

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction mécanique

Présenté par :

KASMI Abdennour & SAIB Miloud

Thème

EFFET DE TRAITEMENT THERMIQUE SUR LES CARACTERISTIQUES MECANIKES EN TRACTION D'UN ALLIAGE D'ALUMINIUM

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
ZAOUI Moussa	Pr	Président
ELHADI Abdelmalek	MCA	Encadreur
ROKBI Mansour	MCA	Examineur

Année Universitaire : 2021 / 2022

N° d'ordre : GM/...../2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Nous remercions tout d'abord le directeur de ce mémoire : ELHADI Abdelmalek pour ses directives et ses conseils précieux et pour le temps qu'il nous a consacré.

Nous remercions également Messieurs les membres du jury, d'accepter nos sentiments respectueux pour avoir bien voulu participer et analyser notre travail.

Nous remercions tous les responsables du hall technologique de la faculté de technologie de l'université de Mohamed Boudiaf, M'sila.

Nous tenons à remercier tous le corps de département de génie mécanique, notamment nos chers enseignants.

Nous aimerions à exprimer nos remerciements à nos parents et nos familles, ceux qui nous ont apportés leurs soutiens et leurs aides précieuses tout au long de l'étude.

Nous souhaitons exprimer nos reconnaissances aux personnes qui nous ont soutenues à la réalisation de ce travail.

- A tous, Grand Merci -

DEDICACES

À tous nos amis et collègues

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

Toutes les personnes qui nous ont aidés et contribués à la réalisation de ce travail.

Résumé

Afin de comprendre le comportement mécanique en traction de l'alliage d'aluminium 6082, nous avons effectué une étude expérimentale. Après la fabrication des échantillons (éprouvettes de traction) sur le tour selon les dimensions normalisées, elles ont été traitées thermiquement (mise en solution, trempe à l'eau et revenu à différentes températures pour avoir différentes duretés. Des essais de traction ont été réalisés par la machine de traction, ce qui nous a permis d'avoir des résultats expérimentaux et de comprendre le comportement de l'alliage d'aluminium 6082 à travers ses propriétés mécaniques comme la dureté, la résistance à la rupture, l'allongement et le coefficient de striction.

Summary

In order to understand the mechanical behavior in tension of the aluminum alloy 6082, we carried out an experimental study. After the samples (tensile specimens) were manufactured on the lathe according to the standardized dimensions, they were heat-treated (solution treatment, water quenching and tempered at different temperatures to have different hardness. Tensile tests were carried out by the tensile machine, which allowed us to have experimental results and to understand the behavior of the aluminum alloy 6082 through its mechanical properties such as hardness, breaking strength, elongation and coefficient of necking.

ملخص

من أجل فهم سلوك سبائك الألمنيوم 6082 اثناء الشد، قمنا بإجراء دراسة تجريبية. بعد تصنيع عينات اختبار بإبعاد مدروسة ثم معالجتها حراريا بطرق مختلفة (معالجة المحلول، تبريد سريع بالماء والارجاع في درجات حرارة مختلفة). قمنا باختبار الشد بالآلة WP310. هذا الأخير مكننا من فهم سلوك سبائك الألمنيوم 6082 من خلال الخواص الميكانيكية المتحصل عليها المتمثلة في الصلابة، مقاومة القطع، معامل الاستطالة و معامل التعنيق.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 01 GENERALITES SUR LES ALLIAGES D'ALUMINIUM	
1.1. Introduction	4
1.2. Obtention de l'aluminium	4
1.3. Alliages d'aluminium	5
1.3. 1. Introduction	5
1.3. 2. Nuance de l'alliage de l'aluminium	5
1.3. 3. Propriétés des alliages d'aluminium	6
1.3. 4. Principales nuances normalisées des alliages d'aluminium	7
1.3. 5. Désignation des alliages de moulage (fonderie)	9
1.3. 6. Désignation des alliages de corroyage	9
1.3. 7. Alliages à durcissement structural	11
1.3. 8. Symboles des traitements métallurgiques des alliages d'aluminium	11
CHAPITRE 2 TRAITEMENTS THERMIQUES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM	
2.1. Introduction	15
2.2. Principaux types de traitements thermiques	15
2. 2. 1. Traitements thermique d'homogénéisation	15
2. 2. 2. Traitements thermiques d'adoucissement	16
2. 2. 3. Traitements thermiques de durcissement structural	17
2. 2. 3. 1. Mise en solution solide	17
2. 2. 3. 2. Trempe (refroidissement rapide)	17
2. 2. 3. 3. Maturation	18
2. 2. 3. 4. Traitements de revenu ou de maturation artificielle	19
CHAPITRE 03 DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET TECHNIQUES DE MESURE	
3.1. Introduction	22
3.2. Principe d'essai de traction	22
3.3. Echantillon d'essai de traction	22
3.3.1. Première phase : déformation élastique	24
3.3.2. Deuxième phase : déformation permanente est donné par la courbe ABCD.	24
3.4. Vitesses d'essai de traction (solllicitation)	25
3.5. Présentation de la machine de traction	26

SOMMAIRE

3.6. Identification du matériau utilisé	27
3.7. Présentation des échantillons (éprouvettes).....	28
3.8. Préparation des éprouvettes	28
3.8.1. Usinage des éprouvettes.....	28
3.9. Traitements thermiques Appliqués	29
3.10. Traitements de revenu ou de maturation artificielle.....	30
3.11. Essai de micro dureté.....	31
3.12. Déroulement de l'essai de traction.....	32

CHAPITRE 04 RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

4.1. Introduction	36
4.2. Comportement mécanique du matériau en traction en fonction de la température de revenu.....	36
4.2.2 Domaine plastique homogène.....	38
4.3. Résultats obtenus par traitement thermique de revenu.....	39
4.3. 1. Evolution de la dureté en fonction de la température de revenu	40
4. 3. 2. Evolution de la Résistance à la rupture en fonction de la température de revenu.	40
4. 3. 3. Evolution de l'allongement en fonction de la température de revenu.....	41
4.3.4. Evolution du Coefficient de striction Z% en fonction de la température de revenu.....	42
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	44
BIBLIOGRAPHIE	45

NOMENCLATURE

A% : coefficient d'allongement

F : La force

ΔL : L'allongement

S₀: Section initiale

L: La longueur initiale

R_e: résistance limite élastique

R_r: résistance à la rupture

E : Le module de Young (module d'élasticité longitudinale).

σ : La contrainte

F₀: la force initiale

ϵ : La déformation

R_m: La résistance à la traction

L_u : longueur ultime

S_u : Section ultime

Z% : Valeurs de Coefficient de striction

d₀: diamètre initial

L₀: longueur de référence

L_C: longueur calibrée

V : La vitesse

H : dureté Vickers,

d: diagonale moyen de l'empreinte.

INTRODUCTION
générale

INTRODUCTION GENERALE

Les matériaux métalliques prennent une place importante dans le développement technologique et l'avancement industriel, Les alliages à base d'aluminium ont été l'objet de plusieurs travaux de recherches et de progrès scientifiques, ces alliages sont les plus utilisés juste 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'alliage 6082 appartient à la série 6xxx (Al-Mg-Si), peut être traité thermiquement est l'objet de notre étude. Vu ses propriétés, il a une résistance à la traction assez importante, bonne performance de soudage et résistance à la corrosion. Il est principalement utilisé dans l'industrie du transport et de l'ingénierie structurelle, tels que les ponts, grues, charpentes, avion de transport, navires de transport et ainsi de suite. Il est l'alliage le plus couramment utilisé pour l'usinage.

Les propriétés mécaniques de cet alliage telles que la dureté et la résistance à la rupture sont améliorées par les traitements thermiques.

Dans ce mémoire nous avons fait des essais de traction pour comprendre le comportement mécanique de l'alliage 6082 avant et après traitements thermiques.

Le travail s'organise en quatre chapitres :

Le premier chapitre contient des généralités sur les alliages d'aluminium tels que la classification, les applications et les caractéristiques des alliages Al-Mg-Si.

Le deuxième chapitre est une recherche bibliographique sur les différents traitements thermiques appliqués sur les alliages d'aluminium.

Le troisième chapitre est consacré aux dispositifs expérimentaux et procédures techniques utilisés dans le travail, en citant à titre d'exemple, la description générale

de la machine de traction, le déroulement de l'essai de traction, les traitements thermiques appliqués.

Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté les résultats expérimentaux obtenus sous forme des courbes de traction résultantes et le calcul de différentes propriétés mécaniques.

Et en fin, ce mémoire se termine par une conclusion générale.

CHAPITRE 01

GENERALITES SUR LES ALLIAGES

D'ALUMINIUM

1.1. Introduction

La première apparition de l'aluminium était en 1854 lors d'une présentation à l'académie des sciences par le chimiste français Sainte-Claire Deville, sous la forme d'un lingot. Cette pièce avait été obtenue par voie chimique [1]. Il est classé comme le métal le plus utilisé après le fer et les aciers [2].

Notre chapitre consiste à étudier l'aluminium et ses alliages et leurs domaines d'applications. On vise la série 6000 utilisant le magnésium et le silicium (Al-Mg-Si) avec cuivre (Cu).

1.2. Obtention de l'aluminium

Fabriqués industriellement depuis 1886 à partir des bauxites (Al_2O_3 , $Al(OH)_3$) et de la cryolithe. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium, contiennent de 40 à 60% d'oxyde d'aluminium hydraté mélangé à de la silice et à de l'oxyde de fer. La bauxite est le minerai le plus utilisé pour obtenir de l'alumine, matière intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium. L'aluminium est produit par électrolyse de l'alumine dans de la cryolithe fondue, à environ $1000^{\circ}C$ dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone [1].

L'aluminium est un métal blanc tirant légèrement sur le bleu de symbole Al. Il appartient au groupe 13 du tableau périodique dont le numéro atomique 13, la masse volumique est 2698.7 kg/m^3 soit environ un tiers de celle de l'acier. La structure cristalline est de type cubique à faces centrées. La température de fusion $660^{\circ}C$. Son coefficient de dilatation thermique linéaire est de l'ordre de $23 \cdot 10^{-6}$, son module de Young est environ $7 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, a une ductilité élevée, donc fort allongement à la rupture (tôles minces, feuilles), bon conducteur de la chaleur et de l'électricité, sa résistance à la corrosion est élevée car le métal, bien que très oxydable, se couvre, au contact de l'air, d'une couche d'oxyde protectrice (couche naturelle étanche d'alumine $< 0,1 \text{ mm}$). Les éléments d'addition diminuent plus ou moins cette résistance. L'aluminium est un matériau relativement élastique mais peu malléable. [3, 4]. Il présente un bon rapport

résistance/poids, ce qui explique les nombreuses applications dans le domaine des transports. Il a une faible résistance à l'usure et la fatigue.

