

**Ministère de l'enseignement supérieur
Et de la recherche scientifique
Université Mohamed Boudiaf – M'sila**



**Faculté de technologie
Département Génie mécanique
MEMOIRE
Présenté pour l'obtention du diplôme
De MASTER
Filière : Génie des Matériaux
Option : Génie des Matériaux
Thème**

**L'effet D'écrouissage sur les Propriétés
Mécanique a la Traction
D'un Alliage D'aluminium**

Dirigé par :

Mr : Debih –Ali

Présenté par :

Mahammedi- Dahmane

Promotion : 2017/2018

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Nous tenons premièrement à remercier allah le tout puissant, qui nous a donné la force et La patience d'accomplir ce modeste mémoire.

Le grand merci à allah tout puissant qui m'a protégé le long de mon cursus d'étude.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance et ma gratitude à celui qui m'a aidé pour élaborer Ce travail, Mr.debihe ali , Maître de Conférences à l'université de M'sila, d'avoir accepté L'encadrement de ce thème.

Nos remerciements les plus distinguées vont également aux membres du jury pour l'intérêt

Qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par Leurs propositions.

Nous tenons a remercier les personne de laboratoire de faculté science de matière .

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou De loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

*A ceux qui m'ont soutenu au long de mes études, qui m'ont
Toujours poussé vers le chemin du savoir. à ma source d'amour*

Et d'affection, les deux êtres les plus chères au monde :

Mes Chers parents : kouider et mouna .

*A ma grande famille frères et sœurs : hakim et antare et aissa
et mohammed et ayoub et tous les filles .*

A ma future fiancée.

Les personnes de laboratoire de faculté des sciences et matières :

djalal et zafi .

A tous mes amis :

Athmane et ayoub et amineQQ et hossem et hamza .

A tous ceux qui me sont cher(e)s .

A tous les Universitaires.



mahammedi dahmane

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير تصلب عينة الألمنيوم 6000 وتغير خصائصها الميكانيكية لما تخضع لتأثير قوى الضغط .

كذلك تأثير قوى الشد على الخصائص الميكانيكية التي طرأت على العينة بعد تأثير تصلب .

و استنتجنا أن مادة الالمنيوم هي مزيج غير معدني و هو خفيف ويلعب دور مهم في مجال الصناعات وذلك بفضل خصائصه (الكيميائية و الحرارية و الميكانيكية و الكهربائية) .

Résume :

Ces travail avait objectif de comprendre l'effet de l'écrouissage sur les propriétés mécaniques à la traction d'un alliage d'aluminium 6000.

Le comportement de traction pour la détermination de la propriété mécanique a mis en évidence que le métal, ses l'effet d'écrouissage.

L'aluminium en tant que premier alliage non ferreux et léger, joue un rôle important dans le domaine industriel une leurs propriétés « thermique, chimique, mécanique, électrique ».

Mots clé :

Aluminium, contraint, propriété, mécanique, écrouissage, traction.

Abstract :

The purpose of this work was to understand the effect of strain hardening on the tensile mechanical properties of an aluminum alloy 6000.

The tensile behavior for the determination of the mechanical property has shown that the metal has the effect of hardening.

Aluminum as the first non-ferrous and light alloy, plays an important role in the industrial field a their "thermal, chemical, mechanical, electrical" properties.

Sommaire

Remerciement.....	I
Dédicace	II
Résumé	III
Sommaire	IV
Liste tableau	VII
Liste figure	VIII
Introduction générale.....	1
Chapitre I : L aluminium et ses alliages	
I.1. Introduction	03
I.2.Histoire de aluminium	03
I.3. Pays producteur de l'aluminium	04
I.4.Désignation des alliages d'aluminium	05
I.5. Principale caractéristique de l aluminium	05
I.6.Eléments d'addition dans les alliages d'aluminium	08
I.7 Traitement thermique des alliages d'aluminium	09
I.7.1. But des traitements thermique	09
I.7.2. Principaux traitement thermiques	09
I.7.2.1. Traitement d' homogénéisation	09
I.7.2.2. Traitement d'adoucissement	09
I.7.2.3. Traitement vieillissement	09
I.7.2.3.1.Vieillissement naturel (Maturation)	10
I.7.2.3.2. Vieillissement artificiel (revenu)	10
I.7.2.4.Traitement thermiques de durcissement structural	10
I.7.4.1. Mise en solution 12	10
I.7.4.2. Trempe 13	10
I.7.4.3. Vieillissement	11
Chapitre II : Comportement plastique et contraintes résiduelles	
II.1.Introduction	12

II.2.Approche de la mécanique linéaire de la rupture.....	13
II.2.1. Rupture fragile et rupture ductile.....	13
II.2.2. mode de rupture et distribution des contraintes	14
a. Définition d'un fissure	15
b. Modes de ruptures	15
c. Distribution des contraintes a la pointe de la fissure en mode	16
II.3. Comportement plastique 24	16
II.3.1.Description du comportement plastique – plasticité	16
II.3.2. La traction uniaxiale	17
a. Essai expérimental	17
b. Analyse de la courbe de traction	17
II.3.3.Définitions complémentaires	20
a. Ecrouissage – adoucissement	20
b. Effet Bauschinger	20
c. Restauration	21
II.3.4.Principaux critères utilisés- plasticité multiaxiale	21
a. Forme générale d'un critères de plasticité isotrope	21
b. Critère de Tresca	21
c. Critère Von Mises	22
II.4. Contraintes résiduelles.....	22
II.4.1.Définition contraintes résiduelles	22
III.4.2.1. Type de contraintes résiduelles	22
III.4.3. Origines des contraintes résiduelles	23
II.4.4. Effets des contraintes résiduelle sur la fatigue	24

Chapitre III : partie expérimentale

III. Introduction	28
III.1.But de l'expérimentation	29
III.2.Analyse chimique de l'alliage 6000	29

III.3.1. Microscope optique.....	29
III.3.2. Banc d'essai de traction	30
III.3.2.1. L'essai de traction	30
III.4. Résultats obtenus.....	32
III.5. Observations microscopiques	50
III.5.1. Courbes Contrainte- Déformation.....	50
III.6. Interprétation des résultats	51
III.7. conclusion	52
Conclusion générale	53

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Désignation des séries principales des alliages d'Aluminium [5].....	5
Tableau I.2 : Propriétés physiques de l'aluminium [11].....	7
Tableau III.1: Les caractéristiques physiques physique de notre alliage [38].....	28
Tableau III.2: Analyse chimique de l'alliage 6000.....	29
Tableau III.3. : Variation σ a fonction de ε et F a fonction ΔL à comprissions 5%.....	32
Tableau III.4. : Variation σ a fonction de ε et F a fonction ΔL à comprissions 10%.....	37
Tableau III.5. : Variation σ a fonction de ε et F a fonction ΔL à comprissions 15%.....	41
Tableau III.6. : Variation σ a fonction de ε et F a fonction ΔL à comprissions 20%.....	46
Tableau III. 7 : Variation Re par apport ε	51

Listes de figures

Chapitre I

Figure I.1 : Principaux pays producteurs de bauxite (Source : LME).....	4
---	---

Chapitre II

Figure II. 1 : Exemple de fissure sur une plaque trouée [18].....	12
Figure II.2 : Courbes contrainte-déformation [19].....	13
Figure II.3 : Différents modes de rupture.....	14
Figure II.4 : Définition des axes (x,y) et des coordonnées (r , θ) au voisinage de l'extrémité d'une fissure	15
Figure II. 5 : Traction uniaxiale.....	17
Figure II. 6 : Courbe contrainte – déformation [20].....	17
Figure II.7 : Idéalisations classiques du comportement plastique.....	19
Figure II. 8 : Phénomène d'écrouissage et d'adoucissement en traction simple.....	20
Figure II. 9 : Effet Bauschinger.....	20
Figure II.10 : Diagramme de Haigh (a)et Goodman(b) [21].....	24
Figure II.11: Longueur de la fissure en fonction du nombre de cycle [28].....	25
Figure II .12 : Longueur de la fissure en fonction du nombre de cycle.....	26
Figure II. 13 : Evolution de la vitesse de fissuration sous l'influence d'une surcharge	26

Figure chapitre III

Figure III.1:Microscope optique	30
Figure III.2 : Eprouvette de traction.....	31
Figure III.3 : Exemple d'une éprouvette de traction.....	31
Figure III.4 : La banc d'essai de la traction unidirectionnelle wp 310.....	32
FigureIII.5 : Diagramme de traction pour éprouvette a état compression 5% $f(\sigma) = \epsilon$	36
Figure III.6 : Exemple de rupture d'une éprouvette réelle a état de compression 5%	36
Figure III.7 : Diagramme de traction pour éprouvette a état compression 10% $f(\sigma) = \epsilon$	40
Figure III.8 : Exemple de rupture d'une éprouvette réelle a 10% de comprissions.....	40
Figure III.9 : Diagramme de traction pour éprouvette a état compression 15%.....	45
Figure III.10 : Exemple de rupture d'une éprouvette réelle a 15% de comprissions.....	46
Figure III.11 Diagramme de traction pour éprouvette a état compression 20 %.....	49

Figure III 12 : Exemple de rupture d'une éprouvette réelle a 20% de comprissions.....	49
Figure III. 13 : Observation optique 100	50
Figure III.14 : Courbe représente la variation de traction.....	50
Figure III .15 : Variation R_e en fonction de ϵ	51

Introduction générale

Introduction générale

L'ingénierie mécanique a besoin de connaître le comportement mécanique des matériaux utilisés pour fabriquer diverses structures. Ce sont les essais mécaniques qui peuvent lui fournir ces données nécessaires. Elles sont tout d'abord indispensables pour la mise au point des procédés de mise en forme.

En effet, si, pendant longtemps, l'empirisme et l'habitude suffisaient pour mener à bien les opérations les opérations de laminage, de filage, d'extrusion, de forgeage, d'usinage, etc.,

L'augmentation de la dimension des demi-produits, les exigences accrues de qualité et de précisions, les économies d'énergie à réaliser concourant à rendre nécessaires les calculs détaillés de ces diverses opérations. Il est évident qu'ils ne peuvent être menés à bien sans une connaissance précise des lois de comportement mécanique des matériaux faisant intervenir la vitesse de sollicitation et la température, ainsi que les interactions entre les propriétés mécaniques et les évaluations de la structure microscopique.

Les alliages d'aluminium sont aujourd'hui encore, massivement utilisés dans les structures aéronautiques principalement du fait de leur faible densité.

La conception de telles structures doit prendre en compte les sollicitations de fonctionnement, ainsi que les risques d'apparition de dommages en service, ce qui est bien sûr particulièrement vrai dans les domaines aéronautique, naval, automobile et divers structures spéciales.

Une direction de recherche importante dans l'aéronautique concerne l'allégement des structures. En effet, le gain de poids fait lui-même moteur dans l'allégement des structures, etc. Pour réduire la masse des structures, le dimensionnement doit se faire au plus juste et ceci passe naturellement par une amélioration de la compréhension des phénomènes physiques régissant l'endommagement des structures étudiées.

En dehors des sollicitations thermomécaniques (normales), que peut subir une structure ou un composant (chargement simple, fatigue, fluage), il peut aussi survenir des sollicitations exceptionnelles pouvant conduire à la rupture et l'optimisation des matériaux pour ces sollicitations exceptionnelles permet de limiter les conséquences d'un accident.

Parmi les dimensionnements (classiques) à la rupture que pratiquent les bureaux d'étude, on peut citer par exemple, le crash automobile ou la résistance des structures du génie civil aux tremblements de terre ou à l'impact. Ces dimensionnements peuvent avoir plusieurs objectifs.

Introduction générale

Dans le cas du crash automobile, par exemple on cherche à absorber la plus grande part possible de l'énergie du choc par la déformation et l'endommagement du véhicule afin de protéger les passagers. On peut aussi vouloir contrôler la taille des fragments éjectés lors de la rupture d'une pièce tournante (ex pneumatique de la Concorde).

Enfin on peut chercher à garantir qu'un bâtiment ne s'écroule pas lors d'un tremblement de terre, même si l'on accepte qu'il soit fortement endommagé.

Pour cela, il faut d'une part comprendre l'origine physique des ruptures, afin de pouvoir optimiser les matériaux pour une application donnée, et d'autre part savoir modéliser la rupture afin de dimensionner les structures. Les modèles des ruptures pourront être assez différents selon le type de matériau et selon les vitesses de sollicitations.

Les ruptures brutales peuvent en effet être soit de type ductile, soit de type fragile, on parlera de ruptures fragiles lorsque l'énergie absorbée par la rupture est très faible, on parlera de rupture ductile lorsque cette énergie est élevée.

Organisation des chapitres :

Le contenu de notre projet fin étude est réparti en trois chapitres :

Chapitre I :

Traitant d'une étude bibliographique sur les alliages d'aluminium (désignation et les traitements thermiques).

Chapitre II :

Traitant d'une étude bibliographique sur les différents types de rupture l'effet de phénomène d'écrouissage sur le comportement des matériaux.

Chapitre III :

Je fais des essais mécaniques et l'attaque chimique sur des éprouvettes pour étudier l'effet d'écrouissage.

Chapitre I :

L'aluminium et ses alliages

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

Introduction :

L'aluminium est le troisième élément le plus abondant juste après le silicium et l'oxygène. Sa production industrielle n'a commencé qu'au début du 20^{ème} siècle. Il est classé comme le métal le plus utilisé après le fer et les aciers [1].

L'aluminium est un métal blanc argenté très malléable, de masse volumique 2.7g/cm³, ses Températures de fusion sont 660°C, La bauxite est le minéral le plus utilisé dans l'obtention de l'alumine, matière intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium, elle est formée par l'altération rapide des roches granitiques en climat chaud et humide.

Cependant la séparation de l'aluminium du minéral est un procédé délicat.

Le procédé utilisé dans l'industrie «Hall Héroult») est un procédé de purification électrolytique. L'aluminium se prête facilement aux traitements de surface et à toutes modalités de soudage. Au chauffage il présente une aptitude au grossissement du grain, ce qui altère sa plasticité [6].

L'aluminium s'avère comme un bon conducteur d'électricité non magnétique, il résiste naturellement à la corrosion atmosphérique grâce à la formation d'une fine couche superficielle d'alumine Al₂O₃ qui le protège contre les ravages de l'air, de la température et de l'humidité et des attaques chimiques. L'alumine est un composé très dur, mais à température ambiante l'alumine devient insoluble dans tous ses composés chimiques courants et mauvais conducteurs d'électricité.

L'aluminium est un élément métallique, parmi les métaux les plus abondants dans la croûte c'est un élément du troisième groupe de la classification de Mendeleïev juste après le silicium et l'oxygène, dont le numéro atomique 13, la masse atomique 2698.7 kg/m³ (environ 27) et la structure cristalline de type cubique à faces centrées.

La seule source de ce métal c'est les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%), La bauxite est le minerai le plus utilisé pour obtenir de l'alumine, matière intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium et être la production d'aluminium par électrolyse d'alumine dans la cryolithe (Na₃AlF₆) fondue, à environ 1000°C dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone. [2]

I-2- Histoire de l'aluminium :

La première apparition de l'aluminium était en 1825 lors d'une présentation à l'Académie des sciences par le chimiste français Sainte-Claire sous la forme de lingot. Cette pièce avait été obtenue par voie chimique. En 1825 il y a eu l'invention du procédé d'électrolyse de

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

L'aluminium par Paul Héroult (France) et Charls Martin Hall (USA) [3].

I-3- Pays producteurs de l'aluminium :



Figure I.1 : Principaux pays producteurs de bauxite (Source : LME).

