



Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

### MASTER

En Génie Mécanique

Option : Génie des Matériaux

Présenté par :

Lakehal khaoula & Ben khelil marwa

### Thème

**EFFET DE LA TREMPE, LORS DES TRAITEMENTS THERMIQUES  
SUR LES COMPORTEMENTS MECANIQUE DE L'ALUMINIUM**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
HOUSSIN mostapha	MCB	Président
BOUDILMI aissa	MCA	Encadreur
BENHAMADOUCH E lamia	MAA	Examineur

*Année Universitaire : 2019 / 2020*

N° d'ordre : GM/...../2020

# *Remerciements*

*Je tiens d'abord à remercier dieu, le tout puissant, qui m'a aidé à réaliser ce travail.*

*Ce travail a été effectué au laboratoire de physique et chimie des matériaux et laboratoire de génie mécanique de la faculté des Sciences et Technologie de l'Université de M'SILA.*

*J'exprime mes profonds remerciements à l'encadreur de cette mémoire **BOUDILMI AISSA** pour son aide précieuse, sa confiance ses encouragements.*

*JE remercie à tous les ingénieurs. Dans les laboratoires de génie mécanique, notamment le professeur **Belkacem . A .** Qui a contribué à la réalisation de notre travail.*

*J'exprime ma profonde gratitude au Dr **M.OUSSAMA**. Qui a toujours été notre mentor, nos conseils et notre aide.*

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

*Enfin, je remercie les membres de jury pour avoir Accepté d'évaluer le présent travail*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail:*

*À mes très partants.*

*À mes chers frères.*

*À mes chers sœur.*

*À tout ma famille.*

*A tous mes amies dans la faculté de  
technologies*

Table des matières .....	i
Liste des figures .....	vii
Liste des tableaux .....	xii
Abréviations et symboles .....	xiii
Introduction générale.....	1

## *Chapitre I : Généralités sur l'aluminium Et ses alliages*

I.1 Introduction .....	2
I.2.Histoire d'aluminium .....	3
I.3.L'aluminium .....	4
I.3.1 Fabrication des alliages d'aluminium.....	4
I.3.2.Généralités sur l'aluminium.....	4
I.3.2.1.Généralités sur les alliages d'aluminium .....	4
I.3.2.2.Propriétés de l'aluminium .....	7
I.3.2.2.A. Propriétés physiques de l'aluminium .....	7
I.3.2.2.B. Les propriétés mécaniques de l'aluminium .....	8
I.3.2.2.B .a. Légèreté .....	8
I.3.2.2.B. b Résistance mécanique .....	8
I.3.2.2.B. c. Résistance à la corrosion .....	8
I.3.2.2.B. d. Recyclabilité .....	8
I.3.2.2.B. e. Ductilité, malléabilité .....	9
I.3.2.2.C Conductivité thermique et électrique .....	9
I.3.2.2.D Propriétés chimiques de l'aluminium .....	9
I.4.Avantages techniques et économiques .....	9
I.5.Les inconvénients de l'aluminium .....	10
I.6. Utilisation et applications .....	11
I.7.Familles alliages d'aluminium .....	13
I.7.1.Durcissement par écrouissage .....	15
I.7.2.Durcissement structural .....	16

I.8.Les alliages d'aluminium .....	16
I.8.1.Désignation des alliages d'aluminium .....	16
I.8.1.a. Composition des alliages de corroyage .....	17
I.8.1.b. Composition des alliages de moulage .....	17
I.9.Désignation des alliages d'aluminium.....	17
I.9.1Les alliages d'aluminium de série 6000.....	17
I.9.2.L'alliage d'aluminium 6063.....	17
I.9.2.1.Caractéristiques générale 6063 .....	18
I.10Les Traitements thermiques.....	18
I.10.1 Désignation des états métallurgiques .....	18
I.11Les Traitements thermiques de durcissement structural .....	19
I.12Traitements thermiques d'homogénéisation.....	22
I.13Les traitements d'adoucissement par restauration ou recuit.....	23

## *Chapitre II : Essai de traction simple*

II.1 Introduction .....	24
II.2 Essai mécanique des matériaux .....	24
II.3 Comportement plastique .....	25
II.4. Description du comportement plastique - plasticité.....	25
II.5. Essai de Traction .....	26
II.5.1 La traction unie axiale .....	26
II.5.2 Traction.....	26
II.5.3 Démentions des éprouvettes .....	27
II.5.4 Déterminer à partir d'une courbe d'essai de traction les Caractéristiques Mécanique suivant.....	28
II.5.4.1 Principe .....	28
II.5.5 Exploitations de l'essai .....	28
II.5.6Définitions .....	29
II.6 Classification des matériaux .....	31
II.7 Etude du comportement d'une éprouvette métallique en traction simple .....	32
II.8 Courbe rationnelle de traction .....	34
II.8.1 Contraint varie .....	34

II.9 Déformation rationnelle .....	34
II.9.1 Courbe rationnelle de traction .....	35
II.9.2 Équation de la courbe rationnelle .....	36
II. 10 Essais duresté .....	36
II.10.1 Essai de duresté Brinell (HB) .....	37
II.10.2 Duresté Brinell .....	37
II.10.2.1 Principe .....	38
II.10.2.2 Essai de Duresté Vickers (HV).....	38
II.10.2.2.1 Principe .....	39
II.10.2.3 Essai de duresté Rockwell (HR) .....	40
II.10.2.3.1 Principe .....	40

## *Chapitre III : Procédure expérimental*

III.1 Introduction.....	42
III.2 Analyse chimique sur le matériau étudié .....	42
III.3 Préparation des échantillons.....	42
III. 3.1 échantillons de l'essai de duresté (brinell) .....	43
III.3.2 Eprouvette de l'essai de traction .....	44
III.4 traitement thermique .....	45
III.4.1 traitement d'homogénéisation .....	45
III.4.2 Traitement de trempé.....	46
III.5 Machine des essais de traction wp310 .....	47
III.5.1 préparation de l'éprouvette de traction .....	48
III.5.2 Essai de traction .....	51
III.6 Essais de duresté .....	53
III.6.1. Préparation d'échantillon pour l'analyse micro duresté .....	53

## *Chapitre IV: Résultats et discussion*

IV.1 Introduction.....	55
IV.2 Essai de traction .....	55
IV. 2.1 Résultats des essai de traction .....	55
IV.2.2La courbe de traction .....	60
IV.2.3 Exemple sur les calculs d'éprouvette Al 6063 a l'état trempé à l'air .....	61
IV.2.4 Interprétation et discussion .....	63
IV.3 Observation métallographique de l'alliage 6063 .....	64
IV.3.1 La micro dureté des échantillons .....	64
IV.3.2 Micro dureté Vickers HV .....	65
IV.3.3Les Interprétation .....	66
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>67</b>
<b>Bibliographie</b>	

# Liste des Figures

## Chapitre I : Généralités sur l'aluminium Et ses alliages

Figure (I.1) : Procédés de fabrication de l'aluminium. ....	5
Figure (I.2) : Caractéristiques mécaniques de différentes séries alliages aluminium .....	16
Figure (I.3) : cycle de traitement thermique .....	21
Figure (I.4) (a) Evolution de la dureté en fonction de la durée de revenu. (b) Evolution des propriétés mécaniques et de la tenue à la corrosion après le revenu au pic .....	23

## Chapitre II: Essai de traction simple

Figure (II.1) : Courbe de traction conventionnelle .....	25
Figure (II.2) : Eprouvette de traction : a) cylindrique, b) prismatique .....	27
Figure (II.3) : dimension d'éprouvette de traction .....	28
Figure (II.4) : Diagramme effort-déformation .....	29
Figure (II.5) : La striction .....	31
Figure (II.6) : Idéalisations classiques du comportement plastique .....	32
Figure (II.7) : courbe de traction possible.....	32
Figure (II.8) : Essai en traction monotone d'une éprouvette ductile .....	33
Figure (II.9) : La courbe rationnelle de traction .....	36
Figure (II.10) : Définitions des différents domaines de dureté .....	37
Figure (II.11) : Principe de dureté brinell .....	38
Figure (II.12) : Principe de la dureté Vickers .....	39
Figure (II.13) : Principe de la dureté Rockwell (échelle B, bille en acier).....	40

## **Chapitre III : *Procédure expérimental***

Figure (III.1) : préparation l'éprouvette de essai de dureté .....	43
Figure (III.2) : Eprouvette finie pour la dureté .....	43
Figure (III.3) : préparation de l'éprouvette de l'essai de traction .....	44
Figure (III.4) : Eprouvette finie pour la traction .....	44
Figure (III.5) : four de traitement thermique .....	45
Figure (III.6) : éprouvettes et échantillons trempé à l'air ambiant .....	46
Figure (III.7) : éprouvettes et échantillons trempé à l'huile .....	46
Figure (III.8) : Machine hydraulique des essais universelle wp310.....	47
Figure (III.9): éprouvette avant l'essai de traction .....	50
Figure (III.10) : phénomènes observés au course de l'essai de traction .....	51
Figure (III.11) : éprouvette après l'essai de traction .....	52
Figure (III.12) : polisseuse de deux disques .....	53
Figure (III.13) : polisseuse de la finition .....	53
Figure (III.13) : Micro d'uromètre Indente ZHV .....	54

## **Chapitre IV: *Résultats et discussion***

Figure (IV.1) : Courbe de l'Essai de traction d'un éprouvette (Air) .....	56
Figure (IV.2) : Courbe de l'Essai de traction d'un éprouvette (Eau) .....	57
Figure (IV.3) : Courbe de l'Essai de traction d'un éprouvette (Huile) .....	58
Figure (IV.4) : Courbe de l'Essai de traction d'un éprouvette (Réf) .....	59
Figure (IV.5) : - Courbes de traction des différentes éprouvettes .....	59
Figure (IV.6) : résultats des essai micro deruté (air, eau, huile, referens).....	64
Figure (IV.7) : la micro dureté Vickers des différents échantillons étudiés .....	65
Figure (IV.8) : schéma illustratif de l'empreinte du pénétrateur sur l'échantillon .....	66

# Liste des Tableaux

## Chapitre I : Généralités sur l'aluminium Et ses alliages

Tableau (I.1) : Séries d'alliages d'aluminium de corroyage.....	6
Tableau (I.2) : Désignation des états métallurgiques .....	7
Tableau (I.3) : Désignation des différents traitements thermomécaniques correspondant l'état T .....	7
Tableau (I.4) : Propriétés physiques et mécaniques de l'aluminium. ....	9
Tableau (I.5) : la masse volumique de différent étal.....	11
Tableau (I.6) : Désignation des séries principales des alliages d'aluminium .....	15
Tableau (I.7) : Familiers d'alliages d'aluminium.....	17
Tableau (I.8) : famille d'alliages d'aluminium corroyés .....	18
Tableau (I.9) : Différents traitements thermiques et leurs symboles .....	20
Tableau (I.10) : Durée minimale de mise en solution en fonction de .....	21

## Chapitre III : Procédure expérimental

Tableau (III.1) : la composition chimique d'alliage 6063.....	42
---	----

## Chapitre IV : Résultats et discussion

Tableau IV.1 les valeurs de déplacement des points(Air).....	56
Tableau IV.2 les valeurs de déplacement Des points(Eau) .....	57
Tableau IV.3 les valeurs de déplacement des points(Huile) .....	57
Tableau IV.4 les valeurs de déplacement des points(Réf).....	58
Tableau IV.5 Tableau récapitulatif des résultats des essais de traction.....	63
Tableau IV.6 valeurs de la micro dureté Vickers des différents échantillons étudiés .....	65

## *Liste des symboles*

**L<sub>0</sub>**: Longueur initiale entre repères

**L<sub>c</sub>** :Longueur calibrée

**L<sub>μ</sub>**: Longueur ultime après rupture

**S<sub>0</sub>**: Section initiale

**S<sub>u</sub>**: Section minimale après rupture

**A** : Allongement après la rupture

**Z** : Coefficient de striction

**σ<sub>c</sub>**: La contrainte conventionnelle

**ε\***: La déformation conventionnelle

**E = R<sub>e</sub>/ε<sub>e</sub>** : module de Young

**R<sub>m</sub>**: la résistance à la traction

**σ** : contrainte

**σ<sub>e</sub>**: Résistance élastique

**σ<sub>m</sub>**: Contrainte maximal

**σ<sub>r</sub>**: Contrainte à la rupture

**HV** : Dureté Vickers

**HR** : Dureté Rockwell

**HB** : Dureté Brinell

# Introduction générale

Les principaux alliages d'aluminium sont fabriqués depuis 1886 à partir des bauxites et de la Cryolithe, Les alliages à base d'aluminium ont été l'objet de plusieurs travaux de recherches Scientifiques, ces alliages sont les plus utilisés justes après les fontes et les aciers. Leurs Excellentes propriétés mécaniques et électriques ont permis leur utilisation dans divers secteurs d'activités telle que l'industrie aéronautique, automobile ou le transport électrique [1].

Les propriétés mécaniques et électriques de ces alliages résultent par Le traitement thermiqueAprès la déformation jouent un rôle très important dans l'amélioration de ses propriétés.La température de revenu peut favoriser la précipitation des nouvelles phases qui appauvrissent la solution solide sursaturée et de ce fait réduit considérablement le potentiel de durcissementStructural qui confère à ces alliages d'intéressantes propriétés mécaniques. Généralement desvieillissements artificiels sont appliqués pour provoquer la formation des phases durcissant.L'objectif de notre travail de recherche l'effet de trempe, lors des traitements thermiques sur le comportement mécanique d'aluminium de type (AL 6063). Es alliages sont utilisés par laboratoire de l'Université de M'sila. Ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

- **Le premier chapitre** présent une étude bibliographique sur les Aluminium et ces alliages on focalise sur la fabrication d'aluminium et la description des différents familles d'aluminiums; et les série 6060 et 6063; ainsi que les domaines d'applications et les traitements thermiques d'aluminium.
- **Le deuxième chapitre** ; est consacré sur les essais mécaniques des matériaux ; qui nous présentons les techniques de déterminations des champs de déformations et de contraintes dans les aluminiums subissant un essai de traction (dans un objectif de déterminations des déformations) et l'essai de la dureté.
- Dans **le troisième chapitre** « procédures expérimentales », nous présenterons le matériau sur lequel notre étude a été réalisée ainsi que la description des modes opératoires de toutes les techniques expérimentales utilisées.
- Dans **le quatrième chapitre** :Les résultats et discussion, nous regroupons les résultats obtenus par les courbes de traction et le diagramme de dureté ainsi que les interprétations.

Enfin, une conclusion générale pour résumer la totalité de nos travaux.

## **Chapitre I : Généralités sur l'aluminium et ses alliages**

### **1 . Introduction**

L'aluminium, un matériau idéal en construction Découvert en 1808 par Sir Humphrey Davy, l'aluminium est un métal qui connaît aujourd'hui de nombreuses applications dans le secteur de la construction. On le retrouve ainsi sous forme de bardage dans les grandes constructions (immeubles d'habitation ou de bureaux, bâtiments d'aéroports, de gares ferroviaires, de complexes sportifs) où il souligne de sa brillance des lignes racées imaginées par de grands architectes. Dans ces mêmes constructions, on l'utilise aussi pour créer des charpentes et des éléments porteurs de grande ampleur conjuguant esthétique et légèreté. Plus récemment, l'aluminium s'invite aussi chez le particulier. Dans ce cadre, le plus souvent l'emploi de l'aluminium se limite à quelques touches de ci-de là : portails et portillons, volets, fenêtres et portes, vérandas, mais aussi escaliers, rambardes et garde-corps. En construction, l'aluminium est principalement utilisé sous deux formes: Les profilés (murs rideaux, cadres de fenêtre, vérandas...) Les produits laminés (volets roulants, portes, bardages, toitures, plafonds suspendus, panneaux muraux, panneaux isolants, cloisons, équipements de chauffage, de ventilation, dispositifs de protection solaire, réflecteurs de lumière) Le saviez-vous ? L'aluminium est naturellement un métal mou. Pour le rendre plus résistant et utilisable en construction, il est dans la très grande majorité des cas associé à d'autres métaux comme le cuivre, le manganèse, le magnésium, le zinc, etc. En fonction du choix de l'alliage et du procédé de fabrication, l'aluminium va décliner de grandes variétés de propriétés physiques et mécaniques rendant son utilisation tout terrain.

## I.2.Histoire d'aluminium

En 1807, Humphry Davy, après avoir découvert que le sodium et le potassium entraient dans la composition de l'alun, suppose qu'il s'y trouve aussi un autre métal, qu'il baptise « aluminium » (en latin, « *alun* » se dit allument) [2]. Pierre Berthier découvre dans une mine près des Baux-de-Provence en 1821 un minerai contenant plus de 50 % d'oxyde d'aluminium. Ce minerai sera appelé bauxite. On attribue généralement la découverte et l'isolement de l'aluminium à Friedrich Wöhler en 1827. Toutefois, deux ans plus tôt, le chimiste et physicien danois Hans Christian Ørsted avait réussi à produire une forme impure du métal. Wöhler fut le premier à mettre en évidence les propriétés chimiques et physiques de l'aluminium, dont la plus notable est la légèreté.

Le chimiste français Henri Sainte-Claire Deville améliore en 1846 la méthode de Wöhler en réduisant le minerai par le sodium. Il publie ses recherches dans un livre en 1856. Cette méthode est utilisée à travers toute l'Europe pour la fabrication de l'aluminium, mais elle reste extrêmement coûteuse. Le métal est d'ailleurs utilisé pour fabriquer des bijoux, dont la valeur sera évidemment réduite à néant quelques décennies plus tard [3]. 1855 : Les nouveaux métaux sont exposés à l'exposition universelle de Paris. La société Pechiney est créée en France.

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

### I.3 L'aluminium

#### I.3.1 Fabrication des alliages d'aluminium

La fabrication de l'aluminium se décompose en deux étapes :

- extraction de l'alumine de la bauxite ;
- fabrication de l'aluminium par électrolyse de l'alumine.

Les gisements du minerai de départ, la bauxite, ont très nombreux et importants sur tout le globe terrestre. Les plus vieux, aujourd'hui épuisés, étaient dans le sud de la France, en particulier près du village des Baux en Provence, qui a donné son nom au minerai.

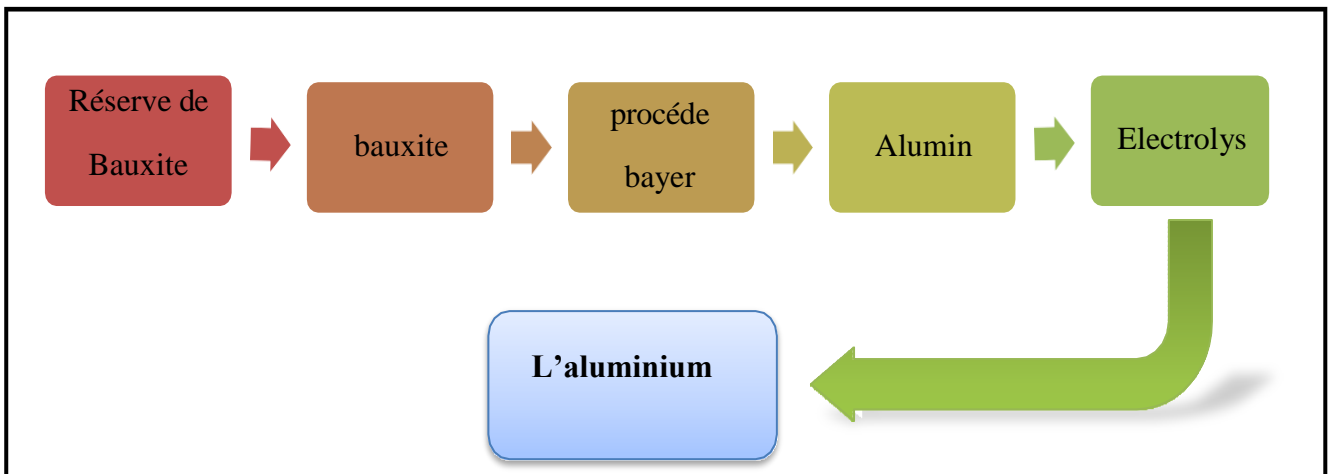


Figure I.1 : Procédés de fabrication de l'aluminium

#### I.3.2 Généralités sur l'aluminium

##### I.3.2.1. Généralités sur les alliages d'aluminium

De nos jours, les alliages d'aluminium sont utilisés dans la construction, les transports, l'emballage et les biens de consommation, occupant la deuxième position des matériaux métalliques les plus utilisés après les alliages ferreux. Les principales caractéristiques physicochimiques des alliages d'aluminium justifiant leur emploi sont leur densité, leur conductivité thermique et électrique, leurs propriétés mécaniques et leur bonne tenue à la corrosion atmosphérique de manière générale. La tenue à la corrosion des alliages d'aluminium est due à la présence d'une couche d'oxyde native à leur surface d'épaisseur voisine de 5 à 10 nm. Toutefois, dans certains milieux, les alliages d'aluminium peuvent être sensibles à différentes formes de corrosion localisée telles que la corrosion inter granulaire, la corrosion par piqûre ou bien encore la corrosion sous contrainte. Ces modes de corrosion dépendent

non seulement des milieux d'exposition mais également de la nature de l'alliage d'aluminium et de son état métallurgique.

