alliages d'aluminium.

Dans ce travail nous avons utilise différentes techniques de caractérisation les mesures de la dureté et l'observation métallographique par microscopie optique.

En plus d'une introduction ou on présente et on justifie le choix de ce thème de recherche, et d'une conclusion ou on résume l'essentiel des résultats obtenus et d'une liste des références bibliographiques consultées, ce mémoire est constitué de trois chapitres :

- Le premier chapitre s'intéresse aux notions générales sur la précipitation dans les alliages a base d'aluminium.
- Le second chapitre est un rappel sur traitement thermique et thermo chique pour les alliages de l aluminium.
- Le troisième chapitre présente des méthodes expérimentales utilisées, c'est-a-dire le four pour traitement thermique la microscopie optique pour structure et appareil mesure de dureté, les résultats expérimentaux obtenus par les différentes techniques et leurs interprétations.

CHAPITRE I

L'aluminium et ses alliages

CHAPITRE 1 : L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

I.1. Introduction

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

L'aluminium est peu utilisé à l'état pur , sauf en miroiterie, du fait de sa faible résistance mécanique (au maximum 20kg/mm^2), d'où son utilisation sous forme d'alliages. En effet , l'addition contrôlée des éléments d'alliages tels que le cuivre, le silicium, le magnésium, le manganèse ,le titane, le chrome, le zinc et le cobalt améliorant les propriétés mécaniques. [1]

I.2. Historique

L'aluminium a connu un développement spectaculaire depuis sa naissance en 1854symbolisée par la présentation à l'académie des sciences, par le chimiste français sainte claire De ville, d'un petit lingot réalisé par voie chimique. Mais le véritable début du développement industriel de l'aluminium et ses alliages se produit en 1886 avec l'invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium par Paul Héroult en France et Charles Martin Hallaux Etats-Unis. L'aluminium est aujourd'hui le premier métal non ferreux ; entonnage, il a supplanté l'étain dans les années 1920, le plomb dans les années 1940, le zinc puis le cuivre dans lesannées1950.

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

La consommation mondiale annuelle d'aluminium franchira les 40 millions de tonnesdont15 millions de métal recyclé.

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

Les alliages d'aluminium se prêtent également à tous les processus de transformation : laminage, filage, matriçage, moulage, etc. Ceci explique qu'ils soient aujourd'hui utilisés dans la plupart des grands marchés industriels : transports terrestres, maritimes ou aérospatiaux, emballage, bâtiment, électricité, mécanique [2].

I.3. L'aluminium

L'aluminium est l'élément le plus répondu dans la nature (8% de l'écorce terrestre),que l'on extrait du minerai de bauxite. C'est un métal blanc argenté, de masse volumique 2,7g.cm^{-3} et de masse atomique égale à 26,27 g.mol^{-1}, il fond à 660°C. C'est un bon conducteur d'électricité et de chaleur, il résiste bien à la corrosion grâce à la fine couche d'oxyde de structure amorphe couvrant sa surface extérieure. L'aluminium est trivalent et a un caractère amphotère. Exposé à l'air, l'aluminium se recouvre totalement d'une fine couche d'alumine transparente, continue, adhérente, auto cicatrisante et protégeant le métal contre l'oxydation. Le film d'oxyde est relativement stable dans les solutions aqueuses. La résistance de ce film diminue de manière drastique dans les solutions alcalines et acides [3,4].



FigureI.1 : Lingots d'aluminium [5].

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 (superstructure et équipements), bâtiment (toiture, baies, façades, aménagement intérieur), industrie électrique (câbles et appareillages), boites boisson, etc.

L'aluminium pur n'a pas une très grande résistance mécanique mais ses alliages peuvent avoir des propriétés remarquables : 75 % des structures des avions airbus et Boeing sont en aluminium. Le dernier saut technologique en date est la mise au point des alliages aluminium-lithium (avion rafale) [2].

I.3.1. Fabrication de l'aluminium

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre, c'est le troisième élément après L'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium. La bauxite est le minerai le plus utilisé pour obtenir de l'alumine, matière intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium. La bauxite contient de 40 à 60% d'oxyde d'aluminium hydraté mélangé à de la silice et à de l'oxyde de fer [2].



Figure I.2: Le principal minerai d'aluminium est la bauxite [7].

L'aluminium est produit par électrolyse de l'alumine dans de la cryolithe (Na_3AlF_6) fondue, à environ 1000°C dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone.

L'aluminium se dépose au fond de la cuve avec un titre de 99,7% (les principales impuretés étant le fer et le silicium).

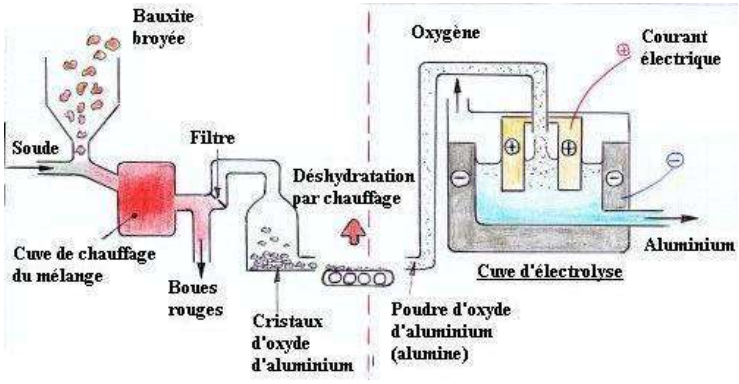


Figure I.3: Fabrication de l'aluminium [8].

L'aluminium passe ensuite dans une station d'affinage, avant sa transformation au laminage en produit.

I.3.2. Les propriétés principales de l'aluminium

I.3.2.1. Propriétés physiques de l'aluminium

Pour un même volume, l'aluminium est trois fois plus léger que l'acier. Les seuls métaux plus légers que l'aluminium sont le lithium, le béryllium et le magnésium. Sa faible densité et la valeur élevée du rapport de la résistance mécanique à la masse font de l'aluminium un matériau recherché dans la construction aéronautique, ferroviaire et l'industrie automobile. L'aluminium et ses alliages sont aussi utilisés dans les réacteurs nucléaires. En effet, l'aluminium absorbe relativement peu de neutrons . Les physiques de l'aluminium sont regroupées dans le tableau I.1 [9,10].

I.3.2.2. Propriétés mécaniques de l'aluminium

L'aluminium commercialement pur possède, à l'état recuit, des propriétés mécaniques faibles (tableau I.1). On peut toute fois améliorer considérablement ces propriétés par écrouissage, addition d'éléments d'alliage ou traitements thermiques, selon les cas.

L'aluminium et ses alliages ont une structure cristalline cubique à faces centrées. Ils font donc preuve, à l'état recuit, d'une excellente ductilité à toute température [10].

Tableau I.1: Quelques Propriétés physiques et mécaniques de l'aluminium [11].

Propriété	Unité	Valeur	Remarque
Massevolumiqueρ	$Kg.m^{-3}$	2698	
Pointdefusion	°C	660.45	Sous101310^{-5}bar
Pointd'ébullition	°C	2056	Sous101310^{-5}bar
Pressiondevapeur	Pa	$3.7.10^{-3}$	à 927°C
Energieinterne massiqueμ	$J.Kg^{-1}$	$3.98.10^{5}$	
Capacité thermique Massique Cp	$J.Kg^{-1}.K^{-1}$	897	à 25°C
Conductivité thermique λ	$W.m^{-1}.K^{-1}$	237	à 27°C
Coefficient de dilatation linéiqueα_1	10-6K-1	23.1	à 25°C
Résistivité électrique ρ	$10^{-9}\Omega$ .m	26.548	à 25°C
Susceptibilité Magnétique K		$0.6.10^{-3}$	à 25°C
Module d'élasticité Longitudinal E	MPa	69000	
Coefficient de poisson ν		0.33	

Les caractéristiques physiques de l'aluminium dépendent des traitements thermiques (Trempe, recuit, etc.), des traitements mécaniques (forgeage, laminage, etc.), ainsi que des éléments d'addition.

I.3.2.3. Propriétés électrochimiques

Résistance à la corrosion

La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium explique le développement de ses nombreuses applications dans le bâtiment, les transports, l'équipement du territoire, la construction

navale...milieux dans les quels les conditions d'emploi peuvent être sévères.

La tenue à la corrosion dépend des paramètres suivants :

- Le métal lui-même : sa composition, son état métallurgique, l'état de surface ;
- Les caractéristiques du milieu dans le quel il est exposé : humidité, température, présence d'agents agressifs, etc. ;
- Les conditions de services prévues ;
- Le mode d'assemblage éventuel des structures, les dispositions constructives ;
- La durée de vie espérée, la fréquence d'entretien ;

Il n'y a pas de métal ou d'alliage universel du point de vue tenu à la corrosion. Pour un même matériau, toutes les nuances n'ont pas la même résistance aux différentes formes de corrosion [11].

I.3.3. Alliages d'aluminium

La nuance de l'alliage est déterminée selon les principaux éléments additionnés à l'aluminium. Ces éléments sont généralement le cuivre, le magnésium, le silicium, le zinc, le manganèse. On peut trouver, d'autres éléments qu'on retrouve sous forme de trace vu leur limite de solubilité dans l'aluminium, ce sont : le chrome, le cadmium, le bismuth, le titane, le fer, le zirconium, le cobalt, le lithium, l'étain et les terres rares [4,12].

I.3.3.1. Rôle des principaux constituants

On distinguera les additions principales déterminantes pour les propriétés du matériau et les additions secondaires, en faible quantité , qui ont une action spécifique[13].

a) **Le silicium:** confère à l'alliage d'excellentes propriétés de fonderie, telles qu'une augmentation de la coulabilité, une diminution de la criquabilité et de l'aptitude à la retassure. On note aussi une augmentation de la résistance à l'usure(le silicium est très dur), de l'étanchéité des pièces, mais une diminution de l'allongement à rupture.

b) **Le cuivre :** augmente les propriétés mécaniques par durcissement structural, principalement la dureté (donc l'usinabilité) et la tenue à chaud sans perte au niveau de la coulabilité mais diminue la résistance à la corrosion et augmente l'aptitude à la crique.

c) **Le magnésium :** augmente la résistance à la corrosion, aux dommages, l'allongement à rupture et engendre un nouveau système durcissant après traitement thermique (Mg_2Si) mais diminue les propriétés de fonderie et d'usinabilité (les copeaux ont tendance à coller aux outils , ce qui augmente leur usure).

d) **Le zinc :** très peu utilisé à cause des es médiocres capacités en fonderie et ses faibles propriétés mécaniques ,il se trouve sous forme de ternaire Al-Zn-Mg, ce qui donne un alliage à durcissement structural avec des précipités $MgZn_2$, attenu le gazage de l'alliage, améliore la coulabilité (faiblement), diminue l'allongement, augmente la tendance à la micro retassure et l'agressivité chimique de l'alliage fondu.

Chaque nuance d'alliage impose un mode d'élaboration et de transformation spéciale, parmi les quels on distingue deux modes d'élaboration:

- Les alliages de moulage
- Les alliages de corroyage

Ces derniers peuvent être subdivisés en deux catégories, les alliages à durcissement structural et sans durcissements structural [3,4].

