République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DE MEDEA

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Génie Mécanique

speesialite : Ingénierie des matériaux et des surfaces

Thème

Etude et caractérisation des propriétés Mécanique de l alliage a basse d'aluminium (2017-A)

Réalisé par :

Mr. KOUAR Zineddine

Mr. BELHANAFI Khaled

Proposé et dirigé par :

Dr : BELHADJ Abd-El Mouneim

La soutenance aura lieu le **14/06/2018**

2017/2018

Résumé :

Un essai de traction est une expérience de physique qui permet de

- déterminer le comportement élastique d'un matériau ;
- mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau ;

et ce dans un état de contrainte uni axiale.

Certains objets manufacturés doivent avoir un minimum de solidité pour pouvoir supporter les charges, le poids et bien d'autres efforts. L'essai de traction permet de caractériser les matériaux, indépendamment de la forme de l'objet sollicité, ou la performance d'un assemblage mécanique. Comme tout essai mécanique, l'essai de traction reproduit une sollicitation simple, donc éloignée des sollicitations réelles, mais facilement maîtrisable et reproductible.

ملخص:

اختبار الشد هي تجربة المادية التي تسمح

•تحديد سلوك مرن من مادة.

•قياس درجة قوة الشد من مادة.

وفي حالة من الإجهاد ذو محورين.

يجب بعض المواد يكون الحد الأدنى من القوة لتحمل الأحمال والوزن والكثير من الجهود الأخرى.

اختبار الشد تستخدم لتوصيف المواد، بغض النظر عن شكل الكائن المطلوب، أو أداء جمعية الميكانيكية .مثل أي اختبار الميكانيكية، واختبار الشد يستنسخ لمسة بسيطة، والإجهاد بحيث الحقيقي الآن، ولكن يمكن السيطرة عليها بسهولة وقابلة للتكرار

Abstract:

Tensile testing is a physical experience that allows

• Identify flexible behavior of a substance.

• Measure the tensile strength of a material. In the case of stress with two axes. Some materials must have minimal force to withstand loads, weight and a lot of other efforts. Tensile testing is used to characterize materials, regardless of the desired object shape, mechanical performance or assembly. Like any mechanical test, the tensile test reproduces a simple touch, so real stress now, but easily controllable and repeatable

REMERCIMENTS

Ce travail de thèse à été réaliser simultanément au sein de laboratoire du hall technologique de l'université DR YAHYA FARES W. DE MEDEA .

Accompagné au quotidien dans la préparation de ce travail avec la plus grande assiduité ainsi qu'avec des qualités humaine remarquable .sa présence au quotidien fut un atout majeur pour la réalisation et J'exprime mes très sincères remerciement a Monsieur BELHADJ ABD EL-MOUNEÏM , qui a encadrée mémoire, m'a ce travail tant d'un point de vue scientifique que moral et pour bonne humeur

Nous remercions vivement Monsieur DRICHI LKHEÏTHER pour leur soutien quotidien qui ont rendu ce semestre de recherche particulièrement anime et agréable.

Enfin nous remercions l'ensemble de nos collègues, nos professeurs de l'université de Médéa .
Et toute ce qui ont contribues a la réalisation de ce travail

Dédicaces

A nos parents qui nous sont les plus chers au monde;

A tous les membres de la famille KOUAR et BELHANAFI;

A tous nos amis;

A tous ceux que nous 'aimons et qui nous 'aiment, ou 'qu'ils soient ;

A tous ceux qui comptent pour nous;

A tous ceux qui nous aidée de loin et de près ;

I.INTRODUCTION……01

Chapitre 01

II. **I.1. Les Alliages D'aluminium……...02**

III. **I.1.1 Généralités sur les alliages d'aluminium**:……..03

IV. I.1.2 Les alliages d'aluminium de la série 2000 et leurs traitements thermiques:……03

V. **I.1.3 Propriétés et utilisation du 2017A « Duralumin »…….04**

VI. **I.1.3.1. Propriétés et données numériques du2017A……..04**

VII. Légèreté……05

VIII. Résistance mécanique……05

IX. **Résistance à la corrosion……05**

conductivité thermique et électrique……05

Ductilité, malléabilité……05

Recyclabilité……05

Imperméabilité, effet barrière……..05

Propriétés réfléchissantes…….…06

- **propriétés thermiques ……06**
- **propriétés électriques……...06**
- **Module d'élasticité……..06**
- **Ténacité……07**
- **résistance à la fatigue……...07**

I.1.3.2. Quelques exemples d'utilisation du2017A…….07

- **Aéronautique ……...07**

Transports ferroviaires……07

Automobile……08

Le cycle de vie ***Environ 75% du métal produit depuis 1880 est encore en utilisation aujourd'hui, après réutilisation »……08***

I. 2.Observations expérimentales……10

I.2.1.Principe ……10

I.3.ÉPROUVETTES……11

I. 4. Diagramme Conventionnel ……..11

I. 41. Forme classique d'un diagramme de traction……..11

I. 4.2.Propriétés "classiques" déduites de l'essai de traction……..12

I. 4.2.1. Limite apparente d'élasticité……..14

I. 4.2.2. Transition élasto – plastique…….14

I. 4.2.3. Résistance A La Traction……..15

I. 4.2.4. Allongement pour cent après rupture……..15

I. 4.2.5. Striction……15

I. 5. Diagramme Rationnel:……15

I. 5.1. Définition……15

I.6. Corrélation avec la microstructure…….……19

Chqpitre 2

II.1. Matériau Et Eprouvettes Utilisées……..20

II.1.1. Matériau De L'étude……20

II.1.2. Fabrication des éprouvettes……..22

II.1.3.Traitement thermique des éprouvettes…….22

.II.2. Module de Young…….24

II.3. Déformation plastique dans un essai de traction ……..25

II.4 DISPOSITIFS D'ESSAIS…….25

II.4.1. Plateforme traction……...……25

II.5. Résultats et interprétation…..……..28

II.6.L'essai de traction 1……...……28

II.7.L'essai de traction 2…….……..30

Conclusion générale……..33

En sciences des matériaux, on peut distinguer plusieurs types de propriétés pour les alliages métalliques selon leurs utilisations. Par exemple, dans le cas de l'évolution des composants électroniques, ce sont essentiellement les propriétés physiques qui sont en cause et qui seront donc étudiées. Par contre, dans le cas du développement des structures aéronautiques, ce sont les propriétés mécaniques, telles que les modules et les limites d'élasticité, l'écrouissage, la résistance à la fatigue, l'anisotropie en comportement, les limites d'endommagement, etc.), qui sont déterminantes. Afin d'atteindre ce développement dans les alliages d'aluminium où les pièces sont soumises à des chargements variables et conduisant généralement à différents phénomènes du comportement macroscopique, il nous est souvent imposé une étude et un suivi rigoureux de ces propriétés. Ce champ d'investigation a attiré l'intention de plusieurs chercheurs depuis le début du 20ème siècle afin d'améliorer le rendement des structures d'aluminium travaillant en chargement cyclique.

L'objectif de ce travail est de faire une étude expérimentale du comportement cyclique élastoplastique plus au moins approfondie de l'un des alliages d'aluminium les plus utilisés dans ces structures, en l'occurrence le 2017A. La partie expérimentale est réalisée à travers l'analyse d'un séries d'étude en contrainte imposée, qui est constituée de trois essais de traction-compression. L'étude du comportement en fatigue et en endommagement de notre matériau constitue une section importante dans ce travail.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LES ALLIAGES D'ALUMINIUM

I. INTRODUCTION

La partie bibliographie de tout le manuscrit fera l'objet de ce premier chapitre, dans laquelle nous allons étaler l'état de l'art en relation avec le thème abordé dans cette thèse. Nous commencerons par donner un aperçu général sur les alliages d'aluminium, en se focalisant sur leurs propriétés mécaniques et leurs utilisations et intérêts dans le domaine industriel. Ensuite.

Nous allons aussi illustrer cela par quelques travaux de certains auteurs qui se sont intéressés à corréler entre le comportement macroscopique et les observations microscopiques sous différents angles de vue. La modélisation de ce comportement cyclique sera aussi abordée dans cette partie. Ensuite, nous présenterons les travaux réalisés dans le cadre de l'étude de l'endommagement par fatigue dans les alliages d'aluminium. Une attention particulière sera projetée sur l'effet du type de chargement sur la durée de vie obtenue en fatigue. Enfin, nous terminerons ce chapitre par le rappel du contexte général de la présente étude, où nous exposerons tout ce que nous allons apporter comme contributions dans les investigations dans ces domaines.

I.1. Les Alliages D'aluminium

L'aluminium figure comme le troisième élément de l'écorce terrestre en quantité, après l'oxygène et le silicium [1]Mais celui-ci en tant que métal est très jeune ; parce que son existence ne fut prouvée qu'en 1808 par **D. Humphrey** en électrolysant des sels fondus d'aluminium [2]. En effet, l'aluminium pur n'existe pas à l'état naturel, c'est de la bauxite qu'on extrait ce métal après une série de transformations électrochimiques. Les deux types de bauxite sont :

- Les bauxites rouges dont la teneur en oxyde de fer est relativement élevée.
- Les bauxites blanches, qui contiennent peu de fer mais beaucoup de silice.

I.1.1 Généralités sur les alliages d'aluminium:

L'aluminium pur ne présente que peu d'intérêts, car ses caractéristiques mécaniques sont médiocres. Par contre, ses alliages sont des matériaux de choix dans de nombreux secteurs comme l'aéronautique et l'automobile [3].

Les alliages d'aluminium se répartissent dans leurs études en deux familles :

les alliages à durcissement par écrouissage (dislocations) et les alliages à durcissement structural (précipités) [4].L'utilisation d'aluminium en alliage avec les autres éléments est destinée en grande partie à améliorer ses caractéristiques mécaniques. C'est le cas par exemple des alliages des séries 2000, 6000 et 7000 utilisés dans des structures sollicitées mécaniquement.