Depuis le début du XXe siècle, l'industrie mondiale de l'aluminium a connu un développement sans précédent dans l'histoire des métaux : de 2 500 tonnes en 1895, la production annuelle dépasse à présent les 20 millions de tonnes. Elle a doublé tous les 9 ans jusqu'en 1950 où elle a connu son plus grand essor. De nos jours, cette production reste stationnaire.

2003, les pays producteurs de bauxite les plus importants sont, en milliers de tonnes (kt), l'Australie (53000 kt), la Guinée(17000 kt), le Brésil (13000 kt), la Jamaïque (12500 kt), la Chine(9000 kt), la CEI (8000 kt) et l'Inde (8000 kt).

La France arrive en douzième position avec une production de 430 000 tonnes d'aluminium par an. La Guinée assure 85% de l'approvisionnement français actuel en bauxite. Point vocabulaire :

***Natif** : un métal est dit natif s'il existe dans la croûte terrestre à l'état non combiné (par exemple : l'or)

***Réfractaire** : un matériau réfractaire résiste à de très hautes températures. L'alumine est un matériau réfractaire (température de fusion supérieure à 2000°C)

***Billette** : petit lingot d'aluminium laminé.

I-4-Désignation des différents alliages d'Aluminium :

La désignation des alliages d'aluminium s'effectue suivant un système de 4 chiffres [4].

Le premier chiffre de la série indique le principal élément alliant en présence et les chiffres subséquents indiquent la composition (voir tableau (I.1)).

On désignera les alliages d'aluminium corroyés suivant les normes de l'association d'aluminium. Ces normes affectent à chaque type d'alliage un nombre de quatre chiffres qui permet de les classer en séries.

Tableau I.1 : Désignation des séries principales des alliages d'Aluminium [5].

series	Designation	Element d'alliage principal	Phase principale présente dans l'alliage
1000	1XXX	99% d'Al au minimum	-
2000	2XXX	Cuivre (Cu).	Al_2Cu , Al_2Cu/Mg
3000	3XXX	Manganèse (Mn).	Al_6Mn
4000	4XXX	Silicium (Si).	-
5000	5XXX	Magnésium (Mg).	Al_3Mg_2
6000	6XXX	Magnésium (Mg) et Silicium (Si).	Mg_2Si
7000	7XXX	Zinc (Zn).	$MgZn_2$
8000	8XXX	Autres éléments.	-
9000	-	Non utilisé.	-

I-5-Les caractéristiques d'aluminium :

I-5-1- Légèreté :

L'aluminium est plus léger, et présente des caractéristiques mécaniques très élevées, il est largement utilisé dans les transports terrestres rapides et la fabrication des carrosseries des véhicules. La production d'aluminium n'est seulement un peu plus 2 % de celle de l'acier ce métal et ses alliages qui en dérivent arrivent en second position en ce qui concerne la production et l'utilisation des matériaux métalliques.

L'expérience montre que l'allègement obtenu avec une structure en alliage d'aluminium peut atteindre 50% par rapport à une structure équivalente en acier inoxydable [6].

I-5-2- La conductivité électrique et thermique :

L'aluminium fournit une excellente prise électrique, et est utilisé de plus en plus pour les lignes à haute tension parce qu'un poids inférieur à celui du cuivre, et aussi il offre un fort pouvoir caloporteur comme l'utilisation dans des dispositifs de refroidissement [7].

I-5-3- La tenue à la corrosion :

L'aluminium et ses alliages sont généralement une bonne tenue à la corrosion (Atmosphérique, en milieu marin).

L'aluminium est couramment utilisé par les Architectes, ainsi que dans les bâtiments publics.

(La pyramide du Louvre « constituée de verre et de métal »). Toute offre de nombreuses possibilités de formes et de traitements de surface, des structures de construction, transformation de l'aluminium nécessite beaucoup d'entretien et de la résistance au fil du temps. Cette bonne tenue à la corrosion alliée à sa faible densité a permis un développement des applications de l'aluminium dans le bâtiment. Les utilisateurs disposent ainsi :

- D'une durée de vie des équipements accrue. Il n'est pas rare de trouver intacts des Toitures, des bardages, des équipements de portes, des bateaux..., vieux de plusieurs Décennies [2], [4].
- D'une esthétique pérenne. Les produits de corrosion de l'aluminium sont blancs et Propices à traitements de coloration. [4]

I-5-4- Aptitudes aux traitements de surfaces :

Les traitements de surfaces sur l'aluminium ont plusieurs objectifs parmi lesquels : [6]

- La protection de certains alliages, quand leur résistance à la corrosion « naturelle »
- La pérennité de l'aspect en évitant la corrosion par piqûre ou le noircissement. Est jugée insuffisante.
- La modification des propriétés de surface comme la dureté superficielle.
- La décoration du métal par anodisation puis colmatage pigmentaire.

I-5-5- Le recyclage :

Le recyclage de l'aluminium plus efficace par rapport à d'autres métaux, et ne représente que 5% de l'énergie nécessaire à l'élaboration du métal à partir d'un minerai (plan économique), et l'expérience montre que les déchets d'aluminium ont une valeur marchande supérieure à celle des ferrailles car une tonne d'aluminium recyclé permet d'économiser quatre tonnes de bauxite, en évitant l'étape de l'électrolyse, ce qui nécessite beaucoup d'énergie et d'éviter les polluants

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

associés émissions. L'aluminium est quasiment recyclable à l'infini sans perdre ses qualités [7], [8].

I-5-6- Propriétés mécaniques :

L'aluminium commercialement pur dans l'état recuit a une faible propriété mécanique Mais peut grandement améliorer ces propriétés par écrouissage, par addition d'éléments d'alliage ou par traitements thermiques, selon les cas. Ainsi, il apparaît à l'état recuit une excellente ductilité par rapport aux aciers. L'aluminium est un matériau relativement élastique mais peu malléable. [9], [10].

La résistance mécanique et la résistance à la fatigue de l'aluminium sont tout aussi différentes de celles de l'acier. C'est pourquoi il est important de bien connaître les limites du matériau avant de l'utiliser. Contrairement à l'acier, la soudure de l'aluminium peut présenter certaines difficultés, Il faut retenir ce paradoxe : « Plus on soude l'aluminium, plus on l'affaiblit ». Cette situation se produit en raison d'un changement des propriétés métallurgiques de l'aluminium de base dans la zone thermiquement affectée (ZAT). [7], [9]

I-5-7- Propriétés physiques :

Les propriétés physiques de l'aluminium non allié sont résumées dans le tableau suivante :

Tableau I.2 : Propriétés physiques de l'aluminium [11].

Propriété	Unité	Valeur
Paramètre de maille (à 298.15°K)	Å	4.05
Point de fusion	°C	660.45
Point d'ébullition	°C	2056
Pression de vapeur	Pa	0.0037
Energie interne massique μ	J kg ⁻¹	398000
Capacité thermique massique C_p (à 298.15°K)	J kg ⁻¹ K ⁻¹	897
Conductivité thermique λ (à 298.15K)	W m ⁻¹ K ⁻¹	237
Résistivité électrique ρ (à 298.15 K)	10 ⁻⁹ Ω m	26.548

I-6-Eléments d'addition dans les alliages d'aluminium :

Les éléments d'addition et, en particulier, les éléments de transitions, jouent un rôle très important dans la métallurgie de l'aluminium [12].

La teneur des éléments d'addition est limitée par le facteur de solubilité. Les éléments d'addition les plus répandus dans les alliages d'aluminium sont le cuivre, le magnésium, le manganèse, le zinc, le fer et le silicium. Ces derniers ont plus ou moins une influence sur les caractéristiques de l'AlMgSi. Ils peuvent en même temps améliorer ou détériorer les propriétés physiques, chimiques et technologiques de l'aluminium pur [13]. Un certain nombre d'éléments d'addition sont rajoutés dans certains alliages pour donner une propriété particulière [14].

Les alliages à base d'aluminium contiennent habituellement une certaine quantité de cuivre, de manganèse. Ces éléments peuvent être aussi ajoutés délibérément pour fournir les propriétés matérielles spéciales. La présence de magnésium améliore la trempabilité du matériel.

Le manganèse est habituellement ajouté pour réduire les effets néfastes des impuretés comme le fer. Les éléments d'alliages peuvent entrer partiellement dans la solution solide α et former en partie les particules intermétalliques. La composition des composés intermétalliques dépend du procédé de solidification lors de l'élaboration de l'alliage.

Parmi tous les éléments présents, le fer est probablement le plus important par ce qu'il a une affinité avec plusieurs éléments d'addition tel que Mn, Cr et Si. Il peut former ainsi une large gamme de composés intermétalliques lors du procédé de fabrication tels que $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Mn}, \text{Fe})_3\text{Si}_2$ et $\beta\text{-Al}_5\text{Si}$. Ces composés intermétalliques sont nuisible aux propriétés mécaniques des alliages lorsque leur taille excède 3 μm [12]. En revanche, ils présentent l'avantage de la résistance au fluage à haut est température.

Les éléments Mn et Cr se caractérisent par une faible solubilité dans les alliages d'aluminium. L'introduction de Mn et Cr modifie de façon générale la forme, éventuellement la taille des grains [15], améliore la ductilité et la ténacité. Mn et Cr sont souvent utilisés dans les alliages d'aluminium pour éviter la recristallisation au cours de la mise en solution.

L'addition de Mn dans les alliages d'aluminium facilite la précipitation dans les joints de grains. L'introduction de Mn réduit la proportion de Si en solution dans les alliages Al-Mg-Si par la formation des précipités de type AlMnSi et réduit ainsi la précipitation de Si et de Mg₂Si dans les joints de grains [15].

I-7- traitements thermique :

I-7-1-But des traitements thermiques :

Les traitements thermiques ont pour but de modifier en générale la nature et la répartition des constituants d'un matériau. Selon le domaine d'application du matériau les traitements peuvent améliorer ou détériorer les propriétés mécaniques de ce dernier.

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

I-7-2-Principaux traitements thermiques :

I.7.2.1. Traitements d'homogénéisation :

Les traitements d'homogénéisation sont fonction de la durée et la température des traitements thermiques qui dépendent généralement de la massivité de pièces, de la composition des alliages et de l'importance des ségrégations. Les domaines des températures d'homogénéisation s'étendent le plus souvent de 450°C à 500°C pour l'aluminium et de 450°C à 590°C pour les alliages d'aluminium [16].

I-7-2-2-Traitements d'adoucissement :

Le but de ces traitements pour d'adoucir un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale. Nous notons parmi ces traitements thermiques le traitement de restauration et le traitement de recristallisation utilisés dans le cas de matériaux écrouis, et le traitement de recuit de précipitation dans le cas de matériaux trempés. Ce traitement consiste à chauffer une période relativement longue à une température élevée pour ramollir l'alliage produit par l'évolution des précipités provenant des constituants de l'alliage.

I-7-2-3-Traitement de vieillissement :

Ce terme désigne l'évolution (généralement défavorable) des propriétés d'un matériau au cours du temps par interaction en volume avec un facteur physique environnant.

Bien que la distinction soit parfois difficile, le terme de corrosion désigne plus spécifiquement une dégradation et/ou une perte de matière par réaction (se produit en surface de la pièce considérée) chimique du matériau avec son environnement. L'usure est une perte de matière d'origine mécanique, consécutive au mouvement relatif de deux surfaces solides en contact. Il y a deux types sont :

I-7-2-3-1-Vieillessement naturel (Maturation) :

Les alliages traités thermiquement voient leurs propriétés changées une fois revenus à la température ambiante après leur traitement thermique. Le taux de vieillissement change selon le type d'alliage et également dans un type d'alliage, de sorte que le vieillissement naturel est stable pouvant durer de quelques jours jusqu'à plusieurs années. Certains alliages de la série 6000 qui sont durcissant et peuvent atteindre une dureté maximale après un mois à la température ambiante.

I-7-2-3-2-Vieillessement artificiel (Revenu) :

Il consiste en un chauffage à une température au-dessus de la température ambiante, et en maintient selon les objectifs désirés et la nature du matériau traité, la précipitation s'accélère et la dureté augmente encore par comparaison au vieillissement naturel et il est effectué à des températures allant jusqu'à 240°C (100 à 240°C dans le cas de la série 6000) Pendant le vieillissement artificiel à une température donnée, la dureté augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale après un temps de maintien donné

I-7-4- Traitements thermiques de durcissement structural :

Le durcissement structural a une importance primordiale dans la métallurgie des Alliages d'aluminium car c'est le processus par excellence qui permet d'améliorer les Propriétés mécaniques. Ce type de traitement, spécifique aux alliages à durcissement Structural comprend :

I-7-4-1- Mise en solution :

L'obtention d'une solution solide à l'aide de la réaction du durcissement par précipitation est très importante dans l'opération du traitement thermique. L'objectif de ce traitement est d'amener dans la solution solide la quantité maximale de l'élément de durcissement soluble ou élément d'alliage (ex. Cu, Mg, Si) dans la matrice. La procédure consiste à maintenir l'alliage à une température suffisamment élevée et pour une période de temps assez long afin d'obtenir une solution solide homogène. Les domaines des températures de mise en solution s'étendent le plus souvent de 450°C à 500°C pour l'aluminium et de 450°C à 590 °C pour ses alliages [17]

I-7-4-2- Trempe :

La trempe est une opération nécessaire pour effectuer un traitement thermique. Cette opération consiste en un refroidissement suffisamment rapide de la solution solide obtenue dans la première étape, pour que les précipités intermétalliques stables n'aient pas le temps d'être

Chapitre I : Aluminium et ses alliages

formés. Elle ne prend pas de temps, puisqu'elle a une très courte durée. Elle peut être faite à l'eau, à l'air, à l'huile ou dans des métaux en fusion à différents intervalles. Son but est de supprimer la formation de la phase à l'équilibre Mg_2Si pendant le refroidissement et de préserver la solution soluble solide formée lors de la mise en solution, par un refroidissement rapide (~ 260 °C/s) à basse température, habituellement près de la température de la pièce. Le résultat de cette opération est une solution solide sursaturée en éléments d'alliages, et également en lacunes [17]

I-7-4-3- Vieillissement :

Le but principal des traitements de vieillissement est de modifier les propriétés mécaniques des alliages après trempe. Ces propriétés mécaniques sont convenables pour plusieurs applications.

Chapitre II :

Comportement plastique et contraintes résiduelles

Chapitre II: Comportement plastique contrainte résiduelles

II- I-Introduction :

Toute pièce mécanique est soumise durant son fonctionnement normal à un certain nombre de sollicitations de causes variables mais qui se traduisent le plus souvent par des variations cycliques qui lui sont appliquées, il est malheureusement souvent constaté, est ce depuis fort longtemps, la ruine, parfois catastrophique, d'un certain nombre de structures alors que celles-ci ne sont soumises qu'à des sollicitations dynamiques jugées modestes par rapport aux capacités statiques des matériaux définies communément par leur résistance à la rupture et leur limite d'élasticité.

Le responsable de ces ruines est très souvent le phénomène de fatigue des matériaux, au caractère particulièrement insidieux puisque se développant lentement dans le temps, sans modifications macroscopiquement des pièces et des structures dans des zones souvent inaccessibles mais particulièrement sujettes à cet endommagement de par leur conception.

La fatigue est un processus (succession de mécanismes) qui sous l'action de contraintes ou de déformations variables dans le temps modifie les propriétés locales d'un matériau et peut entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la structure (Figure II.1).

La fatigue est notamment caractérisée par une étendue de variation de contrainte bien inférieure à la résistance à la traction du matériau. Les étapes principales de la fatigue sont l'amorçage de fissures (si des défauts ne sont pas déjà présents dans le matériau), la propagation de fissures et la rupture finale.

