

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 محمد بوضياف 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 : Productique et Fabrication Mécanique
Présenté par :
BENABDERRAHMANE Aissa & HADJ BELKACEM Abdelfetteh

Thème

***Influence des traitements thermiques sur les
caractéristiques mécaniques des alliages
d'aluminium en traction***

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
SLAMANI Mohamed	Professeur	Président
ELHADI Abdelmalek	MCB	Encadreur
AMROUNE Saleh	MCA	Examineur

Année Universitaire : 2019 / 2020

N° d'ordre : GM/...../2020

Résumé

Les alliages d'aluminium sont largement utilisés, notamment dans le domaine industriel aéronautique, automobile et naval. L'essai mécanique de traction a pour but de déterminer quelques propriétés mécaniques des matériaux, tels que la résistance d'élasticité, la résistance à la rupture et l'allongement.

Pour améliorer ces caractéristiques et avoir une combinaison optimale de résistance et de ductilité, les alliages d'aluminium peuvent subir des traitements thermiques.

Pour ce faire, ce travail consiste à étudier l'influence des traitements thermiques sur les caractéristiques mécaniques de quelques alliages d'aluminium en traction, avec analyses et discussions des résultats obtenus.

Mots clés : Alliages d'aluminium, traitements thermiques, essai de traction, propriétés mécaniques des matériaux.

ملخص

تستعمل كثيرا أمزجة الألمنيوم، ولا سيما في المجال الصناعي الخاص بالطيران، السيارات والمجال البحري. تهدف تجربة الشد لتعيين بعض المميزات الميكانيكية للمواد كمقاومة المرونة، مقاومة الانكسار والاستطالة. لتحسين الخصائص الميكانيكية وكذا الحصول على مقاومة وليونة جيدتين، تخضع أمزجة الألمنيوم للمعالجات الحرارية. لأجل هذا، يتعلق هذا العمل بدراسة تأثير المعالجات الحرارية على الخصائص الميكانيكية لبعض أمزجة الألمنيوم بعد خضوعها لتجربة الشد مع تحليل ومناقشة النتائج المتحصل عليها.

الكلمات المفاتيح : أمزجة الألمنيوم، المعالجات الحرارية، تجربة الشد، المميزات الميكانيكية للمواد.

Dédicaces

A nos familles et nos amis.

Remerciements

Nous tenons à remercier tout d'abord le grand puissant, Dieu qui nous a éclairé le chemin pour réaliser ce modeste travail.

Nous remercions également notre encadreur monsieur Elhadi Abdelmalek pour ses orientations, et ses précieux conseils durant toute la réalisation de ce travail.

Nos remerciements vont aux membres de jury, Monsieur le président Slamani Mohamed et l'examineur Monsieur Amroune Saleh pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant l'évaluation de ce mémoire.

Nous remercions vivement tous les enseignants de Génie Mécanique de l'Université M'sila.

Sommaire

Résumé	
Dédicaces.....	01
Remerciements.....	02
Sommaire.....	03
liste des figures.....	06
liste des tableaux.....	08
Introduction générale	09

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES ALLIAGES D'ALUMINIUM

I.1 Historique de l'aluminium.....	10
I.2 Obtention de l'aluminium.....	10
I.3 Influence des éléments d'addition.....	10
I.4 Propriétés physiques de l'aluminium.....	12
I.5 Propriétés mécaniques de l'aluminium.....	13
I.6 Alliages d'aluminium.....	13
I.6.1 Propriétés des alliages d'aluminium.....	14
I.6.2 Désignations numérique et chimique des alliages d'aluminium.....	14
I.7 Désignation des alliages de corroyage.....	15
I.8 Désignation des alliages de moulage.....	15

CHAPITRE II : TRAITEMENTS THERMIQUES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

II.1 Introduction.....	19
II.2 Traitements thermique d'homogénéisation	19
II.3 Traitements thermique d'adoucissement	19
II.4 Traitements thermiques de durcissement structural.....	19
II.4.1 Différents stades du traitement de durcissement structural.....	20
II.4.1.1 Mise en solution solide	20
II.4.1.2 Refroidissement	21
II.4.1.3 Durcissement structural	21

II.5 Traitements de mise en solution.....	21
II.5.1 Influence de la température de mise en solution.....	21
II.5.2 Influence de la durée de mise en solution.....	21
II.6. Traitement de Trempe.....	22
II.6.1 Vitesse critique de trempe.....	22
II.6.2 Influence du fluide de trempe.....	23
II.6.3 Influence du temps de transition entre mise en solution et trempe.....	24
II.7 Maturation.....	24
II.8 Traitements de revenu ou de maturation artificielle.....	25
II.8.1 Introduction (Phénomènes généraux).....	25
II.8.2 Influence du temps d'attente entre trempe et revenu.....	26
II.8.3 Alliages peu sensibles au temps d'attente entre trempe et revenu.....	26
II.8.4 Alliages influencés favorablement par l'attente entre trempe et revenu.....	26
II.8.5 Alliages influencés défavorablement par l'attente entre trempe et revenu.....	26

CHAPITRE III : DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET TECHNIQUES DE MESURE

III.1 Introduction.....	28
III.2 Description générale de la machine de traction.....	28
III.2.1 Constituants de la machine.....	28
III.2.2 Déroulement de l'essai de traction.....	29
III.2.3 Eprouvettes de traction.....	30
III.2.4 Principe de l'essai.....	31
III.2.5 Exploitations de l'essai.....	31

CHAPITRE IV : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

VI.1 Introduction.....	34
VI.2 Influence du traitement thermique sur $R_{p0,2}$ et R_m des alliages d'aluminium sollicités en action.....	34
VI.3 Evolution des propriétés mécaniques en traction de l'alliage d'aluminium 6063.....	37
VI.4 Evolution des propriétés mécaniques en traction de l'alliage d'aluminium 6101.....	41
VI.4.1 Effet de la déformation plastique (premier état).....	42

VI.4.2 Effet de revenu (deuxième état)	43
VI.4.3 Effet conjugué de la déformation plastique et du revenu (Troisième état)	44
VI.5 Variation des propriétés mécaniques en traction de l'alliage d'aluminium 2017A.....	45
VI.5.1 Résistance élastique à la traction.....	46
VI.5.2 Résistance maximale à la traction.....	47
VI.5.3 Résistance à la rupture.....	47
VI.5.4 Module d'élasticité longitudinal E.....	48
VI.5.5 Coefficient de striction Z(%).....	48
VI.5.6 Allongement à la striction $Z_u\%$	49
Conclusion générale.....	50
Bibliographie.....	51

Liste des figures

CHAPITRE II : TRAITEMENTS THERMIQUES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

Figure II.1 : Diagramme d'équilibre aluminium-cuivre.....	20
Figure II.2 : Influence de la vitesse de trempe sur la limite d'élasticité de différents alliages d'aluminium à l'état trempé revenu (T6).....	23
Figure II.3 : Influence du milieu de trempe et de l'épaisseur sur la vitesse moyenne de refroidissement en mi- épaisseur de tôles en alliages d'aluminium.	24
Figure II.4 : Courbes de maturation des alliages 2014, 2024, 6061, 7050 et 7075 à différentes températures.....	25

CHAPITRE III : DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET TECHNIQUES DE MESURE

Figure III.1 : Machine d'essai de traction.	28
Figure III.2 : Constituants de la machine WP 310.	29
Figure III.3 : Eprouvette de traction.	30
Figure III.4 : Diagramme effort-déformation.	31
Figure III.5 : Module d'Young.	32
Figure III.6 : Section de rupture d'une éprouvette en traction.	33

CHAPITRE IV : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

Figure IV.1 : Caractéristiques mécaniques des familles d'alliages d'aluminium corroyés.....	34
Figure IV.2 : Evolution des propriétés mécaniques en traction de la nuance Clad 2024-T819 en fonction de la température de l'essai de traction.	35
Figure IV.3 : Evolution des propriétés mécaniques en traction de la nuance 2219-T851 en fonction de la température de l'essai de traction.	36
Figure IV.4 : Courbes de traction réalisées sur les alliages : 2219-T851 et 2050-T84.....	37
Figure IV.5: Courbes de traction d'alliage 6063 après homogénéisation.	38
Figure IV.6 : Courbes d'alliage 6063 chauffé à vitesse 10C°/min.	38
Figure IV.7 : Courbes de traction d'alliage 6063 chauffé à vitesse 15C°/min.	39

Liste des figures

Figure IV.8: Courbes de traction d'alliage 6063 traité à vitesse 20C°/min.	39
Figure IV.9 : Microstructure de l'alliage Al6101 ($\phi=9.5\text{mm}$).	42
Figure IV.10 : Microstructure de l'alliage Al6101 ($\phi=3.15\text{ mm}$).	42
Figure IV.11 : Microstructure de l'alliage Al6101 ($\phi=9.5\text{mm}$) : Revenue à 170°C (04 heures).....	43
Figure IV.12 : Microstructure de l'alliage Al6101 ($\phi=3.15\text{ mm}$): Revenue à 170°C durant 04H	44
Figure IV.13: Courbes moyennes de traction (contraintes déformations)	46
Figure IV.14 : Variation de σ_e en fonction de la température.	46
Figure IV.15 : Variation de σ_m en fonction de la température.	47
Figure IV.16 : Variation de σ_r en fonction de la température.	47
Figure IV.17 : Variation de E en fonction de la température.	48
Figure IV.18 : Variation de Z% en fonction de la température.	48
Figure IV.19 : Variation de l'allongement à la striction Zu % en fonction de la température.....	49

Liste des tableaux

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ALLIAGES D'ALUMINIUM

Tableau I.1: Effets des éléments d'addition dans l'aluminium.....	11
Tableau I.2: Propriétés physiques de l'aluminium.....	12
Tableau I.3 : Propriétés mécaniques de l'aluminium.....	13
Tableau I.4. Désignation des alliages d'aluminium	17
Tableau I.5 : Désignation de l'état de livraison	17
Tableau I.6 : Subdivisions de H – écrouissage	18
Tableau I.7 : Subdivisions de T – Traitement thermique dans l'ordre chronologique	18

CHAPITRE II : TRAITEMENTS THERMIQUES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

Tableau II.1 : Conditions de traitements thermiques des alliages d'aluminium	27
--	----

CHAPITRE IV : RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

Tableau IV.1 : Valeurs de la résistance à la rupture (R_m) en N/mm^2	40
Tableau IV.2 : Valeurs de taux d'allongement (A%).....	40
Tableau IV.3 : Résultats des tests mécaniques obtenus.....	43
Tableau IV.4 : Résultats des tests mécaniques obtenus après revenu.....	44
Tableau IV.5. : Résultats des tests mécaniques obtenus après tréfilage et revenu.....	45

INTRODUCTION GENERALE

L'aluminium pur présente de faibles caractéristiques mécaniques rendant impossibles son utilisation dans la construction de structures mécaniques sans l'addition des éléments tels que le cuivre, le silicium le magnésium qui donne les alliages d'aluminium.

Les alliages d'aluminium jouent un rôle primordial dans la construction industrielle de différentes pièces. Ils se trouvent dans une grande variété d'applications grâce à leurs excellentes propriétés mécaniques. En plus, la faible densité des alliages d'aluminium a une résistance notable à la déformation. En service, les matériaux sont soumis à des forces provoquant des déformations. Il est donc important de connaître les caractéristiques mécaniques et les conditions de déformations et de rupture de ces matériaux.

Ces propriétés sont connues et mesurées par des essais mécaniques normalisés à l'aide d'éprouvettes standard soumises à des conditions de mise en charge bien définies.

L'amélioration des propriétés mécaniques de ces alliages résultent par les traitements thermiques. L'objectif de notre travail est l'étude de l'influence du traitement thermique des alliages d'aluminium sur les caractéristiques mécaniques en traction.

Pour arriver à ce but, notre étude s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre est une étude bibliographique, concernant des généralités sur les alliages d'aluminium.

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

Le troisième chapitre est consacré pour les dispositifs expérimentaux, en décrivant la machine de traction et les techniques de mesure des paramètres résultants de l'essai de traction.

Le dernier chapitre est une étude qui expose et analyse les résultats des travaux de recherche, pris de plusieurs thèses et mémoires qui concernent les traitements thermiques appliqués sur quelques alliages d'aluminium et leurs effets sur les caractéristiques mécaniques de ces alliages après les essais de traction.

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

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES ALLIAGES D'ALUMINIUM

I.1 Historique de l'aluminium

L'Aluminium figure comme le troisième élément de l'écorce terrestre en quantité, après l'Oxygène et le Silicium.

Il est le métal le plus récemment découvert puisqu'il n'est utilisé industriellement que depuis la fin du XIX^e siècle. Son existence ne fut prouvée qu'en 1808 par l'électro chimiste Sir Humphrey Davy, qu'il appelle «Aluminium », en électrolysant des sels fondus d'Aluminium [1].

Il a fallu attendre 1825 pour que Hans Christian Oersted isole pour la première fois l'Aluminium par une réaction chimique impliquant un amalgame (mélange) de Potassium sous forme d'une poudre grise contenant encore une très grande quantité d'impuretés. En 1827, le chimiste allemand Friedrich Wöhler obtint cette même poudre grise d'aluminium contenant cependant moins d'impuretés. Entre 1827 et 1845, Friedrich Wöhler améliora le procédé d'Oersted en utilisant le Potassium métallique. Il était le premier à mesurer la densité de l'aluminium et à montrer sa légèreté.

Ce n'est qu'en 1886 que la production commerciale de l'aluminium débuta suite à la découverte simultanée de Paul Louis Toussaint Héroult en France, et Charles Martin Hall aux Etats Unis du procédé d'électrolyse de l'oxyde d'aluminium dissous dans un bain de cryolithe en fusion.

La production mondiale de l'aluminium fut de 6000 tonnes en 1900 et a cru régulièrement surtout après 1950 pour atteindre une production mondiale actuelle de 20000 kT [2].

I.2 Obtention de l'aluminium

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%) constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal [3].

L'élaboration de l'aluminium consiste à extraire l'alumine pure de la bauxite, puis à réduire cette dernière en aluminium pur.

Le cycle de fabrication est celui du procédé bayer, breveté en 1887 et toujours en service [3].

I.3 Influence des éléments d'addition

Les éléments d'additions peuvent être classés selon la contribution de chacun dans l'amélioration de la performance de l'anode.

Un élément d'addition est ajouté au matériau de base pour :

- Avoir un potentiel plus électronégatif que celui du métal de base.
- Améliorer la morphologie de la dissolution.
- Annuler les effets nuisibles des impuretés.
- Améliorer les propriétés mécaniques.

De ce fait, on peut résumer les effets des éléments d'addition dans le tableau I.1

<i>éléments</i>	<i>effets</i>
Manganèse (Mn)	Il est ajouté pour éliminer l'effet nuisible du fer en évitant la formation de la phase Fe-Al.
Zinc (Zn 5%)	L'adition du zinc, jusqu'à 5%, abaisse le potentiel de l'anode, mais au-dessus de ce niveau aucun avantage n'est obtenu. En dessous de 0,9%, le zinc a peu d'influence sur l'exécution des anodes d'aluminium.
Mercure (Hg), l'indium(In) ou de l'étain(Sn)	Il active la surface de l'anode en évitant sa passivation. il déplace le potentiel de corrosion vers des valeurs plus électro-négatives.
Magnésium (Mg 0,2% à 2%)	Il améliore les caractéristiques mécaniques du matériau (dureté).
Cadmium (Cd)	Il est ajouté pour favoriser la formation d'un produit mou de corrosion.
Titane (Ti)	Il agit en tant qu'acquéreur pour l'hydrogène ou sert simplement à raffiner les grains et à augmenter le secteur de frontière de grain diluant de ce fait l'effet de fragilisation.

Tableau I.1: Effets des éléments d'addition dans l'aluminium.

I.4 Propriétés physiques de l'aluminium

Les principales propriétés physiques de l'aluminium sont indiquées dans le tableau I.2.