I.3.3.2. Les différentes familles d'alliages d'aluminium

I.3.3.2.1. Alliages d'aluminium de corroyage

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).
- Les alliages non susceptibles de durcissement structural (non trempant).

Ces alliages ont une bonne résistance mécanique, une bonne ductilité, une résistance à la propagation des fissures , appréciable résistance à la fatigue, résistant aux corrosions et ayant une bonne conductibilité électrique [4].

a. Désignation des alliages corroyés

La désignation, conforme à la norme Afnor NF EN 573 ainsi qu'aux spécifications

internationales de l'Aluminium Association, est numérique à quatre chiffres dont le premier chiffre indique la famille (ou la série) à la quelle appartient l'aluminium ou l'alliage d'aluminium (tableau I.2) [14].

Tableau I.2: Familles d'alliages d'aluminium corroyés [14].

Elémentd'alliage	Famille
Aucun	1000
Cuivre	2000
Manganèse	3000
Silicium	4000
Magnésium	5000
Magnésium et silicium	6000
Zinc (et cuivre)	7000

La lettre A (ou B) peut suivre les quatre chiffres de la désignation numérique exemple 2017A. Il s'agit alors d'une composition légèrement différente et spécifique à un (ou plusieurs) pays ou à un producteur.

a. Etats métallurgiques

Ils sont conformes à la norme Afnor NFEN515 qui désigne l'état métallurgie de basse par une lettre F, O, Hou T (tableau I.3).

TableauI.3: Désignation des états métallurgiques de base [14].

	Etat brut de fabrication
O	Etat recruit
H	Etat écroui et éventuellement restauré ou stabilisé
T	Etat durci par traitement thermique

Les états F et O ne comprennent pas de subdivision. Les états H et T comprennent les subdivisions ci-après :

❖ Subdivision de l'état H :

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

H1: Ecrouissage.

H2 : Ecrouissage puis restauration.

H3: Ecrouissage puis stabilisation.

Le second chiffre indique le niveau de dureté du métal.

2 : Etat quart dur.

4 : Etat demi dur.

6 : Etat trois-quarts dur.8: Etat dur.

9 : Etat extra-dur.

b. Alliage à durcissement structural

Le durcissement structural pour cette classe d'alliage est obtenu par une gamme de traitement thermique comportant une mise en solution et une trempe suivie d'un revenu ou d'une détention artificielle. Les familles d'alliages appartenant à ce groupe sont : les alliages des séries 2000, 4000, 6000 et 7000[4].

Par exemple dans le cas de l'alliage d'aluminium Al-4%Cu le procédé de durcissement comprend les étapes suivantes :

- **Première étape** : mise en solution à 550°C de manière à dissoudre complètement le cuivre dans la solution solide d'aluminium car la solubilité limite du cuivre dans l'aluminium

est de5%à une température de 550°C.

- **Deuxième étape** : trempe à l'eau ou à l'huile jusqu'à température ambiante pour geler La solution solide du cuivre dans l'aluminium jusqu'à la température ambiante. On obtient ainsi, à cette température, une solution solide fortement saturée en cuivre et instable, car l'enthalpie libre de cette solution est loin d'être le minimum.

- **Troisième étape** : traitement de revenu à des températures comprises entre 100 et 190°C pendant des durées variant classiquement de 1 à 100 jours représentent un vieillissement artificiel. Un abandon de l'alliage à la température ambiante permet un durcissement naturel appelé maturation [15].

c. Alliage sans durcissement structural

Ce sont des alliages non trempant, le niveau de caractéristiques mécaniques dépend du taux d'écrouissage ou de la teneur en addition c.-à-d.par l'effet combiné des éléments d'addition (durcissement par solution solide) et de l'écrouissage. Si en combinant l'effet de durcissement par écrouissage et l'effet d'adoucissement par traitement de restauration ou de recuit Ils sont utilisés pour remplacer l'aluminium non allié toutes fois qu'une légère augmentation des caractéristiques mécaniques est nécessaire, ils font preuve d'une excellente tenue à en atmosphère humide et marine.

Les familles d'alliages appartenant à ce groupe sont :les alliages des séries 1000,3000,5000 et 8000[16].

d. Alliages d'aluminium de fonderie

Les alliages de fonderie sont mis en forme par moulage, Il existe différents types de moulage: le moulage en sable , le moulage en coquille ,la coulée sous pression ,etc.

Les alliages d'aluminium de fonderie constituent plusieurs familles de matériaux dont la composition est un compromis entre les propriétés de moulage (coulabilité, usinabilité, absence de criques, retrait volumique)et les propriétés d'usage de la pièce (propriétés mécaniques ,aspect de surface ,aptitude au polissage, résistance à la corrosion ,etc.).

L'obtention d'un type de propriété mécanique dépend aussi du procédée de moulage (sable, coquille, cire perdue, coulée sous pression, etc.) [15].

La résistance à la corrosion des alliages au silicium, au magnésium, au zinc est excellente. Cependant, celle des alliages contenant de fortes additions de cuivre (au moins 2 à3%) est jugée insuffisante pour les utiliser sans protection dans des milieux très agressifs [4].

e. Désignation de s alliages de fonderies

La désignation alphanumérique, autre fois en usage, a été remplacée par une désignation, comme pour les alliages de corroyage, mais en 5 chiffres, suivant la norme Afnor NF EN 1780-1. On trouvera au tableau I.5 la correspondance entre le premier chiffre et l'élément d'alliage. Cette désignation numérique est en vigueur depuis1998 [14].

Tableau I.4: Familles d'alliages d'aluminium moulés.

Elément d'alliage	Famille
Aucun	10000
Cuivre	20000
Silicium	40000
Magnesium	50000
Zinc et cuivre	70000

f. Etats métallurgiques

SelonlanormeNFEN1706, les états métallurgiques sont maintenant[1] désignés de la façon indiquée au tableau I.6.

TableauI.5: Désignation des états métallurgiques des produits moulés [14].

Etat métallurgique	Designation
Brut de fonderie	F
Recuit	O
Refroidissement contrôlé après solidification et vieillissement naturel (maturation)	T1
Traitement thermique de mise en solution et Vieillissement naturel (maturation)	T4
Refroidissement contrôlé après solidification et vieillissement artificiel ou sur-revenu (stabilisation)	T5
Traitement thermique de mise en solution et vieillissement artificiel (revenu) maximum	T6
Traitement thermique de mise en solution et sous-vieillissement artificiel (sous-revenu)	T64

On distingue les différents traitements thermiques par les notations : T1,T2...T10. Les plus utilisés pour les pièces de fonderie sont :

F:état brut de fonderie sans traitement thermique ;
T1 : mise en solution, refroidissement contrôlé après solidification et maturation (vieillissement naturel à 20°C) ;

T4 : mise en solution , trempe et maturation ;
T5 (pour les alliages au Cu) : mise en solution à 495°C (et non540°C car la température de l'eutectique est abaissée par la présence du Cu), puis refroidissement contrôlé après solidification de 450°Cà 220°C par tenue là air forcé. Avantage de la méthode : pas de trempe donc peu de contraintes résiduelles et pas de revenu donc coût moindre ;

T6 : miseensolutionà540°C, trempe être venu au pic de dureté. Une trempe à l'eau chaude

(90°C) permet de limiter les chocs thermiques et donc les tapures de trempe ;

T64 : miseensolutionà540°C, trempe et revenu légèrement *avant* le pic de dureté ;

T7 : mise en solution à 540◦C, trempe être venu légèrement après le pic de dureté (sur vieillissement) [14].

I.3.2.6.4. Influence de s éléments d'addition

Les éléments d'additions ont une influence sur les caractéristiques de l'aluminium, ces modifications sont indiquées dans le tableau .I.6 suivant:

Tableau I.6: Influence de éléments d'addition [17].

Elément d'alliage	Son rôle
Cu	**Résistance mécanique moyenne à l'état trempé mûri mais relativement élevée à l'état trempé revenu** **Bonn e tenue à chaud** **Aptitude au soudage généralement mauvaise selon les procédés traditionnels** **Résistance à la corrosion relativement faible en atmosphère** **Corrosive relativement élevée à l'état trempé revenu**
Si	**Coulabilité**
Fe	**Diminue les retassure sinternes**
Mn	**Aptitude à la déformation** **Resistance à la corrosion, Aptitude ou brasage et soudage**
Mg	**Caractéristiques mécaniques élevés** **Resistance à la corrosion, Soudabilité**
Cr	**Soudabilité et taille de grain moyenne**

I.3.3.3. Les alliages Aluminium/Cuivre

Ce sont les alliages de la série (2000), à durcissement structural, ils forment une gamme importante d'alliages se caractérisant par :

- Une résistance mécanique moyenne à l'état trempé mûri mais relativement élevée à l'état trempé revenu.
- Une bonne tenue à chaud.
- Une aptitude au soudage généralement mauvaise selon les procédés traditionnels.
- Une résistance à la corrosion relativement faible en atmosphère corrosive [18].

a) L'alliage d'aluminium 2017A

Il est considéré comme l'un des alliages les plus anciens, également très connu sous la dénomination Duralumin, peut être considéré comme étant à l'origine du développement de l'aluminium dans l'aviation et également du développement de l'aviation elle-même.

Les alliages durs d'aluminium datent de la découverte accidentelle du phénomène de durcissement structural par Alfred Wilm à Berlinen1906. Son travail amené au développement des alliages de corroyage connu sous le nom de duralumin (Al –3.5Cu –0.5Mg –0.5Mn), qui a été rapidement adopté en Allemagne pour les sections structurales pour l'avion de Junkers F-13 qui a volé la première fois en 1919.

Le duralumin était le précurseur d'un certain nombre d'alliages de la série 2xxx on incluant l'alliage 2014 et l'alliage 2024.

Il est toujours très utilisé, à l'état T4. C'est un alliage à durcissement structural utilise dans les structures à résistance mécanique très élevée, il est également utilisé dans des parties des avions, des véhicules et des machines soumis à de fortes contraintes [18].

b) Composition chimique de l'alliage 2017A

L'alliage 2017 est un alliage Al-Cu avec des additions secondaire de Fe et de Mg, il contient également du Si, du Cr, et du Mn. La gamme de composition de cet alliage est présentée dans le tableau I. 7 [17].

Tableau I.7: Composition chimique de l'alliage 2017A.

Alliage	Si(%)	Fe(%)	Cu(%)	Mn(%)	Mg(%)	Cr(%)
2017A	**0,20 - 0,8**	**0,7**	**3,5 - 4,5**	**0,40 - 1,0**	**0,40 - 1,0**	**0,10**

c) Propriété mécanique

L'alliage2017 à des propriétés mécaniques élevées et une bonne résistance à la fatigue, ses propriétés sont présentées dans le tableau I.8.

Tableau I.8: Caractéristiques mécaniques typiques de l'alliage d'aluminium 2017[13].