L'aluminium industriel contient 0.5% d'impuretés (Fe+Si), il peut être obtenu presque pur par raffinage électrolytique ($Al > 99.99\%$) [5]. Ces impuretés ont différents effets sur leurs caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques.

A la température ambiante, l'aluminium forme très vite une couche d'oxyde Al_2O_3 (Alumine), épaisse et adhérente, qui protège le métal contre les effets mécaniques et physiques et les attaques chimiques [6].

1.3. Alliages d'aluminium

1.3. 1. Introduction

En général, on utilise rarement de l'aluminium pur pour la fabrication de demi-produits ou de pièces moulées à cause de ses propriétés mécaniques insuffisantes, En effet, il a été montré que l'association de métaux d'addition, tels que, Mg, Mn, Cu, Si, Ni, Ti, et Zn, même en petite quantité, augmente de façon significative certaines propriétés mécaniques. Ainsi, l'opération de fabrication de demi-produits ou de pièces moulées nécessite l'élaboration d'un alliage en fonderie.

1.3. 2. Nuance de l'alliage de l'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 et le manganèse. A côté de ceux-là, d'autres éléments qu'on retrouve sous forme de trace tels que le chrome, le cadmium, le titane, le fer, le zirconium, le cobalt, le lithium, l'étain...etc.

Chaque nuance d'alliage impose un mode d'élaboration et de transformation spéciale, parmi lesquels, on distingue deux modes d'élaboration : Les alliages de moulage et les alliages de corroyage, ces derniers peuvent être subdivisés en deux catégories, les alliages à durcissement structural et sans durcissements structural.

1.3. 3. Propriétés des alliages d'aluminium

Les principales caractéristiques des alliages d'aluminium sont :

- Résistance à la corrosion

Comme pour l'aluminium pur ; les alliages d'aluminium sont protégés contre la corrosion grâce à la formation d'une couche de Al_2O_3 .

La protection anticorrosion peut être améliorée par anodisation. Les risques de corrosion à craindre dépendent des éléments d'addition.

En effet, le fer favorise la corrosion galvanique alors que Cu, Mn, (Mg + Si) et (Mg + Zn) encouragent la corrosion inter granulaire.

- Mise en œuvre

Elle est assez facile par un grand nombre de procédés : laminage, moulage, forgeage, formage, filage, étirage, extrusion, métallurgie des poudres et usinage.

Le coefficient de dilatation important et la grande conductivité thermique imposent, à cause des dilatations, certaines précautions en soudage et en usinage. La soudabilité (MIG, TIG....) dépend de la trempe et du revenu pratiqués sur l'alliage.

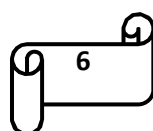
- Traitements thermiques

Ils sont tout à fait différents de ceux des aciers. Après trempe, le durcissement est obtenu par vieillissement naturel ou maturation à température ambiante, ou par revenu à température élevée.

Les alliages avec le cuivre, le silicium, le zinc et ceux avec le magnésium plus le silicium sont dits trempant ou avec durcissement structural.

- Résistance à chaud

La résistance à chaud des alliages d'aluminium au-delà de $150^{\circ}C$ est assez faible.



- Résistance aux basses températures

Les alliages d'aluminium ont un réseau cristallin CFC, par conséquent, ils ne sont pas fragiles.

- Résistance à la fatigue

De manière générale, le coefficient d'endurance est de l'ordre de 0,5 pour les alliages non trempant et de (0,25 à 0,30) pour les alliages trempants.

1.3. 4. Principales nuances normalisées des alliages d'aluminium

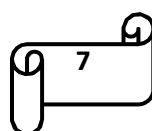
Deux grandes familles : Les alliages d'aluminium corroyés, obtenus par déformation plastique (laminage...) et les alliages d'aluminium pour la fonderie. Les compositions et les microstructures des deux familles sont assez différentes et chacune se divise en deux groupes : ceux pouvant être traités thermiquement et ceux ne pouvant pas être traités ou non trempants.

1.3. 4. 1. Alliages corroyé

Le corroyage est une opération consistant à déformer un métal avec allongement, généralement, mais non obligatoirement dans un sens privilégié : il est effectué à chaud, à température ordinaire et permet par déformation appropriée (filage, matriçage.).

Cette famille, la plus utilisée, comprend tous les produits laminés d'usage courant : barres, profilés, tôles, plaques, bandes ; les produits filés et étirés ; les fils ; les produits forgés ou destinés à la forge, les produits moulés, les lingots de refusion, les composites utilisant l'aluminium et ceux issus de la métallurgie des poudres.

La figure 1.1 présente quelques produits laminés et corroyés en alliages d'aluminium.



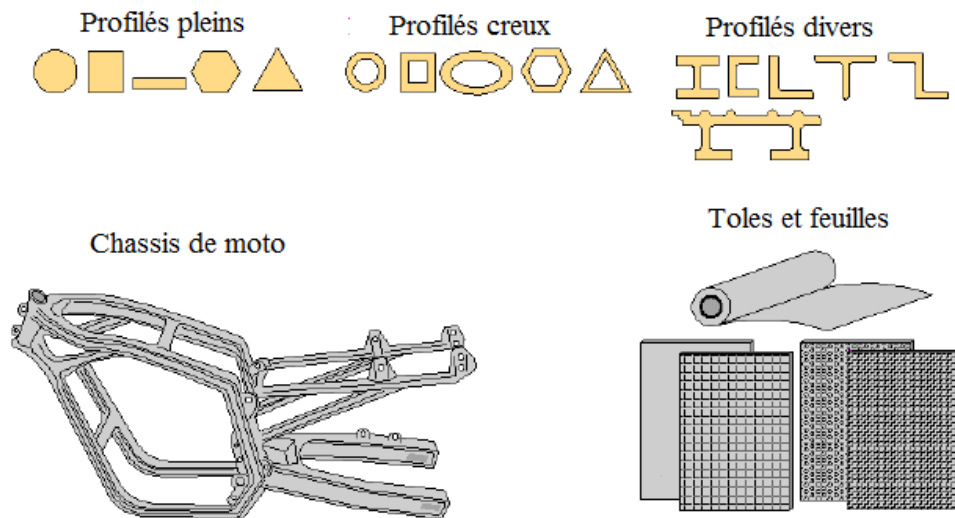


Figure 1.1 : Produits laminés et corroyés en alliages d'aluminium.

1.3. 4. 2. Alliages de moulages

Ils sont utilisés en fonderie pour la fabrication des pièces par la coulée du métal liquide dans des moules en sable ou métallique, en acier ou en fonte. L'inconvénient est à un grand retrait au moulage (3,5 à 8,5% en volume).

La figure 1.2 présente des pièces de fonderie en alliages d'aluminium.

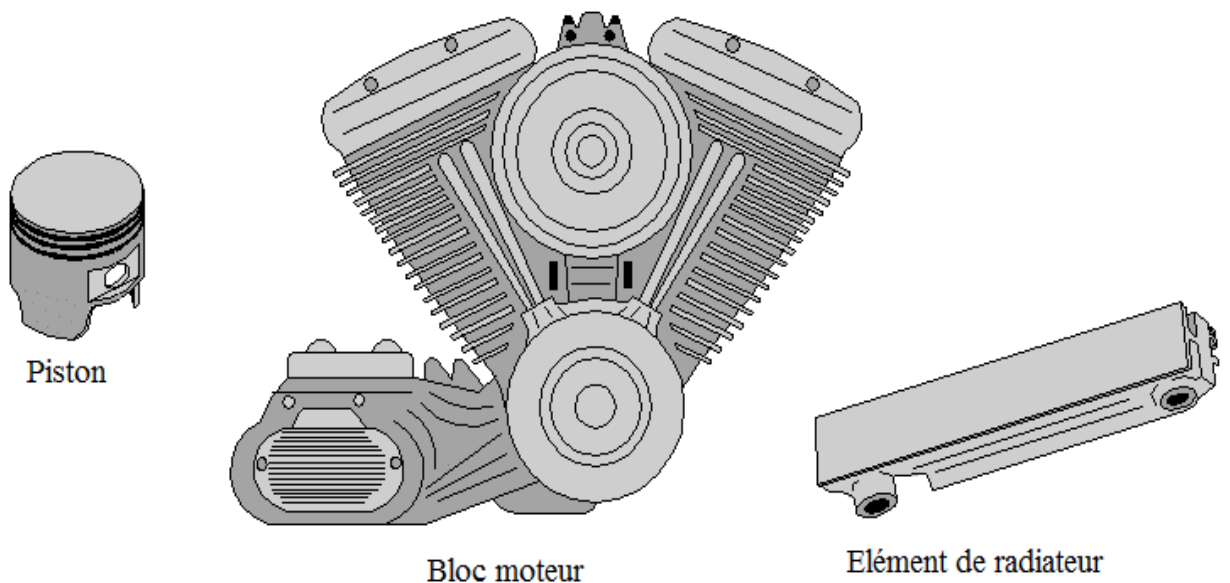


Figure 1.2 : Pièces de fonderie en alliages d'aluminium.

1.3. 5. Désignation des alliages de moulage (fonderie)

Les alliages de moulage sont également regroupés en huit séries caractérisées par le premier chiffre de leur appellation.

La série 2xx.x contient du cuivre qui donne une bonne résistance mécanique et thermique à l'alliage. Il faut cependant utiliser un revêtement anticorrosion sur ce type d'alliage.

La série 3xx.x regroupe les alliages de moulage les plus utilisés. Ils sont constitués d'aluminium, de silicium et de cuivre. Le silicium améliore la coulabilité du liquide, réduit le risque de formation de criques et minimise la porosité par retrait.

Les alliages de la série 4xx.x contiennent aussi du silicium et quelques fois du cuivre, du fer ou du nickel.