<i>Propriété</i>	<i>Unité</i>	<i>Valeur</i>	<i>Remarque</i>
Numéro atomique		13	
Masse volumique ρ	Kg . m ⁻³	2 698	
Point de fusion	°C	660.45	sous 1013 10 ⁻³ bar
Point d'ébullition	°C	2 056	sous 1013 10 ⁻³ bar
Pression de vapeur	Pa	3.7 10 ⁻³	à 927 °C
Energie interne massique u	J . kg ⁻¹	3.98 10 ³	
Capacité thermique massique C_p	J . kg ⁻¹ . K ⁻¹	897	à 25°C
Conductivité thermique λ	W . m ⁻¹ . K ⁻¹	237	à 27 °C
Coefficient de dilatation linéique α_l	10 ⁻⁶ K ⁻¹	23.1	à 25°C
Résistivité électrique ρ	10 ⁻⁹ Ω . m	26.548	à 25°C
Susceptibilité magnétique K		0.6 . 10 ⁻³	à 25°C
Module d'élasticité longitudinal E	MPa	69 000	
Coefficient de poisson ν		0.33	

Tableau I.2: Propriétés physiques de l'aluminium [4].

I.5 Propriétés mécaniques de l'aluminium

L'aluminium pur dans l'état recuit, à des faibles propriétés mécaniques, mais peut les améliorer par écrouissage, par addition d'éléments d'alliage ou par traitements thermiques. Il apparaît à l'état recuit une excellente ductilité par rapport aux aciers. L'aluminium est un matériau relativement élastique mais peu malléable [5et 6].

La résistance mécanique et la résistance à la fatigue de l'aluminium sont différentes de celles de l'acier. C'est pourquoi, il est important de bien connaître les limites du matériau avant de l'utiliser. Contrairement à l'acier, la soudure de l'aluminium peut présenter certaines difficultés, il faut retenir que, plus on soude l'aluminium, plus on l'affaiblit.

Cette situation se produit en raison d'un changement des propriétés métallurgiques de l'aluminium de base dans la zone thermiquement affectée. [5et 6].

Les propriétés mécaniques de l'aluminium dépendent des degrés de sa pureté ainsi que de son état d'utilisation, en effet il peut être utilisé à l'état coulé ou laminé puis recuit.

Le tableau I.3 illustre les valeurs moyennes de certaines propriétés mécaniques de l'aluminium [4].

Etat	coulé	Lamine recuit
Propriété		
Résistance traction (N/mm)	70 à 100	70 à 90
Limite app d'elast. (N/mm ²)	30 à 40	30 à 40
Allongement(%)	15 à 25	40 à 30
Dureté de brinell	15 à 25	15 à 25
Module d'élasticité (N/mm ²)	67500	67500

Tableau 1.3 : Propriétés mécaniques de l'aluminium [3].

I.6. 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 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 bismuth, 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.

I.6.1 Propriétés des alliages d'aluminium

Les principales caractéristiques des alliages d'aluminium sont :

- **Résistance à chaud** : La résistance à chaud des alliages d'aluminium au-delà de 150°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 trempant.
- **Résistance à la corrosion** : Comme pour l'aluminium pur ; les alliages d'aluminium sont protégés contre la corrosion grâce à la formation d'une pellicule 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 forme** : Les alliages d'aluminium sont faciles à laminier et emboutir. Les alliages les plus appropriés au filage à chaud sont les alliages Al-Mg.

I.6.2 Désignations numérique et chimique des alliages d'aluminium

La désignation permet à l'utilisateur de renseigner sur les teneurs des éléments constituant l'alliage et les différents traitements métallurgiques qui le subit. Selon les normes des désignations numérique et chimique des alliages d'aluminium, les alliages d'aluminium sont classés en trois parties [7].

- Alliages corroyé

Destinés pour les semi-produits (tôles, plaques, barres, profilés, tubes... etc.) ainsi que pièces estampées et de forge et produits par laminage.

- Alliages frittés

Elaborés par frittage, à partir de poudres.

- 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 (élaboration des pièces assez complexes : poignées de manivelles, blocs moteur... etc.)

I.7 Désignation des alliages de corroyage

Alliages frittés

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

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 [8].

I.8 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 plutôt de l'étain et du cuivre qui leur confèrent une bonne résistance mécanique et une bonne coulabilité [8].

Il est important de mentionner que la tolérance aux impuretés des alliages de moulage est beaucoup plus grande que celle des alliages de corroyage.

Le recyclage est le terme généralement utilisé pour les alliages de la série 3xxx et 5xxx, tandis que l'affinage est plutôt employé pour les alliages de fonderie. Dans l'ensemble du présent texte, le terme recyclage est employé dans les deux cas à des fins de simplification. Le terme « boucle fermée » est utilisé lorsqu'un alliage donné est recyclé en ce même alliage, tandis que le terme « boucle ouverte » correspond à l'utilisation d'alliages d'aluminium combinés à d'autres matières premières pour produire des alliages ayant des teneurs différentes en éléments d'alliage.

Le tableau I-1 regroupe la nomenclature utilisée pour le référencement des séries d'alliages d'aluminium, elles sont définies avec l'élément majoritaire. Pour les alliages corroyés, le deuxième chiffre permet de suivre l'évolution d'une nuance (par exemple l'alliage d'aluminium (AA) 2219 est la seconde évolution de la nuance 2019). En outre, la particularité de la série 1XXX est que les deux derniers chiffres donnent la teneur en aluminium de l'alliage : 1050 : 99,50% d'aluminium.

Depuis la découverte d'Alfred Wilm en 1906 [9], certaines séries d'alliages d'aluminium, appelées alliages à durcissement structural, sont connues pour pouvoir être durcies par traitement thermique. C'est le cas des séries 2000, 6000 et 7000.

Des procédés comme le laminage permettant l'obtention de tôles de différentes épaisseurs induisent également des contraintes. Ce sont les différents traitements thermomécaniques qui suivent la mise en forme qui permettent de réduire ces contraintes.

Il est possible de distinguer différentes étapes de transformations qui sont décrites par des lettres suivies de numéros comme le montrent les tableaux I.5, I.6 et I.7 en accord avec la norme NF EN 515.

Séries d'alliages corroyés	Éléments d'alliages principaux	Séries d'alliages de fonderie	Éléments d'alliages principaux
1XXX	Aucun (99% d'aluminium minimum)	1XX.X	99% d'aluminium minimum
2XXX	Cuivre	2XX.X	Cuivre
3XXX	Manganèse	3XX.X	Silicium + cuivre et/ou magnésium
4XXX	Silicium	4XX.X	Silicium
5XXX	Magnésium	5XX.X	Magnésium
6XXX	Magnésium et silicium	7XX.X	Zinc
7XXX	Zinc	8XX.X	Autres éléments
8XXX	Autres éléments	9XX.X	Autres éléments

Tableau I.4. Désignation des alliages d'aluminium [10]

Signification des lettres

Le tableau I.1 indique la Signification des lettres utilisées

Lettre	Signification
F	<u>État brut de fabrication</u> : Cette désignation s'applique pour les produits n'ayant pas subi de transformations ou traitements thermiques.
O	<u>État recuit</u> : Cette désignation s'applique pour les produits ayant subi un traitement thermique, ce qui donne les propriétés de résistance les plus faibles afin d'améliorer la ductilité et la stabilité dimensionnelle en diminuant les contraintes internes du matériau.
H	<u>État durci par écrouissage (spécifique aux familles 1000, 3000, 5000 et 8000)</u> : Cette désignation s'applique pour les produits écrouis par déformation à froid qui peut être suivie d'un traitement thermique, ce qui diminue la résistance en partie. La lettre H est toujours suivie de deux chiffres
W	<u>État trempé après mise en solution</u> : État instable qui n'est appliqué que sur des alliages qui vieillissent spontanément à température ambiante.
T	<u>État traité thermiquement (spécifique aux familles 2000, 6000 et 7000)</u> : Afin d'avoir un état stable après mise en solution (autre que F, O et H). La lettre T est toujours suivie d'un ou plusieurs chiffres

Tableau I.5 : Désignation de l'état de livraison [11].

<i>Le premier chiffre après H désigne le traitement de base</i>	
H1 – Uniquement écroui	H3 – Écroui et stabilisé
H2 – Écroui et partiellement recuit	H4 – Écroui et verni ou laqué
<i>Le deuxième chiffre après H désigne le degré d'écrouissage</i>	
HX2 – 1/4 dur	HX8 – 4/4 dur (pleinement écroui)
HX4 – 1/2 dur	HX9 – Extra dur
HX6 – 3/4 dur	

Tableau I.6 : Subdivisions de H – écrouissage [11].

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Mise en solution			X	X		X	X	X	X	
Transformation à chaud	X	X			X					X
Écrouissage		X	X					X		X
Vieillissement naturel	X	X	X	X						
Vieillissement artificiel					X	X	X*	X	X	X
Écrouissage									X	

Tableau I.7 : Subdivisions de T – Traitement thermique dans l'ordre chronologique [11].

CHAPITRE II

TRAITEMENTS THERMIQUES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

II.1. Introduction

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

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

II.2. Traitements thermique d'homogénéisation

Ce sont des traitements comportant un chauffage à des températures relativement élevées appliqués à certains produits bruts de fonderie et corroyés, et destinés le plus souvent à en faciliter la transformation à chaud ou à froid (filage, étirage, laminage, forgeage). Ils consistent en général en des maintiens de 6 à 48 heures à des températures allant de 450° C à 610° C, qui ont pour but de dissoudre les phases métalliques en excès et de réaliser une homogénéisation de la composition de la solution solide.

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 [12].

II. 3.Traitements thermique d'adoucissement

Le but est d'adoucir un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale. Nous avons ici le traitement de restauration et le traitement de recristallisation utilisés dans le cas de matériaux écrouis, 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".

C'est dans cet état que l'aluminium ou l'alliage d'aluminium présente la résistance mécanique minimale mais la plasticité maximale. L'état recuit est l'état optimal pour réaliser des déformations ou des mises en forme à froid importantes et difficiles.

II. 4.Traitements thermiques de durcissement structural

Dans ce paragraphe, on étudie surtout les traitements de mise en solution, trempe, maturation et revenu des alliages d'aluminium.

II.4.1. Différents stades du traitement de durcissement structural

L'aluminium est capable de former des solutions solides avec la plupart des métaux qui lui sont associés comme constituants d'alliage.

La possibilité de traiter thermiquement un alliage est due à l'augmentation, avec la température, de la solubilité à l'état solide des éléments d'addition [13]. Un alliage soit traitable thermiquement, il y a lieu que l'un au moins des constituants donne avec l'aluminium un diagramme d'équilibre binaire du type de celui de la figure II.1 qui représente le cas de la solubilité du cuivre dans l'aluminium.

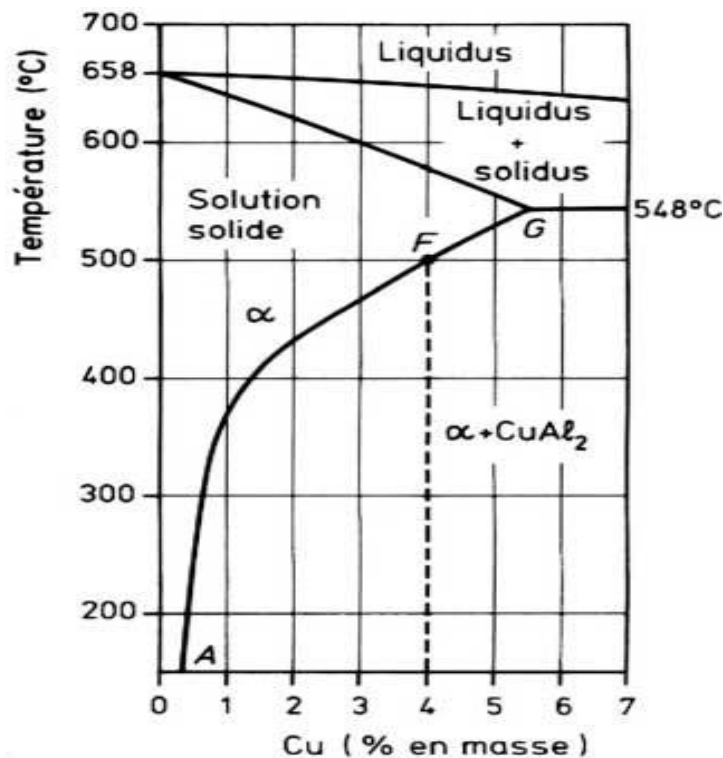


Figure II.1 : Diagramme d'équilibre aluminium-cuivre

Le traitement thermique de durcissement structural comporte trois grands stades :

II.4.1.1. Mise en solution solide

Chauffage à température élevée (400°C à 600°C suivant les alliages considérés). Dans le cas de l'alliage Al- Cu 4 % par exemple, il a pour but théorique la mise en solution dans l'aluminium à l'état solide des 4 % de cuivre.

D'après le diagramme d'équilibre binaire (figure II. 1), la température minimale de mise en solution est de 500 °C. Il faut en effet atteindre le point *F* sur la courbe *AG* traduisant la limite de solubilité, à l'état solide, du cuivre dans l'aluminium en fonction de la température.

II. 4.1.2. Refroidissement

L'alliage est refroidi assez lentement pour qu'à chaque température, l'équilibre ait le temps de s'établir, il va y avoir la précipitation dès que la température passera au-dessous de 500°C. Comme la solubilité du cuivre dans l'aluminium diminue avec la température, la quantité de précipités va augmenter lorsque la température va diminuer.

Cependant, si au lieu de refroidir lentement la solution homogène, on l'amène brusquement à la température ambiante par trempe, la précipitation n'a pas en général le temps de se former durant le refroidissement. On peut ainsi obtenir, à la température ambiante, la solution solide homogène qui était stable au-dessus de 500 °C, mais qui se trouve alors sursaturée.

II. 4.1.3. Durcissement structural

Se trouve à l'état métastable, va avoir tendance à retrouver l'équilibre en rejetant sous forme de précipité une partie du cuivre qui est en sursaturation : c'est ce phénomène qui est responsable du durcissement structural par maturation à la température ambiante [14].

II. 5. Traitements de mise en solution

L'objectif de ce traitement est d'amener dans la solution solide la quantité maximale de l'élément de durcissement soluble ou élément d'alliage (ex. Cu, Mg, Si) dans la matrice.

La procédure consiste à maintenir l'alliage à une température suffisamment élevée et pour une période de temps assez long afin d'obtenir une solution solide homogène.

Les domaines des températures de mise en solution s'étendent le plus souvent de 450°C à 500°C pour l'aluminium et de 450°C à 590 °C pour ses alliages [15].

II. 5.1. Influence de la température de mise en solution

La mise en solution des alliages d'aluminium a pour caractère remarquable d'avoir une cinétique à peu près indépendante de la température. Bien entendu, les diagrammes d'équilibre montrent que la solubilité des éléments d'addition usuels augmente avec la température [13].

II. 5.2. Influence de la durée de mise en solution

La durée de mise en solution devait être suffisante pour mettre en solution solide la plus grande quantité possible d'éléments intermétalliques, mais qu'il n'était théoriquement pas utile de dépasser cette valeur de maintien. Néanmoins, cette durée dépend d'autres facteurs, et en particulier :

a) de la nature de l'alliage

Par exemple, dans le cas de tôles de 1 mm d'épaisseur, la durée de la mise en solution est de l'ordre de

1 min pour les alliages 6060 et 7020 ; 3 à 8 h pour l'alliage 7075 ; 2 min pour les alliages 6005 A, 6081, 6082 et 6181.

II. 6. Traitement de Trempe

Cette opération consiste en un refroidissement suffisamment rapide de la solution solide obtenue dans la première étape, pour que les précipités intermétalliques stables n'aient pas le temps d'être formés. Elle ne prend pas de temps, puisqu'elle a une très courte durée. Elle peut être faite à l'eau, à l'air, à l'huile ou dans des métaux en fusion à différents intervalles. Son but est de supprimer la formation de la phase à l'équilibre Mg_2Si pendant le refroidissement et de préserver la solution soluble solide formée lors de la mise en solution, par un refroidissement rapide (~ 260 °C/s) à basse température, habituellement près de la température de la pièce. Le résultat de cette opération est une solution solide sursaturée en éléments d'alliages, et également en lacunes [15].