Une description détaillée des différentes formes de corrosion et des mécanismes associés sera donnée dans ce chapitre.

Il existe plusieurs familles d'alliages d'aluminium de propriétés différentes. Selon les normes de l'Aluminium Association et la norme européenne, les alliages d'aluminium sont groupés en fonction de leurs éléments chimiques principaux d'addition. Les alliages d'aluminium dits de corroyage sont divisés en deux groupes distincts (Tableau I-1) :

les alliages à durcissement par écrouissage (3xxx, 5xxx, 8xxx), les alliages à durcissement structural (2xxx, 4xxx, 6xxx, 7xxx) [4].

	<b>Durcissement par écrouissage</b>				<b>Durcissement structural</b>			
<b>Séries</b>	<b>1000</b>	<b>3000</b>	<b>5000</b>	<b>8000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>6000</b>	<b>7000</b>
<b>Eléments d'alliage principaux</b>	Al	Mn	Mg	Si + Fe	Cu	Si	Mg + Si	Zn + Mg
<b>Etendue de la teneur (% mass.) des éléments d'alliage principaux</b>	Al ~99%	0,5-1,5	0,5-5	Si : 0,3-1 Fe : 0,6-2	2-6	0,8-1,7	Mg : 0,5-1,5 Si : 0,5-1,5	Zn : 5-7 Mg : 1-2
<b>Eléments d'addition complémentaires</b>	Cu	Mg, Cu	Mn, Cu	Autres (Cu, Mn, Si, Mg, Zn)	Si, Mg		Cu, Cr	Cu
<b>Résistance mécanique moyenne (MPa)</b>	50-160	100-240	100-340	130-190	300-480	150-400	200-320	310-600

Tableau I.1: Séries d'alliages d'aluminium de corroyage

Cinq états métallurgiques fondamentaux sont définis et symbolisés par des lettres données dans le Tableau I.2.

Etat F - les produits sont fabriqués par déformation plastique, sans que soient maîtrisés les taux d'adoucissement ou de durcissement par déformation ou traitement thermique. Etat O – les produits sont dans l'état le plus ductile, obtenu par traitement de recuit. Etat H – les produits sont durcis par déformation, avec ou sans maintien ultérieur à une température suffisante pour provoquer un adoucissement partiel. Etat W – les produits sont soumis à une mise en solution et une trempe; ils

continuent d'évoluer à la température ambiante. Cet état est un état métallurgique instable.

<b>Désignation</b>	<b>Etat métallurgique</b>
<b>F</b>	Etat brut
<b>O</b>	Etat recuit
<b>H</b>	Etat écroui
<b>W</b>	Etat trempé non stable
<b>T</b>	Etat durci par traitement thermique

Tableau I.2 Désignation des états métallurgiques

Etat T - les produits sont soumis à un traitement thermique partiel ou complet, avec application éventuelle de déformation plastique. Dans le Tableau I-3 sont présentés les symboles des différents traitements pour l'état durci par traitement thermique (T) qui est l'état naturel des alliages à durcissement structural et le plus utilisé dans l'industrie.[4]

<b>Symbole</b>	<b>Traitement thermique</b>
<b>T1</b>	Refroidissement contrôlé après démoulage et maturation naturelle
<b>T3</b>	Mise en solution, trempe, écrouissage contrôlé et maturation naturelle
<b>T4</b>	Mise en solution, trempe et maturation naturelle
<b>T5</b>	Refroidissement contrôlé après démoulage et revenu ou sur-revenu
<b>T6</b>	Mise en solution, trempe et revenu au pic
<b>T7</b>	Mise en solution, trempe et sur-revenu (stabilisation)
<b>T8</b>	Mise en solution, trempe, écroui et revenu

Tableau I.3 Désignation des différents traitements thermomécaniques correspondant à l'état T.

L'état métallurgique T351, correspondant à l'état de réception de notre tôle, est l'état de base de l'alliage EN AW 2024 étudié; il correspond à une mise en solution, une trempe, un écrouissage contrôlé à un taux compris entre 1,5 et 3 %, suivi d'une maturation naturelle. Cetraitement, thermiquement est pratiqué après laminage. Il précède, le plus souvent, les traitements T6, les plus utilisés pour cet alliage par l'industrie aéronautique. L'alliage d'aluminium EN AW 2024 est donc un alliage d'aluminium de la série 2xxx à durcissement structural. Les éléments d'alliage principaux sont

le cuivre et le magnésium. En général, les alliages de la série 2xxx sont caractérisés par une bonne tenue à chaud, une bonne usinabilité et des bonnes propriétés mécaniques à l'état revenu T6. Par contre, leur résistance à la corrosion est faible, principalement à cause du cuivre, élément noble par rapport à l'aluminium. Toutes ces propriétés dépendent très fortement des états métallurgiques qui sont le résultat des traitements thermomécaniques explicités dans le paragraphe suivant [4].

### I.3.2.2. Propriétés de l'aluminium

#### I.3.2.2.A. Propriétés physiques de l'aluminium

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

<i>Propriety</i>	<i>Valeur</i>
Numerous atomique	13
Masse atomique	26,9815 g/mol
Paramètre de maille (à 298.15°K)	4.05 Å
Point de fusion	660.45°C
Point ebullition	2467°C
Energy de fusion	10,79 kJ·mol <sup>-1</sup>
Capacité thermique massique C <sub>P</sub> (à 298.15°K)	897 J kg <sup>-1</sup> k <sup>-1</sup>
Conductivity thermique $\lambda$ (à 298.15K)	237 W m <sup>-1</sup> k <sup>-1</sup>
Resistivity électrique $\rho$ (à 298.15 K)	26.54810 <sup>-9</sup> $\Omega$ m
Retrait volumique : en cours de solidification	5.6%
Conductivity thermique à 20 °C:	$\lambda = 217.6 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Resistivity électrique à 20 °C:	$\rho = 2.63 \mu\Omega\text{cm}$
Module d'élasticité (MPa)	68 000
Charge de rupture (MPa)	80 à 100
Limiter d'élasticité 0.2% (MPa)	30 à 40
A <sub>R</sub> (%)	25 à 30

I.4 Propriétés physiques et mécaniques de l'aluminium.

C'est un élément du troisième groupe de la classification de Mendeleïev avec un numéro atomique de 13, une masse atomique de 26.28 et une température de fusion d'environ 660°C qui dépend de la

teneur des impuretés. Il se cristallise dans le système cubique à faces centrées, avec un paramètre de maille 4,04 Å. Son coefficient de dilatation thermique linéaire est de l'ordre de  $23.10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . La liste des propriétés physiques et chimiques de l'aluminium est donnée sur (Tableau I.4).

### **I.3.2.2.B Les propriétés mécaniques de l'aluminium**

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

#### **I.3.2.2.B .a. Légèreté**

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

#### **I.3.2.2.B .b. Résistance mécanique**

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

#### **I.3.2.2.B .c. Résistance à la corrosion**

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

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

#### **I.3.2.2.B .d. Recyclabilité**

L'aluminium est recyclable à 100% sans dégradation de ses propriétés.

Son recyclage ne nécessite que peu d'énergie : 5% seulement de l'énergie utilisée pour la production de métal primaire.

### I.3.2.2.B .e. Ductilité malléabilité

L'aluminium peut être facilement travaillé à basse température et déformé sans se rompre, ce qui permet de lui donner des formes très variées.

### I.3.2.2.C Conductivité thermique et électrique

L'aluminium est un excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité. La conductivité thermique de l'aluminium est utilisée dans de nombreuses applications d'évacuation de la chaleur, c'est-à-dire de refroidissement (comme les systèmes d'air conditionné dans les véhicules). A poids égal, l'aluminium offre une conductivité électrique deux fois supérieure à celle du cuivre, ce qui explique son emploi privilégié dans les applications de transport d'électricité à haute tension sur grande distance.

### I.3.2.2.D Propriétés chimiques de l'aluminium

À la température ambiante, l'aluminium forme très vite une couche d'oxyde  $Al_2O_3$  épaisse adhérente et protectrice. Bien que ce film d'alumine résiste bien dans les solutions d'acide chlorhydrique, sulfurique et nitrique mais elle a une résistance chimique limitée et qui peut être améliorée par anodisation. Ce traitement permet d'obtenir une couche épaisse de l'alumine ( $Al_2O_3$ ) mais poreuse [5]. L'aluminium a une bonne aptitude aux traitements de surface qui présente un rôle important pour la protection de certains alliages d'aluminium, quand leur résistance à la corrosion « naturelle » est jugée insuffisante, et la modification des propriétés de surface comme la dureté superficielle [6].

## I.4. Avantages techniques et économiques

Les emplois de l'aluminium et de ses alliages se sont développés dans des proportions surprenantes pour des raisons techniques et économiques. Les raisons techniques sont nombreuses : - L'aluminium est un métal dont la densité est faible, ce qui vaut à ses alliages la dénomination d'alliages légers. L'aluminium est le métal le plus léger après le lithium et le magnésium :

Métal pur	Masse volumique(kg/dm <sup>3</sup> )
Lithium	0.53
Magnésium	1.74

Aluminium	2.70
Titane	4.51
Fer	7.86
Cuivre	8.96
Plomb	11.40

Tableau I.5 la masse volumique de différent métal [7].

L'aluminium est donc 3,3 fois plus " léger " que le cuivre et 2,9 fois plus léger que le fer ; il " pèse " grossièrement 3 fois moins que les métaux industriels usuels. C'est cette caractéristique qui a valu aux alliages d'aluminium leur développement dans les moyens de transport et en particulier dans l'aéronautique.

L'aluminium peut être utilisé dans une large plage de températures. Contrairement à d'autres métaux, tel que l'acier, l'aluminium ne se fragilise pas aux basses températures et ses caractéristiques mécaniques augmentent même aux températures des gaz liquéfiés, d'où son utilisation en cryogénie. Sa température de fusion est basse : 658°C, nettement inférieure à celle du cuivre (1083°C) et à celle du fer (1536°C) ; cela ne lui permet pas de résister aux très hautes températures. Il existe cependant des alliages qui résistent bien à des températures de l'ordre de 200°C souvent atteintes en aéronautique et en astronautique.

### I.5 Les inconvénients de l'aluminium

Les inconvénients de l'aluminium sont peu nombreux mais ils méritent d'être toutefois pris en compte à l'heure du choix des matériaux en rénovation ou en neuf :

- Un coût conséquent : Comparé au PVC ou au bois, l'aluminium est notablement plus cher à l'achat. Le différentiel varie le plus souvent de 1 à 3 en fonction des finitions choisies, et pour certaines fenêtres sur mesure de 1 à 10. Pour les volets battants, les mêmes différences de prix sont à noter. Pour les rambardes et garde-corps, les escaliers, etc. l'aluminium se place également dans les prix les plus élevés.
- Une certaine fragilité au coup : Le matériau étant malléable, à faible épaisseur, notamment en feuille, il a tendance à mal supporter les coups et à s'enfoncer. Pour limiter les possibles bosses, le produit choisi doit être de plus grande épaisseur, ou composé d'un alliage plus résistant.

- Une forte conductivité à la chaleur : L'aluminium est un bon conducteur de chaleur. Quand il est utilisé pour la fabrication de fenêtres ou de portes, le matériau doit être associé à des systèmes de ruptures de pont thermique.

## I.6. Utilisation et applications

Grâce à ses propriétés incomparables, l'aluminium se retrouve aujourd'hui, sous forme d'alliages, dans de très nombreuses applications industrielles. À la vue de tous, ou de manière transparente, l'aluminium est omniprésent et contribue à notre mode de vie moderne[8]

### ➤ Les nombreuses applications de l'aluminium dans le secteur du bâtiment

Métal aux propriétés étonnantes, l'aluminium permet à nombre d'industries d'innover constamment. C'est tout particulièrement vrai dans le secteur du BTP, où l'aluminium permet aujourd'hui de concevoir **des projets** d'aménagement particulièrement bien adaptés aux besoins modernes.[8]

### ➤ Une présence sous de multiples formes

Dans le secteur du bâtiment, l'aluminium se retrouve dans différents produits et équipements, sous diverses formes :



■ **Sous forme pleine** : des alliages d'aluminium robustes peuvent être utilisés pour assembler toutes sortes d'accessoires utilisés dans le BTP. On peut les retrouver dans des garde-corps, des structures de balcons, de rambardes, des échelles ou encore des étagères

■ **Sous forme de produits laminés** : le laminage de l'aluminium permet d'obtenir des tôles ou des bandes d'aluminium à la fois légères, résistantes et de toutes dimensions. On retrouve ces produits laminés dans des stores, des plafonds suspendus, des toitures, portails ou cloisons amovibles par exemple.

■ **Sous forme de profilés** : particulièrement malléable, léger et résistant, l'aluminium est utilisé sous forme de profilés dans de nombreuses applications, notamment pour les menuiseries, les vérandas, les façades vitrées, les verrières, ou encore les pergolas.

L'aluminium est ainsi très présent dans tous types de bâtiments, et pour de nombreuses applications, même s'il est surtout privilégié pour la réalisation de structures légères et aériennes[8].



### **L'aluminium : le compagnon indispensable des solutions vitrées sur-mesure**

Résistant tout en restant extrêmement léger, l'aluminium permet de réaliser des structures vitrées de toutes dimensions, pour des immeubles, usines, ateliers et maisons individuelles. Dans les faits, il n'y a pas de limite aux dimensions d'une surface vitrée soutenue par une structure en aluminium. Ce matériau entre alors dans la conception de larges baies vitrées, de vérandas de grandes dimensions, ou encore de façades vitrées sur toute leur hauteur.

Particulièrement résistant malgré sa finesse, l'aluminium permet de minimiser la taille des structures pour optimiser la superficie des surfaces vitrées. Les structures porteuses sont aussi discrètes que possible afin d'optimiser la circulation de la lumière naturelle, tout en permettant une meilleure isolation thermique. Cette finesse sur de grandes structures fait de l'aluminium le matériau de référence pour la conception de structures bioclimatiques qui permettent de réaliser de substantielles économies d'énergie.[8]

### **L'aluminium, une révolution pour les transports**


Bien plus léger que l'acier, tout en présentant une excellente résistance à la corrosion et aux déformations, l'aluminium a pris une place prépondérante dans l'industrie des transports dès le début de son industrialisation. Plus de légèreté pour les véhicules aériens et spatiaux

Pour les avions civils et militaires, comme pour les lanceurs et vaisseaux spatiaux, une structure trop lourde pénalise la charge utile et l'emport en carburant. La chasse aux kilos en trop a toujours été au cœur des priorités du secteur depuis le tout début de l'aviation. Capable d'une haute résistance mécanique dans un poids très contraint, l'aluminium permet de concevoir des engins volants ou orbitaux plus légers restant très solides et remarquablement durables dans le temps. Même s'il est aujourd'hui concurrencé par les composites en fibre de carbone, l'aluminium est toujours aujourd'hui le matériau de référence pour l'industrie aéronautique et aérospatiale. [8]

### **➤ Une importance grandissante dans l'industrie automobile**

Plus près de notre usage quotidien, l'aluminium permet également d'améliorer, pas à pas, l'industrie automobile. La part de l'aluminium dans les véhicules roulants ne fait qu'augmenter au fil des années, dotant ces derniers de nombreux atouts.



Un poids plus léger pour réduire la consommation en carburant	Une meilleure tenue de route et moins d'accidents	Des véhicules plus faciles à recycler
<p><b>Navires et trains : vers la grande vitesse</b></p> <p>Dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, l'aluminium a été utilisé dans l'industrie navale et ferroviaire pour réduire le poids des véhicules, abaisser leur centre de gravité et ainsi améliorer leurs performances à résistance égale.</p> <p>La réduction du poids couplée à une amélioration des motorisations, a permis le développement de trains et de navires à grande vitesse capables d'emporter un nombre important de passagers. L'utilisation de l'aluminium est ainsi indissociable des performances des TGV ou des ferries rapides.</p>		

### I.7 Famille des alliages d'aluminium

L'utilisation des alliages d'aluminium dans l'industrie automobile et aéronautique dépend largement de leurs caractéristiques mécaniques et thermiques. L'aluminium pur à 99,5 % et plus, a de faibles propriétés mécaniques. C'est la raison pour laquelle, dès la fin du XIX siècle, les métallurgistes ont cherché à améliorer plusieurs de ses propriétés en y ajoutant d'autres métaux. La métallurgie de l'aluminium ne débute réellement qu'avec la découverte du durcissement structural des alliages d'aluminium au cuivre.

Seuls neuf éléments sont capables de s'allier à l'aluminium parce qu'ils ont une solubilité dans l'aluminium à l'état solide supérieur à 0,5 %. Ce sont l'argent, le cuivre, le gallium, le germanium, le lithium, le manganèse, le magnésium, le silicium et le zinc. Pour diverses raisons de coût élevé (l'argent), de disponibilité (le gallium, le germanium) et de difficultés de mise en œuvre (le lithium), la métallurgie de l'aluminium est fondée, depuis son début, sur uniquement cinq éléments

d'alliage le cuivre, le manganèse, le magnésium, le silicium et le zinc.

Ces cinq éléments sont à la base des huit familles d'alliages d'aluminium. L'action d'un élément sur les propriétés de l'aluminium dépend bien évidemment de sa nature et de la quantité ajoutée. Mais, pour certains d'entre eux, leur influence sur les propriétés de l'alliage peut aussi dépendre de la présence d'un, ou plusieurs autres éléments dits secondaires comme le fer, le nickel, le cobalt, le vanadium, le plomb, le bismuth, l'étain, le cadmium..., parce qu'ils peuvent former des composés intermétalliques entre eux, d'autre part les éléments comme le chrome, le zirconium, et le titane, sont ajoutés à certains alliages pour faciliter le contrôle de la structure métallurgique, par exemple, la taille des grains de l'état de coulée et la nature de la recristallisation et affecter ainsi les caractéristiques des alliages [9].

Les désignations des séries principales des alliages d'aluminium sont résumées dans le tableau I.6

Designation de la série	Eléments d'alliage principal	Exemples
Serie 1000 1XXX	99% d'aluminium au minimum	1050,1080,1200
Serie 2000 2XXX	Cuivre (Cu)	2007,2017,2030
Serie 3000 3XXX	Manganèse (Mn)	3003 3005,3105
Serie 4000 4XXX	Silicium (Si)	4047,4015,4925
Serie 5000 5XXX	Magnésium (Mg)	5083 ,5086 ,5754
Serie 6000 6XXX	Magnésium (Mg) et Silicium (Si)	6060 ,6061,6086,6063
Serie 7000 7XXX	Zinc (Zn)	7075 ,7049 ,7020
Serie 8000 8XXX	Lithium (Li) et autre	8011,8019

Tableau I.6 Désignation des séries principales des alliages d'aluminium [10].

Les propriétés mécaniques de l'aluminium peuvent être améliorées, selon l'application, par écrouissage, par addition d'éléments d'alliage (Si, Mg, Mn, Cu...) ou par traitements thermiques.

Les alliages d'aluminium sont faciles à laminier avec un coefficient d'écrouissage  $n$  de 0.2 à 0.3 [11].

Et faciles à emboutir, ainsi, le chaudronnage et le repoussage sont des opérations aisées [12].

La figure I.7 montre l'ordre de grandeur de la résistance mécanique des différentes séries d'alliages d'aluminium.

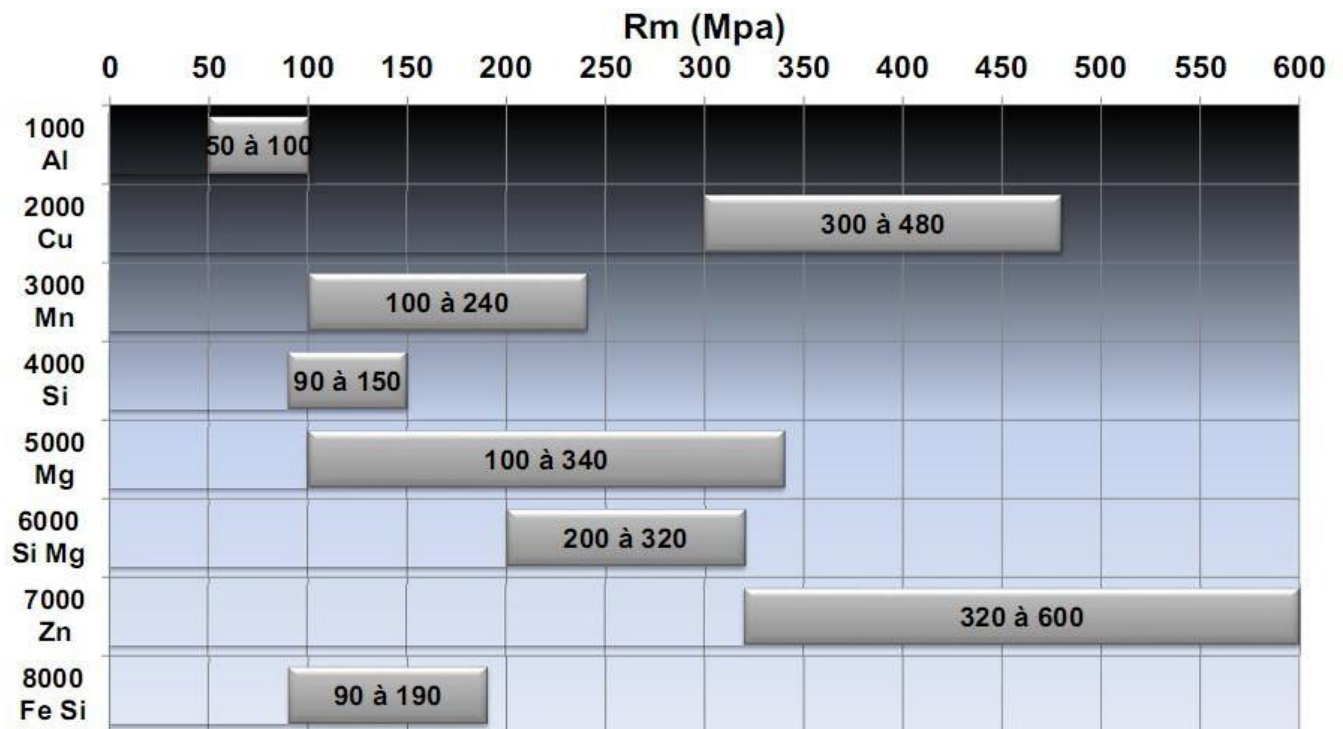


Figure I.7: Caractéristiques mécaniques de différentes séries alliages aluminium [13].