I.1.2 Les alliages d'aluminium de la série 2000 et leurs traitements thermiques:

Les alliages de la série 2000 (Al-Cu) font partie comme ceux de la série 6000 (Al-MgSi) et la série 7000 (Al-Zn-Mg) des alliages à durcissement structural ou trempant. Leur durcissement est obtenu à travers une suite de traitements thermiques : remise en solution solide, trempe puis revenu [5]. Ils forment une gamme importante d'alliages se caractérisant par :

- Une résistance mécanique importante à l'état trempé-revenu,
- Une utilisation pour les structures portantes et travaillantes :
  aéronautique, automobile.
- Une aptitude au soudage généralement mauvaise selon les procédés traditionnels, hormis le 2219 qui est un alliage soudable très largement utilisé en application spatiale.
- une résistance à la corrosion relativement faible en atmosphère corrosive.
- fonderie sont bien réalisés. Les pièces réalisées dans cette série d'alliage sont très souvent des pièces soumises à des contraintes mécaniques importantes et, de ce fait, font presque toujours l'objet d'un traitement thermique Les principaux éléments d'addition de cette série sont le cuivre et le magnésium. Nous résumons ci-dessous le rôle de ces deux éléments [5].
- le cuivre contribue fortement à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des alliages et améliore considérablement les aptitudes à l'usinage. Par contre, le cuivre est souvent défavorable à la tenue en corrosion de la pièce, une protection de surface (peinture, anodisation) est fréquemment nécessaire.

De plus, les alliages aluminium cuivre, dans lesquels la teneur en silicium est très faible, sont assez facilement sujets à la crique (amorce de rupture) si le refroidissement des fonderies est mal contrôlé. Le cuivre joue un rôle important dans la tenue en fluage des alliages aluminium-cuivre et facilite leurs soudages [1, 6].

- le magnésium est le principal agent d'amélioration des caractéristiques mécaniques et de la tenue à la corrosion des alliages d'aluminium. Il permet aussi un renforcement aux traitements de surface et facilite le soudage des alliages aluminium magnésium .

I.1.3 Propriétés et utilisation du 2017A « Duralumin »

Le 2017A est l'alliage le plus approprié pour réaliser une large gamme de pièces dans l'industrie, en particulier dans l'aviation militaire. En effet, il est à la fois léger et résistant, ce qui le rend le plus courant. Réputé par le nom AU4G, le duralumin peut être considéré comme étant à l'origine du développement de l'aluminium dans l'aviation et également du développement de l'aviation elle-même [7].Cependant, il y a lieu de rappeler que sa résistance à la corrosion en atmosphère corrosive est relativement faible dans le cas de séjours prolongés.

I.1.3.1. Propriétés et données numériques du2017A

Nous donnons ci-dessous quelques propriétés essentielles de cet alliage d'après plusieurs références [Anderson1967, Heath1981, Develay1990c, May2009].

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

Légèreté

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

Résistance mécanique

L'aluminium est utilisé très majoritairement sous forme d'alliages dont le constituant principal est l'aluminium, les éléments d'addition pouvant représenter jusqu'à 15% de son poids. La résistance de l'alliage d'aluminium est adaptée à l'application requise. A titre d'exemple, on considère qu'un kilogramme d'aluminium peut remplacer deux kilogrammes d'acier dans des applications automobiles.

Résistance à la corrosion

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

conductivité thermique et électrique

L'aluminium est un excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité.La conductivité thermique de l'aluminium est utilisée dans de nombreuses applications d'évacuation de la chaleur, c'est-à-dire de refroidissement (comme les systèmes d'air conditionné dans les véhicules).

A poids égal, l'aluminium offre une conductivité électrique deux fois supérieure à celle du cuivre, ce qui explique son emploi privilégié dans les applications de transport d'électricité à haute tension sur grande distance.

Ductilité, malléabilité

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

Recyclabilité

'aluminium est recyclable à 100% sans dégradation de ses propriétés. Son recyclage ne nécessite que peu d'énergie : 5% seulement de l'énergie utilisée pour la production de métal primaire.

Imperméabilité, effet barrière

Même à très faible épaisseur, une feuille d'aluminium est totalement imperméable et ne laisse passer ni lumière, ni micro-organismes, ni odeurs. De plus le métal lui-même ne libère ni odeur ni goût, ce qui en fait un élément de choix pour l'emballage alimentaire ou pharmaceutique.

Propriétés réfléchissantes

L'aluminium possède un pouvoir réfléchissant élevé de la lumière ainsi que de la chaleur ce qui, ajouté à son faible poids, en fait un matériau idéal pour les réflecteurs dans les matériels d'éclairage ou les couvertures de survie.

Symbole	Al
Numéro atomique	13
Masse atomique	27 g/mole
Réseau cristallin	structure cubique à faces centrées
Température de fusion	660°C
Température d'ébullition	2056° C
Masse volumique à 20°C	2,7 g/cm3
Conductibilité thermique à 20 °C	240 W /m °C
Pouvoir réflecteur (aluminium poli)	85 à 90 % dans le spectre visible, 90 à 98% dans l'infrarouge
Module d'élasticité	67 000 MPa

- **Masse volumique :**

Elle varie en fonction de la présence ou non d'éléments d'addition. Elle est de 2700 kg/m3 pour un aluminium de pureté 99,65% et de 2790 kg/m3 pour le2017A.

❖ **propriétés thermiques :**

La température de fusion est de 660,4°C pour un aluminium pur. Elle varie entre 560°C et 640°C pour le2017A.

- **propriétés électriques :**

L'aluminium pur conduit très bien l'électricité puisqu'il se place immédiatement après le cuivre dans les métaux communs avec une résistivité électrique de 2.92 10–8 Ω.m. Les éléments d'addition ont une influence importante sur sa conductivité électrique. Pour le2017A, la résistivité électrique est multipliée quasiment par deux (5.1 10–8 Ω.m) ce qui diminue considérablement sa conductivité électrique.

- **Module d'élasticité :** Le module d'élasticité est de 66,6 GPa pour l'aluminium pur et augmente en présence d'impuretés et des éléments d'addition. Dans le cas de l'AU4G, ce module est compris entre 69 et 72 GPa et son module de cisaillement est compris entre 23 et 26 GPa.

- **ténacité :** La ténacité ou résistance statique résiduelle à la propagation d'une fissure est une

notion très importante pour les alliages travaillant en chargement cyclique car elle conditionne la fiabilité et la sécurité de toute la structure. Cette propriété est caractérisée par le critère KIc lequel se situe entre 21 et 23 √m pour 2017A

- **résistance à la fatigue :** On détermine la limite d'endurance comme étant le rapport entre la limite à la fatigue à 108 en contraintes alternées (traction-compression) et la charge de rupture en traction monotone. Ce rapport varie entre 0,25 et 0,35 dans le cas des alliages de la série 2000. Ce rapport sert à caractériser l'endurance en fatigue.

I.1.3.2. Quelques exemples d'utilisation du2017A

❖ **Aéronautique :**

La raison essentielle de son utilisation dans le domaine aéronautique est la réduction du poids des appareils afin de minimiser la consommation ou augmenter la charge utile et le rayon d'action. L'aluminium est aujourd'hui le premier métal non ferreux utilisé en tonnage dans plusieurs secteurs économiques tels que l'aéronautique où la plupart des alliages utilisés sont issus de la série 2000. Dans cette famille d'alliages, la nuance 2024 reste la plus utilisée. Ce sont ses qualités de résistance à l'endommagement (qui se traduit par une longue durée de vie avant l'initiation des premières phases d'endommagement) qui font que les constructeurs l'utilisent sur toutes les structures d'avions. La technologie aéronautique a permis, par ses besoins de plus en plus pointus, de développer de nouveaux alliages et de nouvelles techniques de caractérisation des alliages d'aluminium. Cependant il présente des caractéristiques mécaniques pouvant être améliorées.

- **Transports ferroviaires :**

Le gain de poids est d'autant plus intéressant que dans ces matériels où la fréquence des arrêts est relativement élevée afin de réduire la consommation lors du démarrage et l'usure lors du freinage (métros récents, remorques d'autorail, etc.).

- **Automobile :** Les applications sont plutôt ciblées dans ce domaine. Telles que la réalisation des culasses, jantes, échangeurs thermiques, pistons et carters, étriers de freins, carrosserie, etc. Nous pouvons indiquer aussi d'autres domaines d'utilisations des alliages d'aluminium à l'image de l'architecture et le bâtiment, l'industrie électrique et électronique et le domaine du conditionnement alimentaire. En conclusion, nous pouvons confirmer que l'aluminium et les alliages d'aluminium couvrent un domaine étendu d'utilisation puisqu'on trouve à chaque extrémité de ce domaine, d'une part, l'aluminium raffiné à l'état recuit avec une résistance à la rupture de l'ordre de 50 MPa et, d'autre part, les alliages à haute résistance du type Al-Zn-Mg-Cu (série 7000) fortement chargés en éléments d'addition et donne, à l'état trempé revenu, une résistance pouvant atteindre 750 MPa.