Si le refroidissement est très lent, il y a précipitation grossière et non homogène des phases qui ne pourraient plus participer au durcissement structural. Il existe pour chaque alliage une vitesse critique de trempe et une vitesse de refroidissement.

II. 6.1. Vitesse critique de trempe

La vitesse critique de trempe est la vitesse de trempe minimale qui permet d'éviter tout début de transformation perlitique ou bainitique et d'obtenir ainsi une structure entièrement martensitique. En fait, dans les alliages d'aluminium, il faut, pour que les caractéristiques mécaniques soient optimales, que la concentration de la solution solide soit sensiblement la même qu'à la température de mise en solution, ce qui n'implique pas nécessairement que le refroidissement soit très rapide. C'est là qu'intervient la notion de vitesse critique de trempe qui peut être considérée comme la vitesse de refroidissement minimale qui permette d'obtenir à la température ambiante la solution solide sursaturée. Cette vitesse critique de trempe, qui est fonction de la composition chimique de l'acier et de son histoire antérieure (taille des grains austénitiques, condition d'austénitisation...etc.) [16].

La figure II.2 donne également, à titre d'exemple, l'influence de la vitesse moyenne de trempe entre 400°C et 290 °C sur la limite d'élasticité de différents alliages à moyenne ou haute résistance et à l'état trempé revenu [17] : on observe que la détermination de la limite en fonction de la vitesse de trempe peut varier fortement d'un alliage à un autre.

Par ailleurs, la présence d'additions secondaires est susceptible d'avoir une grande importance sur la vitesse critique de trempe des alliages ; par exemple, l'addition de zirconium augmente la vitesse critique de trempe des alliages Al Cu-Mg-Si, l'addition de manganèse, mais surtout de chrome, augmente celle des alliages Al-Zn-Mg et Al-Zn-Mg-Cu [18].

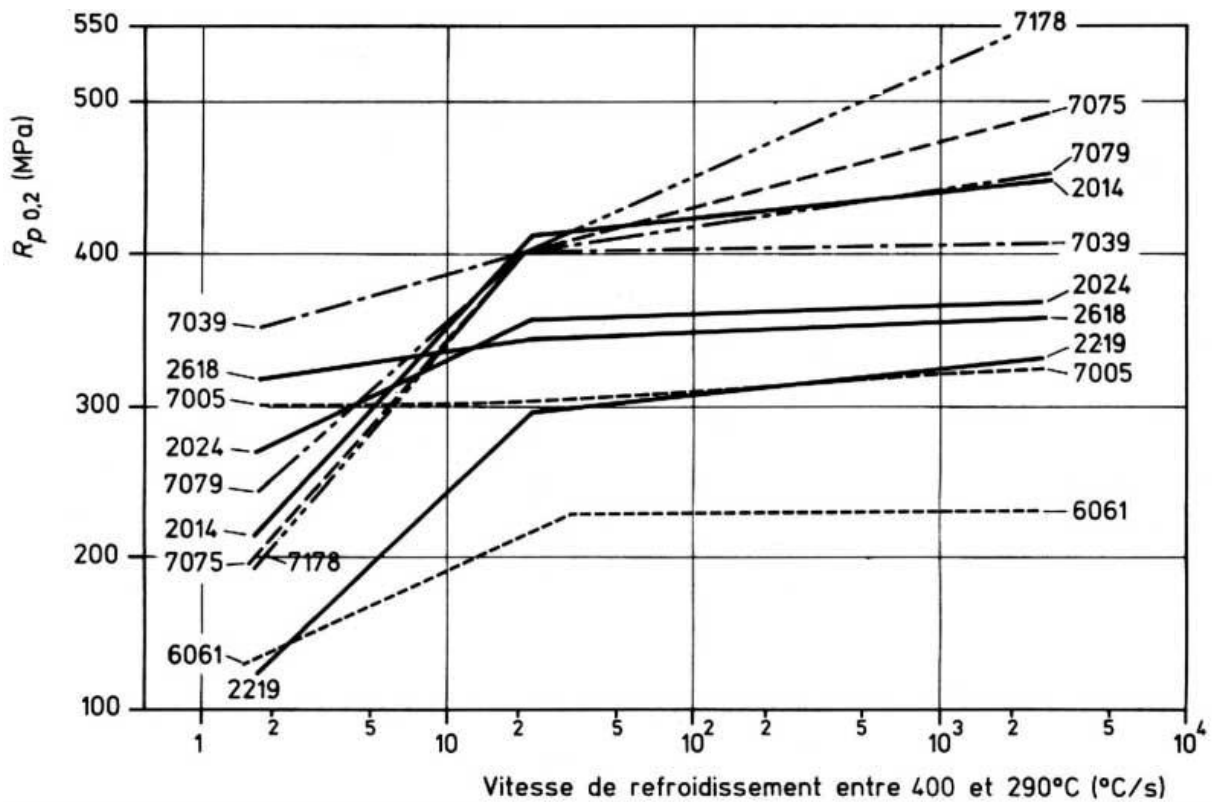


Figure II.2 : Influence de la vitesse de trempe sur la limite d'élasticité de différents alliages d'aluminium à l'état trempé revenu (T6).

II. 6.2. Influence du fluide de trempe

La figure II.3 illustre l'influence du milieu de trempe et surtout de la température de l'eau de trempe sur la vitesse moyenne de refroidissement à cœur des tôles en alliages d'aluminium et cela en fonction de l'épaisseur de la tôle considérée. D'une façon générale, toutes les conditions qui augmentent la stabilité des films de vapeur autour de la pièce lors de son immersion diminuent la vitesse de refroidissement. Il en est de même des additions dans l'eau de trempe, additions dont le but est de diminuer sa tension superficielle.

Dans la pratique de la trempe des alliages d'aluminium, la trempe à l'eau est le procédé le plus largement utilisé parce que le plus efficace. Le choix de la température de l'eau est extrêmement important. D'une façon générale, la trempe à l'eau froide est la plus favorable sur le plan de la résistance mécanique et d'autres propriétés telles que la résistance à la corrosion, mais dans le cas des produits épais ou de forme irrégulière, elle engendre des contraintes internes qui peuvent s'avérer rédhibitoires. En revanche, ces contraintes sont généralement sensiblement diminuées dès que la température de l'eau de trempe dépasse 60 °C.

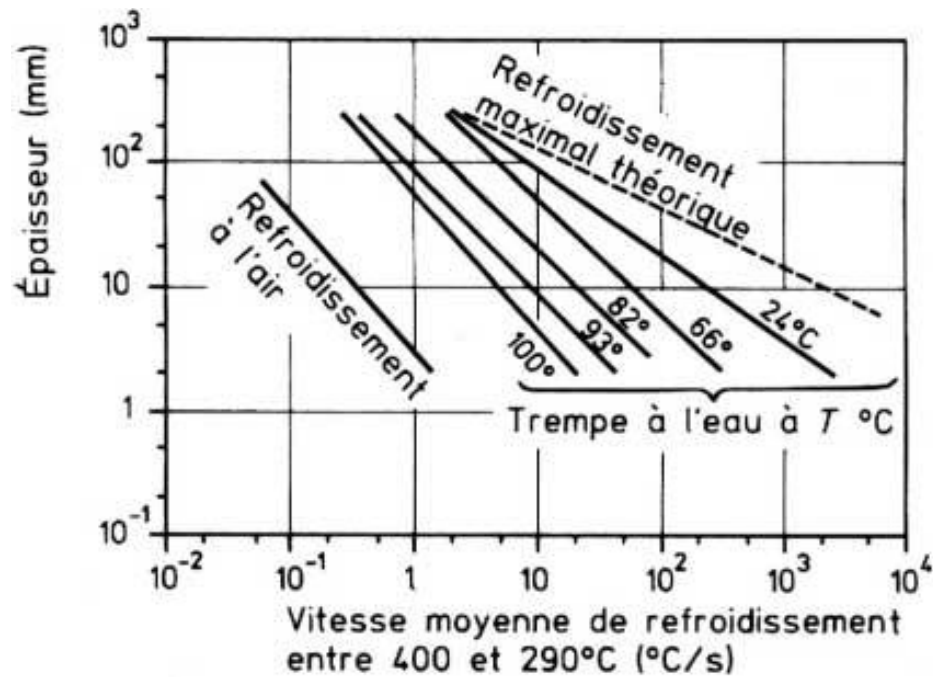


Figure II.3 : Influence du milieu de trempe et de l'épaisseur sur la vitesse moyenne de refroidissement en mi- épaisseur de tôles en alliages d'aluminium [19].

II.6.3. Influence du temps de transition entre mise en solution et trempe

Lorsqu'on trempe des produits de faible épaisseur, il y a lieu de tenir compte du temps de transition qui s'écoule entre la sortie du four de mise en solution et l'immersion dans le fluide de trempe. Pendant ce temps de transition, les produits refroidissent généralement à faible vitesse.

Si le temps de transition est assez long pour que la température des produits pénètre dans l'intervalle critique, une partie au moins de cet intervalle est parcouru à faible vitesse.

Les effets du temps de transition sont similaires à ceux déjà indiqués concernant la diminution de la vitesse de refroidissement.

Certaines spécifications stipulent que le temps de transition doit être inférieur à une durée variant de 5 à 15 s dans le cas de tôles dont l'épaisseur varie de 0,4 à 2,3 mm [20].

II. 7. Maturation

La maturation est un chauffage modéré. Son but est de donner de la mobilité aux atomes pour leur permettre de former des précipités. On utilise parfois le terme vieillissement. Le but principal des traitements de vieillissement est de provoquer un durcissement structural et modifier les propriétés mécaniques des alliages après trempe. Ces propriétés mécaniques sont convenables pour plusieurs applications.

Le comportement des alliages lors de la maturation est variable d'une famille à l'autre. Il peut être fortement influencé par les températures ambiantes auxquelles sont soumis les produits trempés.

La figure II.4 donne les courbes de maturation à la température ambiante (soit 20 °C environ), à 0 °C et à - 18 °C des alliages 2014, 2024, 6061, 7050 et 7075 sous forme de tôles, la maturation étant caractérisée par l'évolution des caractéristiques mécaniques de traction en fonction du temps de maintien après trempé à la température considérée.

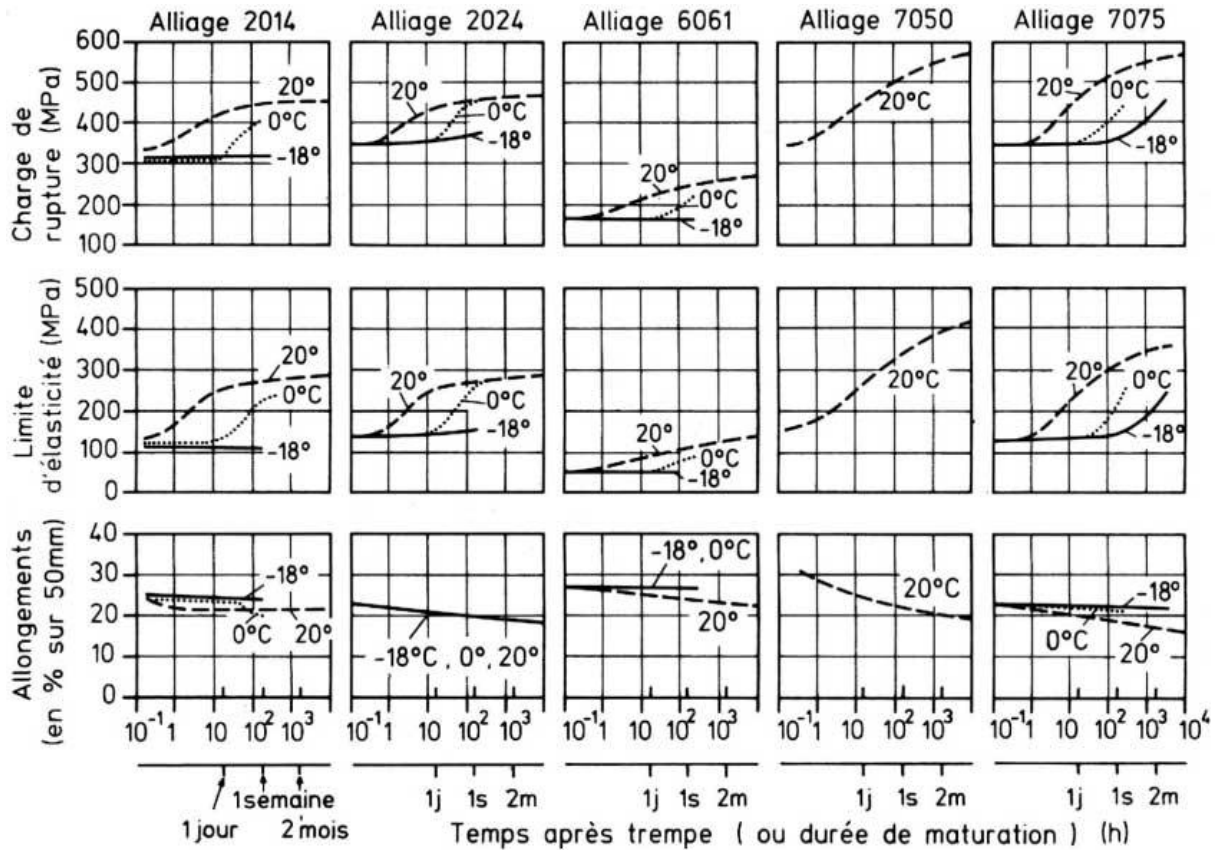


Figure II.4 : Courbes de maturation des alliages 2014, 2024, 6061, 7050 et 7075 à différentes températures

II.8. Traitements de revenu ou de maturation artificielle

II.8.1. Introduction (Phénomènes généraux)

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.

II.8. 2. Influence du temps d'attente entre trempe et revenu

Pour certains alliages, les courbes de revenu ne sont pas identiques si l'on part d'un état fraîchement trempé ou d'un état trempé et déjà plus ou moins mûri. Dans le second cas, qui est le plus industriel, la maturation est en réalité conduite en deux étapes dont la complexité est d'autant plus grande que la température entre trempe et revenu ne reste généralement pas constante.

Or, les alliages d'aluminium réagissent de façon très différente à l'influence de la maturation naturelle entre trempe et revenu [21].

II.8. 3. Alliages peu sensibles au temps d'attente entre trempe et revenu

Ce sont les alliages du type 2014 ainsi que les alliages Al-Zn-Mg-Cu du type 7075.

II.8. 4. Alliages influencés favorablement par l'attente entre trempe et revenu

Ce phénomène favorable peut s'expliquer par le fait que, lors de la maturation à la température ambiante, il se forme des germes dont les plus gros se transforment, lors du revenu, en particules de précipités durcissant, les plus petits étant redissous. Plus cette maturation est longue, plus le nombre de germes donnant naissance à des précipités est grand et plus le durcissement lors du revenu sera important.

II.8. 5. Alliages influencés défavorablement par l'attente entre trempe et revenu

En revanche, pour certains alliages, l'attente entre trempe et revenu peut présenter un effet franchement défavorable : il s'agit des alliages type 6181 et également 6060 relativement chargés en Mg_2Si (à teneur en Mg_2Si supérieure à 1,2-1,5 %).

On peut cependant penser que le revenu expérimenté de 10 h à 160 °C ne correspond pas, pour chaque cas considéré, aux caractéristiques optimales et que, pour chaque attente entre trempe et revenu, il existe, en revanche, une condition de revenu bien déterminée et conduisant à ces caractéristiques optimales.

Les températures et durées varient d'un alliage à l'autre : alliage de fonderie EN AC-42200 (ancienne désignation AS7G06) :

- mise en solution : 8 à 12 heures à 535 °C ;
- trempe à l'eau (20 °C) dans les 7 secondes qui suivent la sortie du four de mise en solution ;
- revenu : 6 heures minimum à 170 °C.

Pour certains alliages, on effectue une trempe, mais pas de revenu. Dans ce cas, il y a « maturation » (exemple : 5 jours à 20 °C pour les AU), c'est-à-dire que l'on considère que l'alliage atteint ses caractéristiques mécaniques seulement après cette période. Tout essai de dureté ou de résistance mécanique avant ces 5 jours n'est pas significatif.