Les paramètres souvent utilisés pour prédire le comportement en fatigue et ainsi le nombre de cycles à rupture d'une structure sont : l'amplitude de cette sollicitation (chargement ou déformation imposée), sa valeur moyenne, le fini de surface et le milieu dans lequel la structure sera utilisée.

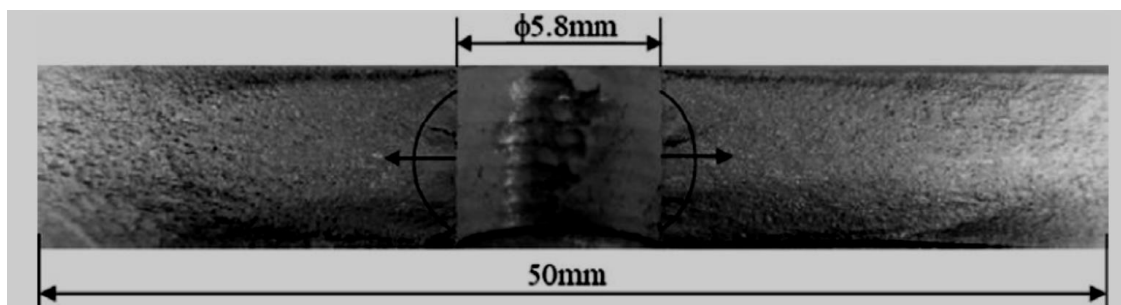


Figure II.1 : Exemple de fissure sur une plaque trouée [18] .

Chapitre II: Comportement plastique contrainte résiduelles

II-2 – Approche de la mécanique linéaire de la rupture :

II-2-1-Rupture fragile et rupture ductile :

La rupture désigne la séparation d'un corps en plusieurs parties sous l'action d'une contrainte de nature statique, c'est-à-dire qu'elle est constante ou qu'elle varie peu avec le temps. Il peut s'agir d'une contrainte de traction, de compression, de cisaillement ou de torsion. Les deux modes de rupture des matériaux à usage industriels sont la rupture ductile et la rupture fragile. Une telle classification repose sur la capacité d'un matériau à subir une déformation plastique. Le comportement lié au rapport entre la contrainte de traction et la déformation à ces deux types de rupture est illustré dans la figure (II.2)

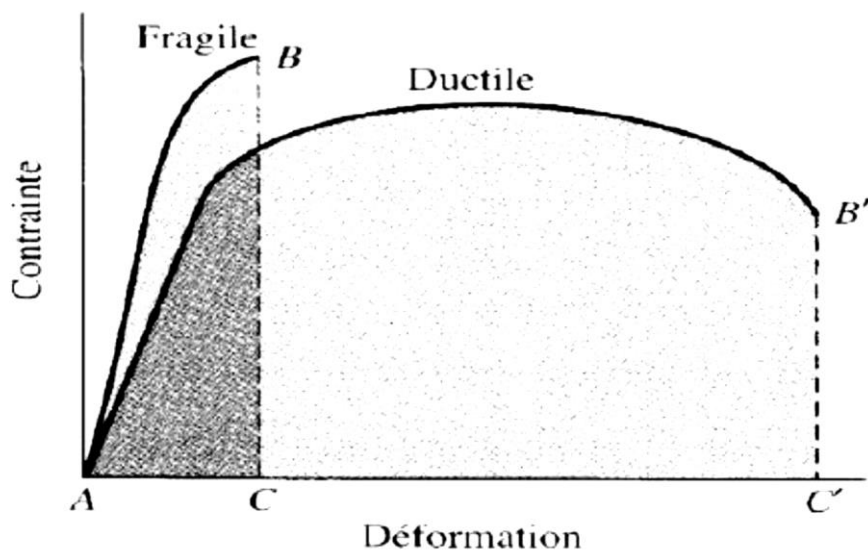


Figure II.2 : Courbes contrainte-déformation [19].

La rupture fragile est rapide, survient sans déformation notable et par une énergie d'absorption faible. La direction de cette propagation est presque perpendiculaire à la direction de la contrainte de traction appliquée et il en résulte une surface de rupture relativement unie. Les surfaces de rupture fragile d'un matériau possèdent des caractéristiques qui leur sont propres et sont exemptes de toute trace de déformation plastique.

La rupture ductile se caractérise par une vaste déformation plastique située à proximité d'une fissure qui se propage. Elle se déroule assez lentement, à mesure que s'allonge la fissure. Une telle fissure est dite stable, c'est-à-dire qu'elle résiste à tout allongement ne résultant pas d'un accroissement de la contrainte appliquée.

La rupture ductile est presque toujours un moindre mal, contrairement à la rupture

Chapitre II: Comportement plastique contrainte résiduelles

Fragile qui a un caractère soudain et brutal, et a des effets imprévus en raison de la propagation spontanée et rapide de la fissure. En revanche, la présence d'une déformation plastique signale l'imminence d'une rupture et rend donc possible l'application de mesures préventives.

II.2.2. Mode de rupture et distribution des contraintes au niveau de la pointe de la fissure :

a-Définition d'une fissure :

Une fissure est définie comme la surface séparant localement un solide en deux parties.

Le champ de déplacement est alors discontinu à travers cette surface et les trois composantes vectorielles de cette discontinuité forment les trois modes de rupture.

b. Modes de ruptures:

La rupture d'un composant mécanique se produit par fissuration du matériau selon l'un ou une combinaison des trois modes élémentaires décrits par la figure 03. Le mode I est le plus dangereux sur l'extension d'une fissure.

- ☒ Mode I : mode d'ouverture de la fissure, où les déplacements aux lèvres de la fissure sont perpendiculaires à la direction de propagation [20]
- ☒ Mode II : mode de cisaillement dans le plan, où les déplacements aux lèvres de la fissure sont parallèles à la direction de propagation
- ☒ Mode III : mode de cisaillement hors du plan, où les déplacements aux lèvres de la fissure sont parallèles au fond de la fissure.

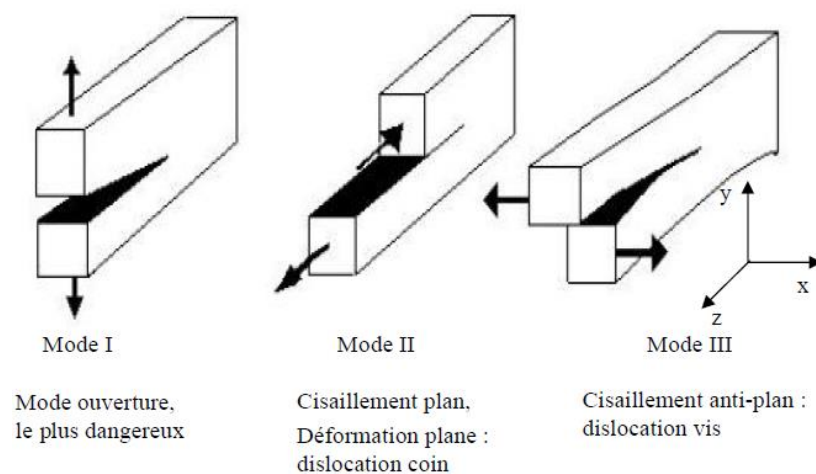


Figure II.3 : Différents modes de rupture.

Chapitre II: Comportement plastique contrainte résiduelles

c. Distribution des contraintes à la pointe de la fissure en mode I :

Le champ de contraintes au voisinage de la pointe de fissure en mode I (figure 4) est décrit par l'équation (1) [21] .

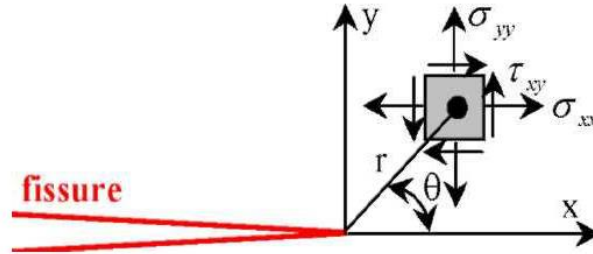


Figure 4. Définition des axes (x, y) et des coordonnées (r, θ) au voisinage de l'extrémité d'une fissure

éq (1)

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} * \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} * \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot \left(\cos \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \right)$$

Où K_I représente le facteur d'intensité de contrainte introduit par Irwin [21] en 1957

Caractérisant la cinématique des mouvements des fissures.

Plusieurs ouvrages donnent l'expression de ces

Facteurs d'intensité de contrainte pour des géométries et des chargements variés.

L'objet de la mécanique de la rupture est :

☒ l'étude des évolutions de cette surface, c'est-à-dire la propagation de la Fissure en fonction des chargements appliqués et des caractéristiques du Matériau constituant le solide.

☒ prévoir le comportement de la fissure dans le milieu fissure s'apparente a Prévoir sa propagation dans un critère de ruine.

Tout paramètre ou toute valeur issue de plusieurs paramètres caractérisant la propagation d'une fissure, comparée à sa valeur critique (mesurée expérimentalement),

Peut servir de critère de ruine à condition de déterminer la valeur critique du

Chargement qui déclenche la croissance de la fissure et la direction selon laquelle la Fissure se propagera.

Le critère de ruine permet de connaître le comportement de la fissure à un instant

Chapitre II: Comportement plastique contrainte résiduelles

Donné. Cependant, certaines fissures se propagent à une certaine vitesse jusqu'à la Ruine. Dans ce cas, la connaissance de la vitesse de propagation s'avère primordiale. Dont plusieurs paramètres peuvent influencer la rupture du matériau.

☒ Les facteurs mécaniques concernent l'état de déplacements, de Déformations, de contraintes et les conditions d'environnement telles que La température.

☒ Les facteurs métallurgiques concernent les impuretés, les tailles de Grains, les états de surface...

II-3-Comportement plastique :

La plasticité est la propriété qu'ont certains corps de pouvoir subir sans rupture des Déformations permanentes irréversibles. Les premières études expérimentales Concernant

Le phénomène de plasticité ont été menées par Tresca. C'est vers 1870 que Saint-Venant Et Levy publient la théorie mathématique de la plasticité. A partir de ce Moment interviennent des noms très connus dans le domaine de la plasticité: Prandtl, Hencky, Prager, Hill, etc....

Très rapidement on a fait le lien entre la physique des solides et les connaissances Expérimentales de la déformation plastique. On suppose généralement que la déformation Plastique est continue, alors qu'il est établi depuis longtemps qu'au niveau Atomique elle Se fait par glissement sur des plans visiblement séparés. C'est pour quoi des développements De la théorie des dislocations ont permis de rapprocher la Physique des solides et la mécanique Des milieux continus.

En effet le solide est en Réalité un assemblage de grains cristallins La déformation plastique peut être due.

(Pour les métaux) aux déformations permanentes des grains, du moins à température Ordinaire. Ces déformations sont dues principalement à des glissements dans une Direction de rangée Atomique suivant des plans parallèles du réseau cristallin (loi de Schmid). [23]

II-3-1- description du comportement plastique – plasticité :

La théorie de la plasticité repose sur une idéalisation et une généralisation de faits Expérimentaux correspondant à des états de contraintes très simples: sphérique ou Mono-axial

. Des états de contraintes plus complexes ont été réalisés pour vérifier les Lois proposées, et Déterminer leur degré d'approximation, selon les matériaux étudiés et Leur état physique initial.

Chapitre II: Comportement plastique contrainte résiduelles

II.3.2 La traction unie axiale :

a. Essai expérimental :

Le comportement d'une éprouvette métallique, soumise à une traction simple nous apporte tous les éléments nécessaires

à la compréhension du phénomène de plasticité. Il est important de noter que la traction, schématisée par les figures (5 et 6), est effectuée à froid.

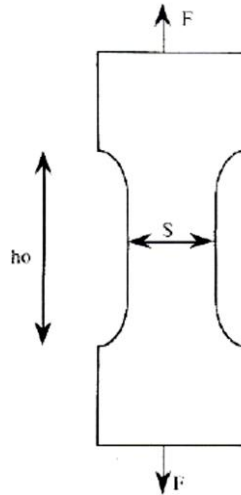


Figure II.5 : Traction uniaxiale

On impose à l'éprouvette une déformation globale $\ln h/h_0$ que l'on note ϵ , et on enregistre la contrainte.

$\sigma(\epsilon)$ qui est égale à F/S , F étant la force enregistrée et S l'aire

de la section droite utile de l'éprouvette. La courbe $\sigma(\epsilon)$ représentée sur la figure (6).

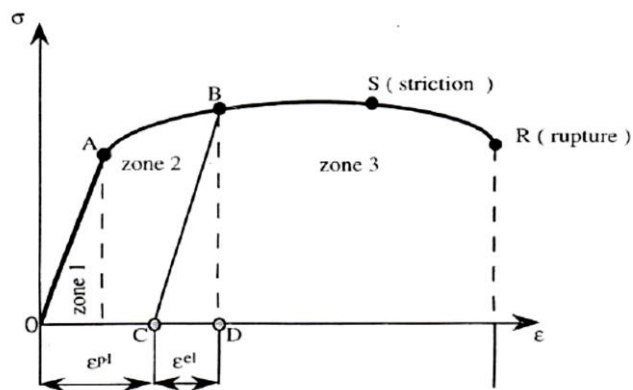


Figure II.6 : Courbe contrainte – déformation [20] .

b. Analyse de la courbe de traction :

Nous distinguons 3 zones, correspondant à des comportements différents.

Chapitre II: Comportement plastique contrainte résiduelles

Zone 1: Dans cette zone la courbe est une droite OA dont la pente est le module Young E. On a la relation simple :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Qui est la loi de comportement élastique linéaire. Le fait essentiel est la réversibilité:

En effet, si on libère l'éprouvette (on a donc $\sigma=0$) l'éprouvette retrouve sa longueur initiale l_0 et on a donc $\varepsilon=0$.

Zone 2 : Dans cette zone, par contre, les déformations sont irréversibles, c'est une caractéristique fondamentale des déformations plastiques. En effet, si on allonge l'éprouvette jusqu'au point figuratif B puis on décharge (point C) on constate que l'éprouvette ne revient pas à sa longueur initiale l_0 . On a donc une déformation résiduelle qui n'est autre que la partie irréversible de la déformation: c'est la partie plastique que l'on notera ε^{pl} (notée OC sur la figure 6). On remarque que la décharge a le même module Young E. Il s'agit d'une décharge élastique : si on impose à l'éprouvette un nouvel allongement à partir de l'état représenté par le point C, le trajet parcouru est encore le trajet CB avant de subir une déformation plastique à partir du point B. A tout instant la déformation totale, $\sigma(OD)$ se décompose en une partie élastique $\varepsilon^{el}(CD)$ égale à σ/E et une partie plastique $\varepsilon^{pl}(OC)$.

On a :

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl}$$

- le point A correspond au seuil de plasticité la contrainte en A est nommée limite élastique en traction uni axiale et est notée σ_0 .

On voit que lorsque le matériau a déjà été déformé, cette limite (à partir de laquelle on observe des déformations plastiques irréversibles) augmentent. La limite en contrainte est alors appelée contrainte d'écoulement. En général pour les métaux, il y a croissance de la contrainte d'écoulement avec la déformation: c'est le phénomène d'écrouissage. Dans le cas contraire on parle d'adoucissement.

Zone 3 :

C'est le domaine de la striction. La section de l'éprouvette ne demeure plus constante dans la longueur, la striction étant une diminution localisée de section. On observe que la force de traction passe par un maximum en début de striction, puis décroît régulièrement jusqu'à rupture, et qu'il en est de même de la contrainte calculée.

