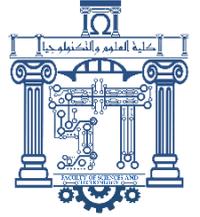




الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Republique Algerienne Democratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de génie mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **Master Académique**

En : **Filière**

Spécialité : Génie des matériaux

Par : - Loucif rawya

- Ben aoua nour el houda

Sujet

Comportement mécanique des alliages d'aluminium

Présenté et soutenu publiquement, le 12/06/2022, devant le jury composé de :

M/Bouزيد Laouadi

MCA

Président

M/Med Taher Hannachi

Pr

Rapporteur

M/Abdallah Diha

MCB

Examineur 1

Promotion : 2021/2022

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier le bon dieu le tout puissant de n'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Je tiens à remercier tous ceux et celle ont contribué à finaliser ce modeste travail.

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de mémoire le professeur Mohamed Tahar Hannachi, pour sa patience, sa disponibilité et ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

J'exprime ma gratitude aux membres de jurés qui ont accepté d'évaluer ce modeste travail de fin d'étude.

Enfin, je remercie également toute l'équipe pédagogique département de génie mécanique A tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Merci.

Dédicace

Du profond de mon cœur, je dédie cet effort à tous qui me sont cher.

A l'âme mon père Hassnaoui, qu'ALLA ait pitié de son âme et l'amène dans ces spatiaux paradis, c'est pour lui que j'ai tout fait et finalement j'ai tenu ma promesse. J'aurais aimé que tu sois à mes côtés ce jour Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour.

A la source de ma force ma mère fatiha, aucune dédicace ne saurait exprimer mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulé, le fruit de vos innombrables sacrifices. Puisse ALLAH, le très haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.

A l'ange pur qui a contribué à mon éducation...tante : zaloukh

A qui était mon modèle...mes sœurs : Ghawaich, Abir, zohra, Lina et Bassma (houdayda)

A qui puis je puiser ma force, mes frère :Yazid, Mohamed, et Wail.

À la source du bonheur de la joie :Sajou, Djoud, Taha, et baymouna .

A mes beaux frère : Saber, Midou, Alla, merci beaucoup pour tout ce que vous m'avez apporté pendant cette période que dieu garde vous

A mes amis les plus chères qui étaient avec moi : Joujou, Samsouma, Houria, manel je vous aime

A mon chère amis : Taha merci beaucoup d'être à mes cotés

A mon adorable binome ma sœur et ma coupine mon amis intime : nanoua

A toute la promo de génie mécanique

A toute la famille Loucif et Hamel, tous mes amis et toutes les personnes que je n'ai pas cité.

Parouya Loucif

Dédicace

*Au nom de dieu clément et miséricordieux et en termes d'amour et de fidélité,
je dédie ce présent mémoire :*

A ma très chère mere : Fadila

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point remercier comme il se doit,
Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes cotés
a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.*

A mon très cher frère : saif Eddine

*Ta as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce
travail traduit ma gratitude et mon affection*

A ma très chère sœur : Malak

Sans oublier les petits mignons : Hamssa, Omran (bezdine)

*A mon adorable binome ma sœur et ma coupine mon amis intime : rawya
(blaw)*

À tous les membres de ma famille

A mes meilleures amies

A tous les camarades de notre section

Nour El Houdda Ben Aoua

ملخص

في هاته الدراسة حاولنا تقديم التعاريف الوصفية المناسبة، والترتيب العام لمزيج معدن الألومنيوم، وبعدها قمنا بوصف واحتساب العناصر والخصائص الميكانيكية لهذا المعدن، نذكر منها (تجربة الشد، والصلادة وتجربة الصدمة). دون أن ننسى الخصائص التعدينية، والمتمثلة في الطريقة التقليدية لحساب وتحديد أبعاد المكون الدقيق للمعدن.

الكلمات المفتاحية: الخصائص التعدينية ، سبائك الألومنيوم ، الاختبارات

Résumé

Dans cette étude on a tenté de décrire et de classer les alliages d'aluminium en générale, puis on a essayé de présenter et de déterminer les propriétés mécaniques tout en faisant les calculs pour un nombre d'essais traditionnels (essais de traction, essais de dureté et essais de résilience), sans oublier les caractéristiques métallurgiques et la méthode conventionnelle de comptage et la détermination des tailles moyennes des grains.