La série 5xx.x contient du magnésium, tandis que la série 7xx.x contient du zinc, du magnésium et du chrome.

Les alliages de la série 8xx.x contiennent de l'étain et du cuivre qui leur confèrent une bonne résistance mécanique et une bonne coulabilité [7].

1.3. 6. Désignation des alliages de corroyage

Ils sont référencés par une désignation à 4 chiffres. Le premier chiffre désigne les principaux éléments ajoutés. Le second chiffre permet d'identifier les variantes successives d'un alliage dans la famille 1000 les deux derniers chiffres désignent le pourcentage en aluminium (1050=50 %) dans les autres familles ils sont choisis de manière aléatoire.

La série 2000 ou 2xxx, regroupe tous les alliages aluminium cuivre. La présence du cuivre donne de bonnes caractéristiques mécaniques à l'alliage, il améliore son usinabilité et sa résistance au fluage, mais diminue sa résistance à la corrosion et sa soudabilité.

La série 3xxx regroupe les alliages aluminium-manganèse. Le manganèse donne à l'alliage une bonne résistance à la corrosion et une meilleure aptitude à l'emboutissage.

Les alliages de la série 5xxx contiennent du magnésium qui améliore également la résistance à la corrosion, la soudabilité, l'usinabilité et l'aptitude à l'anodisation de l'alliage.

Les alliages de la série 6xxx aluminium-magnésium-silicium sont prédisposés au filage et plus utilisés dans les profilés pour bâtiment.

La série 7xxx est plutôt utilisée dans le domaine de l'aéronautique compte tenu des bonnes caractéristiques mécaniques que le zinc donne à l'aluminium. Cet alliage requiert cependant une protection contre la corrosion.

Finalement, l'étain est aussi quelques fois combiné avec l'aluminium pour créer des alliages ayant une forte résistance au frottement. L'ajout de nickel à l'aluminium par exemple, augmente la résistance au fluage et le chrome sert dans certains cas comme complément au manganèse afin de réduire le risque d'apparition de criques [7].

Les alliages d'aluminium de corroyage se divisent en deux groupes très distincts tant par la gamme de fabrication que par certaines propriétés comme :

Les alliages sans durcissement structural (par écrouissage) et les alliages à durcissement structural.

Le tableau 1.1 indique les familles des alliages d'aluminium sans durcissement structural (par écrouissage).

Durcissement par écrouissage

Famille	Élément d'alliage	% en masse	Additions possibles
1000	Aucun		Cuivre
3000	Manganèse	0,5 – 1,5	Magnésium – cuivre
5000	Magnésium	0,5 - 5	Manganèse – Chrome
8000	Fer et silicium	Si : 0,3 – 1 Fe : 0,6 - 2	Nickel

Tableau 1.1 : Familles des alliages d'aluminium à durcissement par écrouissage [5].

1.3. 7. Alliages à durcissement structural

Les caractéristiques mécaniques maximales de ces alliages sont obtenues par un Traitement en trois étapes : chauffage, refroidissement et maintien.

Le tableau 1.2 montre les familles des alliages d'aluminium à durcissement structural.

Durcissement structural			
Famille	Élément d'alliage	% en masse	Additions possibles
6000	Magnésium et silicium	Mg : 0,5 – 1,5 Si : 0,5 – 1,5	Silicium – magnésium- manganèse
2000	Cuivre	2 - 6	
7000	Zinc et magnésium	Zn : 5 – 7 Mg : 1 - 2	Cuivre

Tableau 1.2 : Familles des alliages d'aluminium à durcissement structural [8].

1.3. 8. Symboles des traitements métallurgiques des alliages d'aluminium

Cette désignation est ajoutée aux celle de numérique, elle est composée de groupe des lettres (F, O, H, T, W), indiquent l'état métallurgique de base suivi parfois par un ou plusieurs chiffres signifient le moyen principal d'obtention.

Elle représente le déroulement de traitements utilisés pour obtenir les différents états métallurgiques d'aluminium et ses alliages.

- L'état brut (F)

L'état métallurgique brut de fabrication des produits réalisés par déformation plastique. Il est symbolisé par la lettre F et n'est pas suivi d'aucun chiffre.

- L'état recuit (O)

L'état métallurgique recuit ou recristallisation, c'est l'état des produits obtenus par

Traitement thermique dit recuit, il est indiqué par la lettre O.

- L'état trempé (W)

Représente l'état métallurgique des produits obtenus par mis en solution trempé, son symbole est la lettre W.

- L'état écroui (H)

L'état écroui représente l'état des produits durcis par déformation, avec ou sans maintien ultérieur à une température suffisante pour provoquer un adoucissement partiel du métal.

- L'Etat durci (T)

Dans l'état de durcissement par traitement thermique (durcissement structural), les Traitements thermiques considérés sont des combinaisons de tout ou partie des traitements de mise en solution, trempe, maturation, revenu avec application éventuelle de déformations plastiques. Il est symbolisé par la lettre T. Le premier chiffre (1 à10) suivant la lettre T sert à identifier les séquences des traitements thermiques de base du durcissement structural, alors les désignations des états métallurgiques des alliages d'aluminium à durcissement structural (états T) sont subdivisées ci-après [9,10] :

- T1 : désigne les produits refroidis depuis la température élevée de mise en forme et muris dans des conditions stables.
- T2 : désigne les produits refroidis depuis la température élevée de mise en forme, écrouis à froid et muris dans des conditions stables.
- T3 : c'est la désignation des produits mise en solution, écrouis et muris dans des conditions stables.
- T4 : cette désignation est employée aux produits mise en solution et muris dans des conditions stables.
- T5 : c'est la désignation appliquée à des produits refroidis depuis la température élevée de mise en forme par filage ou autre et revenus.
- T6 : cette désignation indique les produits mises en solution, trempés et revenus.

- T7 : cette désignation est utilisée aux produits mises en solution, trempés et sur revenus.
- T8 : cette désignation est utilisée aux produits mises en solution, écrouis et revenus.
- T9 : cette désignation est utilisée aux produits mises en solution, revenus et écrouis.
- T10 : cette désignation est utilisée aux produits refroidis depuis la température élevée de mise en forme, écrouis et revenus.

CHAPITRE 2
TRAITEMENTS THERMIQUES
DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

2.1. Introduction

Les traitements thermiques se présentent par une suite d'opérations d'échauffement et de refroidissement. Les traitements thermiques, utilisés depuis longtemps en métallurgie, permettent généralement d'améliorer les propriétés mécaniques d'un matériau (résistance à la traction, dureté...). En modifiant de façon contrôlée sa microstructure, soit par la variation de la température de traitement, soit en variant la durée du traitement, ou encore par une combinaison des deux. Certains éléments (Mg, Cu, Ni, etc.) forment des précipités de dureté différente qui augmentent la résistance mécanique des alliages d'aluminium.

2.2. 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.

2. 2. 1. Traitements thermique d'homogénéisation

Ces traitements ont pris depuis ces dernières années une ampleur considérable dans le cas des alliages d'aluminium. Ce sont des traitements comportant un chauffage à des températures relativement élevées. Ils consistent en général en

des maintiens de 6 à 48 heures à des températures allant de 450° C à 610° C, qui ont pour but de dissoudre les phases métalliques en excès et de réaliser une homogénéisation de la composition de la solution solide.

Le corroyage est une opération consistant à déformer un métal avec allongement. Il est effectué à chaud, à tiède ou à température ambiante et permet par déformation appropriée (forgeage, matriçage, laminage, filage) d'obtenir des produits à la forme désirée [11, 12].

- Pratique des traitements d'homogénéisation

La durée du traitement d'homogénéisation est généralement en fonction de la section des produits.

Les températures d'homogénéisation dépendent essentiellement de la nature des alliages et également du but recherché. Les températures le plus généralement appliquées aux alliages 6000 sont les suivantes :

- alliages 6000 du type 6060 : 540°C à 590°C ;
- alliages 6000 du type 6081 ou 6082 : 525°C à 550°C ;

2. 2. 2. Traitements thermiques d'adoucissement

Ces traitements ont pour but principal d'améliorer ou de régénérer la plasticité d'un alliage donné.

Lorsqu'on fait subir à l'aluminium durci par écrouissage, un chauffage à température suffisante, la structure écrouie est progressivement remplacée par une nouvelle structure à grains reformés : lorsque la recristallisation est complète, l'alliage est dit recuit ou adouci. Ce traitement consiste à chauffer une période relativement longue à une température élevée pour ramollir l'alliage produit par l'évolution des précipités provenant des constituants de l'alliage. L'état recuit est l'état optimal pour réaliser des déformations ou des mises en forme à froid importantes et difficiles.

2. 2. 3. Traitements thermiques de durcissement structural

Le durcissement structural a une importance primordiale dans la métallurgie des alliages d'aluminium car c'est le processus par excellence qui permet d'obtenir des niveaux élevés de résistance mécanique. Pour obtenir le durcissement structural, on étudie les traitements de mise en solution, trempe, maturation et revenu des alliages d'aluminium.

2. 2. 3. 1. Mise en solution solide

Elle consiste en un maintien à une température suffisamment élevée afin de dissoudre, c'est-à-dire, mettre en solution solide, les éléments d'addition présents dans l'alliage en phases dispersées (ex. Cu, Mg, Si) dans la matrice. La procédure consiste à maintenir l'alliage à une température suffisamment élevée et pour une période de temps assez long afin d'obtenir une solution solide homogène.

Les domaines des températures de mise en solution s'étendent le plus souvent de 450°C à 500°C pour l'aluminium et de 450°C à 590 °C pour ses alliages [13].

La solubilité des éléments d'addition usuels augmente avec la température [14].

La durée de mise en solution doit être suffisante pour mettre en solution solide la plus grande quantité possible d'éléments intermétalliques. Cette durée dépend d'autres facteurs, et en particulier : la nature de l'alliage.

2. 2. 3. 2. Trempe (refroidissement rapide)

Malgré sa très courte durée, la trempe est l'une des opérations les plus cruciales effectuées lors d'un traitement thermique. Cette opération consiste en un refroidissement suffisamment rapide de la solution solide obtenue dans la première étape (mise en solution solide) pour que les précipités intermétalliques stables n'aient pas le temps d'être formés. Elle ne prend pas de temps, puisqu'elle

a une très courte durée. L'alliage est dit dans un état de trempe fraîche, il présente une résistance mécanique relativement faible mais une bonne plasticité. Elle peut être faite à l'eau, à l'air et à l'huile.