Le cycle de vie *Environ 75% du métal produit depuis 1880 est encore en utilisation aujourd'hui, après réutilisation »*

- L'accroissement de notre conscience environnementale a entraîné un usage plus important des méthodes et études liées à l'analyse du cycle de vie.
- L'analyse du cycle de vie est le meilleur cadre pour mesurer l'impact environnemental potentiel d'un produit. Elle comprend une analyse complète couvrant l'extraction du matériau, la fabrication, le transport, l'utilisation, le recyclage ainsi que les opérations connexes de fourniture en énergie, en matériau secondaire, et en transport. Les normes ISO 14040 et 14044 définissent des règles et une méthodologie qui prennent en compte et intègrent toutes les étapes du cycle de vie du produit.
  La European Aluminium, à laquelle l'AFA est affiliée, soutient l'utilisation de cette méthodologie en présentant des données fiables sur la production primaire d'aluminium, la fabrication de produits semi-finis, le recyclage de l'aluminium et sa fin de vie :
- Cycle de vie type pour un produit en aluminium
- En général l'approche retenue pour une analyse de cycle de vie est celle « du berceau à la tombe », cette tombe n'étant que celle du produit manufacturé. Le métal continuant son existence grâce au recyclage il s'agit dans ce cas plutôt d'une approche « du berceau au berceau »

- Le cycle de vie d'un produit en aluminium peut être modélisé à travers les différentes étapes présentées dans le schéma ci-dessous. A noter : lorsque l'on parle de « fin », ce terme désigne la fin de vie du produit, et non celle du matériau aluminium qui, lui, est recyclé à l'infini.

- Extraction de la bauxite : première étape de la production d'aluminium.

- Production d'alumine : matériau brut pour la production de l'aluminium primaire, elle est extraite de la bauxite.

- Production de l'aluminium primaire : produit par électrolyse.

    - La semi-fabrication inclut plusieurs procédés industriels : le laminage, le filage, le moulage,…
    - Fabrication du produit : l'aluminium est ensuite transformé en produits.
    - Phase d'utilisation : les principaux débouchés pour les produits en aluminium sont le transport, la construction de bâtiments, l'emballage et l'ingénierie.

Recyclage : tous les produits en aluminium collectés sont recyclés et utilisés à nouveau dans d'autres usines.



Fig.1.1.cycle de vie type pour un produit en aluminium

I. 2.Observations expérimentales:

Les essais de traction-compression uni-axiaux sont à la fois les plus simples et les plus couramment utilisés pour mettre en évidence, à travers des observations macroscopiques, les caractéristiques du comportement élastoplastique mécanique d'un matériau métallique. Le principe de base est de soumettre une éprouvette de longueur initiale L_0 et de section initiale A_0 à un effort cyclique.

I.2.1.Principe :

l'essai consiste a soumettre une éprouvettes un effort de traction et cela généralement jusqu'à rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques.

on impose en général une déformation croissante a une éprouvettes sur la quelle on trace deux repères initialement distincts de l_0, et on mesure simultanément l'effort f et l'allongement :

$$\Delta l = L - L_0.$$

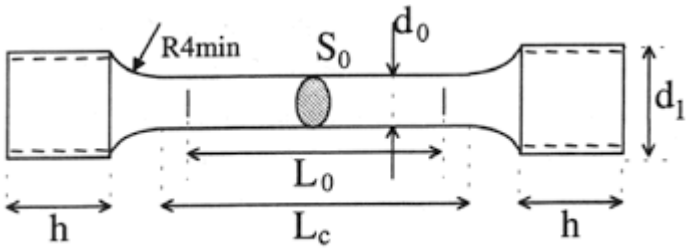


fig I.2.:représentation schématique d'une éprouvette cylindrique

I.3.ÉPROUVETTES :

L'éprouvette est généralement obtenue par usinage d'un prélèvement d'un produit ou d'une ébauche moulée. Sa section est généralement plate (fig. 1 (1)) ou circulaire(fig. (3)).

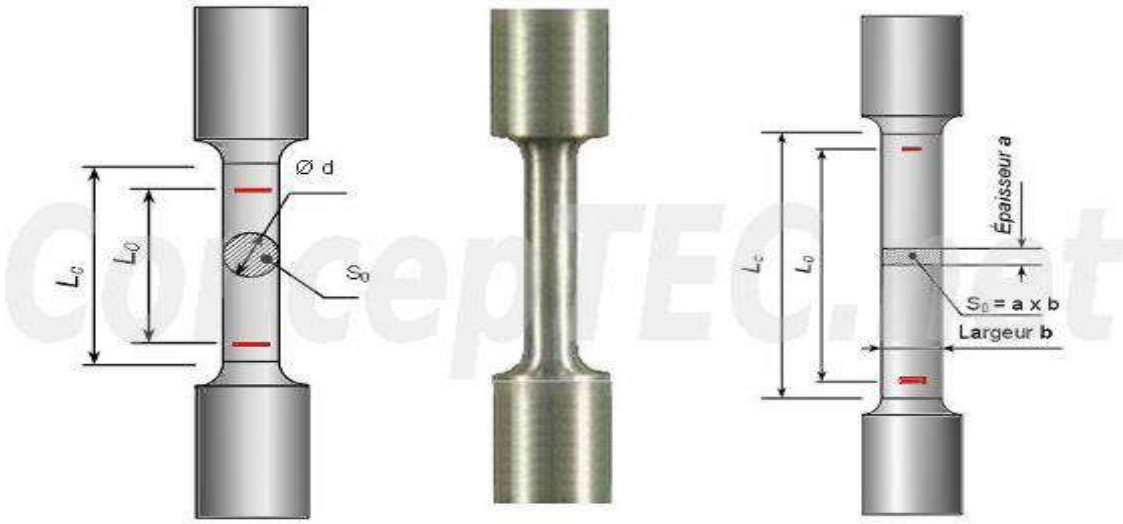


Fig. I.3: géométrie des éprouvettes de traction

Toute éprouvette doit comporter une partie calibrée de longueur L_0 qui doit être usinée d'une manière très soignée avec des tolérances bien définies. Cette longueur doit être proportionnelle à la section selon l'expression empirique**:**

$$L_0 = k.\sqrt{S_0}$$

avec S_0 : section initiale de la partie calibrée, k = 5.65

I. 4. Diagramme Conventionnel :

I. 41. Forme classique d'un diagramme de traction :

Le diagramme de traction représente l'évolution de la charge unitaire

$$R = \frac{F}{S}$$

en fonction du taux d'allongement

$$e = \frac{L - L_0}{L_0}$$

La courbe conventionnelle a l'allure donnée par la figure suivante :

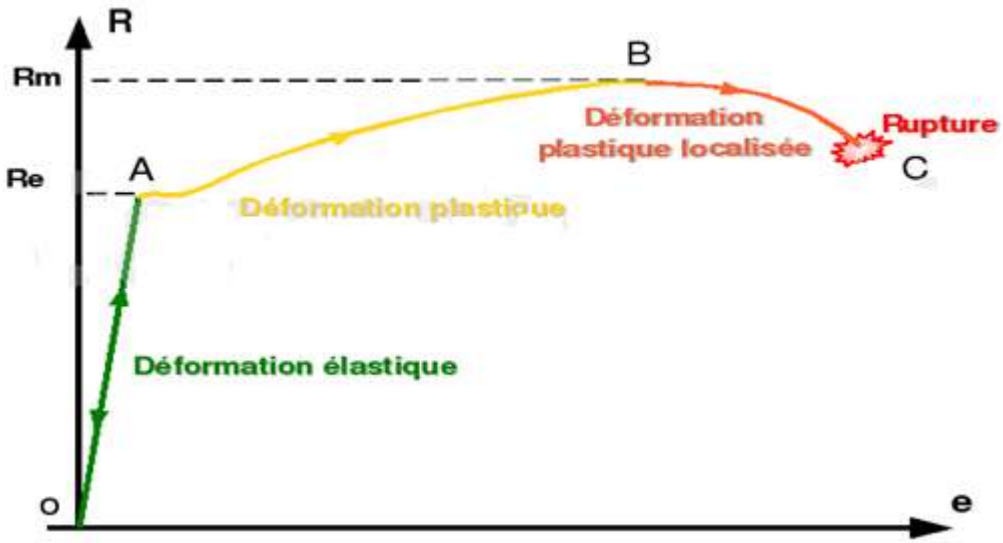


Fig. I.4: Allure de la courbe conventionnelle de traction

- **OA : domaine élastique à déformation réversible** $R=E.e$ **le coefficient de proportionnalité est le module d'Young** E**), e point** A **marque la limite du domaine élastique.**
- **AB : domaine de déformation permanente homogène ou de déformation plastique répartie; le point** B **se situe à charge maximale et au début de la striction ;**
- **BC** : **domaine de striction ou de déformation plastique localisée ; C : point de rupture de l'éprouvette**.

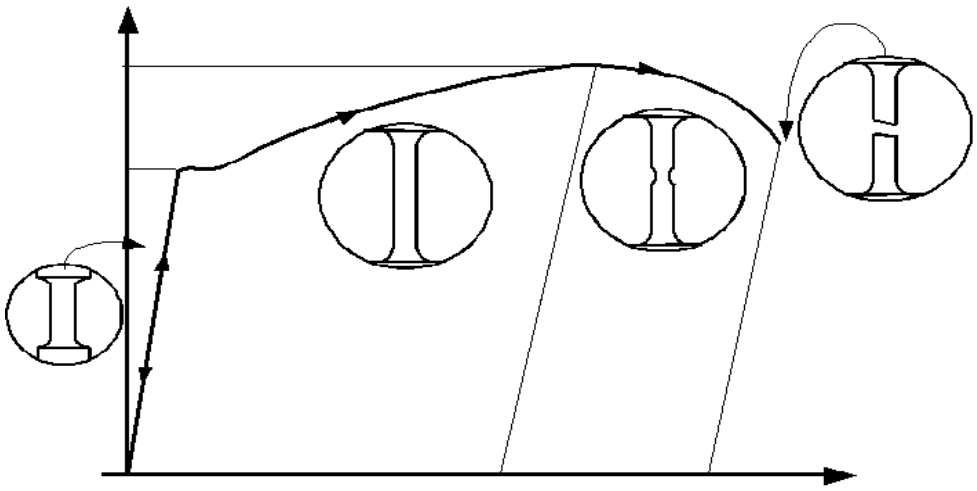


Fig. I .5 représentation des éprouvettes selon la charge appliquée

I. 4.2.Propriétés "classiques" déduites de l'essai de traction:

I. 4.2.1. Limite apparente d'élasticité:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$ ***en* MPa *; F en* N *; S_0 en* mm^2**

