

République Algérienne Démocratique et populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique  
Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement  
Technologique-Skikda



Département de Technologie  
Filière : Génie Mécanique

**Mémoire Présenté en Vue de l'Obtention du Diplôme  
de Professeur d'Enseignement Secondaire**

**Thème :**

**Étude de l'influence de la torsion sur la dureté et  
l'écrouissage d'un alliage d'aluminium par essai.**

**Présenté par :**

- Mr. GHERABI Hocine
- Mr. GHERABI Ouail

**Encadrant(e) :**

- Mr. FNIDES Mohamed

**Jury de Soutenance :**

Nom et prénom	Grade	Université	Rôle
KHERIEF Nacereddin Mohamed	MCA	ENSET	Président
FNIDES Mohamed	MCA	ENSET	Encadrant
BENSASSI Mohamed	MCB	ENSET	Examineur

**Année Universitaire : 2023/2024**

# إهداء

بسم الله الرحمن الرحيم، بسم الله الذي تشرق بنوره البدايات وتتحقق بفضلها الغايات، بسم الله الذي نستهل به كل عمل ونسأله التوفيق والبركة والصلاة والسلام على من أرسل رحمة للعالمين، النبي الأمي الكريم، سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم.

أما بعد، فإنما سعينا في طلب العلم خالصاً لوجه الله تعالى، راجين منه القبول والرضا. قال الله تعالى: "يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ" [المجادلة: 11]

الحمد لله الذي تتم بنعمته الصالحات  
أهدي هذا العمل

إلى الذي كان دومًا مصدر قوتي وإلهامي، والذي لم يبخل عليّ بدعمه وحبّه وتوجيهاته السديدة. إلى من زرع في قلبي قيم العلم والإيمان، وإلى من كان لي العون والسند في كل خطوة خطوتها. "أبي الغالي" هذا النجاح هو ثمرة جهدي وتضحياتك، أطال الله في عمرك وأدامك لي.

إلى ينبوع الحب والحنان، التي كانت دومًا بجانبني، تزرع في قلبي الأمل وتحيطني بدعواتها الصادقة. إلى من لا تستطيع الكلمات أن توفيهما حقها. "أمي الغالية" هذا النجاح هو بفضل الله ثم بفضل دعواتك ورعايتك، حفظك الله وأطال في عمرك.

إلى الذين كانوا لي الدعم والسند، والذين شاركوني كل لحظة من لحظات الفرح والحزن. إلى من جعلوا لحياتي معنى وأضفوا عليها السعادة والبسمة. "عائلتي العزيزة، إخوتي وأخواتي" هذا النجاح هو نتاج حبكم وتشجيعكم.

إلى الذين كانوا لي العون في مسيرتي، والذين وقفوا بجانبني في كل لحظة، إلى من جعلوا الرحلة أجمل وأضفوا عليها لحظات من السعادة والدعم. "أصدقائي الأعزاء" هذا النجاح هو نتيجة لصداقتكم الصادقة ودعمكم المتواصل، أدام الله صداقتنا وأعانكم على كل خير.

لكم جميعًا، أهدي هذا النجاح، بكم وبدعمكم وصلت إلى ما أنا عليه اليوم، جزاكم الله كل خير

غرابي الحسين

# إهداء

الحمد لله خالق الكون، فاطر السماوات والأرض، الذي أنعم علينا بنعمة العقل والعلم، وجعل العلم نورًا يُضيء دروبنا في الحياة.

والصلاة والسلام على أشرف المرسلين، سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم، وعلى آله وصحبه أجمعين.

إلى من وضع المولى - سبحانه وتعالى - الجنة تحت قدميها، وقرها في كتابه العزيز، إلى من أفضّلها على نفسي، إلى التي وهبت فلذة كبدها كل العطاء والحنان، إلى التي صبرت على كل شيء، إلى من ارتحت كلما تذكرت ابتسامتها في وجهي، إلى نبع الحنان "أمي الغالية" أعز ملاك على القلب والعين جزاها الله عني خيرا الجزاء في الدارين.

إلى لغة الضياء التي هدّت خطاي، وفتحت لي أبواب المعرفة، ورفعت بي إلى سماء العلم، إلى من أضاء دربي بنور الحكمة، وعلمني معنى الإصرار والعزيمة، إلى من صبر عليّ واحتضن أحلامي، إلى من آمن بي حين شككتُ بنفسي، إلى "أبي الغالي" جزاه الله عني خيرا الجزاء في الدارين.

إلى من يملكون قلبي ويشاركوني نبضه، إلى من هم شركائي في الفرح والحزن، إلى من ساروا معي في رحلة الحياة، إلى من قدموا لي الدعم والسند في كل خطوة،

"إخوتي وأخواتي" أطال الله بقاءكم وبارك فيكم

إلى من يملكون أطيب القلوب وأجمل المشاعر، إلى من جمعتهم معي رحلة العمر، إلى من رسموا معي أجمل ذكريات الطفولة، إلى من زرعوا في قلبي معنى الأخوة الحقيقية،

"أصدقائي الأعزاء" أطال الله بقاءكم ودامت صداقتنا.

أدعو الله أن يوفقني في مسيرتي القادمة، وأن يجعل علمي نافعًا لي ولغيري، وأن يجزيكم خيرا الجزاء على ما قدمتموه لي.

مع خالص الحب والتقدير والامتنان

غرابي وائل

---

# Remerciements

---

Louange à ALLAH, qui nous a accordé la force et la persévérance pour mener à bien ce travail, et prière et paix sur notre prophète Mohammed et sur tous ses compagnons.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude au **Dr. Mohamed FNIDES**, notre directeur de mémoire, dont le soutien inlassable et les conseils éclairés ont été essentiels à la réalisation de ce travail. Ses orientations précieuses et son dévouement constant ont été une source d'inspiration tout au long de cette recherche.

Nous souhaitons également à remercier profondément le comité de soutenance, composé de **Mr. KHERIEF Nacereddin Mohamed**, président du comité, et de **Mr. BENSASSI Mahmoud**, examinateur pour leurs remarques perspicaces et les suggestions judicieuses ont grandement contribué à améliorer la qualité de ce mémoire. Nous leur sommes profondément reconnaissants pour le temps et l'énergie qu'ils y ont consacrés.

Nous n'oublierons jamais de remercier la direction de l'institution, représentée par le directeur **Mr. BOUJADDAR Jamal** et le chef département **Mr. RAHMONI Salah** pour le soutien et les facilités offertes tout au long de cette période ont été déterminants pour créer un environnement propice à l'étude et à la recherche.

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance à tous les professeurs qui ont jalonné notre parcours académique au fil des années. Chacun d'eux a contribué à notre formation intellectuelle et personnelle, laissant une empreinte durable sur notre éducation. Nous les remercions sincèrement pour leur dévouement et leur engagement.

Nos remerciements s'étendent aussi à toute l'administration et au personnel de l'institution, qui ont travaillé sans relâche pour assurer un cadre éducatif favorable et confortable à tous les étudiants.

Enfin, nous souhaitons exprimer notre plus profonde gratitude à nos familles aimantes, en particulier à nos parents, pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants. Ils ont toujours été notre source de motivation et de force, nous inspirant à persévérer et à exceller.

ALLAH vous bénisse tous et vous guide dans vos futures entreprises.

---

---

# Résumé

---

Le travail présenté dans cette étude vise à évaluer l'impact du test de torsion sur la dureté et l'écrouissage des alliages d'aluminium (AlSi8Cu3Fe). La première partie de cette mémoire commence par une revue exhaustive des différents types de matériaux et de leurs propriétés mécaniques, ainsi que de la manière dont les contraintes externes les affectent. Dans la deuxième partie (partie pratique), des échantillons d'alliages d'aluminium ont été préparés et utilisés dans des essais de torsion et de traction pour déterminer les changements dans les propriétés mécaniques telles que la dureté et les limites d'élasticité. Les procédures expérimentales comprenaient la préparation des échantillons et l'utilisation d'équipements variés tels qu'une machine de torsion, une machine de traction, un four électrique et un duromètre numérique. Les tests de torsion ont été réalisés à température ambiante et les résultats ont été analysés pour déterminer le coefficient de torsion et les limites de rupture. En outre, des tests de traction ont été effectués pour mesurer l'élasticité longitudinale (module de Young) et d'autres propriétés. Les résultats obtenus ont montré que le test de torsion affecte de manière significative la dureté des alliages d'aluminium, avec une augmentation de la dureté et des limites d'élasticité à mesure que la déformation augmente. Les études métallurgiques ont également montré des changements dans la structure microscopique de l'échantillon après l'exposition aux tests de torsion. En conclusion, cette étude offre une compréhension approfondie de l'effet des contraintes de torsion sur les alliages d'aluminium, aidant à améliorer la conception des matériaux pour les applications d'ingénierie.

**Mots clés** – Contraintes ; Déformation ; Dureté ; Écrouissage ; module de Young

---

---

# Abstract

---

This study aims to assess the impact of the torsion test on the hardness and work hardening of aluminium alloys (AlSi8Cu3Fe). The first part of this thesis begins with a comprehensive review of various material types and their mechanical properties, and how external stresses affect them. In the practical part, samples of Aluminium alloys were prepared and used in torsion and tension tests to determine changes in mechanical properties such as hardness and yield limits. The experimental procedures included preparing the samples and using various equipment such as a torsion machine, a tension machine, an electric furnace, and a digital hardness meter. Torsion tests were conducted at room temperature and the results were analysed to determine the torsion coefficient and fracture limits. Additionally, tensile tests were conducted to measure longitudinal elasticity (Young's modulus) and other properties. The results showed that the torsion test significantly affects the hardness of aluminium alloys, with an increase in hardness and yield limits as deformation increases. Metallurgical studies also demonstrated changes in the sample's microstructure after exposure to torsion tests. In conclusion, this study provides an in-depth understanding of the effect of torsional stresses on aluminium alloys, aiding in the improvement of material design for engineering applications.

**Keywords** – Stresses; Deformation; Hardness; Hardening; Young's Modulus.

---

---

## ملخص

---

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير اختبار الالتواء على صلابة وتصلب سبائك الألومنيوم (AlSi8Cu3Fe). يبدأ البحث بمراجعة شاملة لأنواع المواد المختلفة وخصائصها الميكانيكية وكيفية تأثير الإجهادات الخارجية عليها. في الجزء الثاني و التطبيق، تم إعداد عينات من سبائك الألومنيوم واستخدامها في اختبارات الالتواء والشد لتحديد التغيرات في الخصائص الميكانيكية مثل الصلابة وحدود المرونة. تضمنت الإجراءات التجريبية تجهيز العينات واستخدام معدات متنوعة مثل آلة الالتواء، آلة الشد، فرن كهربائي ومقياس الصلابة الرقمي. أُجريت اختبارات الالتواء عند درجات حرارة الغرفة وتم تحليل النتائج لتحديد معامل الالتواء وحدود الكسر. كذلك، أُجريت اختبارات الشد لقياس المرونة الطولية (معامل يونغ) وخصائص أخرى. النتائج أظهرت أن اختبار الالتواء يؤثر بشكل ملحوظ على صلابة سبائك الألومنيوم، حيث زادت الصلابة وحدود المرونة مع زيادة التشوه. كما أن الدراسات المعدنية أظهرت تغيرات في البنية المجهرية للعينة بعد التعرض لاختبارات الالتواء. في الختام، تقدم هذه الدراسة فهماً معمقاً لتأثير الإجهادات الالتوائية على سبائك الألومنيوم، مما يساعد في تحسين تصميم المواد للاستخدامات الهندسية.

**الكلمات المفتاحية** – الاجهادات، التشوه، الصلادة، التصلب، معامل يونغ.

---

---

# Liste des Symboles

---

## Liste des Symboles

---

Symbole	Signification
$E$	Module d'Young [MPa].
$\varepsilon$	La déformation [%]
$F$	Charge appliquée [N]
$S$	Surface [ $mm^2$ ].
$L_0$	Longueur initiale [mm].
$L$	Longueur courante [mm].
$R_e$	Limite élastique [MPa].
$A\%$	Allongement
$R_m$	Résistance à la traction.
$HB$	Dureté Brinell.
$HV$	Dureté VICKERS
$HR$	Dureté Rockwell
$D$	Diamètre (mm).
$M$	Moment de torsion (Nm).
$R_c$	La résistance à la compression unie axiale
$\nu$	Coefficient de Poisson
$G$	Module de cisaillement
$I_o$	Moment quadratique
$n$	Coefficient d'érouissage
$R^2$	Coefficient de détermination.
$\alpha$	Angle de torsion (degré).
$K$	Coefficient de résistance (N/ $mm^2$ ).
$\gamma$	Angle de glissement (degré).
$\sigma$	Contrainte normale.
$\sigma_0$	Limite d'élasticité
$\varepsilon_p$	Déformation plastique.

---

---

# Table des Matières

---

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Etude Bibliographique</b>	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique des matériaux.....	3
I.3. Le « Matériau » C'est quoi ?.....	3
I.3. 1. Les matériaux métalliques .....	4
I.3. 2. Les polymères .....	4
I.3. 3. Les céramiques .....	5
I.3. 4. Les composites.....	6
I.3.4. 1. Principaux constituants .....	6
I.3.4. 2. Produits en composite.....	6
I.4. Propriétés des matériaux .....	7
I.4. 1. Propriétés physiques .....	7
I.4. 2. Propriétés thermiques .....	7
I.4. 3. Propriétés mécaniques .....	7
I.4. 4. Propriétés électriques.....	8
I.4. 5. Propriétés technologiques .....	8
I.4. 6. Propriétés économiques .....	8
I.5. Comportement mécanique de matériaux.....	9
I.5. 1. La rigidité.....	9
I.5. 2. Elasticité .....	9
I.5. 3. Résistance maximale .....	9
I.5. 4. Limite élastique .....	9
I.5. 5. Fragilité.....	9
I.5. 6. Ténacité.....	9
I.5. 7. L'écrouissage.....	9
I.5.7. 1. Mécanisme et effet de l'écrouissage .....	9
I.5.7. 2. Influence de l'écrouissage sur les caractéristiques mécaniques .....	10
I.5. 8. La dureté .....	10
I.6. Conclusion.....	10

---

---

## **Chapitre II : Caractérisation mécanique des matériaux**

II.1. Introduction .....	11
II.2. Contraintes / déformations .....	11
II.3. Caractérisation des propriétés mécaniques .....	12
II.3.1. Essais de fatigue .....	12
II.3.1.1. Généralité sur la fatigue .....	12
II.3.1.2. Eprouvettes et essai .....	13
II.3.2. Essai de fluage .....	13
II.3.3. Essai de traction.....	14
II.3.4. Essai de compression .....	16
II.3.5. Essai de cisaillement.....	17
II.3.6. Essais de résilience.....	18
II.3.6. 1.Principe de l'essai de résilience .....	18
II.3.6. 2.Machine d'essai .....	18
II.3.7. Essai de flexion.....	19
II.3.7. 1.Les éprouvettes .....	19
II.3.7. 2.Essais de flexion trois points.....	20
II.3.7. 3.Essai de flexion quatre points .....	20
II.3.8. Essai de dureté .....	21
II.3.8. 1.Essai de pénétration .....	21
II.3.8.1. 1. Essai de dureté brinell .....	22
II.3.8.1. 2. La dureté VICKERS(HV).....	22
II.3.8.1. 3. La dureté Rockwell (HR).....	23
II.4. Conclusion.....	24

## **Chapitre III : Procédures expérimentales**

III. 1. Introduction.....	25
III. 2. Equipements utilisés .....	25
III.2. 1. Eprouvettes .....	25
III.2. 2. Machines et outils .....	26
III.2.2. 1. Tour parallèle.....	26
III.2.2. 2. Fraiseuse.....	27
III.2.2. 3. Machine de torsion.....	27
III.2.2. 4. Machine de traction .....	28
III.2.2. 5. Four électrique.....	29
III.2.2. 6. Microduromètre.....	29

---

---

III.2.2. 7. Plaquette de coupe et porte-outils .....	30
III.2.2. 8. Microscope métallographique .....	30
III.2.2. 9. Autres équipements .....	31
III. 3. Protocole d'essai .....	31
III.3. 1. Conditions d'acceptation .....	31
III.3. 2. Essais de torsion.....	31
III.3. 3. Essais de traction .....	32
III. 4. Etude métallographique .....	33
III.4. 1. Le polissage par abrasion mécanique.....	33
III.4. 2. Le métayage est certainement .....	33
III.4. 3. La réalisation des études métallographiques.....	33
III.4. 4. Détermination des paramètres d'écrouissage et du coefficient de résistance .....	34
III. 5. Conclusion .....	34

#### **Chapitre IV : Résultats des essais**

IV. 1. Introduction.....	35
IV. 2. Essais de torsion.....	35
IV. 3. Relevés des essais .....	35
IV.3. 1. Essai à rupture .....	35
IV.3.1. 1. Evolution du couple en fonction de l'angle de torsion .....	37
IV.3.1. 2. Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de l'angle unitaire de torsion .....	37
IV.3.1. 3. Détermination du module de cisaillement .....	38
IV.3.1. 4. Evolution de la contrainte de Von Mises en fonction de la déformation de Hencky .....	39
IV.3. 2. Essai à 1/3 et à 2/3 de la rupture .....	40
IV.3.2. 1. Essai à 1/3 de la rupture .....	41
IV.3.2. 2. Essai à 2/3 de la rupture .....	42
IV.3. 3. Essai de traction.....	43
IV.3.3. 1. Relevés des essais .....	43
IV.3.3. 2. Calcul du module d'élasticité longitudinale E (ou module de Young).....	44
IV.3. 4. Test de dureté .....	44
IV.3. 5. Détermination du coefficient d'écrouissage et du coefficient de résistance .....	46
IV. 4. Conclusion .....	48
Conclusion générale .....	49
Références Bibliographiques .....	50

---

---

# Listes des Figures

---

## Chapitre I : Etude Bibliographique

<b>Figure. I. 1.</b> Les métaux et alliages les plus courants. ....	4
<b>Figure. I. 2.</b> Produits à base de polymères naturels et synthétiques [3]. ....	5
<b>Figure. I. 3.</b> Microstructure typique d'n surface céramique polie qu'illustre les grains monocristallins, les joints des grains et les pores [5]. ....	5
<b>Figure. I. 4.</b> Schéma de la structuration d'un matériau composite [8]. ....	6
<b>Figure. I. 5.</b> Béton armé (béton + armature acier), pneumatiques (élastomère + toile + fils d'acier).....	6