Les huit familles d'alliages d'aluminium se divisent en deux groupes bien distincts en relation avec leur mode de durcissement [13].

### I.7.1 Durcissement par écrouissage

Le premier groupe est constitué des alliages à durcissement par écrouissage. Ce sont les familles 1000, 3000, 5000 et 8000. Les propriétés mécaniques de ces alliages sont obtenues par le durcissement plastique qui correspond à une modification structurale du métal. En effet, le mécanisme de déformation plastique va créer de nombreux défauts cristallins, sources d'une énergie interne stockée hors d'équilibre, et qui peuvent augmenter les caractéristiques mécaniques au cours de sa mise en forme causé par blocage des dislocations [12].

L'influence considérable des éléments d'alliage sur l'écrouissage est liée à l'état métallurgique du matériau : éléments en solution solide (de substitution ou d'insertion) ou éléments sous forme d'une dispersion de deuxième phase [14].

### I.7.2 Durcissement structural

Le second groupe est constitué des alliages à durcissement structural. Ce sont les familles 2000, 4000, 6000 et 7000. Les propriétés mécaniques de ces alliages sont obtenues par le traitement

thermique, généralement effectué à la fin de la gamme de transformation, en trois étapes : mise en solution, trempe et revenu (ou maturation).

Le phénomène de durcissement résulte de la précipitation provoquée et contrôlée de certaines phases à l'intérieur de la matrice d'aluminium qui augmentent les propriétés mécaniques [13].

## I.8 Les alliages d'aluminium

Dans ses principales applications, l'aluminium est utilisé sous forme d'alliages, ce qui augmente sa résistance mécanique, mais souvent au détriment d'autres propriétés telle que la ductilité. Pour le meilleur compromis entre les propriétés pour un usage donné, les métallurgistes agissent sur la composition de l'alliage, mais aussi sur les traitements thermiques ou thermomécaniques [15].

### I.8.1. Désignation des alliages d'aluminium

On distingue les deux grandes familles d'alliages d'aluminium suivantes :

- **Les alliages de corroyage** produits obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou à froid tels que filage, le laminage ;
- **Les alliages de moulage** obtenus directement par fonderie.

<i>Elément d'alliages</i>	<i>Famille des moulés</i>	<i>Famille des corroyés</i>
<b>Aucun</b>	10000	1000
<b>Cu</b>	20000	2000
<b>Mn</b>	/	3000
<b>Si</b>	40000	4000
<b>Mg</b>	50000	5000
<b>Mg+Si</b>	/	6000
<b>Zn</b>	70000	7000

Tableau I.8.1: Familiers d'alliages d'aluminium

#### I.8.1.a Composition des alliages de corroyage

La désignation, conforme à la norme Afnor NF EN 573 ainsi qu'aux spécifications internationales de l'Aluminium Association, est numérique à quatre chiffres dans la premier chiffre indique la famille (ou la série) à laquelle appartient l'aluminium ou l'alliage d'aluminium [16]

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

Tableau I.8 Famille d'alliages d'aluminium corroyés.

### I.8.1.b Composition des alliages de moulage

Obtenus par coulés dans des moules d'où sortent des produits (presque) finis. Ils subissent donc pas de déformation importante mais doivent présenter, selon les applications, certaines des autres propriétés ci-dessus, et aussi d'autres qualités bonnes telles que coulabilité, retrait faible à la solidification, aucune formation de criques... une grande part des alliages de moulage provient de métal recyclé refondu [16].

## I.9 Désignation des alliages d'aluminium

### I.9.1 Les alliages d'aluminium de série 6000

Magnésium et de silicium et parfois un peu de cuivre, de chrome ou de manganèse. Les alliages sont faits pour obtenir les plus grands niveaux de résistance par la précipitation de la phase  $Mg_2Si$ . Leurs propriétés mécaniques ne s'étendent que doucement à ceux de l'acier de construction. L'expulsion est généralement très bonne, les alliages sont soudables et ont une bonne résistance à la corrosion, ils sont bien appropriés à la plupart des processus de traitement de surface, et ils ont des propriétés de résistance au-dessus de  $100^\circ C$ . Gamme typique d'application des armatures de fenêtre à des structures fortement chargées [17].

### I.9.2. L'alliage d'aluminium 6063

Cet alliage très demandé appartient à la catégorie des alliages pouvant recevoir un traitement thermique. Avec une structure de grain plus fine que le 6061, l'alliage 6063 présente les meilleures caractéristiques esthétiques après anodisation. Il a une très bonne résistance à la corrosion, une bonne

usinabilité et une bonne soudabilité. Il est couramment utilisé pour les tubes cylindriques les conducteurs électriques à barres bus et les applications architecturales.

#### ❖ **Caractéristiques générale 6063**

Puisque le produit 6063 est de la famille d'alliage d'aluminium sérié 6000, alors il a des propriétés de celle-ci de l'alliage (aluminium-magnésium-silicium). Alliage pour extrusion directe avec des caractéristiques mécaniques légèrement .Il est utilisé dans la menuiserie métallique le bâtiment, l'ameublement e l'automobile. [18].

En générale, cet alliage est connu par une excellence malléabilité, une résistance moyenne, une bonne résistance à la corrosion.

### **I.10 Les Traitements thermiques**

L'aluminium et ses alliages (trois fois plus léger que l'acier) présentent de très bonnes propriétés de conductivité électrique et thermique, il résiste naturellement à la corrosion de l'air et de l'eau et il est 100 % recyclable. Les propriétés des alliages d'aluminium peuvent toutefois être très sensiblement améliorées par les traitements thermiques. Ceux-ci nécessitent d'être réalisés dans des équipements spécifiques requérant notamment une grande précision des températures de chauffage. [19].

#### **I.10.1 Désignation des états métallurgiques**

L'état métallurgique d'un alliage, en lien avec ses propriétés mécaniques, résultant de l'application d'un traitement thermique, est représenté par une désignation standard, décrite pour les alliages corroyés. Un traitement thermique est désigné par les lettres suivantes :

**F** : Tel que fabriqué à chaud **O** : Recuit ou recristallisé ;

**H** : Ecroui par déformation à froid **T** : Traité thermiquement.

	Traitement thermique		Symbole
<b>Traitement avec mise en solution séparée</b>	Sans Ecouissage	Mûri	T4
		Revenu	T6
		Sur revenu	T7
	Avec Ecouissage	Ecoui muri	T3
		Revenu	T8
		Revenu et Ecoui	T9
<b>Traitement sans mise en solution séparée</b>	Sans Ecouissage	Muri	T 1
		Revenu	T5
	Avec Ecouissage	Revenu et Ecoui	T10
		Ecoui Muri	T11
		Revenu	T12

Tableau I.8 Différents traitements thermiques et leurs symboles [19]

### I.11 Les Traitements thermiques de durcissement structural

Le phénomène de «durcissement structural», a été découvert en 1906 par Wilm [Figure I.4] qui mit en évidence une évolution de la dureté de certains alliages d'aluminium après maintien à la température ambiante suite à une mise en solution et une trempe fraîche. Merica et al. ont proposé dès 1919 que l'augmentation de dureté était liée à la diminution de la solubilité du cuivre à la température ambiante. Le durcissement structural est basé en effet sur la précipitation des éléments soluté due à la diminution de leur solubilité à la température ambiante. Le processus de durcissement nécessite donc trois conditions : les éléments d'alliage doivent être solubles dans l'aluminium et leur solubilité doit diminuer avec la baisse de la température. Après trempe fraîche, la solution solide sursaturée ( $\alpha$ SS) doit apparaître. Des précipités durcissant se forment pendant le traitement thermique de revenu. Seuls les alliages des séries 2xxx, 4xxx, 6xxx et 7xxx sont sujets au traitement de durcissement structural. Le traitement thermique comporte trois étapes principales : une mise en solution solide, un refroidissement rapide et un maintien soit à la température ambiante, appelé « maturation », soit à une température élevée, dit « revenu » (Figure I-4). Celles-ci sont précisées dans les paragraphes suivants.[20]

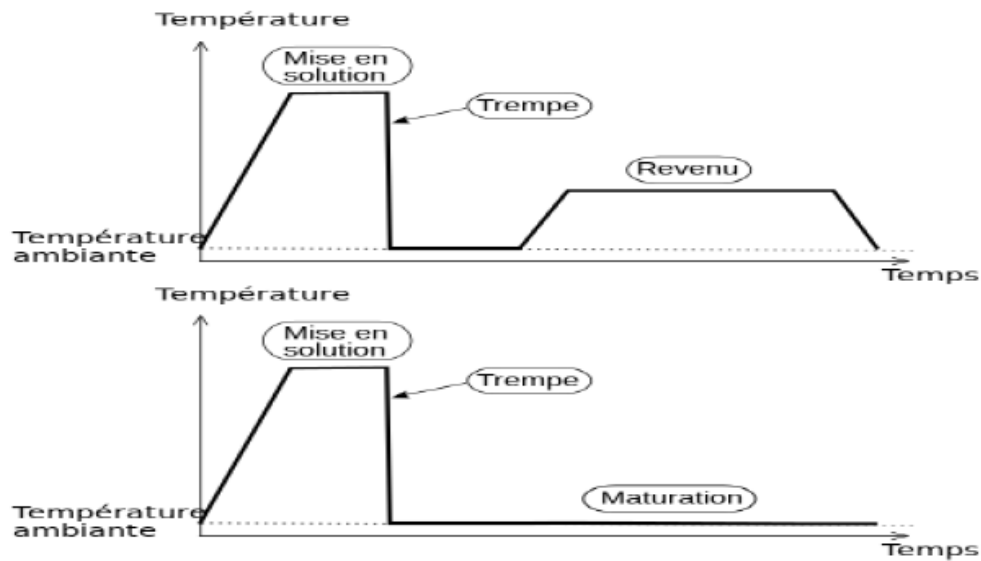


Figure I.4 : cycle de traitement thermique

Epaisseur ou diamètre (mm)	Temps minimal de la mise en solution (mn)	
	Four à l'air	Four à bain de sel fondu
≤ 0,5	20	10
0,5 – 0,8	25	15
0,8 – 1,6	30	20
1,6 – 2,3	35	25
2,3 – 3,0	40	30
3,0 – 6,25	50	35
6,25 – 12,0	60	45
12,0 – 25,0	90	60
25,0 – 37,5	120	90
37,5 – 50	150	108
50 – 62,5	180	120
62,5 – 75	210	150
75 – 90	240	165
90 – 100	270	180

Tableau I.9 Durée minimale de mise en solution en fonction de l'épaisseur de la pièce traitée et du type de four.

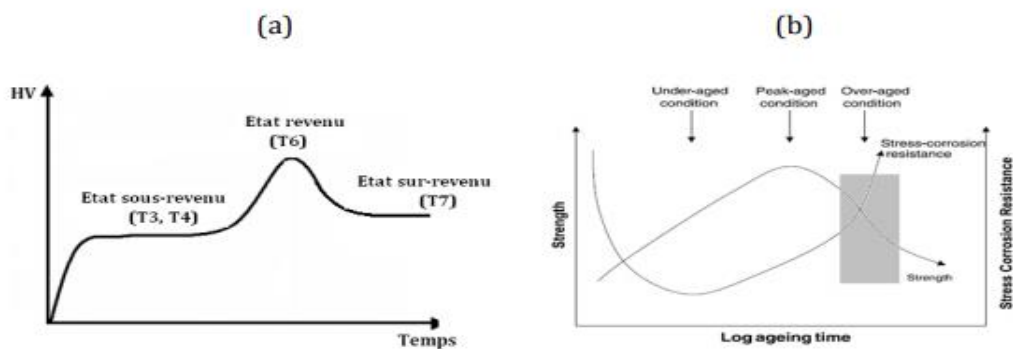
La Mise en solution consiste au chauffage à une température supérieure à la température de solus pendant une durée suffisante pour atteindre un équilibre thermique afin que tous les atomes de soluté se retrouvent en solution solide. La température de mise en solution est comprise, en général, entre 400 et 600 °C; la température optimale dépend surtout de la composition chimique de l'alliage bien évidemment. La durée de mise en solution est également très importante; elle doit être suffisante pour mettre en solution solide le plus grand nombre possible d'intermétalliques sans toutefois être trop

longue. Le Tableau I-9 présente le temps minimal de mise en solution en fonction de l'épaisseur de la tôle et du type de four utilisé, en accord avec les normes EN 515[20].

Cette durée de maintien dépend de la nature de l'alliage, des taux de corroyage et d'écrouissage, de l'épaisseur du matériau et du type de four. Une température trop basse ne permettra pas une mise en solution complète des éléments chimiques en soluté qui conduira à de faibles propriétés mécaniques finales et par contre une température très élevée conduira à la détérioration du matériau due à des phénomènes de brûlure induits par la fusion partielle des eutectiques complexes et des précipités aux joints de grains. La Trempe est l'opération de refroidissement suffisamment rapide après l'étape de mise en solution de manière à garder la solution solide sursaturée à la température ambiante. Le refroidissement doit, en effet, être effectué le plus rapidement possible pour éviter la décomposition de la solution solide dans toute la pièce. Après la trempe, à la température ambiante, une solution solide sursaturée en atomes de soluté en substitution et en lacunes est donc obtenue. La trempe influe sur les caractéristiques mécaniques et sur la sensibilité à la corrosion de l'alliage. Une vitesse de trempe inférieure à 200 °C/min sensibilise l'alliage à la corrosion inter granulaire et diminue sa résistance mécanique. Le refroidissement par trempe peut prendre plusieurs formes : la trempe par immersion dans l'eau, par aspersion ou à l'air soufflé.

La Maturation intervient après l'étape de trempe. Après l'étape de refroidissement la solution solide se trouve dans un état métastable; elle a donc tendance à retrouver son état d'équilibre. De manière progressive et spontanée, la solution solide se décompose à température ambiante. Ce phénomène est fondamental pour le durcissement structural des alliages 2xxx et 7xxx : au cours de ce processus, une augmentation des propriétés mécaniques en fonction du temps de maturation est observée. Cette maturation est qualifiée de naturelle ; elle peut aussi être effectuée dans l'eau chaude favorisant la pré-precipitation, mais plus particulièrement le colmatage de l'alumine formée par anodisation. Le Revenu peut, le plus souvent, être préféré à une maturation moins durcissant. Le retour de la solution solide sursaturée à l'état d'équilibre peut être accéléré par des maintiens à une température supérieure. Le revenu est donc l'étape de chauffage ultérieure à des températures inférieures aux températures de mise en solution; elles sont de l'ordre de 100 à 200 °C. Le résultat de cette précipitation sous l'effet du revenu est une augmentation des propriétés mécaniques telle que la dureté. Les conditions de revenu telles que la température et la durée sont spécifiques à chaque type d'alliage. L'évolution de la résistance mécanique en fonction du temps de revenu est caractérisée par une courbe en forme de cloche, avec un maximum de la résistance mécanique pour une durée  $t$  correspondant à l'état dit de revenu au pic. Les états sous revenus correspondent à une durée de traitement inférieure au temps  $t$

(Figure I-2a). Dans cet état les alliages gardent une capacité de déformation plastique et donc une bonne aptitude à la mise en forme, mais la résistance à la corrosion est faible. Les états sur-revenus correspondent à une durée de traitement supérieure au temps  $t$ . Cet état présente une résistance à la corrosion supérieure à celle de l'état sous-revenu. L'impact d'un revenu sur la tenue à la corrosion de l'alliage 2024 étant l'objet de cette étude, une recherche bibliographique approfondie sur l'influence des facteurs de premier ordre, que sont la température et le temps, a été menée (Figure I-2b) et plus précisément aux paramètres de ces traitements thermiques (temps, température).[20]



**Figure I.5** (a) Evolution de la dureté en fonction de la durée de revenu. (b) Evolution des propriétés mécaniques et de la tenue à la corrosion après le revenu au pic

## I.12 Traitements thermiques d'homogénéisation

Traitement d'homogénéisation à l'heure actuelle, les traitements d'homogénéisation sont extrêmement répandus et tendent à se généraliser à la fois dans le cas des alliages d'aluminium et dans le cas de l'aluminium non allié.

Les traitements d'homogénéisation consistent à maintenir les plaques ou billettes coulées, à une température assez élevée (entre 450 et 610 °C) et pour un temps prolongé (durant 6 à 48 h) dans le but de faciliter leur transformation ou d'améliorer les propriétés des produits obtenus. Les effets du traitement d'homogénéisation, qui peuvent être retenus sont: la dissolution de phases intermétalliques en excès, le nivellement des concentrations dans la solution solide, la coalescence de phases intermétalliques déjà présentées et la précipitation de nouvelles phases. La redistribution du cuivre est assez bonne pour les alliages Al-Cu.[20]

## I.13 Les traitements d'adoucissement par restauration ou recuit

Traitement d'adoucissement Les traitements d'adoucissement par recuit ou par restauration sont appliqués en cours ou en fin de transformation par déformation plastique. Le but d'un traitement d'adoucissement est d'améliorer ou de régénérer la plasticité d'un alliage. Le traitement de restauration

s'effectue à une température inférieure à celle du seuil de recristallisation ; il correspond à un perfectionnement du réseau d'un métal écroui, qui se réalise soit par restauration de la structure, soit par recristallisation, soit par grossissement de grain, soit par transformation de phase. Par un traitement d'adoucissement par restauration, le risque de recristallisation grossière est éliminé. Le traitement de recuit consiste à porter en température l'alliage pour une durée déterminée suivi d'un refroidissement contrôlé après avoir atteint les caractéristiques. Le couple durée-température choisi est spécifique pour chaque type d'alliage et dépend du niveau d'écrouissage du matériau. [20]

# Chapitre II

## Essai de traction simple

### II.1 Introduction

Ce chapitre est divisé par deux parties, la première partie qui concerne les explications sur les essais mécaniques des matériaux.

La deuxième partie qui concerne tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que 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. Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes des pièces allant d'un pignon microscopique jusqu'à la structure métallique d'un grand hall. Dans la recherche on l'applique pour la caractérisation de nouveaux matériaux et dans industrie pour les contrôles périodiques servant à surveiller la qualité des alliages, des polymères et des céramiques. Cet essai a comme objectif :

- De faire connaître le fonctionnement d'une machine de traction et de capteurs qui y sont appliqués.
- De mesurer des courbes de traction sur des alliages d'aluminium, de cuivre et des aciers ;
- D'interpréter les résultats obtenus : déterminer la limite élastique, l'allongement à rupture etc. ....
- D'estimer la précision de mesure.

### II.2 Essai mécanique des matériaux

Tout solide auquel est appliqué un effort mécanique se déforme. Différents essais de laboratoire (traction, compression, torsion...) permettent d'étudier les modes de déformation des matériaux d'un point de vue macroscopique et phénoménologique, et de déterminer leurs lois de comportement. Lors de tels essais, tant que le matériau est soumis à une contrainte inférieure à une valeur spécifique (appelée limite d'élasticité), il va se comporter de manière réversible : si l'on effectue une décharge (annulation de la contrainte appliquée), le matériau retrouve état initial. A l'inverse, si l'on contraint le

matériau au-delà de sa limite d'élasticité, une déformation persiste après la décharge : c'est la déformation plastique (Figure II.1). La déformation plastique est donc (essentiellement) irréversible. En général, elle est isochore : le volume de l'objet qui se déforme reste inchangé tout au long du processus de déformation plastique [21].