		Traction			Dureté Brinell	CisaillementR$_m$(MPa)	Fatigue (MPa)	Module D'élasticité(GPa)
Alliage	**Etat**	**R0,2 (MPa)**	**R_m (MPa)**	**A (%)**				
2017A	T4	280	420	18	105	260	135	73

I.3.4. Diagramme des phases de l'alliage Al-Cu

Le diagramme de phases Al-Cu est donné par la Figure I.4 suivante :

- 500 et 580°C , l'alliage Al-4%Cu est monophasé : désordonnée de substitution α.
- En dessous de 500°C l'alliage devient bi phasé α+Al_2 Cu.
- Au four et à mesure que la température diminue, la proportiond'Al_2Cu augmente.
- A la température ambiante, les proportions d'équilibre sont de 93% de phase α et de 7% d'Al_2 Cu [19].

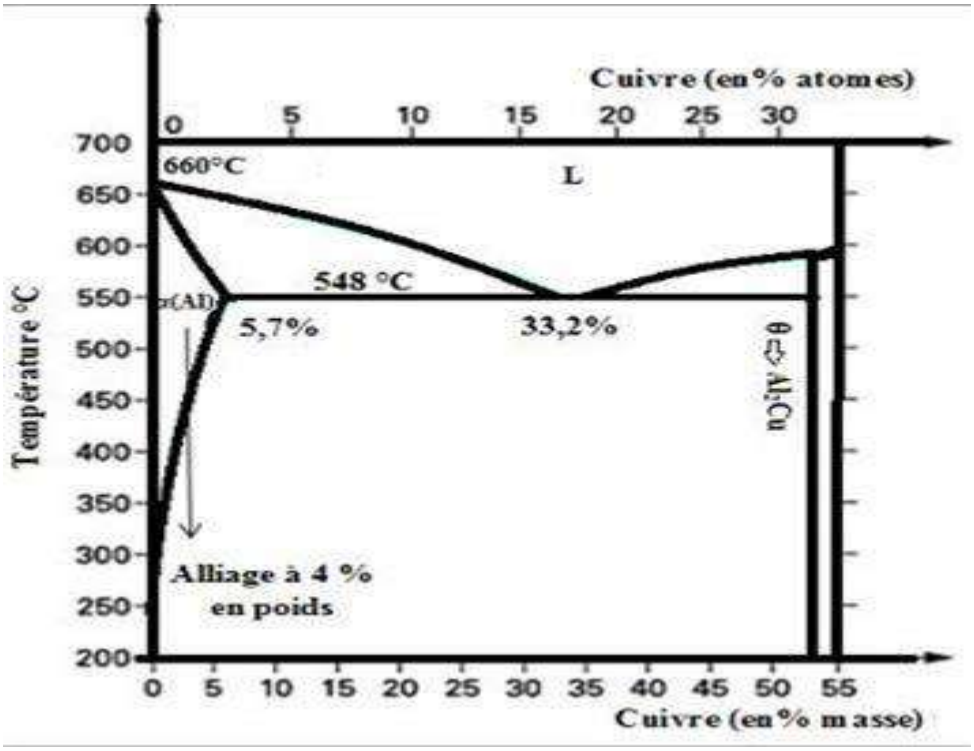


Figure I.4 : Diagramme d'équilibre d'un alliage Al-Cu entre 0% et 60% de masse de cuivre

CHAPITRE II

traitement thermique

CHAPITRE II : TRAITEMENTS THERMIQUES

II.1 Traitements thermiques des matériaux [20].

Les traitements thermiques ont pour but de modifier la nature et la répartition des constituants d'un matériau. Selon le domaine d'application du matériau les traitements peuvent améliorer ou détériorer les propriétés mécaniques de ce dernier. En général, les traitements thermiques en métallurgie sont : la trempe, le revenu, le recuit et le vieillissement.

II.1.1 Vieillissement thermique

Le terme vieillissement désigne l'évolution (généralement défavorable) despropriétés 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 **[21].**

II.1.1.1 Vieillissement 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.

II.1.1.2 Vieillissement 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 6000) Pendant le vieillissement artificiel à une température donnée, la dureté augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale après un temps de maintien donné.

II.1.2 : Le recuit :

Le recuit est un procédé correspond a un cycle de chauffage, maintien en température puis refroidissement lent dans le four ou l'air d'environnement. Le recuit est également utilisé pour changer les propriétés magnétiques d'une pièce. Le recuit de recristallisation, après écrouissage, a pour but de conférer au métal une taille de grain optimale pour son utilisation future (pliage, emboutissage). **[22]**

II.1.2.1 Traitement thermiques des alliages d'aluminium :

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

II.1.2.3 Les traitements d'homogénéisation : [22]

Ce sont des traitements comportent un chauffage à des températures relativement élevées appliqués à certains produits de fonderie ou corroyés, et destinés plus souvent à en facilités la transformation à chaud au à froid (filage, forgeage, laminage…etc.).Ils consistent en générale en maintiens de 6h à48h à des températures allant de 450°c à610°c, qui ont pour but dissoudre les phases métalliques et de réaliser une homogénéisation de la composition de la solution solide.

II.1.2.4 Les traitements d'adoucissement : [21]

Ils ont pour but d'adoucir un métal ou un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale.

Dans le cas de l'écrouissage, ce sont des traitements de Restauration et des recuits de recristallisation. Ces traitements ont des effets semblables à ceux décrits pour l'aluminium. Seules les températures traitement sont plus élevées pour les alliages :

- Le traitement de restauration est effectué à200-300°c pendant 1à8 heures ;
- Le traitement de recristallisation est effectué à 300-400°c pendant 0,5 à 3 heures.

II.1.3 Traitement de trempe structurale [22]

- Principe : Le traitement de trempe structurale des alliages d'aluminium comprend
  1. Une mise en solution solide suivie d'un :
  2. Refroidissement suffisamment rapide pour maintenir à la température ambiante laSolution solide existant à des températures plus élevées.
  3. D'un traitement de revenu ultérieur à l'ambiante (maturation) ou à une températureSupérieure qui conduit à un durcissement de l'alliage.

II.1.3.1 Mise en œuvre industrielle [23].

Le traitement est réalisé dans un four sous air possédant une très bonne Homogénéité de température (de l'ordre de +/- 5°C). Le refroidissement doit être Très rapide. Pour ces raisons, l'eau est souvent utilisée comme milieu de trempe, la Charge tombe par gravité dans le bac d'eau, huile, lubrifiant.

a. **Etape de mise en solution** : maintien d'une pièce à une température suffisamment élevée (540°C dans notre cas) et pour une période de temps assez longue pour que les éléments d'alliage soient distribués de façon homogène. Le temps de chauffage varie selon la géométriede la pièce. Il peut aller de quelques minutes pour une feuille mince à 20 heures pour une grosse pièce. Il faut accorder une attention particulière à la disposition des pièces dans le four pour assurer un chauffage homogène. On respectera les paramètres de mise en solution puisqu'une surchauffe entraînera la perte des propriétés et une dégradation de la pièce. Au contraire, un chauffage insuffisant ou inégal signifiera que la pièce n'atteindra pas les propriétés mécaniques souhaitées.
b. **Trempe :** refroidissement rapide d'une pièce pour l'amener à la température ambiante afin de préserver l'effet de la mise en solution.la trempe s'effectue généralement dans un fluide peut être l'eau, huile ou lubrifiant. On va donc amener l'alliage le plus

rapidement possible à la température ambiante de manière à immobiliser les atomes dans leur position en solution solide. La trempe est, de bien des façons, l'étape la plus critique dans le procédé de traitement thermique parce que le refroidissement rapide introduit des contraintes. Cela explique que bien que la trempe se réalise le plus souvent par immersion dans l'eau fraîche, il arrive que les pièces complexes, ayant de grandes variations dans l'épaisseur de ses parois, soient trempées dans un milieu procurant un refroidissement moins rapide, comme l'eau chaude, une solution aqueuse de glycol, de l'air forcé ou un brouillard (parfois au détriment des propriétés métallurgiques optimales). Juste après la trempe (on dit : état de trempe fraîche), l'alliage se trouve dans un état très malléable et, dépendamment de l'alliage, reste dans cet état pour quelques minutes, quelques heures ou quelques jours. Au cours de cette période, on procédera à des opérations de dégauchissement ou de mise en forme. Le durcissement structural (formation de précipités) produit ensuite à température ambiante pendant une longue période, ce qu'on appelle le vieillissement naturel, ou, dans un four à température et temps contrôlés, le vieillissement artificiel.

II.1.4 Revenu

Le revenu est un traitement thermique effectué sur les pièces mécaniques afin de leurs donner leurs caractéristiques mécaniques et parfois de résistance a la corrosion. Le revenu s'opère à une température supérieure à celle de la maturation et inferieur à la température de mise en solution. Le but de revenu est de diminuer les effets de la trempe d'homogénéisation et stabiliser les propriétés mécaniques et d'atténuer ou de faire disparaitre les tentions internes.il durcit la pièce par précipitation de composés intermétallique dans la matrice d'aluminium.

II.1.4.1 Alliages de la série (2000) [23].

Dans le cas des alliages de type 2017A l'évolution des caractéristiques mécaniques en fonction du temps du reste relativement faible durant une période dite incubation, d'autant plus longue que la température est plus basse. Durant cette période d'incubation, il semble cependant que les caractéristiques mécaniques ne restent pas rigoureusement constantes mais très lentement.

Vers la fin de la période d'incubation, la maturation s'accélères, sa vitesse passe maximum, puis décroît de nouveau et les caractéristiques mécaniques tendent asymptotiquement vers des valeurs limites.

La période d'incubation peut être avantageusement mis a pour effectuer des misesen forme, c'est-à-dire effectuer ce que l'on appelle le travail sur trempe fraiche. Afin d'augmenter cette période d'incubation, il est conseillé d'introduire les pièces trempées dans un milieu froid tel qu'un réfrigérateur : c'est la solution retenue par exemple pour la pose des rivets dans l'industrie aéronautique.

Avec les alliages de **type 2017 A ,2024** et **2014** on peut admettre qu'a 20°C, les caractéristiques deviennent stables après une maturation de quelques jours. Contrairement à la vitesse de mise en solution, la vitesse de maturation dépend beaucoup plus de la température.

II.1.4.2 Processus de traitement thermique de l'alliage 2017A : [21]

a. Mise en solution :

Le processus de mise en solution consiste à prendre une pièce de l'alliage d'aluminium à la température de la pièce (état 1A sur les **figures II.1 et II.2.** Et à la ramener le plus rapidement possible a l'état (2). Si la pièce été fabriquée selon un processus de fabrication a chaud (1B), Elle serait aussi amenée a (2).lorsque la pièce a atteint 515°C de part en part, les éléments d'alliages sont alors totalement dissous en solution solide, c'est e dire dans l'aluminium solide dont la structure granulaire.

b. Refroidissement lent (recuit) :

Il faut éviter de refroidir lentement l'aluminium mise en solution, c'est-à-dire de passer lentement de l'état (2) à l'état (3). En occurrence, il se forme de gros précipités aux joints de grains et les propriétés ne sont pas maximales **(figure II.1.b),** 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.

c. Trempe [22]

Si on refroidit rapidement de (2) à (3), les atomes de cuivre n'ont pas le temps de migrer aux joints de grains et ils demeurent en solution dans les grains **(figure II.1.c)**. Par conséquent, aussitôt que la pièce dans l'état(2) est sortie du four, elle doit être refroidie rapidement à l'état (3) en la trempant dans l'eau. Les propriétés obtenues sont alors celle du l'état T4 (mise en solution et vieilli naturellement à un état relativement stable), dont la limite ultime est égale à 470 MPa. A cet état, la structure est instable car des précipités se forment, mais très lentement. Il se produit alors un vieillissement naturel. Pour accélérer le processus, il faut chauffer

légèrement. L'opération s'appelle un vieillissement artificiel. Le vieillissement artificiel est nécessaire pour la plupart des alliages, car le vieillissement naturel est trop lent.

d. Vieillissement artificiel

Le vieillissement artificiel consiste à amener la pièce de l'état (3) à l'état (4) en chauffant pendant 12 heures à 190 °C, puis à refroidir en ramenant la pièce à l'état (5). Des précipités se forment dans toute la structure et les précipités maximales sont obtenues **(figure I I.1.d)**. En fait, il s'agit de l'état T6 (mis en solution et vieilli artificiellement), et l'alliage ainsi obtenu est le 2017 – T4 dont la limite est égale à 485 MPa.