Certaines Courbes De Traction Ne Présentent Pas De Limite Apparente D'élasticité Nette (Aciers Austénitiques, Aluminium,...), De Telle Sorte Que L'on Définit Une Limite Conventionnelle D'élasticité (Souvent Fixée A 0. 1% Ou 0.2%).

$$R_{r0.2} = \frac{F_{r0.2}}{S_0}$$ **en *Mpa***

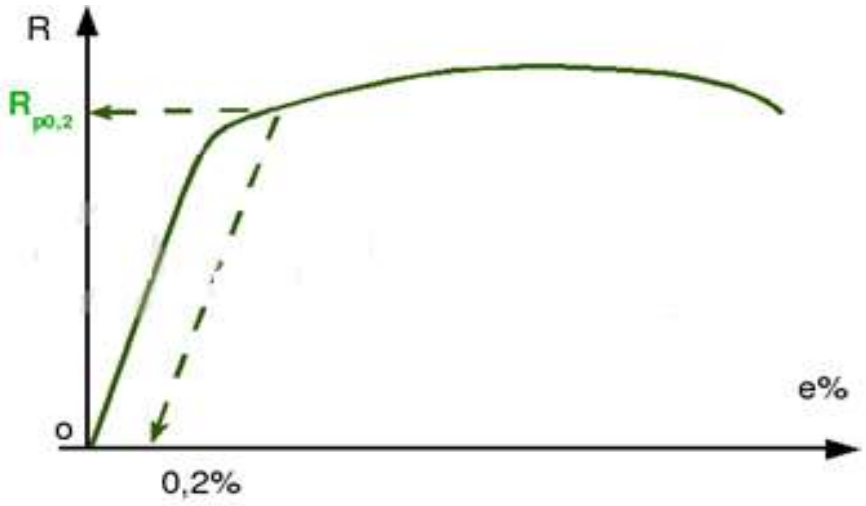


Fig. I. 6 Limite conventionnelle d'élasticité

I. 4.2.2. Transition élasto – plastique :

Dans certains cas (aciers ferritiques), la transition élastique - plastique se fait de façon hétérogène (bande de Piobert Lüders). Dans ce cas, la courbe possèdera un crochet de traction suivi d'un palier de charge. La norme définit trois éléments :

- **une limite supérieure d'élasticité R_{eH} en (MPa);**
- **une limite inférieure d'élasticité R_{el} en (MPa);**
- **la longueur du palier A_p en (%).**

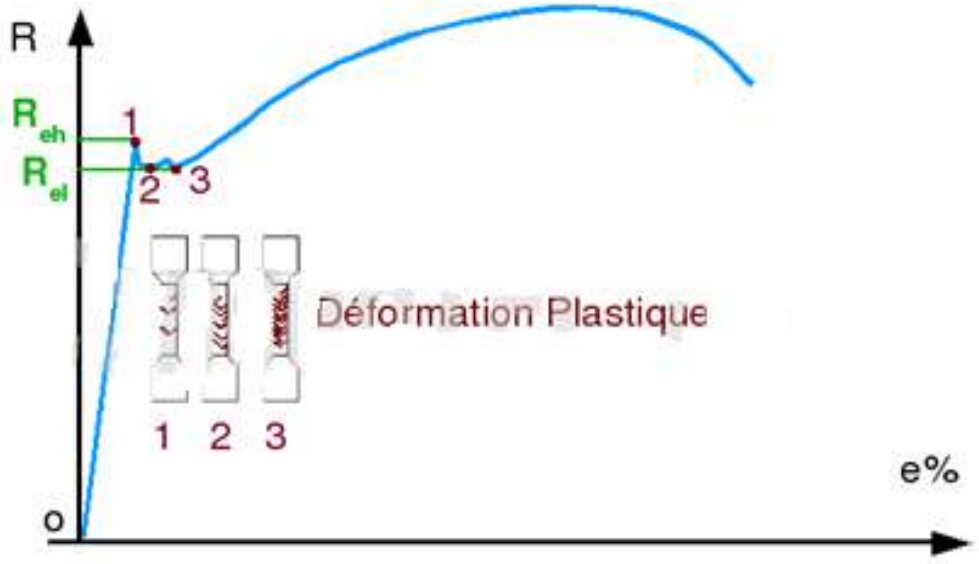


Fig. I.7: Limite inférieure et supérieure d'écoulement
(palier de Piobert Lüders)

I. 4.2.3. Résistance A La Traction:

$$Rm = \frac{F_m}{S_0}$$

Défini par:

Avec F_m= charge maximale; Rm en (MPa).

I. 4.2.4. Allongement pour cent après rupture:

$$A = \frac{L_u - L_0}{S_0} \times 100.$$

Défini par A%=

Ou L_u = longueur de l'éprouvette reconstituée après rupture.

I. 4.2.5. Striction On définit:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100.$$

- le coefficient de striction :
- l'allongement de striction

Où S_u est la section minimale de l'éprouvette après rupture.

I. 5. Diagramme Rationnel:

I. 5.1. Définition:

La courbe conventionnelle permet de définir des propriétés mécaniques permettant de caractériser un matériau, mais elle ne peut pas renseigner pas sur la loi de comportement (relation entre la charge réelle et la déformation réelle) dans les domaines élastique et plastique du matériau car elle ne teint pas compte de la diminution de la section.

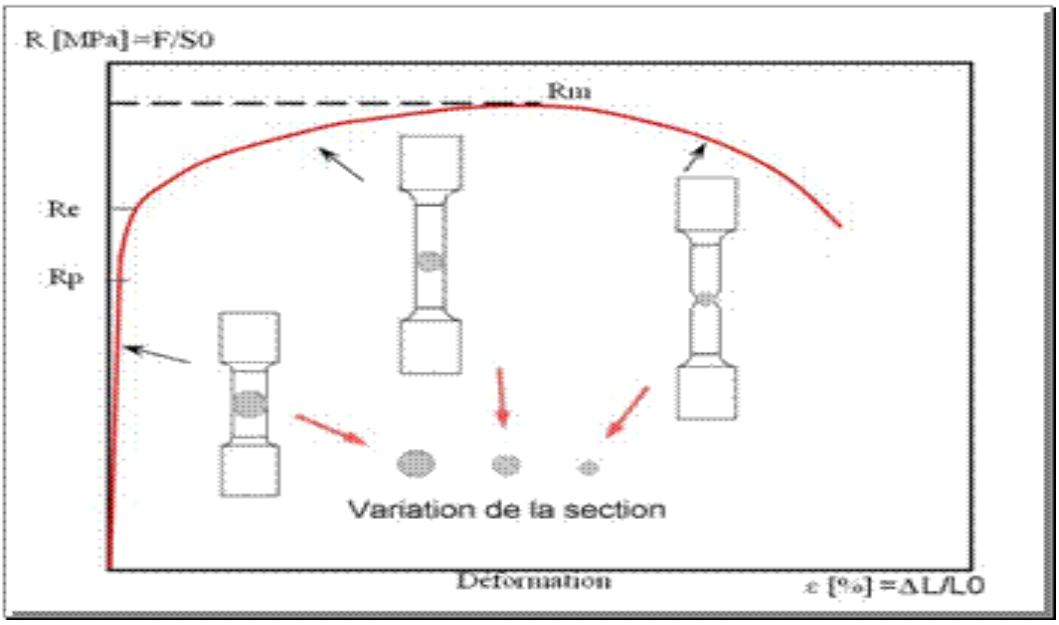


fig. I.8. Variation de la section au cours de l'essai

La courbe rationnelle (ou le diagramme rationnel) de traction est la représentation de la courbe en ordonnées la contrainte vraie, et en abscisses la déformation rationnelle.

I.6. Corrélation avec la microstructure:

Il est bien connu que l'amorçage des fissures en chargement cyclique apparait tout d'abord à l'échelle d'un grain (ou de quelques grains), appelée échelle mésoscopique. A cette échelle, les contraintes et déformations sont difficiles à quantifier. Il est donc très important d'utiliser une méthode de changement d'échelle pour les estimer. Pour cela, il est généralement préférable de travailler avec la notion d'élément de volume représentatif (EVR) qu'on doit supposer suffisamment petit pour pouvoir distinguer.

les hétérogénéités et suffisamment grand pour être représentatif du comportement macroscopique global du matériau. Lorsqu'une structure mécanique s'adapte, le comportement « macroscopique » du matériau reste généralement élastique. Cependant, quelques grains défavorablement orientés subissent une déformation plastique, qui sera ensuite noyée dans une matrice élastique. Pour mieux comprendre cette approche, nous pouvons assimiler ces grains à des inclusions élastoplastiques noyées dans une matrice parfaitement élastique (Fig.I.9)