Le tableau II.1 indique les conditions de traitements thermiques des alliages d'aluminium [17].

ALLIAGE			État	Mise en solution (°C)	Trempe	Maturation	Revenu	
Classe	Série	Nom						
CORROYÉS	2000	2011	T6 – T8	510 ± 5	Eau ≤ 40 °C	≥ 4 jours	14 h/160 °C 20 h/160 °C ou 10 h/175 °C	
		2014	T6	505 ± 5	Eau ≤ 40 °C			
		2017A	T4	500 ± 5	Eau ≤ 40 °C			
		2024	T3 – T4	495 ± 5	Eau ≤ 40 °C			
		2030	T3 – T4	490 ± 5	Eau ≤ 40 °C			
		2618A	T6	530 ± 5	Eau ≤ 80 °C			
		6005A	T6	530 ± 5	Eau ≤ 40 °C			
		6060	T5 – T6	535 ± 5	Eau ou air soufflé			
		6000	6061	T6	535 ± 5			Eau ± 40 °C
			6082	T6	535 ± 5			Eau ± 40 °C
	6106		T5 – T6	530 ± 5	Eau ou brouillard			
	7020		T6	450 ± 10	Eau ou air soufflé			
	7000	7049A	T6	465 ± 5	Eau ≤ 40 °C			
			T73	465 ± 5	Eau ≤ 40 °C			
7075		T6	465 ± 5	Eau ≤ 50 °C				
		T73	465 ± 5	Eau ≤ 40 °C				

Tableau II.1 : Conditions de traitements thermiques des alliages d'aluminium [22].

CHAPITRE III

DISPOSITIFS

EXPERIMENTAUX ET

TECHNIQUES DE MESURE

III.1. Introduction

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

Dans notre cas, le but de l'évaluation des caractéristiques des matériaux en alliage d'aluminium.

III.2. Description générale de la machine de traction

L'appareil est une machine d'essai à montant hydraulique produisant directement des forces de traction (figure III.1). La force de traction maximale peut atteindre 50 KN dans les deux directions. La force et le déplacement sont enregistrés par des capteurs, affichés et peuvent être traités sur un PC.



Figure III.1 : Machine d'essai de traction.

III.2.1. Constituants de la machine

Cette machine est constituée d'un vérin hydraulique à double effet (1), situé sur la traverse (2) (figure III.2). La tige du piston (3) agit sur la traverse supérieure (4). La traverse inférieure (5) peut être déplacée en plusieurs positions pour le réglage de la hauteur, elle est fixée à l'aide de rainures et languettes (6) aux deux colonnes (20). Entre la traverse inférieure et la traverse supérieure se trouve l'espace de travail (7). Les logements cylindriques (8) permettent de changer les différents éléments, comme les têtes de serrage à coin (9). Les indicateurs pour la force et le déplacement, le groupe hydraulique et la commande de la machine sont logés dans le boîtier (10). La mesure de la force se fait à travers un transducteur de force (11) à la traverse inférieure. A la traverse supérieure, on mesure la course via un capteur de déplacement (12). La

force et le déplacement sont affichés numériquement sur (13) et peuvent être envoyés à l'ordinateur. Le mouvement de déplacement de la traverse supérieure est commandé à l'aide de bouton-poussoir. Les deux directions possèdent un circuit d'avance rapide (15). Le réglage de la vitesse de déplacement se fait par le bouton (16) et la force par le bouton (17). Outre de l'interrupteur principal (18), la machine WP310 possède aussi un bouton-poussoir d'arrêt d'urgence (19).

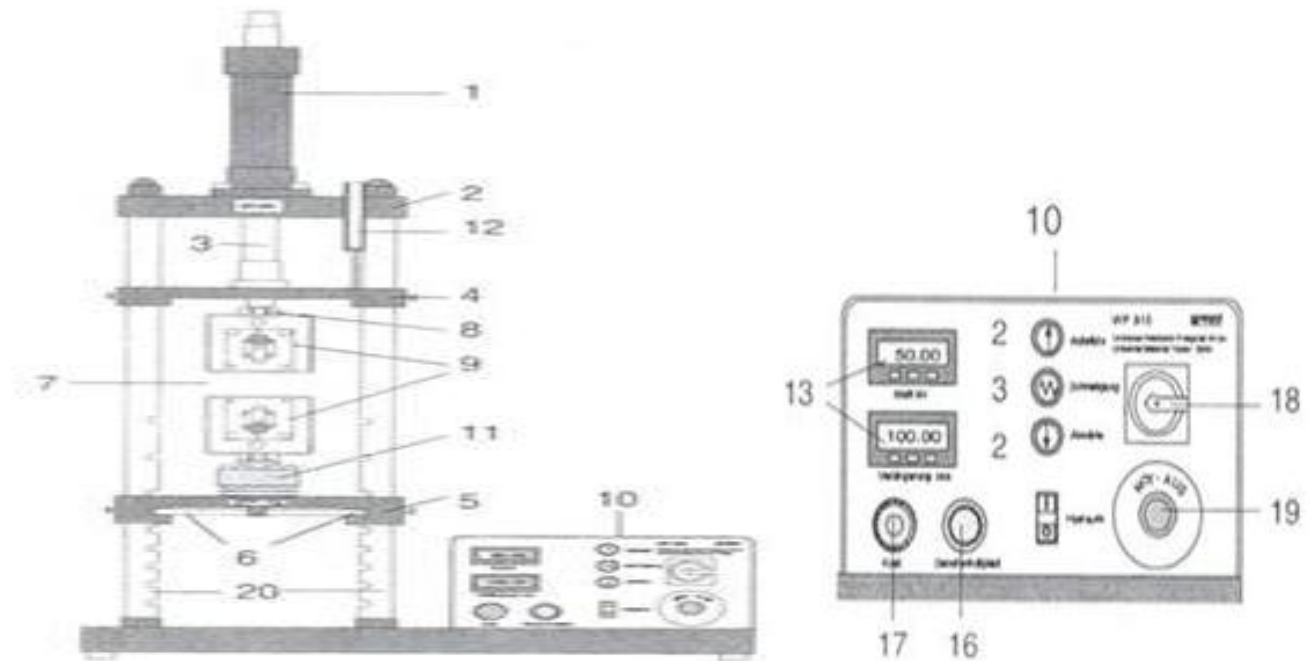


Figure III.2 : Constituants de la machine WP 310.

III.2.2. Déroulement de l'essai de traction

Pour le bon déroulement de l'essai de traction, il faut suivre les instructions suivantes :

Mettez la machine et le PC d'acquisition sous tension,

- Fixer bien l'éprouvette sur les deux mors de la machine de traction.
- Utiliser le logiciel d'acquisition des données relatives à l'essai :
- Saisir les paramètres de l'éprouvette (type (forme), Base de mesure 10). Ainsi la section S_0 sera calculée puis saisie automatiquement.
- Saisir les paramètres identifiants l'essai (Matière, établissement...)
- Saisir les paramètres relatifs au fonctionnement de la machine (vitesse de chargement : MPa/s, daN/s...). En se basant sur la norme ISO.
- Revérifier les données déjà saisies puis lancer l'essai.
- L'interface visionne l'allure de la courbe au fur et à mesure que le mors mobile de la machine se déplace jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

- Enregistrer la courbe dans laquelle figure toutes les données saisies.
- Imprimer la courbe de traction.
- Arrêter soigneusement le PC et la machine.

III.2.3. Eprouvettes de traction

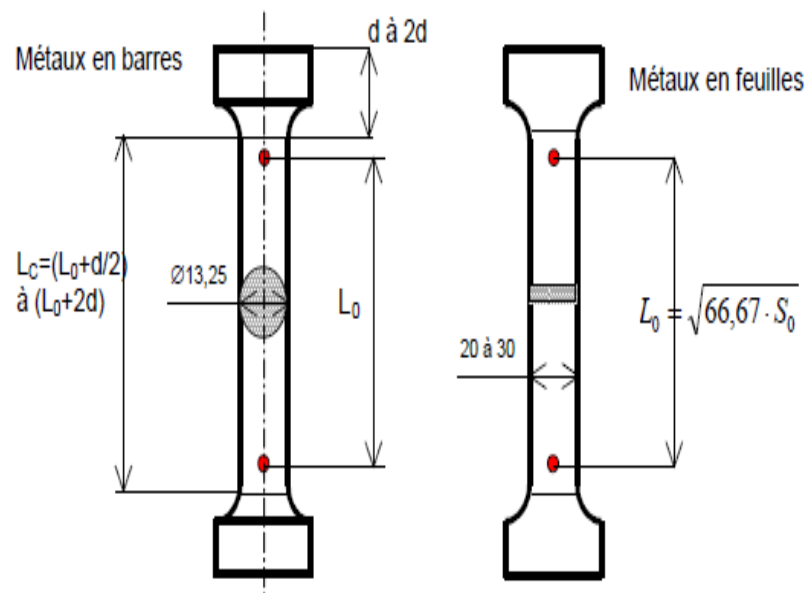
On peut effectuer les essais sur un barreau cylindrique ou de section rectangulaire (éprouvette plate), comme indique la figure III.3.

Les éprouvettes cylindriques sont habituellement obtenues par tournage. Les éprouvettes plates peuvent être obtenues par sciage d'une tôle puis fraisage.

Les éprouvettes sont fréquemment prélevées dans une pièce réelle ou un brut (lingot, tôle, profilé, etc.). Dans ce cas, l'endroit où l'éprouvette est prélevée, et la direction de prélèvement ont une importance : la matière est souvent hétérogène et anisotrope.

Les éprouvettes de traction sont normalisées. ($\varnothing \geq 4\text{mm}$ ou $e \geq 3\text{mm}$...).

Dans l'éprouvette, on s'intéresse à la partie calibrée, qui est la partie dans laquelle la section droite ne varie pas (partie de largeur uniforme). Au sein de cette partie calibrée, on trace deux repères « un peu à distance » des congés ; les efforts et la déformation dans cette partie entre repère est réputée uniforme. La longueur de la partie calibrée est notée L_c . Les dimensions des éprouvettes varient aussi selon les pays : Japon (norme JIS) USA (norme ASTM).



S_0 : section initiale en mm^2

S_u : section minimale après rupture

L_0 : longueur initiale entre repères

L_u : Longueur ultime après rupture

L_c : longueur de la partie calibrée

Figure III.3 : Eprouvette de traction.

III.2.4. Principe de l'essai

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

Dans ce travail, nous avons caractérisé l'aluminium et ses alliages par l'intermédiaire de l'essai de traction réalisée grâce à la machine d'essai de traction. Nous donnons ici tout d'abord la description générale d'une machine de traction, puis des éléments concernant les éprouvettes, les mesures de déformation et de charge appliquée.

III.2.5. Exploitations de l'essai

Sur un diagramme effort-déformation (figure III.4), on observe les phases successives suivantes :

Zone OA: domaine des déformations élastiques ou réversibles (zone parfois linéaire) si l'on cesse la charge, l'éprouvette retrouve ses dimensions initiales.

Zone AB: la déformation n'est plus complètement réversible. La déformation est plastique (ou permanente) homogène ; appelée aussi déformation plastique répartie. Les allongements augmentent plus vite que les charges. L'allongement a lieu avec une diminution régulière de la section tout au long de l'éprouvette.

Zone BC: la déformation plastique se localise dans une petite portion de l'éprouvette et n'est plus homogène, c'est la striction on aboutit à la rupture en C. les allongements croissent avec une diminution de la charge.

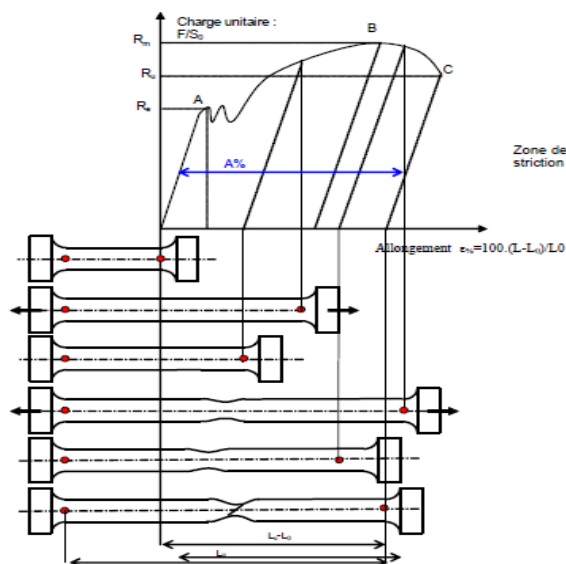


Figure III.4 : Diagramme effort-déformation.

En enregistrant la force appliquée à l'éprouvette par la machine de traction et son allongement progressif, on détermine une série de caractéristiques mécaniques importantes. On rapporte en général la force F et l'allongement Δl aux dimensions initiales de l'éprouvette d'essai.

On obtient ainsi la contrainte nominale (le quotient de la charge par la section initiale de l'éprouvette S_0)

$$F/S_0$$

La caractéristique d'élasticité est la pente de cette droite qui est le module d'élasticité E (Coefficient d'élasticité longitudinal ou module d'Young) (figure III.5), il exprime le rapport entre la charge unitaire appliquée et la déformation longitudinale de l'éprouvette.

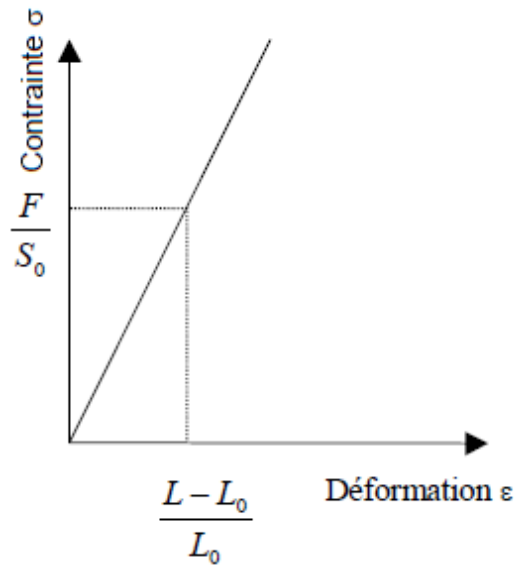


Figure III.5 : Module d'Young.

Lorsqu'on trace la courbe de σ en fonction de ϵ dans la zone élastique, la pente de la courbe est donnée par $\tan \theta$.

$$E = \frac{F \cdot L_0}{S_0 \cdot \Delta L}$$

L'essai de traction n'est pas assez précis en général pour la mesure du module d'élasticité, car même si l'on amplifie suffisamment, et les techniques électroniques permettent de petites déformations parasites diminuent la valeur de la pente en plus des écarts à la loi de proportionnalité.

Ces écarts sont attribués à des microdéformations plastiques pour les aciers doux et à des contraintes résiduelles pour certains aciers traités qui conduisent à une plastification progressive de l'éprouvette.

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

$$R_e = F_e / S_0$$

Le point B correspond à la charge maximale ; il est appelé résistance à la traction ou résistance à la rupture (il n'y ait pas encore rupture) :

$$R_m = F_r / S_0$$

A partir de ce point, la déformation commence à se localiser sous forme de striction, ce qui explique la décroissance de l'effort nécessaire aux déformations au-delà du point B.

Le point C correspondant, lui, à la charge ultime (finale).

Après rupture de l'éprouvette et reconstitution de celle-ci, on mesure L_U et S_U respectivement longueur entre repères et section minimale ultimes.

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

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

L_u est la longueur de l'éprouvette après rupture. Il caractérise la ductilité du matériau.

La striction est la réduction de section maximale de l'éprouvette rompue c'est-à-dire dans la section de rupture (figure III.6). Le coefficient de striction traduit l'aptitude à la déformation à froid.

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

Avec S_0 : section initiale, S_u et S_r : sections après rupture.

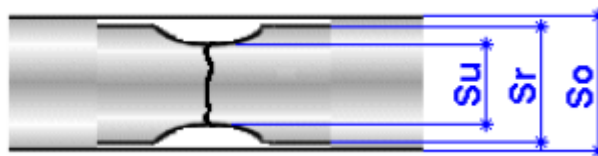


Figure III.6 : Section de rupture d'une éprouvette en traction.