Si on prolonge indument le traitement a 190°C, les précipités migrent aux joints de grains. Les propriétés sont alors les même qu'a l'état de recuit **(figure II.1.e)**.on dit qu'il y a **survieillissement.**

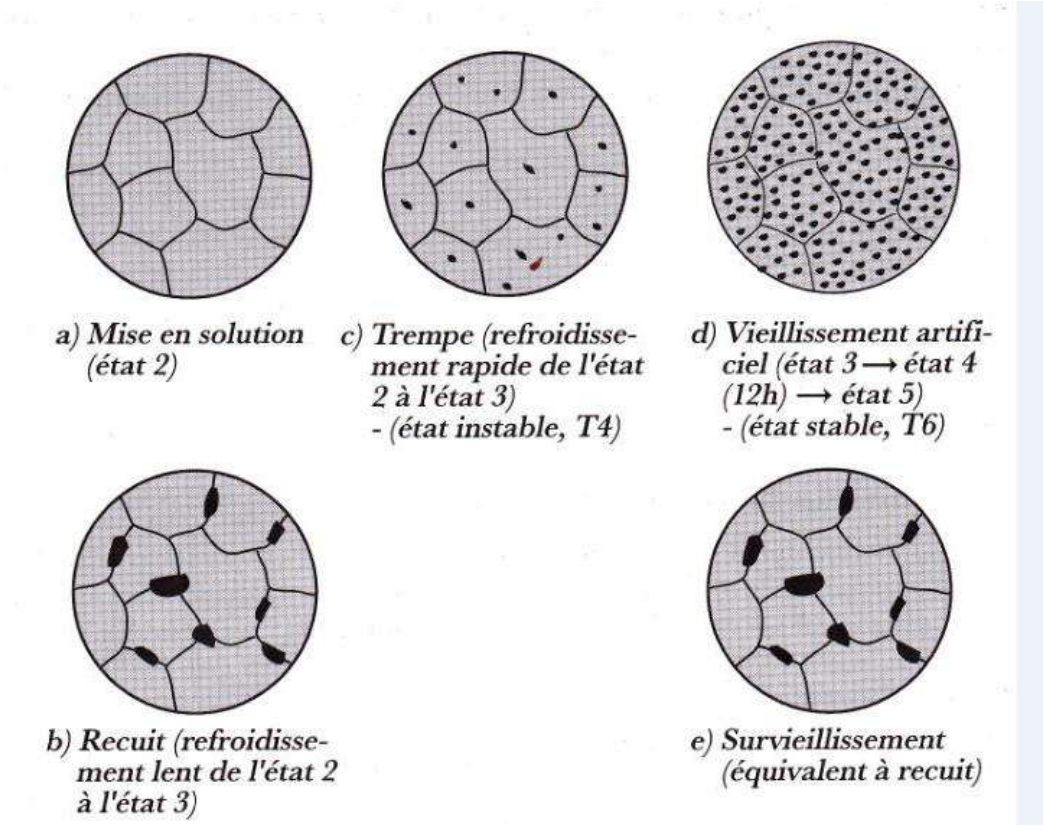


Figure II.1 : Structure cristalline de l'aluminium a différentes états des traitements thermiques

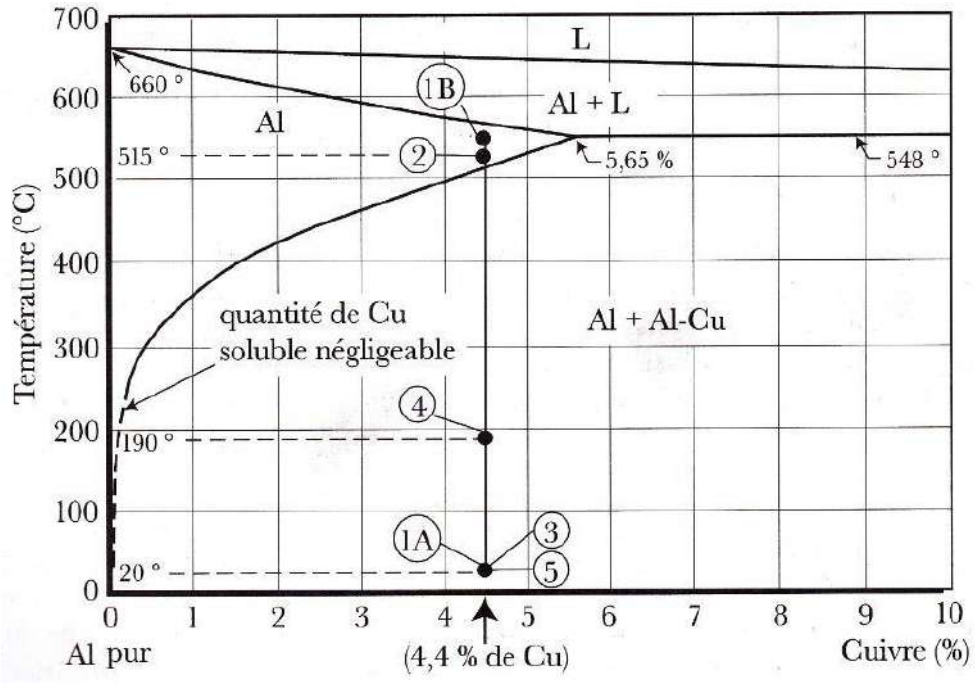


Figure II.2. : Diagramme des phases d'alliage Al-Cu entre 0 à 10% de masse de cuivre

CHAPITRE III

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

CHAPITRE III : TECHNIQUES EXPERIMENTALES

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 traitement de trempe suivi d'un traitement de revenu pour essayer d'atténuer les effets néfastes de la trempe, et de rendre le matériau plus ductile avec un dureté plus élevée.

Nous avons procédé à l'identification de l'alliage corroyé **Al-Cu 4% (2017A), puis choisir l**es traitements thermiques nécessaires et adéquats pour notre objectif, pratiquer par suite des essais de dureté, ainsi que des examens microscopiques. Tous ces travaux ont été réalisés au niveau du laboratoire d'ingénierie des surface et matériaux de l'université Yahia Farés de Médéa, Tandis que la dureté a été pratiquée à POVAL BEROUAGHIA.

III.2 Four utilisé

Le four utilisé est représenté sur la figure III.1 :



Figure III.1. Four programmable

III.3 Préparation des échantillons

III.3.1 Découpage :

Le découpage des échantillons a été fait manuellement à l'aide d'une scie et refroidi par un jet d'eau. Les dimensions de ces échantillons sont (37x25x10). Figure III.2.

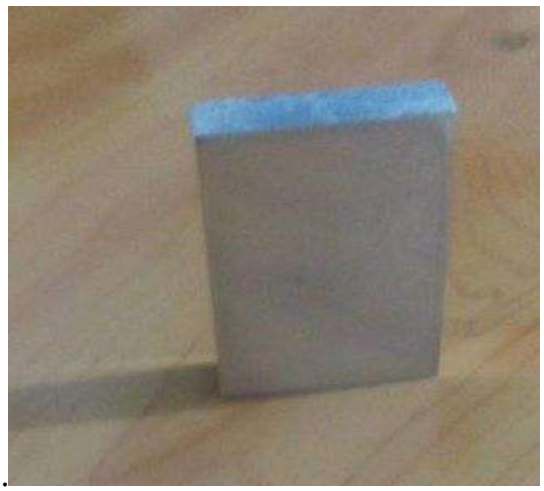


Figure III.2. L'échenillant.

III.3.2 Trempe

La trempe est pratiquée à une température de 520 °C, un maintien à cette température de deux durées (1 heure et 2 heures) suivie d'un refroidissement sur deux liquide différents (Eau et Huile). La Figure III.3**,** montre le Four programmable ouvert utilisé pour la réalisation de cette trempe.

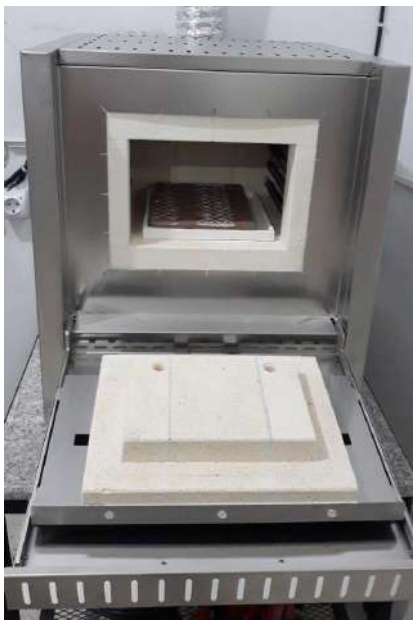


Figure III.3. Four programmable ouverte.

Dans cette figure III.4, on représente le diagramme temps température pour un traitement de trempe. Il constitué d'un domaine de chauffage suivi d'un domaine de maintient et terminé par un refroidissement soit dans l'eau (trait bleu) ou refroidissement dans l'huile (traite vert) dans la courbe du diagramme.