Chapitre II: Comportement plastique contrainte résiduelles

En rapportant la force de traction à la section calculée, et en supposant la déformation Homogène : courbe SR sur la figure (6). L'analyse plus précise, dans la section réduite Par la striction montre que l'état de contrainte réel n'est plus monodimensionnel.

La Contrainte d'écoulement que l'on peut en déduire continue à croître, lorsque le matériau Ne subit pas d'adoucissement. Dans le comportement plastique, qui comprend en fait Les zones 2 et 3, nous retiendrons que la déformation est irréversible, mais aussi Incrémentale Dans la mesure où nous avons constaté qu'il faut suivre "pas à pas" la Courbe AR de la figure (4).

Cette caractéristique importante de la plasticité apparaît Encore plus nettement dans les exemples où l'état initial et l'état final ne permettent Nullement de décrire de façon réaliste le processus de déformation: il faut préciser

L'histoire des contraintes et des déformations. Cette description complète n'est pas Nécessaire en élasticité (même non linéaire), et représente une difficulté majeure de la Plasticité, qui n'a pas toujours été bien appréhendée.

● Idéalisations courantes :

Par rapport au comportement précédent, on utilise fréquemment les schématisations Suivantes, représentées sur la figure (7) :

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

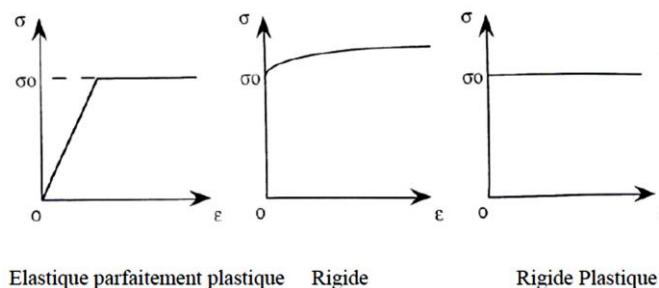


Figure II.7 : Idéalisations classiques du comportement plastique.

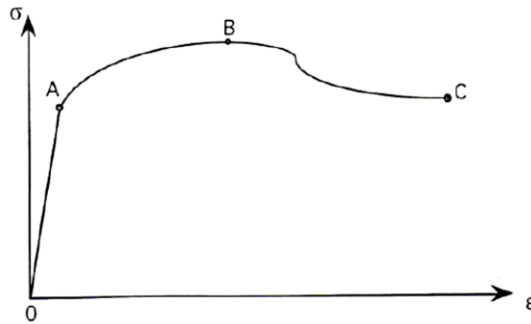
Chapitre II: Comportement plastique contrainte résiduelles

II-3.3 Définitions complémentaires :

a-Ecrouissage-adoucissement :

Nous avons déjà défini l'écrouissage comme l'augmentation de la contrainte d'écoulement au cours de la déformation plastique (figure 8 partie AB).

L'adoucissement est le phénomène inverse : la contrainte d'écoulement diminue avec la Déformation plastique (figure 8 parties BC de la courbe).



FigureII. 8 : Phénomène d'écrouissage et d'adoucissement en traction simple.

b- Effet Bauschinger :

En général le comportement en traction est voisin du comportement en compression, Mais pour certains matériaux (la fonte par exemple), la courbe contrainte déformation En essai uni axial est très dissymétrique (figure 9).

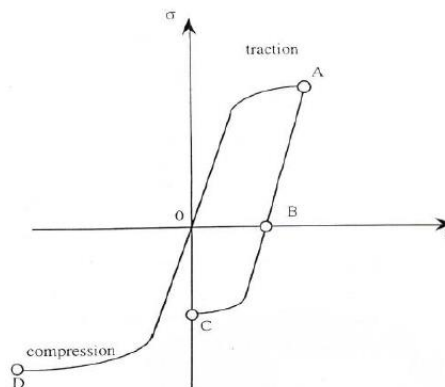


Figure II.9 : Effet Bauschinger .

Une traction préalable OA (figure 8), suivie d'un déchargement AB puis d'une compression BC , conduit à un état de contrainte différent d'une compression OD , à partir de l'état initial. Dans la suite de ce chapitre nous négligerons ces particularités.

Chapitre II: Comportement plastique contrainte résiduelles

c- Restauration

L'écroutissement est provoqué par une création et une accumulation de défauts (Dislocations), qui peuvent être partiellement ou totalement éliminés par un traitement approprié (recuit par exemple).

Le matériau subit alors une restauration qui a, en particulier, pour effet de diminuer sa contrainte d'écoulement "actuelle".

II-3.4- Principaux critères utilisés - plasticité multiaxiale :

a- Forme générale d'un critère de plasticité isotrope :

Si le cas mono axial est très simple, surtout si l'on néglige l'effet Bauschinger comme nous l'avons annoncé, le cas général requiert une analyse détaillée. Le problème peut être formulé de la façon suivante : un tenseur de contrainte σ étant donné, il faut être capable de décider si l'état de contrainte correspond au domaine élastique. Ou s'il est dans le domaine plastique. Pour résoudre ce problème nous utiliserons une fonction mathématique f appelé critère de plasticité et possédant les caractéristiques suivantes :

$f(\sigma) < 0$	caractérise un état élastique,
$f(\sigma) = 0$	correspond à la zone plastique,
$f(\sigma) > 0$	est considéré comme non physique et est donc interdit.

Nous devons alors préciser la forme de la fonction f en tenant compte des résultats expérimentaux et des idéalizations retenues. Le critère de plasticité sera déterminé à partir d'une fonction seuil σ_0 et des composantes du tenseur des contraintes σ .

b-Critère de Tresca :

Historiquement il semble que ce soit le premier critère de plasticité qui ait été proposé, au siècle dernier, en mécanique des sols.

☒ Introduction du critère de Tresca: Tresca a postulé que le critère de plasticité fait intervenir la cission maximum τ_{\max} et s'écrit donc :

$$f = 2(\tau_{\max} - \tau_0)$$

Où est la contrainte limite, caractéristique du matériau considéré. On peut démontrer, et nous l'admettons ici, que l'équation précédente est équivalent à :

$$f = \text{Max}_{ij}(\sigma_i - \sigma_j) - \sigma_0$$

Pour un état de traction uni axiale, le critère de Tresca signifie que la plastification se

Chapitre II: Comportement plastique contrainte résiduelles

Produit quand le cisaillement maximum atteint la valeur critique $\sigma_0/2$.

c. Critère de Von Mises :

L'écoulement plastique a lieu quand l'énergie nécessaire pour obtenir une déformation permanente dans l'essai de traction est fournie à la pièce équation N° 2 :

éq (2) :

$$\sigma_{\text{eq}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{1/2} = \sigma_0$$

Avec : $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$

En traction uniaxiale : $\sigma_{\text{eq}} = \sigma_0$

II-4 Contraintes résiduelles :

II-4.1- Définition contraintes résiduelles :

On définit généralement les contraintes résiduelles comme étant les contraintes qui subsistent dans les pièces mécaniques qui ne sont soumises à aucun effort extérieur.

Tout procédé de fabrication introduit dans une pièce mécanique des contraintes résiduelles qui vont influencer son comportement en fatigue, en rupture et même en corrosion. Il existe peu de modes de mise en œuvre de matériaux qui n'engendrent pas un nouvel état de contraintes.

Le rôle des contraintes résiduelles est donc très important pour concevoir une pièce mécanique. Depuis quelques années, les études se sont multipliées pour comprendre l'effet des contraintes résiduelles sur les performances mécaniques.

II-4.2- Type de contraintes résiduelles :

Des contraintes résiduelles existent dans pratiquement toutes les pièces rigides, Métalliques Ou non (bois, polymère, verre, céramique, etc.). Elles traduisent l'histoire Métallurgique le cas Échéant et mécanique de chaque point et de l'ensemble de la pièce Au cours de son élaboration. Elles existent à différents niveaux. On en distingue en Général trois qui dépend de l'échelle laquelle on les observe [22] :

☒ Contraintes résiduelles d'ordre macroscopiques (1er ordre) :

Se situent l'échelle d'un grand nombre de grains ou de la pièce mécanique. Elles sont accessibles à la mesure, par exemple à l'aide de jauges qui détectent les déformations qu'elles produisent et par diffraction des rayons X.

Chapitre II: Comportement plastique contrainte résiduelles

Contraintes dues à l'hétérogénéité et à l'anisotropie du cristal (grain) (2eme ordre) :

Lors d'une sollicitation mécanique (traction uniforme d'une éprouvette lisse par exemple), certains grains orientés favorablement atteindront avant d'autres la limite d'écoulement, ce qui provoquera une hétérogénéité du comportement lorsque la charge sera supprimée, les retours élastiques se feront donc différemment et plus ou moins librement suivant les grains, ce qui conduira ceux-ci dans des états de contraintes résiduelles non nulles. La moyenne cependant de ces contraintes, c'est-à-dire la résultante générale suivant l'axe de traction, sera nulle à la fin de l'essai (contrainte résiduelle d'ordre macroscopiques). Ce type de contraintes pourrait être mesuré par diffraction des rayons X.

Contraintes à l'échelle du cristal (3ème ordre):

On atteint à ce niveau la limite de la notion de contraintes. Ce sont les actions créées par tous les types de défauts cristallins : lacunes, atomes interstitiels, atomes en substitution, dislocations, défauts d'empilement, macles, jusqu'aux joints de grains.

Ces trois types de contraintes résiduelles interviennent les unes sur les autres. Ce sont bien sûr les contraintes du premier ordre ou macro-contraintes qui intéressent les mécaniciens ou les bureaux d'études. Mais les contraintes résiduelles de 2ème ordre sont également très importantes, car elles sont l'indicateur de l'état d'écrouissage et d'endommagement du matériau [22] :

II-4.3- Origines des contraintes résiduelles :

Les origines des contraintes résiduelles sont très diverses. Elles sont produites à différentes étapes de fabrication de la pièce :

- ☒ Pendant la solidification.
- ☒ Lors du démoulage.
- ☒ Au cours du traitement thermique et en particulier de l'opération de trempe.

Elles peuvent être séparées en trois catégories : mécanique, thermique et métallurgique. On assiste souvent à une combinaison de ces différentes causes pour la genèse des contraintes résiduelles. Par exemple, dans le cas d'une rectification, les contraintes sont engendrées par trois processus.

- ☒ résultant de la déformation plastique en absence d'échauffement
- ☒ résultant du dépassement de la limite d'élasticité à la suite de la présence d'un gradient thermique
- ☒ résultant de changements de phases métallurgiques

Chapitre II: Comportement plastique contrainte résiduelles

II -4.4- Effets des contraintes résiduelles sur la fatigue :

Les contraintes résiduelles jouent un rôle primordial sur la tenue en fatigue des Matériaux. Elles peuvent être considérées comme une contrainte moyenne ou statique Superposée à la contrainte cyclique. Cet effet de la contrainte moyenne se traduit par Une diminution de la tenue à la fatigue lorsque la contrainte moyenne augmente, ce qui Se traduit dans les diagrammes de Haigh et de Goodman (figure 10).

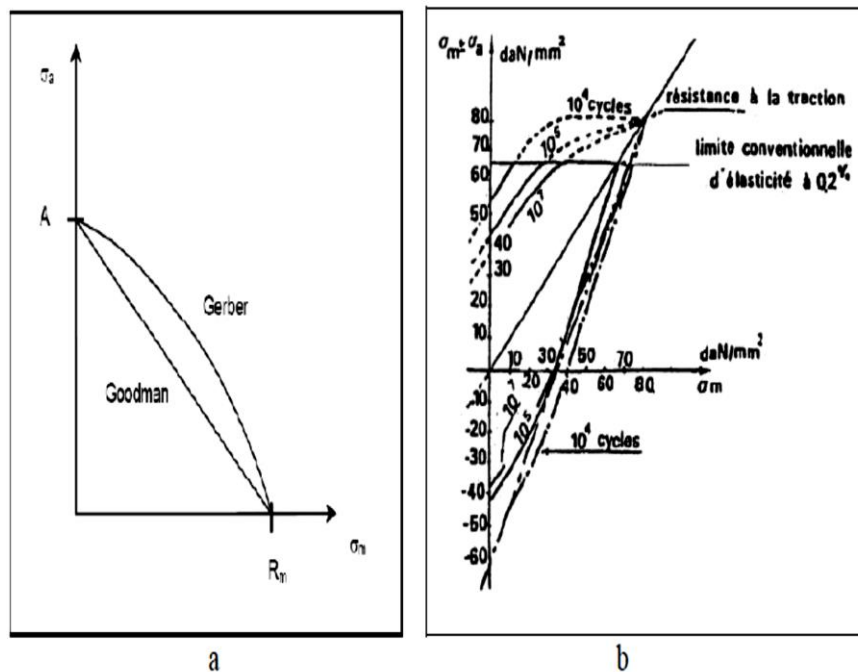


Figure II.10 : Diagramme de Haigh (a) et Goodman (b) [21]

Le diagramme de Haigh, donnant la limite d'endurance en fonction de la contrainte Moyenne. Cette représentation est la plus courante ; On distingue pour le diagramme DeHaigh plusieurs formes différentes d'interaction entre la limite d'endurance et la Contrainte moyenne dont les principales sont :

- ☒ la droite de Goodman, l'interaction linéaire la plus simple et la plus pessimiste (adoptée dans les codes de construction).
- ☒ la parabole de Gerber, un peu moins sévère.

L'effet des contraintes résiduelles sur la propagation de la fissure de fatigue est d'une grande importance et a été le centre de beaucoup de recherche et études [23- 24]. Il y a de nombreuses méthodes pour générer des contraintes résiduelles sous forme

Chapitre II: Comportement plastique contrainte résiduelles

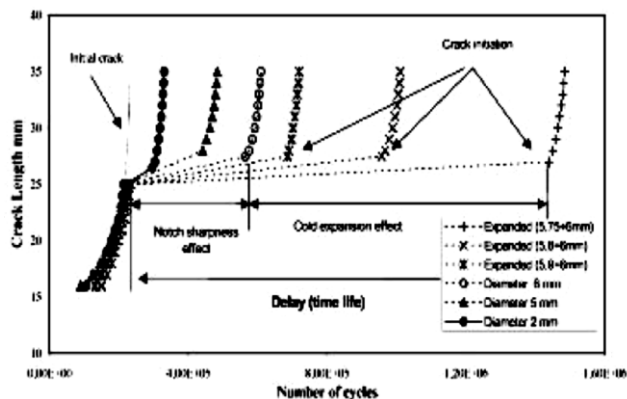
De contrainte mécaniques soit par grenailage, écrouissage, choc de laser, préchargement mécanique et par expansion.

Le pré chargement mécanique se produit quand une charge de traction simple est appliquée, il entraîne une déformation plastique de compression. Un inconvénient de ce processus est que la contrainte résiduelle n'est pas uniforme autour de la fissure.

L'expansion à froid des trous est une technique employée fréquemment par l'industrie aéronautique pour améliorer la durée de vie des structures en fatigue au niveau des trous des rivets. Le processus de l'expansion a été développé par Boeing Compagnie vers la fin des années 60 [23]. Fatigue Technologie Inc. a lancé une méthode efficace admise comme norme pratique aux Etats-Unis [24]. Le processus propose d'augmenter radialement un trou pour créer une zone de contrainte résiduelle de compression autour d'un trou qui retarde la progression de la fissure sous un chargement cyclique. L'expansion a été étudiée dans de nombreuses études. Beaucoup des solutions analytiques pour le calcul des contraintes résiduel ont été développées, mais peu corrobore avec des résultats expérimentaux [25] [26].

L'introduction des contraintes résiduelles par expansion des trous sur les alliages d'aluminium [27] a permis une augmentation significative de la durée de vie et une diminution de la vitesse de propagation comparativement à un trou non expansé.