Le module de cisaillement G exprime le rapport entre le couple et la déformation par cisaillement, par exemple dans un essai de torsion.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

G est le coefficient de Poisson, il exprime le rapport entre la déformation longitudinale de l'éprouvette et la déformation transversale

CHAPITRE IV

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

VI.1. Introduction

Le comportement du matériau, après traitement thermique, varie d'une famille d'alliages d'aluminium à une autre et est influencé par les variations de température. Par exemple, à chaque température, au-dessus d'un certain seuil, il existe un maximum de la limite élastique et de la contrainte de rupture qui est atteinte d'autant plus vite que la température de revenu est élevée, et ce maximum est d'autant plus élevé que la température est plus basse. L'allongement à la rupture, par contre diminue lorsque la température du revenu augmente.

Les résultats que nous présentons ultérieurement, sont des travaux déjà réalisés par des chercheurs. Nous traitons dans ce chapitre, l'influence du traitement thermique sur les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium.

VI.2. Influence du traitement thermique sur $R_{p0,2}$ et R_m des alliages d'aluminium sollicités en traction sur les alliages 2219-T851 et 2050-T84

L'essai de traction est parmi les principaux essais mécaniques. Celui-ci permet d'obtenir les propriétés de résistance mécanique maximale et de limite d'élasticité ainsi que l'allongement à la rupture.

La figure IV.1 présente les caractéristiques mécaniques R_m (contrainte maximale avant rupture, et $R_{p0,2}$, la limite conventionnelle de déformation plastique correspondant à un allongement relatif $\epsilon=0,2\%$) des familles d'alliages d'aluminium.

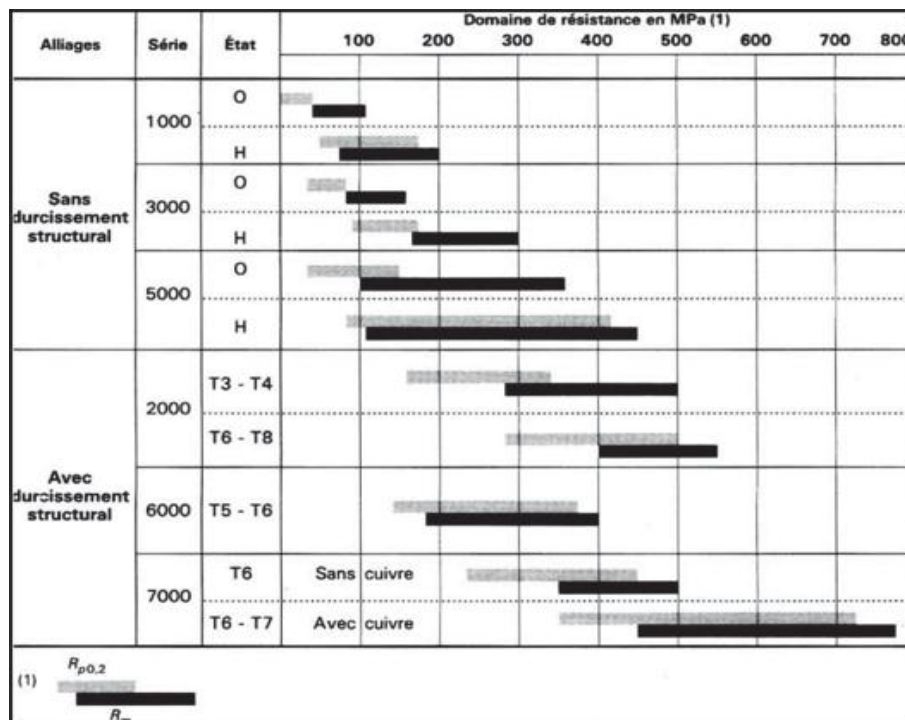


Figure IV.1 : Caractéristiques mécaniques des familles d'alliages d'aluminium corroyés [23]

Selon la figure IV.1, on remarque que :

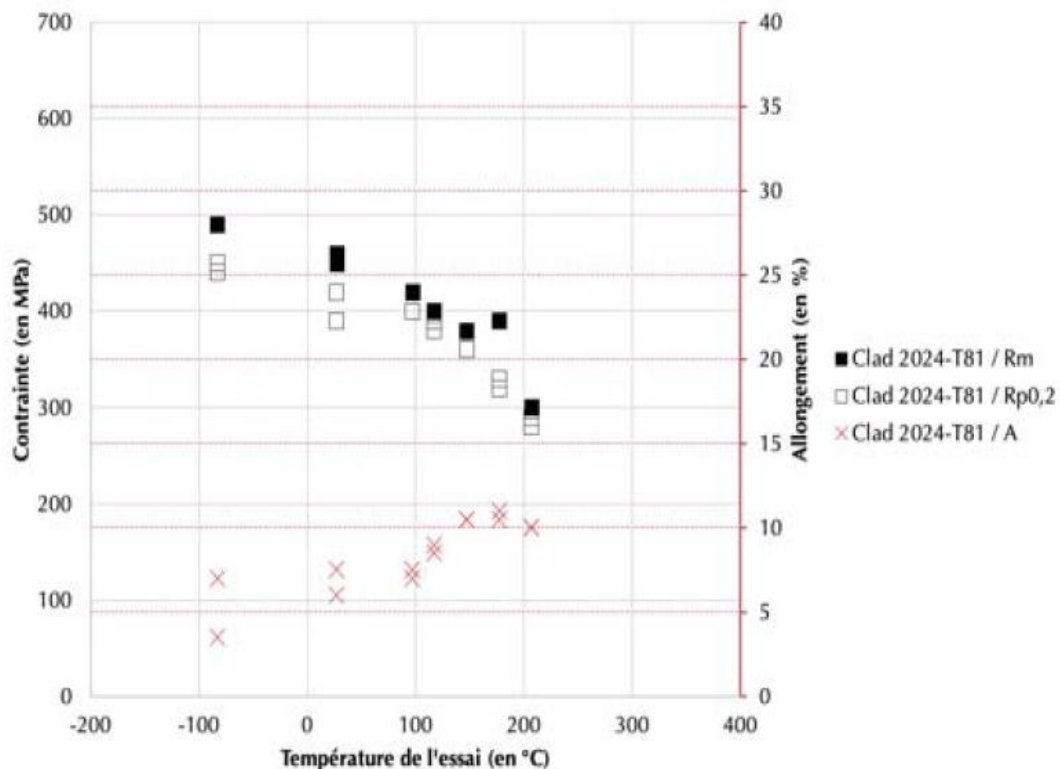
Pour les alliages à durcissement structural, un état vieilli artificiellement (T5 à T8) présente de meilleures propriétés qu'un état vieilli naturellement (T1 à T4).

Ensuite, il est clairement établi que les alliages d'aluminium à durcissement structural ont les meilleures propriétés mécaniques.

La famille d'alliages 7000 avec un traitement T6-T7 est celle qui présente les meilleures propriétés, lors d'un maintien en température les alliages issus de la série 7000 perdent rapidement leurs propriétés mécaniques. Cela est moins marqué sur des alliages de la série 2000.

Des travaux ont été réalisés afin de déterminer l'évolution des propriétés mécaniques en traction à plusieurs températures [24].

Les figures IV.2 et IV.3 présentent l'évolution des propriétés mécaniques de deux nuances d'alliages d'aluminium à plusieurs températures. Il est possible de voir une diminution de la résistance lorsque la température augmente, ce qui est justifié par les dislocations qui vont se déplacer dans le matériau. S'il est pur, la dislocation ne va rencontrer aucun obstacle à sa propagation autre que la friction du réseau et va permettre une importante ductilité.



Clad 2024-T819 : Alliage d'aluminium plaqué.

Figure IV.2 : Evolution des propriétés mécaniques en traction de la nuance Clad 2024-T819 en fonction de la température de l'essai de traction.

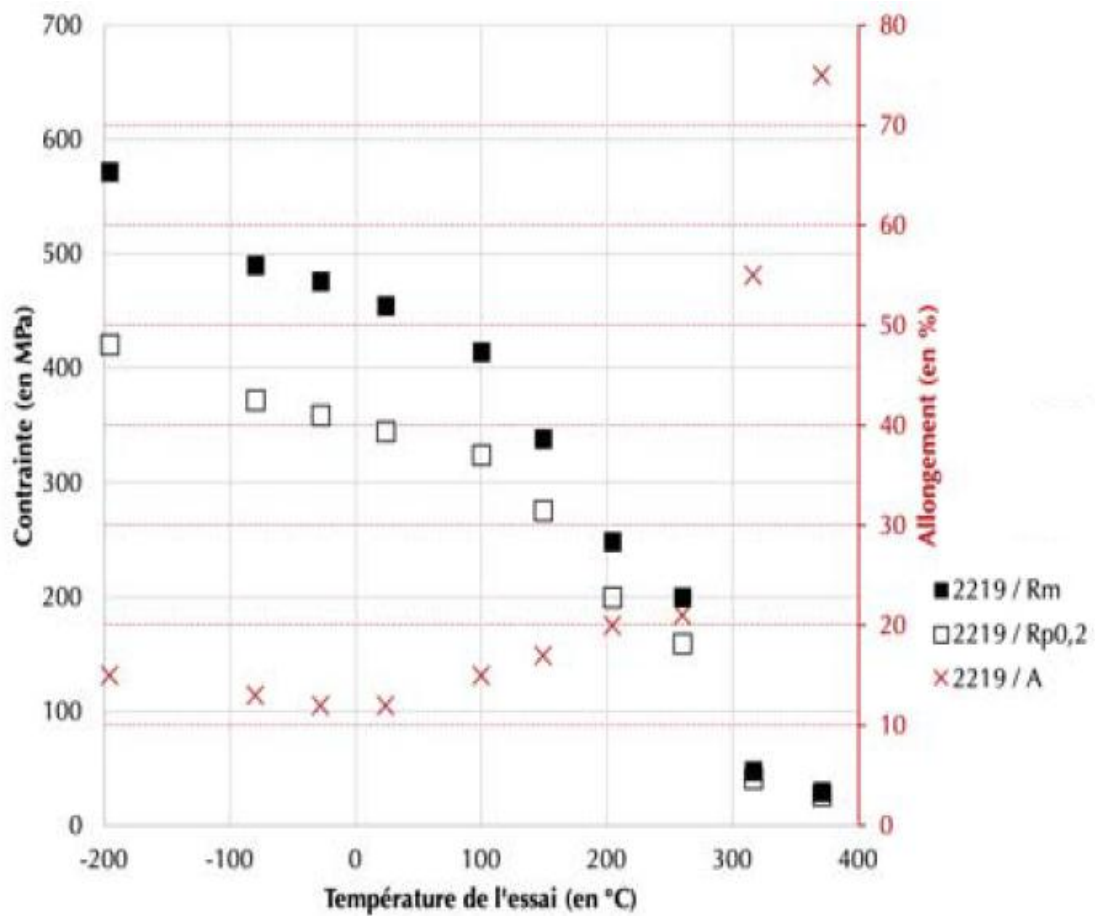


Figure IV.3 : Evolution des propriétés mécaniques en traction de la nuance 2219-T851 en fonction de la température de l'essai de traction.

Les précipités évoluent vers leurs microstructures stables et parfois en perdant de la cohérence avec la matrice, les écarts entre les paramètres de maille des précipités et celui de l'aluminium deviennent trop grands pour être appropriés par des déformations de la matrice. Ces changements microstructuraux influent sur les propriétés des alliages.

La figure IV.4 présente les courbes de traction réalisées à 200°C et les courbes de traction réalisées à la température ambiante [25]. Afin de faciliter la comparaison, Il est possible d'observer sur cette figure une diminution des propriétés mécaniques des deux nuances avec l'augmentation de la température.

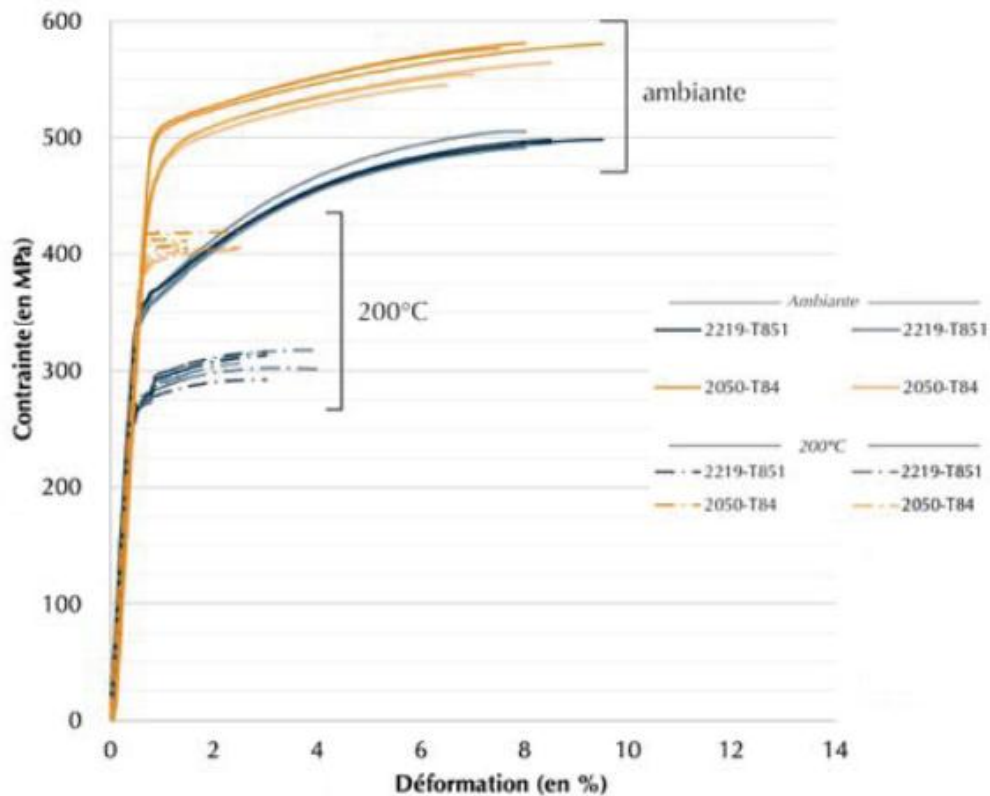


Figure IV.4 : Courbes de traction réalisées sur les alliages : 2219-T851 et 2050-T84.

Les faibles valeurs l'allongement sont dues à des ruptures hors extensomètres, les sauts présents sur les courbes du 2219-T851 lors des essais en température sont dus à un changement de vitesse de l'essai imposé par la norme. Ce changement de vitesse a été supprimé par la suite.

VI.3. Evolution des propriétés mécaniques en traction de l'alliage d'aluminium 6063

Les figures IV.5, IV.6, IV.7 et IV.8 illustrent des résultats obtenus par des essais de traction sur des éprouvettes d'alliages d'aluminium 6063 après traitements thermiques [26]. Les échantillons sont soumis à un traitement d'homogénéisation, qui est un traitement comportant un chauffage de l'alliage 6063 en état brut (corroyé) à des températures relativement élevées 450°C et le maintien pendant 7 heures.

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

- Chauffage à une température 400°C dans les vitesses 20°C/min, 15°C/min et 10°C/min.
- Temps maintien d'une demi-heure.
- Trempe à huile.