Si le refroidissement est très lent, il y a précipitation grossière et non homogène des phases qui ne pourraient plus participer au durcissement structural.

Pour éviter la dévaluation de la microstructure de mise en solution, le transfert du four vers le milieu de trempe doit se faire très rapidement, car la précipitation est très rapide à ce moment précis. Selon une étude [15], elle doit avoir lieu dans les sept à quinze secondes suivant la mise en solution.

Deuxièmement, le volume du milieu refroidissant doit être suffisamment grand pour éviter qu'il ne s'échauffe lors de la trempe des pièces. Donc, il doit bien absorber la chaleur de la pièce sinon on doit assurer une circulation du liquide de refroidissement.

Le résultat de cette opération (Trempe) est une solution solide sursaturée en éléments d'alliages, et également en lacunes [16].

La trempe empêche la reformation des précipités. À l'inverse des aciers, la trempe a donc pour conséquence un adoucissement de l'alliage.

2. 2. 3. 3. Maturation

Après trempe, l'alliage durcit plus ou moins rapidement suivant sa composition par simple séjour à la température ambiante : c'est la maturation ou vieillissement naturel. Le durcissement est stabilisé au bout d'un certain temps dépendant de la composition de l'alliage, en général quelques jours pour les alliages série 2000, une à quelques semaines pour les alliages série 6000, quelques mois pour les alliages série 7000.

La maturation des alliages Al-Si-Mg est plus complexe. La figure 35 donne un exemple dans le cas de tôles en alliage 6082 mises en solution à 540°C et trempées à l'eau.

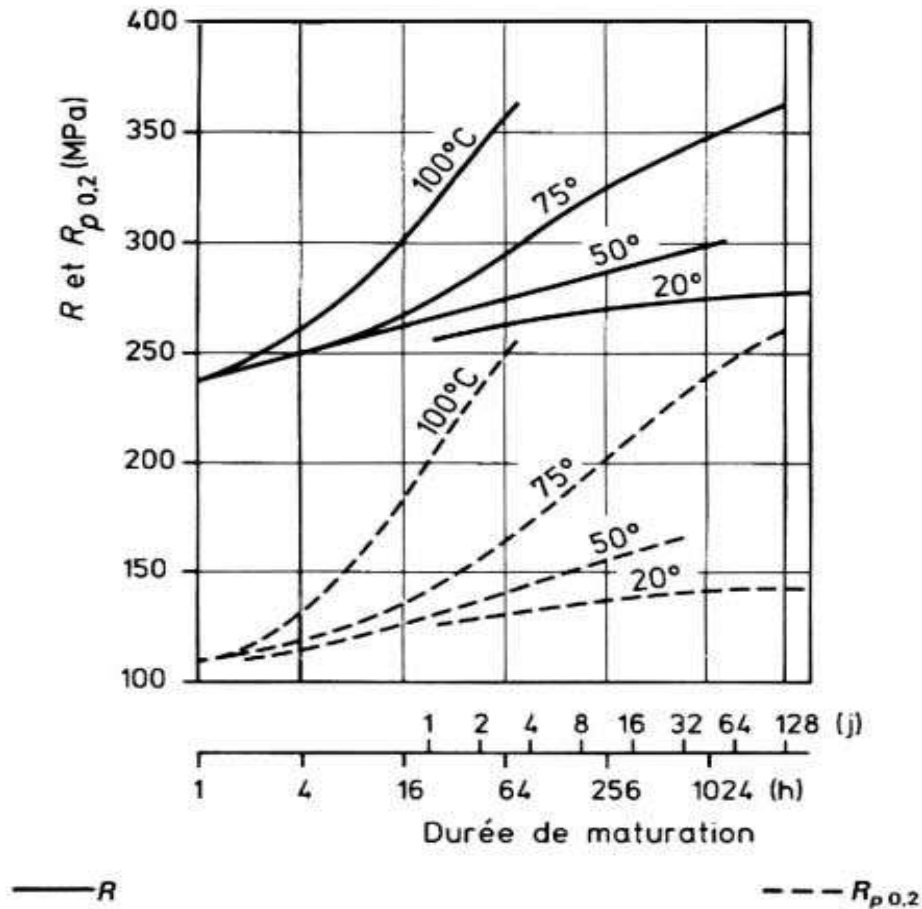


Figure 35 – Évolution, après mise en solution et trempe, des caractéristiques mécaniques de traction de l'alliage 6082 en fonction de la durée de la maturation et de la température de maturation [17].

2. 2. 3. 4. Traitements de revenu ou de maturation artificielle

Le durcissement peut être augmenté par un traitement à une température supérieure à l'ambiante pour beaucoup d'alliages, c'est le traitement de revenu ou vieillissement artificiel qui confère une microstructure différente de celle de la maturation et conduit à des caractéristiques supérieures, en particulier pour la limite d'élasticité.

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 et il est effectué à des températures allant jusqu'à 240°C (100°C 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, un abaissement de la limite d'élasticité et du module d'élasticité pendant la montée en température.

Industriellement, il est bien évident que le revenu ne peut pas être toujours effectué immédiatement après trempe. Différents remèdes efficaces ont pu être trouvés, en particulier dans le cas des alliages A-SG, à savoir :

- soit effectuer un pré-revenu de courte durée : 2 à 8 min vers 180 à 200°C immédiatement après trempe. Cette solution est tout à fait concevable industriellement en utilisant un four à passage disposé après le bac de trempe dans la chaîne de fabrication. Ce pré-revenu très court laisse à l'utilisateur un délai de l'ordre de 1 semaine, au cours duquel le temps d'attente entre trempe et revenu n'intervient pratiquement pas sur les caractéristiques mécaniques finales du produit [18] ;

- soit, si l'on ne peut effectuer le pré-revenu immédiatement après trempe, réaliser le revenu final en deux temps : le premier temps consistant en un séjour de quelques minutes à une température de l'ordre de 250°C et le second temps étant constitué par le revenu normal de précipitation [19, 20].

Soit encore, et toujours si l'on ne peut effectuer le pré-revenu immédiatement après trempe, réaliser ce pré-revenu en deux temps, le premier consistant comme dans le cas précédent en un chauffage de quelques minutes à une température de l'ordre de 250°C, et le second temps étant constitué par le pré-revenu proprement dit de 2 à 8 min vers 180 à 200°C.

CHAPITRE 03

DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET TECHNIQUES DE MESURE

3.1. Introduction

Durant le fonctionnement des systèmes mécaniques, les matériaux sont sollicités par des efforts provoquant des changements dans leurs propriétés. Les propriétés mécaniques les plus importantes sont la rigidité, la limite élastique et la ductilité mesurées par l'essai de traction. Donc, il est nécessaire de savoir les conditions de déformations et de rupture de ces matériaux.

Ce chapitre a pour objectif de présenter le principe de l'essai de traction pour déterminer certaines caractéristiques mécaniques essentielles des matériaux et les dispositifs expérimentaux utilisés lors des caractérisations de matériaux étudiés.

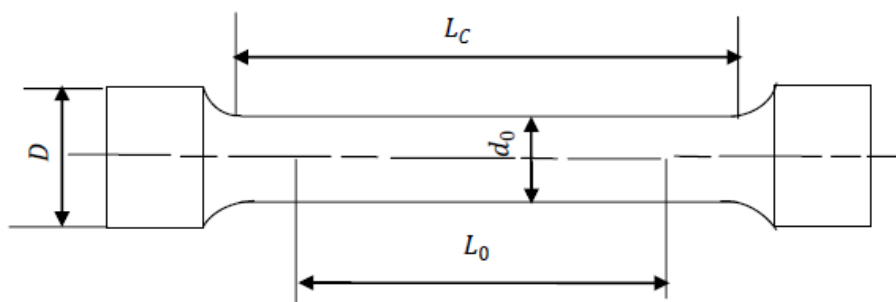
3.2. Principe d'essai de traction

Soumettre une éprouvette en traction, en appliquant lentement et progressivement un effort de traction croissant jusqu'à la rupture dans l'intention de déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau de l'éprouvette.

3.3. Echantillon d'essai de traction

Il existe différents types d'éprouvettes selon la forme du produit (barres, fils, tôles, tubes, pièces forgées ou moulées...) et la nature du matériau.

Exemple d'Éprouvettes tournées dans des barres (figure 3.1) :



L_0 = Longueur initiale entre repères

L_c = Longueur de la partie calibrée

L_t = Longueur totale de l'éprouvette

S_0 = Section initiale de l'éprouvette

d_0 = Diamètre initial de l'éprouvette

Figure 3.1 : Eprouvette de traction cylindrique.

Les extrémités des éprouvettes peuvent présenter la forme voulue pour s'adapter aux mâchoires de la machine d'essai. Les dimensions des éprouvettes sont précisées par les normes.

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

Sachant que la section $S_0 = \pi.d_0^2/4$, donc : $d_0 = 1,13 S_0$

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

On a : $L_0 = 5,65 S_0$

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

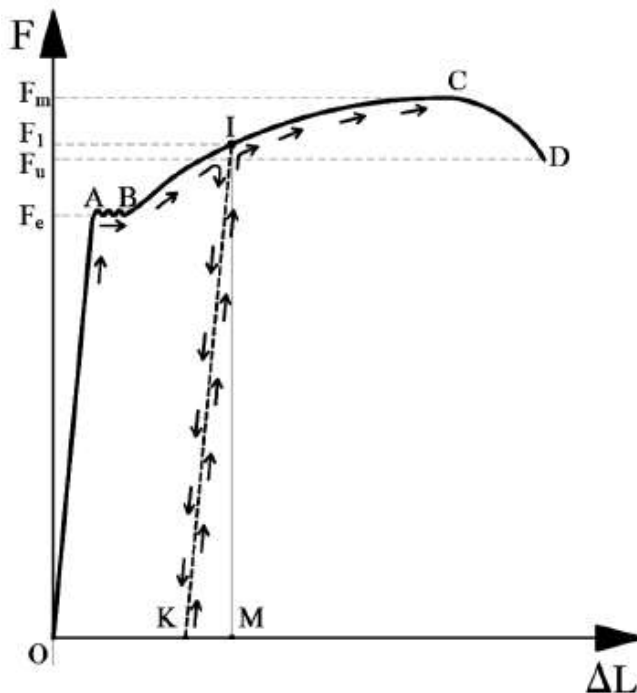
Le diamètre de la tête d'amarrage l'éprouvette est :

$$L_0 + 2 d_0 \geq L_c \geq L_0 + 0,5 d_0$$

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

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

En enregistrant la force appliquée à l'éprouvette par la machine de traction et son allongement progressif (figure 3.2).