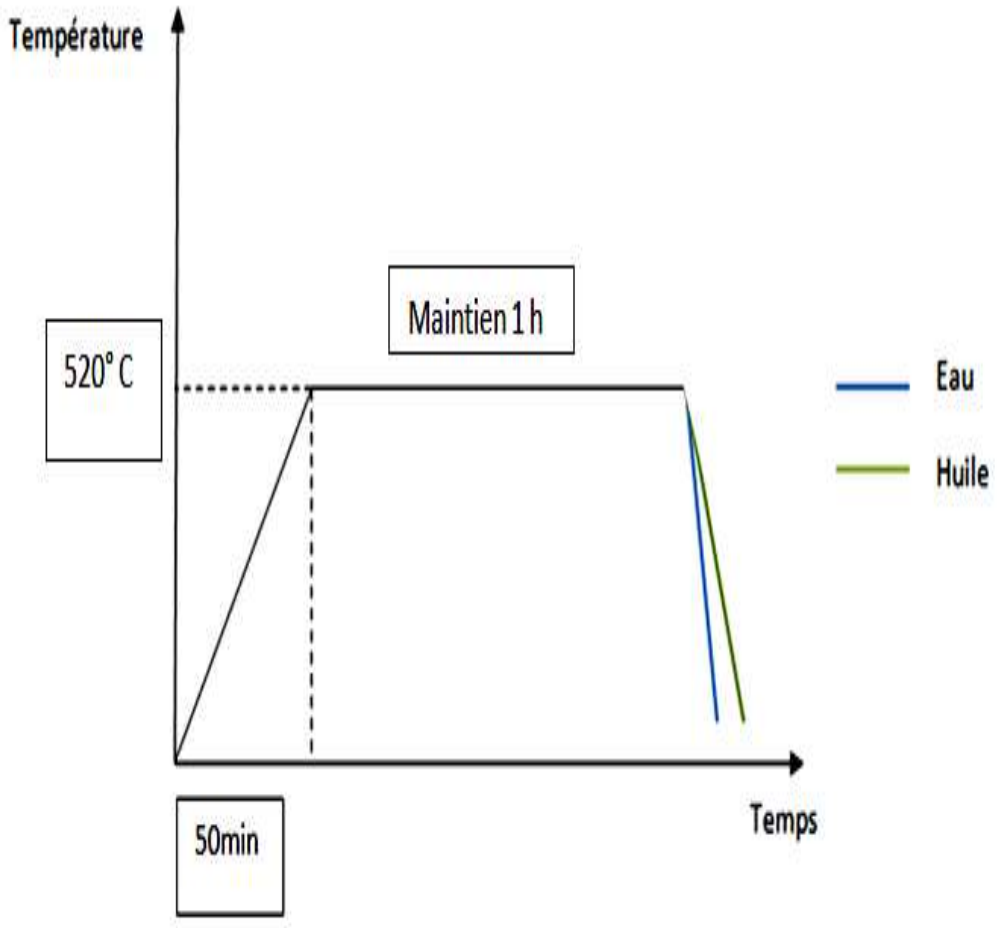


Figure III.4 : Diagramme temps température de traitement de trempe pratiquée sur notre échantillon.

La figure III.5 Montre le refroidissement dans l'eau et dans l'huile simultanément.



Figure III.5. Refroidissement des échantillons dans l'eau et dans l'huile.

II.3.3 Revenu :

Le revenu est réalisé pour atténue les effets néfastes de la trempe à savoir la ductilité fragilité. La température de revenu a été fixée 240°C et le temps de maintient été choisi, comme la trempe, en deux temps (1 heure et 2 heures). Finaliser par refroidissement long à l'air.

Pour bien expliqué le travail, les échantillons trempés avec une durée de maintient 1 heure, leur revenu est effectué avec le même maintient et pour ceux trempés avec un maintient de deux heures sont revenus avec un même maintient deux heures. La figure III.6, représente le diagramme temps température d'u traitement de revenu pratiqué sur notre échantillon.

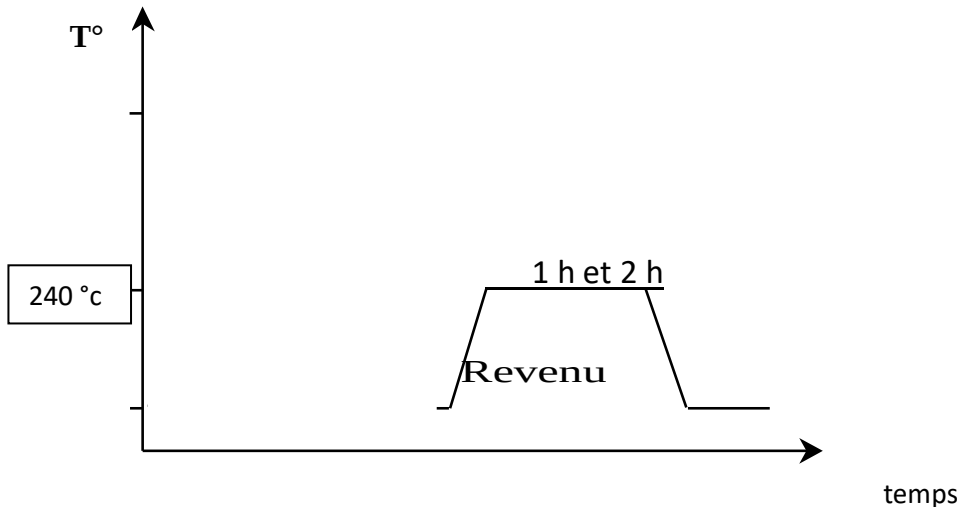


Figure III.6 : Diagramme temps température de traitement de trempe pratiquée sur notre échantillon.

II.3.4 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.

II.3.4.1 Les polisseuses :

Pour obtenir une surface plane et la qualité de surface miroir, on a utilisé une polisseuse présentée dans la Figure III.7 Un liquide diamanté est représenté dans la Figure III.8. .



Figure III.7. La polisseuse labo IMS



Figure III.8. Diamonds suspension.

III.3.4.2 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 (NHO_3) : 2.5m
- Eau distillée (H_2O) : 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.3.5 Examens microscopiques :

Après toutes ces opérations de préparation, les échantillons sont observés sur un microscope de notre l'aboratoire représenté dans la figure III.9.



Figure III.9. Microscope optique du labo IMS.

II.3.6 Mesure de la dureté

II.3.6.1 Essai Brinell

Le duromètre utilisé est celui de Brinell, dont le pénétrateur est une bille en acier trempé (dureté HBS) ou en carbure de tungstène (dureté HBW) de diamètre *D* (mm). L'empreinte est une calotte sphérique de diamètre moyen *d* (en mm, moyenne de deux diamètres orthogonaux mesurés à l'aide d'un appareil optique approprié).

La charge d'essai *F* (N) est choisie dans une gamme normalisée adaptée à *D, e*t au matériau testé. La dureté est donnée par le rapport de *F* (en kg force à l'origine) à la surface de l'empreinte, exprimée sans dimension :

$$\mathrm{HBW} = \frac{0{,}102 \cdot 2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

F : est la force appliquée en kilogramme-force (kgf) ;

D : le diamètre de la bille en millimètre (mm).

d : le diamètre de l'empreinte laissée par la bille en millimètre (mm).

Pour mener à bien les mesures de dureté, on a suivi avec rigueur les consignes suivantes :

- L'exécution de l'essai Brinell demande une surface plane, usinée ou meulée. Son état doit permettre une lecture aisée du diamètre de l'empreinte, plus ses dimensions seront faibles, plus l'état de surface devra être soigné.

- La charge est appliquée normalement à la surface et sans choc, en la faisant croître Progressivement, de manière à atteindre en 15 s la charge fixée. Elle doit être maintenue (10 à 15 s), on décharge et on mesure le diamètre de l'empreinte. Cette précaution est introduite en raison des possibilités de fluage sous charge des métaux [10]. Figure III.10, et la figure III.11 présente le duromètre utilisé dans notre travail pour mesurer les différents cas produits.

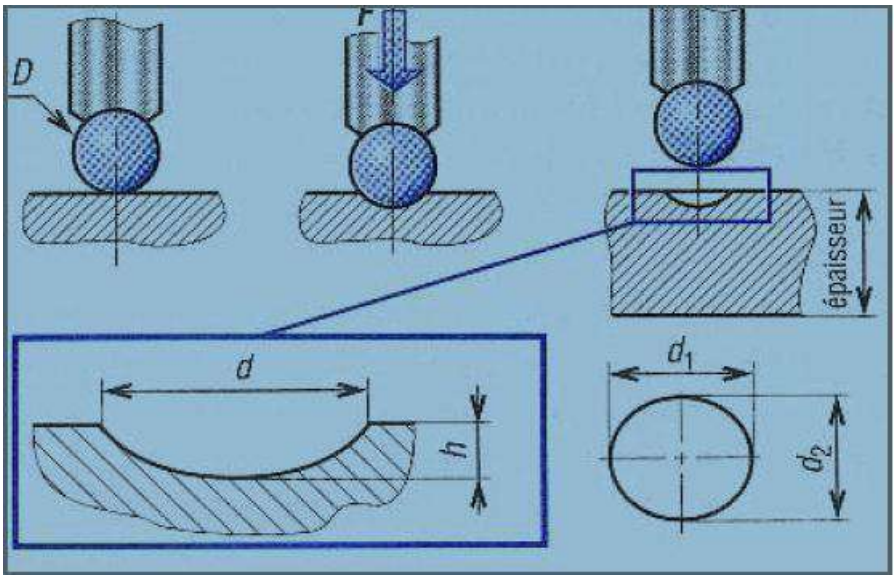


Figure III.10: Essai de dureté Brinell



Figure III.11. Duromètre POVAL BEROUAGHIA .

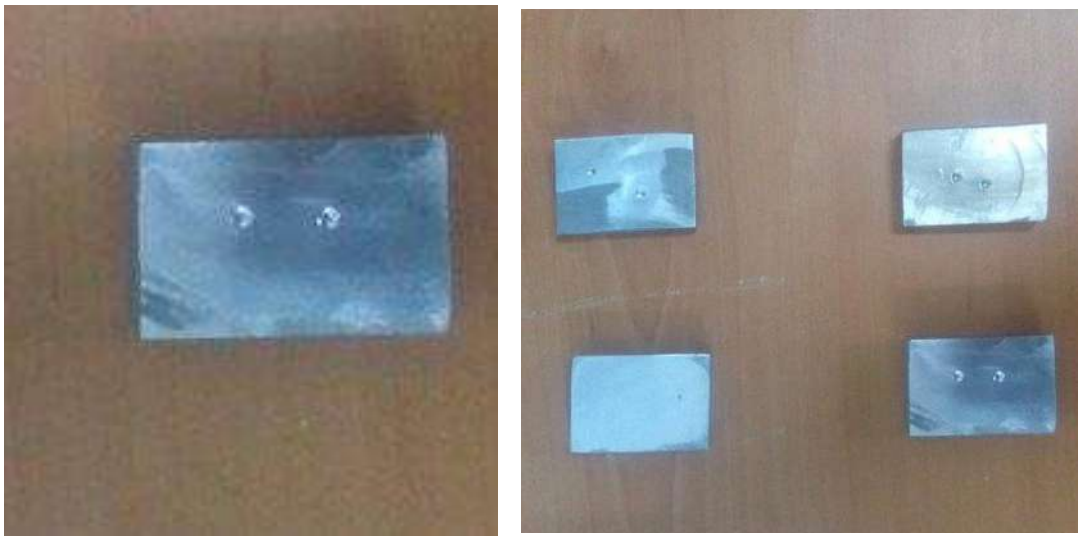


Figure III.12. Les empreintes essai de dureté sur les échantillons.

CHAPITRE VI : RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.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 (VI.1–VI.5) avec un grossissement de X20.