## Chapitre II : Caractérisation mécanique des matériaux

<b>Figure II. 1.</b> Eprouvette de fatigue [18].....	13
<b>Figure II. 2.</b> Courbes de fluage (1 : Fluage logarithmique ; 2 : Fluage restauration ; 3 : Fluage visqueux) [20]. ....	14
<b>Figure II. 3.</b> Eprouvette. Machine de traction. Courbe contrainte-déformation [16]. ....	15
<b>Figure II. 4.</b> Courbes conventionnelles typiques de traction. ....	15
<b>Figure II. 5.</b> Courbes de tractions des matériaux [20]. ....	16
<b>Figure II. 6.</b> Presse de compression. Schéma et principe. ....	17
<b>Figure II. 7.</b> Schéma de principe de l'essai de résilience. ....	19
<b>Figure II. 8.</b> L'essai de flexion trois points et l'essai de flexion quatre points. ....	19
<b>Figure II. 9.</b> L'essai de flexion trois points. ....	20
<b>Figure II. 10.</b> Essai de flexion quatre points, selon EN ISO 14125. ....	21
<b>Figure II. 11.</b> Principe de l'essai de dureté BRINELL. ....	22
<b>Figure II. 12.</b> Principe de l'essai de dureté VICKERS. ....	23
<b>Figure II. 13.</b> Principe de l'essai de dureté ROCKWELL (B) et ROCKWELL (C). ....	23
<b>Figure II. 14.</b> Schéma de l'essai de torsion .....	24

## Chapitre III : Procédures expérimentales

<b>Figure III. 1.</b> Eprouvettes pour la torsion.....	25
<b>Figure III. 2.</b> Eprouvettes pour la traction.....	25
<b>Figure III. 3.</b> Tour parallèle SN 40 C.....	26
<b>Figure III. 4.</b> Fraiseuse verticale (F V 1.5). ....	27
<b>Figure III. 5.</b> Machine de torsion. ....	28
<b>Figure III. 6.</b> Machine de traction. ....	28
<b>Figure III. 7.</b> Four électrique.....	29

---

---

<b>Figure III. 8.</b> Microduromètre digital.....	30
<b>Figure III. 9.</b> Plaquette et porte-outils utilisés.....	30
<b>Figure III. 10.</b> Microscope optique métallographique (Euromex).....	31
<b>Figure III. 11.</b> Eprouvette à la rupture. ....	32
<b>Figure III. 12.</b> Essais de traction.....	32
<b>Figure III. 13.</b> Surfaces polies.....	33

#### **Chapitre IV : Résultats des essais**

<b>Figure IV. 1.</b> Evolution du couple en fonction de l'angle de torsion. ....	37
<b>Figure IV. 2.</b> Evolution du contrainte en fonction de l'angle de torsion.....	38
<b>Figure IV. 3.</b> Zoom dans les petites déformations premier essai à rupture. ....	38
<b>Figure IV. 4.</b> Evolution de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de la déformation de Hencky. ....	39
<b>Figure IV. 5.</b> Zoom dans les petites déformations troisième essai à rupture.....	40
<b>Figure IV. 6.</b> Essai de torsion à 1/3 de la rupture.....	41
<b>Figure IV. 7.</b> Essai de torsion à 2/3 de la rupture.....	42
<b>Figure IV. 8.</b> Evolution de la contrainte en fonction de la déformation.....	44
<b>Figure IV. 9.</b> Evolution de dureté HV en fonction de pourcentage de déformation. ....	45
<b>Figure IV. 10.</b> Empreinte de test de dureté HV.....	46
<b>Figure IV. 11.</b> Transformation de la courbe Contraintes-déformations en $\ln(\sigma)$ et $\ln(\epsilon)$ . ....	48

---

---

# Listes des Tableaux

---

## Chapitre I : Etude Bibliographique

### Chapitre II : Caractérisation mécanique des matériaux

<b>Tableau II. 1.</b> Classement des matériaux en fonction de leur résistance à la compression.....	17
<b>Tableau II. 2.</b> Pénétrateurs Brinell, Rockwell, Vickers et Knoop [29-30].....	21

### Chapitre III : Procédures expérimentales

<b>Tableau III. 1.</b> Composition chimique réelle de l'alliage AlSi8Cu3.....	26
<b>Tableau III. 2.</b> Conditions de traitement thermique.....	29

### Chapitre IV : Résultats des essais

<b>Tableau IV. 1.</b> Résultats de Essai à rupture. ....	36
<b>Tableau IV. 2.</b> Valeurs théoriques extraites <a href="http://www.matweb.com">www.matweb.com</a> . ....	40
<b>Tableau IV. 3.</b> Résultats de Essai à 1/3 de la rupture.....	41
<b>Tableau IV. 4.</b> Résultats de Essai à 2/3 de la rupture.....	42
<b>Tableau IV. 5.</b> Evolution de la Contraintes en fonction de la déformations. ....	43
<b>Tableau IV. 6.</b> Les valeurs du module de Young.....	44
<b>Tableau IV. 7.</b> Evaluation de la dureté en fonction de pourcentage de déformation. ....	45
<b>Tableau IV. 8.</b> Les valeurs de $\ln(\sigma)$ en fonction de $\ln(\epsilon)$ . ....	47

---

# Introduction générale

# ***Introduction générale***

En raison de la diversité de la nature des matériaux et des méthodes de fabrication, leurs réponses aux contraintes extérieures ne sont pas les mêmes.

Pour comprendre précisément le comportement des structures, il est nécessaire d'étudier comment les propriétés des matériaux évoluent sous l'influence de ces contraintes mécaniques et thermiques.

Les tests mécaniques actuels constituent un outil essentiel pour déterminer les propriétés des matériaux telles que le module d'Young, la limite d'élasticité et le module de cisaillement, dans diverses conditions. Grâce à ces tests, nous pouvons mesurer avec précision les propriétés physiques des matériaux, ce qui nous aide à prédire comment ils se comporteront lorsqu'ils seront exposés à différentes pressions.

Le premier chapitre passe en revue des recherches bibliographiques complètes sur les matériaux, couvrant leurs différents types et leurs diverses propriétés, notamment physiques, thermiques, mécaniques, électriques, technologiques et économiques. De plus, nous discutons du comportement mécanique des matériaux et de la manière dont ils sont affectés par différentes contraintes, fournissant ainsi une base de connaissances pour comprendre les performances des matériaux dans des applications pratiques.

Dans le deuxième chapitre, nous commençons par une explication détaillée du phénomène de déformation et de la manière dont il se produit dans les matériaux sous l'influence de différentes charges.

Dans ce contexte, nous passons en revue les expériences mécaniques les plus importantes utilisées dans les laboratoires scientifiques, telles que les expériences de torsion, de traction, de compression, de flexion et de cisaillement, en plus des tests de flexibilité et de dureté. De plus, nous expliquons les fondements théoriques de chaque expérience et le protocole expérimental suivi pour garantir l'exactitude des résultats obtenus.

Dans le troisième chapitre, nous avons concentrés sur l'équipement de base utilisé pour effectuer les essais mécaniques et les protocoles expérimentaux suivis. Par exemple, nous expliquons les outils et équipements nécessaires aux essais de torsion et de traction sur l'alliage d'aluminium  $\text{AlSi8Cu3Fe2}$ , ainsi que la manière de réaliser ces essais et d'analyser les résultats conformément aux normes standards.

Dans le quatrième chapitre, nous discutons les résultats obtenus à partir d'expériences de torsion, de traction et de dureté, en plus de l'étude métallographique de l'échantillon. Nous analysons ensuite comment ces expériences affectent les propriétés de l'alliage étudié, en nous concentrant sur les changements de dureté et de résistance sous différents niveaux de contrainte.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale et une liste de références bibliographiques consultées dans le cadre de ce travail.

# Chapitre I

## Etude Bibliographique

## **I.1. Introduction**

L'étude des matériaux et de leur comportement mécanique est essentielle pour les ingénieurs mécaniciens [1].

Comprendre comment les matériaux réagissent sous contrainte est crucial pour concevoir des structures efficaces. Les essais mécaniques fournissent les données nécessaires pour évaluer la résistance, la durabilité et d'autres propriétés clés des matériaux utilisés dans la fabrication. Aujourd'hui, avec les demandes croissantes en termes de qualité, de précision et d'efficacité énergétique, une compréhension approfondie des processus de formage et des lois régissant le comportement des matériaux devient indispensable. Cela englobe la prise en compte de facteurs tels que la vitesse de contrainte, la température et les interactions complexes au niveau de la microstructure des matériaux.

## **I.2. Historique des matériaux**

L'histoire des matériaux remonte à la préhistoire, lorsque les premiers hominidés ont commencé à utiliser des matériaux naturels, tels que la pierre, le bois et la terre, pour fabriquer des outils et des armes. Au fil du temps, l'homme a appris à manipuler ces matériaux pour en améliorer les propriétés et en développer de nouveaux.

Les premiers grands progrès dans le domaine des matériaux ont eu lieu avec l'invention du bronze et du fer. Ces deux alliages, constitués de métaux naturels, étaient plus solides et plus durables que la pierre, ce qui a permis aux humains de fabriquer des outils et des armes plus efficaces.

Au cours des siècles suivants, l'homme a développé une multitude de nouveaux matériaux, notamment le verre, le ciment, le papier et le plastique. Ces matériaux ont permis de révolutionner de nombreux domaines, tels que la construction, l'industrie et la médecine.

Aujourd'hui, la recherche sur les matériaux se poursuit à un rythme effréné. Les scientifiques développent de nouveaux matériaux aux propriétés toujours plus étonnantes, tels que les super matériaux, les matériaux intelligents et les matériaux biocompatibles.

## **I.3. Le « Matériau » C'est quoi ?**

Un matériau est une substance, une matière destinée à être mise en forme. Un objet peut être fabriqué avec des matériaux différents. Un même matériau peut être utilisé pour fabriquer des objets différents.

On peut classer les matériaux en 4 grandes familles :

- ❖ Les métaux.
- ❖ Les polymères.
- ❖ Les céramiques.
- ❖ Les composites.

### I.3. 1. Les matériaux métalliques

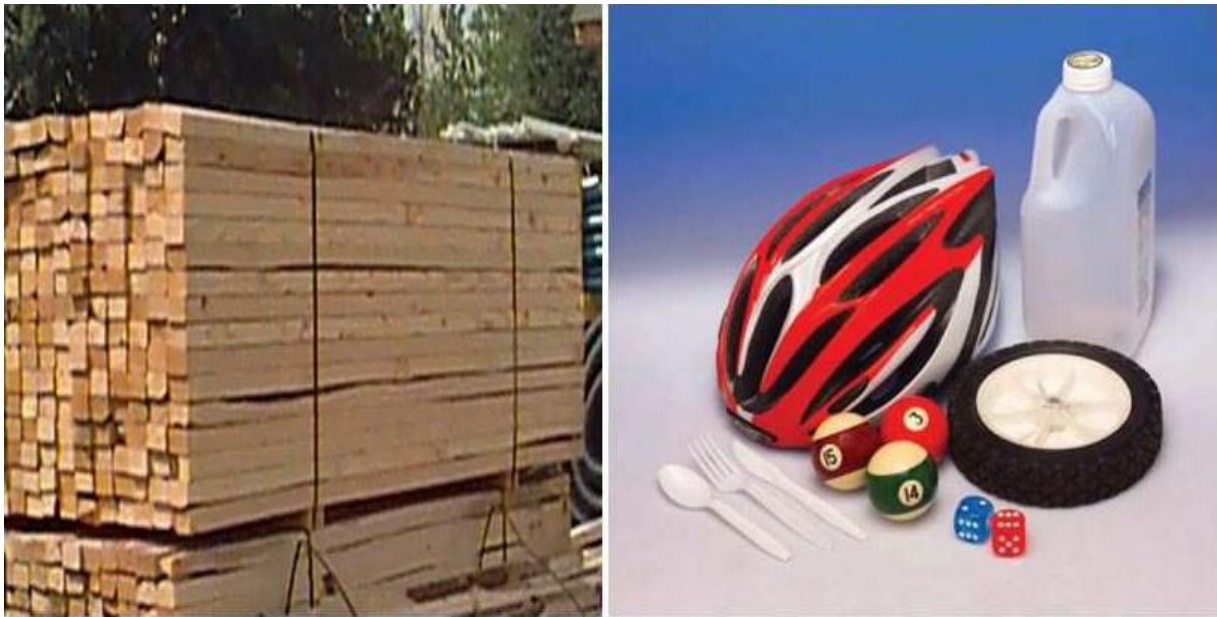
Métaux purs (cuivre, fer, aluminium, etc.) et alliages. Un alliage est un matériau fabriqué à partir de deux ou de plusieurs métaux et d'éléments chimiques. Par exemple, le bronze est un alliage du cuivre et de l'étain qui peut contenir aussi du manganèse et du silicium.



Figure. I. 1. Les métaux et alliages les plus courants.

### I.3. 2. Les polymères

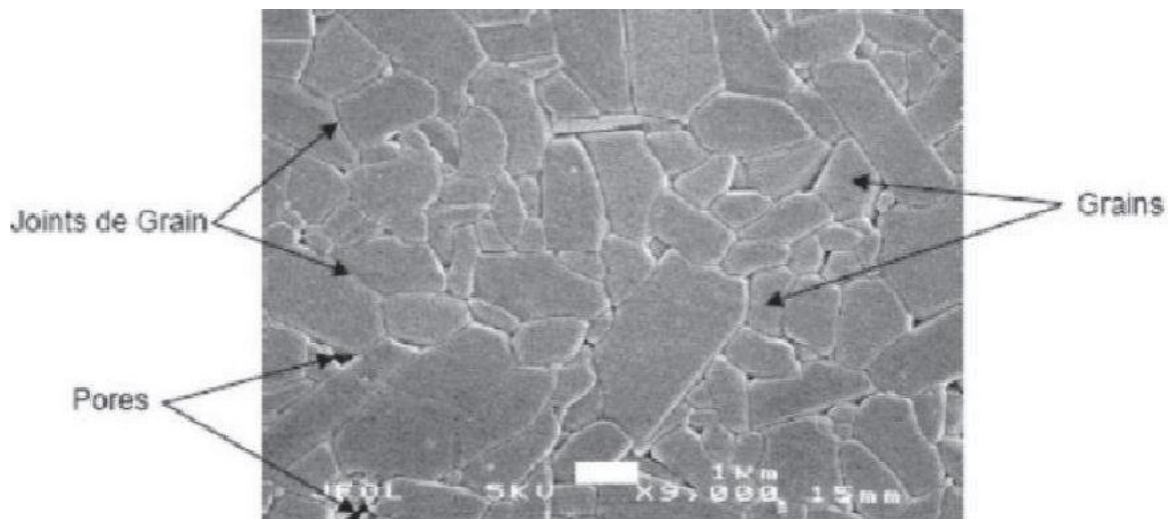
Le mot « polymère » vient du grec « poly » signifiant plusieurs et « meros » parties ou unités. En effet, un matériau macromoléculaire ou polymère est constitué de longue chaîne les unités de répétition sont toutes les mêmes (homopolymère) ou des natures différentes (Copolymère). La cohésion des atomes sur une même chaîne est assurée par une liaison Chimique forte, tandis que les liaisons interchaîne sont plus faibles. La présence de liaisons faibles et fortes apporte aux matériaux polymères des propriétés physicochimiques Particulières (Figure I. 2.) [2].



**Figure. I. 2.** Produits à base de polymères naturels et synthétiques [3].

### I.3. 3. Les céramiques

Le terme céramique échelonné souvent des objets rustiques comme les argiles, les briques et les tuiles mais le terme céramique signifié plus généralement un solide qui n'est ni un métal ni un polymère. Une céramique est un matériau solide de synthèse qui nécessite souvent des traitements thermiques pour son élaboration. La plupart des céramiques modernes sont préparées à partir des poudres consolidées (mise en forme) et sont densifiées par un traitement thermique (le frittage) [4].



**Figure. I. 3.** Microstructure typique d'n surface céramique polie qu'illustre les grains monocristallins, les joints des grains et les pores [5].

La plupart des céramiques sont des matériaux poly-cristallins, c'est à dire comportant un grand nombre de microcristaux bien ordonnés (grains) reliés entre eux par des joints des grains comme illustré sur la figure I.3. [5].

### I.3. 4. Les composites

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est complémentaire et permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue appelée matrice [6].

#### I.3.4. 1.Principaux constituants

Les principaux constituants sont le renfort et la matrice. Le renfort a pour rôle d'apporter au matériau composite ses performances mécaniques élevées. La matrice qu'on appelle aussi liant, son rôle est de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de Protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures [7].

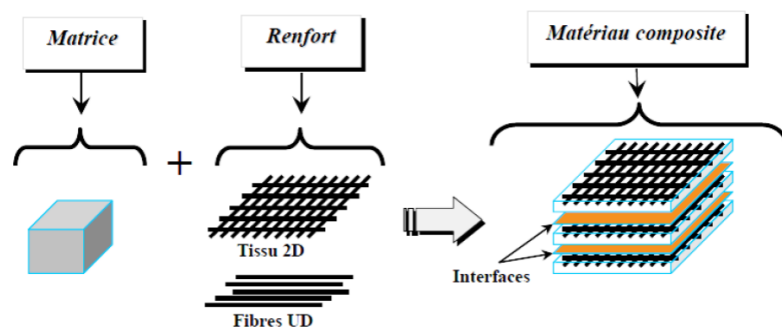


Figure. I. 4. Schéma de la structuration d'un matériau composite [8].

#### I.3.4. 2.Produits en composite



Figure. I. 5. Béton armé (béton + armature acier), pneumatiques (élastomère + toile + fils d'acier)

Les produits en composite sont présents dans une grande variété d'industries et d'applications quotidiennes, en raison de leurs propriétés uniques qui combinent les avantages de plusieurs matériaux distincts.

## **I.4. Propriétés des matériaux**

Les propriétés suivantes font une partie de toutes les propriétés des matériaux [9].

### **I.4. 1. Propriétés physiques**

La couleur, la masse volumique, le point de fusion, la conductibilité et le coefficient thermique de dilatation. La densité de la majorité des métaux dépasse 7000 kg/m<sup>3</sup>, celle des métaux légers (Al, Mg) est inférieure à 3000 kg/m<sup>3</sup>. Il est important de connaître le point de fusion des métaux pour pouvoir les traiter à chaud afin d'obtenir des éléments coulés [9]. La dilatation produite par l'échauffement est caractérisée par le coefficient de dilatation linéaire ou volumique. Ces coefficients sont pris en compte lors de toute étude de construction métallique puisque des désordres peuvent survenir à la suite d'une variation de température [9].

### **I.4. 2. Propriétés thermiques**

Les propriétés thermiques des matériaux décrivent leur capacité à transférer la chaleur. Elles comprennent :

- ❖ Conductivité thermique : la conductivité thermique est la capacité d'un matériau à transférer la chaleur.
- ❖ Capacité calorifique : la capacité calorifique est la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'un matériau d'un degré.
- ❖ Point de fusion : le point de fusion est la température à laquelle un matériau solide fond.
- ❖ Point de solidification : le point de solidification est la température à laquelle un matériau liquide se solidifie.

### **I.4. 3. Propriétés mécaniques**

Parmi les résistances mécaniques, on peut citer : la résistance, la dureté, la résilience, la fatigue et le fluage.

- ❖ La résistance mécanique est la capacité d'un métal de résister aux efforts extérieurs. Suivant la nature de ces efforts on distingue : la résistance à la traction, à la compression, à la flexion, et à la torsion qui sont caractérisées par les charges limites par lesquelles le métal se rompt.