L'étude expérimentale et numérique de l'effet d'expansion à froid de l'alliage 6005 T5 [28] a montré que l'augmentation du degré d'expansion des trous induit une amélioration de la durée de vie (figure. 11). Les contraintes résiduelles de compressions induites par ce procédé sont le paramètre important de cette amélioration que ce soit sur l'initiation ou la propagation des fissures de fatigue.



FigureII.11: Longueur de la fissure en fonction du nombre de cycle [28]

Chapitre II: Comportement plastique contrainte résiduelles

L'effet des contraintes résiduelles par soudage sur la vitesse de propagation des fissures de fatigue a été mis en évidence sur des éprouvettes M(T) et C(T) en alliage d'aluminium 2024 T351 [29].

Les contraintes résiduelles peuvent être aussi induites au cours du service sous forme de surcharges [30 31]. En effet, une surcharge appliquée lors d'un chargement d'amplitude constante provoque un retard sur la propagation de fissure (figure 12).

Halliday [32] étudie l'effet de surcharges pour différents rapport de charge sur la vitesse de propagation sur l'alliage d'aluminium 2024 T351. Un retard de la vitesse de propagation par rapport à celui immédiatement avant la surcharge, a été observée pour un essai à $R = 0,05$ (figure 9).

La vitesse de propagation minimum a eu lieu à -2 microns -3 microns et au-delà des positions des deux fronts de fissures avant application de la surcharge. De même, si une sous-charge [33] intervient dans ce type de chargement une accélération du taux de propagation peut être observée.

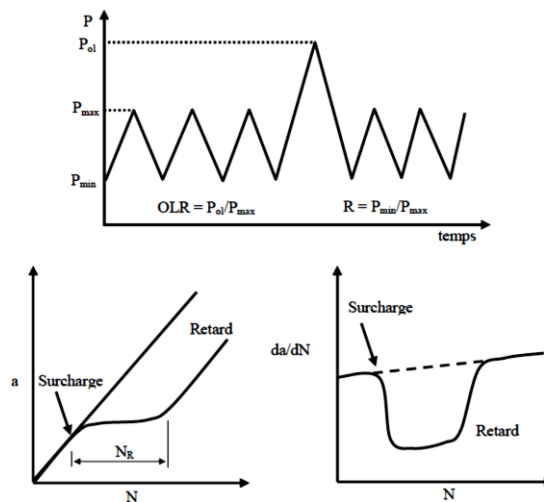


Figure II .12 : Longueur de la fissure en fonction du nombre de cycle .

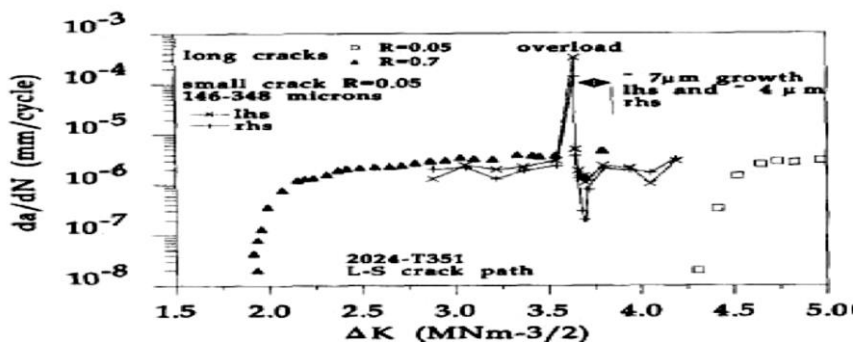


Figure II. 13 : Evolution de la vitesse de fissuration sous l'influence d'une surcharge [34]

Chapitre II: Comportement plastique contrainte résiduelles

Lam et Lian [35] ont également utilisé la méthode de déformation plastique localisée (LPD) pour générer les contraintes résiduelles dans un alliage d'aluminium de type 2024 T3. Ils ont expliqué aussi l'effet du rapport de charge sur la propagation de la fissure de fatigue. Le facteur d'intensité de contraintes résiduelles a été calculé par la méthode des éléments finis et la méthode fonction de poids où R_{eff} est déterminé. R_{eff} représente le rapport de charge effective dépendant du facteur d'intensité de contrainte résiduelle K_r et est défini comme suite équation

N° 3:

éq (3) :

$$R_{eff} = \frac{K_{min} + K_r}{K_{max} + K_r}$$

Chapitre III :
Partie expérimentale

Chapitre III : Partie Expérimentale

III-Introduction :

Les essais mécaniques sont des expériences dont le but est de caractériser les lois de comportements des matériaux (mécanique des milieux continus) la loi de comportement établit une relation entre les contraintes (pression = force / surface) et les déformations (allongement unitaire sans dimensions) il ne faut pas confondre une déformation avec un déplacement ou une dilatation .

Cependant la déformation d'une pièce dépend de la forme de la pièce et de la manière dont sont exercés les efforts les efforts extérieurs sur cette pièce. Il faut donc normaliser les essais.

Notre alliage d'aluminium (série 6000) a une grande importance industrielle, il est très utilisé pour les différents profilés est surtout pour l'emballage des produits alimentaires, ils résistent bien la corrosion atmosphérique et sont facilement soudable.

Ces caractéristiques mécaniques peuvent être augmentées par addition de manganèse et de magnésium ce dernier un durcissement secondaire par solution solide [37]

Tableau III.1: Les caractéristiques physiques de notre alliage [38].

Caractéristiques physique	6000
Masse volumique (g/cm^3)	2.70
Intervalle de fusion	615c-655c
Coefficient de dilatation linéique (0 à 100 C) ($C - 1.106$)	23.4
Module d'élasticité (mpa) (1)	69500
Coefficient de poisson	0.33
Conductivité thermique (0 à 100 °c) ($W/M^{\circ}C$)	Etat T5 : 200
Résistivité à °c ($\mu\Omega cm$)	Etat T5 : 3.3
Capacité thermique massique (0 à 100 °C) ($j/Kg^{\circ}c$)	945
Limité élastique $R_{p0.2}$ (Mpa)	110 (2)
Limité de la rupture R_m (Mpa)	150 (2)
Allongement (%)	14 (2)

Chapitre III : Partie Expérimentale

(1) : moyenne de module de traction et de compression.

(2) : barre étirée état T5 diamètre inférieur à 100 mm .

III-1-But de l'expérimentation :

Projet:

Etude L'effet d'écroutissage sur les propriétés mécaniques à la traction d'un alliage d'aluminium.

III-2-Analyse chimique de l'alliage 6000 :

Tableau III.2 : Analyse chimique de l'alliage 6000.

Ele	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Pb	Sn	Na	Al%
Moy	0.408	0.199	0.004	0.109	0.690	0.010	0.010	0.001	0.002	0.000	0.001	0.001	98.561

III-3- Matériel exploité :

III-3-1- Microscope optique :

Le microscope optique ou microscope photonique est un instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions (ce qui caractérise son grossissement) et de séparer les détails de cette image (et son pouvoir de résolution) afin qu'il soit observable par l'œil humain. Il est utilisé en biologie, pour observer les cellules, les tissus, en pétrographie pour reconnaître les roches, en métallurgie et en métallographie pour examiner la structure d'un métal ou d'un alliage.

Il ne faut pas le confondre avec la loupe binoculaire qui n'exige pas des échantillons plats de faible épaisseur, ou réfléchissants, et permet d'observer des pièces naturelles sans préparation en grossissant l'image d'un facteur peu élevé, mais en gardant une vision stéréoscopique propice à l'examen macroscopique révélateur de grains, de criques, de fissures, etc.

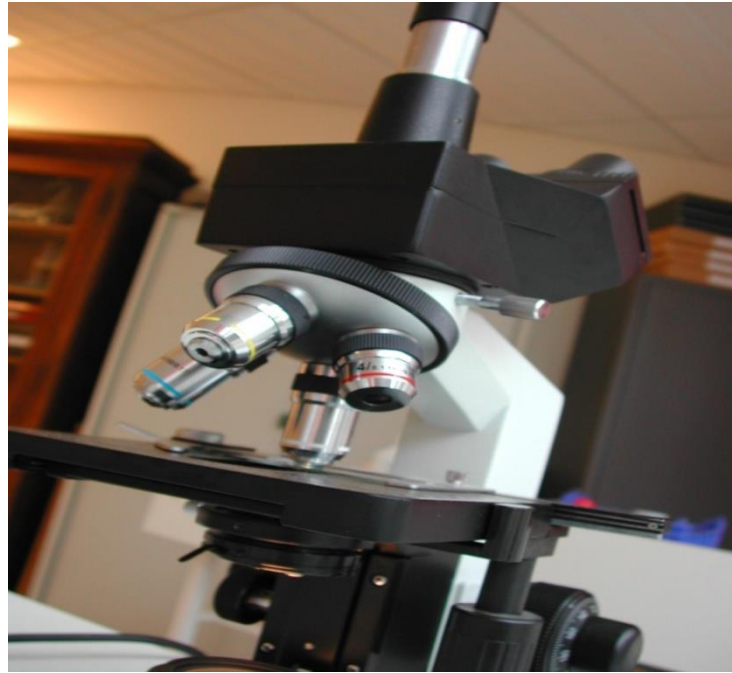


Figure III.1: Microscope optique .

III-3-2- Banc d'essai de traction :

III-3-2-1-L'essai de traction :

Un essai de traction est une expérience de physique qui permet de mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau quelconque.

L'éprouvette dispose de deux têtes par lesquelles elle est fixée dans la machine à la traction et une zone plus mince dans laquelle la déformation est localisée. La déformation est mesurée au moyen d'un extensomètre attaché à l'éprouvette, le résultat d'un tel essai est la contrainte nominale en de laquelle les caractéristiques suivantes peuvent être déduites

- **Le module de Young E :**

La pente de la partie linéaire initiale de la courbe

- **La limite élastique R_e :**

Elle correspond à la fin de la partie élastique de traction marquée par une légère chute

- **La Déformation plastique $R_p 0.2$:**

Elle correspond à la contrainte à laquelle une déformation plastique de 0.2 % est atteinte pour la déterminer, on trace une ligne parallèle à la partie linéaire initiale de la courbe de traction coupant l'axe de déformation à 0.2 % ceci s'impose si la partie linéaire initiale

Chapitre III : Partie Expérimentale

No peut pas être déterminée sans ambiguïté.

- La Résistance à la traction R_m :

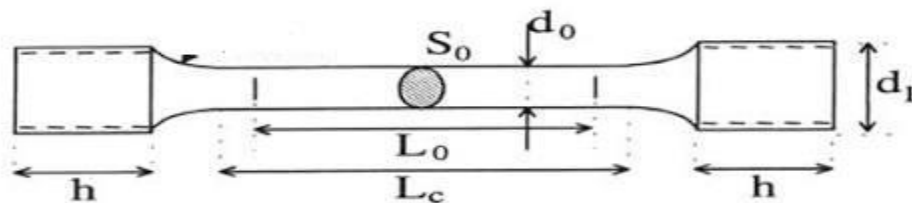
Correspond a la contrainte maximale atteinte de la courbe en cours de l'essai

III-3-2-2-Eprouvettes de traction :



Figure III.2:Eprouvette de traction .

III-3-2-3-Dessin définition de l'éprouvette :



$d_0 = \varnothing$ partie calibrée
 $d_1 = \varnothing$ des têtes filetées
 $L_0 =$ longueur entre repère
 $L_c =$ longueur calibrée
 $h =$ longueur des têtes

Figure III.3 : Exemple d'une éprouvette de traction.

$D_0 = 8 \text{ mm}$	$h = 13 \text{ mm}$	$D_1 = 12 \text{ mm}$	$L_c = 80 \text{ mm}$	$S_0 = 52.4 \text{ mm}$
----------------------	---------------------	-----------------------	-----------------------	-------------------------

Chapitre III : Partie Expérimentale

III-3-2-4-Appareil d'essai :



Figure III.4 :Le banc d'essai de la traction unidirectionnelle wp310.

L'appareil d'essai est une machine d'essai verticale à colonne à entraînement hydraulique avec génération directe d'énergie.

On peut générer tant des forces de traction que de compression dans l'espace de travail.

La force d'essai maximale est de 50 KN dans les deux directions

III-4-Résultats obtenus :

III-4-1-1^{ère}Expérience pour une éprouvette de sous compression 5 % :

Tableau III.3. : Variation σ en fonction de ε et F en fonction ΔL à comprissions 5%.

L (mm)	F (KN)	σ	ε
0	0	0	0,2508949
0,14	0	0	0,2491
0,3296	0,02	0,0003981	0,2466692
0,5192	0,04	0,0007962	0,2442385

Chapitre III : Partie Expérimentale

Suite tableau (III.3)

0,7078	0,11	0,0021895	0,2418205
0,7068	0,16	0,0031847	0,2418333
1,0654	0,23	0,004578	0,2372359
1,2642	0,29	0,0057723	0,2346872
1,4634	0,33	0,0065685	0,2321333
1,6434	0,33	0,0065685	0,2298256
1,8208	0,46	0,0091561	0,2275513
1,9986	0,57	0,0113455	0,2252718
2,1772	0,64	0,0127389	0,2229821
2,3772	0,64	0,0127389	0,220418
2,5668	0,66	0,0131369	0,2179872
2,7552	0,74	0,0147293	0,2155718
2,9352	0,74	0,0147293	0,2132641
3,1098	1,01	0,0201035	0,2110256
3,3068	1,16	0,0230892	0,2085
3,4952	1,24	0,0246815	0,2060846
3,4938	1,31	0,0260748	0,2061026
3,855	1,25	0,0248806	0,2014718
4,0536	1,32	0,0262739	0,1989256
4,231	1,45	0,0288615	0,1966513
4,4182	1,59	0,0316481	0,1942513
4,5954	1,73	0,0344347	0,1919795
4,7726	1,87	0,0372213	0,1897077
4,9392	2,04	0,0406051	0,1875718
5,1158	2,21	0,0439889	0,1853077
5,2928	2,36	0,0469745	0,1830385
5,4602	2,49	0,0495621	0,1808923
5,6402	2,49	0,0495621	0,1785846
5,8262	2,69	0,053543	0,1762
6,0034	2,83	0,0563296	0,1739282
6,1906	2,97	0,0591162	0,1715282
6,1884	3,08	0,0613057	0,1715564
6,5366	3,17	0,0630971	0,1670923
6,7214	3,43	0,0682723	0,1647231
6,8978	3,61	0,0718551	0,1624615

Chapitre III : Partie Expérimentale

Suite tableau (III.3) :

7,0626	3,87	0,0770303	0,1603487
7,249	4,05	0,0806131	0,157959
7,4262	4,19	0,0833997	0,1556872
7,6014	4,43	0,0881768	0,153441
7,7896	4,52	0,0899682	0,1510282
7,9552	4,74	0,0943471	0,1489051
8,1302	4,99	0,0993233	0,1466615
8,3002	4,99	0,0993233	0,1444821
8,4614	5,43	0,1080812	0,1424154
8,6464	5,68	0,1130573	0,1400436
8,8124	5,88	0,1170382	0,1379154
8,8094	6,03	0,1200239	0,1379539
9,1458	6,21	0,1236067	0,133641
9,3198	6,51	0,129578	0,1314103
9,4952	6,74	0,1341561	0,1291615
9,6808	6,96	0,138535	0,1267821
9,8466	7,17	0,142715	0,1246564
10,0232	7,34	0,1460987	0,1223923
10,1902	7,49	0,1490844	0,1202513
10,3574	7,63	0,151871	0,1181077
10,5346	7,77	0,1546576	0,1158359
10,7124	7,88	0,1568471	0,1135564
10,8824	7,88	0,1568471	0,1113769
11,0688	8,06	0,1604299	0,1089872
11,2368	8,16	0,1624204	0,1068333
11,4052	8,24	0,1640127	0,1046744
11,4032	8,34	0,1660032	0,1047
11,7316	8,42	0,1675955	0,1004897
11,9202	8,49	0,1689889	0,0980718
12,0986	8,57	0,1705812	0,0957846
12,2672	8,64	0,1719745	0,0936231
12,4358	8,71	0,1733678	0,0914615
12,6144	8,78	0,1747612	0,0891718