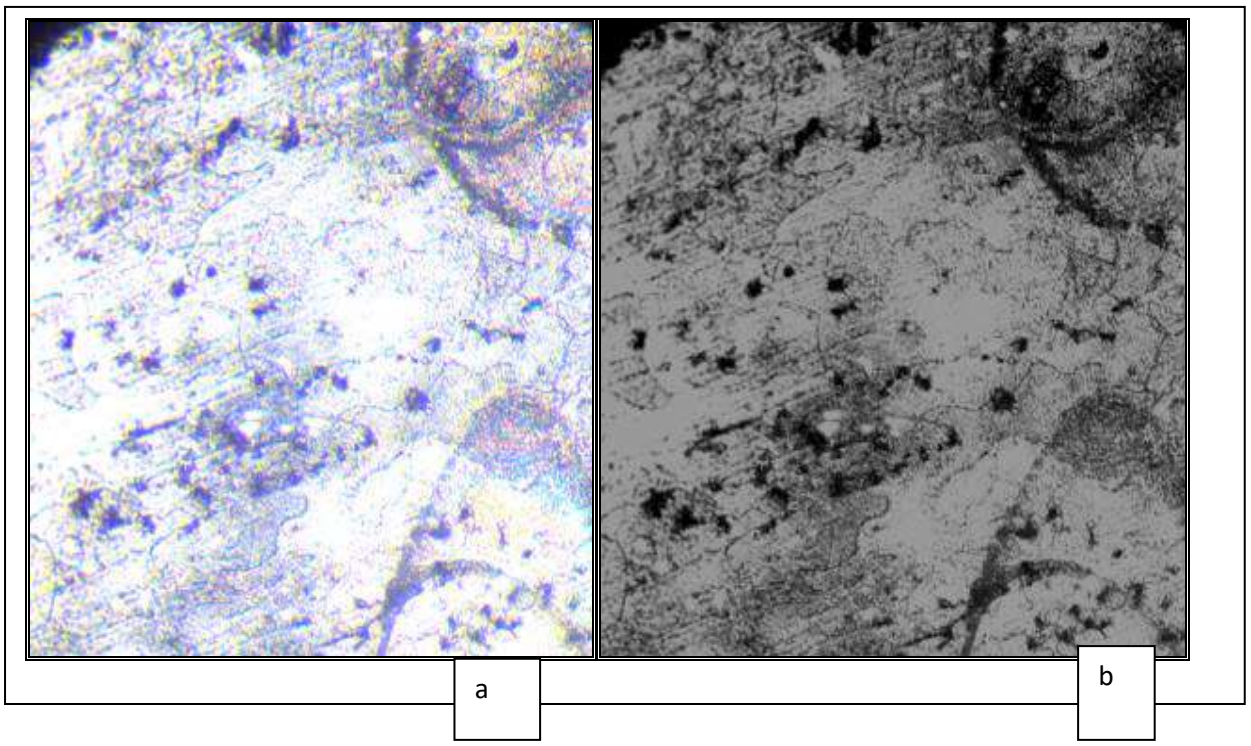


Figure VI. 1 : Microstructure dans le métal de base 2017A, a) colorie b) noire et blanc.

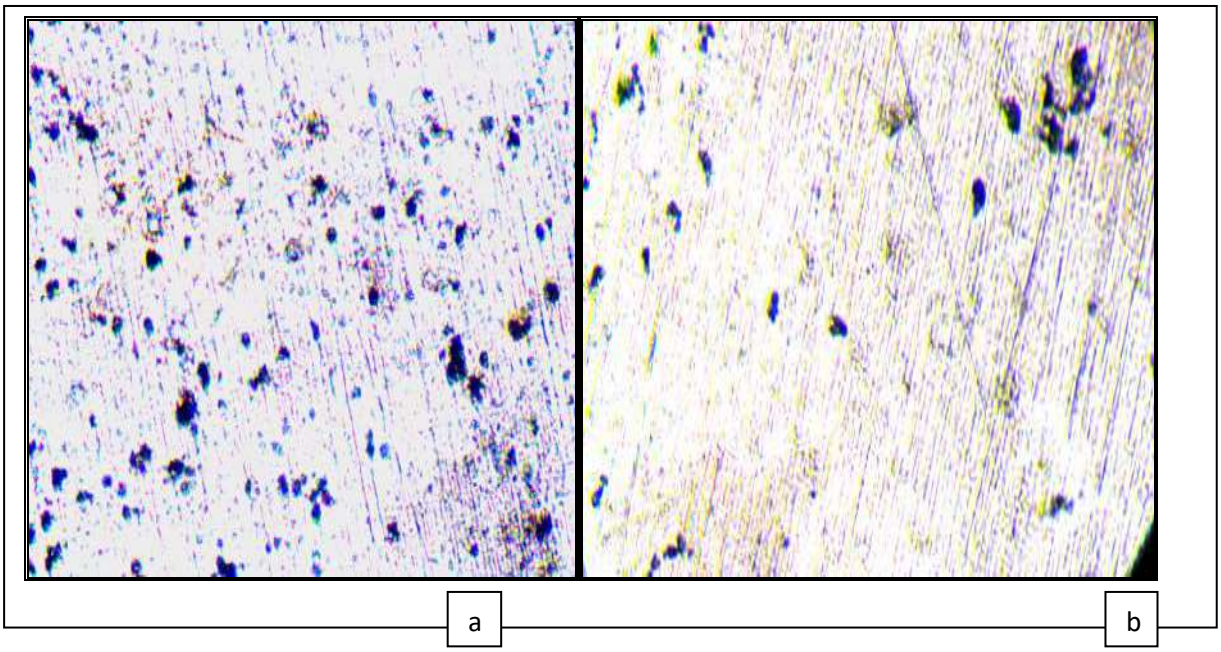


Figure VI.2. Microstructure de l'échantillon à microscope optique
a) Trempe 520° pendant 2h refroidit a l'eau
b) revenu 2h a 240°c.

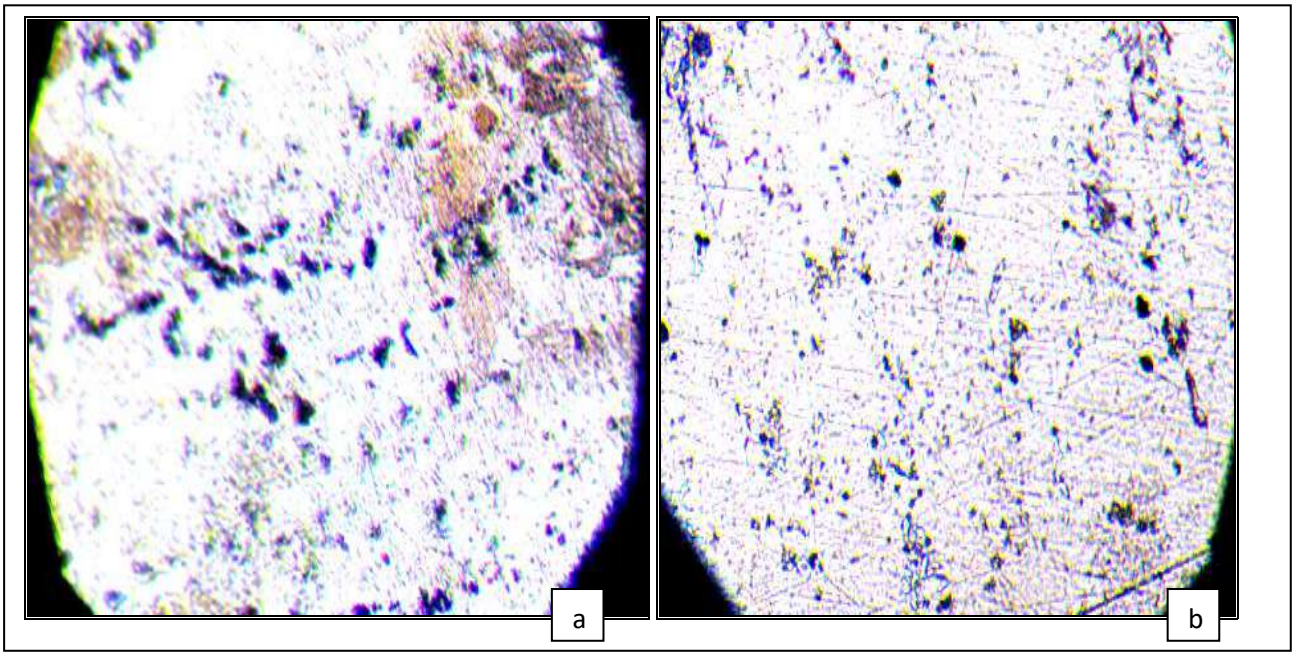


Figure VI.3. Microstructure de l'échantillon à microscope optique
a) Trempe à 520°C pendant 2h et refroidit à huile
b) revenu 2h à 240°c.

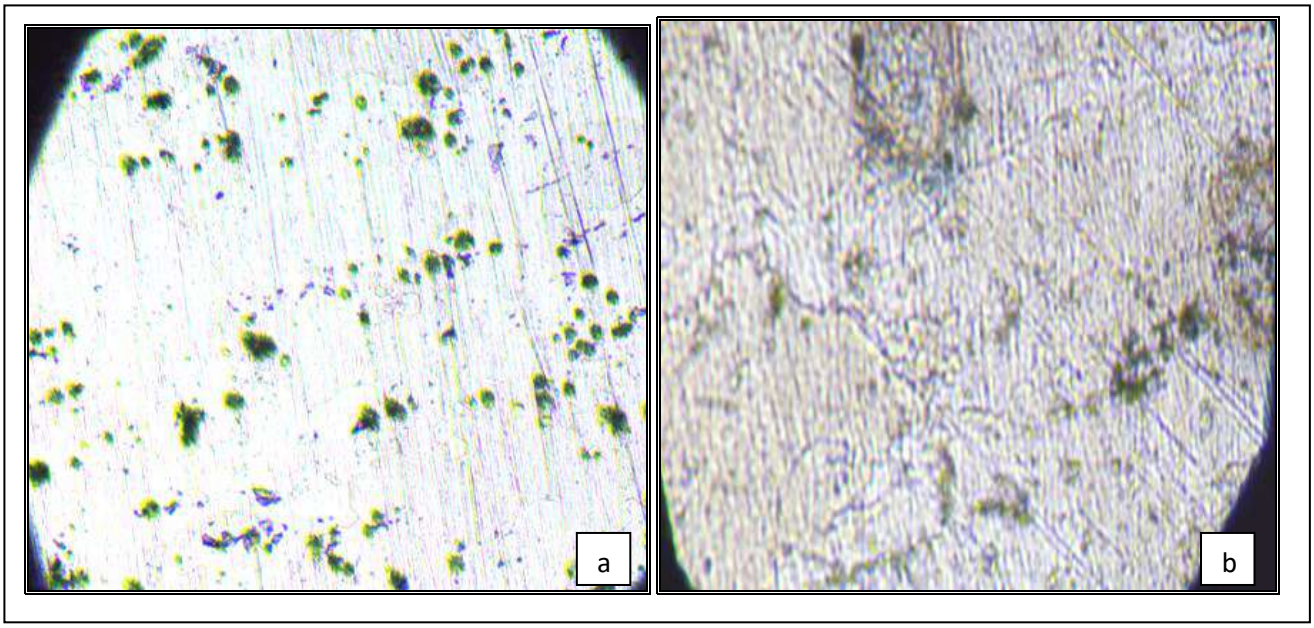


Figure VI.4. Microstructure de l'échantillon à microscope optique
a) Trempe 520° pendant 1h et refroidit à l'eau
b) revenu 2h a 240°c.