- ❖ La dureté d'un métal détermine son pouvoir de résister à l'enfoncement d'une bille en acier ou d'un cône.
- ❖ La résilience est caractérisée par la quantité de travail nécessaire à la rupture d'une éprouvette subissant des chocs.
- ❖ La fatigue est la propriété de soumettre un métal aux effets alternés, répétés et conjugués d'efforts externes (statique ou dynamique).
- ❖ Le fluage caractérise la capacité d'un métal à se déformer à la suite d'une charge constante. Il peut donc conduire à l'accroissement des flèches des éléments des constructions et à la perte de stabilité [9].

#### **I.4. 4. Propriétés électriques**

Les propriétés électriques des matériaux décrivent leur capacité à conduire l'électricité. Elles comprennent :

- ❖ Conductivité électrique : la conductivité électrique est la capacité d'un matériau à conduire l'électricité.
- ❖ Résistance électrique : la résistance électrique est la capacité d'un matériau à s'opposer au passage du courant électrique.
- ❖ Diélectrique : un matériau diélectrique est un matériau qui ne conduit pas l'électricité.

#### **I.4. 5. Propriétés technologiques**

Sont caractérisées par la possibilité d'usinage des métaux, ce qui est conditionnée par leur plasticité [9].

#### **I.4. 6. Propriétés économiques**

Les propriétés économiques des matériaux décrivent leur coût, leur disponibilité et leur recyclable. Elles comprennent :

- ❖ Coût : le coût d'un matériau est important pour sa sélection.
- ❖ Disponibilité : la disponibilité d'un matériau peut être limitée par des facteurs tels que la rareté des ressources naturelles ou les restrictions commerciales.
- ❖ Recyclabilité : la recyclabilité d'un matériau permet de réduire les déchets et de protéger l'environnement.

## **I.5. Comportement mécanique de matériaux**

Ce sont des propriétés des propriétés relatives aux aspects de résistance aux efforts, des déformations résultantes des efforts, des déformations résultantes des efforts, des contacts entre solides (chocs, glissement...) [10].

### **I.5. 1. La rigidité**

C'est l'aptitude d'un matériau à sa déformation de façon élastique (et donc réversible).

La rigidité est définie par le module d'élasticité  $E$  plus le matériau est rigide plus la force qu'on peut lui appliquer est importante.

### **I.5. 2. Elasticité**

C'est l'aptitude d'un matériau à se déformer sous une charge (un effort) et de retourner à son état initial après décharge.

### **I.5. 3. Résistance maximale**

C'est la charge maximale que peut supporter un matériau la charge peut être effort en traction le couple en torsion.

### **I.5. 4. Limite élastique**

C'est la charge maximale que peut supporter un matériau pour se déformer d'une façon élastique.

### **I.5. 5. Fragilité**

C'est la facilité avec laquelle on peut fracturer un matériau fragile se déformer plastiquement.

### **I.5. 6. Ténacité**

C'est l'aptitude d'un matériau à absorber l'énergie lors d'une déformation plastique. C'est une combinaison entre la bonne résistance à la rupture et la bonne ductilité une des façons de définir la ténacité est l'aire de la surface engendrée par la courbe de traction la ténacité peut être mesurée par l'essai de résilience « Charpy ».

### **I.5. 7. L'écrouissage**

#### **I.5.7. 1. Mécanisme et effet de l'écrouissage**

La déformation plastique d'un matériau cristallin modifie ses propriétés de par son influence sur sa structure interne ; ces évolutions de propriétés et de microstructure, appelées écrouissage, jouent un rôle très important pour les caractéristiques mécaniques du matériau. En effet, le durcissement par écrouissage est largement utilisé pour augmenter les caractéristiques mécaniques

de nombreux alliages métalliques.

Au cours d'un essai de traction, la consolidation d'un matériau est le résultat d'un mouvement et d'une multiplication des dislocations qui balayent les plans de glissement et s'entrecroisent entre elles en augmentant leur densité [11].

L'écroutissage c'est l'effet des interactions entre dislocations qui augmente avec la multiplication des dislocations au cours de la déformation plastique. Cet effet est responsable du fort durcissement des alliages de structure cubique à faces centrées [12].

### **I.5.7. 2. Influence de l'écroutissage sur les caractéristiques mécaniques**

L'écroutissage a une influence sur les propriétés mécaniques des aciers. Les effets de ce phénomène se traduisent par l'amélioration des caractéristiques telles que [13] :

- ❖ Sa résistance à la traction augmente et semble tendre vers une limite.
- ❖ Sa limite d'élasticité croît plus rapidement que la résistance et finit par tendre vers la même valeur l'allongement baisse rapidement et ne décroît par la suite que lentement.

### **I.5. 8. La dureté**

La dureté quantifiée résistance d'un matériau à la pénétration sous une certaine charge  $F$ , est une propriété mécanique qui dépend non seulement des caractéristiques de matériau, mais aussi de la nature et de la forme de pénétrateur et du mode de pénétration. Donnée en méga- pascal (MPa) puisqu'elle est le rapport d'une force en Newton (N) sur une surface calculée en millimètres carrés (mm<sup>2</sup>).

## **I.6. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons effectué une étude bibliographique sur les différents types de matériaux mécanique, leurs caractéristiques et leur comportement mécanique sous diverses influences.

Nous avons commencé par une présentation des grandes catégories de matériaux. Ensuite, nous avons approfondi les propriétés mécaniques de ces matériaux.

Enfin l'impact des influences externes sur le comportement mécanique des matériaux a également été discuté.

# Chapitre II

## Caractérisation mécanique des matériaux

## II.1. Introduction

Le choix des matériaux pour une application industrielle donnée exige une connaissance et une maîtrise de ses caractéristiques mécaniques. A ce stade, la caractérisation mécanique des matériaux repose sur l'étude de son comportement vis-à-vis les sollicitations extérieures qui engendrent des contraintes et des déformations. Pour cela, on recourt à un certain nombre d'essais normalisés. Ces derniers, permettent de déterminer les grandeurs physiques caractérisant le comportement mécanique des matériaux testés [14].

Les essais mécaniques sont l'étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux, du module d'Young à la limite d'élasticité, en passant par la ténacité ou la résistance à la fatigue, et ce dans des conditions variables, par exemple de température ou de vitesse de sollicitation.

Le propos de ce document est de présenter les techniques expérimentales les plus couramment utilisées, aussi bien dans les laboratoires universitaires qu'industriels, pour caractériser le comportement mécanique des matériaux. Les techniques abordées seront : les essais unis-axiaux (quasi-statiques et dynamiques), les essais multiaxiaux, les mesures d'indentation, les essais de fatigue et les techniques gravitant autour du phénomène de rupture. En outre, les annexes apportent un complément sur les méthodes de mesure de la déformation et de la contrainte.

Il s'agit ici de donner les grandes idées et les modes opératoires propres à chacune des techniques abordées sans entrer dans trop de détails [15].

## II.2. Contraintes / déformations

Robert Hooke (1635-1703) a empiriquement expliqué comment les matériaux solides réagissent aux forces à une échelle macroscopique : lorsqu'une force est appliquée sur un matériau, celui-ci se déforme tout en restant élastique. Il a formulé la loi de Hooke, qui stipule que l'allongement d'un matériau est proportionnel à la force appliquée.

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (\text{II.1})$$

Cette loi n'est rigoureusement vraie que pour les céramiques, le verre, la plupart des minéraux et les métaux les plus durs. Mais, dans quelle mesure le comportement d'une structure dépend de son matériau constitutif plutôt que de ses dimensions et de sa forme ?

Nous avons besoin de critères objectifs qui soient indépendants de la taille et de la forme du matériau. Lorsque nous étudions les conditions qui prévalent en chaque point d'un matériau sous l'effet des forces mécaniques, nous entrons dans les concepts de contrainte et de déformation. La définition claire et utilisable de ces deux notions est due à Augustin CAUCHY (1789- 1857). Quand on soumet un corps à l'action de forces extérieures, des contraintes s'établissent par réaction, à l'intérieur de ce corps. À ces contraintes sont associées des déformations. Pour s'affranchir de la dépendance des dimensions du matériau, les paramètres contraints et déformation sont utilisés.

La contrainte (ou stress) détermine avec quelle intensité les atomes du matériau sont écartés les uns des autres ou comprimés les uns sur les autres. Cette contrainte est, pour une traction simple, la force qui agit sur une unité de surface du matériau.

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (\text{II.2})$$

Elle se mesure en Pascal (Pa).

La déformation indique dans quelles proportions les liaisons inter atomiques (à l'échelle microscopique) et la structure elle-même (l'objet, à l'échelle macroscopique) ont été déformées. La déformation, pour une traction simple, est le rapport de l'allongement à la longueur initiale [16].

$$\varepsilon = \frac{(L - L_0)}{L_0} \quad (\text{II.3})$$

## II.3. Caractérisation des propriétés mécaniques

Afin de caractériser le comportement mécanique d'un ou de plusieurs matériaux soumis à des forces extérieures qui engendrent des contraintes et des déformations, on a recours à un certain nombre d'essais mécaniques. Ces essais mécaniques doivent mettre en jeu des états de contrainte simples et connus, d'interprétation facile et non équivoque. De plus ils doivent être reproductibles. C'est pourquoi des organismes nationaux et internationaux normalisent ces essais (AFNOR, ISO, CEN). Parmi ces essais mécaniques on distingue :

### II.3.1. Essais de fatigue

#### II.3.1.1. Généralité sur la fatigue

Lorsque l'on soumet un métallique à des cycles répétés, il subit des modifications de microstructure regroupées sous le terme général d'endommagement par fatigue, ou plus simplement de fatigue. Cet endommagement ne se signale par aucune modification

macroscopiquement décelable, et la rupture peut intervenir à des niveaux de contraintes peu élevés, souvent inférieur à la limite élastique, mais dont la répétition constitue le danger. La capacité de résistance à la fatigue d'un matériau s'appelle endurance [17].

Les essais de fatigue caractérisent la capacité d'un matériau à résister à une sollicitation cyclique. Si le nombre de cycles est petit, on parlera de fatigue oligocyclique.

Il existe plusieurs modes de sollicitations possibles : flexion, efforts axiaux (traction et/ou compression) et torsion, et des modes combinés, statiques et dynamiques (torsion / flexion, tension / torsion, etc.) [18].

### II.3.1.2. Eprouvettes et essai

Les éprouvettes peuvent être de géométries variées, en fonction de ce que l'on cherche à caractériser. Classiquement, elles peuvent être à section circulaire ou parallélépipédique, et d'épaisseur constante ou variable. Les plus générales sont les éprouvettes toroïdales, à section circulaire variable, comme celle présentée sur la figure II.1. Enfin, les éprouvettes peuvent être lisses ou entaillées. L'état de surface doit être particulièrement soigné et répétitif, et l'usinage ne doit pas introduire de contraintes résiduelles importantes. Comme on peut le voir, la surface de l'éprouvette est parfaitement polie pour retarder au maximum la rupture par fatigue.

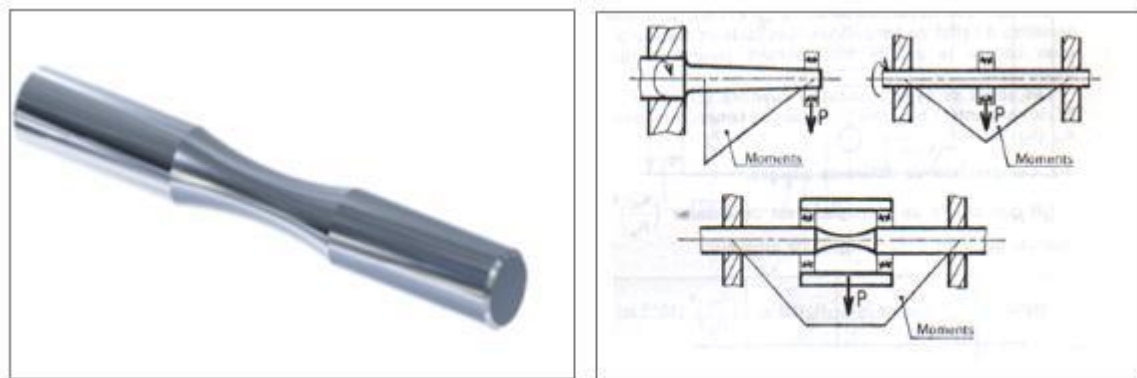


Figure II. 1. Eprouvette de fatigue [18].

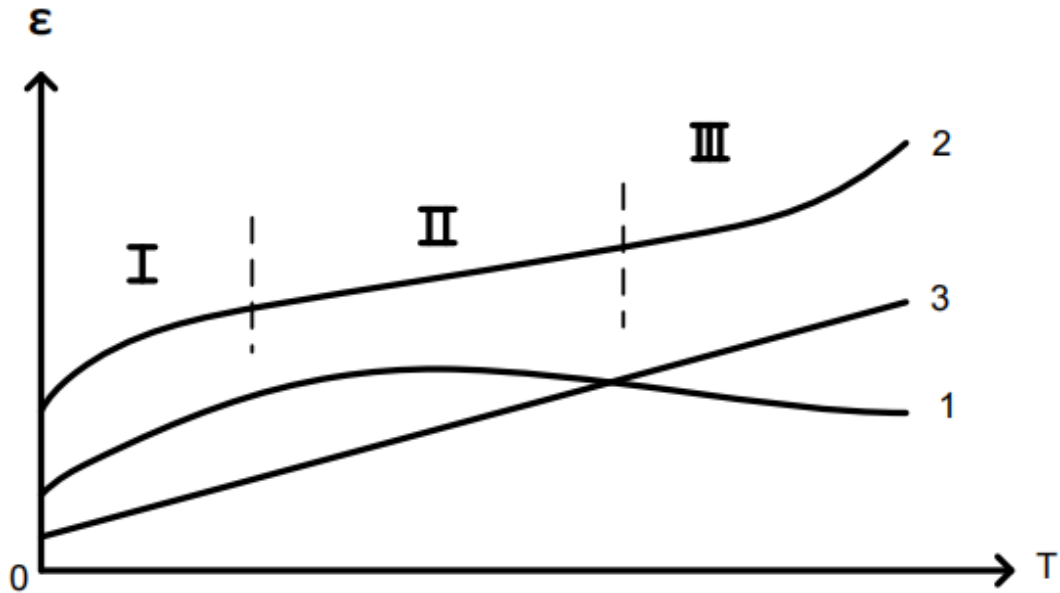
### II.3.2. Essai de fluage

Le fluage est la déformation isotherme sous contrainte constante en fonction du temps.

Le fluage d'un matériau se produit à haute température et correspond à un régime de déformation lente, sous charge constante, la contrainte étant potentiellement inférieure à la limite d'élasticité. Ces essais intéressent donc les domaines où les matériaux sont soumis à des températures élevées, tels que l'aéronautique ou le nucléaire [19].

Les essais de fluage nécessitent l'usage d'une machine de mise en charge, d'un four et d'un

extensomètre. Dans le cas des métaux, les essais de fluage sont le plus souvent effectués en traction, quoique des essais de compression sont également possibles pour des matériaux fragiles, le risque d'endommagement étant plus limité dans ce mode (les fissures perpendiculaires à l'axe de sollicitation ne pouvant pas se développer) [18].



**Figure II. 2.** Courbes de fluage (1 : Fluage logarithmique ; 2 : Fluage restauration ; 3 : Fluage visqueux) [20].

Les courbes de fluage représentent la variation de l'allongement en fonction du temps. Leur aspect général est schématisé sur la Figure.II.2.

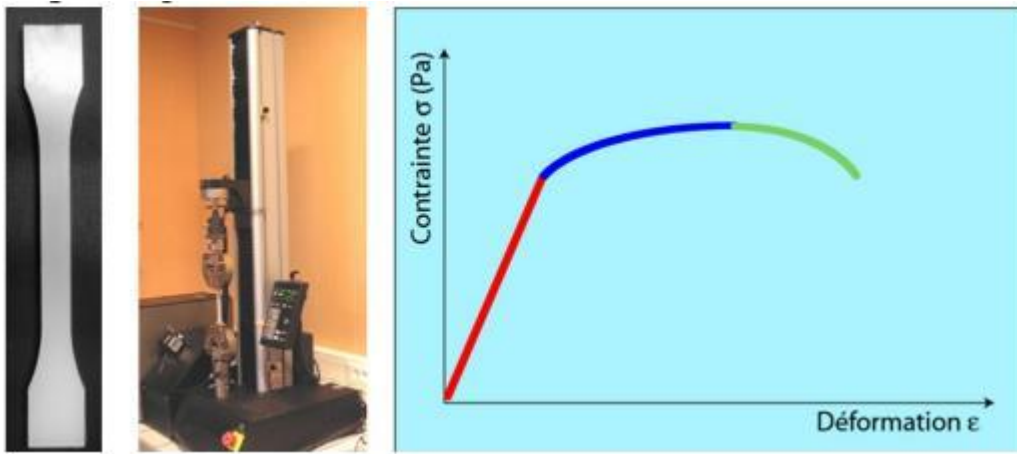
La courbe n° 1 est caractéristique du fluage logarithmique qui se manifeste aux températures relativement basses ( $T < 0,3 T_f$ ) et ne conduit pas à la rupture.

La courbe n° 2 est relative au fluage restauration ( $T > 0,3 T_f$ ) très largement gouverné par des processus de diffusion.

La courbe n° 3 correspond au fluage visqueux (ou fluage Nabarro), observé au voisinage de la température de fusion pour des contraintes faibles.

### II.3.3. Essai de traction

L'essai le plus fréquemment utilisé afin de déterminer le comportement mécanique d'un matériau est l'essai de traction. Cet essai est caractérisé par sa facilité de mise en œuvre et par la richesse des informations fournies. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que la limite élastique, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction. L'essai permet, en outre, l'étude et l'identification des mécanismes physiques de déformation plastique.

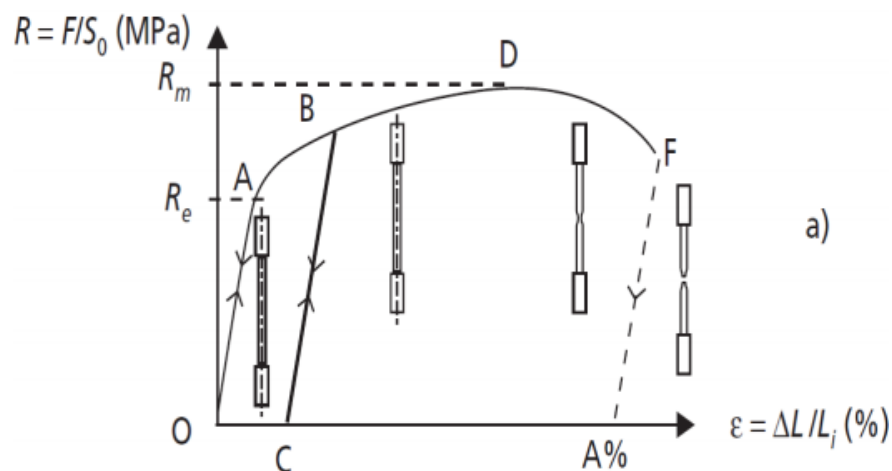


**Figure II. 3.** Eprouvette. Machine de traction. Courbe contrainte-déformation [16].

On exerce une force de traction sur un barreau de dimension standardisée, jusqu'à sa rupture, en suivant un processus de mise en charge à une vitesse de déformation constante.