A : Limite de la phase élastique.

C : point de charge maximale qui marque le début de la striction.

D : point de rupture de l'éprouvette.

F_e : charge à la limite apparente d'élasticité.

F_m : charge maximale.

F_u : charge ultime.

$\Delta L = L - L_0 =$ Allongement absolu avec L longueur utile de l'éprouvette (fonction de l'effort de traction F) Fig. 4.

Figure 3.2 : Courbe conventionnelle de traction (efforts-allongements) [21].

On détermine une série de caractéristiques mécaniques importantes [22], en général la force F et l'allongement Δl aux dimensions initiales de l'éprouvette d'essai.

3.3.1. Première phase : déformation élastique

Est une droite OA très proche de l'axe des charges. Si on supprime l'effort, l'éprouvette reprend sa longueur initiale L_0 ;

La charge F_e correspondante est appelée charge à la limite apparente d'élasticité. Pendant cette phase la diminution de la section S_0 est constante et si faible qu'on peut la négliger.

Dans la phase élastique le matériau suit la loi de Hooke qui exprime la dépendance linéaire entre les contraintes et les déformations : $\sigma = E \varepsilon$ avec :

$\sigma = F/S_0$ S_0 est l'aire de la section initiale de l'éprouvette.

σ contrainte normale en un point de la section droite en N/mm^2 ou MPA.

E : la pente de la partie élastique, est constante physique du matériau qui se détermine expérimentalement, appelée coefficient de Hooke ou module de Young ou module d'élasticité longitudinale.

$\varepsilon = \Delta L/L_0 = (L-L_0/L_0)$ appelé allongement relatif ou allongement unitaire ou dilatation linéique relative; c'est le rapport de l'allongement absolu ΔL à la longueur initiale L_0 de l'éprouvette.

3.3.2. Deuxième phase : déformation permanente est donné par la courbe ABCD.

Le point A est la limite d'élasticité (ou résistance élastique à la traction R_e) :

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

Le point B correspond à la charge maximale ; il est appelé résistance à la traction où

Résistance à la rupture R_m (bien qu'il n'y ait pas encore rupture)

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

Si on supprime l'effort lorsqu'il a atteint la valeur F_1 , l'éprouvette ne reprend pas sa longueur initiale, elle conserve un certain allongement ; la déformation est permanente.

En traçant le diagramme de "retour" obtenu en faisant décroître lentement la force de traction de la valeur F_1 à la valeur zéro, on obtient la droite IK parallèle à OA. La longueur OK mesure la valeur de l'allongement permanent obtenu avec la Force F_1 .

L'allongement relatif total ou A pour cent de l'éprouvette est l'allongement de rupture :

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

La striction est la réduction de section maximale de l'éprouvette rompue c'est-à-dire dans la section de rupture (fig-3). Le coefficient de striction traduit l'aptitude à la déformation à froid.

$$Z\% = 100 \cdot \frac{S_0 - S_u}{S_0}$$

Avec S_0 : section initiale et S_u : section après rupture.

3.4. Vitesses d'essai de traction (sollicitation)

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

Le tableau 3.1 donne les valeurs de la vitesse de sollicitation en traction de différents matériaux.

Aciers	$V \leq 0,15 L_0$ (mm/min)	ou ≤ 30 N/mm²/sec
Aluminium	$V \leq 0,009 L_0$ (mm/min)	ou ≤ 10 N/mm²/sec
Cuivre	$V \leq 0,006 L_0$ (mm/min)	

Tableau 3.1 : Vitesse de sollicitation en traction de différents matériaux [23].

3.5. Présentation de la machine de traction

Elle est disponible au sein du laboratoire de sciences des matériaux, faculté de technologie à l'université de M'sila.

Cette machine est un appareil d'essai vertical à colonne à entraînement hydraulique (figure 3.3). La force de traction maximale peut atteindre 50 KN dans les deux directions. Elle est équipée d'un PC pour la saisie et l'acquisition des données et des informations relatives à l'éprouvette et à la machine.

La machine de traction est équipée d'un dispositif de mesure d'allongement et dispositif d'enregistrement de diagramme plus un capteur de force, et un système d'amarrage coaxiale adapté à la forme des éprouvettes. Le capteur d'allongement mesure instantanément l'allongement de l'éprouvette alors que le capteur de force indique la charge appliquée.

On peut monter sur cette machine d'autres accessoires à savoir le montage relatif à l'essai de cisaillement par exemple.



Figure 3.3 : Machine de traction WP 310.

3.6. Identification du matériau utilisé

Dans le cadre de ce travail, un alliage à base d'aluminium du système Al-Mg-Si (série 6xxx) a fait l'objet de notre étude. Sa désignation Européenne est AW-6082 ou AlSi1MgMn, la désignation Française est 6082. Il est apte au durcissement structural, sous forme de produits laminés ou filés, de diamètre 12 mm suivant EN 573-3 / EN 515 & EN 754-2, avec de bonnes propriétés d'extrusion et de forgeage, une bonne anodisation et une bonne résistance à la corrosion. Il convient à la fabrication de bateaux, de composants de construction, de vélos, de pièces automobiles, d'instruments optiques, de matériaux en aluminium pour véhicules ferroviaires, etc.

Cet alliage est utilisé dans la fabrication des pièces mécaniques, pièces de machine mécano-soudée, plaques de base, menuiserie métallique, industrie textile, articles ménagers. On note que cet alliage n'est pas stable du point de la vue mécanique lors de son vieillissement naturel, c'est pourquoi nous sommes intéressés à son étude. Sa composition chimique (pds %) est donnée dans le tableau 3.2 selon la référence UNI EN 573-3.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0,70 – 1,30	0,50 max	0,10 max	0,40 – 1,00	0,60 – 1,20	0,25 max	0,20 max	0,10 max

Tableau 3.2 : Composition chimique (pds %) de l'alliage 6082.

Les résultats de l'analyse chimique (pds %) spectroscopique de notre alliage sont indiqués dans le tableau 3.3.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ni
0,85	0,78	0,71	0,56	1,20	0,07	0,40	0,17

Tableau 3.3 : Composition chimique (pds %) de l'alliage 6082 par spectroscopie.

3.7. Présentation des échantillons (éprouvettes)

La forme géométrique et les dimensions en mm de l'éprouvette choisie (selon la norme ISO 6892-1) sont représentées dans la figure 3.4.

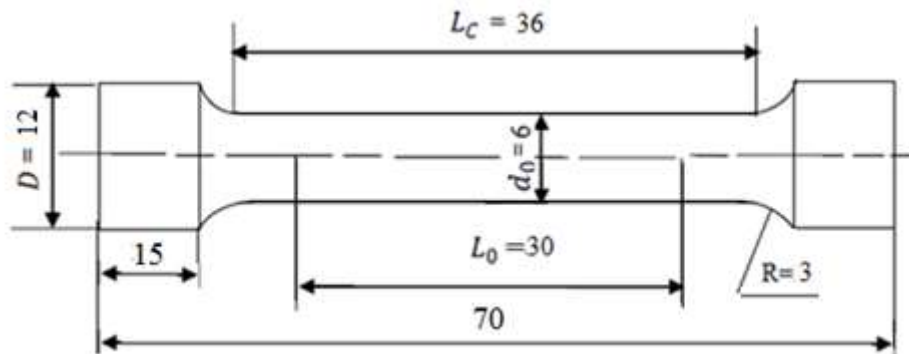


Figure 3.4 : Eprouvette de traction utilisée.

3.8. Préparation des éprouvettes

3.8.1. Usinage des éprouvettes

Des éprouvettes cylindriques ont été réalisées, à partir d'une barre découpée sous la forme et les dimensions voulues à l'aide d'une scie mécanique (figure 3.5), puis elles ont été passées par le poste d'usinage (tournage : figure 3.6) afin d'avoir les échantillons comme un produit fini selon les dimensions et les critères géométriques demandés.



Figure 3.5 : découpage de l'éprouvette (ébauche).



Figure 3.6: Tournage de l'éprouvette.

3.9. Traitements thermiques Appliqués

D'une façon générale, les traitements thermiques ne modifient pas la composition chimique de l'alliage, mais ils permettent de modifier (en général améliorer) les caractéristiques des matériaux, notamment : La dureté, la résistance à la traction, la résilience et l'élasticité. Les traitements thermiques des éprouvettes ont été effectués dans un four sous air possédant une très bonne homogénéité de température (de l'ordre de $\pm 2^{\circ}\text{C}$) de type Nabertherm (figure 3.7).



Figure 3.7 : Four électrique Nabertherm.

Le type de traitement thermique appliqué est le traitement de durcissement structural. Ce dernier se fait comme suit :

Mise en solution solide : chauffage à température élevée : 540 pendant 30mn pour mettre en solution solide (un mélange de corps purs formant un solide homogène) le plus grand nombre possible d'éléments durcissants solubles.

Refroidissement rapide : L'eau est souvent utilisée comme milieu de trempe pour maintenir la solution solide en sursaturation [24].

La figure 3.8 représente deux éprouvettes, l'une avant traitement thermique (figure 3.8a) et l'autre après mise en solution et trempe (figure 3.8b).



Figure 3.8 : Eprouvettes de traction : (a) Avant traitement thermique ; (b) Après traitement thermique.

La valeur moyenne de la dureté de l'alliage d'aluminium 6082 utilisé après trempe est 103HV (diminution de la dureté comparée avec le matériau non traité (121HV)).

3.10. Traitements de revenu ou de maturation artificielle

Pré-revenu en deux temps : Pré-revenu 1 min à 250 °C + 4 min à 200 °C (3 j après trempe) pour éviter la maturation naturelle.

Revenu 8 h : appliqué trois jours après le pré-revenu à 240 °C, 200 °C, 160 °C et 120 °C.