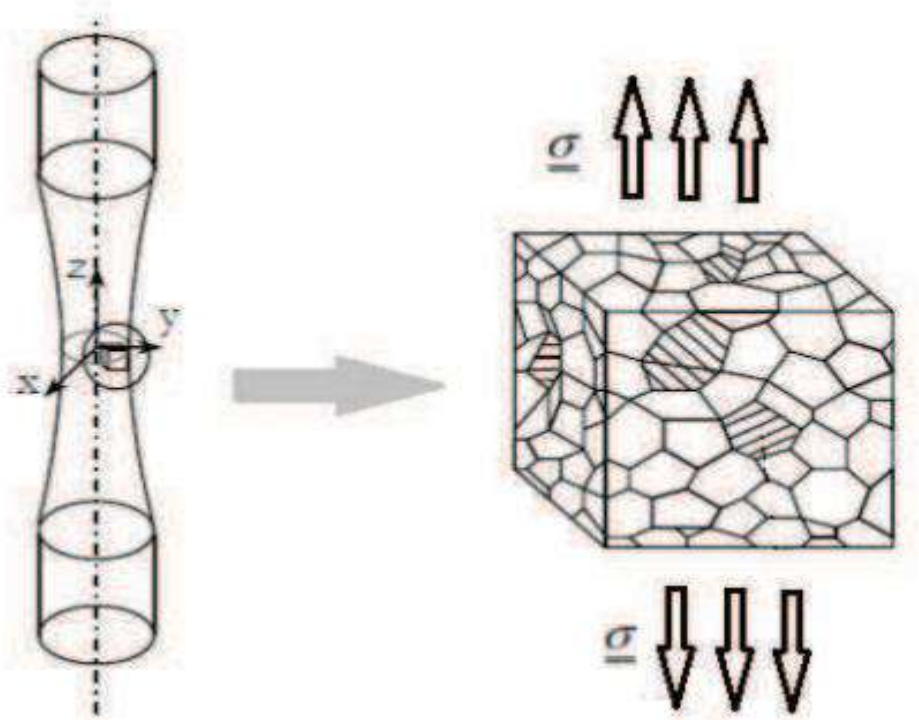


Fig. I.9 : Le passage de l'échelle macroscopique à l'échelle mésoscopique

La bibliographie parlant de ce contexte devient de plus en plus riche depuis plusieurs années et particulièrement depuis l'invention du microscope électronique à balayage (MEB) et celui en transmission (MET). Le but de la plupart des travaux réalisés dans ce domaine est de lier le comportement macroscopique des structures aux observations obtenues à l'échelle microscopique, afin de comprendre le mécanisme de détérioration du matériau et du comportement élastoplastique de la structure d'une manière générale. Nous pouvons citer quelques travaux qui ont marqué ce domaine à l'image de :

Srivatsan et Coyne [Srivatsan1986 et Srivatsan1990], Parker et al [Parker1996], Flaceliere et al [Flaceliere2007], Taleb et al [Taleb2009] etc. Nous pouvons explorer les travaux qui sont le plus en relation avec notre étude. Srivatsan et Coyne [Srivatsan1986] ont découvert que les précipités qui existent dans les matrices induisent des concentrations de contraintes conduisant à des bandes de glissement très intenses générant ainsi des nucléations de microfissures. Quelques années plus tard, les mêmes auteurs [Srivatsan1990] ont conclu que l'existence de précipités facilement cisaillables par les dislocations conduisent localement à des chutes de concentrations de contraintes. Parker et al [Parker1996] ont révélé qu'il y'a une forte interaction entre les bandes de glissement et les dislocations au cours de la déformation. Dans leur étude sur le comportement cyclique du 304L et dans le but de comprendre l'effet du trajet de

chargement sur le durcissement ou l'adoucissement de ce matériau, Taleb et al [Taleb2009] ont réalisé une investigation microstructurale originale, en utilisant la microscopie électronique à transmission (MET) et une technique de mesure basée sur l'utilisation du champ magnétique (SQUID). Ils ont pu lier les différentes observations macroscopiques avec les différentes morphologies et les distributions des dislocations ainsi qu'avec la quantité et l'orientation des nouvelles plaquettes de martensite induites par déformation (Fig. I.13 et Fig. I.14). L'échantillon de la figure I.13a est pris d'une éprouvette sollicitée en déformation contrôlée par 10 cycles en traction-compression suivie de 10 cycles en torsion alternée équivalente, celui de la figure I.13b est quant à lui pris d'une éprouvette sollicité par les mêmes cycles mais appliquées de manière alternée (traction-compression puis torsion puis traction-compression…). Pour la figure I.14, nous avons l'échantillon (a) qui est pris d'une éprouvette chargée selon un trajet circulaire à une déformation équivalente de 0.2%, et l'échantillon (b) d'une éprouvette sollicitée selon le même principe que celui Chapitre I : Chapitre I considéré dans la figure I.10a mais avec une amplitude de déformation équivalente de 0 .2%.

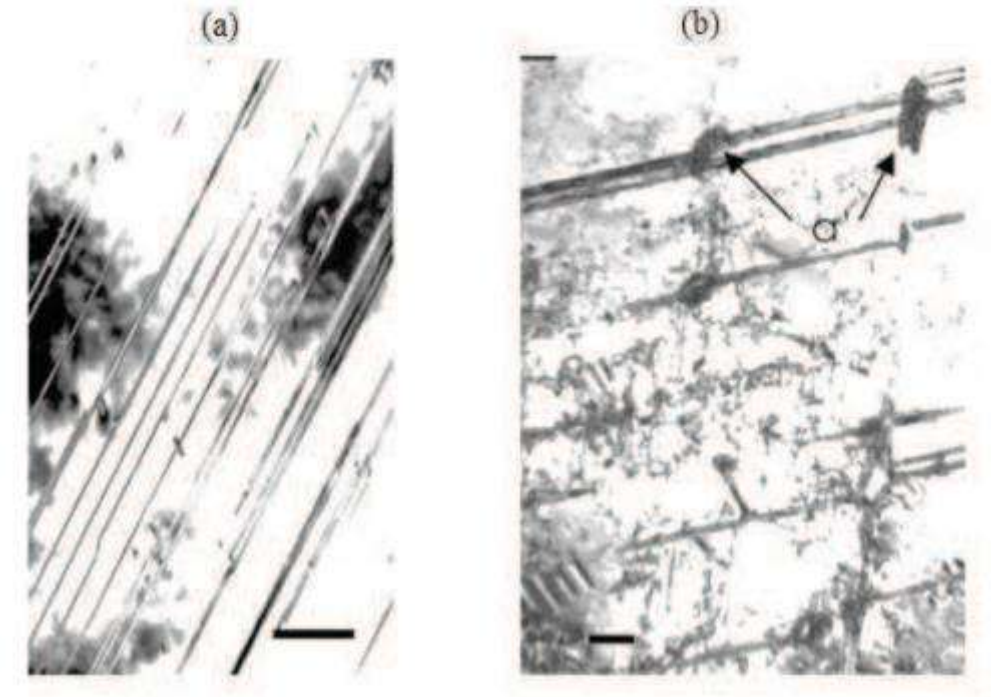


Fig. I.10 : Images MET montrant la nature et la structure des défauts. échelle de 100 nm : (a) fautes d'empilements unidirectionnels. (b) nucléation de la martensite à l'intersection des fautes d'empilement [Taleb2009].

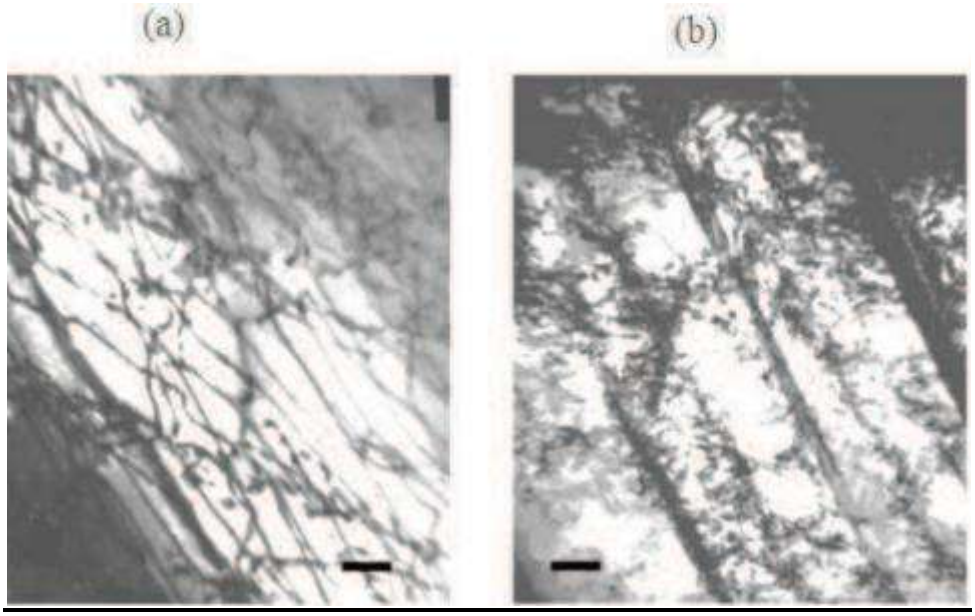


Fig. I.11: Micrographie des dislocations de deux exemples des échantillons étudiés. Echelle 100 nm : (a) Structures sous forme de réseau (b)

Nous pouvons citer aussi les travaux réalisés récemment par Flaceliere et al. dans cette optique d'investigations multi-échelles, notamment à l'échelle mésoscopique. Nous présentons dans la figure suivante (Fig. I.15), deux résultats des plus remarquables de leurs travaux.

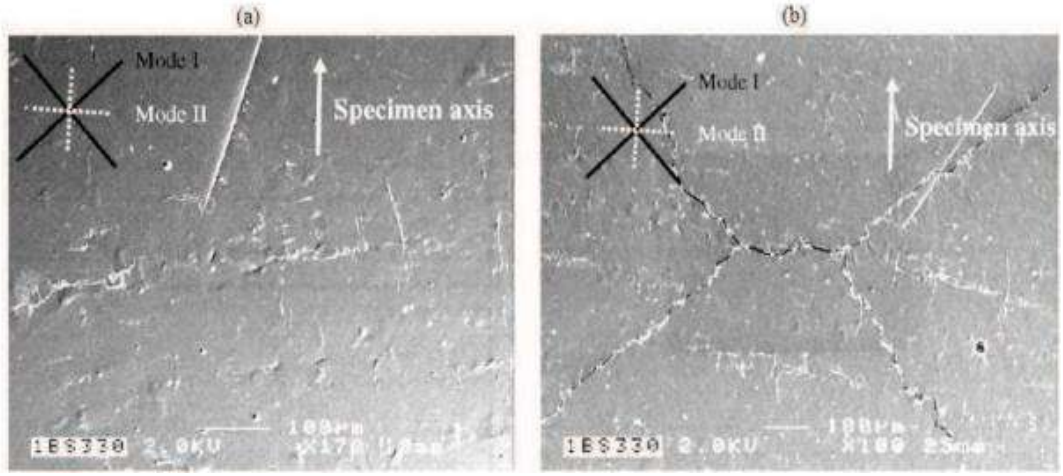


Fig. I.12 : Micrographie des surfaces externes d'éprouvettes en cours du chargement cyclique (torsion alternée). (a) échantillons montrant la détérioration de la surface externe après 3.105 cycles. (b) échantillons montrant la direction et les modes de fissuration après 8.105 cycles

II.1. Matériau Et Eprouvettes Utilisées

II.1.1. Matériau étudie

Le matériau étudié est le 2017A, un alliage constitué principalement d'aluminium et de cuivre largement utilisé en aéronautique, en raison de sa grande résistance aux contraintes et de sa plus faible densité comparée à l'acier. Appelé fréquemment dans le langage des industriels le duralumin ou encore duralumin, mais deux différentes désignations capitales peuvent être affectées à cet alliage, en l'occurrence AU4G (Norme NF A 02-104) et 2017 (Norme NF A02-004 / EN 573-1). Mais le critère qui définit cette appellation repose sur la composition massique de l'alliage que nous présentons dans le tableau suivant (Tab. II.1).