L'éprouvette d'essai est prélevée dans le matériau à caractériser et usinée à des dimensions normalisées, afin d'assurer une meilleure comparaison des essais effectués dans différents laboratoires. Pour chaque type de matériau, il existe un type d'éprouvette [16].

### II.3.3. 1. Courbe de traction



**Figure II. 4.** Courbes conventionnelles typiques de traction.

Avec :

- OA : allongement élastique linéaire, réversible. Au-delà du point A : déformation plastique permanente + déformation élastique. La suppression de la force appliquée (BC) laisse apparaître un allongement plastique rémanent (OC). Une remise en charge conduit à une nouvelle limite d'élasticité (CB).
- $R_e = F_e / S_0$  : limite apparente d'élasticité (MPa) :
- $R_p 0.2$  : Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % d'allongement plastique ; sa

détermination nécessite souvent l'usage d'un extensomètre.

- AD : allongement élastique + allongement plastique réparti.
- $Rm = Fm/S_0$  : résistance à la traction (MPa).
- DF : apparition et progression d'une striction (réduction de section localisée) dans les matériaux ductiles. En F : la rupture de l'éprouvette.
- $A\% = \frac{\Delta L_u}{L_i}$  : allongement pour cent après rupture (%).
- $E = Re/\epsilon_e$  : module de Young. En pratique, seule l'utilisation d'un dispositif extensométrique très précis permet d'exploiter la pente de la montée élastique pour la mesure de E. [14]

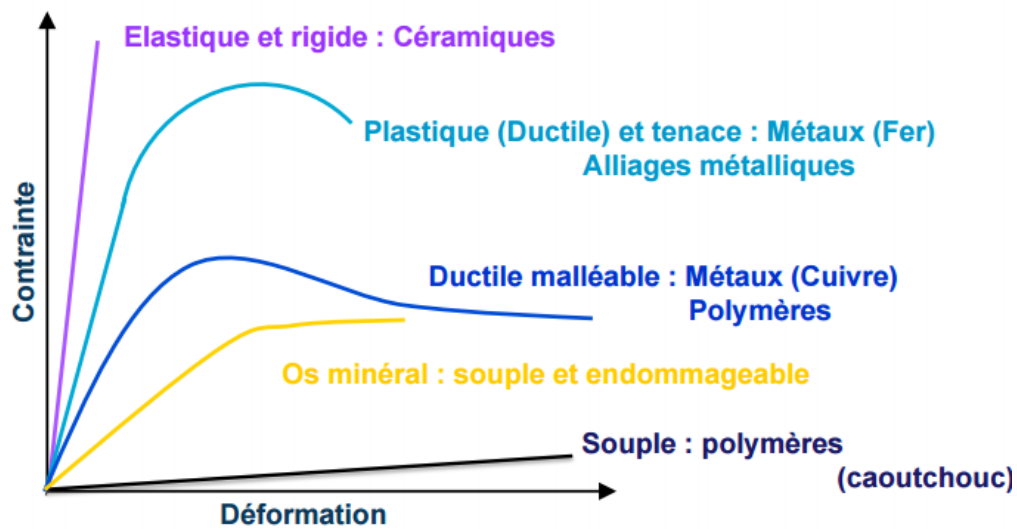
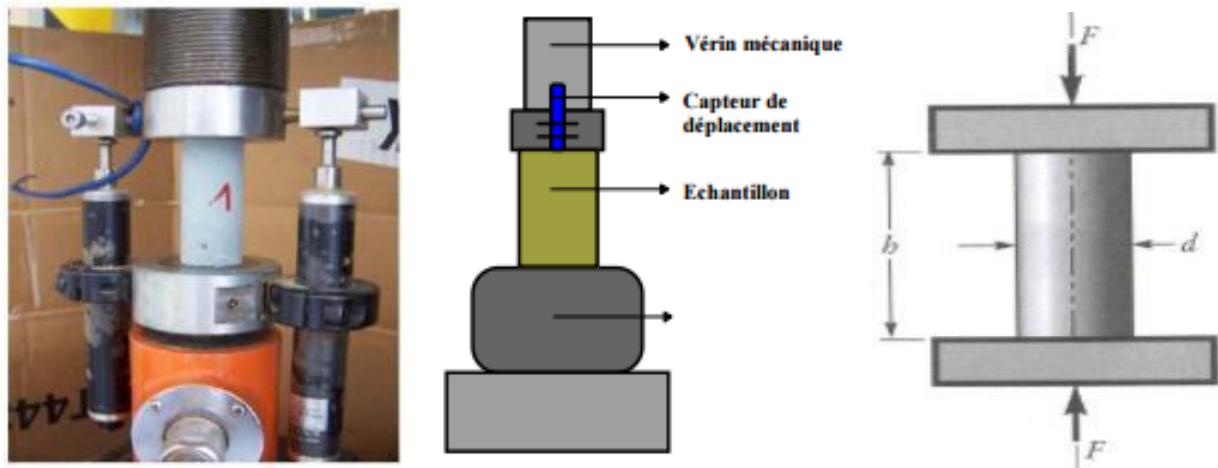


Figure II. 5. Courbes de tractions des matériaux [20].

### II.3.4. Essai de compression

L'essai de compression consiste à soumettre une éprouvette de forme cylindrique, placée entre les plateaux d'une presse, à deux forces axiales opposées. Si le matériau étudié est ductile, la rupture ne peut être atteinte avec ce test. L'essai de compression est surtout utilisé pour déterminer la contrainte de rupture des matériaux fragiles (comme les céramiques) qui sont difficiles à usiner pour un essai de traction [16].



**Figure II. 6.** Presse de compression. Schéma et principe.

L'échantillon doit présenter de préférence une élongation (rapport hauteur sur diamètre) de 2 à 2,5. La dimension usuelle dans le laboratoire est de 80 mm de hauteur par 40 mm de diamètre. Dans certains cas (manque de matériaux, qualité de la Pièce, ...) les échantillons peuvent avoir des dimensions inférieures pour pouvoir réaliser les essais. Les échantillons sont préparés par forage au diamètre 40 mm (ou inférieur, préciser le cas de l'expertise en cours si différent), découpage et rectification pour l'obtention de surfaces strictement parallèles.

Au cours de l'essai, un enregistreur permet de relever l'évolution de la contrainte axiale grâce à un capteur de force ou de pression, ainsi que celle des déformations soit par des capteurs de déplacement soit par des jauges de déformation.

Cet enregistrement permet de déterminer différentes caractéristiques mécaniques selon le besoin : la résistance à la compression uni-axiale  $R_c$ , la limite élastique  $R_e$ , le module d'Young  $E$  et le coefficient de Poisson  $\nu$  [21].

Matériaux	La résistance à la compression
Acier	200-300
Titane	100-150
Aluminium	70-100
Granit	200-300
Béton	20-50

**Tableau II. 1.** Classement des matériaux en fonction de leur résistance à la compression.

### II.3.5. Essai de cisaillement

Les essais de cisaillement utilisés pour l'étude des matériaux composites permettent de

connaître le comportement au cisaillement (contrainte et module de cisaillement) soit selon une sollicitation dans le plan des couches (cisaillement inter-laminaire), soit selon une sollicitation perpendiculaire aux couches (cisaillement intra - laminaire) [22]. Ces essais sont très souvent difficiles à mettre en œuvre, portant sont très importants pour l'étude d'un matériau composite. Plusieurs méthodes d'essais existent et chacune présente quelques inconvénients.

Les contraintes de cisaillement, dans les composites (unidirectionnels), jouent un rôle important sur la dégradation des interfaces et par là même sur la tenue en service de ces matériaux.

### II.3.6. Essais de résilience

Les essais de résilience permettent de caractériser la fragilisation d'un matériau. Ils consistent à rompre une éprouvette entaillée (l'entaille a pour but de fragiliser le matériau) éprouvette Charpy sous l'impact d'un "mouton pendule". On mesure l'énergie absorbée par la rupture, ce qui permet de remonter à la résilience du matériau (énergie absorbée ramenée à la surface (en J/cm<sup>2</sup>)). Cet essai permet également d'accéder au taux de rupture fragile (cristallinité - évalué par l'opérateur ou par analyse d'images) ou à l'expansion latérale des éprouvettes suite à la rupture [23].

#### II.3.6. 1. Principe de l'essai de résilience

L'essai consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie  $W$  absorbée dont on déduit la résilience. La résilience est l'énergie exprimée en joules par cm<sup>2</sup>, nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette.

$$\text{Résilience} = \frac{\text{énergie absorbée par la rupyure } W \text{ (Joule)}}{\text{section au droit de l'entaille } (Cm^2)} \quad (\text{II.4})$$

#### II.3.6. 2. Machine d'essai

Un couteau fixé sur un marteau oscille dans plan vertical autour d'un axe O. Une partie de l'énergie emmagasinée dans la chute du pendule est utilisée pour rompre l'éprouvette. Le centre de gravité du pendule est toujours très voisin de l'arête du couteau du pendule (figure II.7).

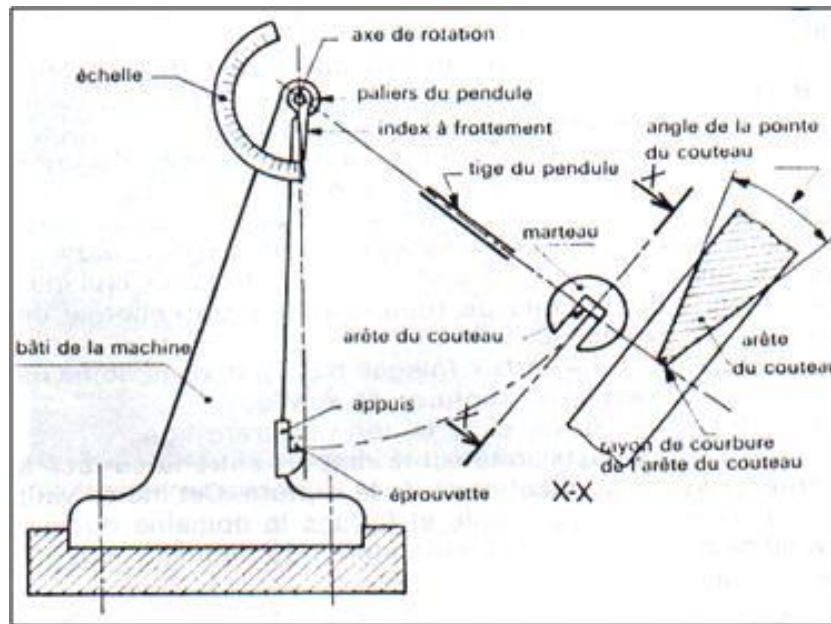


Figure II. 7. Schéma de principe de l'essai de résilience.

### II.3.7. Essai de flexion

Une poutre est sollicitée en flexion simple lorsque toutes les forces appliquées à la poutre, que ce soient les forces à distance ou les forces élémentaires de liaison, sont perpendiculaires à la ligne moyenne, et soit situées dans le plan de symétrie, soit réparties symétriquement par rapport à celui-ci, ou concentrées en un point ou réparties suivant une loi [24].

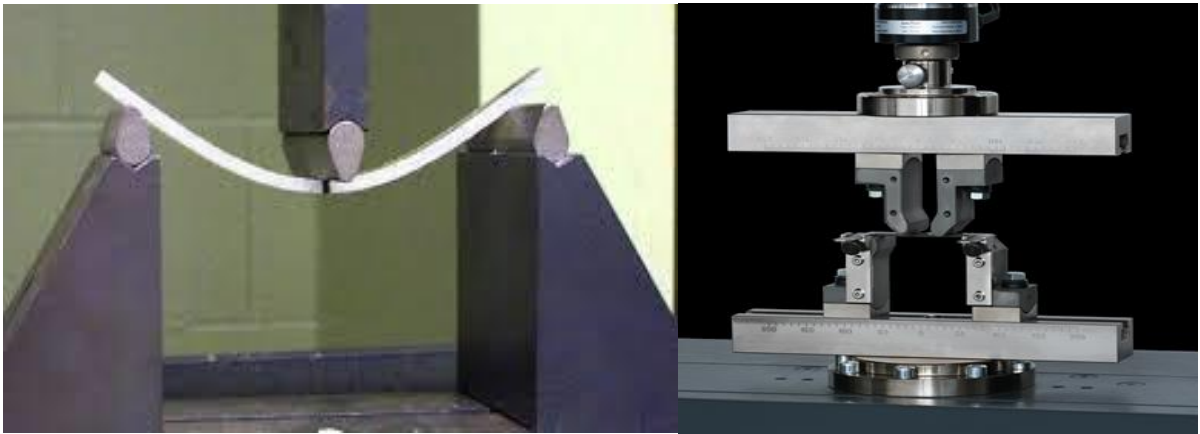


Figure II. 8. L'essai de flexion trois points et l'essai de flexion quatre points.

#### II.3.7. 1. Les éprouvettes

En général, l'éprouvette utilisée en flexion trois points et en flexion quatre points sont identiques. Leur forme est prismatique et leur dimensionnement est régi par des normes spécifiques à chaque matériau. Toutes ces normes obéissent à un certain nombre de principes dont les plus importants sont [25] :

La longueur  $L$  et l'épaisseur  $h$  de l'éprouvette doivent être dans un rapport fixe :

- ❖  $L_{min} = 20.h$  (ISO 178 relatives aux matières plastiques rigides).
- ❖  $L_{min} = (16 + 1).h$  (EN 63 relatives aux matières plastiques renforcées au verre textile).
- ❖  $L_{min} = 4.h$  (NFP 18-401 pour les bétons).

La largeur  $b$  de l'éprouvette peut être quelconque et sa valeur est comprise entre 10 et 25

- ❖  $C_m$  pour les produits sidérurgiques. Pour des matériaux ayant des fibres grossières, la
- ❖ Largeur doit être comprise entre 20 et 50 cm spécifiques à la norme ISO 178.

### II.3.7. 2. Essais de flexion trois points

La déformation d'un barreau rectangulaire reposant sur deux appuis par l'intermédiaire d'un poinçon (ou panne) appliquée à égale distance des appuis et se déplaçant à vitesse constante, est la méthode la plus couramment rencontrée, c'est l'essai de flexion 3 points, elle fait l'objet des normes NF EN ISO 178, ASTM D 790, D 5934 et D 5943 pour les matériaux polymères et s'appuie sur un matériel et un mode opératoire simples [26].

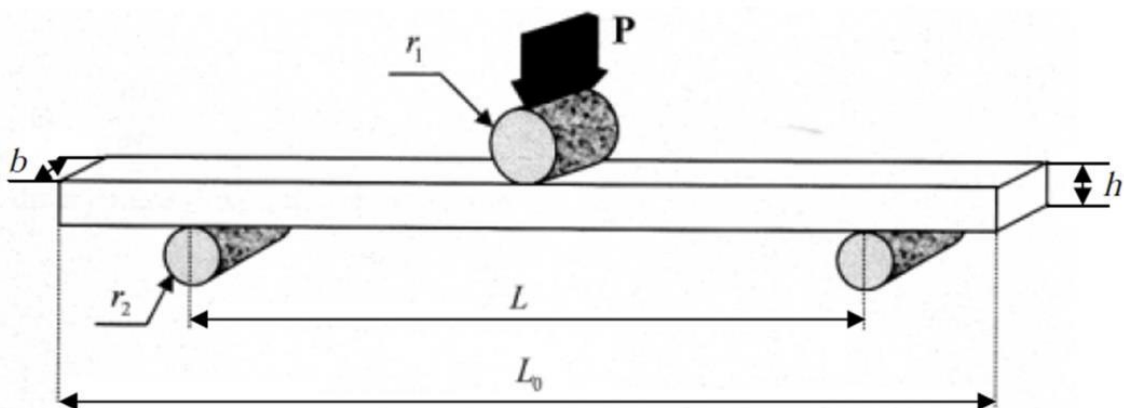


Figure II. 9. L'essai de flexion trois points.

Avec :  $P$  : charge appliquée ;  $r_1$  : rayon de cylindre de la panne ;  $r_2$  : rayon des cylindres d'appuis ;  $L$  : longueur entre appuis ;  $L_0$  : longueur totale de l'éprouvette ;  $h$  : hauteur de la poutre ;  $b$  : largeur de la poutre.

### II.3.7. 3. Essai de flexion quatre points

Pour éviter l'influence des contraintes de cisaillement (sur la déformée et le mécanisme de rupture) qui se superpose aux contraintes normales de flexion, on utilise quelques fois la méthode de flexion quatre points pour laquelle l'effort tranchant est nul dans la zone des contraintes maximales. L'essai de flexion à quarts points consiste à exercer entre les appuis deux points d'applications de la charge [27].

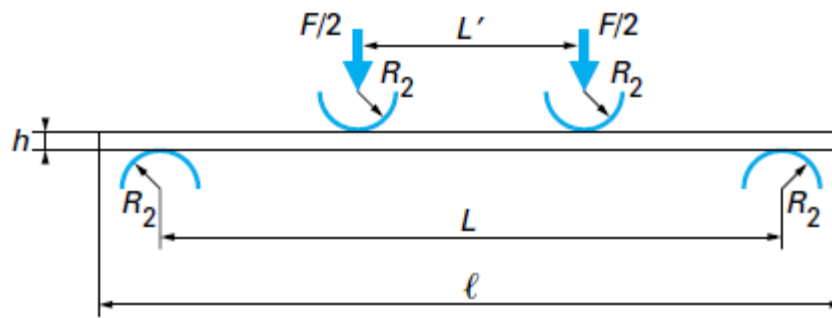


Figure II. 10. Essai de flexion quatre points, selon EN ISO 14125.

### II.3.8. Essai de dureté

La définition valable pour la dureté est la résistance qu'oppose un corps à la pénétration d'un corps plus dur. La dureté est un complément indispensable de l'examen métallographique, qui donne une première impression sur les caractéristiques mécaniques et corrobore souvent l'interprétation des textures. Selon le type de charge du corps d'essai lors de la pénétration dans le matériau, on distingue deux procédés [28] :

- ❖ Procédé avec action statique (par pénétration).
- ❖ Procédé par action dynamique (par rebondissement) [28].

#### II.3.8. 1. Essai de pénétration

Il consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal à essayer. La charge est constante et on mesure la dimension de l'empreinte. L'empreinte est d'autant plus grande que le métal est moins dur. La dureté  $H$  s'exprime par le rapport de la force sur la surface de l'empreinte :

$$H = \frac{F}{S} \quad (\text{II.5})$$

Les essais les plus classiques sont les essais Brinell, Vickers et Rockwell (Tableau. II.2).