3.11. Essai de micro dureté

Cet essai consiste à mesurer l’empreinte faite dans une partie de surface du matériau destiné, ceci est utile pour estimer sa dureté.

Pour donner des résultats satisfaisants de la micro dureté, il faut préciser tous les paramètres, charge appliquée, temps de mise en charge et préparation de la surface de l’échantillon (polissage).

Le polissage dans notre cas est obtenu manuellement, vise à rendre les surfaces uniformes. Il consiste à abraser la surface sous une charge constante, à l’aide de papiers revêtus de carbure de silicium (SIC) à indice de granulation progressif jusqu’à 1000, montés sur des tourets de polissage dont la vitesse est de 300 tr/min, équipés d’un système d’arrosage à l’eau courante pour éviter l’échauffement des échantillons (figure 3.9).



Figure 3.9: Polisseuse.

La mesure de la micro dureté est basée sur la détermination des dimensions d’empreintes produites dans le matériau par un pénétrateur de forme pyramide (Vickers), sous l’action d’une charge appliquée.

Le rapport de la force appliquée F de 200 grammes à la surface S en cours de l’empreinte donne la dureté HV.

La dureté Vickers HV est calculée par : $HV = 0.189F/d^2$

$$d = (d_1 + d_2)/2$$

H : dureté Vickers,

F (N) : charge appliquée au pénétrateur,

d (mm) : diagonale moyen de l’empreinte.

Le micro uromètre utilisé est indiqué par la figure 3.10.



Figure 3.10: Microduromètre de type Zwick/Roell.

3.12. Déroulement de l’essai de traction

a) L’éprouvette sur les deux mors de la machine de traction est placée comme indique la figure 3.11.



Figure 3.11 : Epreuve fixée sur les deux mors.

- b) Saisir les paramètres identifiants l'essai relatifs au fonctionnement de la machine, matière...etc.
- c) Revérifier les données déjà saisies puis lancer l'essai.
- d) L'interface visionne l'allure de la courbe au fur et à mesure que le mors mobile de la machine se déplace avec une vitesse de traction 2mm/min jusqu'à la rupture de l'éprouvette (figure 3.12).



Figure 3.12 : Rupture de l'éprouvette.

e) Enregistrement des Courbes : Allongements / forces (figure 3.13a) et contraintes /déformations (figure 3.13b).

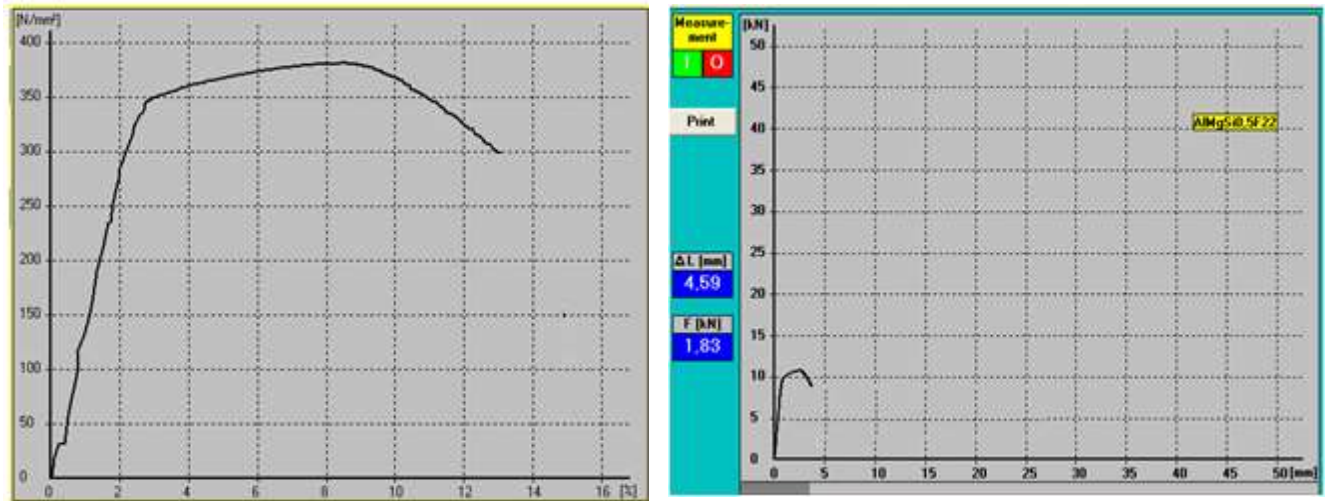


Figure 3.13 : Courbes de traction : (a) Allongements / forces ;
(b) Contrainte /déformation.

CHAPITRE 04

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

4.1. Introduction

Il est généralement connu que l'effet des traitements thermiques de vieillissement joue un rôle important dans l'optimisation des propriétés mécaniques des alliages d'aluminium telles que la dureté et la résistance à la traction.

Dans ce travail, on s'est intéressé à l'étude des effets de la variation de température de revenu sur l'évolution des caractéristiques mécaniques de l'alliage 6082.

4.2. Comportement mécanique du matériau en traction en fonction de la température de revenu

La courbe de traction est la courbe obtenue à partir de l'enregistrement contrainte- déformation. Elle présente en abscisses la déformation et en ordonnées, la résistance unitaire et l'allongement provoqué par la charge, aux valeurs S_0 et L_0 de l'éprouvette (figures 4.1, 4.2, 4.3 et 4.4).

En regroupant les résultats des essais de traction d'aluminium et leur alliage 6082 avant et après les traitements thermiques comme suit :

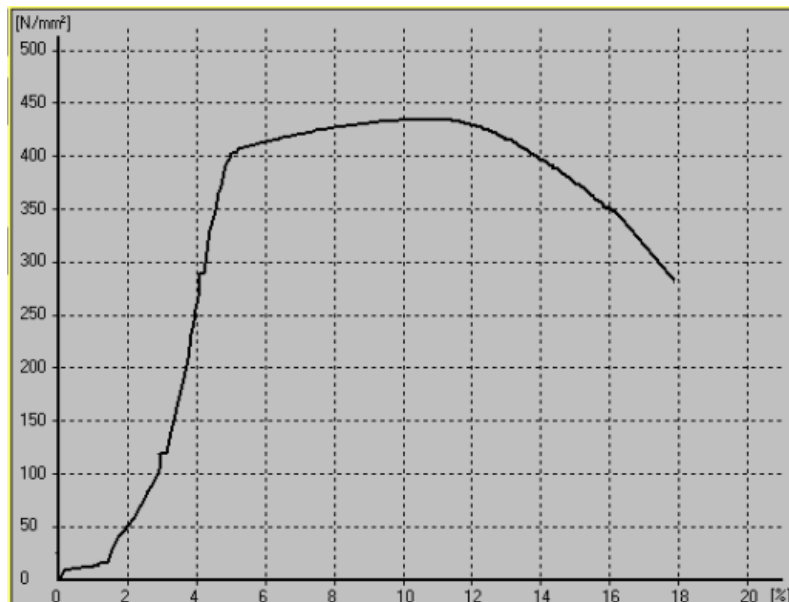


Figure 4.1 : Courbe de traction (contrainte- déformation) du matériau à la température de revenu 120°C.

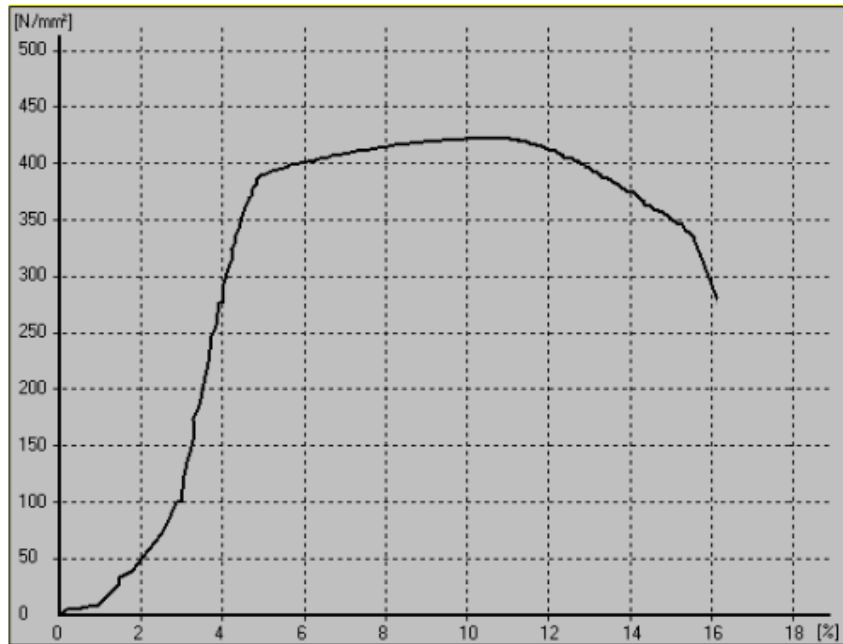


Figure 4.2 : Courbe de traction (contrainte- déformation) du matériau à la température de revenu 160°C.

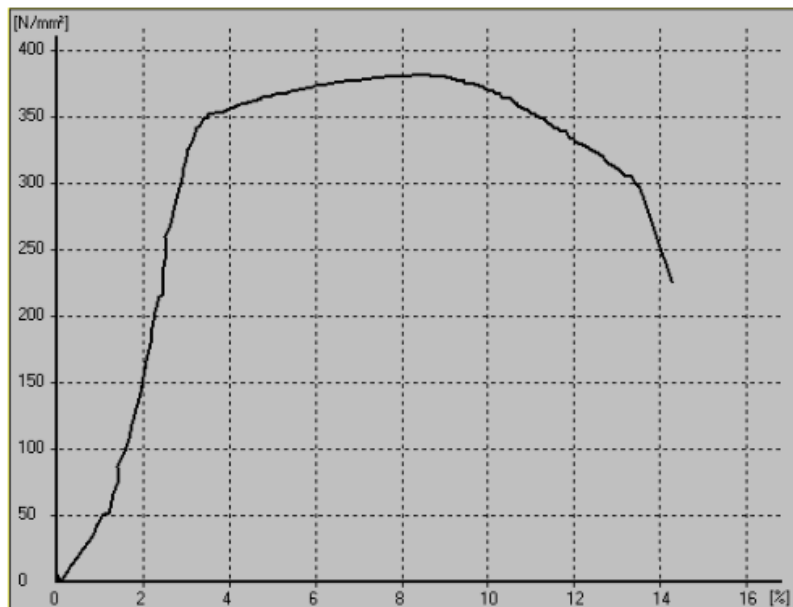


Figure 4.3 : Courbe de traction (contrainte- déformation) du matériau à la température de revenu 200°C.