Chapitre III : Partie Expérimentale

Suite de tableau (III.3) :

12,7832	8,84	0,1759554	0,0870077
12,962	8,9	0,1771497	0,0847154
13,1508	8,96	0,178344	0,0822949
13,3298	9,01	0,1793392	0,08
13,5198	9,01	0,1793392	0,0775641
13,6982	9,09	0,1809315	0,0752769
13,8674	9,13	0,1817277	0,0731077
14,0368	9,16	0,1823248	0,0709359
14,3766	9,17	0,1825239	0,0665795
14,5772	9,14	0,1819268	0,0640077
14,7684	9,08	0,1807325	0,0615564
14,9598	9,01	0,1793392	0,0591026
15,1422	8,89	0,1769506	0,0567641
15,3144	8,78	0,1747612	0,0545564
15,5072	8,64	0,1719745	0,0520846
15,7	8,5	0,1691879	0,0496128
15,8834	8,33	0,1658041	0,0472615
16,0868	8,16	0,1624204	0,0446539
16,2768	8,16	0,1624204	0,042218
16,4842	7,79	0,1550557	0,039559
16,6788	7,56	0,1504777	0,0370641
16,8836	7,32	0,1457006	0,0344385
16,8886	7,07	0,1407245	0,0343744
17,2838	6,81	0,1355494	0,0293077
17,4994	6,53	0,1299761	0,0265436
17,6954	6,23	0,1240048	0,0240308
17,9118	5,91	0,1176354	0,0212564
18,1386	5,57	0,1108678	0,0183487
18,3558	5,21	0,1037022	0,0155641
18,5836	4,82	0,0959395	0,0126436
18,9144	3,78	0,0752389	0,0084026
19,4682	0,59	0,0117436	0,0013026
19,5484	0,08	0,0015924	0,0002744
19,5684	0,08	0,0015924	1,79E-05
19,5694	0,03	0,0005971	5,13E-06
19,5698	0,01	0,000199	0

Chapitre III : Partie Expérimentale

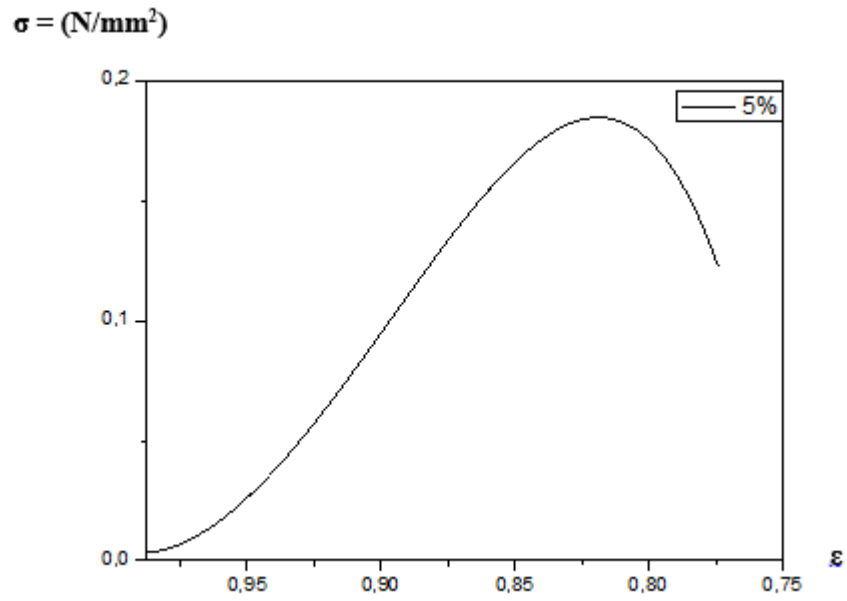


Figure III.5 : Diagramme de traction pour éprouvette à état compression 5% $f(\sigma) = \epsilon$.

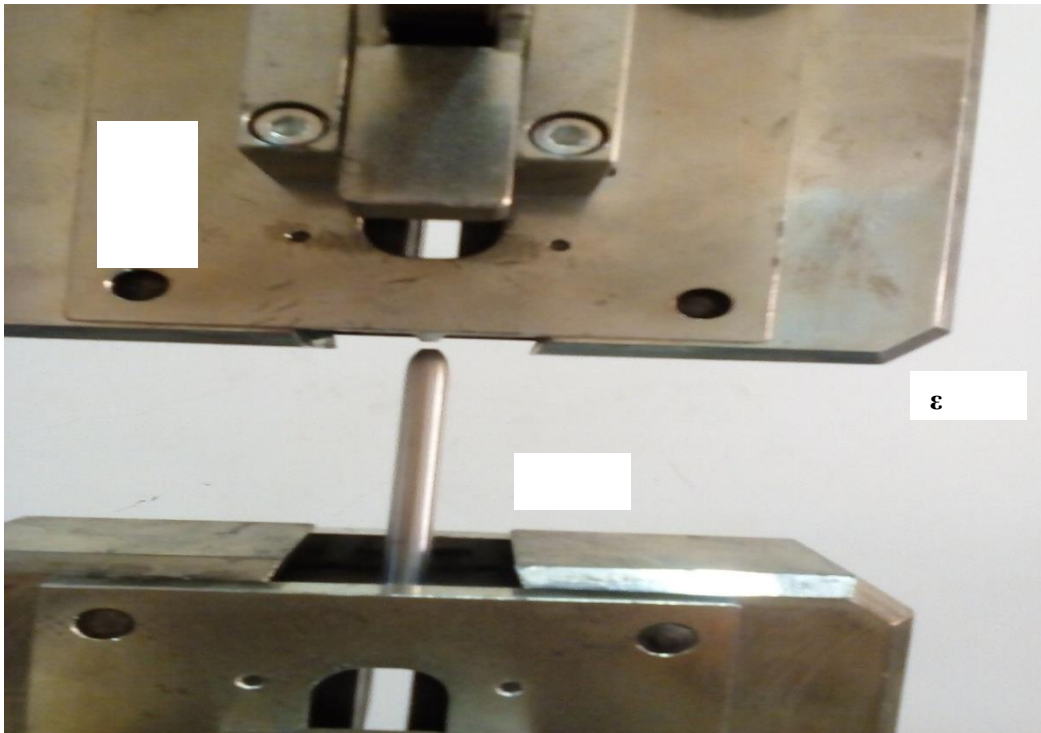


Figure III.6 : Exemple de rupture d'une éprouvette réelle à état de compression 5%.

Chapitre III : Partie Expérimentale

III-4-2-2^{em}Expérience pour éprouvette a état compression10 % :

Tableau III.4. : Variation σ en fonction de ε et F en fonction ΔL à comprissions 10%.

L (mm)	F (KN)	σ	ε
0	0	0	
-0,0004	0,02	0,00039809	0,2193679
0	0	0	0,21936296
0,0498	0,01	0,00019904	0,21874815
0,2088	0,06	0,00119427	0,21678519
0,3788	0,06	0,00119427	0,21468642
0,3752	0,24	0,00477707	0,21473086
0,724	0,3	0,00597134	0,21042469
0,9428	0,36	0,00716561	0,20772346
1,1404	0,48	0,00955414	0,20528395
1,338	0,6	0,01194268	0,20284444
1,525	0,75	0,01492834	0,2005358
1,7128	0,86	0,01711783	0,19821728
1,9218	0,91	0,01811306	0,19563704
2,1292	1,04	0,02070064	0,19307654
2,335	1,25	0,02488057	0,1905358
2,541	1,45	0,02886146	0,18799259
2,7468	1,66	0,0330414	0,18545185
2,9528	1,86	0,03702229	0,18290864
3,1578	2,11	0,04199841	0,18037778
3,3678	2,11	0,04199841	0,17778519
3,361	2,45	0,04876592	0,17786914
3,7474	2,63	0,05234873	0,17309877
3,9736	2,82	0,05613057	0,17030617
4,1794	3,03	0,06031051	0,16776543
4,386	3,2	0,06369427	0,16521481
4,5848	3,26	0,06488854	0,16276049
4,791	3,45	0,06867038	0,16021481
4,985	3,75	0,07464172	0,15781975
5,179	4,05	0,08061306	0,15542469
5,364	4,3	0,08558917	0,15314074
5,5596	4,52	0,08996815	0,15072593
5,7542	4,79	0,09534236	0,14832346
5,9488	5,06	0,10071656	0,14592099
6,142	5,4	0,10748408	0,1435358

Chapitre III : Partie Expérimentale

Suite de tableau (III .4) :

6,332	5,4	0,1074841	0,1411901
6,3186	6,07	0,1208201	0,1413556
6,7022	6,39	0,1271895	0,1366198
6,906	6,7	0,1333599	0,1341037
7,1104	6,98	0,1389331	0,1315803
7,2844	7,28	0,1449045	0,1294321
7,4782	7,59	0,1510748	0,1270395
7,6626	7,87	0,1566481	0,124763
7,8584	8,08	0,160828	0,1223457
8,0454	8,23	0,1638137	0,120037
8,2328	8,36	0,1664013	0,1177235
8,4204	8,48	0,1687898	0,1154074
8,6186	8,57	0,1705812	0,1129605
8,7966	8,67	0,1725717	0,110763
8,9848	8,76	0,1743631	0,1084395
9,1748	8,76	0,1743631	0,1060938
9,1714	8,93	0,1777468	0,1061358
9,5496	9,02	0,1795382	0,1014667
9,7776	9,12	0,1815287	0,0986519
9,9758	9,21	0,1833201	0,0962049
10,1742	9,29	0,1849124	0,0937556
10,3524	9,38	0,1867038	0,0915556
10,551	9,45	0,1880971	0,0891037
10,7296	9,52	0,1894905	0,0868988
10,9278	9,61	0,1912819	0,0844519
11,1366	9,67	0,1924761	0,0818741
11,326	9,7	0,1930733	0,0795358
11,5254	9,73	0,1936704	0,0770741
11,7148	9,76	0,1942675	0,0747358
11,9042	9,79	0,1948647	0,0723975
12,0942	9,79	0,1948647	0,0700519
12,093	9,85	0,1960589	0,0700667
12,4628	9,86	0,196258	0,0655012

Chapitre III : Partie Expérimentale

Suite de tableau (III.4) :

12,6928	9,86	0,196258	0,0626617
12,8732	9,84	0,1958599	0,0604346
13,0742	9,79	0,1948647	0,0579531
13,266	9,7	0,1930733	0,0555852
13,4882	9,59	0,1908838	0,052842
13,6808	9,46	0,1882962	0,0504642
13,8938	9,31	0,1853105	0,0478346
14,077	9,15	0,1821258	0,0455728
14,2906	8,97	0,178543	0,0429358
14,4946	8,77	0,1745621	0,0404173
14,7088	8,56	0,1703822	0,0377728
14,9334	8,33	0,1658041	0,035
15,1334	8,33	0,1658041	0,0325309
15,143	7,85	0,15625	0,0324124
15,549	7,55	0,1502787	0,0274
15,7952	7,24	0,1441083	0,0243605
16,0216	6,92	0,1377389	0,0215654
16,2586	6,57	0,1307723	0,0186395
16,4964	6,18	0,1230096	0,0157037
16,7246	5,77	0,1148487	0,0128864
16,9736	5,32	0,1058917	0,0098124
17,3438	4,31	0,0857882	0,005242
17,7054	0,73	0,0145303	0,0007778
17,7566	0,17	0,0033838	0,0001457
17,7678	0,11	0,0021895	7,41E-06
17,7684	0,08	0,0015924	0
17,7582	0,09	0,0017914	0,0001259
17,7576	0,12	0,0023885	0,0001333
17,7568	0,16	0,0031847	0,0001432
17,7562	0,19	0,0037819	0,0001506
17,756	0,2	0,0039809	0,0001531

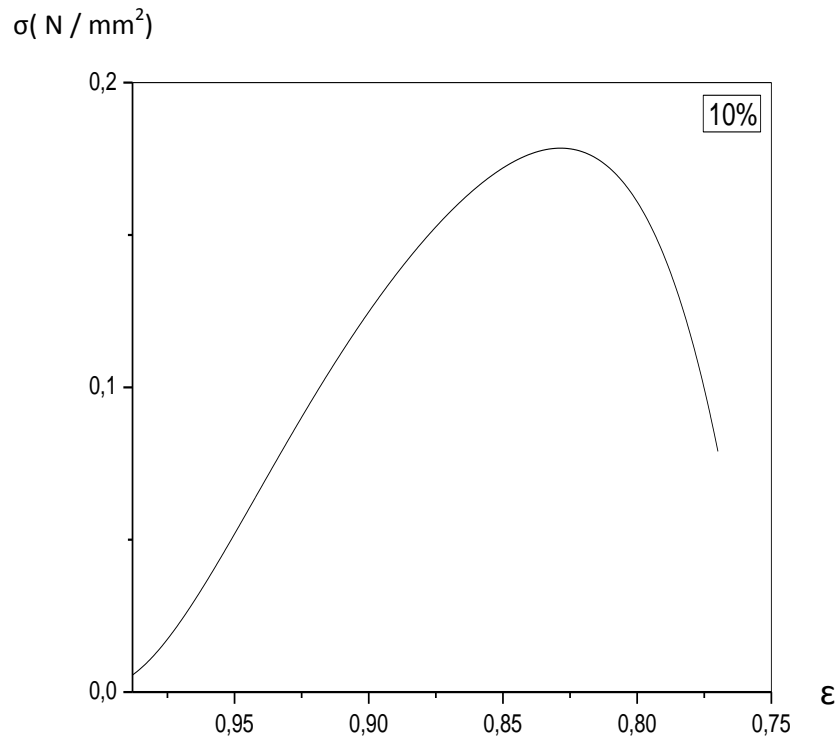


Figure III.7 : Diagramme de traction pour éprouvette à état compression 10% $f(\sigma) = \epsilon$.



Figure III.8 : Exemple de rupture d'une éprouvette réelle à 10% de compressions.

Chapitre III : Partie Expérimentale

III-4-3-3-Expérience pour éprouvette a sous de compression 15% :

Tableau III.5. : Variation σ a fonction de ε et F a fonction ΔL à comprissions 15% .