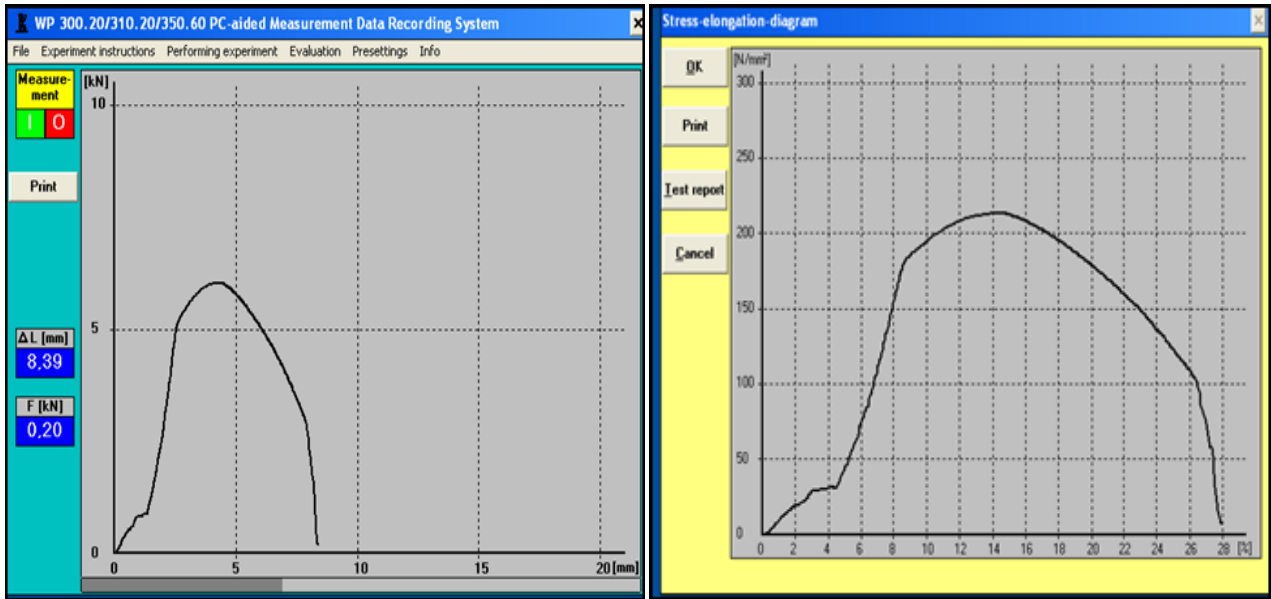


Figure IV.5: Courbes de traction d'alliage 6063 après homogénéisation.

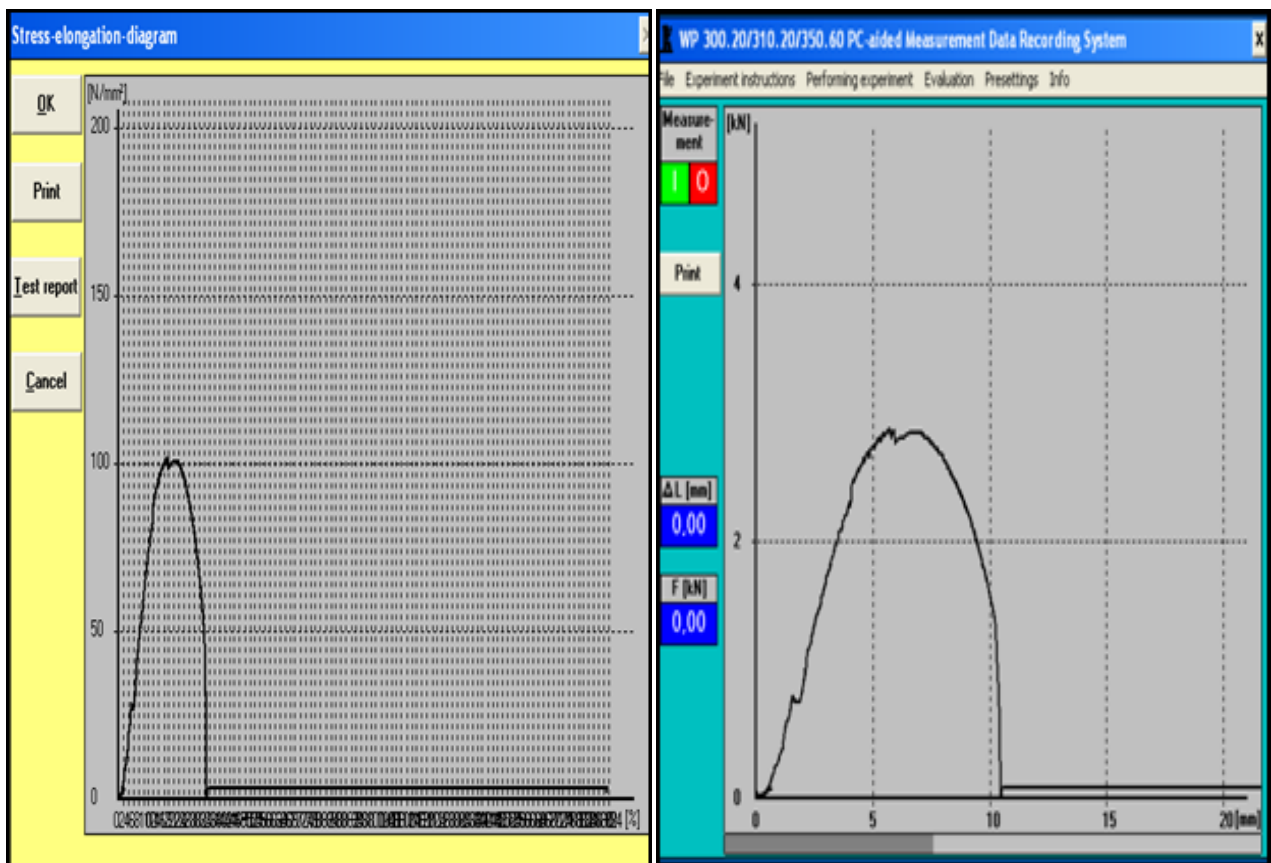


Figure IV.6 : Courbes d'alliage 6063 chauffé à vitesse 10C°/min.

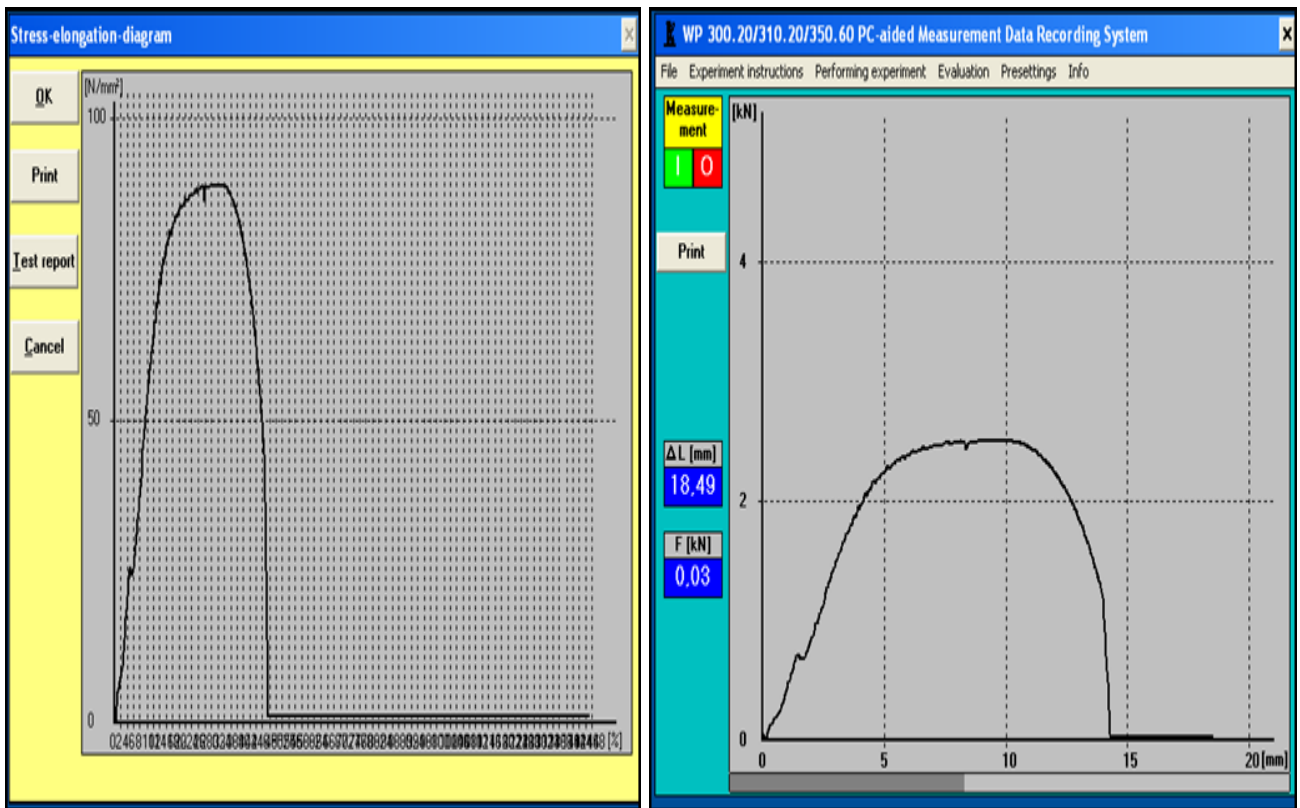


Figure IV.7 : Courbes de traction d'alliage 6063 chauffé à vitesse 15C°/min.

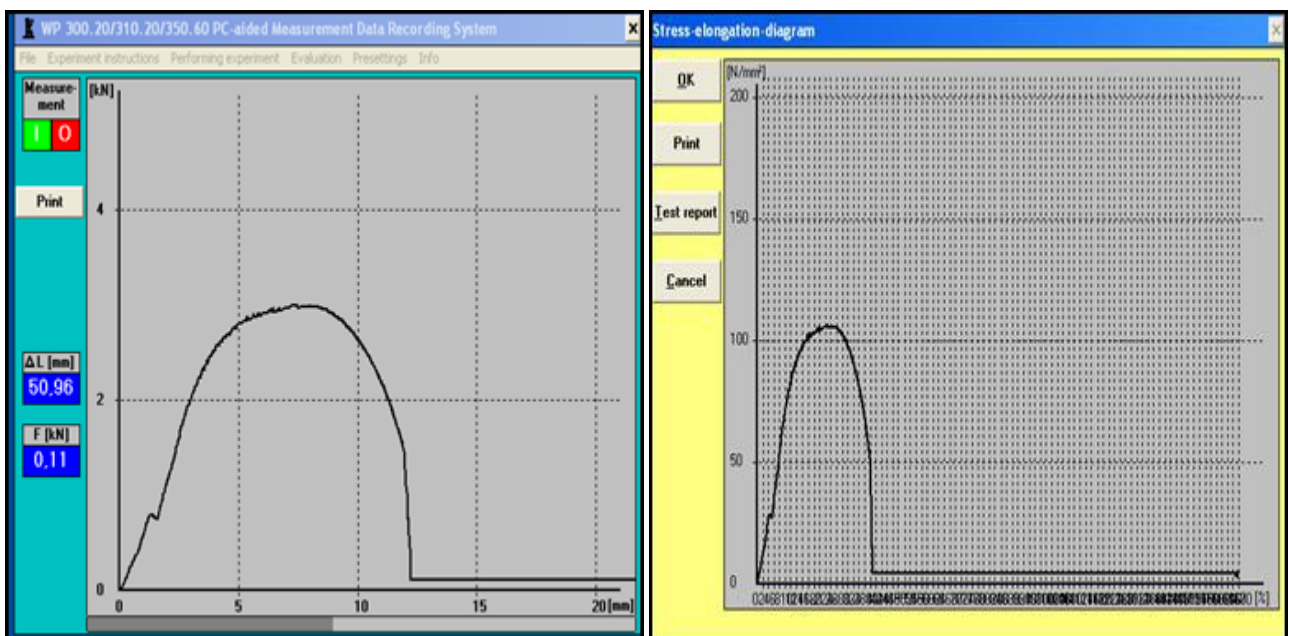


Figure IV.8: Courbes de traction d'alliage 6063 traité à vitesse 20C°/min.

Le tableau IV.1 contient les valeurs de la résistance à la rupture (R_m) en N/mm² après homogénéisation et à différentes vitesses de chauffage.

Alliage d'aluminium 6063 après homogénéisation				
	Sans traitement	Chauffé à vitesse 10C°/min	Chauffé à vitesse 15C°/min	Chauffé à vitesse 20C°/min
R_m	210N/mm ²	100N/mm ²	90N/mm ²	108N/mm ²

Tableau IV.1 : Valeurs de la résistance à la rupture (R_m) en N/mm².

Le tableau IV.2 regroupe les valeurs de l'allongement (A%) après homogénéisation et à différentes vitesses de chauffage.

Le taux d'allongement

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

Alliage d'aluminium 6063 après homogénéisation				
	Sans traitement	Chauffé à vitesse 10C°/min	Chauffé à vitesse 15C°/min	Chauffé à vitesse 20C°/min
A%	21%	27%	45%	40%

Tableau IV.2 : Valeurs de taux d'allongement (A%).

D'après les allures des courbes et dans la zone élastique, on note que :

- L'augmentation de l'allongement après l'application de différents traitements thermiques.
- L'allongement de l'alliage d'aluminium 6063 ne dépend pas avec la vitesse d'échauffements des éprouvettes traitées.
- La pente des courbes des échantillons traités est assez importante, comparée avec l'échantillon avec traitement d'homogénéisation d'où la diminution du module de Young E (module d'élasticité longitudinale).

Pour la zone de déformation plastique

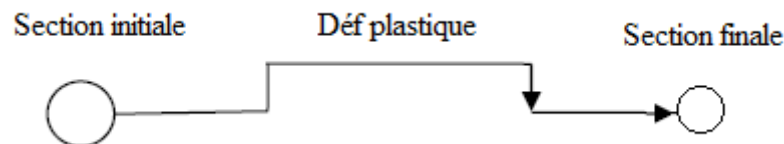
- On remarque que l'allongement avant rupture est le plus grand dans le cas d'échauffement à vitesse de 20°C /min.

- La diminution des valeurs de la résistance à la rupture (σ) des échantillons qui ont subi des traitements thermiques.
- L'augmentation de l'allongement ($A\%$) des échantillons dans le cas d'application du traitement thermique avec différentes vitesses après le traitement d'homogénéisation, le matériau devient ductile.

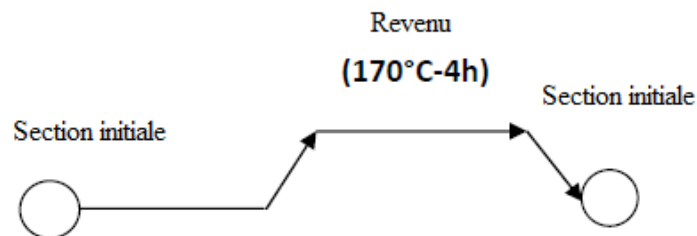
VI.4. Evolution des propriétés mécaniques en traction de l'alliage d'aluminium 6101

Des essais ont été réalisés par LAADJAL Djamel [27], afin de déterminer l'évolution des propriétés mécaniques en traction. Il a utilisé deux types d'échantillons de l'alliage d'aluminium 6101 sous forme de fils, sont découpés à des longueurs de 25 cm et de diamètre 9.50 mm (fil machine) et à des longueurs de 25 cm et de diamètre 3.15 mm (fils tréfilés). Il a considéré trois états structuraux de l'alliage A6101.

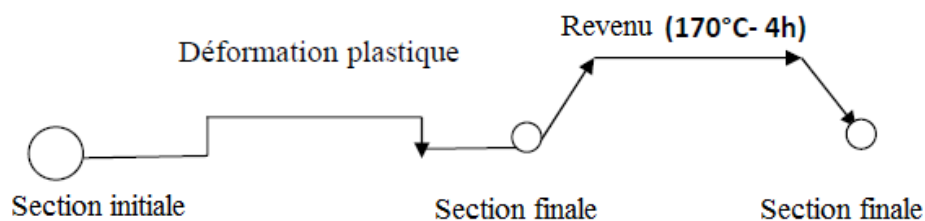
Premier état : Tréfilage du fil machine : Il consiste en une déformation plastique (DF) par tréfilage qui réduit la section initiale ($\varnothing=9.5$ mm) en une section finale ($\varnothing=3.15$ mm).



Deuxième état : Revenu du fil machine : Il consiste en un traitement thermique (TT) sans déformation Plastique.



Troisième état : Effet synergique de la déformation plastique suivie d'un traitement thermique.



Notre travail consiste à comparer les microstructures et les caractéristiques mécaniques obtenues après chaque état.