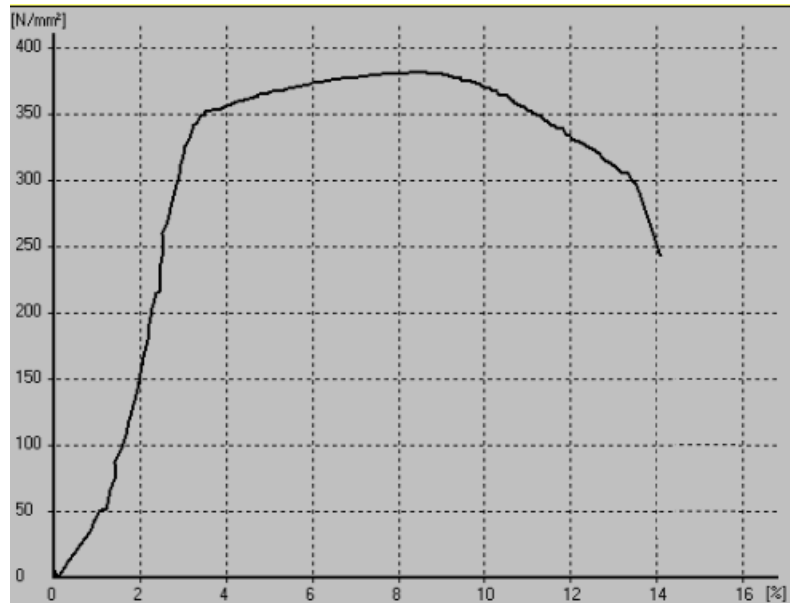


Figure 4.4 : Courbe de traction (contrainte- déformation) du matériau non traité.

On peut déduire que toutes les courbes enregistrées après les tests de traction pour tous les échantillons sont presque identiques et suivent le même comportement mécanique du matériau en traction.

D'après les courbes de traction figurées auparavant, on peut tirer le suivant :

La zone linéaire représente le domaine élastique. Dans cette zone, la relation entre la contrainte et la déformation est linéaire. La déformation est réversible c.a.d, si on enlève la charge, l'éprouvette revient à sa longueur initiale. Le domaine élastique linéaire est décrit par la loi de Hooke connue.

4.2.2 Domaine plastique homogène

Dans le domaine plastique homogène la déformation est permanente et la limite d'élasticité augmente c.a.d si on enlève la charge, l'éprouvette ne revient pas à sa longueur initiale. Le sommet de la courbe s'appelle la charge maximale. Au-delà de cette charge, la déformation est concentrée dans une zone dite zone de striction

ou la déformation est permanente jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

4.3. Résultats obtenus par traitement thermique de revenu

Le tableau 4.1 rassemble les grandeurs obtenues en mm pour les longueurs et les diamètres et en mm² pour les sections après les tests de traction effectués, en se basant sur les formules qu'on a cité dans le chapitre 3.

Tem de rev °C	L_f	L_0	ΔL	d_0	S_0	d_f	S_f	A%	Z%
120	74.07	70.41	3.66	6.05	28.73	4.52	16.03	5.19	44.2
160	75.84	71.96	3.88	6.10	29.20	4.61	16.68	5.39	42.87
200	73.53	70.10	3.43	6.02	28.44	4.4	15.19	4.89	46.58
Non traité	75.31	71.63	3.68	6.03	28.54	4.51	15.96	5.13	44

Tableau 4.1 : Grandeurs obtenues après les tests de traction effectués.

Les caractéristiques mécaniques obtenues par les essais de traction sur le matériau étudié en fonction des traitements de revenu sont regroupées dans le tableau 4.2. Dans ce tableau, les valeurs de la dureté (HV), de la résistance maximale à la rupture (R_r), de l'allongement à la rupture (A%), du coefficient de striction (Z%) sont reportées.

Température de revenu [°C]	HV	R_m	A%	Z%
120	151	428,5	5.19	44.2
160	147	420,5	5.39	42.87
200	133	381	4.89	46.58
Non traité	121	385	5.13	44

Tableau 4.2 : Caractéristiques mécaniques en fonction des traitements thermiques de revenu.

4.3. 1. Evolution de la dureté en fonction de la température de revenu

La variation de la dureté HV en fonction de la température de revenu est représentée sur la figure 4.5. Les données relatives à l'état non traité sont données à titre de comparaison. On constate sur cette figure, une décroissance des valeurs de la dureté avec l'élévation de la température de revenu.

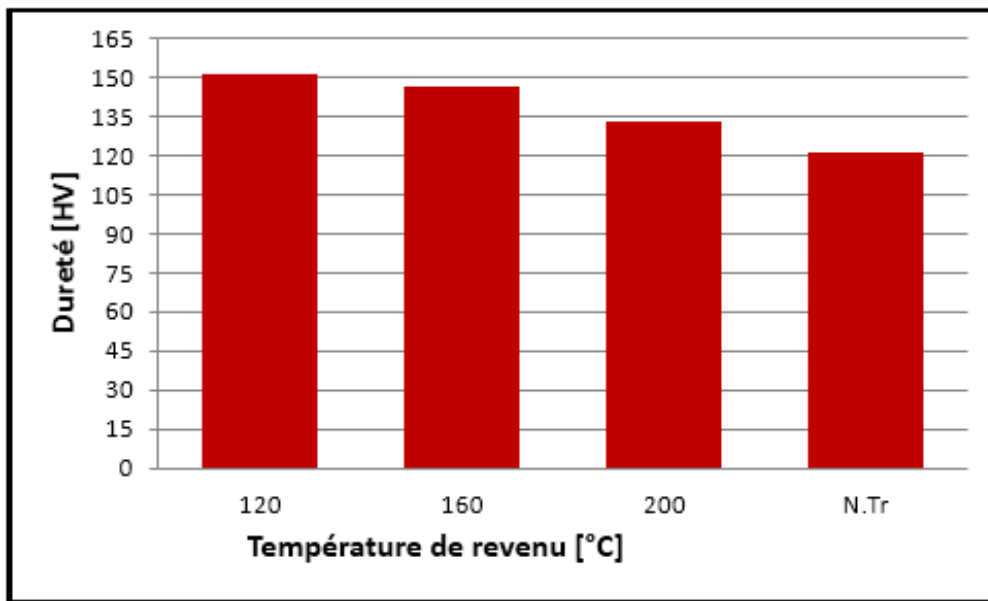


Figure 4.5 : Histogramme de la variation de la dureté en fonction des traitements thermiques de revenu de l'alliage 6082.

4. 3. 2. Evolution de la Résistance à la rupture en fonction de la température de revenu

La variation de la résistance à la rupture en fonction de la température de revenu est représentée sur la figure 4.6. On note que la résistance à la rupture pour le matériau qui a subi un traitement de revenu à 120°C se situe à un niveau supérieur correspond à une charge maximale 428 N/mm^2 , comparée avec le matériau qui a subi un traitement de revenu à 200°C (charge maximale 380 N/mm^2) ou avec le matériau non traité (charge maximale 385 N/mm^2).

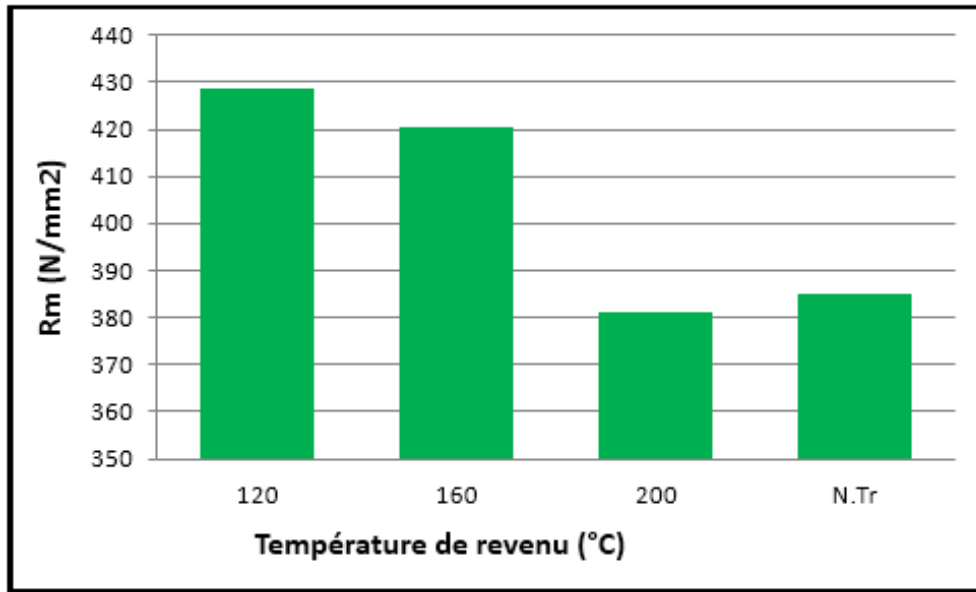


Figure 4.6. Histogramme de la variation de la résistance à la rupture en fonction des traitements thermiques de revenu de l'alliage 6082.

4. 3. 3. Evolution de l'allongement en fonction de la température de revenu

On remarque sur la figure 4.7, que les valeurs de l'allongement du matériau sont maximales à la température de revenu $160^{\circ}C$ et minimales à la température de revenu $200^{\circ}C$, mais, sont généralement plus proches entre elles.