Les mots clé : **caractéristiques métallurgiques, alliages d'aluminium, essais**

Abstract

In this study we tried to describe and classify aluminum alloys in general, then we tried to present and determine the mechanical properties while making the calculations for a number of traditional tests (tensile tests, hardness and impact tests), without forgetting the metallurgical characteristics and the conventional method of counting and determining the average grain sizes.

Key words: **metallurgical characteristics, aluminum alloys, tests**

Sommaire

Remerciements.....	i
Dédicace.....	ii
Résumé.....	iv
Sommaire.....	v
Listes des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	x
Liste des symboles.....	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE I : Notions générales sur les alliages d'aluminium	
I. Introduction.....	3
I.1.Histoire d'aluminium.....	3
I.2.Obtention de l'aluminium.....	4
I.2.1. La bauxite.....	4
I.2.2. L'alumine.....	4
I.2.3. L'aluminium.....	4
I.3. Principaux stades de la fabrication de l'aluminium.....	5
I.4. L'aluminium et ses alliages.....	6
I.4.1. Influence des éléments d'addition.....	7
I.4.2. Effet de taille.....	11
I.4.3. L'effet chimique.....	12
I.4.4. L'effet du regroupement.....	12
I.5. Classification des alliages d'aluminium.....	13
I.5.1. Mise en forme par corroyage.....	13
I.5.2. mise en forme par fonderie.....	14
I.6. Désignation des alliages d'aluminium.....	15
I.6.1. Désignation des alliages corroyés.....	15
I.6.1.1. Désignation numérique (Norme européenne EN 485-2) :.....	15
I.6.2. Désignation des alliages de moulage.....	16
I.6.2.1. Désignation numérique (Norme européenne).....	16
I.6.2.2. Désignation symbolique (Norme européenne).....	17
I.7.Les domaines d'applications de l'aluminium et ses alliages.....	19
I.8. Corrosion des alliages d'aluminium.....	21

I.8.1. Corrosion uniforme ou généralisée	21
I.8.2. Corrosion localisée	22
I.9. Les propriétés mécaniques	23
I.10. Conclusion du chapitre I	25
CHAPITRE II : Comportement mécanique des alliages d'aluminium	
II.1 Introduction	27
II.2. Comportement élastique linéaire	27
II.3. Comportement plastique.....	28
II.3.1. Déformation plastique homogène	29
II.3.2. Déformation plastique	29
II.4. Striction et la rupture	29
II.4.1. Allongement à la rupture pour les alliages d'aluminium	30
II.5. Essai de traction	30
II.5.1 Intérêt et déroulement de l'essai.....	30
II.6. Propriétés de traction	32
II.7. Phénomène d'écrouissage	33
II.7.1. Mécanisme et effet de l'écrouissage	33
II.7.2. Influence de l'écrouissage sur les caractéristiques mécaniques	34
II.7.3. Courbe et coefficient d'écrouissage	34
II.8. Essais dureté.....	37
II.8.1. Domaines de la dureté	37
II. 8.2. Essais sclérométriques ou par rayures.....	38
II.8.3 Les essais par rebondissement.....	39
II .8.4. Les essais par indentation.....	39
II.8.4.1 Essai de dureté Brinell	40
II.8.4.2. Essai de dureté Rockwell.....	41
II.8.4.3. L'essai de dureté Vickers	42
II.9. Essais de résilience	43
II.9.1. Principe de l'essai.....	43
II.9.2. Principe de CHARPY.....	44
II.9.3. Normes utilisées.....	45
II.10. Traitements thermiques des alliages d'aluminium	45
II.10.1. Durcissement structural.....	46
II.10.1.1. La mise en solution.....	46