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ni	Cr	Al
3.9 - 4.0	1.1 - 1.2	0.7 - 0.8	0.5 - 0.6	0.6 - 0.7	< 0.21	< 0.16	< 0.10	reste

Tab. II. 1 : Composition chimique en pourcentage massique du 2017A utilisé

II.1.2. Fabrication des éprouvettes:

Les éprouvettes utilisées dans cette étude ont été usinées par un partenaire industriel.

à partir de barres coulées puis extrudées. Elles sont de type tube mince avec deux têtes massives en leurs extrémités. Leur géométrie est représentée dans la Fig. II.1. Avec cette géométrie, nous pouvons supposer que le champ de contraintes dans la partie utile est quasiment homogène lors du chargement.

La surface de l'éprouvette est bien polie pour diminuer les effets néfastes de la rugosité en chargement cyclique et par conséquent réduire au maximum son influence sur la durée de vie en fatigue. Cette surface semble présenter un état miroir à l'œil nu. Mais à l'échelle microscopique, les traces de l'outil d'usinage demeurent encore existantes, ce qui rend leurs effets non nuls en chargement cyclique essentiellement lorsque nous travaillons en fatigue à grand nombre de cycles.



Fig. II.1 : Eprouvette de traction normalisé

La figure suivante (Fig. II.2), présente cet état de surface, observé au Microscope Electronique à Balayage (MEB), où nous remarquons la persistance des traces d'usinage montrées par des flèches noires.

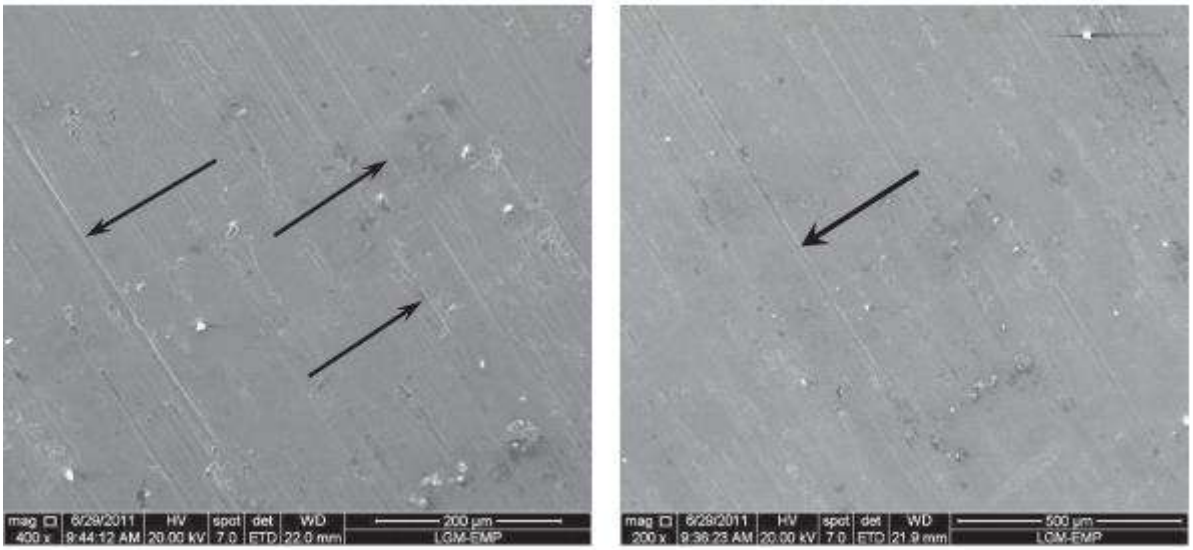


Fig. II.2 : Micrographie MEB de la surface des éprouvettes utilisées

D'après la présentation précédente de notre matériau, nous pouvons conclure que nos éprouvettes ont plus ou moins une texture orientée obtenue par extrusion. Le plus souvent dans l'industrie et selon le cas et les applications visées, il est recommandé de créer une texture et d'autre fois d'en supprimer une autre. Lorsqu'une texture préférentielle est le résultat d'une déformation plastique (extrusion, laminage, …etc.), un recuit de recristallisation s'impose comme le moyen le plus adéquat pour effacer cette anisotropie, si elle est jugée néfaste dans l'application.

II.1.3.Traitement thermique des éprouvettes:

Toutes les éprouvettes utilisées dans la présente étude ont subi le même traitement thermique afin d'avoir des états mécanique et métallurgique les plus proches possible. Nous représentons le cycle de traitement thermique appliqué dans la Fig. II.3.

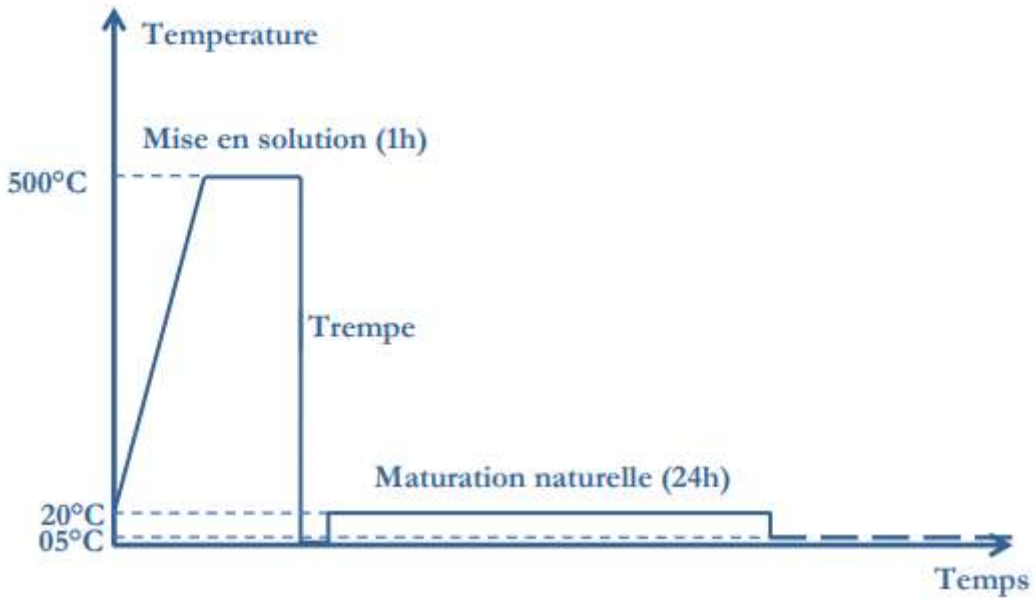


Fig. II.3: Traitement thermique appliqué aux éprouvettes avant les essais cycliques

Le traitement thermique réalisé est composé d'une mise en solution pendant une heure (1h) à 500°C, qui représente une mise en solution en phase α, suivi d'une trempe dans l'eau glacée salée (0 à 2°C). Ensuite, une maturation naturelle pendant 24 heures à 20°C est imposée à toutes les éprouvettes (vieillissement naturel conduisant à différents état de précipitation). Enfin, ces dernières ont étés placées dans une enceinte à température régulée (4 à 6°C) jusqu'au moment de l'essai.

Toutefois, l'essai n'a de sens que si l'éprouvette elle-même est homogène, ceci étant en général garanti par sa petite taille par rapport aux variations de propriétés de la matière. Par ailleurs, pour l'analyse du résultat, on considère en général qu'elle est isotrope.

Dans l'éprouvette, on s'intéresse à la partie calibrée, qui est la partie dans laquelle la section droite ne varie pas (partie de largeur uniforme). Au sein de cette partie calibrée, on trace deux repères « un peu à distance » des congés ; les efforts et la déformation dans cette partie entre repère est réputée uniforme (principe de Saint-Venant). La longueur de la partie calibrée est notée Lc. La longueur de la partie entre repères est notée L0, et peut être fixe ou proportionnelle : Éprouvette non-proportionnelle : les valeurs communément rencontrées pour L0, sont 50, 80, 100 ou 200 millimètres, et, en unité impériale, 2, 4 ou 8 pouces. Plusieurs valeurs mesurées ne sont comparables entre-elles que pour les éprouvettes de même longueur L0 et de même section S0 ; une modification de L0 ou de S0 change le résultat de la mesure.