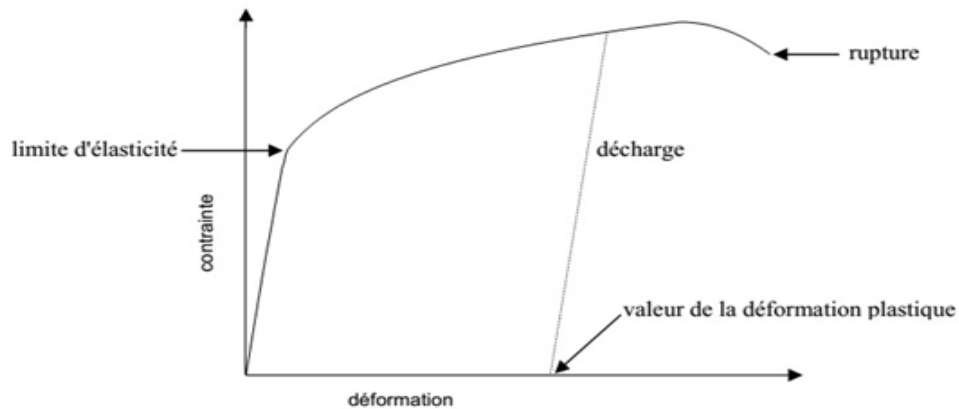


Figure II.1 : Courbe de traction conventionnelle [22]

### II.3 Comportement plastique

La plasticité est la propriété qu'ont certains corps de pouvoir subir sans rupture des déformations permanentes irréversibles. Les premières études expérimentales concernant le phénomène de plasticité ont été menées par Tressa. C'est vers 1870 que Saint-Venant et Levy publient la théorie mathématique de la plasticité. A partir de ce moment interviennent des noms très connus dans le domaine de la plasticité: Prandtl, Hencky, Prager, Hill, etc....

Très rapidement on a fait le lien entre la physique des solides et les connaissances expérimentales de la déformation plastique. On suppose généralement que la déformation plastique est continue, alors qu'il est établi depuis longtemps qu'au niveau atomique elle se fait par glissement sur des plans visiblement séparés. C'est pourquoi des développements de la théorie des dislocations ont permis de rapprocher la physique des solides et la mécanique des milieux continus. En effet le solide est en réalité un assemblage de grains cristallins. La déformation plastique peut être due (pour les métaux) aux déformations permanentes des grains, du moins à température ordinaire. Ces déformations sont dues principalement à des glissements dans une direction de rangée atomique suivant des plans parallèles du réseau cristallin (loi de Schmid).[23]

### II.4 Description du comportement plastique – plasticité

La théorie de la plasticité repose sur une idéalisation et une généralisation de faits expérimentaux

correspondant à des états de contraintes très simples: sphérique ou mono-axial. Des états de contraintes plus complexes ont été réalisés pour vérifier les lois proposées, et déterminer leur degré d'approximation, selon les matériaux étudiés et leur état physique initial.

## II.5 Essai de Traction

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que 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. Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes de pièces allant d'un pignon microscopique jusqu'à la structure métallique d'un grand hall. Dans la recherche on l'applique pour la caractérisation de nouveaux matériaux et dans l'industrie pour les contrôles périodiques servant à surveiller la qualité des alliages, des polymères et des céramiques. Cet essai a comme objectif :

- De faire connaître le fonctionnement d'une machine de traction et de capteurs qui y sont appliqués ;
- De mesurer des courbes de traction sur des alliages d'aluminium, de cuivre et des aciers ;
- D'interpréter les résultats obtenus : déterminer la limite élastique, l'allongement à rupture etc. ....
- D'estimer la précision de mesure.

### II.5.1 La traction unie axiale

L'essai de traction constitue un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique des matériaux. Étant purement uni axial du moins tant qu'il n'y a pas de striction (diminution catastrophique de la section de l'éprouvette au centre de celle-ci), il permet de s'affranchir des méthodes de calcul inverse pour aboutir directement à une loi de comportement uni axial. Il permet de déterminer de nombreuses grandeurs normalisées, comme la contrainte à la rupture, la contrainte maximale, la limite d'élasticité, etc. nécessaires dans les calculs de structure.

### II.5.2 Traction

Le plus simple et le plus courant. Il consiste à placer une éprouvette du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur le matériau jusqu'à sa rupture. On enregistre la force et l'allongement, que l'on peut convertir en contrainte déformation. [24 ; 25]

Ce type d'essai est normalisé par des réglementations nationales ou internationales :

- Géométrie des éprouvettes

- Machine d'essai et leur étalonnage
- Techniques expérimentales mises en œuvre.

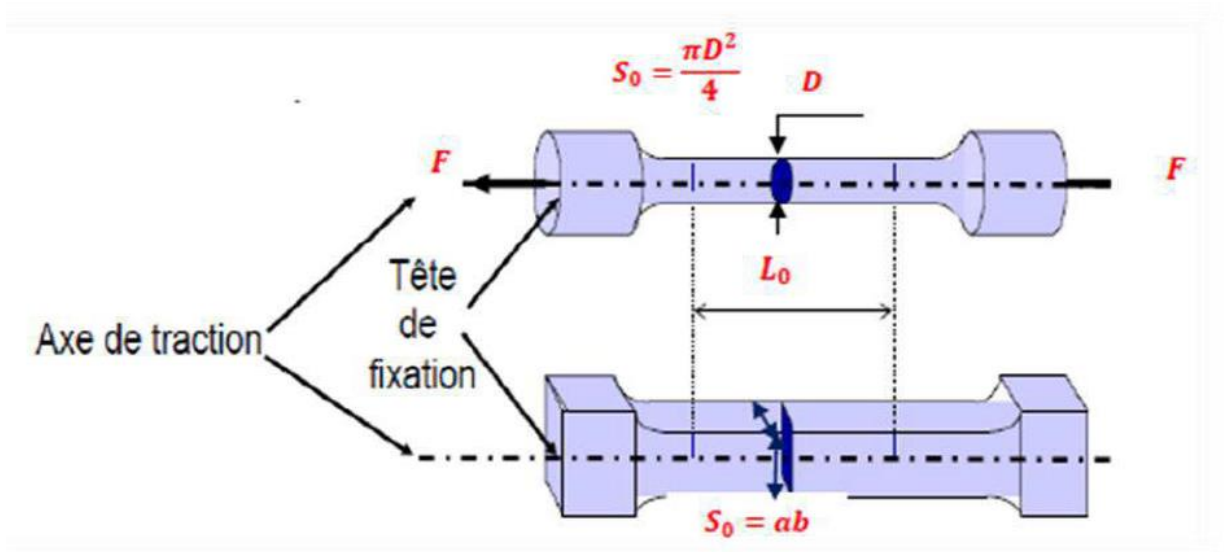


Figure : I. Epreuve de traction : a) cylindrique, b) prismatique

### II.5.3 Démentions des éprouvettes

Selon les normes internationales les éprouvettes de traction doivent satisfaire des conditions normalisées suivantes :

Les dimensions des éprouvettes sont fixées par des normes en fonction du type d'alliage (acier, fonte, aluminium...etc.), de la forme (rond, plate, fil..) et des dimensions des sections. Pour les d'aluminium de forme ( $d$  ou  $b > 0,04\text{mm}$ ), la norme est NF A 03-251. Et le dimensionnement normalisé est :  $L_0 + d/2 < L_c < L_0 + 2d$ .

Avec :  $K = 5,65$  et  $s_0$  : section initial en  $\text{mm}^2$   $L_0 = k\sqrt{s_0}$

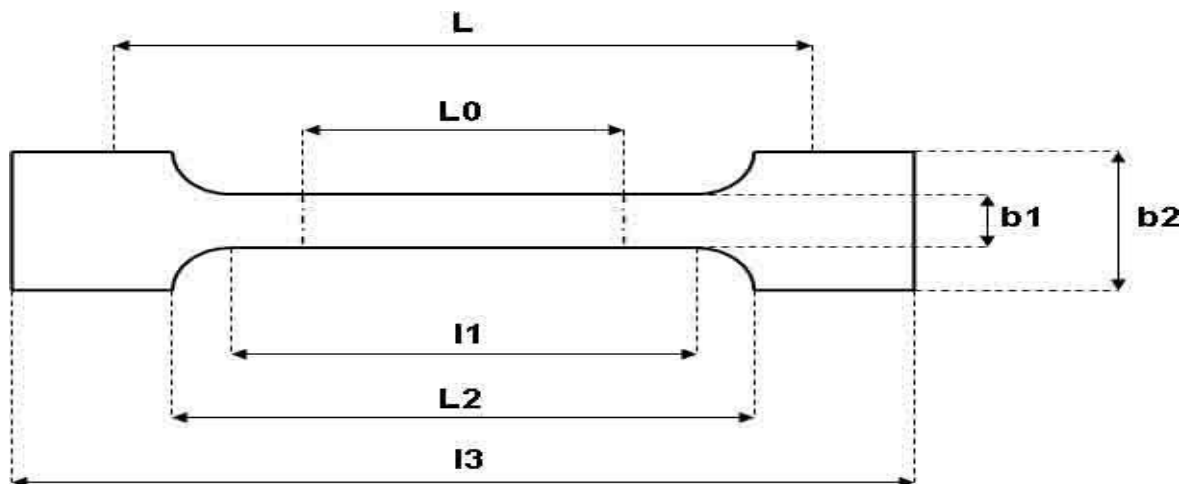


Figure II.2 dimension d'éprouvette de traction.

- $L_0$  : Longueur de référence ;  
 $L$  : Ecartement entre outillages ;  
 $l_1$  : Longueur de la partie calibrée étroite ;  
 $l_2$  : Ecartement entre les parties parallèles larges ;  
 $l_3$  : Longueur totale ;  
 $b_2$  : Largeur dans la zone d'épaulement ;  
 $b_1$  : Largeur dans la zone de la longueur de référence  
 $h$  : Épaisseur de l'éprouvette.

#### II.5.4 Déterminer à partir d'une courbe d'essai de traction les Caractéristiques Mécanique suivante

- le module d'élasticité ou module de Young  $E$  ;
  - la limite d'élasticité  $\sigma_e$  ;
  - l'allongement à la rupture  $A$  ;
  - la striction à la rupture  $Z$  ;
  - le coefficient de Poisson  $\nu$ .
- Le module de Young,  $E$ , ou module d'élasticité longitudinale, exprimé en méga pascals (MPa) ou en giga pascals (GPa) ;
  - La limite d'élasticité (lorsqu'elle existe),  $R_e$ ,  $\sigma_e$ , qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité ;
  - La résistance à la traction  $R_m$ ,  $\sigma_m$ , qui définit la limite à la rupture ;
  - Le coefficient de Poisson  $\nu$ , qui correspond à la proportion entre la déformation transversale (diminution de section) et l'allongement de la pièce dans le domaine élastique ;
  - L'allongement à la rupture  $A$ , qui mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge avant sa rupture, propriété intéressante dans certaines applications. [26]

##### II.5.4.1 Principe

Soumettre une éprouvette à un effort de traction jusqu'à la rupture dans l'intention de déterminer les caractéristiques mécaniques d'un matériau donné. [26]

##### II.5.5 Exploitations de l'essai

Sur un diagramme effort-déformation, on observe les phases successives suivantes :

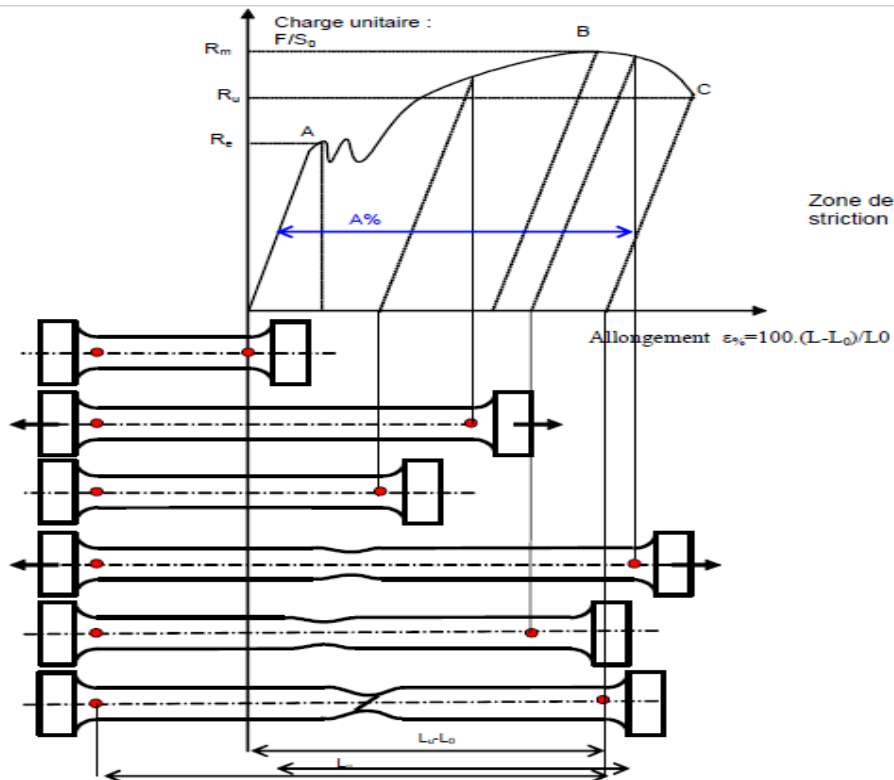


Figure II.3 Diagramme effort-déformation [27]

**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 croissent 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.

### II.5.6 Définitions

Sur le diagramme charge-allongement, qui peut être enregistré ou tracé par points, on utilise les coordonnées suivantes :

En abscisse, l'allongement relatif  $\Delta L/L_0$  de l'éprouvette ou plutôt d'une certaine base de mesure  $L_0$  ( $L_0$  est la longueur initiale de l'éprouvette)

$$\epsilon_0 = 100((L - L_0)/L_0) \quad (\text{II.1})$$

En ordonnée : la charge unitaire, définie à tout instant de l'essai, c'est le quotient de la charge par la section initiale de l'éprouvette  $S_0$

$$\sigma = \Phi / \Sigma_0 \quad (\text{II.2})$$

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

$$P_\varepsilon = \Phi_\varepsilon / \Sigma_0 \quad (\text{II.3})$$

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

$$P_\mu = \Phi_\rho / \Sigma_0 \quad (\text{II.4})$$

C'est la charge maximale atteinte durant l'essai de traction. 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. Un processus de mise en forme qui conduirait à franchir ce point se traduirait par des risques difficiles à contrôler de rupture ou de non-conformité géométrique.

Le point **C** correspondant, lui, à la charge ultime.

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 :

$$A\% = 100((L_\mu - L_0)/L_0) \quad (\text{II.5})$$

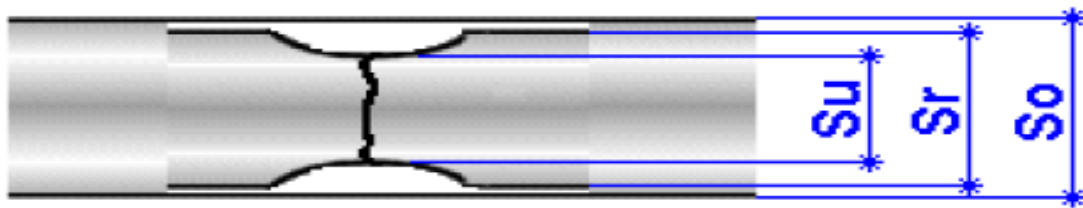
Où  $L_\mu$  est la longueur de l'éprouvette après rupture. Il caractérise la ductilité du matériau.

Cet allongement est la somme de l'allongement réparti  $A_r$  jusqu'au maximum de la charge et de l'allongement localisé de striction  $A_z$ :

$$L_0 A = A_r + A_z$$

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

$$Z\% = 100((S_0 - S_\mu)/S_0) \quad (\text{II.6})$$



So : Dimension éprouvette initiale  
 Sr : Dimension éprouvette après rupture  
 Su : Dimension de la striction après rupture

Figure II.4 La striction [27]

- **Idéalisations courantes**

Par rapport au comportement précédent, on utilise fréquemment les schématisations suivantes, représentées sur la figure II.5 :

- élastique parfaitement plastique, c'est-à-dire non écrouis sable, dans laquelle la contrainte nécessaire à l'obtention d'une déformation plastique ne croît pas avec celle-ci.
- rigide plastique (ou rigide plastique écrouis sable), dans laquelle la déformation élastique est négligée, ce qui est souvent légitime en mise en forme des métaux où les déformations élastiques restent faibles en général ( $\approx 0,5\%$ ) alors que les déformations plastiques sont importantes ( $>10\%$ ).
- rigide parfaitement plastique où l'élasticité et l'écrouissage sont négligés. [24]

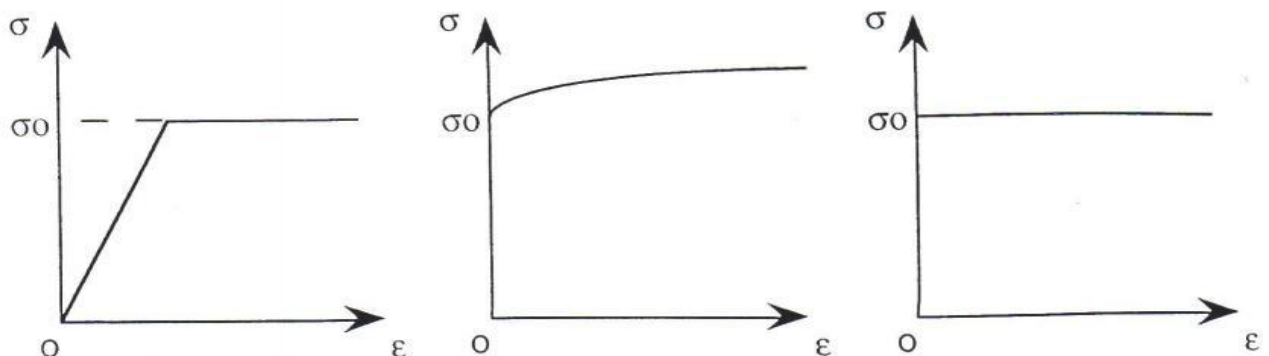


Figure II.5 Idéalisations classiques du comportement plastique

## II.6 Classification des matériaux

Trois comportements possibles : fragile, ductile et élastique non linéaire : sont représentés sur la figure suivante :

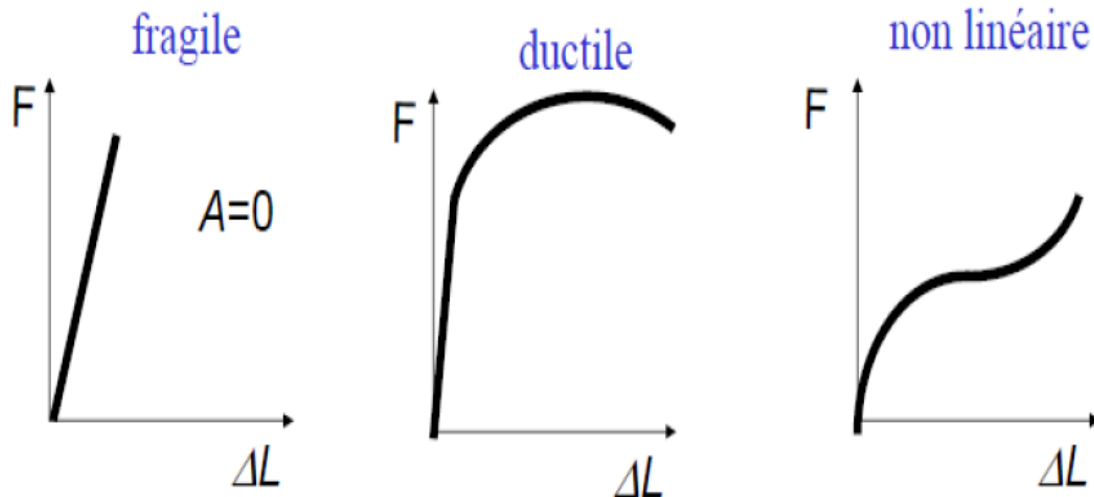


Figure II.6 courbe de traction possible

➤ **Matériaux fragile :**

Domaine plastique n'existe pas elle caractérise les métaux fragile comme le verre ; les céramiques ; le béton ; les polymères thermodurcissables...etc.

➤ **Matériaux ductiles :**

Déformation plastique permanente et importante on trouve ce type de graphes dans les métaux ; alliages ; polymères plastiques...etc.