VI.4.1. Effet de la déformation plastique (premier état)

La structure obtenue après une déformation plastique par tréfilage à la température 40°C, qui fait passer la section du fil machine de 9.5 mm à 3.15mm, est une structure écrouie. Les précipités existants avant le tréfilage (Mg_2Si + Intermétalliques contenant du Fer) participent au durcissement de la structure, comme indique les figures IV.9 et IV.10.

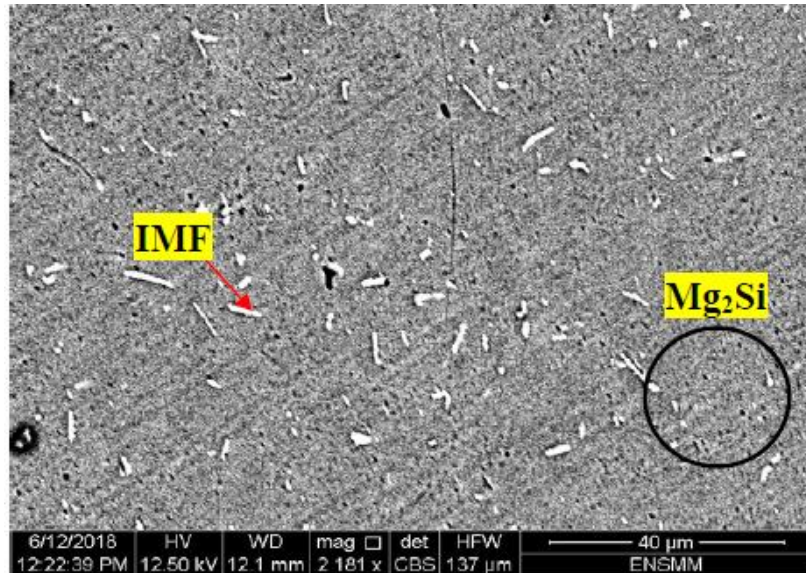


Figure IV.9 : Microstructure de l'alliage Al6101 ($\varnothing=9.5$ mm).

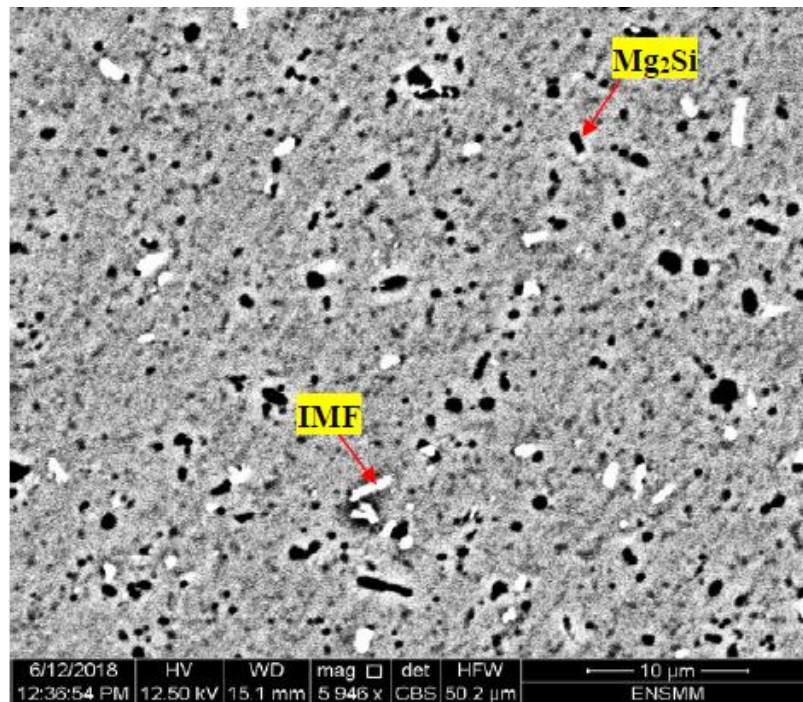


Figure IV.10 : Microstructure de l'alliage Al6101 ($\varnothing=3.15$ mm).

Les valeurs des caractéristiques mécaniques sont enregistrées dans le tableau IV. Suivant :

Diamètres des fils \varnothing (mm)	Taux de déformation ε (%)	la charge à la rupture R_m (MPa)	l'allongement A (%)
($\varnothing=9.5$ mm)	0	215	11
($\varnothing=3.15$ mm)	89	391	8

Tableau IV.3 : Résultats des tests mécaniques obtenus.

On remarque l'augmentation de la résistance mécanique à la rupture. Par contre l'allongement diminue à cause de l'effet de l'écroutissage.

VI.4.2. Effet de revenu (deuxième état)

La figure VI.11 montre que les constituants structuraux restent les mêmes (matrice alpha aluminium + précipités).

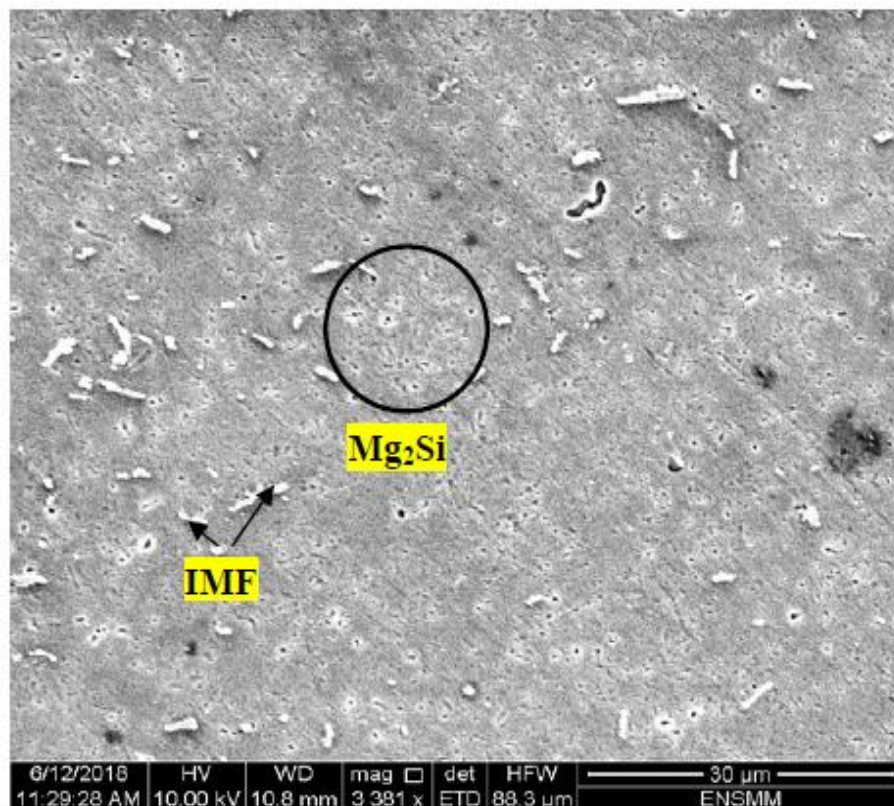


Figure IV.11 : Microstructure de l'alliage Al6101 ($\varnothing=9.5$ mm) : Revenue à 170°C (04 heures).

Les valeurs des caractéristiques mécaniques sont enregistrées dans le tableau IV.4 suivant :

Diamètres des fils \varnothing (mm)	Taux de déformation ε (%)	la charge à la rupture R_m (MPa)	l'allongement A (%)
($\varnothing=9.5$ mm)	0	215	11
($\varnothing=9.5$ mm) Revenu à 04 heures	0	250	7

Tableau IV.4 : Résultats des tests mécaniques obtenus après revenu.

Les caractéristiques mécaniques montrent une augmentation de la dureté et de la résistance mécanique. Mais on a une diminution de l'allongement. Ce phénomène est dû au durcissement structural par précipitation. Dans ce cas se sont les précipités secondaires qui sont à l'origine de l'augmentation de la dureté.

VI.4.3. Effet conjugué de la déformation plastique et du revenu (Troisième état)

La figure VI.12 présente la microstructure de l'alliage d'aluminium après la déformation plastique et le revenu.

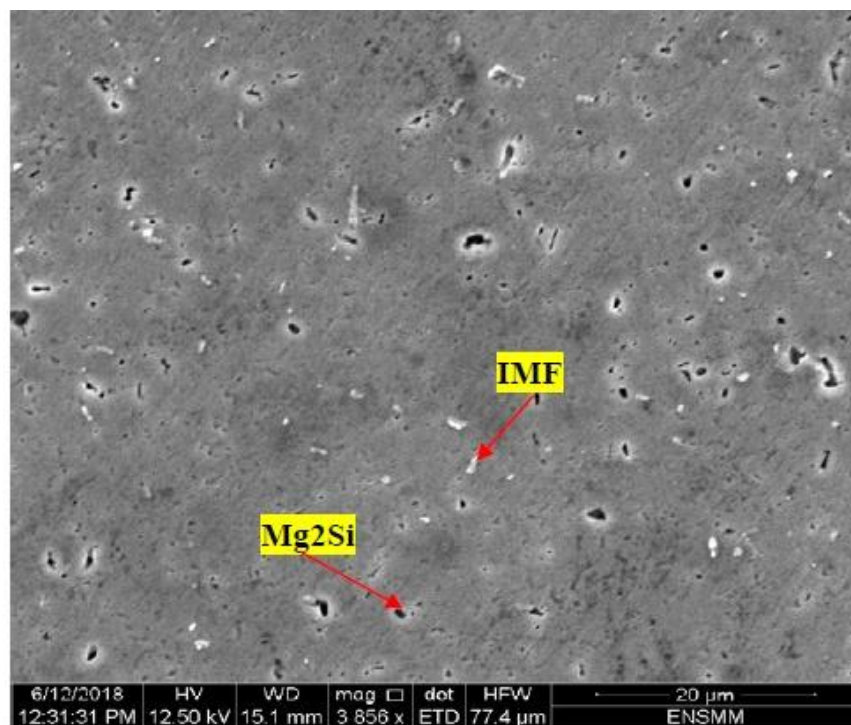


Figure IV.12 : Microstructure de l'alliage Al6101 ($\varnothing=3.15$ mm): Revenu à 170°C durant 04 heures.

Les valeurs des caractéristiques mécaniques sont enregistrées dans le tableau IV.5.

Diamètres des fils Ø (mm)	la charge à la rupture R_m (MPa)	l'allongement A(%)
(Ø=9.5 mm)	215	11
(Ø=3.15 mm)	391	8
(Ø=3.15mm)	333.4	4.8

Tableau IV.5. : Résultats des tests mécaniques obtenus après tréfilage et revenu.

L'effet conjugué de la déformation plastique suivie d'un revenu a pour conséquence une augmentation de la résistance mécanique mais une diminution de l'allongement.

Dans ce cas, durant la déformation plastique il y'a de l'érouissage. Durant le revenu il y'a deux phénomènes qui ont lieu en même temps: la diminution des contraintes résiduelles induites par érouissage tendance vers une diminution de H mais il y'a également aussi, le phénomène de précipitation secondaire qui durcit la structure, ce qui explique l'augmentation de R_m et la diminution de A%.

VI.5. Variation des propriétés mécaniques en traction de l'alliage d'aluminium 2017A

Lazizi Hakim [28] a étudié l'influence de la variation de la température de revenu sur l'évolution des caractéristiques mécaniques et structurales de l'alliage Al-4%Cu (2017A) trempé dans un fluide à 70% h₂O et 30% d'huile soluble. Les éprouvettes de traction ont subi les traitements thermiques suivants :

-Traitement d'homogénéisation

Chauffage à une température 500 °C pendant un temps de maintien de 8 h et une trempe dans un bain de lubrifiant qui contient (70% H₂O+30%d'huile soluble).

La mise en solution effectué à une température au-dessus de 500°C pendant une période assez longue pour que les éléments d'alliages soient distribués de façon homogène. Le maintien dans four pour heures est suffisant pour la formation d'une solution solide de substitution Al-Cu.

Traitement de vieillissement naturel

Refroidissement à l'air libre pour subir un vieillissement naturel pendant 16h.

Traitement de revenu

Différents traitements de maturation avec des températures de revenu déférentes: (LRv150, LRv160, LRv170, LRv180, LRv190, LRv200, LRv220, LRv240) °C.

La figure IV.13 regroupe les courbes moyennes de traction (contraintes-déformation) de l'alliage corroyé Al-Cu 4% à différentes conditions thermiques (température de revenu) et a permis de déterminer les caractéristiques mécaniques de l'alliage étudié.

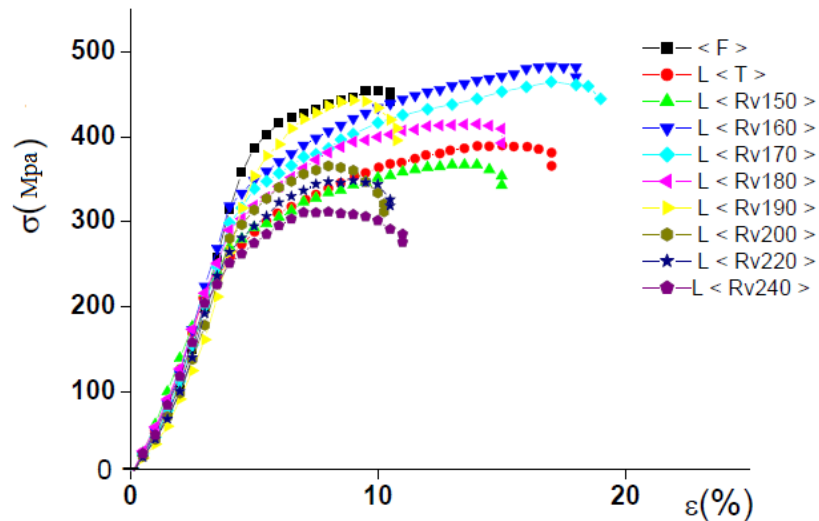


Figure IV.13: Courbes moyennes de traction (contraintes déformations).

Les principales caractéristiques mécaniques obtenues à partir des essais de traction sont schématisées dans les figures suivantes : IV.14, IV.15, IV.16, IV.17, IV.18 et IV.19.

VI.5. 1. Résistance élastique à la traction

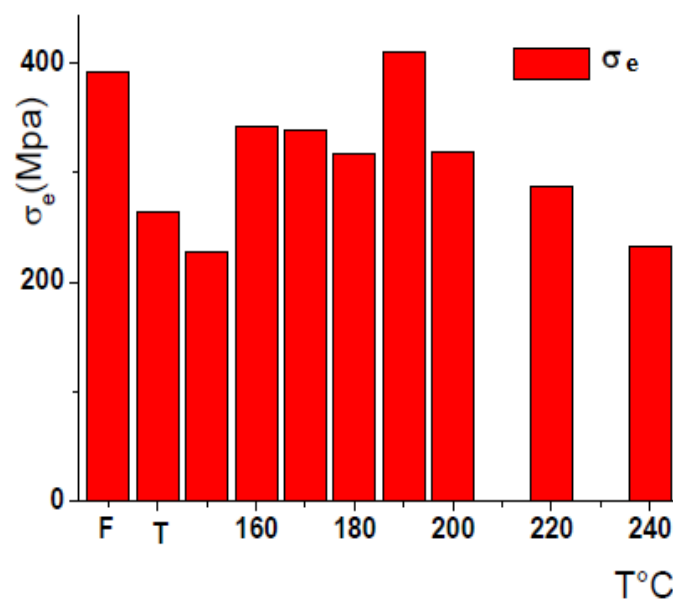


Figure IV.14 : Variation de σ_e en fonction de la température.