II.10.1.2. La trempe	47
II.10.1.3. Vieillissement thermique.....	48
II.10.2. Durcissement par écrouissage	49
II.10.3. Durcissement par addition.....	50
II.11. Conclusion du chapitre II.....	50
CHAPITRE III : Partie Calculs	
III.1. Introduction	52
III.2. L'alliage Aluminium-Magnésium - Silicium série 6000.....	52
III.2.1. L'alliage 6005 A	53
III.2.1.1. L'alliage d'aluminium 6005-T5.....	53
III.2.1.2. L'alliage d'aluminium 6005-T6.....	53
III.2.1.3. L'aluminium 6005-T5 contre l'aluminium 6005-T6	54
III.3. Composition chimique.....	54
III.4. Utilisation d'aluminium 6005 A.....	54
III.5. Equivalences Internationales d'alliage 6005 A	55
III.6. Résultat des calculs sur l'alliage AA 6005	55
III.6.1. Résultat d'essai de traction	55
III.6.1.2. Donnée d'alliage 6005 A.....	57
III.6.2. Résultat d'essai de dureté.....	58
III.6.2.1. Donnée d'essai de dureté	58
III.6.3. Résultat d'essais de résilience.....	59
III.6.3.1. Donnée d'essai résilience	59
III.7. Méthode comptage de nombre des grains à partir d'un alliage 6005 A	60
III.8. Méthode par comptage	61
III.8.1. Comptage du nombre grains	61
III.9. Initiation à la simulation numérique par la méthode des éléments finis avec FreeCAD	63
III.9.1. A propos de FreeCAD	63
III.9.1.1. Resultat du simulation d'éprouvette de traction.....	64
III.10. Analyse et discussion des resultats	77
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	80
Références	82

Listes des figures

Figure I.1 : Les stades d'élaboration de l'aluminium	5
Figure I.2 : Les principaux éléments d'addition pour les alliages d'aluminium	7
Figure I.3 : Solubilité des éléments métalliques dans l'aluminium en fonction de la différence des rayons de Goldschmidt	12
Figure I.4 : Désignation des aluminums et alliages – produits corroyés NF EN 573	16
Figure I.5 . Désignation des aluminums et alliages pour la fonderie NF EN 1780	18
Figure I.6 : Répartition de la consommation d'aluminium	21
Figure I.7 : Perte de poids de l'alliage 3004 H 14 en fonction du PH milieu après une semaine dans l'eau distillée.	22
Figure II.1 : la limite d'élasticité à 0,2 % ($R_{e0,2}$).....	27
Figure II.2 : Courbe de traction (Fe-0,15 % C) présentant une discontinuité à la limite d'élasticité.....	28
Figure II.3 : Eprouvette de traction : a) cylindrique, b) prismatique.....	31
Figure II. 4 : Courbes rationnelles de traction.....	32
Figure II.5 : Représentation d'une courbe de traction (matériau ductile).....	33
Figure II. 6 : Variations des caractéristiques mécaniques en fonction de l'érouissage.....	34
Figure II.7 : Phénomène d'érouissage sur une courbe rationnelle de traction.....	35
Figure II.8 : Courbe rationnelle de traction en coordonnées logarithmiques	36
Figure II.9 : Définitions des différents domaines de dureté.	37
Figure II.10 : Schématisation de l'essai de glissement- rayure (pointe conique).....	39
Figure II.11 : Principe de dureté brinell.....	40
Figure II.12 : Principe de mesure de la dureté Rockwell : a) échelle HRC, b) échelle HRB..	41
Figure II.13 : Principe de dureté Vickers.	42
Figure II.14 : Schématisation de l'essai de résilience.....	44
Figure II.15 : Schématisation de l'essai de résilience du Charpy.....	45
Figure II.16 : Diagramme d'équilibre hypo- eutectique d'un alliage à durcissement structural de composition C_0	46
Figure III.1 : série 6000 (alliage d'aluminium).....	52
Figure III.2 : Éprouvette normalisées de traction.....	56
Figure III.3 : Essai de traction.....	56
Figure III.4 : Courbe rationnelle de traction de l'alliage AA 6005 avant déformation.....	57
Figure III.5 : Courbe rationnelle de traction de l'alliage AA 6005 après déformation.....	58
Figure III.6 : Histogramme d'essai de dureté Avant et Après déformation.....	59