➤ **Elastomères :**

Déformation plastique non proportionnelle à la charge. [27]

## II.7 Etude du comportement d'une éprouvette métallique en traction simple

On distingue principalement trois domaines de comportement mécaniques Contraintes de résistance ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_m$ ,  $\sigma_e$ )

$\sigma_e$ : Résistance élastique

$$\sigma_e = F_e / S_0 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (\text{II.7})$$

$\sigma_m$ : Contrainte maximale

$$\sigma_m = F_m / S_0 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (\text{II.8})$$

$\sigma_r$ : Contrainte à la rupture

$$\sigma_r = F_r / S_0 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (\text{II.9})$$

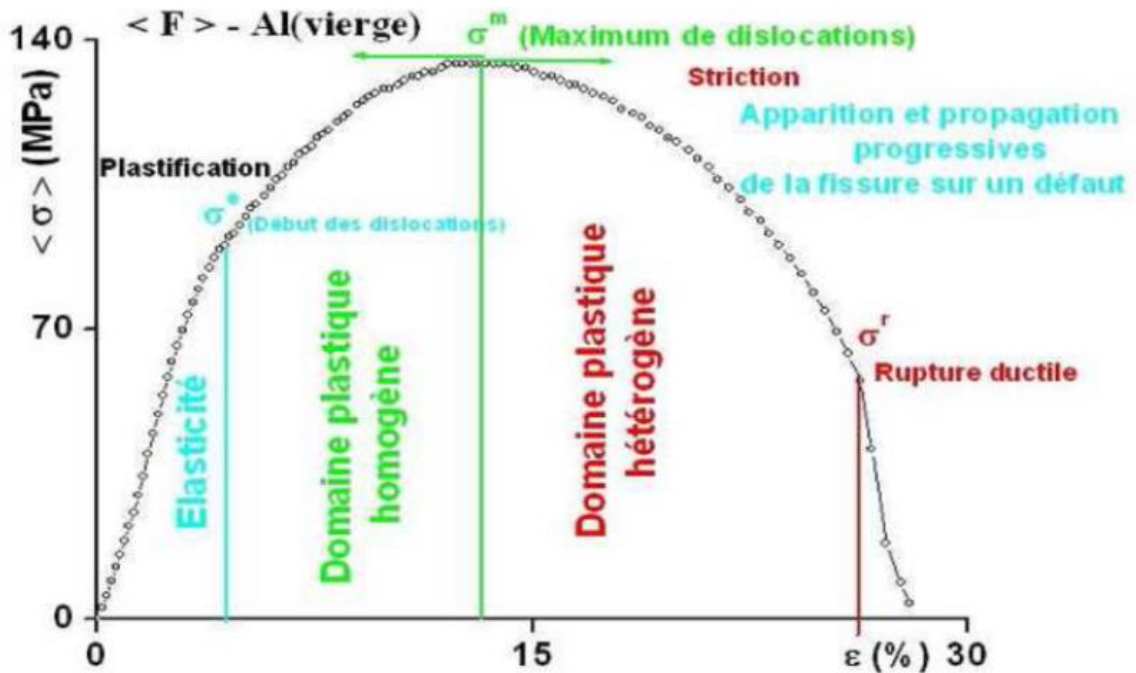


Figure II.7 Essai en traction monotone d'une éprouvette ductile.

### a - Domaine de comportement purement élastique réversible

A l'arrêt de la sollicitation l'éprouvette retourne dans son état initial, les contraintes et les déformations sont reliées linéairement par la loi de Hooke.

$$\sigma_e = E \cdot \epsilon_e = E \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{II.10})$$

Quand  $\sigma = \sigma_e$  les liaisons atomiques sont étirées au maximum.

$\sigma > \sigma_e$ , la seule possibilité de déformer.

### b - Domaine de comportement plastique homogène

Il apparaît au de la limite d'élasticité  $\sigma_e$  correspond à la contrainte à partir de laquelle le matériau commence à se déformer plastiquement.

$\sigma_e < \sigma < \sigma_m$  la densité des dislocations augmente dans le matériau,

$\sigma = \sigma_m$  Le nombre des dislocations atteint son maximum.

### c - Domaine de comportement plastique hétérogène ou d'endommagement

Les caractéristique de ductilité (Z%,  $Z_u$ %, A%)

Le coefficient de striction :

$$Z\% = \frac{s_0 - s_u}{s_0} \times 100 \quad (\text{II.11})$$

L'allongement de striction :

$$Z_{\mu} \% = \frac{S_0 - S_u}{S_u} \times 100 \quad (\text{II.12})$$

- $Z > 0,5$  est grand, le matériau est ductile
- $Z < 0,1$  est faible, le matériau est semi-fragile

L'allongement en pourcent :

$$A\% = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100 \quad (\text{II.13})$$

- $A\% \geq 5\%$  le matériau est considéré comme ductile.
- $A\% < 5\%$  le matériau est considéré comme fragile.

$S_u$  : Section minimale de l'éprouvette après rupture.

$S_0$  : Section initial de l'éprouvette.

$L_0$  : longueur initial de l'éprouvette.

$L_u$  : longueur de l'éprouvette après rupture.

$Z\%$  : (coefficient de striction).

## II.8 Courbe rationnelle de traction

### II.8.1 Contrainte vraie

Comme le montre la définition, la charge de rupture est une grandeur conventionnelle puisque l'on rapporte la charge maximale à la section initiale.

La contrainte vraie correspond à la charge rapportée à la section instantanée, soit :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (\text{II.14})$$

**F**: Charge appliquée, **S** section instantanée.

### II.9 Déformation rationnelle

L'allongement ordinaire n'est pas additif, ce qui est gênant pour les calculs de plasticité ; on le remplace par la déformation rationnelle

$$\epsilon^* = \frac{L}{L_0} \quad (\text{II.15})$$

La déformation rationnelle s'introduit de la façon suivante.

Soit  $L$  la longueur entre repères de l'éprouvette à un instant donné si on l'allonge d'une quantité  $\Delta L$ , l'allongement relatif sera  $\frac{\Delta L}{L}$  et, depuis de l'essai, l'allongement relatif total sera égal à :

$$\epsilon^* = \sum_{L_0}^L \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{II.16})$$

Ou en considérant des allongements infiniment petits  $dL$

$$\epsilon^* = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (\text{II.17})$$

On peut aussi écrire

$$\epsilon^* = \ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (\text{II.18})$$

Si l'on admet la constance du volume de la partie calibrée  $S_0.L_0 = S.L$

$$\text{De plus, } \sigma^* = \frac{F}{S} = \frac{F}{S_0} \left( \frac{S_0}{S} \right) = \frac{F}{S_0} \left( \frac{L}{L_0} \right) = \frac{F}{S_0} \left( \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \right) \quad (\text{II.19})$$

d'où :

$$\sigma^* = \sigma(1 + \epsilon) \quad (\text{II.20})$$

Cela n'est évidemment valable que dans la zone des allongements répartis et à condition que l'homogénéité de la déformation de la partie calibrée sur la base de mesure soit acceptable.

Cette déformation rationnelle diffère peu de l'allongement ordinaire  $A\% = 100 \frac{L-L_0}{L_0}$  pour les faibles valeurs si on l'exprime en % : on a la relation :

$$\epsilon^* = \ln \left( 1 + \frac{A\%}{100} \right) \quad (\text{II.21})$$

La différence ne dépasse pas 2 % pour une déformation de 20 %, mais l'écart grossit pour les déformations importantes.

### II.9.1 Courbe rationnelle de traction

Dans l'essai de traction, on mesure les efforts rapportés à la section initiale de l'éprouvette.

Il existe une représentation de la courbe de traction, de plus en plus utilisée en laboratoire, qui consiste à reporter la contrainte vraie  $\sigma$  en fonction de la déformation rationnelle  $\epsilon^*$  ; c'est la courbe rationnelle de traction.

L'allure d'une telle courbe est représentée sur la figure ci-après.

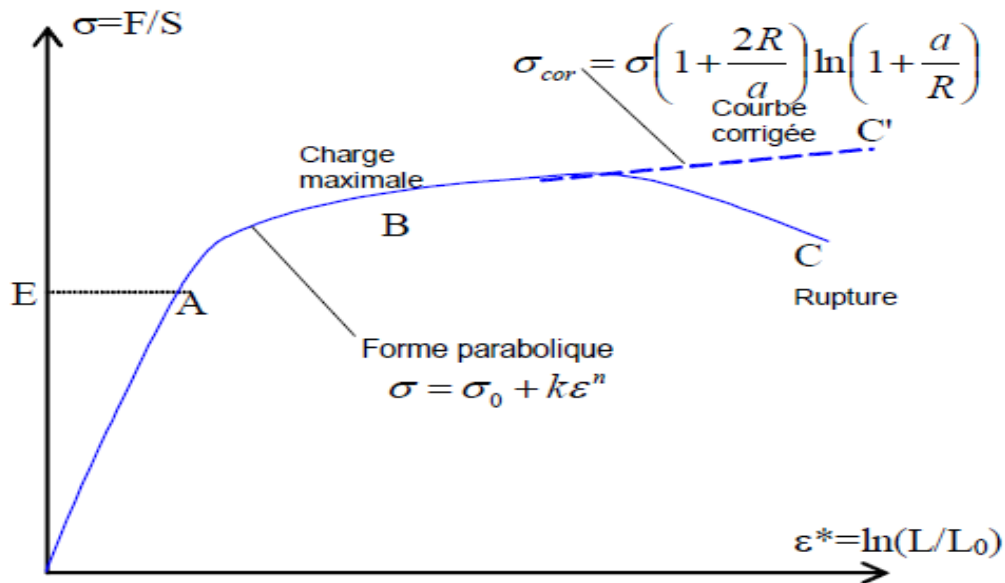


Figure II.8 La courbe rationnelle de traction

Sur cette courbe il n'y a pas de différence avec le tracé ordinaire pour la partie élastique et la limite d'élasticité  $R_e$ , car les déformations élastiques sont très faibles entre la limite d'élasticité et le point correspondant à la charge maximale, la courbe a une forme parabolique.

### II.9.2 Équation de la courbe rationnelle

La portion d'allure parabolique de la courbe rationnelle peut être mise sous forme mathématique. L'expression la plus utilisée est la parabole généralisée de la forme

$$\sigma = \sigma_0 + k \cdot \varepsilon^n \quad (\text{II.22})$$

$\sigma_0$ ,  $k$  et  $n$  étant des constantes.

Pour les aciers doux, on observe expérimentalement que  $\sigma_0$  est nul, d'où l'emploi de la formule simplifiée :

$$\sigma = k \cdot \varepsilon^n \quad (\text{II.23})$$

### II.10 Essais duresité

La duresité d'un matériau définit la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un poinçon, par exemple une bille en acier trempé (duresité Brinell) ou une pyramide en diamant (duresité Vickers). S'il y résiste bien, il est dit dur, sinon il est dit mou. La duresité se mesure sur différentes échelles selon le type de matériau considéré.

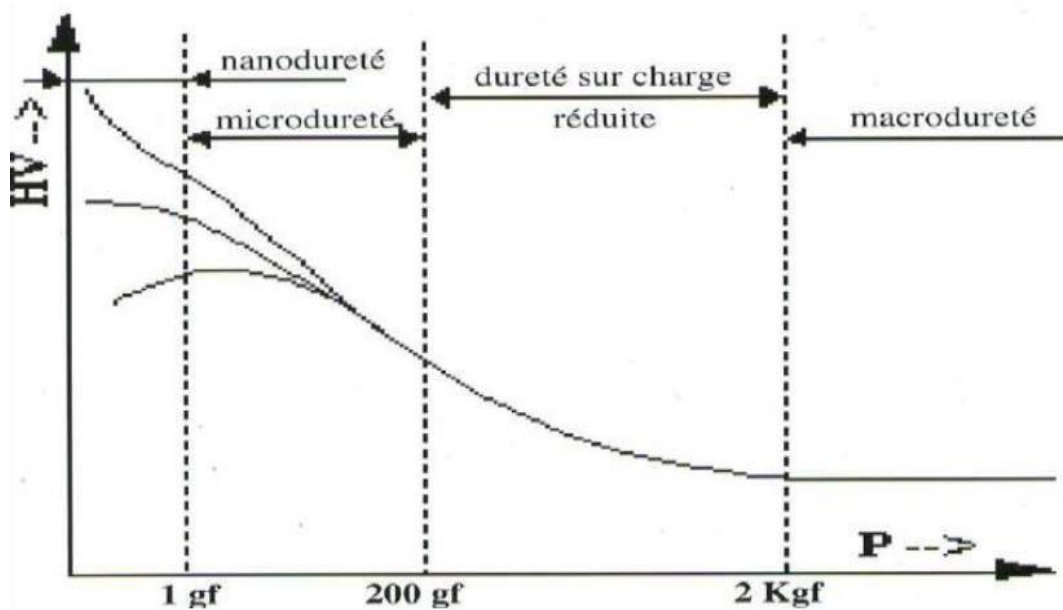


Figure II.9 Définitions des différents domaines de dureté.

**II.10.1 Essai de dureté Brinell (HB)**

Johan August BRINELL (1849–1925), ingénieur métallurgiste suédois, travaillait sur la transformation des aciers en fonction de la température. Il avait besoin d’un test rapide non destructif pour déterminer la dureté des différents aciers testés. Il met au point son test de dureté BRINELL basé sur un indenter bille, pour alliages métalliques peu durs.

L'essai consiste à imprimer dans la pièce une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre  $D$  sous une charge  $F$  et à mesurer le diamètre  $d$  de l'empreinte. [28]

**II.10.2 Dureté Brinell**

Les formules permettant d'obtenir une valeur sur l'échelle de Brinell sont les suivantes :

$HB \cong 0,0649 \cdot \frac{F}{D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	<p><b>HB</b> = Dureté Brinell.  <b>F</b> = Force appliquée [N]  <b>D</b> = Diamètre de la bille. [mm]  <b>d</b> = Diamètre de l'empreinte laissée par la bille. [mm]</p>
$HB = \frac{2 \cdot F}{g \cdot \pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	<p><b>HB</b> = Dureté Brinell.  <b>F</b> = Force appliquée [N]  <b>D</b> = Diamètre de la bille. [mm]  <b>d</b> = Diamètre de l'empreinte laissée par la bille. [mm]  <b>g</b> = <u>Accélération terrestre</u>. [<math>m \cdot s^{-2}</math>] (9,80665)</p>

### II.10.2.1 Principe

L'essai consiste à faire pénétrer en appliquant une force  $F$  un pénétrateur ayant une forme de bille diamètre  $D$ , généralement du carbure poli, dans un métal afin d'en déduire la dureté du matériau.

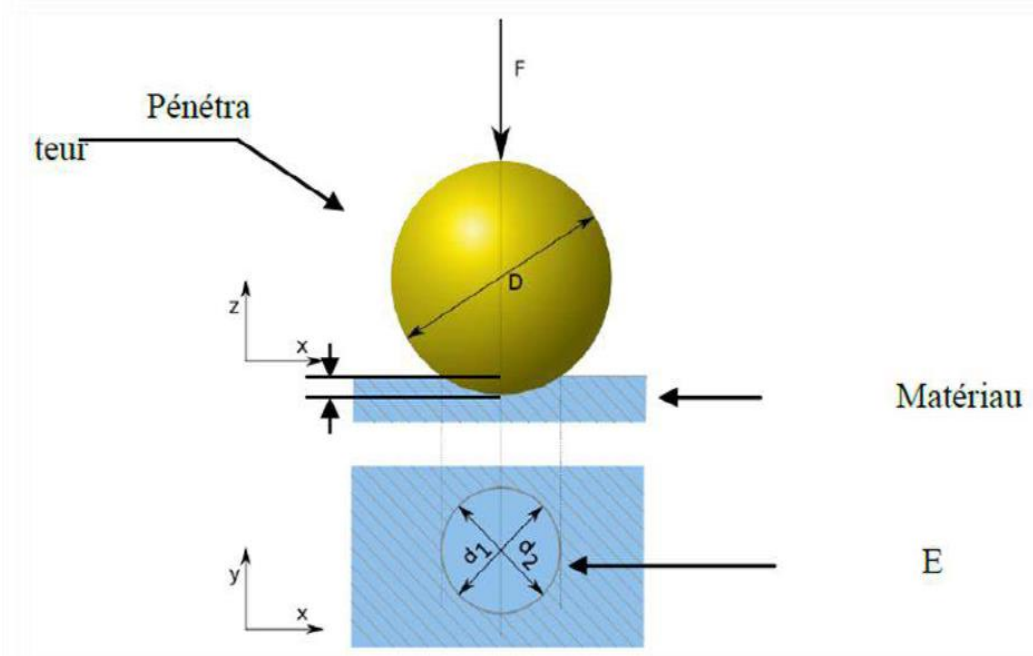


Figure II.10 : Principe de dureté brinell.

La force  $F$  étant exprimée en  $kgf$ , le diamètre de l'empreinte  $d$  en  $mm$  et la dureté **Brinell HB** est exprimée en  $kgf/mm^2$  selon la relation suivante :

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (II.24)$$

$F$  : Force appliquée [N]

$D$  : Diamètre de la bille. [mm]

$d$  : Diamètre de l'empreinte laissée par la bille [mm]. [28]

### II.10.2.2 Essai de Dureté Vickers (HV)

**SMITH** et **SANDLAND**, ingénieurs chez **VICKERS Ltd GB** ont besoin de tester des matériaux trop durs pour le test **BRINELL**. En 1925, ils conçoivent une pyramide diamant. Cette pyramide de diamant à base carrée a un angle au sommet de  $136^\circ$ .

Après l'indentation, on mesure la moyenne des diagonales  $d_1$  et  $d_2$  de l'empreinte en microscopie optique.

**Dureté Vickers** 
$$HV = 0.198. F/d_2 \quad (II.25)$$

**HV**: Dureté Vickers

**F**: Force appliquée [N]

**$d_2$** : Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm].

L'essai VICKERS est adapté pour les alliages durs et les céramiques.

### II.10.2.2.1 Principe

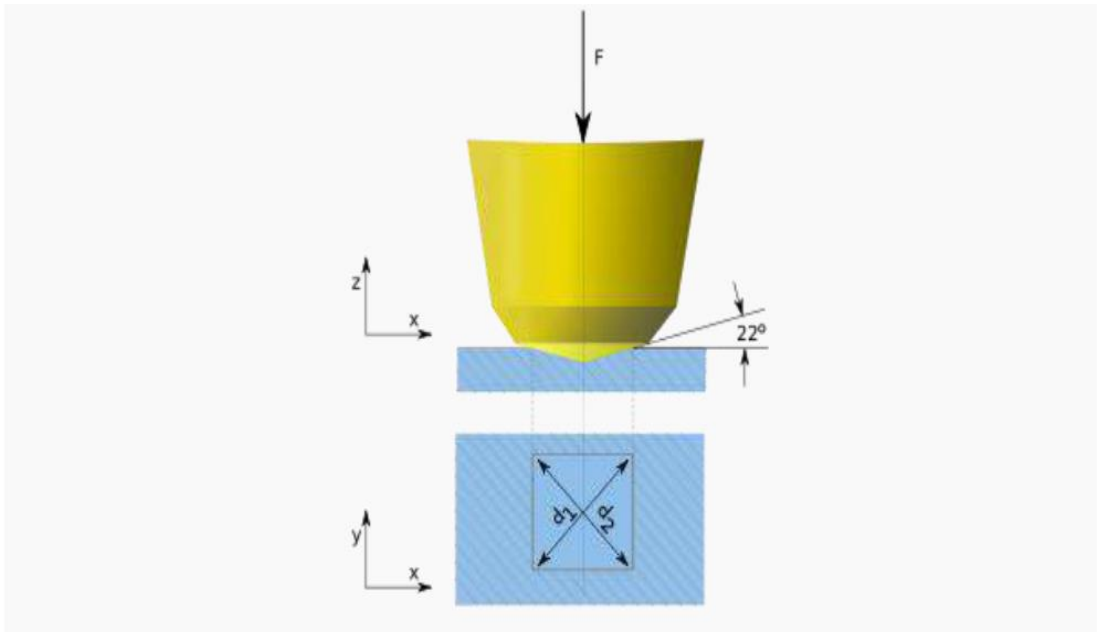


Figure II.11 Principe de la dureté Vickers.

La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à  $136^\circ$ . L'empreinte a donc la forme d'un carré ; on mesure les deux diagonales  $d_1$  et  $d_2$  de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur  $d$  en effectuant la moyenne de  $d_1$  et  $d_2$ . C'est  $d$  qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées.

$$HV = \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{g \cdot d^2} \quad (\text{II.26})$$

**HV** : Dureté Vickers.

**F**: Force appliquée [N].

**D** : Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm]

**g**=Accélération terrestre. [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ](9.80665).

Le degré de dureté, noté HV, est ensuite lu sur un abaque (une table) ; il y a un abaque par force d'appui.

### II.10.2.3 Essai de dureté Rockwell (HR)

Stanley ROCKWELL travaille comme métallurgiste dans une usine de roulements à billes. Il vérifie les traitements thermiques par des tests de dureté. L'essai BRINNEL donne une indentation trop grosse. L'essai VICKERS est trop long. En 1922, ROCKWELL conçoit un nouveau système avec différents pénétrateurs, adapté aux métaux et aux plastiques avec une large gamme de matériaux testés.

Pénétrateur :

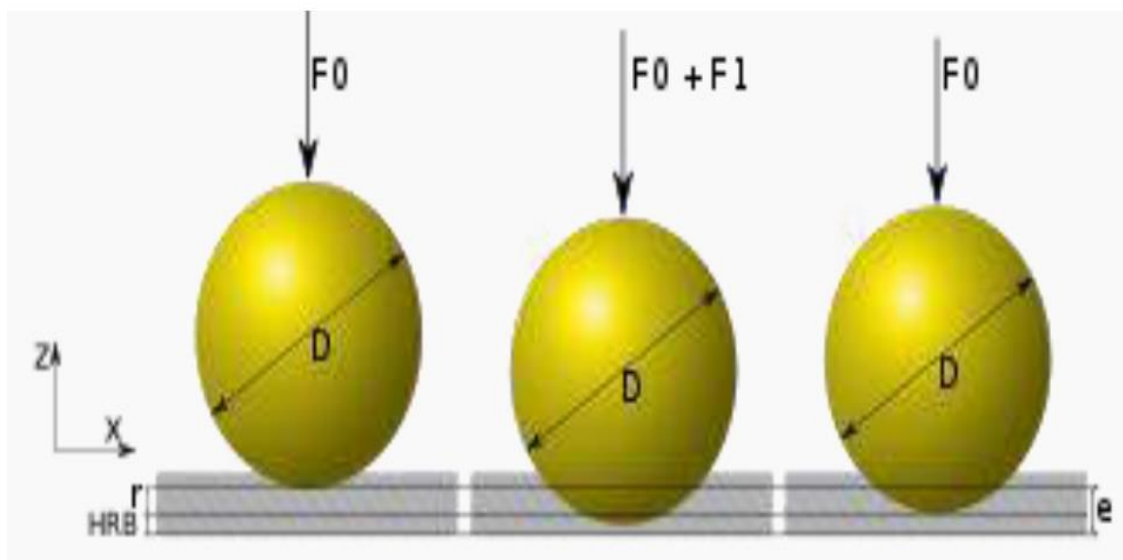
- ✓ soit bille en acier de diamètre 1,59 mm = Rockwell b pour les matériaux mous comme les alliages de cuivre.
- ✓ soit cône en diamant d'angle au sommet  $120^\circ$  et dont l'extrémité est une calotte sphérique de

Rayon 0,1mm = Rockwell c, pour les matériaux plus durs comme l'acier.