L (mm)	F (KN)	σ	ε
0	0	0	0,24344
-0,0006	0,03	0,0005971	0,2434475
0,0088	0,06	0,0011943	0,24333
0,0092	0,04	0,0007962	0,243325
0,0096	0,02	0,0003981	0,24332
0,01	0	0	0,243315
0,0092	0,04	0,0007962	0,243325
0,0492	0,04	0,0007962	0,242825
0,2494	0,03	0,0005971	0,2403225
0,4568	0,16	0,0031847	0,23773
0,6568	0,16	0,0031847	0,23523
0,8544	0,28	0,0055733	0,23276
1,0428	0,36	0,0071656	0,230405
1,2196	0,52	0,0103503	0,228195
1,4074	0,63	0,0125398	0,2258475
1,596	0,7	0,0139331	0,22349
1,7928	0,86	0,0171178	0,22103
1,9992	1,04	0,0207006	0,21845
1,997	1,15	0,0228901	0,2184775
2,3936	1,32	0,0262739	0,21352
2,5996	1,52	0,0302548	0,210945
2,806	1,7	0,0338376	0,208365
3,0126	1,87	0,0372213	0,2057825
3,2292	2,04	0,0406051	0,203075
3,4354	2,23	0,0443869	0,2004975
3,6354	2,23	0,0443869	0,1979975
3,8402	2,49	0,0495621	0,1954375
4,0368	2,66	0,0529459	0,19298
4,2432	2,84	0,0565287	0,1904
4,4396	3,02	0,0601115	0,187945

Chapitre III : Partie Expérimentale

Suite de tableau (III.5) :

4,6464	3,18	0,0632962	0,18536
4,846	3,2	0,0636943	0,182865
5,0536	3,32	0,0660828	0,18027
5,0502	3,49	0,0694666	0,1803125
5,4372	3,64	0,0724522	0,175475
5,655	3,75	0,0746417	0,1727525
5,8436	3,82	0,076035	0,170395
6,0388	4,06	0,0808121	0,167955
6,2234	4,33	0,0861863	0,1656475
6,4176	4,62	0,0919586	0,16322
6,6076	4,62	0,0919586	0,160845
6,7886	5,07	0,1009156	0,1585825
6,974	5,3	0,1054936	0,156265
7,1694	5,53	0,1100717	0,1538225
7,3548	5,76	0,1146497	0,151505
7,5408	5,96	0,1186306	0,14918
7,717	6,15	0,1224124	0,1469775
7,9038	6,31	0,1255971	0,1446425
7,8992	6,54	0,1301752	0,1447
8,2346	6,77	0,1347532	0,1405075
8,4308	6,96	0,138535	0,138055
8,6284	7,08	0,1409236	0,135585
8,815	7,25	0,1443073	0,1332525
9,0016	7,42	0,1476911	0,13092
9,189	7,55	0,1502787	0,1285775
9,389	7,55	0,1502787	0,1260775
9,5756	7,72	0,1536624	0,123745
9,7542	7,79	0,1550557	0,1215125
9,953	7,85	0,15625	0,1190275
10,142	7,9	0,1572452	0,116665
10,3306	7,97	0,1586385	0,1143075
10,5186	8,07	0,160629	0,1119575
10,7072	8,14	0,1620223	0,1096
10,706	8,2	0,1632166	0,109615
11,0548	8,26	0,1644108	0,105255
11,2536	8,32	0,1656051	0,10277

Chapitre III : Partie Expérimentale

Suite de tableau (III.5) :

11,4422	8,39	0,1669984	0,1004125
11,6314	8,43	0,1677946	0,0980475
11,8206	8,47	0,1685908	0,0956825
12,01	8,5	0,1691879	0,093315
12,2	8,5	0,1691879	0,09094
12,3872	8,64	0,1719745	0,0886
12,5762	8,69	0,1729698	0,0862375
12,756	8,7	0,1731688	0,08399
12,9352	8,74	0,173965	0,08175
13,1146	8,77	0,1745621	0,0795075
13,304	8,8	0,1751592	0,07714
13,5034	8,83	0,1757564	0,0746475
13,503	8,85	0,1761545	0,0746525
13,863	8,85	0,1761545	0,0701525
14,0632	8,84	0,1759554	0,06765
14,2532	8,84	0,1759554	0,065275
14,4438	8,81	0,1753583	0,0628925
14,6348	8,76	0,1743631	0,060505
14,8262	8,69	0,1729698	0,0581125
15,0262	8,69	0,1729698	0,0556125
15,2198	8,51	0,1693869	0,0531925
15,4024	8,38	0,1667994	0,05091
15,5952	8,24	0,1640127	0,0485
15,7986	8,07	0,160629	0,0459575
16,0118	7,91	0,1574443	0,0432925
16,215	7,75	0,1542596	0,0407525
16,4184	7,58	0,1508758	0,03821
16,4224	7,38	0,1468949	0,03816
16,817	7,15	0,1423169	0,0332275
17,0418	6,91	0,1375398	0,0304175
17,267	6,65	0,1323647	0,0276025
17,4828	6,36	0,1265924	0,024905
17,7088	6,06	0,120621	0,02208
17,9242	5,79	0,1152468	0,0193875
18,1542	5,79	0,1152468	0,0165125
18,3986	5,07	0,1009156	0,0134575
18,6276	4,62	0,0919586	0,010595

Chapitre III : Partie Expérimentale

Suite de tableau (III.5) :

18,919	4,05	0,0806131	0,0069525
19,3522	1,39	0,0276672	0,0015375
19,639	0,05	0,0009952	-0,002048
19,7092	0,04	0,0007962	-0,002925
19,7086	0,07	0,0013933	-0,002918
19,7076	0,12	0,0023885	-0,002905
19,6874	0,13	0,0025876	-0,002653
19,6574	0,13	0,0025876	-0,002278
19,6474	0,13	0,0025876	-0,002153
19,6376	0,12	0,0023885	-0,00203
19,5976	0,12	0,0023885	-0,00153
19,5876	0,12	0,0023885	-0,001405
19,5776	0,12	0,0023885	-0,00128
19,577	0,15	0,0029857	-0,001273
19,5762	0,19	0,0037819	-0,001263
19,5764	0,18	0,0035828	-0,001265
19,576	0,2	0,0039809	-0,00126
19,5754	0,23	0,004578	-0,001253
19,5652	0,24	0,0047771	-0,001125
19,5552	0,24	0,0047771	-0,001
19,5352	0,24	0,0047771	-0,00075
19,5152	0,24	0,0047771	-0,0005
19,4452	0,24	0,0047771	0,000375
19,4252	0,24	0,0047771	0,000625
19,4752	0,24	0,0047771	0
19,4352	0,24	0,0047771	0,0005
19,3852	0,24	0,0047771	0,001125
19,4352	0,24	0,0047771	0,0005
19,4252	0,24	0,0047771	0,000625
19,4052	0,24	0,0047771	0,000875
19,4352	0,24	0,0047771	0,0005
19,4752	0,24	0,0047771	0

Chapitre III : Partie Expérimentale

Suite de tableau (III.5) :

19,4152	0,24	0,0047771	0,00075
19,3952	0,24	0,0047771	0,001
19,4052	0,24	0,0047771	0,000875
19,4552	0,24	0,0047771	0,00025
19,3952	0,24	0,0047771	0,001
19,3552	0,24	0,0047771	0,0015
19,4052	0,24	0,0047771	0,000875
19,3952	0,24	0,0047771	0,001
19,3652	0,24	0,0047771	0,001375
19,3352	0,24	0,0047771	0,00175
19,2952	0,24	0,0047771	0,00225
19,2752	0,24	0,0047771	0,0025
19,2652	0,24	0,0047771	0,002625
19,3752	0,24	0,0047771	0,00125
19,3952	0,24	0,0047771	0,001
19,3652	0,24	0,0047771	0,001375
19,3552	0,24	0,0047771	0,0015
19,3852	0,24	0,0047771	0,001125

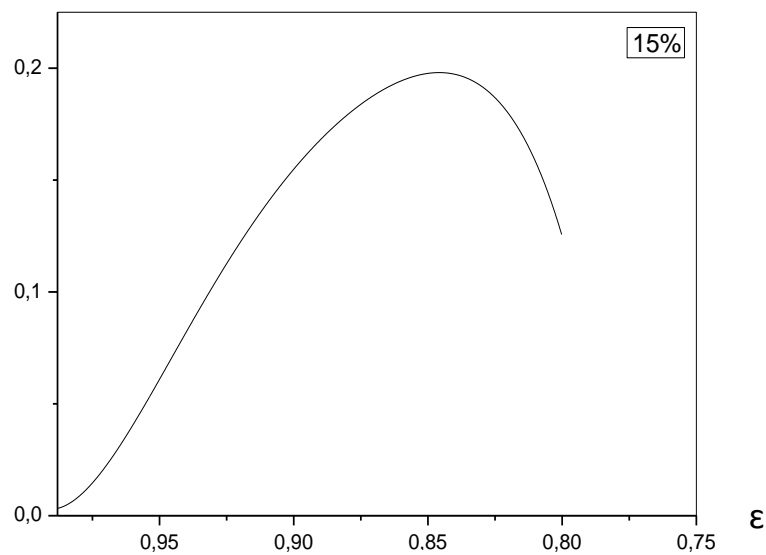


figure III.9 : Diagramme de traction pour éprouvette à état compression 15% $f(\sigma) = \epsilon$.

Chapitre III : Partie Expérimentale

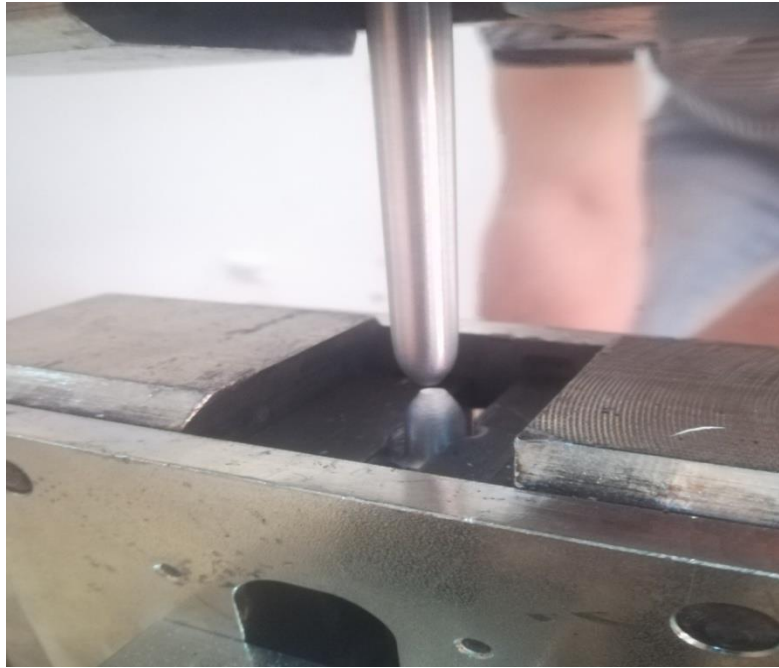


Figure III.10 : Exemple de rupture d'une éprouvette réelle a 15% de compressions.

III-4-4-4^{eme}-Expérience de traction pour une éprouvette a état compression 20% :

Tableau III.6. : Variation σ a fonction de ε et F a fonction ΔL à comprissions 20%.

L (mm)	F (KN)	σ	ε
0	0	0	1
0,0194	0,03	0,0005971	0,9997306
0,0198	0,01	0,000199	0,999725
0,3598	0,01	0,000199	0,9950028
0,5566	0,17	0,0033838	0,9922694
0,7422	0,39	0,0077627	0,9896917
0,9066	0,67	0,013336	0,9874083
1,0928	0,86	0,0171178	0,9848222
1,2916	0,92	0,0183121	0,9820611
1,4762	1,19	0,0236863	0,9794972
1,6592	1,54	0,0306529	0,9769556
1,8298	2,01	0,040008	0,9745861
2,01	2,5	0,0497612	0,9720833
2,1798	3,01	0,0599124	0,969725
2,3614	3,43	0,0682723	0,9672028
2,5322	3,89	0,0774283	0,9648306
2,7022	4,39	0,0873806	0,9624694
2,6906	4,97	0,0989252	0,9626306

Chapitre III : Partie Expérimentale

Suite de tableau (III.6) :

3,0306	4,97	0,0989252	0,9579083
3,1956	6,22	0,1238057	0,9556167
3,3544	6,78	0,1349522	0,9534111
3,5332	7,34	0,1460987	0,9509278
3,7162	7,69	0,1530653	0,9483861
3,9032	7,84	0,156051	0,9457889
4,081	7,95	0,1582405	0,9433194
4,269	8,05	0,1602309	0,9407083
4,4468	8,16	0,1624204	0,9382389
4,6242	8,29	0,165008	0,935775
4,8024	8,38	0,1667994	0,9333
4,9902	8,49	0,1689889	0,9306917
5,169	8,55	0,1701831	0,9282083
5,3476	8,62	0,1715764	0,9257278
5,3464	8,68	0,1727707	0,9257444
5,6864	8,68	0,1727707	0,9210222
5,8842	8,79	0,1749602	0,918275
6,0632	8,84	0,1759554	0,9157889
6,2422	8,89	0,1769506	0,9133028
6,4314	8,93	0,1777468	0,910675
6,6206	8,97	0,178543	0,9080472
6,8098	9,01	0,1793392	0,9054194
7,0094	9,03	0,1797373	0,9026472
7,1894	9,03	0,1797373	0,9001472
7,3694	9,03	0,1797373	0,8976472
7,5498	9,01	0,1793392	0,8951417
7,7406	8,97	0,178543	0,8924917
7,9318	8,91	0,1773487	0,8898361
8,1234	8,83	0,1757564	0,887175
8,1258	8,71	0,1733678	0,8871417

Chapitre III : Partie Expérimentale

Suite de tableau (III.6) :

8,5058	8,71	0,1733678	0,8818639
8,7316	8,42	0,1675955	0,8787278
8,9256	8,22	0,1636147	0,8760333
9,1292	8,04	0,1600319	0,8732056
9,323	7,85	0,15625	0,8705139
9,527	7,65	0,1522691	0,8676806
9,7312	7,44	0,1480892	0,8648444
9,9458	7,21	0,1435112	0,8618639
10,1416	6,92	0,1377389	0,8591444
10,3474	6,63	0,1319666	0,8562861
10,5624	6,38	0,1269905	0,8533
10,7878	6,11	0,1216162	0,8501694
11,0046	5,77	0,1148487	0,8471583
11,222	5,4	0,1074841	0,8441389
11,2294	5,03	0,1001194	0,8440361
11,6694	5,03	0,1001194	0,837925
12,1568	2,16	0,0429936	0,8311556
12,2776	0,12	0,0023885	0,8294778
12,298	0,1	0,0019905	0,8291944
12,2976	0,12	0,0023885	0,8292
12,2974	0,13	0,0025876	0,8292028
12,2776	0,12	0,0023885	0,8294778
12,2574	0,13	0,0025876	0,8297583
12,2372	0,14	0,0027866	0,8300389
12,227	0,15	0,0029857	0,8301806
12,2062	0,19	0,0037819	0,8304694
12,206	0,2	0,0039809	0,8304722

Chapitre III : Partie Expérimentale

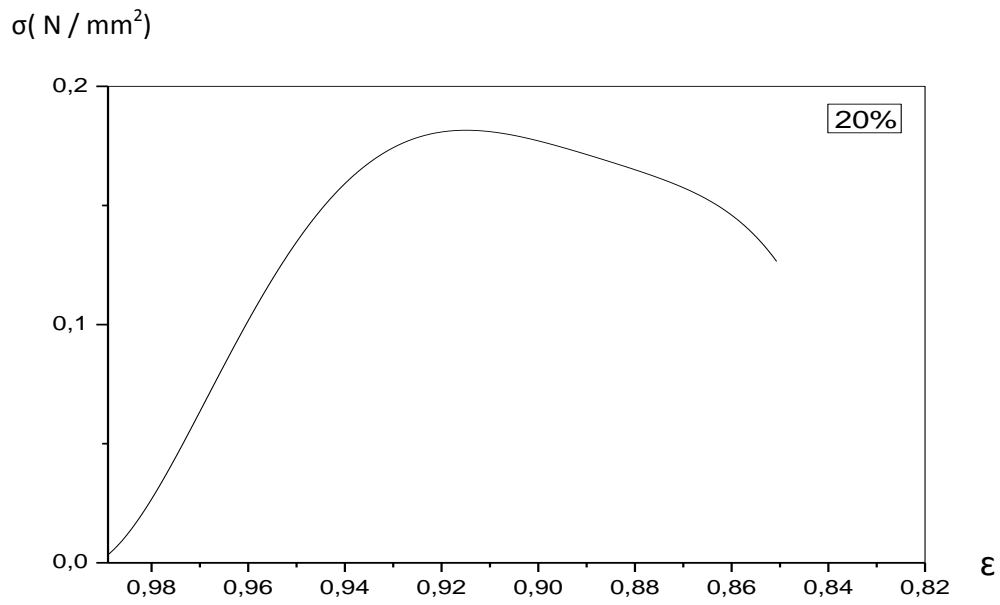


Figure III.11 Diagramme de traction pour éprouvette compression 20 %.