Figure III.7: Courbe rationnelle d'essai de resilience.....	60
Figure III.8 : Microstructure obtenue par M.O de l'alliage étudié à l'état de réception.	62
Figure III.9: éprouvette de traction et son maillage.	64
Figure III.10: Déplacement à amplitude de 20%.....	65
Figure III.11: Déplacement à amplitude de 30%.....	65
Figure III.12: Déformation maximale de l'éprouvette.	66
Figure III.13 : Déformation de l'éprouvette suivant l'axe XX.....	66
Figure III.14 : Déformation de l'éprouvette suivant l'axe YY.....	67
Figure III.15: Déformation de l'éprouvette suivant l'axe ZZ.....	67
Figure III.16 : Contrainte de Von Mises à 20 % de déformation.	68
Figure III.17 : Contrainte maximale de Von Mises de 20% de déformation.	68
Figure III.18: Contrainte de Von Mises à 30% de deformation.	69
Figure III.19: Contrainte maximale de 20% de deformation.....	69
Figure III.20: Contrainte suivant l'axe XX (σ_{XX}).....	70
Figure III.21: Contrainte suivant l'axe YY (σ_{YY}).....	70
Figure III.22 : Contrainte suivant l'axe ZZ σ_{ZZ}	71
Figure III.23 : Conception et maillage de $\frac{1}{2}$ d'une éprouvette rectangulaire de traction.	71
Figure III.24: Déplacement suivant l'axe X.	72
Figure III.25 : Déplacement suivant l'axe de chargement Y.....	72
Figure III.26 : Déplacement suivant l'axe Z.....	73
Figure III.27 : Déformation suivant l'axe X.....	73
Figure III.28 : Déformation suivant l'axe Y.....	74
Figure III.29 : Déformation suivant l'axe Z.	74
Figure III.30 : Contrainte maximale.....	75
Figure III.31 : Contrainte suivant l'axe X.	75
Figure III.32 : Contrainte suivant l'axe Y.	76
Figure III.33 : Contrainte suivant l'axe Z.....	76
Figure III.34 : Contrainte de Von Mises.....	77

Liste des tableaux

Tableau I.1: Simplifié des aptitudes technologiques et d'usage	6
Tableau.I.2: Familles d'alliages d'aluminium et type de durcissement associé	13
Tableau I.3 : Les séries d'alliage de fonderie selon l'Aluminium Association	14
Tableau I.4: Désignations et teneur en masse des alliages de corroyage.....	15
Tableau I.5: Indique les groupes de l'alliage d'aluminium.	17
Tableau I.6: Comparaison entre les types d'alliage d'aluminium.	18
Tableau III.1 : Composition chimique d'alliage 6005 A.....	54
Tableau III.2 : équivalence de la nuance d'alliage d'aluminium 6005 AA.....	55
Tableau III.3 : Déterminés les paramètres et les propriétés mécaniques de l'alliage AA 6005.	57
Tableau III.4 : paramètre de la dureté BRINELL d'alliage AA 6005.....	58
Tableau.III.5 : Kv et Kcv moyenne de la résilience.	59
Tableau III.6 : Nombre des grains et diamètre moyen de la microstructure d'alliage 6005 A.	62
Tableau III.7 : Résultat obtenue sur l'alliage 6005 A.	62
Tableau III.8 : Données mécaniques et géotechniques des éprouvettes de traction.....	64

Liste des symboles

Re	La limite élastique
Rm	La résistance à la traction
S_0	La section initiale de l'éprouvette en (mm ²)
S_f	La section finale de l'éprouvette en (mm ²)
σ	La contrainte nominale
σ_v	La contrainte vraie
ε_v	La déformation vraie
ε	La déformation nominale
ε_r	Déformation relative
Δl	L'allongement
k	Constantes du matériau
n	Le coefficient d'érouissage
D	Le diamètre
d	le diamètre de l'empreinte
F_0	charge initiale
F	La force
HB	La dureté Brinell
HR	La dureté Rockwell
HV	La dureté Vickers
K	Une grande résistance
M	Masse du mouton-pendule [kg]
G	Accélération de la pesanteur
H	Hauteur du mouton-pendule à sa position de départ [m]
h'	Hauteur du mouton-pendule à sa position d'arrivée [m]
W_i	Énergie initiale
W_r	L'effet de l'énergie résiduelle
C_0	Composition
T_0	Température
d_m	Taille moyenne du grain
a	Aire moyenne du grain
m	Nombre de grain par unité d'air
L	Longueur moyenne d'intersection

g	La grosseur moyenne
g	Un grossissement linéaire
S	Surface vrai
K _v , K _{cv}	La résilience
n _T	Nombre de grains dans la circonférence tracée
n ₁	Nombre de grains complètement à l'intérieure.
n ₂	Nombre de grains coupés par circonférence
D	Diamètre moyen de la microstructure

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les alliages légers, l'aluminium, et le magnésium sont largement utilisés dans les applications technologiques et industrielles. Ses importances dans l'économie mondiale résident dans ses propriétés caractéristiques telles que ses faibles densités. Ils sont de deux à quatre fois plus faible que celle des aciers.