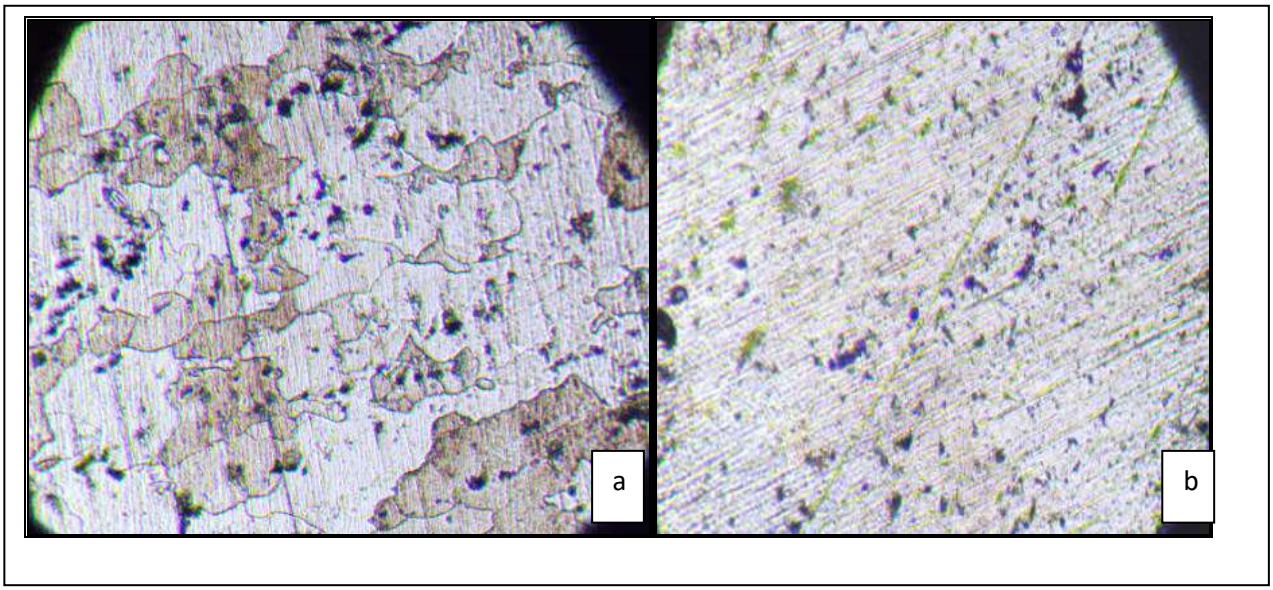


Figure VI.5 Microstructure de l'échantillon à microscope optique
a) Trempe 520° C pendant 1h et refroidit à huile,
b) revenu 2h à 240°c

DEUXIEME PARTIE CHAPITRE IV : INTERPRETATION DES RESULTATS

IV.1 INTERPRITATION DES RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1.1 Mise en Solution

Porté et maintenu suffisamment long temps à une température 520°C, cet alliage est maintenant constitué d'une seule **phase α,** c'est-à-dire de l'aluminium qui à cette température peut dissoudre complètement les 4% de cuivre en solution solide **100% $\alpha_{4\%\ Cu}$.**

IV.1.2 Refroidissement rapide

Si cette solution solide d'équilibre est **brusquement refroidie par immersion dans l'eau** jusqu'à la température ambiante grâce à une trempe, l'alliage est hors d'équilibre et les phases α et **AL_2Cu** ne peuvent se former, car la réorganisation par diffusion des atomes de cuivre pour former les précipités d'équilibre **AL_2Cu** prendrait des dizaines d'années. Après la trempe, on est alors en présence d'une solution solide **α sursaturé en cuivre.**

Si à partir d'une telle solution sursaturée que l'on procède à l'étape subséquente du traitement thermique appelé : revenu de l'alliage.

IV.1.3 Revenu

La dernière étape du traitement consiste à faire chauffer l'alliage brut de trempe à une température relativement basse, à 240°C, pour lui imposer un retour progressif partiel vers l'état d'équilibre.

Il provoque l'expulsion du cuivre en excès dans la solution solide α selon plusieurs étapes dépendant de la température de revenu.

Suivons l'évolution des propriétés mécaniques de l'alliage au cours d'un tel traitement :

- au début de traitement, l'alliage qui est une solution d'aluminium sursaturé en cuivre à une limite d'élasticité et une ductilité initiale.

Quand la durée augmente, les atomes de cuivre dispersé aléatoirement dans la matrice commencent à se regrouper pour former de très petits amas (diamètre = 5nm) appelés : des amas de Guinier – Preston. Figure VI.6

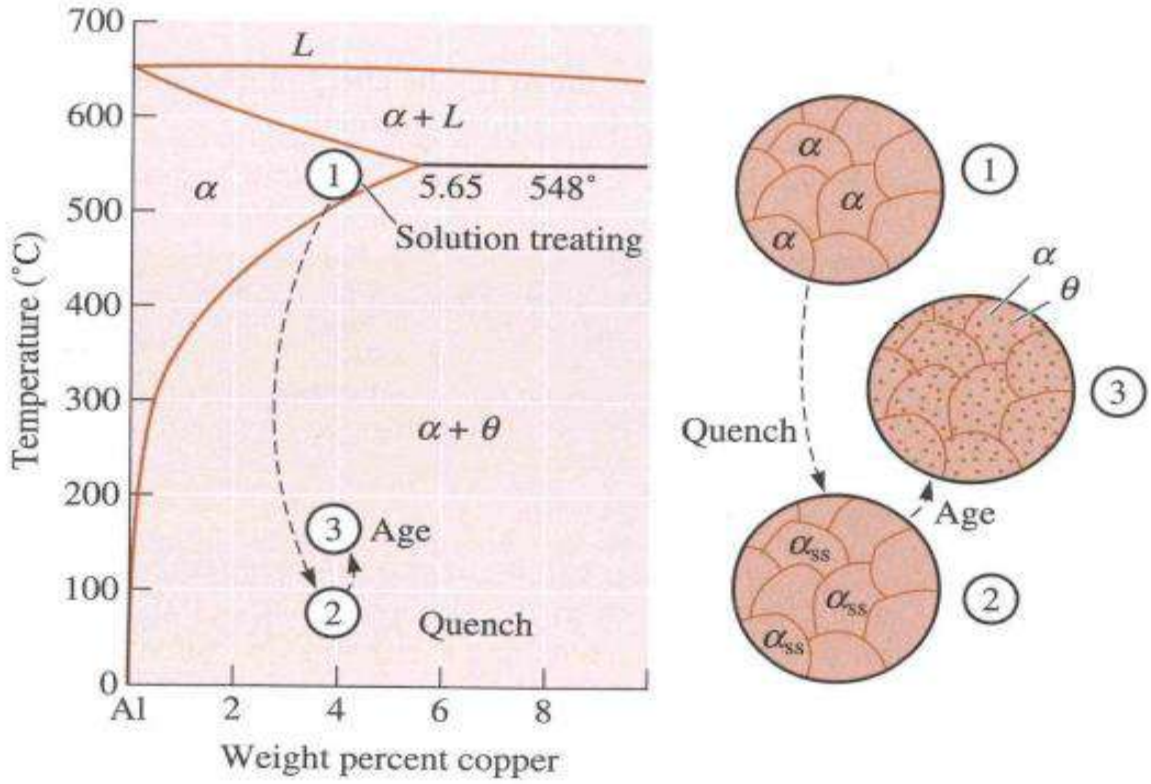


Figure VI.6 : transformations structurales pendant les traitements thermiques appliqués.[25]

IV.1.4 Dureté

Le paramètre que nous avons pu mesurer c'été la dureté. Les essais de dureté ont été réalisés sur des échantillons préalablement préparé, la figure VI.7 :

- L'essai de dureté Brinell, HB.



Figure VI.7 : Les empreintes de l'essai de dureté brinell sur échantillon.

Les tableaux, regroupe les mesures de dureté obtenues trempe 2h,1h et le revenu, ses résultats sont représentés sur l'histogramme de chaque tableau :

Tableau VI. .1: Valeur des différentes duretés pour l'aluminium trempé et refroidi à l'eau ou à l'huile avec des durées de maintiens différentes.

Trempe	Moyenne Dureté brinell
Sans trempe	116 HB
Trempe une heure à 520°c refroidissement à l'eau	132 HB
Trempe deux heures à 520°c refroidissement à l'eau	137 HB
Trempe une heure 520 ° c refroidissement à l'huile	129 HB
Trempe deux heures 520° c refroidissement à l'huile	134 HB

On représente ces différents résultats sous forme d'un histogramme pour pouvoir les comparés. Figure VI.8.

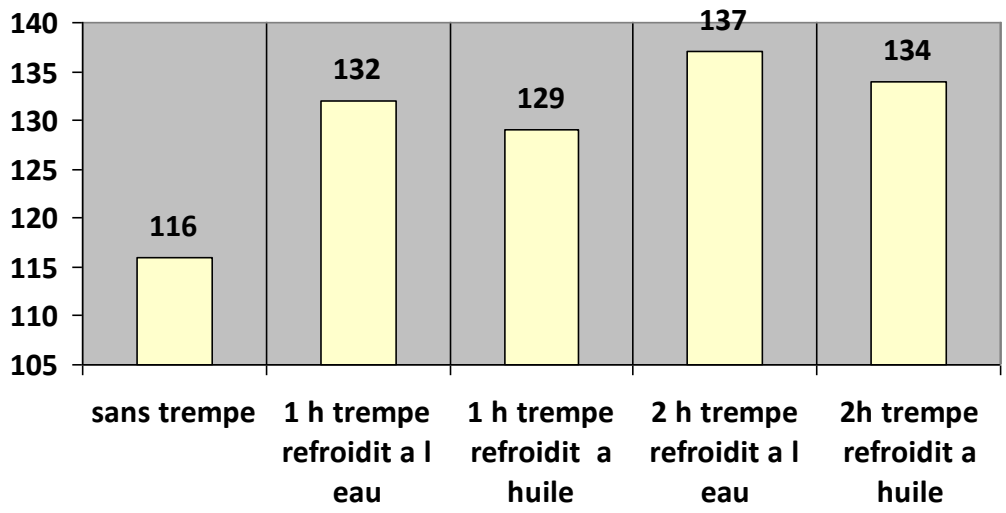


Figure VI.2: L'histogramme des duretés pour l'échantillon trempé et refroidit à l'eau et à huile.

IV.2 Résultats

IV.2.1 Traitement de trempe :

1. La dureté des alliages trempés est meilleure que celle de l'alliage brute.
2. La dureté des alliages trempés et refroidis dans l'eau est meilleure que celle refroidis dans l'huile.
3. La dureté avec un maintien de deux heures est supérieure à celle d'un maintien d'une heure.

On conclut que :

1. La vitesse de refroidissement (milieu de refroidissement) influx positivement sur la dureté.
2. Le maintien de duré importante dans le processus de trempe conduit à une dureté plus importante que celui d'une durée courte.

Tableau VI.2 : Valeur des différentes duretés pour l'aluminium trempé et refroidi à l'eau ou à l'huile et revenu à des durées de maintiens différentes.