Pénétrateur	Brinell	Rockwell		Vickers	Knoop
Nature	Acier trempé ou carbure de tungstène	Diamant	Acier trempé	Diamant	Diamant
Forme	Sphère	Cône	Sphère	Pyramide à base carrée	Pyramide à base losange
Dimensions	 $D = 10 \text{ mm} ; 5 \text{ mm} ; 2,5 \text{ mm} ; 1 \text{ mm}$	 $\theta = 120^\circ$	 $D = 1/16'' (1,587 \text{ mm})$ $D = 1/8'' (3,175 \text{ mm})$	 $\theta = 136^\circ$	 $\alpha = 130^\circ$ $\theta = 172^\circ 30'$

Tableau II. 2. Pénétrateurs Brinell, Rockwell, Vickers et Knoop [29-30].

### II.3.8.1. 1. Essai de dureté brinell

La dureté Brinell (HB) est un nombre proportionnel à  $F / S$ , L'essai Brinell utilise comme poinçon une bille en acier trempé ou en carbure de tungstène de 10 mm de diamètre ( $D$ ). Il s'applique aux métaux "peu durs ».

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{II.6})$$

Avec :  $F$  : charge appliquée ;  $d$  : le diamètre de l'empreinte en millimètres ;  $D$  : diamètre de la bille.

La pression est maintenue pendant 15 à 30 s selon le métal. (Figure II.11).

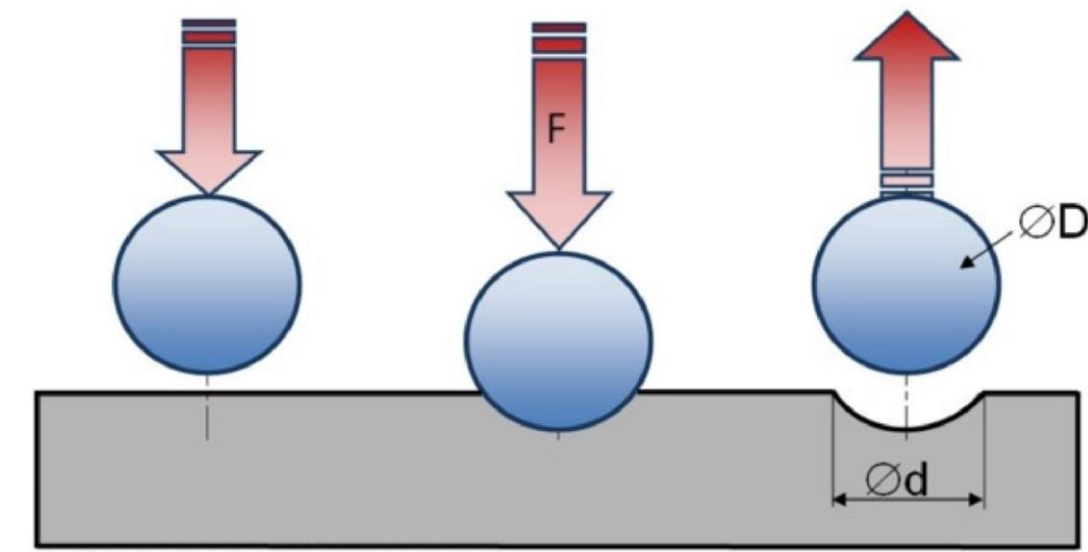


Figure II. 11. Principe de l'essai de dureté BRINELL.

### II.3.8.1. 2. La dureté VICKERS(HV)

Elle est caractérisée par l'empreinte faite par un indenteur sous une charge donnée durant 15 secondes. L'indenteur est formé d'une pyramide en diamant à base carrée dont les faces opposées font un angle de  $136^\circ$ . On mesure la moyenne des diagonales  $d_1$  et  $d_2$  de l'empreinte en microscopie optique.

La dureté Vickers (HV) est calculée e à l'aide de la formule suivante :

$$HV = \frac{0,189F}{d^2} \quad (\text{II.7})$$

Où : HV = Dureté Vickers ; F = Force appliquée [N] ; d = Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm].

L'essai VICKERS est adapté pour les alliages durs et les céramiques (Figure II.12).

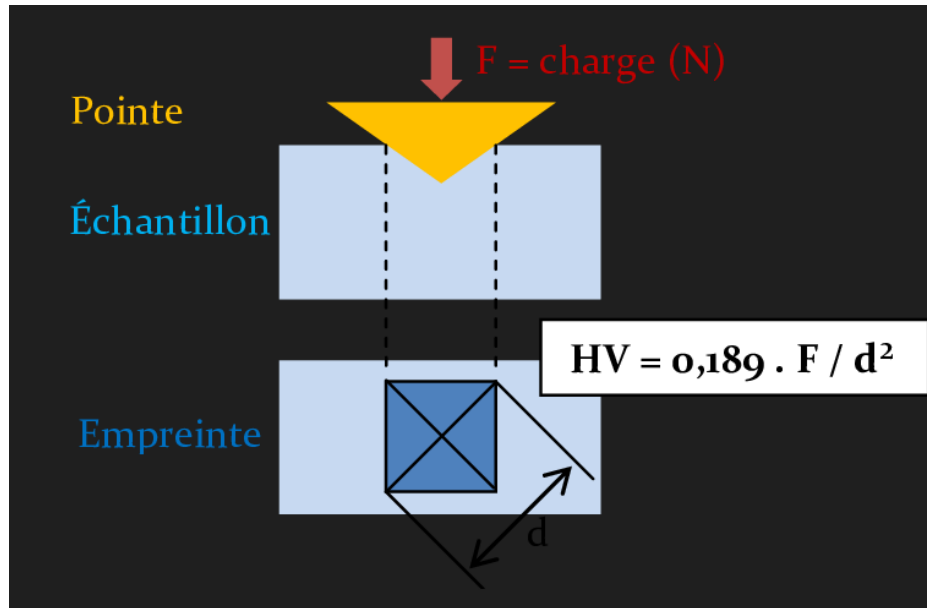


Figure II. 12. Principe de l'essai de dureté VICKERS.

### II.3.8.1. 3. La dureté Rockwell (HR)

C'est une mesure de la dureté d'un métal selon l'enfoncement d'une bille d'acier, appelé dureté Rockwell B (HRB) ou d'un cône de diamant de 120°, dureté Rockwell C (HRC), (La norme de dureté Rockwell date de 1932).

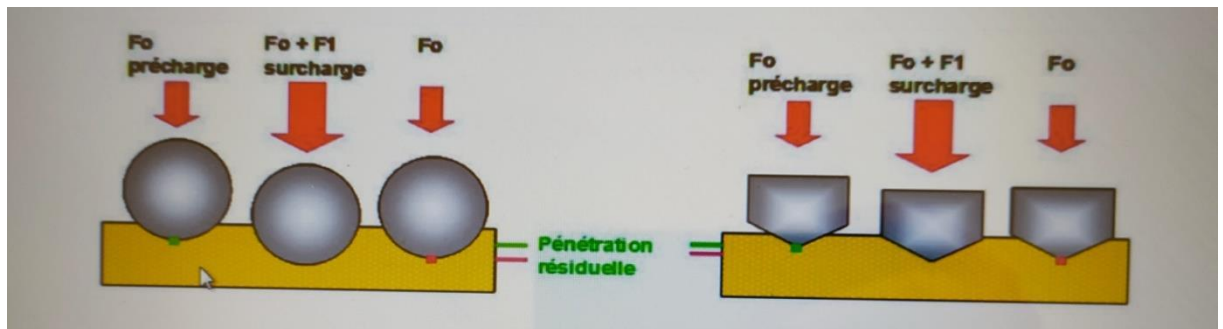


Figure II. 13. Principe de l'essai de dureté ROCKWELL (B) et ROCKWELL (C).

L'essai consiste à appliquer une pré-charge de  $F_0(N)$  sur le pénétrateur qui s'enfonce d'une profondeur  $P_0$ . On applique une force supplémentaire  $F+F_1$ , pendant 3 à 8 s, le cône s'enfonce d'une profondeur  $P_1$ . On supprime la force  $F$ , le cône reste enfoncé d'une profondeur  $P_2$ .

Les indices Rockwell peuvent se lire directement sur un cadran gradué.

- ❖ ROCKWELL C (HRC) : Le pénétrateur est un cône de diamant de 120° et d'extrémité sphérique ( $\varnothing 0,2$  mm).
- ❖ ROCKWELL B (HRB) : Le pénétrateur est une bille d'acier de 1,59 mm de diamètre.

### II.3.9. Essai de torsion

C'est une méthode utilisée pour caractériser le comportement d'un matériau soumis à une charge de torsion. Les résultats de l'essai de torsion sont utilisés pour tracer une courbe de contrainte déformation qui permet de déterminer la limite d'élasticité, le module d'élasticité en torsion, le module de rupture en torsion et la résistance à la torsion [9].

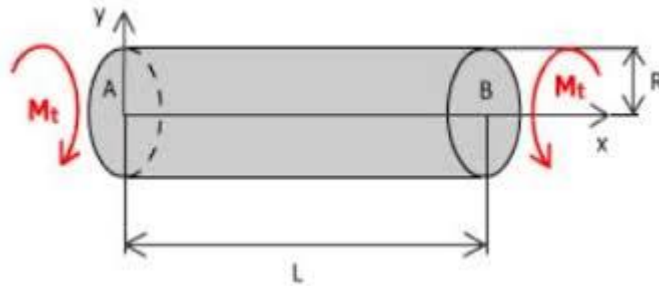


Figure II. 14. Schéma de l'essai de torsion

## II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les concepts fondamentaux des contraintes et des déformations dans les matériaux.

Ensuite, nous avons abordé les différents types d'essais mécaniques couramment utilisés pour caractériser les propriétés mécaniques des matériaux. Ces essais comprennent les essais de traction, de compression, de dureté et de flexion. Chaque type d'essai fournit des informations spécifiques sur le comportement du matériau sous différentes conditions de chargement.

D'après ce chapitre on conclut que, la compréhension des contraintes, des déformations et des essais mécaniques est essentielle pour les ingénieurs et les scientifiques qui travaillent sur des matériaux. Car cette compréhension nous aide à prédire le comportement des matériaux sous charge et à sélectionner les matériaux appropriés pour des applications spécifiques.

# Chapitre III

## Procédures expérimentales

## III. 1. Introduction

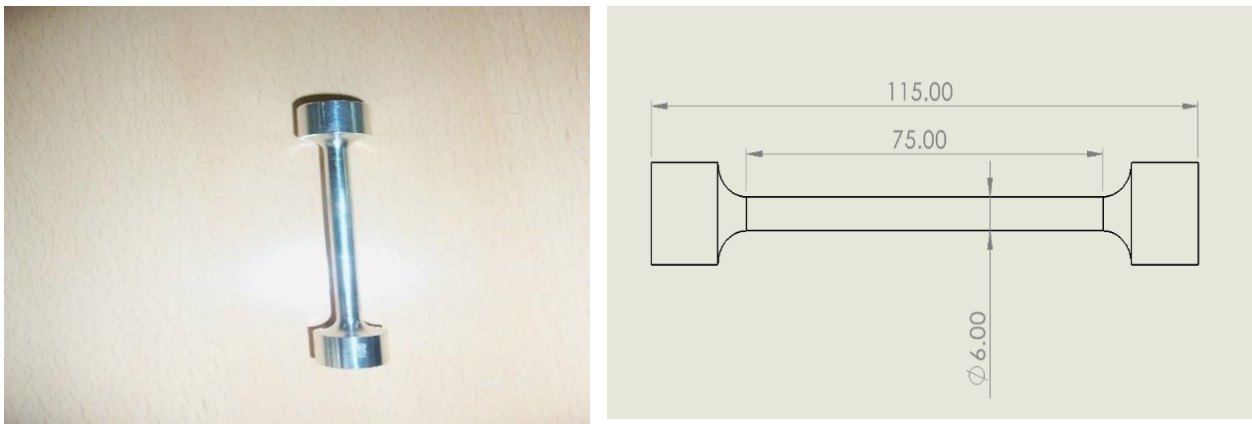
Dans ce chapitre, nous exposons les dispositifs employés pour réaliser les diverses épreuves : usinage, torsion, dureté, ainsi que l'analyse métallographique réalisée au sein du département de génie mécanique de l'université.

Les tests d'usinage réalisés sur les échantillons en alliage d'aluminium requis pour notre travail ont été réalisés dans le hall de technologie du laboratoire de coupe des métaux. Le laboratoire de SDM a réalisé les essais de traitement thermique (recuit) et l'étude métallographique. Le laboratoire de RDM a effectué les tests de torsion.

## III. 2. Equipements utilisés

### III.2. 1. Eprouvettes

Les éprouvettes sont en alliage d'aluminium de nuance AlSi8Cu3Fe. Pour les essais de torsion, nous avons usiné des éprouvettes de diamètre  $\Phi = 6$  mm de longueur totale  $L = 115$  mm et de longueur inter morts  $l = 75$  mm.



**Figure III. 1.** Eprouvettes pour la torsion.

Pour les essais de traction nous avons confectionné quatre éprouvettes de diamètre  $d = 6$  mm, longueur totale  $L = 145$  mm et de longueur centrale  $l = 45$  mm. (Figures III. 2).



**Figure III. 2.** Eprouvettes pour la traction.

La composition chimique réelle de l'alliage AlSi8Cu3Fe est donnée dans le tableau suivant :

Eléments	Pourcentage (%)
Aluminium	89
Silicium	8
Cuivre	3
Fer	< 2

**Tableau III. 1.** Composition chimique réelle de l'alliage AlSi8Cu3.

## III.2. 2. Machines et outils

### III.2.2. 1. Tour parallèle

Le modèle SN 40 C de cette machine-outil est fabriqué par la société tchèque « TOS TRENCIN », avec une puissance sur la broche de 6,6 KW.

La machine offre différentes fréquences de rotation : (45, 63, 90,125, 180, 250,355, 500, 710, 1000, 1400, 2000) tours par minute.

Il existe différentes avances disponibles : (0.08, 0.10, 0.11, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.20, 0.22, 0.24...6.4) mm/tr.



**Figure III. 3.** Tour parallèle SN 40 C.

### III.2.2. 2. Fraiseuse

La fraiseuse verticale (F V 1.5) de la société PMO (Almo) est utilisée pour l'usinage, avec une puissance de 5 KW. Avec une vitesse de rotation allant de 45 tr/min à 2000 tr/min et des avances allant de 16 mm/min à 800 mm/min. L'instrument de coupe est une fraise avec 6 dents en carbure (K10) de 50 mm de diamètre.

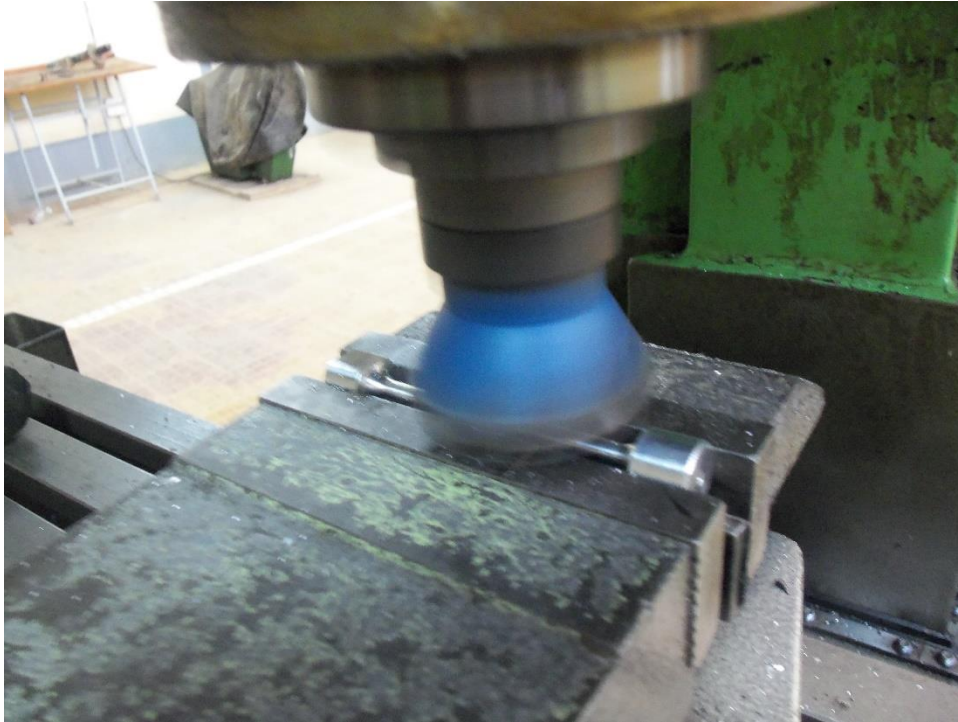


Figure III. 4. Fraiseuse verticale (F V 1.5).

### III.2.2. 3. Machine de torsion

Une machine d'essai de torsion de 30N<sub>m</sub> WP 500 est utilisée pour étudier la torsion des éprouvettes lors d'une charge jusqu'à leur destruction. On mesure le couple d'essai et l'angle de torsion (Figure III. 4). Les composants principaux de cet appareil d'essai sont :

- Un système de chargement ;
- Un système de fixation ;
- Une unité de mesure et une unité d'étalonnage.

Le couple appliqué par un volant est transmis par l'intermédiaire d'un engrenage de rapport de réduction égal à 62. Deux graduations, à l'entrée et à la sortie de l'engrenage, et un compte-tours permettant d'évaluer avec précision l'angle de torsion.

Deux douilles avec méplat sont utilisées pour fixer l'éprouvette entre le dispositif de chargement et l'unité de mesure.

Un appareil constitué d'un levier et d'un contrepoids sert à ajuster la barre de torsion.

La mesure du couple est effectuée à l'aide d'une barre de torsion avec des jauges de contraintes bien placées afin de réduire au minimum les erreurs.

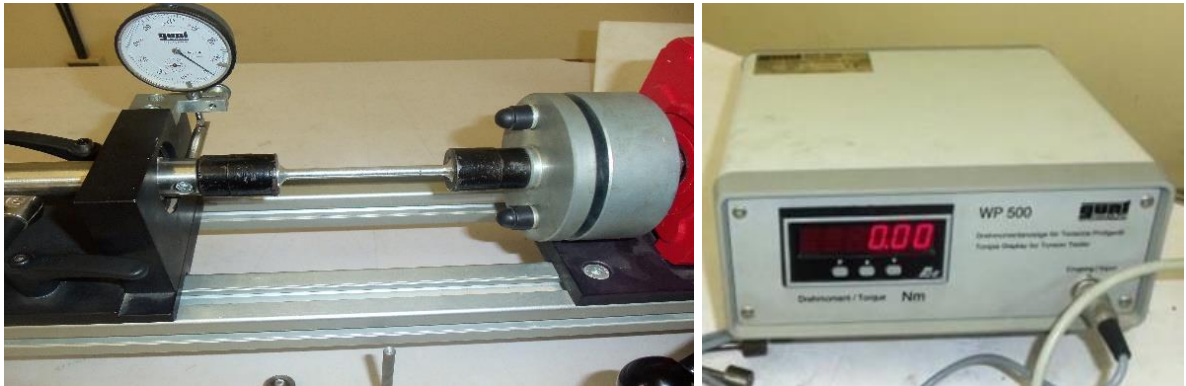


Figure III. 5. Machine de torsion.