- ✓ Pré charge  $F_0$  faible de 10 da N = niveau de référence
- ✓ Surcharge  $F_1$  de 60 à 150 da N
- ✓ Charge  $F_2 = F_0$  à nouveau de 10 da N.

On mesure la profondeur de l'empreinte = différence des 2 positions

#### II.10.2.3.1 Principe



**Figure II.12 :** Principe de la dureté Rockwell (échelle B, bille en acier)

Les essais de dureté Rockwell sont des essais de pénétration. Il existe en fait plusieurs types de pénétrateurs qui sont constitués d'un cône en diamant ou d'une bille en acier trempé polie.

Pour obtenir une valeur de dureté Rockwell, on mesure une pénétration rémanente du pénétrateur sur lequel on applique une faible charge.

- L'essai se déroule en trois phases:

➤ Application sur le pénétrateur d'une charge initiale  $F_0 = 98 \text{ N}$  (soit 10 kgf). Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur initiale  $I$ . Cette profondeur étant l'origine qui sera utilisée pour mesurer la dureté Rockwell.

➤ Application d'une force supplémentaire  $F_1$ . Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur de  $P$ .

➤ Relâchement de la force  $F_1$  ET lecture de l'indicateur d'enfoncement.

La valeur de  $r$  étant l'enfoncement rémanent obtenu en appliquant puis en relâchant la force  $F_1$

- La valeur de dureté est alors donnée par la formule suivante :

• **Échelle B, E et F**

$$\mathbf{HRB = 130 - r} \quad (\text{II.27})$$

• **Échelle C**

$$\mathbf{HRC = 100 - r} \quad (\text{II.28})$$

Une unité de dureté Rockwell correspondant à une pénétration de 0,002 mm

# Chapitre III

## Procédure expérimental

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons d'abord présenter l'alliage **AL6063** que nous avons étudié et sa composition chimique, puis les techniques de préparation des échantillons pour les différents essais.

Nous avons également étudié des techniques d'analyse pour la caractérisation d'échantillons telles que la machine de traction utilisée, et la micro-dureté.

### III.2 Analyse chimique sur le matériau étudié

Dans notre travail, nous avons utilisé un alliage d'aluminium AL 6063 sous la forme d'une tige métallique qui a été fourni par l'informateur de l'université.

La composition chimique est donnée dans le tableau suivant :

AL	Si	Fe	Cu	Zn	Ti	Autres
98.7405	0.42363	> 0.33532	0.03053	0.04883	0.01303	0.05849

Tableau III.1 la composition chimique d'alliage 6063

### III.3 Préparation des échantillons

Dans notre travail, nous avons réalisé des pièces pour étudier le comportement mécanique et le traitement thermique des tiges en aluminium; 4 échantillons et 4 éprouvettes circulaires de dimensions différentes ont été coupés pour faciliter l'utilisation des tiges en aluminium que :

1. Quatre échantillons de petit diamètre ont été coupés à partir du début des barres afin de tester la micro dureté.(figure III.)
2. Préparation de quatre 4 éprouvettes de cylindres pour les essais de traction selon les normes

mondiales. (figure III.)

### III. 3. 1.échantillons de l'essai de dureté (brinell)



Figure III.1préparation l'éprouvette d'essai de dureté.



Figure III.2 Eprouvette finie pour la dureté

### III.3.2 Eprouvette de l'essai de traction



Figure III.3 préparation de l'éprouvette de l'essai de traction.



Figure III.4 Eprouvette finie pour la traction

### III.4 traitement thermique

Les traitements thermiques ont été effectués dans un four du type *NABERTHERM B180*. Les alliages ont subi les traitements thermiques avec une vitesse de chauffage de  $10-12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mn}$ .

Les échantillons et les éprouvettes terminés ont été chauffés à  $540^{\circ}\text{C}$  pendant **6 heures** dans un four de chauffage.

Le but de cette étude est d'étudier l'effet des traitements thermiques sur des échantillons et les éprouvettes *d'aluminium 6063* avec différentes vitesses de refroidissement liées à l'environnement de trempe. Sur les propriétés mécaniques et la dureté.



Figure III.5 four de traitement thermique

### III.4.1 traitement d'homogénéisation

Il consiste à chauffer les éprouvettes et les échantillons dans un four de trempe à une température de  $540^{\circ}$  Pendant un temps de maintien de 6 h.

### III.4.2 Traitement de trempe

Le traitement de trempé consisté à trempés par gravité (avec grande vitesse). Alors exactement lorsque nous sortons les éprouvettes et les échantillons du four, nous effectuons un choc thermique.

Puis ils ont été divisés en quatre classes, la première étant trempée immédiatement la température Ambiante "RT" (25°C) par trempé à **l'eau** (WQ), et la seconde est trempée à **l'air** ambiante et la troisième est trempée à **l'huile** ; tandis que la dernière catégorie reste non refroidie et sans traitement thermique.



Figure. III.6 éprouvette et échantillons trempé à l'air ambiant.

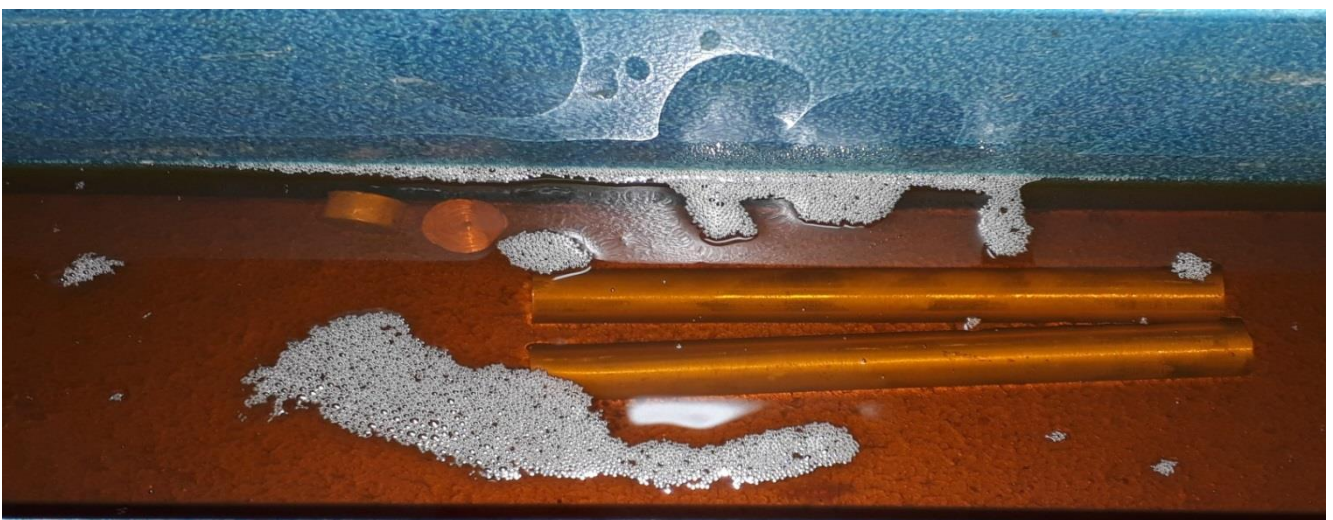


Figure III.7 : éprouvettes et échantillons trempé à l'huile.

### III.5 Machine des essais de traction wp310

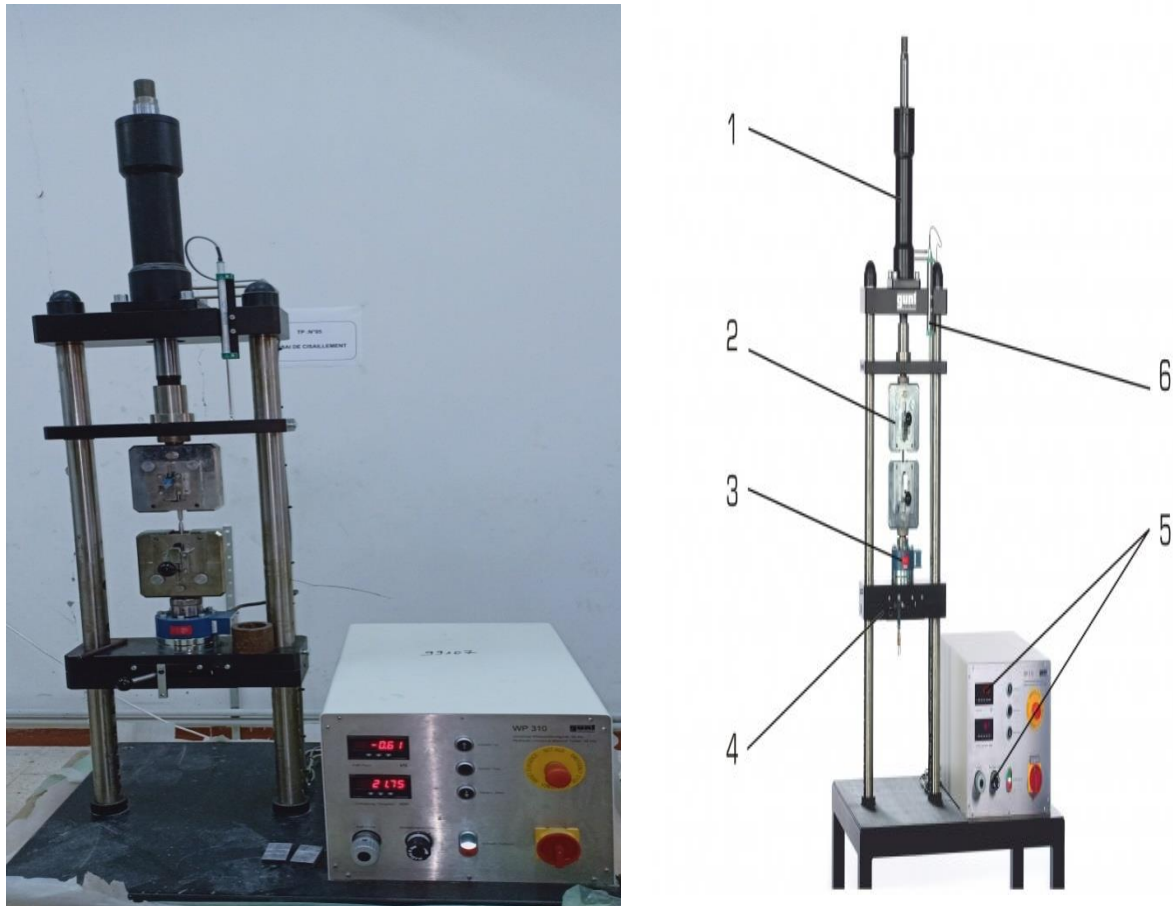


Figure III.8 Machine hydraulique des essais universelle wp310

<b>1</b>	cylindre hydraulique à double effet
<b>2</b>	zone de travail
<b>3</b>	capteur de force
<b>4</b>	Traverse inférieure réglable en hauteur avec verrouillage
<b>5</b>	Bâti
<b>6</b>	éléments d'affichage et de commande
<b>7</b>	capteur de déplacement

Une discipline classique de l'essai des matériaux est la méthode d'essai destructive.

Elle consiste à tester mécaniquement des éprouvettes jusqu'à ce qu'elles se cassent.

L'essai des matériaux met à disposition des données de dureté, de rigidité et de résistance, qui sont

reproductibles et quantifiées avec exactitude.

Le WP 310 et ses accessoires permettent la réalisation d'essais destructifs des matériaux. Grâce à la clarté du montage et à la facilité d'utilisation, on peut observer tous les détails et les phases de l'essai.

L'appareil est suffisamment performant pour pouvoir réaliser des essais basés sur les standards industriels.

Des données techniques des matériaux et des lois fondamentales peuvent être vérifiées à l'aide de valeurs de mesure que l'on a déterminées soi-même.

Le banc d'essai vertical à entraînement hydraulique à génération de forces directe peut générer aussi bien des forces de traction que des forces de compression.

La traverse inférieure peut être déplacée par paliers pour l'ajustage grossier de la hauteur.

Des logements cylindriques se trouvant sur les traverses permettent de changer facilement les accessoires.

Les nombreux accessoires permettent la réalisation d'essais de traction, de compression, de dureté Brinell, de flexion, de cisaillement et d'emboutissage.

Il est également possible de tester des ressorts à disques et des ressorts hélicoïdaux.

La force d'essai et l'allongement des éprouvettes sont mesurés par des capteurs, puis affichés.

Les valeurs de mesure sont transmises vers un PC, afin d'y être évaluées à l'aide d'un logiciel fourni.

### ***Contenu didactique / Essais***

avec les accessoires :

essai de traction

- ✓ essai de compression ;
- ✓ essai de dureté Brinell ;
- ✓ essai de flexion ;
- ✓ essai de cisaillement ;
- ✓ essai d'emboutissage ;
- ✓ test de ressort.

#### **III.5.1 Préparation de l'éprouvette de traction**

Préparation une 4 éprouvettes cylindrique après le traitement thermique et la trempe par air, l'eau et le huile pour l'essai de traction

❖ **Les Dimension :**

L'allongement de l'éprouvette peut être mesuré en enregistrant le déplacement relatif des têtes de serrage à coin.

Généralement on prend  $l_0=5d_0$  (**norme ISO 6892-1**)

Sachant que la section 
$$\frac{S_0=\pi.d_0^2}{4},$$

Donc:  $d_0=1.13\sqrt{S_0}$

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

On a:  $L_0=5,65\sqrt{S_0}$

**$d_0=10\text{mm}$**  : Diamètre initiale de l'aire de la section droite de l'éprouvette

**$L_0=50\text{ mm}$** :La longueur de référence

La longueur calibrée  $L_c$  est donnée par formule suivante :

$$L_c=55\text{mm}$$

$$(L_0 + 0.5 d_0)$$

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

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

$$D=14\text{ mm}$$

La figure suivant sans représenter la finition des éprouvettes avant l'essai de traction.



Figure III.9 éprouvette avant l'essai de traction

### III.5.2 Essai de traction

Les essais de traction unie axiale normalisés ont été effectués sur la **Machine des essais de traction wp310**.

La traction est appliquée à froid sous une vitesse de déformation moyenne de 0.4mm /min. Tous les essais de traction sont effectués avec le même dispositif.

Au cours de l'essai de traction l'éprouvette subie plusieurs phénomènes, ces derniers sont représentés sur la(Figure III.10).

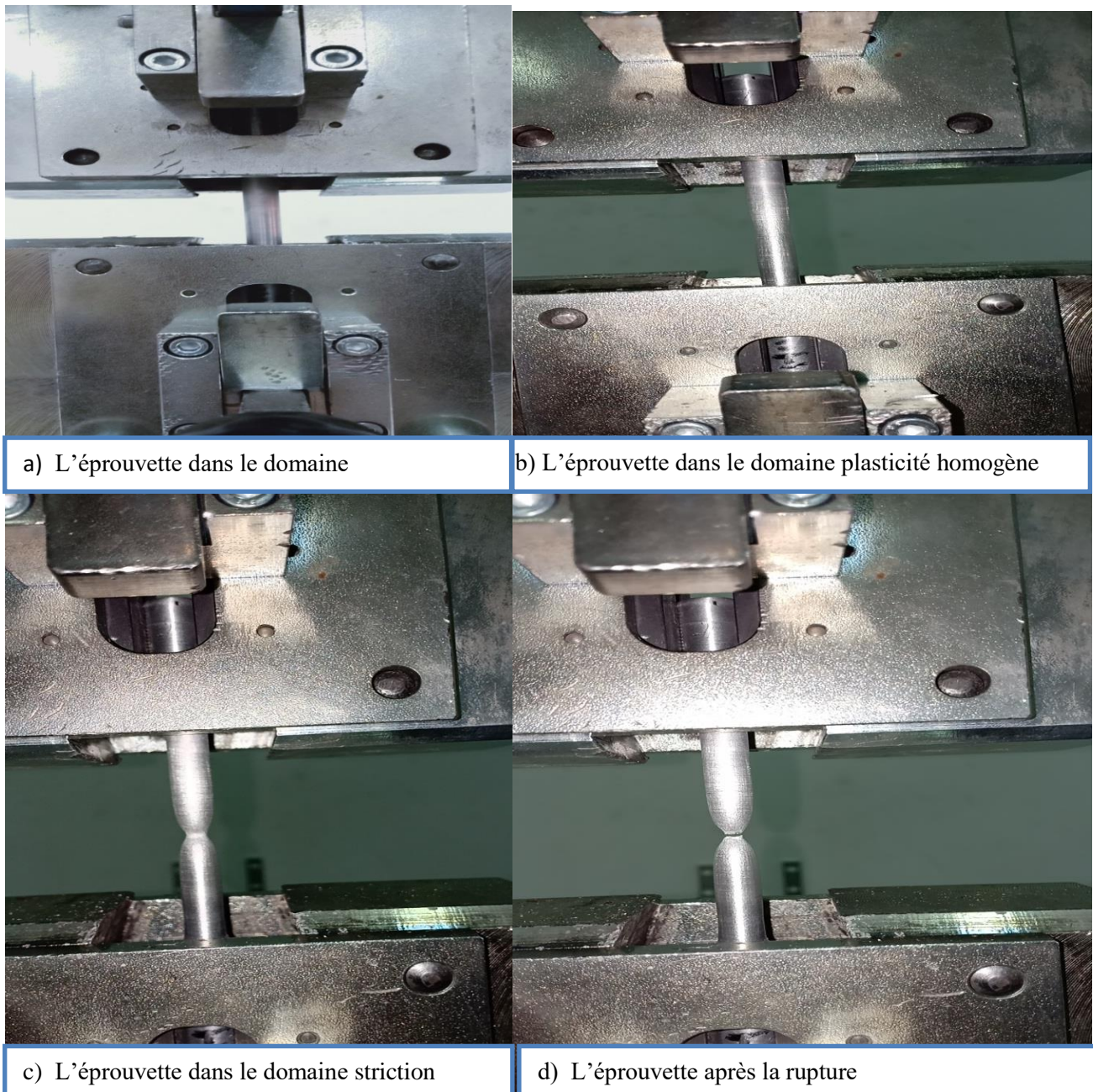


Figure III.10 phénomènes observés au cours de l'essai de traction

Les figures (III.11) ci Doussan Sant représenté les ruptures des éprouvettes après l'essai de traction.



Figure III.11 éprouvette après l'essai de traction

### III.6 Essais de dureté

#### III.6.1. Préparation d'échantillon pour l'analyse micro dureté

➤ **La polissage** : Les échantillons ont subi un polissage mécanique en utilisant des papiers émeri de granulométrie décroissante 220, 400,600,1000,2000, et la finition a été effectuée en utilisant le papier émeri 3000 .Afin d'éviter les rayures produites par le papier abrasif on a effectué une rotation de 90° à chaque fois qu'on change de papier abrasif. Les échantillons sont ensuite lavés à l'eau et séchés à l'air comprimé après chaque polissage.



Figure III.12 : polisseuse de deux disques



Figure III.13 : polisseuse de la finition

➤ **Mesure de MICRODURETE VICKERS:**

L'essai de **la MICRODURETE VICKERS** consiste à imprimer dans la pièce à essayer un pénétrateur en forme de pyramide droite, à base carrée, d'angle au sommet **136°**, sous une charge **F**, et à mesurer la **diagonale d** de l'empreinte laissée sur la surface après enlèvement de la charge .

Nous avons utilisé le **MICRODUROMETRE** (Figure III.14). Nous avons effectué plusieurs essais pour chaque échantillon.

Nous avons appliqué une charge de **50g**. Donc la dureté d'un matériau caractérise sa résistance à la pénétration, un pénétrateur est appliqué sur la surface du matériau à tester avec une force pendant **10** secondes.



Figure III.14 Micro d'uromètre Indente ZHV

# Chapitre IV

## Résultats et discussion

### IV.1 Introduction

Dans cette partie, nous présentons les résultats expérimentaux ainsi que l'interprétation. Nous avons considéré quatre éprouvettes d'aluminium 6063 pour l'essai de traction et quatre échantillon pour le micro dureté.

### IV.2 Essai de traction

#### IV.2.1 Résultats de l'essai de traction

Les résultats suivant nous donnent des courbes de traction (force- allongement) qui ne comporte pas la partie instable de la transition du domaine élastique au domaine plastique.