VI.5. 2. Résistance maximale à la traction

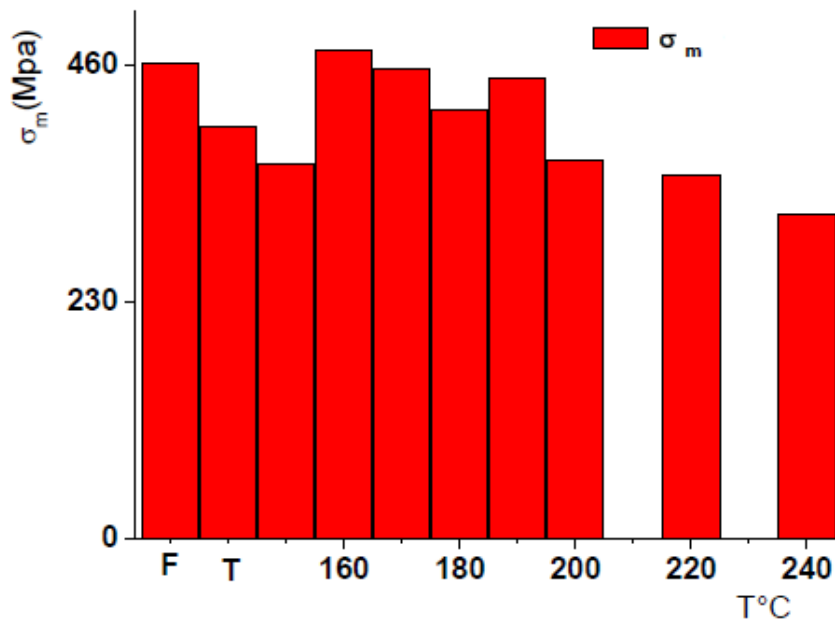


Figure IV.15 : Variation de σ_m en fonction de la température.

VI.5. 3. Résistance à la rupture

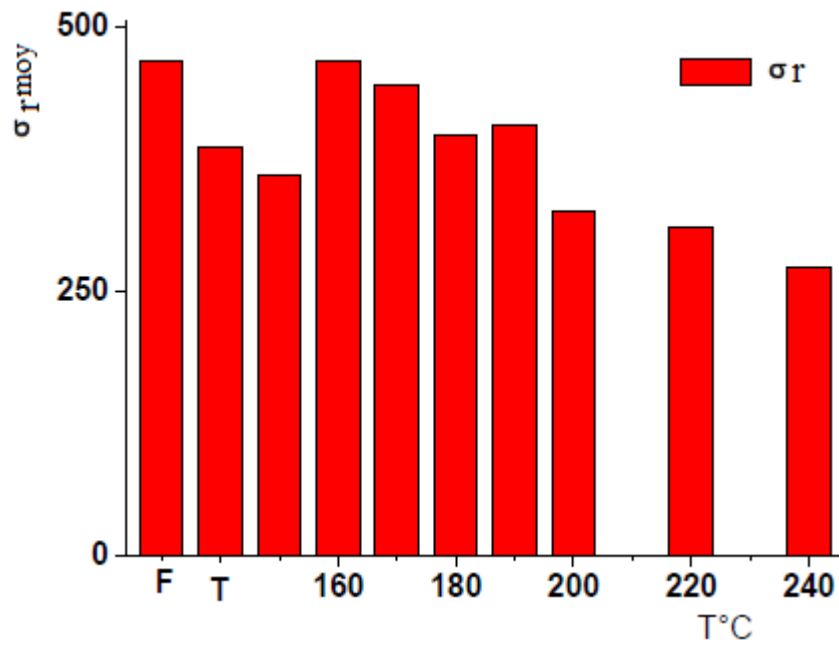


Figure IV.16 : Variation de σ_r en fonction de la température.

VI.5. 4. Module d'élasticité longitudinal E

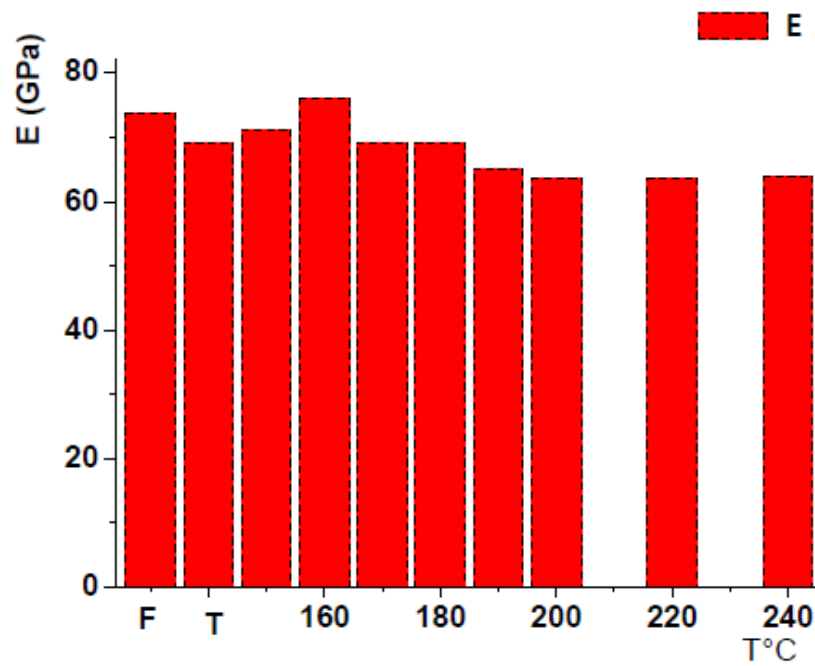


Figure IV.17 : Variation de E en fonction de la température.

VI.5. 5. Coefficient de striction Z(%)

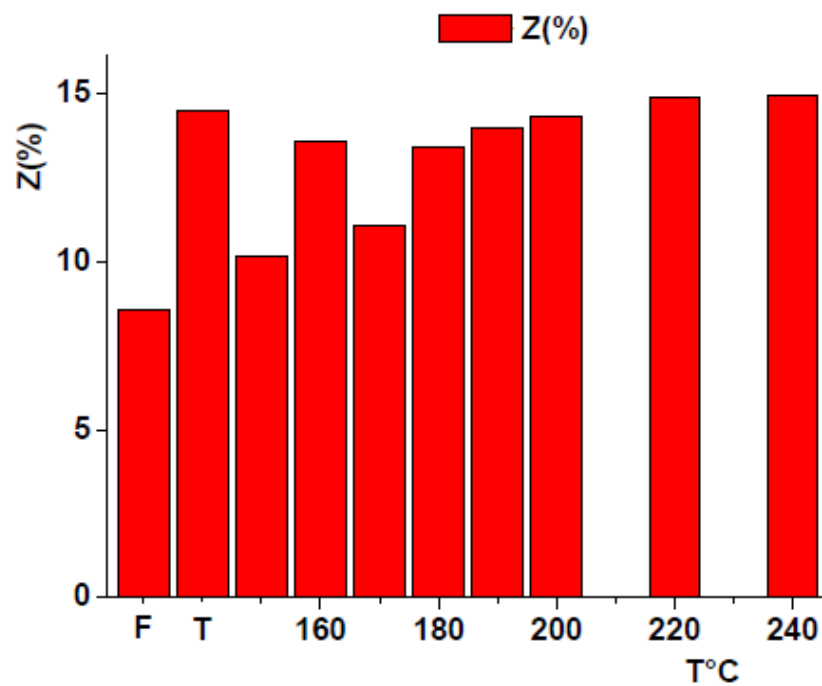


Figure IV.18 : Variation de Z% en fonction de la température.

VI.5. 6. Allongement à la striction Zu%

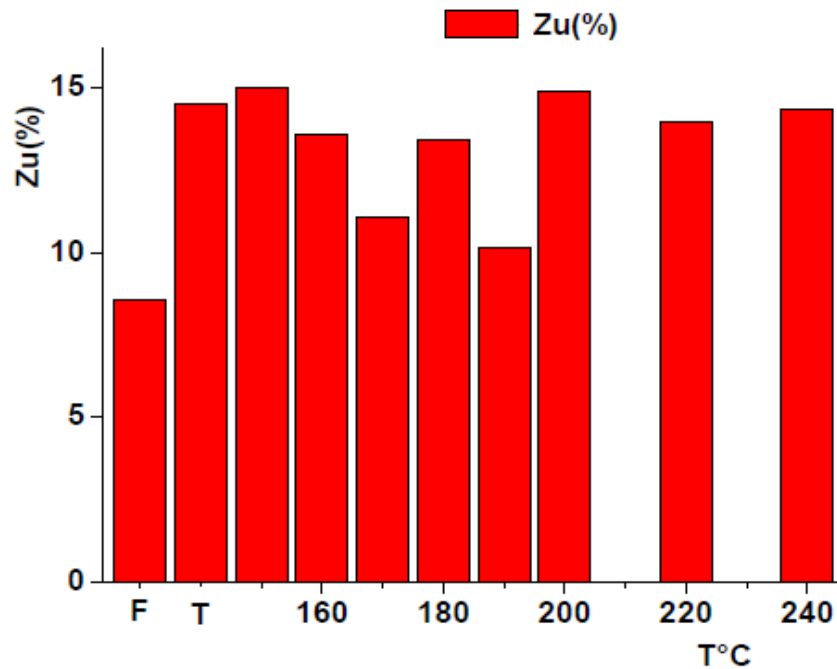


Figure IV.19 : Variation de l'allongement à la striction Zu% en fonction de la température.

Le vieillissement artificiel (revenu) provoque le déplacement des précipités (Al_2Cu) en particulier et les dislocations (propagent la déformation plastique) dans toute la masse de l'alliage.

Le mouvement des dislocations ne peut se poursuivre que si la contrainte extérieure est augmentée, ceci traduit l'effet de durcissement dû à un précipité, ce durcissement provoque alors une des caractéristiques de résistance. Les traitements thermiques effectués sont donc efficaces avant l'utilisation des alliages : aluminium-cuivre.

On remarque que l'allure des courbes moyennes : contrainte- déformation (figure VI.13) à l'état de revenu LRv-160°C donne des valeurs de caractéristiques mécaniques supérieures à celles des autres cas. Les microstructures obtenues par le microscope optique et le MEB montrent que les grains sont plus fins dans la matrice et la distribution des éléments d'alliages est plus uniforme dans le cas de revenu à la température 160°C.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de mémoire se présente comme une contribution à l'étude de l'influence du traitement thermique des alliages d'aluminium sur les caractéristiques mécaniques en traction. Il a permis de mettre en avant plusieurs points intéressants. L'objectif était de focaliser plus de lumière sur l'exposition des résultats des travaux de quelques chercheurs avec analyses et discussion.

Nous avons pris en considération le comportement de l'alliage en traction après traitement thermique.

Les résultats expérimentaux obtenus ont montré généralement que :

Les résultats obtenus expérimentalement sont très proches aux valeurs théoriques.

L'effet conjugué de la déformation plastique suivie d'un revenu a pour conséquence une augmentation de la résistance mécanique mais une diminution de l'allongement.

Pour les alliages d'aluminium à durcissement structural, un état vieilli artificiellement présente de meilleures propriétés tels que, les coefficients d'allongement et de la striction, la limite d'élasticité et la résistance à la rupture, mais Il est possible d'observer une diminution des propriétés mécaniques avec l'augmentation de la température.

En fin, ce travail a permis aussi, de développer les connaissances dans ce domaine.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. COLOMBIE, COLL. Matériaux métalliques. DUNOD Paris 2000.
- [2] D. LANDOLT. Corrosion et chimie de surfaces des métaux. Ed Press. Polytechniques et universitaires, 1997.
- [3] www.educreuse23.ac-limoges.fr/loewy/aa/voisin.
- [4] Tho. G. Thompson. Porous anodic alumina .Fabrication characterization and application. Thinsolid. Films; 29 (1-2) -192-201, 1997.
- [5] J.P Baïllon, J.M.Dorlot, troisième édition, Montréal. Ecole Polytechnique de Montréal, p480(2000)
- [6] J.E. Hatch, Metals Park, p319,(1984).
- [7]. (CHIBANE Samir, Influence du mode d'élaboration et du temps de maturation sur la fracture en traction, la dureté et la microstructure de l'alliage de fonderie AlSi7Mg, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou. 2011/2012.) :
- [8] Herbulot, F. (2009a). Récupération et recyclage de l'aluminium. Stratégies. Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, M 2345-1 à M2345-15.
- [9] Hardouin Duparc, Olivier. 2005. "Alfred Wilm et Les Débuts Du Duralumin.
- [10] (Vennekens, Verstraeten, and Broeckx 2003; ALMET 2012a) Traitements thermiques thermomécaniques.
- [11] Vennekens, R (Intitut Belge de la Soudure), B (ntitut Belge de la Soudure) Verstraeten, and K ntitut Belge de la Soudure) Broeckx. 2003. "Classification Des Alliages d'aluminium - Notice d'information Sur l'aluminium.
- [12] Rémi Desgagnés, Métallurgiste Raymond Langevin ; GUIDE D'AUTO APPRENTISSAGE pour les opérateurs en traitement thermique. p77 (sep 2015).
- [13] Roger DEVELAY ; Traitements thermiques des alliages d'aluminium. p16.
- [14] DEVELAY (R.), CROUTZEILLES (M.) et CHEVIGNY (R.). – *Phénomènes de brûlure et qualité des soudures des alliages légers*. Mém. Sci. Rev. Métallurgie, *LVI*, no 5, p. 409-17, 16 fig., bibl. 3 réf. (1959).
- [15] S. Vyazovkin, D. Dollimore, J. Chem. Inf. Comput. Sci., 36 p42-55(1996)
- [16] Jean-Paul Bailon, Jean-Marie Dorlot, des matériaux, école polytechnique de Montréal, 2000 p 475
- [17] VRUGGINK (J.E.). – Quenching rate effects on mechanical properties of heat-treatable aluminium alloys (Influence de la vitesse de trempe sur les propriétés des alliages d'aluminium à traitement thermique). TMS Paper Selection, The Metallurgical Society of AIME, 10 fig., bibl. 2 réf., Conférence présentée at the Fall Meeting of TMS, Detroit Michigan, 13-17 oct. 1968.

- [18] BRYANT (A.J.). – The effect of composition upon the quench sensitivity of some Al-Zn Mg alloys (Les effets de la composition sur la sensibilité à la trempe de quelques alliages Al-Zn-Mg). *J. Inst. Metals*, 94, p. 94-8, 1 tabl., 10 fig., bibl. 16 réf. (1966).
- [19] HUNSICKER (H.Y.). The metallurgy of heat treatment (La métallurgie des traitements thermiques) dans : *Aluminium* par Van HORN (K.R.), Chapman and Hall, vol. 1, p. 109-61, 36 fig., bibl. 29 réf. (1967).
- [20] K. Boulemzaoud. Mémoire de Magister, Université de Constantine, Algérie, (2012).
- [21] MOULIN (J.), ADENIS (D.) et DEVELAY (R.). – Influence de l'attente entre trempe et revenu sur la précipitation dans quelques alliages d'aluminium. *Mém. Sci. Rev. Métallurgie*, LXVI, no 12, p. 881-93, 3 tabl., 13 fig., bibl. 19 réf. (1969). *Tabl. 63 fig., bibl. 26 réf., Techn. Sci. Aéronaut. Spatiales* 2 (1962) ; 2, 3 et 4 (1963)
- [22] Michel Colombie, matériau métallique, 2^{ème} édition, Paris 2008, pp.352-355.
- [23] Develay, Roger. "Aluminium et Alliages d'aluminium Corroyés : Propriétés Métalliques Aluminium et Alliages d'aluminium Corroyés : Propriétés Métalliques." *Techniques de l'Ingenieur* 330 . 1992.
- [24] Royster, Dick M. 1969. "Tensile Properties and Creep Strength of Three Aluminum Alloys Exposed up to 25000 Hours at 200° to 400°F (370° to 480° K)." National Aeronautics and Space Administration.
- [25] NICOLAS BELLO. Effets d'un vieillissement longue durée sur deux alliages d'aluminium de la série 2000 thèse de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE. Nov 2018.
- [26] Ben zemmouri Lamouri et Tayeb bey Nacer. Etude sur la caractérisation de comportement mécanique d'un alliage aluminium par les essais mécaniques, Mémoire de Master Académique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA. 2019.
- [27] LAADJAL Djamel Alliage d'aluminium-évolution de la microstructure et propriétés mécanique. Mémoire de Master Académique, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA. Juin 2018.
- [28] LAZIZI Hakim. Influence de la variation de la température de revenu sur l'évolution des caractéristiques mécaniques et structurales de l'alliage Al-4%Cu trempé dans un fluide à 70% H₂O et 30% d'huile soluble. Mémoire de Master Académique, Université Mouloud MAMMARI de TIZI-OUZOU. 09/2013