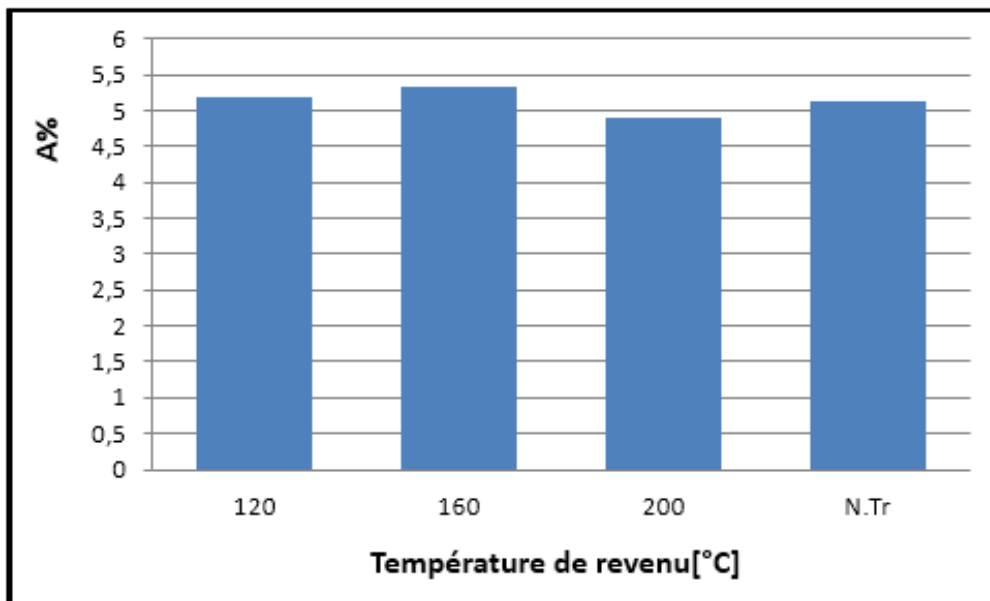


Figure 4.7. Histogramme de l'allongement $A\%$ en fonction des traitements thermiques de revenu de l'alliage 6082.

4.3.4. Evolution du Coefficient de striction Z% en fonction de la température de revenu

La figure 4.8 présente les résultats obtenus du coefficient de striction en fonction de la température de revenu.

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

Ce coefficient prend une valeur maximale à 200°C et une valeur minimale à 160°C.

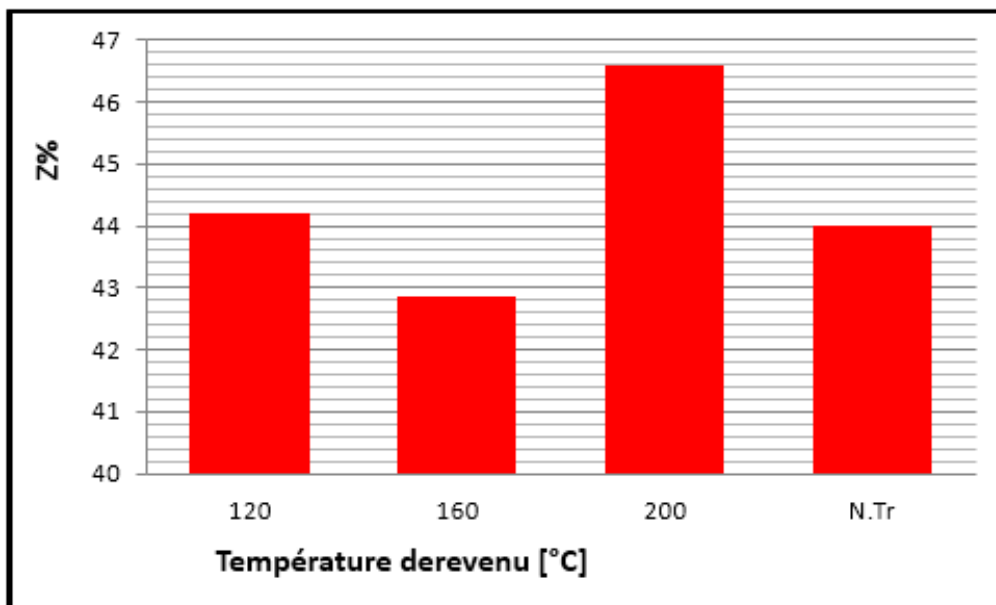


Figure 4.8. Histogramme de la variation du coefficient de striction Z% en fonction des traitements thermiques de revenu de l'alliage 6082.

Pour l'alliage trempé, on remarque que la dureté a diminué (103HV) si on la compare avec la valeur de la dureté de l'alliage en état de livraison (121HV), cela est attribué à l'effet de la trempe qui empêche la reformation des précipités et par conséquent, un adoucissement de l'alliage.

L'effet de revenu (vieillissement artificiel) de l'alliage 6082 montre une augmentation de la dureté et de la résistance mécanique mais on a une diminution légère de l'allongement avec la diminution de la température du revenu. Ce phénomène est dû au durcissement structural par précipitation qui s'agit à la décomposition d'une solution solide sursaturée (phase homogène possédant au moins deux constituants) en un mélange de deux phases de composition différente : intermétallique du fer IMF et Mg_2Si [25].

D'après ce qui précède, on peut dire que la température du revenu optimale est à $160^{\circ}C$, à raison de ses meilleures caractéristiques données pour l'alliage, autrement dit, une dureté et une résistance à la rupture assez grande et un allongement important, ce qui est nécessaire pour les conditions de fonctionnement des matériaux en général.

CONCLUSION GENERALE

Dans l'industrie, l'alliage d'aluminium 6082 a un rôle très important, il peut être nécessaire des traitements thermiques pour améliorer ses caractéristiques mécaniques afin de permettre son utilisation en conditions convenables.

Ce travail se présente comme une contribution à l'étude de l'influence du traitement thermique : trempe et revenu ou vieillissement artificiel à différentes températures du revenu sur le comportement mécanique en traction notamment, quelques caractéristiques mécaniques de cet alliage.

Les conclusions tirées à partir de ce travail sont :

- La recherche bibliographique montre que cet alliage d'aluminium de la série 6000 présente des propriétés mécaniques requises dans le domaine technologique et industriel.
- Les traitements thermiques peuvent modifier les propriétés mécaniques et structurales de l'alliage d'aluminium 6082 de telle façon que :
 - Le traitement thermique de trempe diminue la dureté de l'alliage.
 - La diminution de la température du revenu augmente la dureté.
 - Une augmentation de la résistance mécanique et une diminution légère de l'allongement avec la diminution de la température du revenu.
 - Le revenu augmente la dureté mais entraîne une chute de l'allongement plus importante que l'effet d'écrouissage de l'alliage d'aluminium 6082 non traité.

Enfin, nous pensons que cette étude est une contribution au domaine de la caractérisation et le comportement en traction de l'alliage d'aluminium 6082 traité thermiquement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Asma Hadouche. Caractérisation physico-chimique des alliages d'Aluminium utilisés comme matériau de revêtement mural. Mémoire de Master. Université Med Khider Biskra. 2014
- [2] L.F. Mondolfo, Aluminium Alloys, structures and proprieties, Butterworth, 1st edition, London 1976.
- [3] J.P Baïllon, J.M. Dorlot, troisième édition, Montréal. Ecole Polytechnique de Montréal, p480(2000)
- [4] J.E. Hatch, Metals Park, p319, (1984).
- [5] JM. DORLOT JP. BAILON J. MASOUNAVE. Des Matériaux. Montréal, Editions de L'Ecole Polytechnique de Montréal, 1986.
- [6] Develay, R., Données numériques sur l'aluminium non allié, Les Techniques de l'ingénieur. M443.
- [7] Herbulot, F. (2009a). Récupération et recyclage de l'aluminium. Stratégies. Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, M 2345-1 à M2345-15.
- [8] M. Sara. Mémoire magister en physique. Université de Constantine 2007.
- [9] Roger DEVELAY, Données numériques sur les alliages d'aluminium de transformation , Forme. M 445 – 1 technique de l'ingénieur.
- [10] KAUFMAN, J. Gilbert. Properties of Aluminum Alloys: Tensile, Creep & Fatigue Data, Materials Parks, Ohio, ASM International, 1999, 400 p.
- [11] Rémi Desgagnés, Métallurgiste Raymond Langevin ; GUIDE D'AUTO APPRENTISSAGE pour les opérateurs en traitement thermique. p77 (sep 2015).
- [12] ASM handbook; Nonferrous alloys and special purpose materials, 2 (1992).
- [13] S. Vyazovkin, D. Dollimore, J. Chem. Inf. Comput. Sci., 36 p42-55(1996)
- [14] Roger DEVELAY ; Traitements thermiques des alliages d'aluminium. p16.

- [15] S. Shivkumar, S. Ricci, Jr., B. Steenhoff, D. Apelian and G. Sigworth, « An Experimental Study to Optimize the Heat Treatment of A356 Alloy », AFS Transactions, vol. 97, 1989, p. 791-810.
- [16] S. Vyazovkin, D. Dollimore, J. Chem. Inf. Comput. Sci., 36 p42-55(1996).
- [17] RENOUARD (M.) et BRESSON (Y.). – Traitements thermiques des alliages d'aluminium. 10 tabl., 63 fig., bibl. 26 réf., Techn. Sci. Aéronaut Spatiales 2 (1962) ; 2, 3 et 4 (1963).
- [18] RENOUARD (M.) et MEILLAT (R.). – Le prérevenu des alliages aluminium-magnésiumsilicium. Mém. Sci. Rev. Métallurgie, LVII, no 12, p. 930-42, 5 tabl., 12 fig., bibl. 6 réf. (1960).
- [19] SINGLETON (D.R.). – Quench-ageing makes headway with 6061 aluminium (La maturation après trempe fait des progrès avec l'alliage 6061). Iron Age, no 12, p. 94-5, 1 tabl., 2 fig. déc. 1963.
- [20] FORTIN (P.E.). – Two-step ageing of Al-Mg₂Si alloys (Maturation à deux paliers des alliages Al-Mg₂Si). Metal Progress, p. 119-20, 1 tabl.2 fig., nov. 1964.
- [21] GHARBI Brahim, Essai de Traction Université de Batna 2 Faculté de Technologie.
- [22] HIDOURI Abdelmoumen fascicule de travaux pratiques des sciences des matériaux. Institut Supérieur des Études Technologiques Gafsa. Département de Génie Mécanique 20013.
- [23] Djari. S, Essai de traction, Laboratoire Résistance des Matériaux, Université de Batna.
- [24] THERMI-LYON 11/2005.France.
- [25] M.Hillert, Met. Trans. 3, p. 2729, (1972).

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