#### III.2.2. 4. Machine de traction

L'essai de traction, en métallurgie et en construction mécanique, est un des principaux critères de classement des matériaux. Pour exécuter l'essai on dispose d'une éprouvette de dimensions (section  $S$  et longueur  $L$ ).



Figure III. 6. Machine de traction.

La machine de traction (Oehlgass, presse universelle MP 12 MODULE) mesure et enregistre généralement les efforts  $F$  et les allongements. Les allongements peuvent être mesurés à l'aide d'un extensomètre si le laboratoire en est équipé, sinon on utilisera un comparateur à 1/100 de mm pour relever la valeur de l'allongement de l'éprouvette. Alors que la mesure des efforts et des allongements permet de tracer le diagramme effort-allongement. Le diagramme contrainte-déformation, appelé diagramme de traction, aura la même allure.

### III.2.2. 5. Four électrique

Nous avons effectué un recuit pour le traitement thermique des éprouvettes en torsion en respectant les conditions de traitement thermique mentionnées dans le tableau III.2 Préparation des prélèvements d'essais :

- Réglage de la température du four à 320°C à une valeur de  $\pm 5^\circ\text{C}$  ;
- Installation des 11 échantillons dans le four (4 + 2 échantillons de sécurité).

Alliage	Traitement thermique recuit	Temps de maintien
AlSi8Cu3Fe	320°C	7h20 min

**Tableau III. 2.** Conditions de traitement thermique.

Après 7 heures et 20 minutes de recuit et de refroidissement à température ambiante, les éprouvettes doivent être mises hors du four.



**Figure III. 7.** Four électrique.

### III.2.2. 6. Microduromètre

Pour mesurer la dureté des éprouvettes après recuit, nous avons utilisé un duromètre digital type DM2D dont les caractéristiques sont : Poids = 40 Kg, hauteur = 490mm, largeur = 250 mm, profondeur = 395 mm. La table sur laquelle se pose l'échantillon est de forme carrée de côté 110 mm. (Figure 7). Charges utilisées : (10 ; 25 ; 50 ; 100 ; 200 ; 300 ; 500 ; 1000) g. La hauteur max de l'échantillon ne doit pas dépasser 90mm. La mesure s'effectue en HV et sera convertie en HRC.



Figure III. 8. Microduromètre digital.

### III.2.2. 7. Plaquette de coupe et porte-outils

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte-outil sur lequel se fixent les plaquettes mécaniquement par levier pour plaquette avec trou



Figure III. 9. Plaquette et porte-outils utilisés.

### III.2.2. 8. Microscope métallographique

L'étude métallographique est réalisée à l'aide d'un microscope EUROMEX. L'éprouvette est

placée sous l'objectif du microscope sur une table micrométrique à mouvements croisés, comme illustré dans la figure 10.



**Figure III. 10.** Microscope optique métallographique (Euromex).

### III.2.2. 9. Autres équipements

Outre les équipements mentionnés précédemment, nous avons employé :

- Un smartphone pour prendre les photos des résultats et des différents équipements utilisés.
- Un pied à coulisse pour mesurer le diamètre de l'éprouvette.

## III. 3. Protocole d'essai

### III.3. 1. Conditions d'acceptation des essais

La manipulation est considérée comme valide si les conditions suivantes sont respectées :

- Recueil des changements dans l'état microstructural en fonction de la déformation angulaire ;
- Obtention des courbes de contrainte de cisaillement en fonction de déformation angulaire

### III.3. 2. Essais de torsion

Nous avons choisi d'utiliser des éprouvettes pleines usinées. La géométrie et les dimensions retenues pour ces éprouvettes sont données sur la figure 1.

Les essais ont été réalisés à température ambiante.

- Réalisation de un essais de torsion jusqu'à rupture ;
- Réalisation de un essais de torsion à 1/3 de la rupture ;

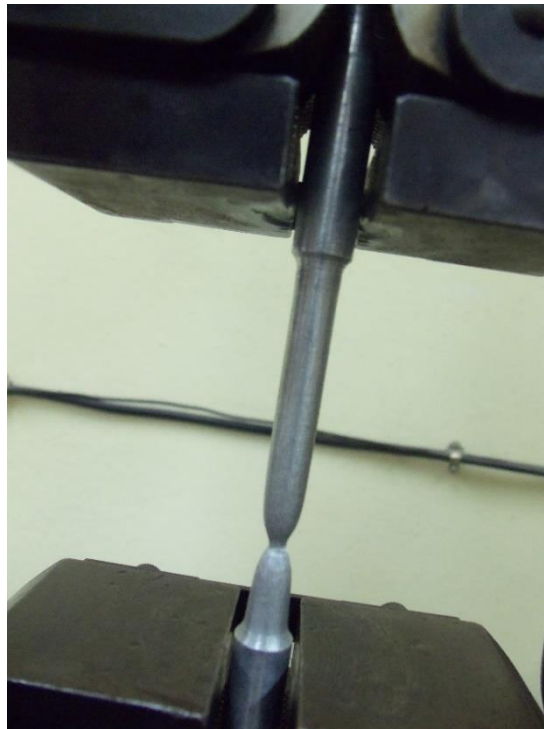
- Réalisation de un essais de torsion à 2/3 de la rupture.



**Figure III. 11.** Eprouvette à la rupture.

### III.3. 3. Essais de traction

La mise en œuvre de l'essai de traction uni-axial (Figure III .12) est assez simple. Grâce à sa simplicité d'analyse, il offre la possibilité d'établir des lois de comportement fiables. De plus, il a une reproductibilité exceptionnelle.



**Figure III. 12.** Essais de traction.

La transformation des grandeurs technologiques (force, géométrie, vitesse de traverse...) en grandeurs vraies et équivalentes (contrainte vraie, déformation vraie, vitesse de déformation vraie...) requiert l'utilisation de certaines hypothèses :

- Dans la zone de diamètre minimal, où le diamètre  $D$  et le rayon de courbure sont mesurés, on suppose que la déformation est uniforme ;

- On suppose que le matériau soit homogène, incompressible et isotrope.

## III. 4. Etude métallographique

### III.4. 1. Le polissage par abrasion mécanique

Le polissage par abrasion mécanique se déroule en deux étapes principales, dans des conditions métallographiques normales. Pour commencer, il faut polir grossièrement la surface sur des papiers de verre en rotation, avec des pouvoirs abrasifs diminuant et en rotation.

La présence d'eau. La deuxième étape implique de terminer le polissage en appliquant la pièce sur des tapis de feutre en rotation sur lesquels ont été déposées des pâtes diamantées de granulométrie décroissante (jusqu'à  $0,1 \mu\text{m}$ ).

### III.4. 2. Le nettoyage est certainement

Le nettoyage des métaux ne se limite pas à l'élimination des graisses, huile et salissure analogues d'origine organique, mais aussi l'enlèvement des couches d'oxyde et autres recouvrements de composés métalliques tels que rouille, calamine sur les échantillons ainsi que des résidus de meulage, peinture et vernis, produits de polissage, copeaux métalliques, particules de sable et similaires.

### III.4. 3. La réalisation des études métallographiques

Pour la réalisation des études métallographiques nous avons procédé à cinq étapes :

- Etape 01 : Coupe des échantillons déformés en deux en respectant la norme à l'axe des échantillons.
- Etape 02 : Les sections des éprouvettes déformées sont plissées en trois étapes : 600, 1200, 2400.



**Figure III. 13.** Surfaces polies.

- Etape 03 : Pour faire ressortir les grains de notre Alliage d'aluminium nous avons utilisé la Composition chimiques suivante : Solution de Keller : 0,5 ml d'HF, 1,5ml d'HI, 2,5ml d'HNO<sub>3</sub>, 95ml de H<sub>2</sub>O, Ceci afin d'obtenir un contraste entre les différents grains.

- Etape 04 : L'utilisation d'un microduromètre AFFRI permet d'observer l'évolution de la dureté au centre et à la périphérie de la section tronçonnée de l'éprouvette en fonction de la déformation.
- L'essai sera réalisé sur quatre échantillons présentant des déformations différentes lors de la torsion : Éprouvette déformée à 0%,33%,66%,100% de la rupture
- Etape 05 : Analyse de la structure microscopique des éprouvettes : Capture d'images microscopiques afin de visualiser la métallographie des diverses éprouvettes déformées.

#### III.4. 4. Détermination des paramètres d'écrouissage et du coefficient de résistance

De l'équation :  $\sigma = K(\epsilon_p)^n$  (Loi d'écrouissage d'Hollomon), nous pouvons déterminer le coefficient d'écrouissage  $n$  et le coefficient de résistance  $K$ , en mettant l'opérateur logarithme népérien dans les deux membres de l'égalité, nous aurons :

$$\ln(\sigma) = \ln(k(\epsilon^n)) \quad (\text{III.1})$$

Alors :

$$\ln(\sigma) = \ln(k) + n.\ln(\epsilon) \quad (\text{III.2})$$

### III. 5. Conclusion

Les équipements et techniques sont présentés essentiels pour effectuer avec précision les tests de torsion, de traction et de dureté. La connaissance de la composition chimique et du protocole d'essai complet assure l'obtention de données précises sur les propriétés mécaniques des matériaux, aidant ainsi à améliorer la qualité des produits et à garantir leur durabilité et leur sécurité dans diverses applications industrielles et ingénierie.

# Chapitre IV

## Résultats des essais

## IV. 1. Introduction

L'essai de torsion a été conçu dans un premier temps pour étudier le comportement des métaux lors de cisaillement et de déformation importante, tout en évaluant les phénomènes d'instabilité (striction).

Dans cette étude, on observe la déformation d'une éprouvette en forme de cylindre.

Les essais de torsion seront réalisés sur des éprouvettes recuites en alliage d'aluminium jusqu'à ce qu'elles soient ruptures, à 1/3 et à 2/3 de la rupture, afin d'évaluer les caractéristiques mécaniques du matériau telles que le module de Young et le module de cisaillement, le coefficient d'écaillage et le coefficient de résistance dans le domaine plastique.

Les résultats de cette expérience seront confrontés à ceux obtenus lors d'un test de traction afin d'évaluer les caractéristiques d'élasticité avec une plus grande mesure.

Afin d'identifier les caractéristiques surfaciques de nos échantillons, nous allons réaliser des tests de dureté et une analyse métallographique.

## IV. 2. Essais de torsion

Il est nécessaire de formuler plusieurs hypothèses avant d'analyser mécaniquement un essai. Il est supposé en particulier que :

- Vitesse angulaire constante : La vitesse angulaire de rotation de l'éprouvette est constante sur toute sa longueur. Cela signifie que la vitesse de rotation ne change pas d'un point à l'autre de l'axe longitudinal.
- Déformations uniformes : Les déformations angulaires et les contraintes de cisaillement sont supposées être uniformes sur toute la section droite de l'éprouvette. Cela signifie que les valeurs de ces grandeurs ne varient pas d'un point à l'autre de la section transversale.
- Homogénéité : L'alliage d'aluminium est considéré comme homogène, ce qui signifie que sa composition et sa microstructure sont uniformes sur toute la longueur de l'éprouvette. Cela implique que les propriétés mécaniques ne varient pas d'un point à l'autre de l'éprouvette.

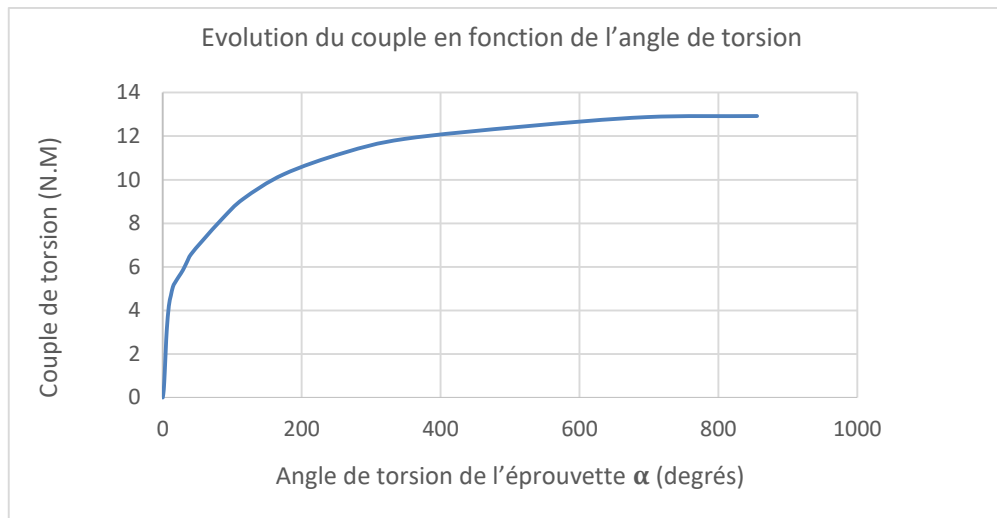
## IV. 3. Relevés des essais

### IV.3. 1. Essai à rupture

Angle d'entrée, rotation du volant à main (tr)	Angle de torsion de l'éprouvette (degrés)	Angle unitaire de torsion (rd /mm)	$\epsilon$ hencky	Couple de Torsion (N.M)	Contrainte de Cisaillement (Mpa)	$\sigma$ Eque VM (Mpa)
<b>0</b>	0	0	0	0	0	0
<b>0.25</b>	1.461	0.00034	0.00051	0.375	8.846	15.322
<b>0.5</b>	2.879	0.00067	0.00100	1.2	28.309	49.032
<b>0.75</b>	4.340	0.00101	0.00151	2.222	52.418	90.791
<b>1</b>	5.801	0.00135	0.00202	3.125	73.720	127.687
<b>1.5</b>	8.723	0.00203	0.00304	4.2	99.080	171.612
<b>2</b>	11.602	0.0027	0.00404	4.675	110.285	191.020
<b>2.5</b>	14.524	0.00338	0.00506	5.075	119.722	207.364
<b>3</b>	17.404	0.00405	0.00606	5.265	124.204	215.127
<b>4</b>	23.205	0.0054	0.00807	5.56	131.163	227.181
<b>5</b>	29.006	0.00675	0.01007	5.85	138.004	239.030
<b>6</b>	34.807	0.0081	0.01208	6.225	146.851	254.353
<b>7</b>	40.608	0.00945	0.01408	6.575	155.107	268.654
<b>10</b>	58.012	0.0135	0.02005	7.23	170.559	295.417
<b>15</b>	87.061	0.02026	0.02994	8.255	194.739	337.298
<b>20</b>	116.067	0.02701	0.03972	9.125	215.263	372.847
<b>30</b>	174.122	0.04052	0.05900	10.25	241.802	418.814
<b>45</b>	261.183	0.06078	0.08725	11.24	265.157	459.265
<b>60</b>	348.244	0.08104	0.11472	11.875	280.137	485.211
<b>90</b>	521.764	0.12142	0.16732	12.45	293.701	508.706
<b>120</b>	696.445	0.16207	0.21761	12.875	303.727	526.071
<b>145</b>	855.827	0.19916	0.26139	12.925	304.907	528.114

Tableau IV. 1. Résultats de Essai à rupture.

### IV.3.1. 1. Evolution du couple en fonction de l'angle de torsion



**Figure IV. 1 .** Evolution du couple en fonction de l'angle de torsion.

En analysant cette allure, on constate que la rupture des éprouvettes se fait après 145 tours du volant à main de la machine, soit un angle de torsion des éprouvettes égale à 855 degrés avec un couple maximum de 12.92 Nm.

### IV.3.1. 2. Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de l'angle unitaire de torsion

Calcul de la contrainte de cisaillement ( $I_0$  et  $\tau$ ) et l'angle unitaire de torsion ( $\theta$ ) :

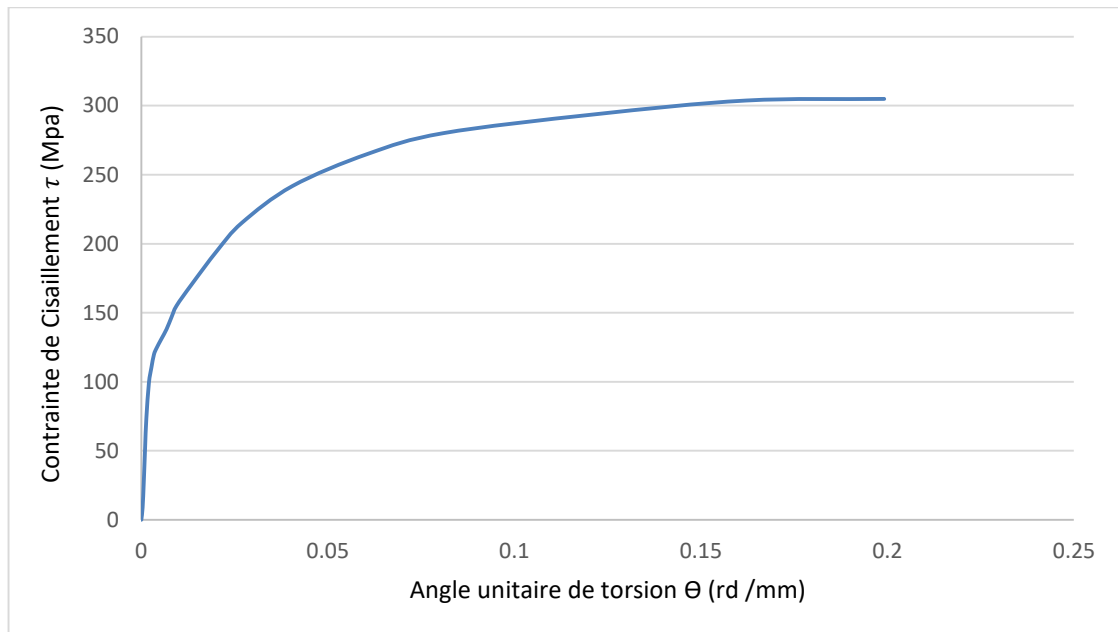
$$I_0 = \frac{\pi D^4}{32} \quad (\text{IV.1})$$

$$\tau = \frac{Mt}{I_0} r \quad (\text{IV.2})$$

$$\theta = \frac{\alpha}{L} \quad (\text{IV.3})$$

Avec :

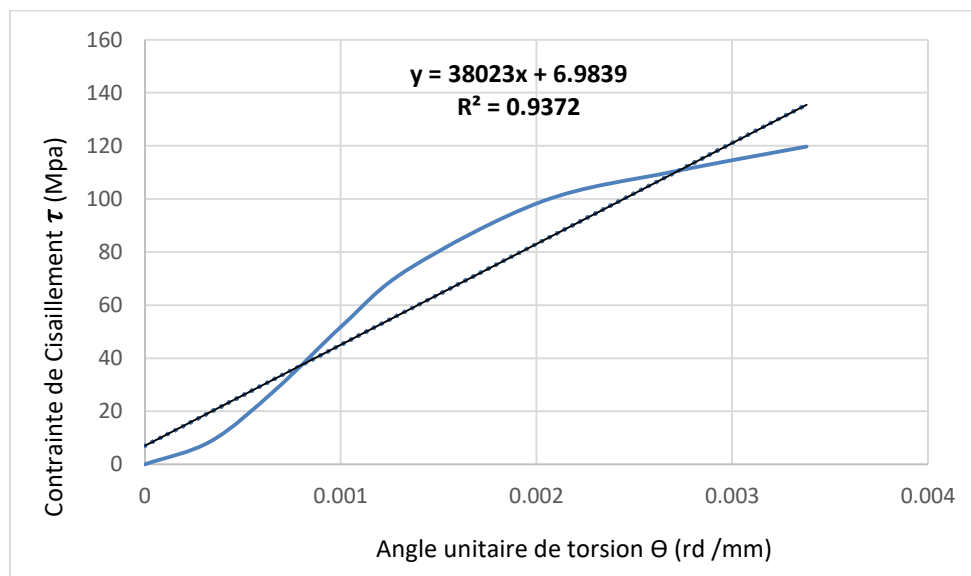
- $D$  : Diamètre de l'éprouvette ;
- $Mt$  : couple de torsion ;
- $\alpha$  : Angle relevé par la machine ;
- $L$  : longueur de l'éprouvette.