Cependant une résistance à la déformation mise en évidence sur les courbes de la **Figure IV.5**

Les différentes dérivées de la courbe de traction obtenues pour notre matériau sont exposées dans ce paragraphe.

Vitesse de déplacement :

$$V = 0.4 \text{ mm/min}$$

$$\text{La longueur : } L_0 = 50 \text{ mm}$$

$$d_s = 3.25 \text{ mm}$$

$$d_s = 3 \text{ mm}$$

$$d_s = 3.30 \text{ mm}$$

$$d_s = 4 \text{ mm}$$

➤ *Eprouvette 01(Air) :*

$\Delta L(\text{mm})$	0	0.67	2.449	5.426	13.846	18.959	20.205	20.736
F(KN)	0	1	5.05	8.2	10.70	7.05	3.71	0.68

Tableau IV.1 les valeurs de déplacement des points(Air)

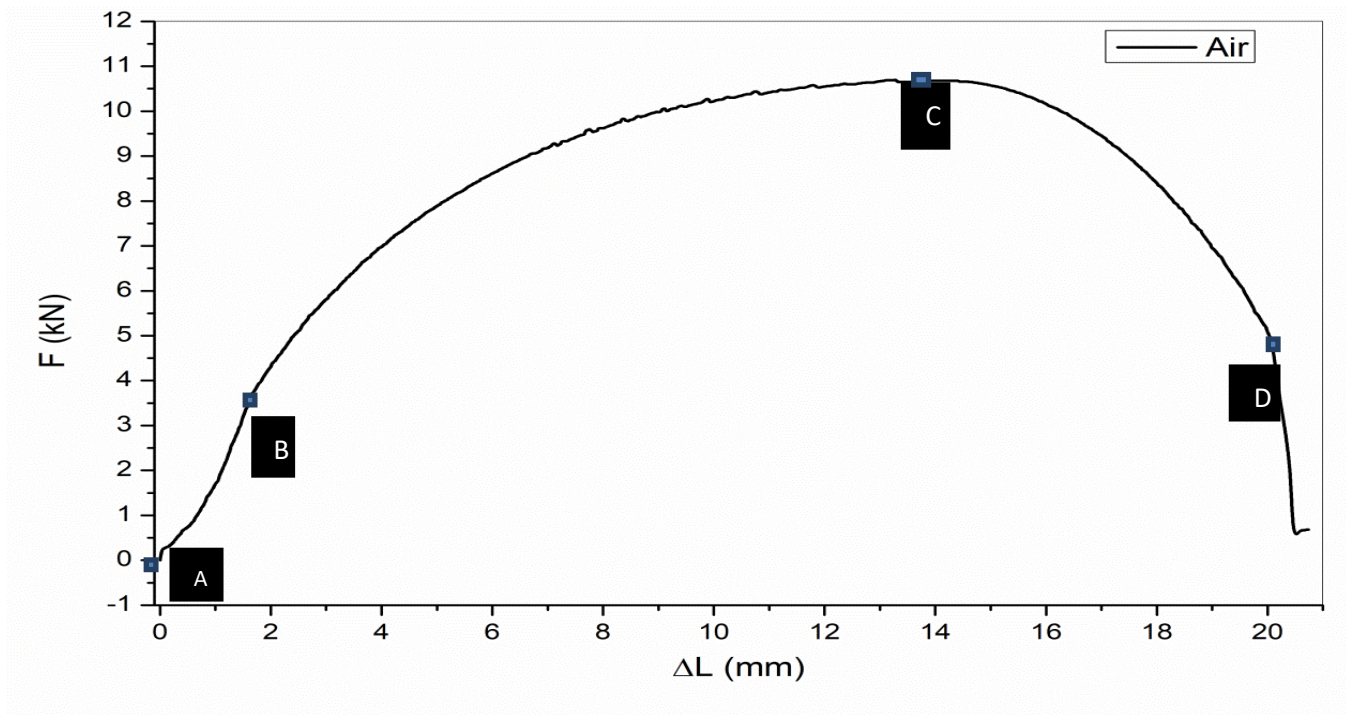


Figure IV.1 Courbe de l'Essai de traction d'une éprouvette (Air)

➤ **Eprouvette 02(Eau) :**

$\Delta L(\text{mm})$	<b>0</b>	<b>0.631</b>	<b>1.374</b>	<b>4.157</b>	<b>14.396</b>	<b>17.858</b>	<b>20.158</b>	<b>20.736</b>
<b>F(KN)</b>	<b>0</b>	<b>0.95</b>	<b>2.79</b>	<b>7.14</b>	<b>10.70</b>	<b>8.56</b>	<b>4.1</b>	<b>0.68</b>

Tableau IV.2 les valeurs de déplacement Des points(Eau)

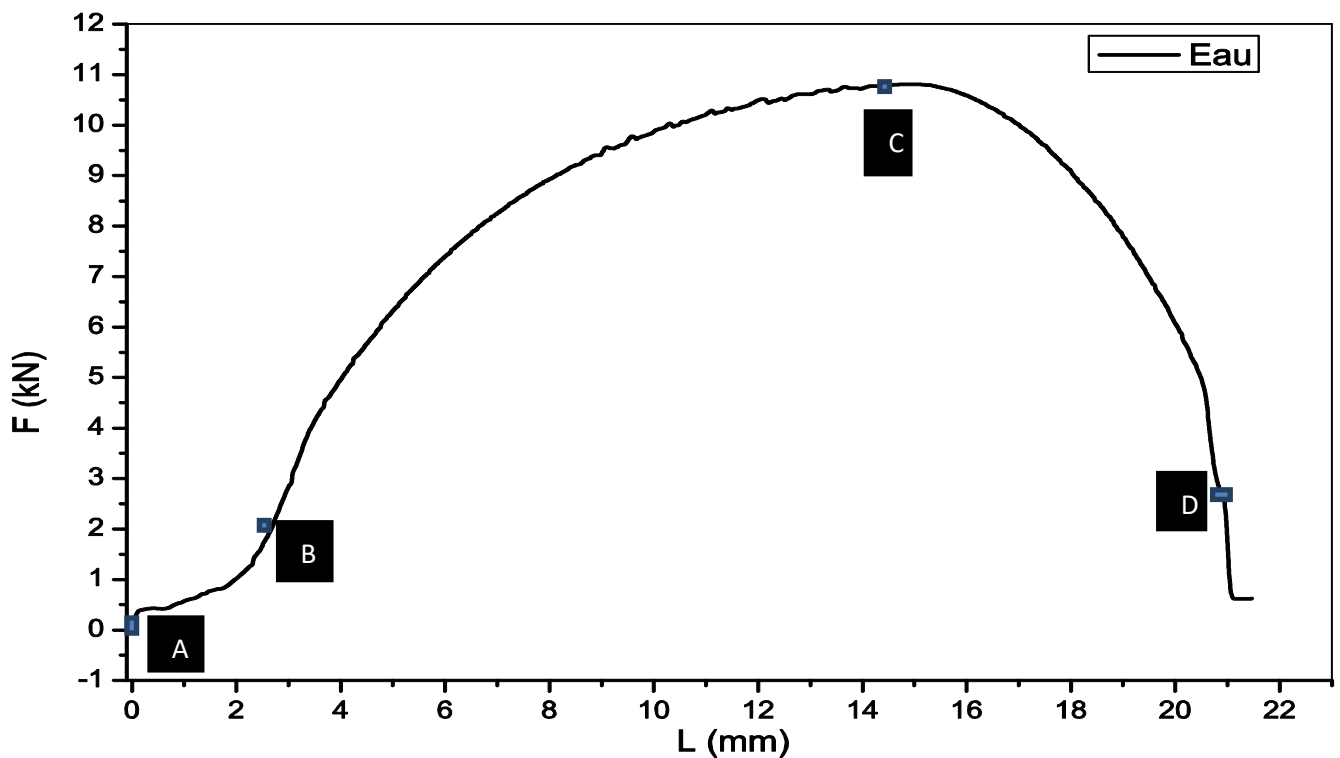


Figure IV.2: Courbe de l'Essai de traction d'une éprouvette (Eau).

➤ **Eprouvette 03(Huile) :**

$\Delta L(\text{mm})$	0	1.676	3.147	7.434	15.664	19.50	21.137	21.787
<b>F(KN)</b>	0	1.17	4.13	8.78	10.86	7.48	2.64	0.61

Tableau IV.3 les valeurs de déplacement des points(Huile)

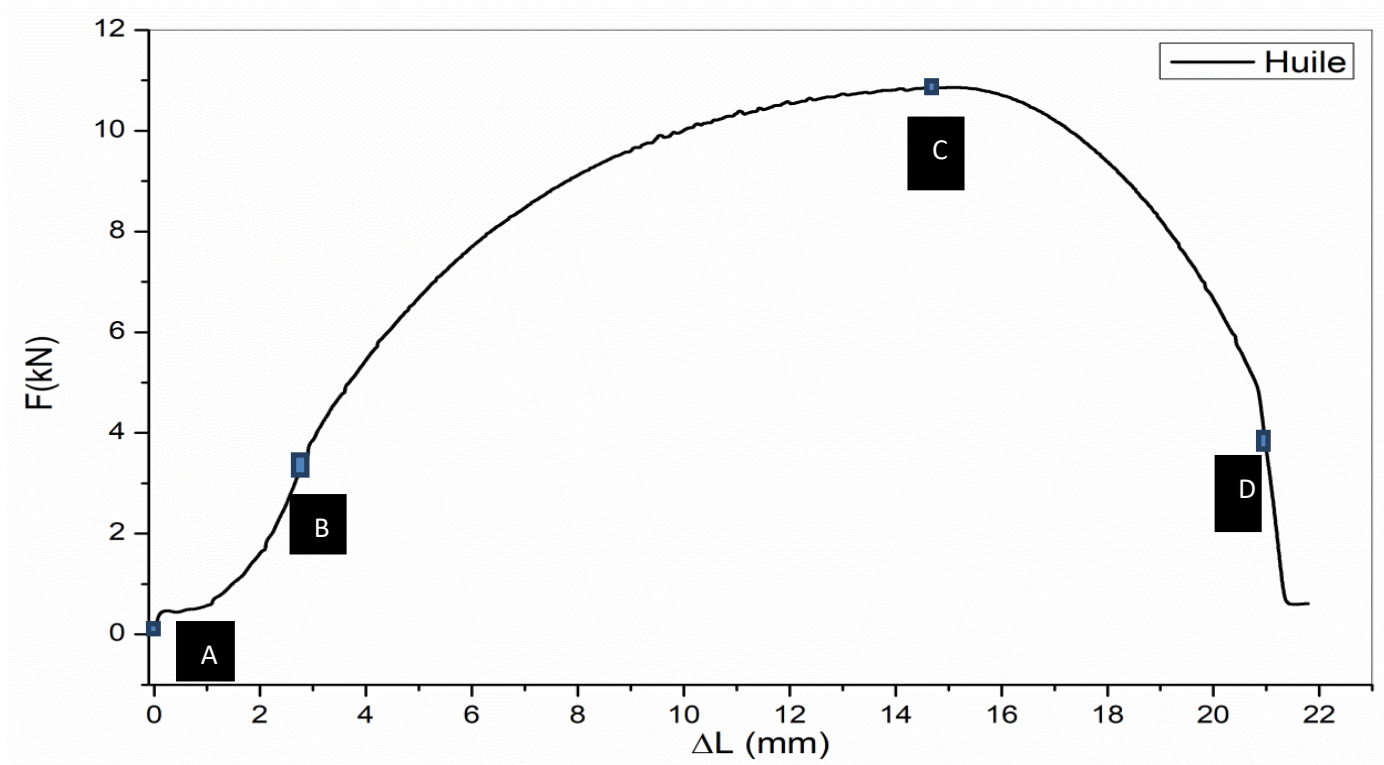


Figure IV.3 Courbe de l'Essai de traction d'une éprouvette (Huile).

➤ **Eprouvette 04(referens) :**

$\Delta L(\text{mm})$	0	1.63	2.320	3.035	4.455	8.535	14.123	14.838
F(KN)	0	1.33	5.46	9.71	13	14.71	3.58	0.58

Tableau IV.4 les valeurs de déplacement des points(Réf)

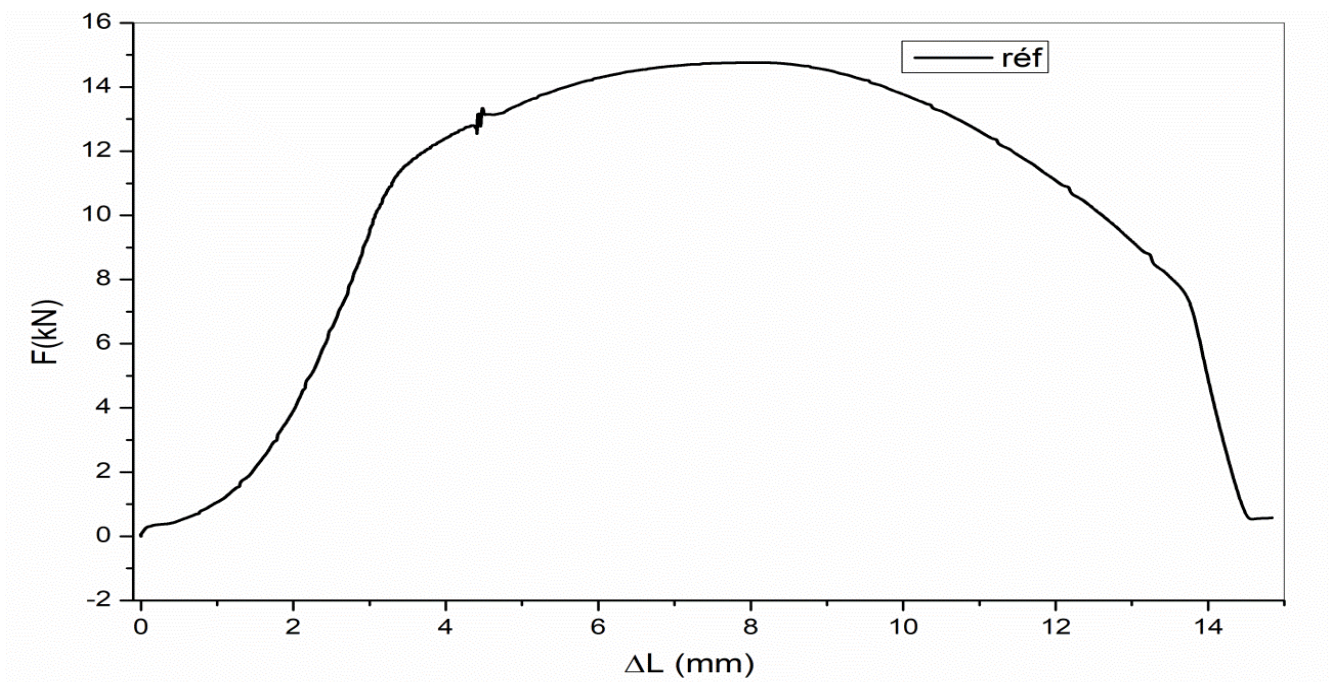


Figure IV.4 Courbe de l'Essai de traction d'une éprouvette (Réf).

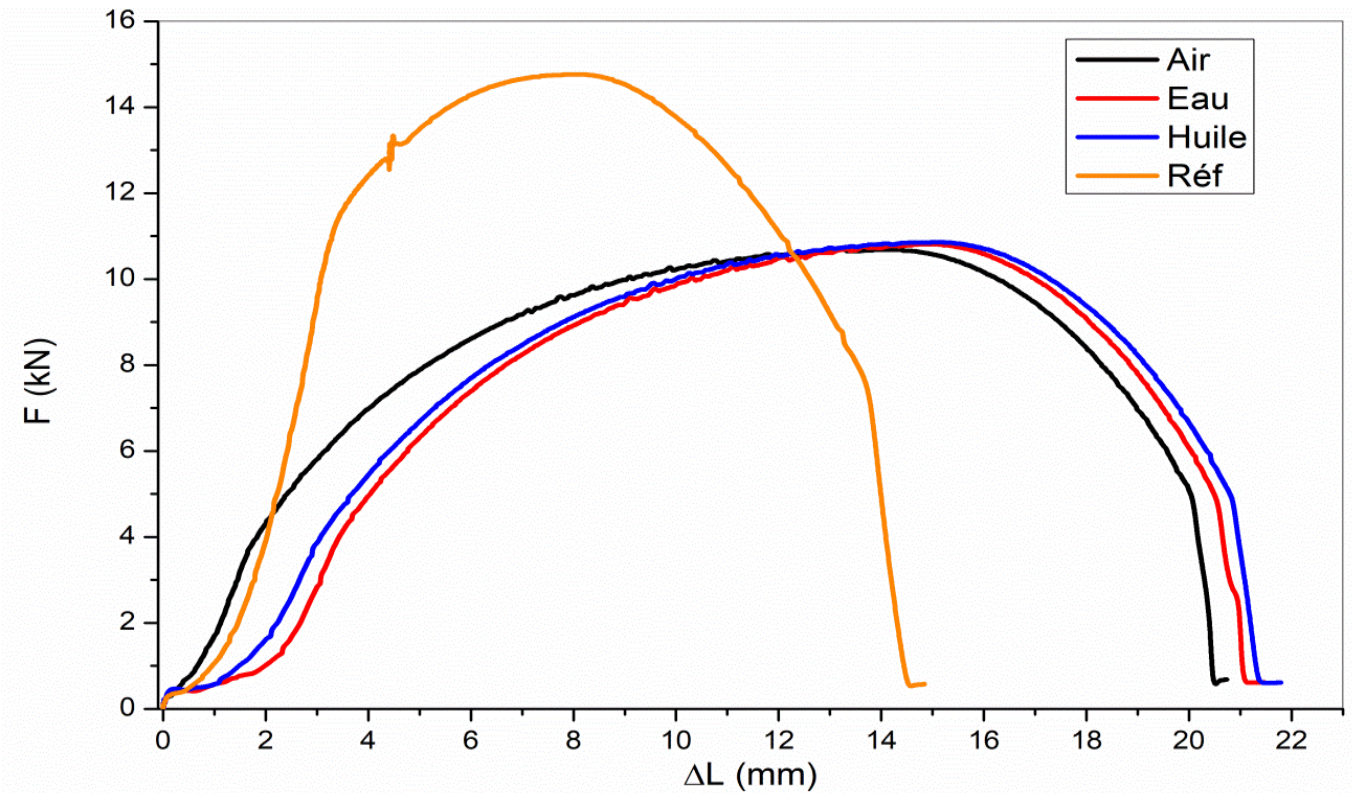


Figure IV.5 Courbes de traction des différentes éprouvettes.

## IV.2.2 La courbe de traction

Les courbes suivant que représente dans la Figure IV (1. 2.3.4), est composée de trois parties ; qui caractérisent les étapes de comportement mécanique de l'éprouvette au cours de l'essai :

### ✓ La première partie

(l'intervalle [A B]): est le domaine de la déformation élastique réversible, dans lequel le matériau obéit à la loi de **HOOKE** =  $E \cdot \varepsilon$  et que:

La contrainte appliquée sur l'éprouvette

**E** : module d'Young

$\varepsilon$  : la déformation

La valeur absolue de la déformation reste faible d'air, de l'ordre 3.96de pourcent à la fin de ce domaine d'élasticité. Par rapport à huile et eau qui a donné une grande valeur de la déformation.

### ✓ La deuxième partie

(l'intervalle [BC]): est le domaine de la déformation plastique homogène ;A partir d'une certaine contrainte, le matériau rentre dans le domaine de la déformation plastique homogène, la valeur de la pente, appelée taux de consolidations (taux d'écrouissage) est bien inférieure celle de module de YOUNG E du matériau, et tend progressivement vers 0 au maximum de la courbe de traction. Dans ce domaine de la déformation plastique, c'est une déformation est irréversible. Si la contrainte est supprimée, le matériau manifeste dans certain retour élastique.

### ✓ La troisième partie

(L'intervalle [C D]) : Une fois que le maximum de la courbe de traction a été atteint, on constate que la déformation plastique se poursuit, mais quelle se localise dans une région de l'éprouvette appelée zone de striction. Le domaine de striction est le domaine de déformation plastique non homogène. La consolidation du matériau ne peut plus alors compenser l'augmentation de la contrainte, il y a instabilité, et striction progressive jusqu'à ce que la rupture soit atteinte dans la zone de striction de

section la plus faible de l'éprouvette étudiée.