Trempe	Revenu	Moyenne Dureté brinell
Trempe une heure à 520° refroidissement à l'eau	+Revenu à 240° c maintien une heure	126 HB
Trempe deux heures à 520°c refroidissement à l'eau	+Revenu à 240° c maintien deux heure	129 HB
Trempe une heure 520°c refroidissement à l'huile	+Revenu a240° c maintien une heure	121 HB
Trempe deux heures 520° c refroidissement à l'huile	+Revenu a240° c maintien deux heure	128 HB

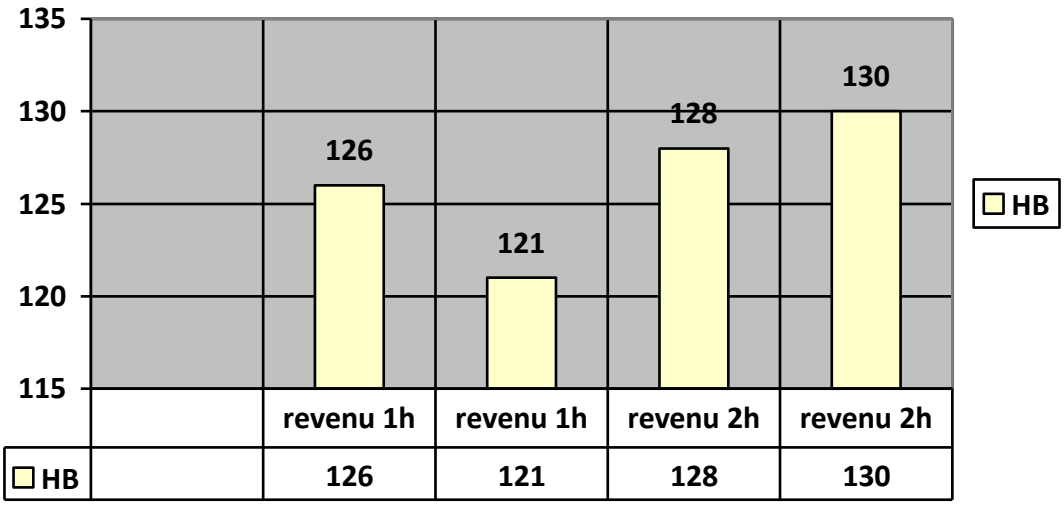


Figure IV.9 La dureté des échantillons revenu avec des temps de maintien différents

IV.2.2 traitement de revenu

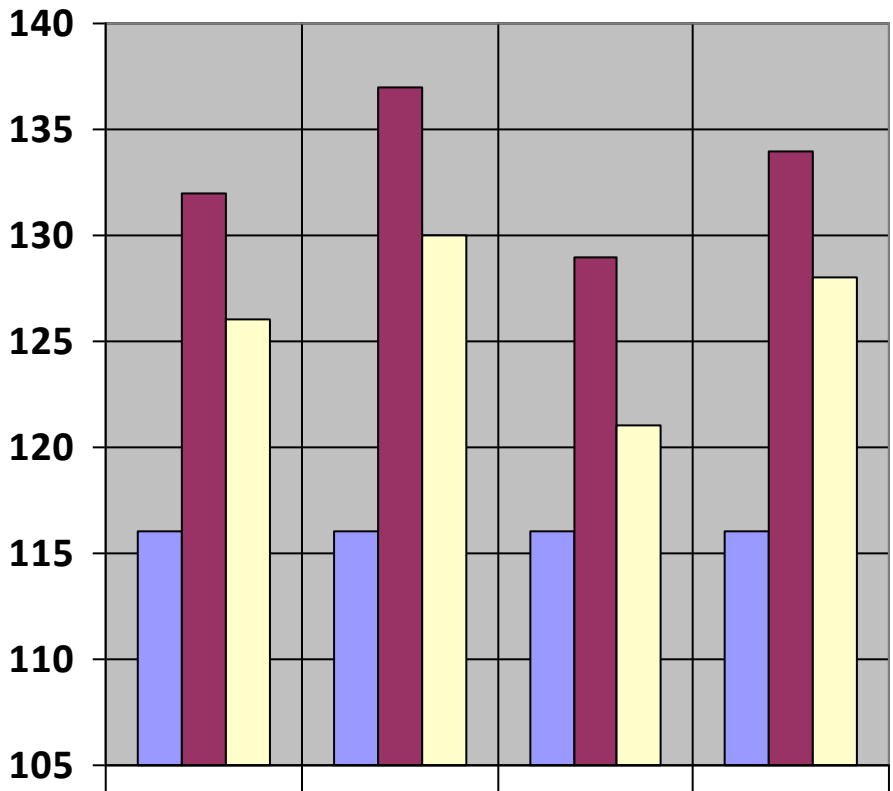
1. La dureté des alliages trempés et revenus à un temps de maintien d'une heure est réduit à celle du matériau trempé.
2. La dureté des alliages trempés et revenus à un temps de deux heures est plus importante que celle d'un temps réduit d'une heure.

3. La dureté en générale après les traitements réalisés est meilleure que celle de l'alliage brute. Tableau IV.4.

Tableau IV.3 : Tableau récapitulatif des résultats de dureté pour les deux traitement pratiqués (trempe et revenu).

Trempe	Moyenne Dureté brinell	Revenu	Moyenne Dureté brinell
Trempe une heure à 520° refroidissement à l'eau	132 HB	+Revenu a240° c maintien une heure	126 HB
Trempe deux heures a 520 refroidissements à l'eau	137 HB	Revenu a240° c maintien deux heure	130 HB
Trempe une heure 520 ° refroidissement à l huile	129 HB	Revenu a240° c maintien une heure	121 HB
Trempe deux heure 520° c refroidissement à l'huile	134 HB	Revenu a240° c maintien deux heure	128 HB

On fin on enregistre les résultats dans histogramme récapitulatif qui compare les valeurs de dureté pour l'aluminium brute et celui traité par les deux traitement respectifs (trempe et revenu). Figure IV.



	trempe 520° c 1h eau	trempe 520° 2h eau	trempe 520°c 1h a huile	trempe 520°c 2h a huile
HB	116	116	116	116
HB trempe	132	137	129	134
HB revenu	126	130	121	128

Figure IV.10 l'histogramme représente la comparaison entre les moyennes dureté brinell HB à la trempe et le revenu.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail nous nous intéressons aux alliages Al-Cu, qui font partie a la série 2xxx. Il est connu depuis longtemps qu'ils durcissent par précipitation des phases métastables au cours de vieillissement à des températures entre 160 °c et 240 °c. Ce pendant, ces alliages industriels peuvent subir un traitement de durcissement par précipitation qui améliore notablement les propriétés mécaniques ; ces derniers sont déterminés par la microstructure développée âpres des traitements thermiques comprenant la mise en solution solide des tous les constituants, une trempe et un vieillissement a une température intermédiaire. Cette microstructure peut être décrite par la composition, la morphologie, la distribution et la taille des précipites formes durant la décomposition des solutions solides sursaturées dans ces alliages.

L'objet de cette étude c'était l'analyse et la compréhension de l'effet des traitements thermiques trempe et revenu ainsi que leur température de maintien sur le durcissement d'alliage d'aluminium de type 2017 T451.

Suivant les résultats obtenus nous avons pu constater que :

1. Les modifications microstructurales issues des traitements thermiques appliques ont sensiblement influencé la dureté de l'alliage. Les échantillons ayants subi des traitements de trempe à l'huile et de à l'eau présentent les valeurs de dureté les plus élevées.
2. Le traitement thermique et la structure sont très liés aux conditions expérimentales qui ont un rôle prépondérant sur les propriétés mécaniques.
3. Aussi la durée de maintien que se soit pour la trempe ou le revenu influx également sur la dureté

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Ghania BENCHABANE, Les mécanismes de recristallisation et de croissance des grains dans les métaux et alliages métalliques légers, thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra ,2009.

[2] **A.Cornet,F.Hlawka,** Métallurgiemécaniquedumicroscopiqueaumacroscopique, Ellipses édition marketing S.A., 2010 32, rue Bargue 75740 Paris cedex 15, ISBN 978-2-7298-6120-9

[3] Reviewsontheinfluencesofolloyingelementsin Microstructure and mechanical Properties of aluminium alloys and aluminium alloy composites R. S. Rana, Rajesh Purohit,and S Das, International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 2, Issue 6,June 2012.

[4] **M. Djeghaba, N. Hachani,** « influence de l'acide acétique sur la qualité de l'anodisation de l'aluminium et de ses alliages»,mémoire de magister, Université de MS'Ila.2002-2003.

[5] **C.Vargel ,**Corrosion de l'aluminium,Paris:Dunod,1999,ISBN2-100-04191-6

[6] **A. Lallali, Y. Assous,** « Elaboration et caractérisation de l'alliage AlSiCu- effet de cuivre sur le durcissement par vieillissement»,mémoire demaster,UniversitéAnnaba, 2019.

[7] http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/content/la-bauxite.

[8] http://www.sfrcegetel.fr/fabrication-aluminium-portail-en-aluminium-coulissant-8542/

[9] **B.Barlas,**Thèsedoctorat,EcoleNationaleSupérieuredesMinesdeParis(2004).

[10] **L.F.Mondolfo,**AluminumAlloys,StructuresandProperties,Butterworth,1st Edition,London, (1976).

[11] **Tho. G. Thompson,** Porous anodic alumina .Fabrication characterization and Application. Thin solid. Films; 29(1-2) -192-201,1997

[12] **A. Haddouche,** « caractérisation physico-chimique des alliages d'aluminium utilisés comme matériau de revêtement mural », mémoire de master, université de Biskra, 2013-2014.

[13] **Yao, J.Y. Graham, D.A. Rinderer . B, Couper, M.J,** ATEM study of Précipitation in Al-Mg-Si alloys, Micron, Vol. 32 , (2001), 865- 870.

[14] **AFNOR,** ''Corrosion des métaux et alliages : termes principaux et définitions'', NF ENISO8044, paris: AFNOR, 2000, 78 p.

[15] **H.Bensabra,** cour de corrosionetprotectiondesmatériaux,UniversitédeJijel,2016.

[16] **Rouibah, K.** (2003). Contribution à l'Etude du Comportement lectrochimique du Couple GalvaniqueAcierauCarbone/AnodesdeZincdansl'EaudeMer Naturelle. Mémoire de Magistère, U STHB, Algers

[17] **Diamant, A.** (Mars2003). Document sur La Corrosion.

[18] **K. EL**GUERMAI. La corrosion. UniversitéHASSANIII-Ainchok.

[19] **Axel Gambou-Bosca**, Ph.D. Chimiste, Centre de Métallurgie du Québec.

[20] **Hervé Gransac** :lundi de la mécanique par laboratoire de la métallurgie a ourlien .

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

[22] **Denis Beaulieu** les caractéristiques de l'aluminium structural.les presses de l'université de Laval.

[23] **M. Renouard et y. Bresson**. Traitements thermiques des alliages d'aluminium (1963).

[24] **Philippe Lours**, Fabien Baillon, Au Cœur des Matériaux Cristallins " Durcissement partraitement thermique", http://nte.mines-albi.fr/SciMat/co/SM6uc5-2.html.

[25] **M.Hebireche mohamed :** cours de traitements thermiques 2020.plateforme de université de yahia fares Médéa.