**Figure IV. 2.** Evolution du contrainte en fonction de l'angle de torsion.

D'après cette allure nous remarquons que le point de rupture est positionné à :  
 $\tau_{Max} = 304.907$  Mpa et  $\theta = 0.19916$  rd/mm.

### IV.3.1. 3. Détermination du module de cisaillement



**Figure IV. 3.** Zoom pour les petites déformations premier essai à rupture.

Pour calculer le module de cisaillement, nous prenons deux points quelconques de la courbe (figure IV. 3) et nous appliquons la relation :

$$G = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\theta_2 - \theta_1} \quad (\text{IV.4})$$

Valeurs calculées : Module de Cisaillement G varie de 30000 à 40000 Mpa.

L'analyse des relevés montre que la zone élastique présente sur les schémas ci-dessus n'est constituée que de deux points. On ne peut donc pas garantir la fiabilité des mesures de module de Cisaillement et de Young.

#### IV.3.1. 4. Evolution de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de la déformation de Hencky

Ici, nous utiliserons le  $\varepsilon$  logarithmique de déformation, aussi connu sous le nom de déformation de Hencky.

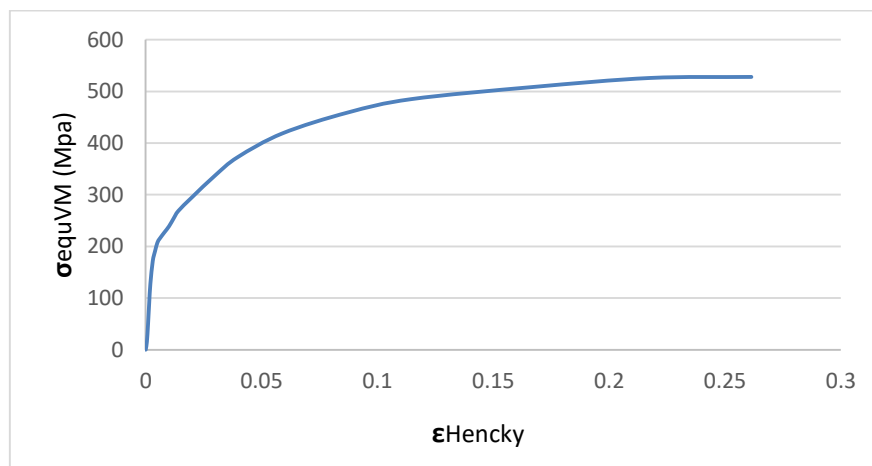
$$\sigma_{equVM} = \tau\sqrt{3} \quad (IV.5)$$

Avec :

$$\gamma = \theta.r \quad (IV.6)$$

Pour les matériaux ductiles :

$$\varepsilon_{HENCKY} = \ln\left(1 + \frac{\gamma}{2}\right) \quad (IV.7)$$

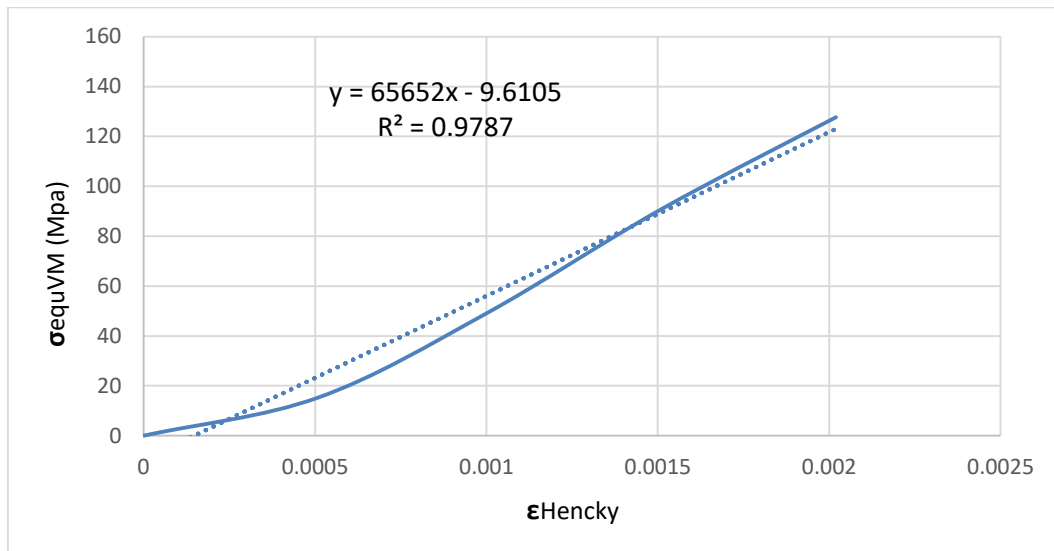


**Figure IV. 4 .** Evolution de la contrainte équivalente de Von Mises en fonction de la déformation de Hencky.

De même pour les valeurs de  $\sigma_{equVM}$  et  $\varepsilon_{HENCKY}$  sont calculées et indiquées sur les trois tableaux (Tableau IV.2, Tableau IV.3 et Tableau IV.4).

Pour calculer le module d'élasticité d'Young, nous prenons deux points quelconques de la courbe (figure IV.2 et figure IV.3) et nous appliquons la relation :

$$E = \frac{\sigma_{equVM 2} - \sigma_{equVM 1}}{\varepsilon_{HENCKY 2} - \varepsilon_{HENCKY 1}} \quad (IV.8)$$



**Figure IV. 5 .** Zoom dans les petites déformations de essai à rupture.

On constate que la valeur du module de Young E est comprise entre 72000 et 68000 Mpa.  
Soit :  $E_{moyen} = 70000$  MPa.

Alliage d'aluminium (AlSi8Cu3fe)	Valeurs
Dureté Brinell	80
Allongement	2.5 %
Module d'Young	<u>71.0</u> GPa
Coefficient de Poisson	0.33
Module de cisaillement	<u>26.5</u> GPa

**Tableau IV. 2.** Valeurs théoriques extraites [www.matweb.com](http://www.matweb.com).

Nous avons vérifié nos mesures expérimentales de rigidité (module de Young) et de résistance à la déformation (module de Coulomb) par rapport à ce que d'autres ont trouvé.

Étonnamment, ils étaient assez proches ! Mais choisir deux points quelconques sur nos tracés de données (courbes IV.4 et IV.5) pour calculer ces propriétés peut faire une grande différence. C'est pourquoi nous avons lissé notre courbe expérimentale pour obtenir une image plus cohérente.

### IV.3. 2. Essai à 1/3 et à 2/3 de la rupture

Les deux essais présentés ci-après correspondent à 1/3 et 2/3 de l'allongement à rupture soit 50 et 100 tours du volant à main.

## IV.3.2. 1. Essai à 1/3 de la rupture

Angle unitaire de torsion (rd /mm)	$\epsilon$ hencky	Couple de Torsion (N.M)	Contrainte de Cisaillement (Mpa)	$\sigma$ Eque VM (Mpa)
<b>0</b>	0	0	0	0.000
<b>0.00034</b>	0.00051	0.3	7.077	13.279
<b>0.00067</b>	0.00100	0.775	18.283	28.602
<b>0.00101</b>	0.00151	1.8	42.463	49.032
<b>0.00135</b>	0.00202	2.725	64.284	85.806
<b>0.00203</b>	0.00304	3.5	82.567	143.010
<b>0.0027</b>	0.00404	3.875	91.413	162.418
<b>0.00338</b>	0.00506	4.35	102.619	177.741
<b>0.00405</b>	0.00606	4.575	107.926	189.998
<b>0.0054</b>	0.00807	5.1	120.311	205.321
<b>0.00675</b>	0.01007	5.475	129.158	222.686
<b>0.0081</b>	0.01208	5.85	138.004	232.901
<b>0.00945</b>	0.01408	6.2	146.261	244.138
<b>0.0135</b>	0.02005	6.85	161.595	271.718
<b>0.02026</b>	0.02994	7.625	179.877	310.535
<b>0.02701</b>	0.03972	8.275	195.211	340.159
<b>0.04052</b>	0.05900	9.5	224.109	383.061
<b>0.05193</b>	0.07501	10.275	242.392	421.878
<b>0.06753</b>	0.09649	10.9	257.136	446.394

Tableau IV. 3. Résultats de Essai à 1/3 de la rupture.

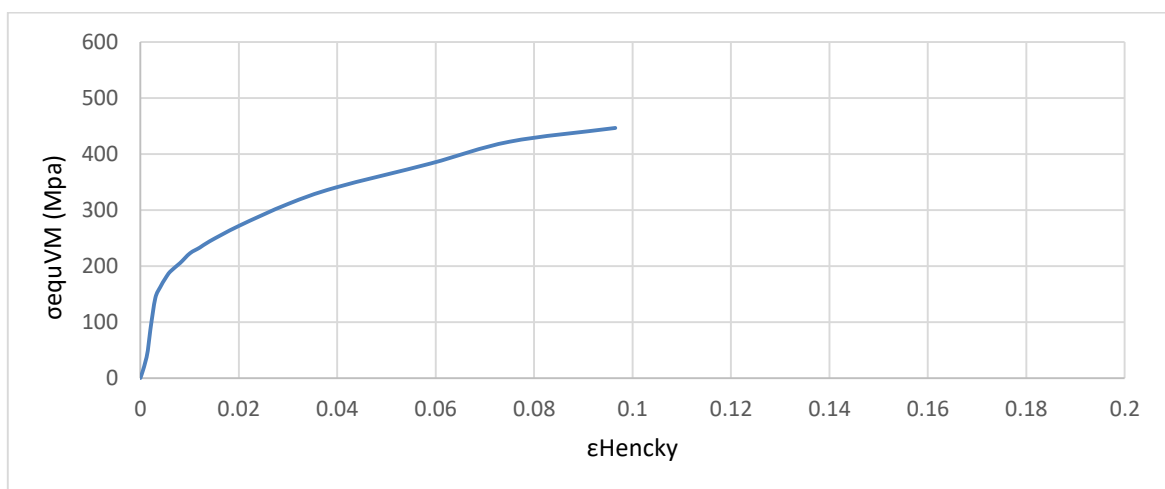


Figure IV. 6 . Essai de torsion à 1/3 de la rupture.

## IV.3.2. 2. Essai à 2/3 de la rupture

Angle unitaire de torsion (rd /mm)	$\epsilon$ hencky	Couple de Torsion (N.M)	Contrainte de Cisaillement (Mpa)	$\sigma$ Eque VM (Mpa)
<b>0</b>	0	0	0	0.000
<b>0.00034</b>	0.00051	0.325	7.667	13.279
<b>0.00067</b>	0.00100	0.7	16.513	28.602
<b>0.00101</b>	0.00151	1.2	28.309	49.032
<b>0.00135</b>	0.00202	2.1	49.540	85.806
<b>0.00203</b>	0.00304	3.5	82.567	143.010
<b>0.0027</b>	0.00404	3.975	93.772	162.418
<b>0.00338</b>	0.00506	4.35	102.619	177.741
<b>0.00405</b>	0.00606	4.65	109.696	189.998
<b>0.0054</b>	0.00807	5.025	118.542	205.321
<b>0.00675</b>	0.01007	5.45	128.568	222.686
<b>0.0081</b>	0.01208	5.7	134.466	232.901
<b>0.0135</b>	0.02005	6.65	156.877	271.718
<b>0.02026</b>	0.02994	7.6	179.288	310.535
<b>0.02701</b>	0.03972	8.325	196.391	340.159
<b>0.04052</b>	0.05900	9.375	221.161	383.061
<b>0.06078</b>	0.08725	10.325	243.572	421.878
<b>0.08103</b>	0.11471	10.925	257.726	446.394
<b>0.10804</b>	0.15019	11.325	267.162	462.738
<b>0.13505</b>	0.18447	11.7	276.008	478.061

Tableau IV. 4. Résultats de Essai à 2/3 de la rupture.

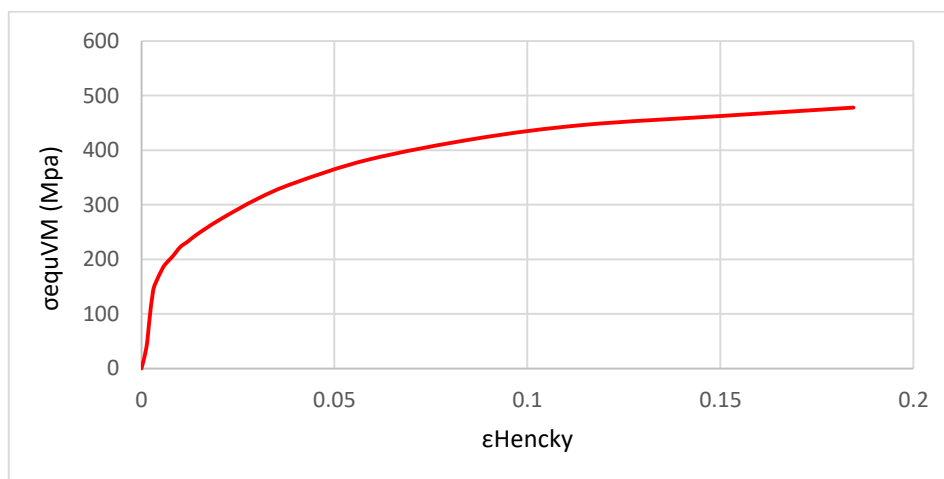


Figure IV. 7 . Essai de torsion à 2/3 de la rupture.

En analysant la forme de la courbe de contrainte en fonction de la déformation, on constate que celle-ci évolue jusqu'à ce que la rupture se manifeste. Il n'est donc pas possible de prédire la forme de la courbe en cas de déformations plus significatives. Afin de parvenir à des objectifs.

Les éprouvettes de torsion, en cas de déformations plus importantes, seront polies pour réduire au minimum les défauts de surface qui pourraient entraîner la rupture prématurée de l'éprouvette.

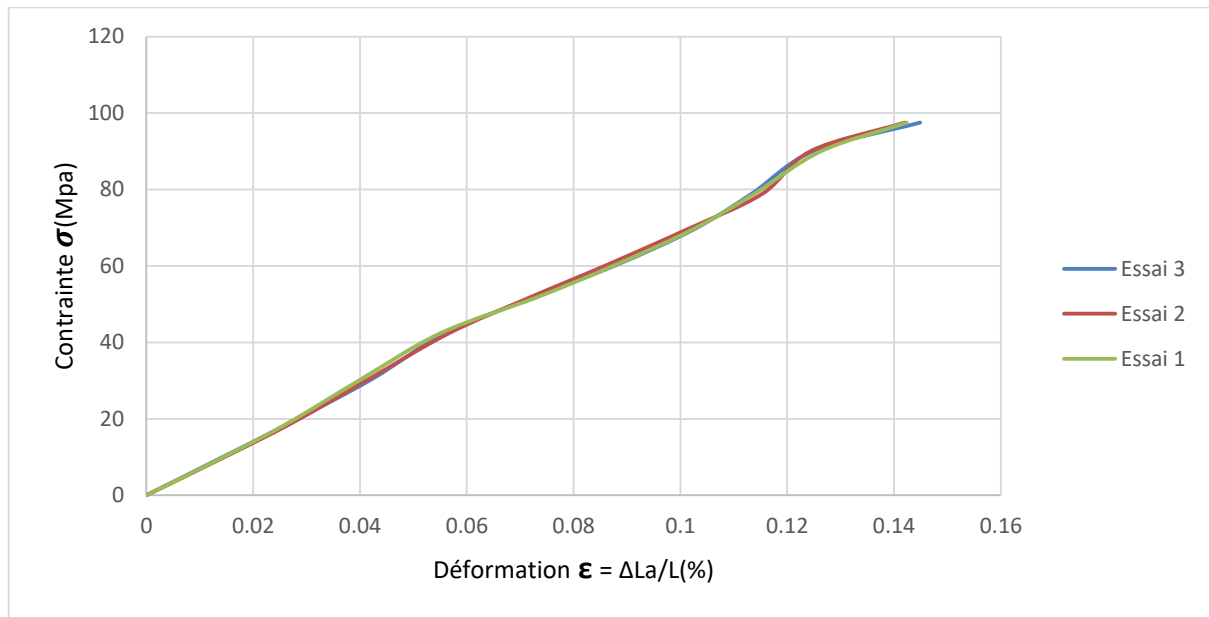
### IV.3.3. Essai de traction

Nous avons vu dans les essais de torsion que le module de Young du matériau ne peut être déterminé avec précision sans avoir effectué un essai de traction dans le domaine élastique. On a donc effectué cette mesure sur une machine de traction (Oehlgass, presse universelle MP 12 MODULE) qui peut effectuer des tests sur des éprouvettes cylindriques.