Après Les courbes de traction nous permet d'obtenir les valeurs des caractéristiques mécaniques en traction pour le matériau étudié sur le **Tableau IV.5** suivant :

#### **IV.2.3 Exemple sur les calculs d'éprouvette Al 6063 a l'état trempé à l'air:**

**La longueur finale :**

$$L_f = \Delta L + L_0$$

$$L_f = 1.98 + 50$$

$$L_f = 51.98 \text{ mm}$$

**La section initiale :**

$$S_0 = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$S_0 = \frac{(3.14)(3.25^2)}{4}$$

$$S_0 = 8.292 \text{ mm}^2$$

**La Résistance élastique :**

$$\sigma_e = F_e / S_0$$

$$\sigma_e = \frac{3.80}{78.5} \times 10^3$$

$$\sigma_e = 48.4 \text{ Mpa}$$

**La Contrainte à la rupture :**

$$\sigma_r = F_r/S_0$$

$$\sigma_r = \frac{10.70}{78.5}$$

$$\sigma_r = 136 \text{ Mpa}$$

**Le coefficient de striction Z% :**

$$Z\% = \frac{(78.5 - 8.292)}{78.5} \times 100$$

$$Z\% = 89.44\%$$

**La déformation :**

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100$$

$$\varepsilon = \frac{1.98}{50} \times 100$$

$$\varepsilon = 3.96\%$$

Eprouvette	Section $S_u$ ( $mm^2$ )	Longueur $L_0$ (mm)	Longueur $L_F$ (mm) $\epsilon\%$		E (MPA)	$\sigma_e$ (MPA)	$\sigma_r$ (MPA)	Z (%)
Air	8.292	50	51.98	3.96	959.59	48.4	136.30	89.44
Eau	7.065	50	54	8	587.5	59.8	136.50	91
Huile	8.549	50	54.30	8.6	668.04	75.15	138.34	89.11
Réf	12.56	50	54.1	8.2	1341.46	140	187.38	84

Tableau IV.5 Tableau récapitulatif des résultats des essais de traction

#### IV.2.4 Interprétation et discussion

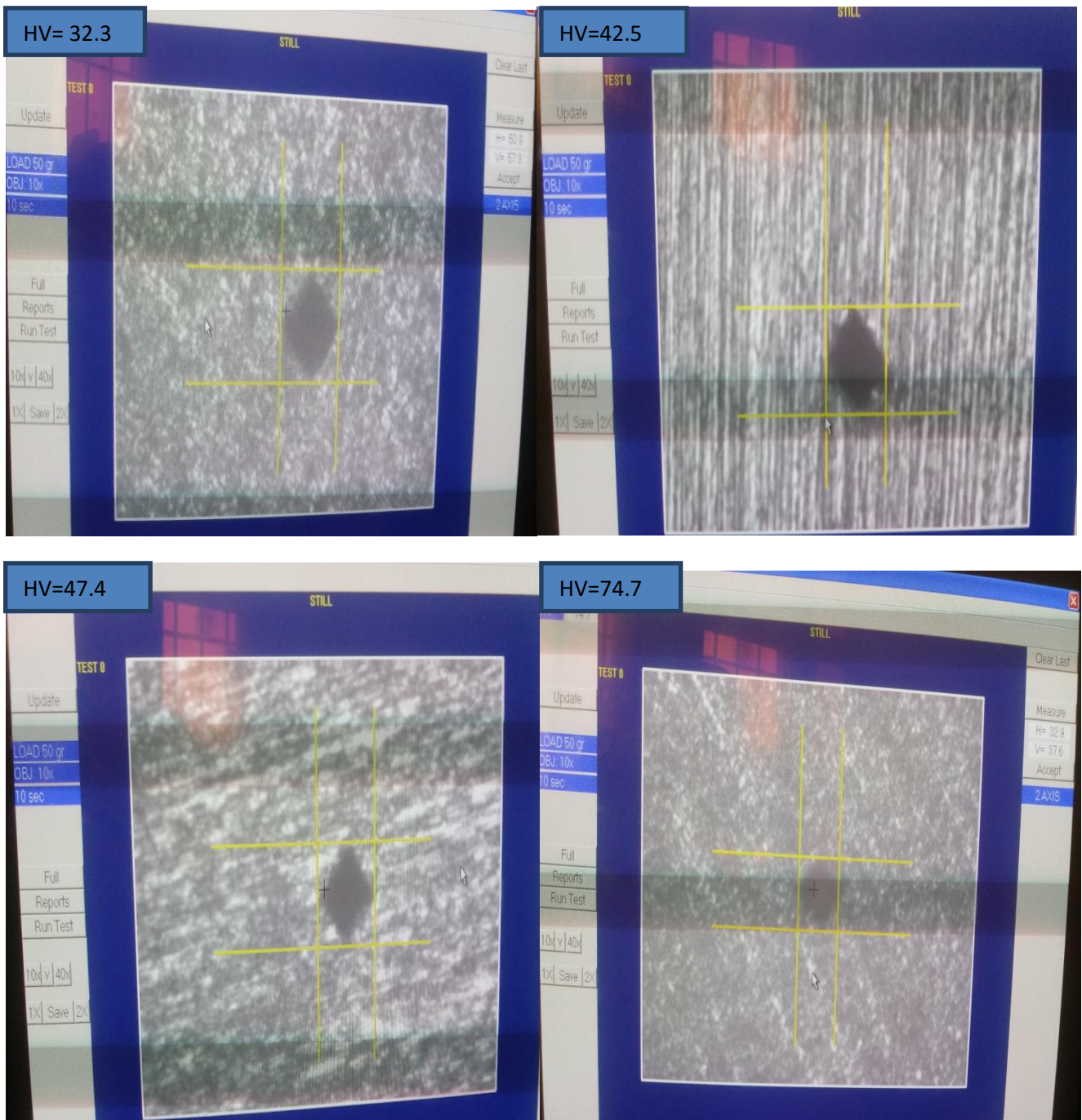
D'après les résultats, nous constatons que la résistance moyenne à la traction est voisine de 138MPa (huile). Et la striction à la rupture des éprouvettes varie de 80% à 90% max. Ce matériau présente un bon compromis entre une résistance à la traction suffisante et acceptable accompagnée d'une ductilité (allongement).

Les plus part des valeurs obtenues des différentes caractéristiques mécaniques pour notre matériau utilisé rentrent bien dans les fourchettes de propriétés données dans la littérature.

### IV.3 Observation métallographique de l'alliage 6063

#### IV.3.1 La micro dureté des échantillons

Les Figure IV.6 représente l'observation des échantillons testé par l'essai de la micro dureté avec le traitement thermique et trempé par air, eau, huile et réf qui donne les résultats suivant :



**Figure IV.6** la micro dureté des échantillons trempé à (air, eau, huile, referens).

### IV.3.2 Micro dureté Vickers HV

Les mesures de micro dureté ont été prises au moyen d'un Micro uromètre.

Les tests se font avec un pénétrateur pyramidal en diamant sous une charge de 50g.

Nous avons effectués des mesures d'échantillon soumis à un traitement thermique et un traitement de refroidissement avec de l'air, de l'eau et de l'huile, et l'objectif est de connaître l'effet de trempe et traitement thermique.

Les résultats moyens sont représentés dans le tableau suivant :

Echantillons	<i>Air</i>	<i>Eau</i>	<i>Huile</i>	<i>Referens</i>
<b>microdureté HV</b>	32.3	42.5	47.4	74.7

Tableau IV.6 valeurs de la micro dureté Vickers des différents échantillons étudiés.

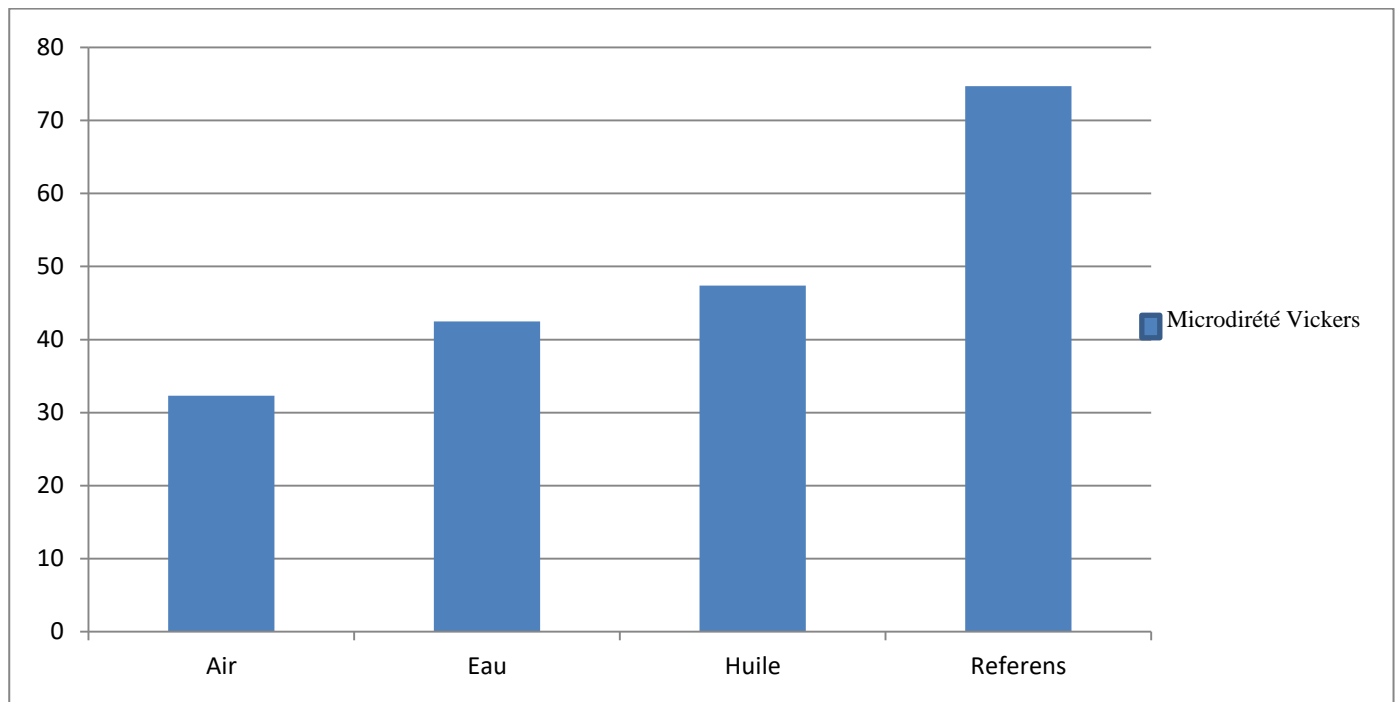


Figure IV.7 la micro dureté Vickers des différents échantillons étudiés.

La dureté Vickers HV est liée à la charge appliquée ( $F$ ) et la longueur de la diagonale de l'empreinte ( $d$ ) par la relation :

$$HV = 2 \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right) \cdot \frac{F}{D^2}$$

Avec  $F$  en  $g$  et  $D$  en  $mm$

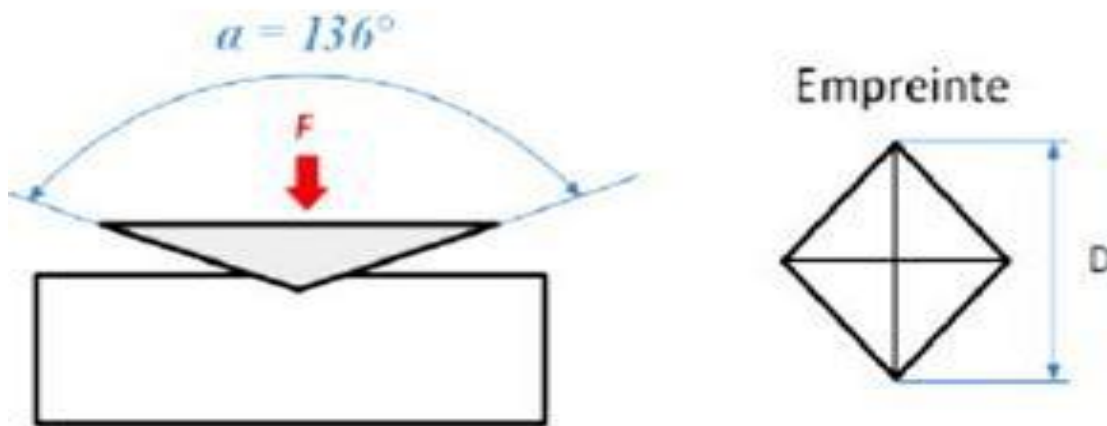


Figure IV.8 Schéma illustratif de l'empreinte du pénétrateur sur l'échantillon.

### IV.3.3 Les Interprétation

Nous avons Représenté la valeur de la micro dureté Vickers dans 4 échantillons différents dans le **Tableau IV.6**.

On note que la micro dureté de l'échantillon refroidi à l'air est plus faible par rapport à l'échantillon d'huile et de l'eau.

L'échantillon d'huile est plus solide  $HV=47.4$ , ce qui confirme que le processus de refroidissement immédiat dans l'huile donne une plus grande résistance à la pénétration.

## Conclusion générale

Dans ce mémoire de master, le travail effectué nous a permis de conclure les résultats suivants :

- L'aluminium et ses alliages, sont très utiles dans différents domaines technologiques dans le monde à cause de ses propriétés physiques, mécaniques, chimiques et électriques, ainsi que de ses faibles coûts et de production.
- La capacité de l'aluminium d'innovation positionne le métal par excellence dans le domaine du développement durable
- Le fonctionnement de la machine hydraulique d'essai universel, WP310, leur constituant éléments et les capteurs qui y sont appliqués, est bien adapté pour l'essai de traction d'aluminium et ses alliages
- L'essai de traction nous permet de déterminer pas mal de propriétés d'alliage d'aluminium 6063 tel ; le coefficient d'allongement, la résistance à la rupture, la limite d'élasticité et le module de Young.
- La caractérisation de l'alliage d'aluminium par l'utilisation de l'essai de traction est plus complexe et plus difficile qu'elle n'apparaît qu'à première vue, à cause de la dépendance de plusieurs facteurs et phénomènes influant pendant et après les essais (qualité de l'appareil de traction et d'éprouvette, formation des microfissures, la température etc.).
- Le traitement thermique est un rôle très important pour la modification de plusieurs propriétés de l'aluminium ; telle la dureté, la résistance et l'allongement
- Les différents milieux de refroidissement font clairement le changement de quelques propriétés mécaniques de l'alliage 6063 comme par exemple la microdureté et la résistance à la rupture et d'élasticité etc....
- Le traitement thermique d'alliages d'aluminium 6063 est un travail d'actualité qui déjà fait l'objet de plusieurs recherches. Il est utilisé pour modifier plusieurs propriétés du matériau dans le but de lui donner des aptitudes nouvelles.
- Les essais de traction et de la microdureté effectués lors de l'expérimentation montrent la différence entre les caractéristiques d'alliage 6063 avant et après le traitement thermique
- L'analyse et l'étude de l'alliage 6063 pouvant être un avantage dans l'industrie, et d'autre part pour combler les défauts du métal pur.
- Ce travail a permis de venir compléter et améliorer, nos connaissances et compréhension générale sur le sujet via l'essai mécanique, le traitement thermique de l'alliage de l'aluminium et le matériau d'aluminium.

- Finalement, nous croyons que nous avons contribué dans le domaine du traitement thermique et la caractérisation d'alliage d'aluminium 6063 qui peut être élargi leur comportement

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:**

- [1] Ghania BENCHABANE ;les mécanismes de recristallisation et de croissance des grains dans les métaux et alliages métalliques légers, , thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra ,2009
- [2] Paul Depovere, La classification périodique des éléments. La merveille Fondamentale de l'Univers, De Boeck Supérieur, 2002, p. 98.
- [3] Georges Chaudron, in « La préparation industrielle de l'aluminium et la découverte de ses propriétés par un illustre savant français, Henry Sainte-Claire Deville », Revue de l'aluminium no 211, juin 1954, p. 97, publié par l'Institut d'histoire de l'aluminium.
- [4] Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse) Cotutelle internationale avec "Université de Pitești - Roumanie"
- [5] 2004Mémoire du magister FILALI HICHEM : Effet de vieillissement naturel et artificiel sur les propriétés mécaniques de deux tôles Al-Mg-Si
- [6] mémoire master DJABRI KHAOULA : Etude l'influence des traitements thermiques sur les propriétés des alliages Al-Mg-Si contenant différents teneur des éléments d'additions2016.
- [7] <http://www.euralliage.com/alliage.html>
- [8] <https://www.groupe-installux.com/laluminium/applications/>
- [9] Techniques de l'ingénieur : aluminium et alliages d'aluminium corroyés : propriétés métalliques [Doc. M438]
- [10] K. Boulemzaoud. Mémoire de Magister, Université de Constantine, Algérie, (2012).
- [11] M. Nicolas, Thèse de doctorat, Laboratoire de Thermodynamique et de Physico Chimie (2002).
- [12] SEB Groupe : Emaillage d'aluminiumPDF
- [13] Techniques de de l'ingénieur Écrouissage d'alliages d'aluminium [M230]
- [14] D.J.Chakrabartia, DavidE.Laughlinb, Phase relations and precipitation in Al-Mg-Si Alloys with Cu additions, Progress in Materials Science49, p.389-410,200.

- [15] JM. DORLOT JP. BAILON J. MASOUNAVE. Des Matériaux Des Matériaux Montréal, Editions de L'Ecole Polytechnique de Montréal, 1986.
- [16] C. Vargel, corrosion de l'aluminium, edition Dunod, 1999.
- [17] U.S.A: ASTM E8: "Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials "Norme ISO 6892: Matériaux métalliques – Essai de traction.
- [18] [https://www.bodycote.com/wp-content/uploads/2018/02/FICHE\\_les\\_traitements\\_thermiques\\_des\\_alliages\\_aluminium-Fev2013.pdf](https://www.bodycote.com/wp-content/uploads/2018/02/FICHE_les_traitements_thermiques_des_alliages_aluminium-Fev2013.pdf)
- [19] R. Guemini. Mémoire de Magister, Université de Constantine, Algérie, (1981).
- [20] [https://oatao.univ-toulouse.fr/17926/1/Radutoiu\\_N.pdf](https://oatao.univ-toulouse.fr/17926/1/Radutoiu_N.pdf)
- [21] Ananthakrishna G.,Noronha.,Fressengeas C et Kubin L.P.,Crossover from chaotic to self-organized critical dynamics in jerky flow of single crystals,phys. Rev. E60.5455-5462(1999).
- [22] Y. Quéré “Physique des Matériaux”, Edition Paris(1988).
- [23] M. Bellet, J. L. Chernot, L. Fourment, E. Massoni, P. Montmitonnet. "Eléments finis et mise en forme des métaux". Séminaire de plasticité, Sophia Antipolis, 26-30 Septembre 1994.
- [24] PDF : Propriétés Mécaniques Des Matériaux
- [25] Michel Dupeux Aide-mémoire science des matériaux
- [26] ] GUERIRA BELHI. Février 2017. POLYCOPIE DE RESISTANCE DES MATERIAUX. Biskra : Université Mohamed Khider.
- [27] pdf Essai de Traction.doc du 06/09/10
- [28] Essais de dureté par Dominique François, Techniques de l'ingénieur M4160-

# Résumé

Le traitement thermique de l'aluminium joue un rôle très important dans l'émergence de nouveaux matériaux qui ont des propriétés distinctives. Et pour déterminer leurs caractéristiques mécaniques, physiques et chimiques, des essais destructifs et non destructifs doivent être effectués. Parmi les essais destructifs que nous réalisons se trouve l'essai de traction qui permet de retrouver les propriétés mécaniques du matériau (module d'élasticité, module de Young,...) etc. L'effet du refroidissement lors du traitement thermique sur le comportement mécanique de l'aluminium est l'objet de notre étude. L'alliage d'aluminium 6063 a été utilisé et soumis à un traitement thermique pendant une certaine période, puis à un refroidissement instantané par air, eau et huile.

4 éprouvettes ont été fabriquées pour effectuer le processus de traction et quatre autres échantillons ont été placés sous l'appareil de mesure de la dureté.

Enfin, nous avons combiné les résultats sous les courbes et les valeurs dans des tableaux.

**Mot clés :** alliage d'aluminium 6063, traitement thermique, trempe, traction, dureté.

# Abstract

The heat treatment of aluminum has a very important role in the emergence of new materials with distinctive properties. In order to know its mechanical, physical and chemical properties, destructive and non-destructive tests must be carried out. Among the destructive tests that we carry out is the tensile test which makes it possible to find the mechanical properties of the material (elastic modulus, Young's modulus, ...) and so on. The effect of cooling during heat treatment on the mechanical behavior of aluminum is the focus of our study. Aluminum alloy 6063 was used and subjected to heat treatment for a period of time and then instant cooling with air, water and oil.

4 specimens were made to perform the tensile process and four more specimens were placed under the hardness meter.

Finally, we have combined the results under the curves and the values in tables.

# ملخص

المعالجة الحرارية للألمنيوم لها دور مهم جدا في ظهور مواد جديدة والتي لها خصائص مميزة. و لمعرفة خصائصها الميكانيكية والفيزيائية والكيميائية يجب القيام باختبارات تدميري وغير تدميري ، من بين الاختبارات التدميرية التي نجريها هي اختبار الشد الذي يجعل من الممكن العثور على خصائص ميكانيكية للمادة (معامل التمدد ، ووحدة يون ، والمرونة..). وما إلى ذلك. إن تأثير التبريد أثناء المعالجة الحرارية على السلوك الميكانيكي للألمنيوم هو محور دراستنا. حيث تم استعمال سبيكة المنيوم 6063 وإخضاعها لمعالجة حرارية لفترة معينة ومن ثم التبريد الفوري بواسطة الهواء والماء والزيت .

تم صنع 4 سبائك من اجل القيام بعملية الشد وأربع عينات أخرى تم وضعها تحت جهاز قياس الصلابة. وأخيرا جمعنا النتائج تحت المنحنيات والقيم في جداول .

**الكلمات المفتاحية:**سبيكة الالمنيوم6063 , الشد, التبريد, المعالجة الحرارية, الصلابة.