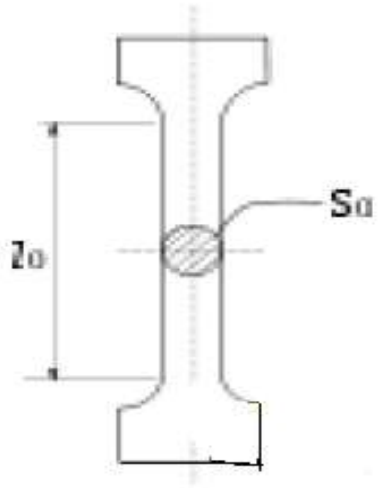


Figure II.4 : Représentation schématique d'une éprouvette cylindrique

Éprouvette proportionnelle :

L 0 = k × S 0 ou L 0 = n × d 0 Les mesures effectuée à partir d'éprouvettes proportionnelles ayant même coefficient *k* ou *n* sont comparables entre-elles. où :

- L0 est la longueur de la partie entre repères ;
- *k* est un coefficient (les valeurs communément rencontrées sont 4, 5,65, 8,16 et 11,3) ;
- n est un coefficient (les valeurs communément rencontrées sont 4, 5 et 8) ; plus n est grand, plus la contrainte dans la section entre repères est homogène

- d_0 est le diamètre de la partie entre repère d'une éprouvette cylindrique. S_0 est l'aire de la section droite.

Dans la pratique, la valeur *k* adoptée sur le plan international est 5,65 (norme ISO 6892-1) ce qui correspond à n = 5 pour une éprouvette cylindrique : L0 = 5×*d*0. or S 0 = π × d 0 2 4 , d'où d 0 = 4 × S 0 π = 4 π × S 0 En posant k = 5 × 4 π = 5 , 6419 ≈ 5 , 65 on obtient : L 0 = 5 , 65 × S 0 L'expression d'une valeur d'allongement doit toujours être associée à l'éprouvette qui a servi à la mesurer ; il est primordial de préciser L0 et S0 pour une éprouvette non-proportionnelle,et, k ou n pour une éprouvette proportionnelle. Une conversion des valeurs d'allongement est possible à partir des normes NF EN 10002-1 (Aluminium) dans le cadre a température ambiante

.II.2. Module de Young:

Le module de Young ou module d'élasticité (longitudinale) ou encore module de traction est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et le début de la déformation d'un matériau élastique isotrope.

Le physicien britannique Thomas Young (1773-1829) avait remarqué que le rapport entre la contrainte de traction appliquée à un matériau et la déformation qui en résulte (un allongement relatif) est constant, tant que cette déformation reste petite et que la limite d'élasticité du matériau n'est pas atteinte. La loi d'élasticité est la loi de Hooke, c'est-à-dire σ = E et ε =E où :

- σ est la contrainte (en unité de pression).
- E est le module de Young (en unité de pression). .
- **ε** est l'allongement relatif, ou déformation (adimensionnel).

Le module de Young est la contrainte mécanique qui engendrerait un allongement de 100 % de la longueur initiale d'un matériau (il doublerait donc de longueur), si l'on pouvait l'appliquer réellement : dans les faits, le matériau se déforme de façon permanente, ou se rompt, bien avant que cette valeur ne soit atteinte. Le module de Young est la pente initiale de la courbe de déformation-contrainte. [13]

Un matériau dont le module de Young est très élevé est dit rigide. L'acier, l'iridium, le diamant, sont des matériaux très rigides, l'aluminium et le plomb le sont moins. Les matières

plastiques et organiques, les mousses sont généralement peu rigides, on dit qu'elles sont souples, élastiques ou flexibles (pour un effort de flexion).

N. B. Ne pas confondre :

- rigidité et résistance : la résistance mécanique d'un matériau est caractérisée par sa limite d'élasticité et/ou sa résistance à la traction ;
- rigidité et raideur : la raideur d'une poutre (par exemple) dépend de son module de Young (de sa rigidité) mais aussi du rapport de sa section à sa longueur[1]. La rigidité caractérise les matériaux, la raideur concerne les structures et les composants : une pièce mécanique massive en matière plastique peut être beaucoup plus raide qu'un ressort en acier ;
- rigidité et dureté : la dureté d'un matériau définit la résistance relative qu'oppose sa surface à la pénétration d'un corps plus dur.

Le tenseur des rigidités généralise le module de Young aux matériaux anisotropes.

II.3. Déformation plastique dans un essai de traction :

Sur un essai de traction simple (uni axial), la déformation plastique produit une allongement irréversible de l'éprouvette. Sur la courbe contrainte-déformation, la partie élastique correspond à la partie linéaire (droite) de la courbe, le domaine plastique correspond à l'infléchissement de cette courbe. La limite entre les deux domaine définit la limite d'élasticité notée ici Re.

Si l'on arrête l'essai en cours (avant striction et rupture), alors l'éprouvette se rétracte élastiquement d'une valeur **εe**, mais conserve une déformation résiduelle **εp.** Cette déformation constitue **εp** la déformation plastique.

II.4 DISPOSITIFS D'ESSAIS:

II.4.1. Plateforme traction:

- Préparation des échantillons et éprouvette:

Avant découpage des éprouvettes, un contrôle visuel des cordons de soudures est nécessaire pour localiser les éprouvettes d'essais.

- Prélèvement et réalisation des éprouvette:

Le découpage et usinage des éprouvettes des essais (traction et résilience) a été effectué au niveau d'une atelier privé.

trois (03) éprouvettes , sont prélevées pour réalisé l'essais de traction pour le premier matériau (2017A).

Usinage des éprouvette de traction:

Toutes les éprouvettes de traction ont été préparées selon la norme ASTM.Celle-ci recommande des

éprouvettes cylindriques dont la longueur de la section utile



Figure .II.5 Eprouvette de traction normalisé

Essai de traction: L'essai de traction l'un des essais les plus pratiqués et qui permet de déterminer des

caractéristiques mécaniques fondamentales des matériaux : limite d'élasticité, charge de rupture, allongement de rupture notamment. Il consiste à réaliser, dans une éprouvette, un champ de contrainte uniforme uni axiale de traction et à enregistrer l'allongement résultant.



Figure II.6: Machine de traction (gunt hamburg)

Les éssais de traction sont effectués au niveau de (hall technologique de l ‘université dr YAHIA FARES médéa)**.**

Afin de pouvoir utiliser les courbes de traction brutes, on doit les modifier de façon que les résultats

obtenus ne soient fonction que du matériau étudié et non de la géométrie de l'éprouvette ; On définit

ainsi :

La Contrainte : $\sigma = F / S0$ unité : Pascal

La Déformation : s = Al / l0

III.1. Résultats et interprétation:

Résultats des essais réalisés en traction Les résultats obtenus en traction monotone sont extraits à partir des premiers cycles dans les essais réalisés en vue Les essais de traction sont effectués au niveau de (hall technologique de l 'université. Nous avons réalisé plusieurs essais différentes valeurs de contrainte maximale. Cependant afin d'extraire le comportement monotone, nous allons considérer l'essai pour lequel la contrainte maximale est plus élevée et permet d'atteindre une déformation significative en plasticité. Nous rappelons par ailleurs que les phénomènes de viscosité sont négligeables à température ambiante pour notre matériau

III.2.L'essai de traction 1:



FIg.II.7: Essai de traction terminé

$F_{(N)}$	500	1500	2000	25000	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500
$\Delta L_{(mm)}$	0.03	0.065	0.085	0.11	0.13	0.15	0.18	0.20	0.21	0.23	0.25	0.27	.029	0.31
$\sigma N/mm^2$	17.69	53.07	70.77	88.46	106.15	123.84	141.54	159.23	176.92	194.62	212.31	230	247.69	265.93
ε%	0.1	0.21	0.28	0.36	0.43	0.5	0.6	0.66	0.72	0.77	0.85	0.9	0.96	1.04

8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000	11500	12000	12500	13000	13500
0.33	0.34	0.36	0.39	0.40	0.42	0.44	0.51	1	1.8	2.9	4.1
283.1	300.77	318.47	336.16	353	371.64	389.02	406.93	424.62	444	460	477.7
1.1	1.15	1.21	1.3	1.43	1.45	1.48	1.7	3.33	6	9.5	13.6

tab.II.2: Résultats des essais réalisés en traction

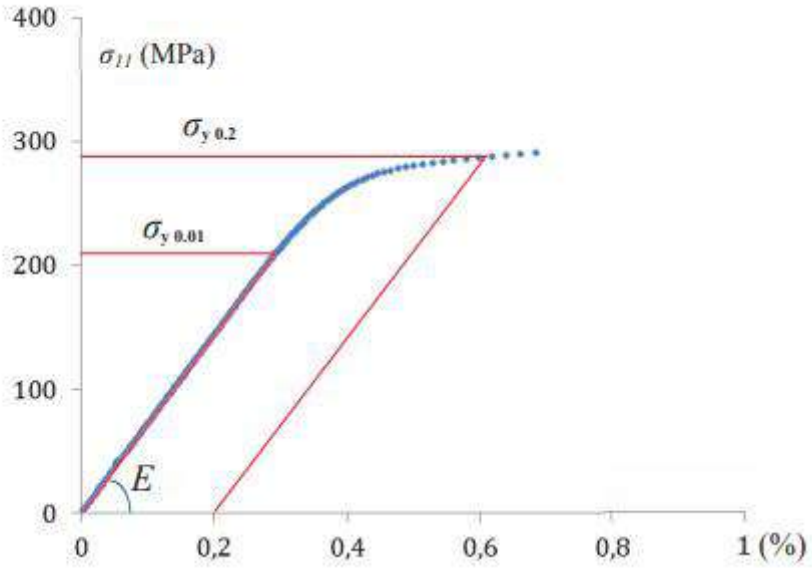


Figure 2.8 Courbe de traction 1

Nous conviendrons à noter E le module d'élasticité dans la direction axiale (zz) appelé communément le module de Young. Il est extrait à partir de la 1ère traction du 1er cycle. Nous avons dans la partie élastique : $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}\frac{244}{0.31\%} =$ 78.70 Gpa

Les résultats trouvés en traction sont résumés dans le tableau

Direction du chargement	**Traction**		
Paramètre	**Δσ**	**Δσ**	**E**
Valeur (MPa)	**225**	**284**	**78705**

III.2.L'essai de traction 2:



FIg.II.9: Essai de traction 2 terminé

$F_{(N)}$	500	1500	2000	25000	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500
$\Delta L_{(mm)}$	0.035	0.09	0.11	0.13	0.15	0.18	0.2	0.22	0.25	0.27	0.29	0.3	0.33	0.35
σN/mm²	17.69	53.07	70.77	88.46	106.15	123.84	141.54	159.23	176.92	194.62	212.31	230	247.69	265.93
ε%	0.11	0.3	0.38	0.45	0.55	0.6	0.68	0.75	0.83	0.9	0.96	1.02	1.16	1.18

8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000	11500	12000	12500	13000	13500
0.37	0.39	0.41	0.43	0.44	0.47	0.49	0.51	0.61	1.12	1.75	390
283.1	300.77	318.47	336.16	353	371.64	389.02	406.93	424.62	444	460	477.7
1.28	1.30	1.36	1.43	1.49	1.56	1.63	1.71	2.03	3.73	5.83	13

tab.II.3: Résultats des essais réalisés en traction

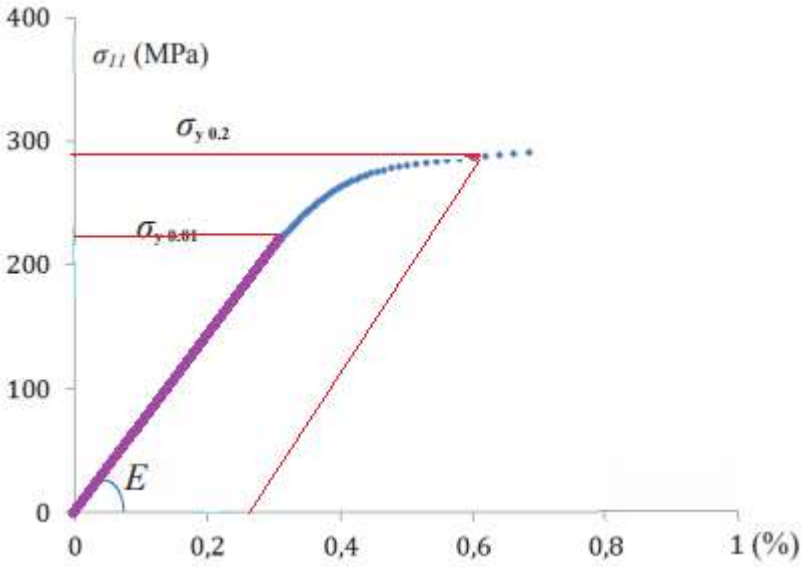


Figure.II.10. Courbe de traction 2

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}\frac{255}{0.36\%} = 70.83\text{Gpa}$$

Direction du chargement	Traction		
Paramètre	Δσ	Δσ	E
Valeur (MPa)	255	291	70831

III.2.L'essai de traction 1:



FIg.II.11: Essai de traction 3 terminé

$F_{(N)}$	500	1500	2000	25000	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500
$\Delta L_{(mm)}$	4	9.5	12	14.24	15.75	17	19.5	21.25	24	26	30	31.25	34.25	36.30
$\sigma N/mm^2$	17.69	53.07	70.77	88.46	106.15	123.84	141.54	159.23	176.91	212.31	230	247.69	265.39	283.18
$\varepsilon\%$	0.13	0.23	0.31	0.4	0.47	0.52	0.56	0.65	0.7	0.8	086	1	1.04	1.14

8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000	11500	12000	12500	13000	13500
37.30	39	40.25	45	85.25	140.05	200	250.05	300	325	350	375
283.08	300.77	3178.47	336.06	353.85	371.54	389.24	406.83	924.62	454.39	460.01	477.7
1.21	1.25	1.3	1.34	1.5	2.84	4.68	6.66	8.53	10	10.30	11.66

tab.II.4: Résultats des essais réalisés en traction

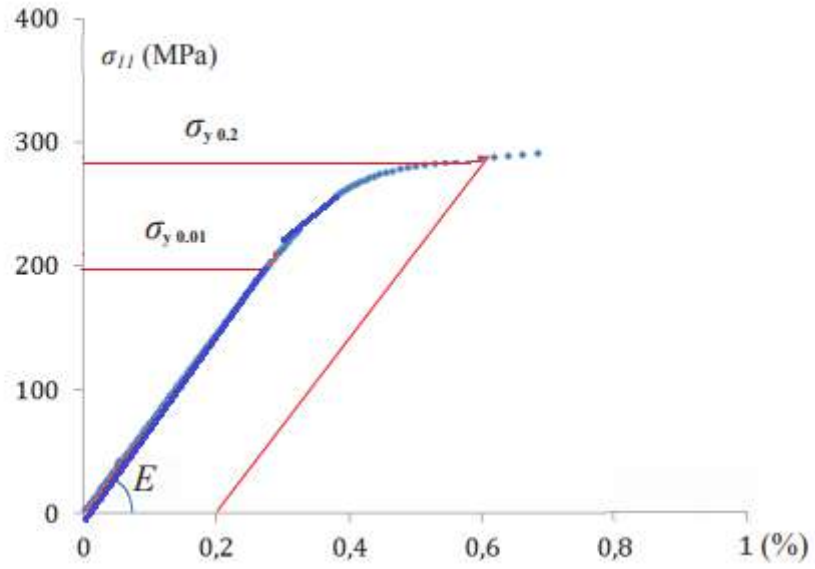


Figure.II.12. Courbe de traction 3

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}\frac{225}{.0.29\%} = 77.58\ \text{Gpa}$$

Direction du chargement	**Traction**		
Paramètre	**Δσ**	**Δσ**	**E**
Valeur (MPa)	**255**	**291**	**77580**

Interprétation des résultats: D'après les caractéristiques mécanique selon la norme NFEN 485-2 et 755-2 on a trouvé que les résultats en terme E, $\Delta\varepsilon$, $\Delta\sigma$ obtenu dans notre travail est proche que les résultats indique dans les normes E=74000Mpa. Cette déférence provient de la composition de matière, de matériel utiliser et de l'expérimentateur.

+

8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000	11500	12000	12500	13000	13500

Conclusion générale:

L'objectif de l'étude présentée dans ce travail est la caractérisation des essais de traction pour connaitre les propriétés mécaniques des ALUMINUIM 2017A, est la résistances mécaniques.

Trois configurations de traction sont considérées pour cette étude : essai de traction pour le matériau, le choix de ce matériaux a été imposé par le promoteur.

Se sont des matériaux largement utilisés dans les industries, les construction et les essais sont réalisées au niveau de HALL TECHNOLOGIQUE YAHYA FARES de Médéa , et les éprouvettes sont usinées au niveau d'une société privé. Les conclusions que l'on peut y tirer sont :

- L'observation métallographique montre que les changements structuraux influents sur les propriétés mécaniques de traction.
- La résistance à la rupture est acceptable.

Références bibliographiques

1. Anderson1967: W.A. Anderson, in: K.R. Van Horn (Ed.), «Aluminum, Properties, Physical Metallurgy, and Phase Diagrams», ASM-Metals Park, OH,1 (1967) 79-108.

2Michel2000: Michel Colombie et Coll., Matériaux métalliques. DUNOD Paris 2000.

3. Barlas2004: B. Barlas, «Etude du comportement et de l'endommagement en fatigue d'alliages d'aluminium de fonderie», Thèse de doctorat, 2004, Ecole des mines de Paris.

4 May2009: A. May, Mémoire de magister, «Contribution à la régénération des propriétés initiales après endommagement par fatigue des alliages d'aluminium», 2009, EMP.

5 Lebert2005: A. A. Lebert, «Etude expérimentale et prévision des mécanismes de rupture des tôles et des joints soudés bout à bout en alliage d'aluminium 6056», Thèse de doctorat, 2005, Ecole des mines de Paris.

6 Dubost1990: B. Dubost, P. Sainfort, «Durcissement par précipitation des alliages d'aluminium», 1990. Techniques d'Ingénieur.

7 Develay1990c: R. Develay, «Données numériques sur l'aluminium non allié», Techniques de l'Ingénieur, fiche M443, 1990.

8 Heath1981: R.L Heath, ASM-Handbook of Chemistry and Physics, 61e édition - Éd.par R.C. Wood-Cleveland, CRC PRESS, 262 (1980-1981).

2. Achani2009: D. Achani, O.S. Hopperstad, O.G. Lademo., «Behaviour of extruded aluminium alloys under proportional and non-proportional strain paths», J. Mater. Process. Technol. 209 (2009) 4750-4764.

3. Aubin2001: V. Aubin, «Plasticité cyclique d'un acier inoxydable austéno-ferritique sous chargement bi-axial non-proportionnel», Thèse de doctorat, 2001, Laboratoire de Mécanique de Lille.

4. Aubin2003: V. Aubin, P. Quaegebeur, S. Degallaix., «Cyclic plasticity of a duplex stainless steel under non-proportional loading», Mater. Sci. Eng. A 346 (2003) 208- 215.

5. Barlas2004: B. Barlas, «Etude du comportement et de l'endommagement en fatigue d'alliages d'aluminium de fonderie», Thèse de doctorat, 2004, Ecole des mines de Paris.

6. Barlat1989: F. Barlat, K. Lian, «Plastic behavior and stretchability of sheet metals. Part I: A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions», Int. J. Plast. 5 (1989) 51-66.

7. Belouchrani1999: M.A. Belouchrani, D. Weichert, «An extension of the static shakedown theorem to inelastic cracked structures», International Journal of Mechanical Sciences, 2 (1999) 163-177

8. Benallal1987: A. Benallal, D. Marquis, «Constitutive equations for non-proportional cyclic elasto-viscoplasticity». ASME J. Eng. Mater. Technol. 109 (1987) 326-336.

9. Benallal1989: A. Benallal, P. Le Gallo, D. Marquis, «An experimental investigation of cyclic hardening of 316 L and of 202