#### IV.3.3.1. Relevés des essais

Force appliquée F(N)	Contrainte $\sigma$ (Mpa)	Allongement $\Delta L$ (mm)			Déformation $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ (%)		
		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 1	Essai 2	Essai 3
<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0
<b>500</b>	9.82	0.0064	0.0065	0.0063	0.0142	0.0144	0.0140
<b>1000</b>	18.8	0.0119	0.0122	0.0120	0.0264	0.0271	0.0267
<b>1500</b>	30.37	0.0181	0.0187	0.0190	0.0402	0.0416	0.0422
<b>2000</b>	42.43	0.0248	0.0255	0.0252	0.0551	0.0567	0.0560
<b>2500</b>	51.89	0.033	0.0324	0.0327	0.0733	0.0720	0.0727
<b>3000</b>	60.13	0.0394	0.0387	0.0395	0.0876	0.0860	0.0878
<b>3500</b>	69.48	0.046	0.0455	0.0461	0.1022	0.1011	0.1024
<b>4000</b>	78.85	0.0512	0.0519	0.051	0.1138	0.1153	0.1133
<b>4500</b>	90.06	0.0569	0.056	0.0562	0.1264	0.1244	0.1249
<b>5000</b>	97.52	0.0641	0.0639	0.0652	0.1424	0.1420	0.1449

**Tableau IV. 5.** Evolution de la Contraintes en fonction de la déformations.



**Figure IV. 8.** Evolution de la contrainte en fonction de la déformation.

#### IV.3.3. 2. Calcul du module d'élasticité longitudinale E (ou module de Young)

Pour calculer le module d'élasticité nous utilisons l'équation suivante :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (\text{IV.9})$$

Les résultats de calcul sont mentionnées dans le tableau suivant :

Numéro d'essai	Module de Young (MPa)
Essai 1	70935
Essai 2	70557
Essai 3	70500
Moyenne	<b>70664</b>

**Tableau IV. 6.** Les valeurs du module de Young.

L'erreur sur la valeur pour l'alliage d'aluminium (70 GPa) indiquée par la littérature est de 0.94%

#### IV.3. 4. Test de dureté

L'essai de dureté explore la résistance d'un matériau à l'enfoncement. Des techniques courantes existent, comme Brinell (bille en acier), Rockwell (pointeaux/charges variables) et Shore (matériaux mous).

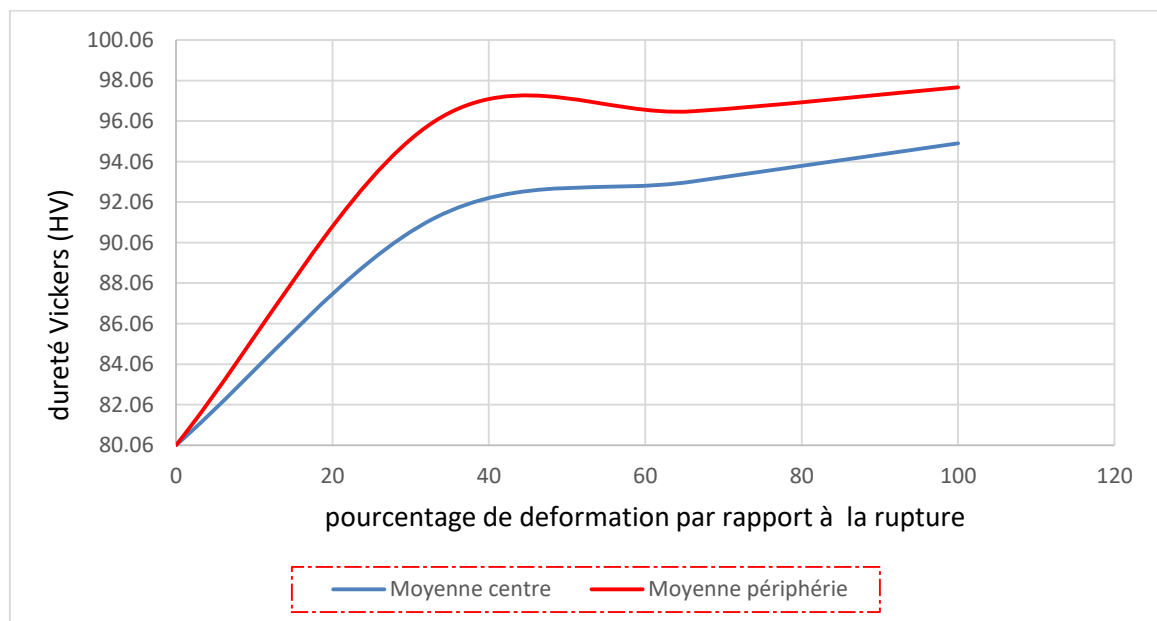
L'essai Vickers se distingue par sa précision, en particulier pour les matériaux durs ou minces. Il utilise un pénétrateur en pyramide de diamant pour créer une empreinte caractéristique. Les diagonales de cette marque sont mesurées avec précision, et une formule convertit ces valeurs en un indice de dureté Vickers (HV) fiable. La précision et la facilité d'utilisation de cette méthode en font un choix populaire pour divers matériaux.

Le tableau suivant présente l'évaluation de la dureté HV au centre et à la périphérie des éprouvettes en fonction du pourcentage de déformation :

Type d'éprouvette	Eprouvette 0%		Eprouvette 33%		Eprouvette 66%		Eprouvette à rupture	
Centre	79,88	80,25	90.42	92.11	92,39	93,77	94.58	95.34
Moyenne centre	80.06		91.26		93.07		94.96	
Périphérie	79,88	80,25	97,26	94,81	98,10	94,99	99,33	96,12
Moyenne périphérie	80.06		96.03		96.54		97.725	
Moyenne totale	80.06		93.64		94.8		96.34	

**Tableau IV. 7.** Evaluation de la dureté en fonction de pourcentage de déformation.

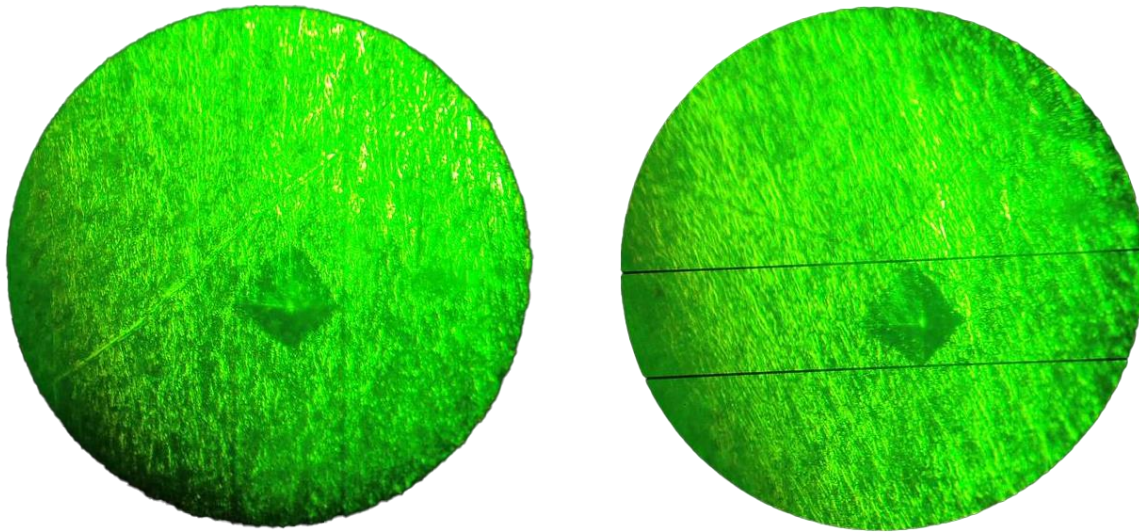
Le chart suivant présente l'évaluation de la dureté HV au centre et à la périphérie des éprouvettes en fonction du pourcentage de déformation :



**Figure IV. 9.** Evolution de dureté HV en fonction de pourcentage de déformation.

On remarque l'augmentation rapide de la dureté lors du début de la déformation,

accompagnée d'une stabilisation rapide.



**Figure IV. 10 .** Empreinte de test de dureté HV.

En outre, on observe une différence de dureté entre le centre et la périphérie de l'échantillon. Cela peut s'expliquer aisément par une augmentation du niveau d'écrouissage sur la périphérie lors de l'essai de torsion. Finalement, la dureté est saturée à la périphérie avec une diminution de la dureté tandis que la dureté continue de croître au centre de l'éprouvette. Cette variation du module de Young est donc similaire à celle observée dans le paragraphe précédent. Cela confirme donc l'apparition du processus de dégradation du matériau et la fusion des cavités, ce qui entraîne une diminution des caractéristiques mécaniques.

### IV.3. 5. Détermination du coefficient d'écrouissage et du coefficient de résistance

L'essai de traction est souvent choisi comme essai de référence pour établir la courbe d'écrouissage reliant l'évolution de la limite élastique  $\sigma_0$  à la variable interne d'écrouissage (la déformation équivalente plastique  $\varepsilon_p$ ). On approche les courbes par des fonctions analytiques qui peuvent prendre plusieurs formes :

Loi d'écrouissage d'Hollomon :

$$\sigma = K (\varepsilon_p)^n \quad (\text{IV.10})$$

Loi d'écrouissage de Krupkowski :

$$\sigma = K (\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n \quad (\text{IV.11})$$

Loi d'écrouissage de Ludwick :

Loi d'écrouissage de Voce :

$$\sigma = \sigma_0 + \left[ K \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^n \right] \quad (\text{IV.12})$$

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_s \left[ 1 - e^{-k \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)} \right] \quad (\text{IV.13})$$

Même si la loi Hollomon initiale présente l'avantage d'être la plus simple. Cependant, elle a quelques limites dans la description de la courbe d'érouissage pour les déformations faibles.

$$\sigma = K \left( \varepsilon_p \right)^n \quad (\text{IV.14})$$

Avec : n : le coefficient d'érouissage et K : le coefficient de résistance du matériau.

#### IV.3.5.1. Essai à rupture

Ln ( $\varepsilon$ HENCKY)	Ln ( $\sigma_{\text{equ}}$ VM (Mpa))
-5.7959	5.145236
-5.51151	5.252378
-5.28639	5.334476
-5.10605	5.371229
-4.8196	5.425747
-4.59819	5.476589
-4.4162	5.538723
-4.263	5.593424
-3.90953	5.688388
-3.50856	5.820967
-3.2259	5.921168
-2.83022	6.037427
-2.43898	6.129627
-2.16526	6.184584

**Tableau IV. 8.** Les valeurs de ln( $\sigma$ ) en fonction de ln( $\varepsilon$ ).

Soit :

$$\text{Ln}(\sigma) = \ln(K) + n \cdot \text{Ln}(\varepsilon_p) \quad (\text{IV.15})$$

Soit l'équation de la droite obtenue :

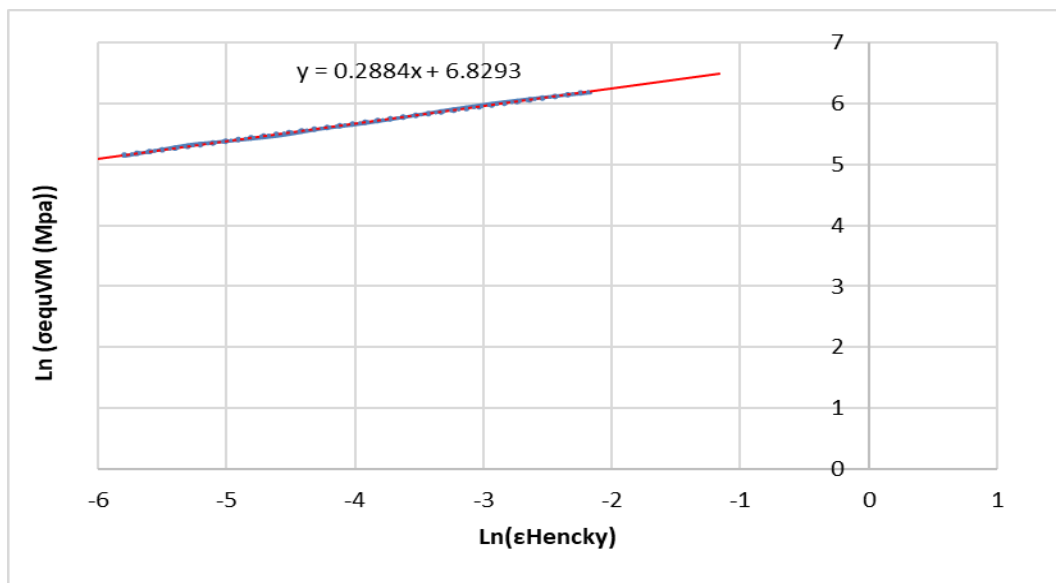
$$\text{Ln}(\sigma) = 6.8293 + 0.2884\text{Ln}(\varepsilon_p) \quad (\text{IV.16})$$

D'après cette équation on obtient :

$$\text{Ln}(K) = 6.8293 \quad (\text{IV.17})$$

$$K = 924.54 \quad (\text{IV.18})$$

$$n = 0.2884 \quad (\text{IV.19})$$



**Figure IV. 11 .** Transformation de la courbe Contraintes-déformations en  $\ln(\sigma)$  et  $\ln(\varepsilon)$ .

#### IV. 4. Conclusion

Les essais réalisés ont démontré une bonne répétabilité et ont permis de caractériser avec précision les propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium.

Les valeurs du module de cisaillement, du module de Young, et les coefficients d'écrouissage sont cohérentes avec les valeurs théoriques. Cependant, la déformation totale atteinte n'a pas permis d'analyser entièrement la courbe de plasticité au-delà de 150%.

Pour des déformations supérieures, il est recommandé de polir les éprouvettes pour minimiser les défauts surfaciques, augmentant ainsi la fiabilité des résultats dans la zone de forte déformation plastique.

# Conclusion générale

## *Conclusion générale*

L'ensemble des données recueillies à partir des essais de torsion met en évidence les limites de la zone élastique de l'alliage d'aluminium, se résumant à seulement deux points significatifs. Cette observation suggère une potentielle inexactitude dans les mesures des modules de cisaillement et de Young, notamment lorsqu'on les compare à des données littéraires.

Ces différences mettent en lumière la nécessité d'employer des essais de traction complémentaires pour affiner la détermination du module de Young et assurer une meilleure corrélation avec les valeurs reconnues par d'autres chercheurs.

L'examen de la courbe contrainte-déformation révèle que sous de fortes contraintes, l'alliage continue de se déformer de manière significative sans augmentation de charge jusqu'à rupture. Cela indique l'imprévisibilité de la réponse du matériau à des déformations plus importantes, nécessitant des mesures expérimentales plus poussées, notamment sur des éprouvettes polies pour réduire les imperfections de surface qui pourraient entraîner une rupture anticipée.

De plus, l'analyse démontre clairement l'impact de l'écrouissage sur le module de Young, avec une augmentation notable de la dureté en début de déformation suivie d'une stabilisation rapide. Il est particulièrement intéressant de noter les variations de dureté entre le centre et la périphérie des éprouvettes, attribuables à un degré d'écrouissage plus élevé en périphérie. Ce phénomène se stabilise par la suite, tandis que la dureté au centre continue d'augmenter, reflétant des modifications dans la structure interne du matériau qui pourrait signaler le début de la détérioration et la formation de cavités, impactant ainsi négativement les propriétés mécaniques du matériau.

Ces observations soulignent l'importance de développer des protocoles expérimentaux plus rigoureux et de diversifier les méthodes d'essai pour obtenir une compréhension plus complète et précise des comportements mécaniques des alliages sous différentes sollicitations.

---

# Références Bibliographiques

---

- [1] Dominique Fraçoisn, Essais mécaniques des métaux : Détermination des lois de comportement, Techniques de l'Ingénieur, Doc. M 120.
- [2] D.Bouguedad, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'éthylène propylène diène monomère (EPDM), thèse, doctorat,UMMTO ;2010.
- [3] william D .Callister, Jr. science et génie des matériaux, john Wilely et Sons,Inc (2007) .
- [4] Abdelmadjid BENAYAD, matériaux monocristallins à forte activité : élaboration, caractérisation, et application, thèse de doctorat, Institut National des Sciences appliquées de Lyon, (2005).
- [5] Mme khariief Amel, Synthèse, caractérisations et étude structural des céramiques PZT de type pérovskite  $Pb_{1-x}La_xCa_x[(Zr_{0.5}Ti_{0.5})_{1-y}Sb_y]O_3$ , mémoire de magister, (2012).
- [6] Bahlouli, N., « Comportement mécanique en température du pli élémentaire d'un stratifié carbone/époxy », 1994, Cachan, Ecole normale supérieure.
- [7] ROUAM Kamila, « Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles », Mémoire de Magister l'université M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES ; 2013/2014.
- [8] Berthelot, J.M., « Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures » Livre, éditions : Lavoisier, 2005.
- [9] « SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION » GHOMARI Fouad UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID. Tlemcen.
- [10] Doughaafaf "Caractérisation Mécanique de L'alliage de Cuivre Cu Sn", mémoire master.
- [11] J.P. Bailon, JU-M-Dorlot, Des Matériaux, presses internationales polytechniques
- [12] B. CHENAL Péchiney, Écrouissage d'alliages d'aluminium, (étude des métaux matériau). 2012.
- [13] Groupe d'ingénieurs des Tréfileries, Tréfilage de l'acier, Techniques de l'Ingénieur, 2012.
- [14] Cours propriétés des matériaux/chapitre-1 caractérisations mécaniques des materiaux.pdf
- [15] Marc Blétry, Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux 2006-2007
- [16] B. JACQUOT, Propriétés mécaniques des Biomatériaux utilisés en Odontologie Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, 2009-2010
- [17] L. Baci, Z. Boumerzoug, C. Esnouf, M. Boucheur, Study of Industrial Aluminum Wire After Cold Wire Drawing And Heat Treatments, (2008).
- [18] D. Francois, A. Pineau, and A. Zaoui, Comportement mécanique des Matériaux. Hermès, (1995).
- [19] DIHA ABDALLAH « Comportement Des Fils Tréfilés Lors De Fluage » , Thèse de magister, université de Biskra ,( 2010).
- [20] M. T. B. marzouk, influence du molybdène sur la résistance mécanique a haute température des aciers inoxydables du type 18 - 14 et particulièrement sur la tenue au fluage vers 700 °c, Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay, (1977).
- [21] Cours Propriétés physiques et mécaniques des céramiques /chapitre-2/université de m'sila.pdf

- 
- [22] Faculté Polytechnique de Mons - Service de Génie Minier, Belgique
- [23] Imen Kallel - Kamoun Analyse mécanique des essais de flexion par flambement postcritique, école centrale de Lyon 1999.
- [24] B.Tanguy, Modélisation de l'essai Charpy par l'approche locale de la rupture, Application.
- [25] Mémoire master professionnelle présentée par: L. RASSOUL et M. FERHI sous le titre de: Etude, conception et fabrication d'un dispositif d'essais en traction biaxiale sur des éprouvettes cruciformes UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU 2015-2016
- [26] B.Radjel et S.Benmedakhen, «la pratique des essais destructifs : l'essai de flexion,» ALGERIE EQUIPEMENT, p. 22, Mars 1996.
- [27] N.Benmanel, «technologiepro,» 00 00 2018. [En ligne]. Available: <https://www.technologiepro.com/cours-sciences-materiaux-plastiques>. [Accès le 14 01 2021].
- [28] P. KRAWCZAK, «Essais mécaniques des plastiques - Caractéristiques instantanées,» 10 07 1999. Available on : [www-techniques-ingenieur.fr](http://www-techniques-ingenieur.fr). [Accès le 17 01 2021]
- [29] [A. P. G. Doubenski, "Resistance des matériaux," université d'Annaba, (1977).
- [30] A. D. A. Castell, "Technologie, Professionnelle générale, 3ème livre," (1978).
- [31] D. François, "Essais mécaniques des métaux, Essais de dureté," Techniques de l'Ingénieur
- [32] M. Béltruy, Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux, 2006-2007