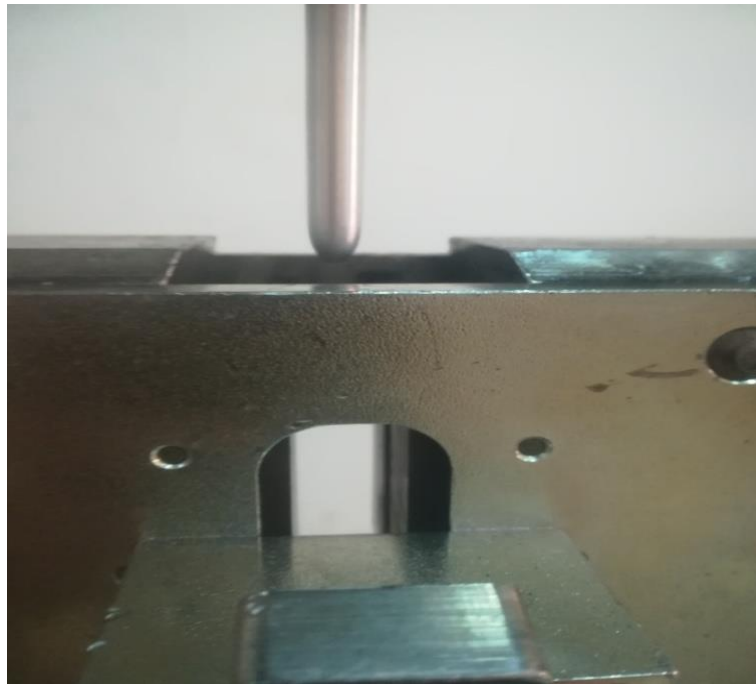


Figure III12 : Exemple de rupture d'une éprouvette réelle à 20% de compressions.

Chapitre III : Partie Expérimentale

III-5-Observations microscopiques :

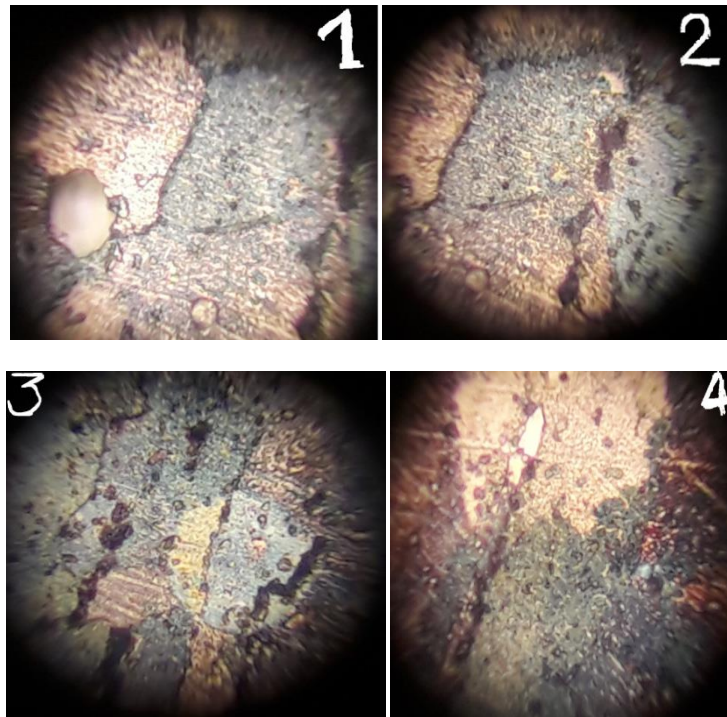


Figure III. 13 : Observation optique 100.

III-5-1-Courbes Contrainte Déformation (5%, 10%, 15%, 20%) :

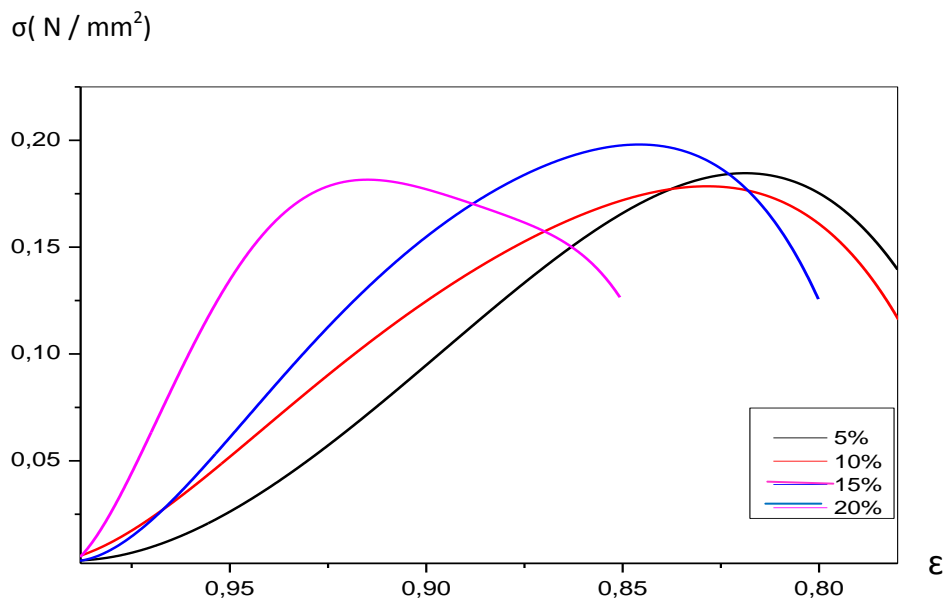


Figure III.14 : Courbe représente la variation de traction. $f(\sigma) = \epsilon$.

Chapitre III : Partie Expérimentale

III-6- Interprétation des résultats :

III-6-1-Résultats obtenus :

Tableau III.7: Variation R_e par rapport ε .

compression %	R_e	ε	Photo microscope
5	0,85	0,16	4
10	0,87	0,15	1
15	0,9	0,14	2
20	0,95	0,13	3

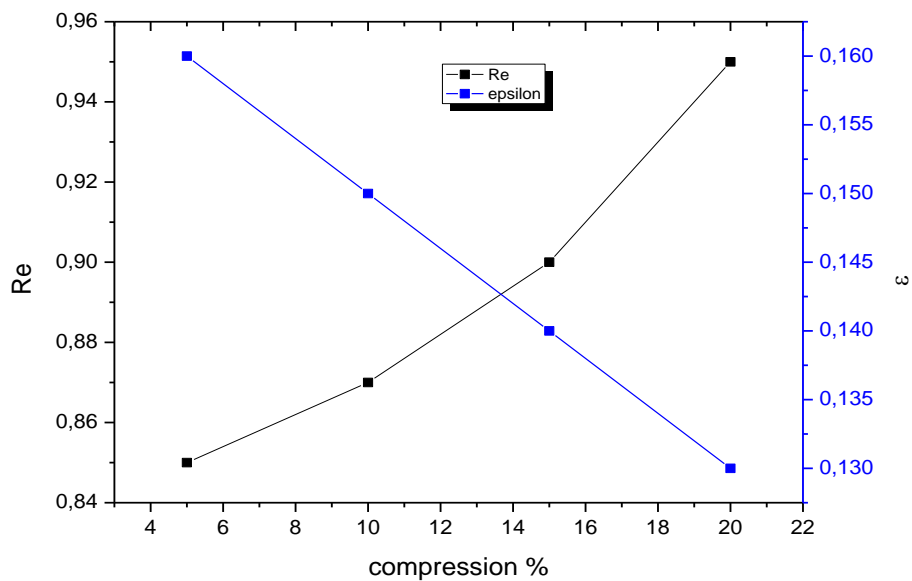


Figure III.15 : Variation R_e en fonction de ε .

Chapitre III : Partie Expérimentale

Conclusion :

D'après les essais on obtient des courbes $f(\sigma) = \varepsilon$ avec la variation de la déformation plastique à différents taux (5 %, 10 %, 15 %, 20 %).

L'écroutissage de l'aluminium a pour effet d'augmenter sa dureté, résistance mécanique, limite d'élasticité, charge à rupture, mais en contrepartie, de diminuer sa plasticité 'sou allongement à la rupture A% son aptitude à la déformation.

Conclusion générale

Conclusion général

Suite au développement spectaculaire de l'aluminium depuis sa naissance en tant que premier métal non ferreux, et reposent bien évidemment sur les propriétés « léger, tenace, résistance, à la corrosion, conducteur de chaleur électricité » les alliage d'aluminium se prêtent également à tous les processus de transformation (laminage, matriçage, moulage, ceci explique qu'il soient aujourd'hui utilisés dans la plus part des grands marchés industrielles.

Pour l'ensemble des domaines d'application, l'aluminium est présenté par toute une gamme d'alliage dont les propriété ont été spécialement adaptées aux besoins des utilisation par des traitements thermique ou thermomécaniques.

L'écrouissages de aluminium a pour effet d'augments sa dureté, résistance mécanique, limite d'élasticité, charge à rupture, mais en contre partie, de diminuer sa plasticité "sou allongement à la rupture A% son aptitude a la déformation.

L'aluminium et ses alliage a l'état écroui sont très utilisés dans de nombreuses application industrielles lorsque l'on recherche de bonne propriété mécanique et lorsque l'on n'est pas gêné technologiquement par la relative plasticité de ses état

Reference bibliographique:

- [1] L.F.Mondolfo, Aluminium Alloys, structures and proprieties , Butterworth ,1st Edition , London 1976.
- [2] A. Hadouche. Mémoire de mastère. Université de Beskra (2014)
- [3] J.Philibert ,A.vignes ,YBréchet ,P.Combrade ,Métallurgie du matériaux au matériaux . Ed.Masson ,1998
- [4]. The Aluminum Association, 1525WilsonBoulevard,Arlington VA 2220 www.aluminum.org. Revised: April 2006.,
- [5].W.F.Miao,D.E.Laughlin,Met.Mater.Trans,31(A)(2000)3613.
- 71
- [6] Elena DIN-STIRBU, thèse de doctorat Université de Pitesti Roumanie. (2005)
- [7] C.Vargel, corrosion de l'aluminium, paris p501 (1999)
- [8] J.E. Hatch, Metals Park, p319,(1984).
- [9] W.S.Miller, L.Zhuang, Materials science , A280, p 37-49 (2000).
- [10] Though. G. Thompson, p192-201(1997)
- [11] J.P Baïllon, J.M.Dorlot, troisième édition, Montréal l école Polytechnique
- [12]. F. Serradj, mémoire de Magister, Université de Constantine, Algérie (2005).
- [13]. C.Varel, Le comportement de l'aluminium et de ses alliages, Ed. Dunod technique,Paris (2004)25.
- [14] .J.Lanthyony,l'aluminiumetlesalliageslégers.Ed.PressesUniversitairesde France,Paris (1984)55.
- [15] .D. M. Laughlin and W. F. Miao, Journal of Materials Science Letters, 21 (2001) 320-329. [14]. I. R. Harris, P. C. Varley, Factors influencing drittleness in AlMgSi alloys, J. I. Metals 82
- [16] J. Zhang, Z. Fan, Y. Q. Wang and B. L. Zhou, materials sciences and technology 17 p 494-497(2001).
- [17] ASM handbook; Nonferrous alloys and special purpose materials, 2 (1992).

- [18] R.H. Oskouei, R.N. Ibrahim (2010) "The effect of typical flight temperatures on the fatigue behavior of Al 7075-T6 clamped plates".
- [19] R. Fortunier, "Comportement Mécanique des Matériaux", 1985.
- [20] Ali Debih, contribution à l'étude de la fatigue des alliages légers : these doctorale, 2018
UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF 1
- [20] G.R. Irwin, "Analysis of stresses and strains near the end of crack traversing a plate", J. of Appl. Mech. Transactions, pp.361-364, 1957.
- [21] M. Bellet, J. L. Chernot, L. Fourment, E. Massoni, P. Montmitonnet. "Eléments finis et mise en forme des métaux". Séminaire de plasticité, Sophia Antipolis, 26-30 Septembre 1994.
- [22] Nelson.D.V., Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP 776, American Society for Testing and Materials.
- [23] Stephens.R.I., Fatemi.A., Stephens.R.R., Fuchs.H.O. "Metal Fatigue in Engineering" John Wiley & Sons, New York, 2001.
- [24] FTI, Extending the Fatigue Life of Metal Structures, Materials Testing, Fatigue Technology Inc., 150 Andover Park West, Seattle, Washington, 1991
- [25] Hsu.Y.C. and Forman.R.G., "Elastic-Plastic Analysis of an Infinite Sheet Having a Circular Hole under Pressure," Journal of Applied Mechanics
- [26] Rich.D.L. and Impellizzeri.L.F., "Fatigue Analysis of Cold-Worked and Interference Fit Fastener Holes," Cyclic Stress-Strain and Plastic Deformation Aspects of Fatigue Crack Growth
- [27] Chen. P.C.T., "A New Method of Predicting Residual Stresses in Autofrettaged Gun Barrels," Technical Report ARCCB-TR-86012, US Army Armament Research and Development Center, Watervliet, 1986
- [28] Zhu.W. and Zha.Z., "An Elastic-Plastic Analysis of Autofrettaged Thick-Walled Cylinders," Acta Mech. Sinica
- [29] Poussard.C., Pavier.M.J. and Smith.D.J., "Analytical and Finite Element Predictions of Residual Stresses in Cold Worked Fastener Holes," Journal of Strain Analysis, Vol. 30, No. 4, 1995.
- [30] Dj. Baouche, "Validation numériques des paramètres de fissuration en élastoplastique". Thèse de doctorat 1998 Université Clermont Ferrand..

- [31] A. Wahab, G.R. Rohrsheim, J.H. Park. "Experimental study on the influence of overload induced residual stress field on fatigue crack growth in aluminum alloy". *Journal of Materials Processing Technology*. 153-154: 945-951, 2004.
- [32] S. Suresh, R.O. Ritchie, "On the influence of fatigue underload on cyclic crack growth at low stress intensities". *Materials Sciences and Engineering*, 51: 61-69, 1981.
- [33] Underwood, J.H., Pook, L.P. and Sharples, J.K., *Flaw Growth and Fracture*, ASTM STP 631, American Society for Testing and Materials, 1977, pp. 402-415.
- [34] M.D. Halliday, J.Z. Zhang, P. Poole and P. Bowen. "In situ SEM observations of the contrasting effects of an overload on small fatigue crack growth at two different load ratios in 2024-T351 aluminium alloy". *Int. J. Fatigue* Vol. 19, No. 4, pp. 273-282, 1997
- [35] Chandawanich, N. and Sharpe, Jr., W.N., "An Experimental Study of Fatigue Crack Initiation and Growth from Coldworked Holes," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 11, 1979, pp. 609-620.
- [36] Fukuda, S. and Tsuruta, Y. *Transactions of JWRI*, Vol. 7, 1978, pp.67.
- [37] j.barralis, G.maeder , *précis de mutallurgie* , NATHAN 1990
- [38] (site internet (mots clés : alliage d'aluminium série 6000)