L'aluminium et ses alliages présentent une grande variété d'applications grâce à leurs bon compromis (densité, propriétés mécaniques). En plus de la faible densité, les alliages d'aluminium ont une bonne résistance à la corrosion grâce à la couche protectrice naturelle d'oxyde qui se forme spontanément à leurs surfaces, une facilité de mise en forme et une bonne conductivité électrique. Ils sont recyclables avec moindre énergie pour leur refusion. Ainsi qu'ils sont non biodégradables.

Face aux exigences technologiques, les alliages d'aluminium connaissent donc un essor tout particulier, du fait de leurs bonnes propriétés mécaniques, de leur excellente résistance à la corrosion, de leur très bon rapport résistance/masse et de leur prix attractif en comparaison des autres alliages précédemment cités [1].

Notre objectif concerne, les vérifications traditionnelles des propriétés mécaniques des structures métalliques travaillant à grand nombre de cycles se faisaient un nombre d'essais (essais de traction, essais de dureté et essais de résilience, sans oublier les caractéristiques métallurgiques.

Pour cela, ce travail est composé de trois chapitres, résumé comme suit :

Dans le premier chapitre, on présente une étude bibliographique sur les notions des alliages d'aluminium.

Dans le deuxième chapitre, on présente les comportements mécaniques des alliages d'aluminium. Ainsi que les différents essais, qui nous permettent la détermination des propriétés mécaniques avec leurs courbes d'analyse.

Le chapitre trois, est consacré aux étapes de calculs et de détermination des propriétés mécaniques du matériau considéré, ainsi que les paramètres influençant ces caractéristiques mécaniques. Une initiation à la simulation numérique de l'essai de traction à été réalisée avec succès, en mode symétrique.

Chapitre I
Notions générales sur les alliages
d'aluminium

I. Introduction

L'aluminium est l'élément métallique le plus abondant dans la nature, il vient au second rang des métaux les plus employés après l'acier. Il est léger, robuste, facile à usiner, économique et résistant à la corrosion. Il est un métal blanc tirant légèrement sur le bleu, dont on obtient facilement un beau fini poli.

L'aluminium est un élément du troisième groupe de classification de Mendéléiev, dont le nombre atomique est 13, la masse atomique 26.28 et la température de fusion 660°C.

Il se cristallise dans le système cubique à faces centrées, avec un paramètre de maille 0.404 nm. Sa masse volumique est 2.7 kg/dm³, son coefficient de dilatation thermique linéaire est de l'ordre de 23.10⁻⁶, son module de Young de 6600 bar.

L'aluminium industriel contient 0.5% d'impuretés (principalement Fe+Si), mais il peut être obtenu presque pur par raffinage électrolytique (Al > 99.99%) [2].

Ces impuretés ont différents effets sur leurs caractéristiques physique, chimiques et mécaniques. Les propriétés d'aluminium peuvent être améliorées par des traitements thermique et mécanique, ainsi par l'addition des éléments comme le Mg, Si, Mn, etc.... A la température ambiante, l'aluminium forme très vite une couche d'oxyde Al_2O_3 (alumine), épaisse et adhérente, qui protège le métal de les effets, mécaniques et physiques et les attaques chimiques [3].

I.1. Histoire d'aluminium

En 1807, Humphry Davy, après avoir découvert que le sodium et le potassium entraient dans la composition de l'alun, suppose qu'il s'y trouve aussi un autre métal, qu'il baptise « aluminium » (en latin, « alun » se dit *alumen*) [4]. Pierre Berthier découvre dans une mine près des Baux-de-Provence en 1821 un minerai contenant plus de 50 % d'oxyde d'aluminium. Ce minerai sera appelé bauxite.

On attribue généralement la découverte et l'isolement de l'aluminium à Friedrich Wöhler en 1827. Toutefois, deux ans plus tôt, le chimiste et physicien danois Hans Christian Ørsted avait réussi à produire une forme impure du métal. Wöhler fut le premier à mettre en évidence les propriétés chimiques et physiques de l'aluminium, dont la plus notable est la légèreté.

Le chimiste français Henri Sainte-Claire Deville améliore en 1846 la méthode de Wöhler en réduisant le minerai par le sodium. Il publie ses recherches dans un livre en 1856. Cette méthode est utilisée à travers toute l'Europe pour la fabrication de l'aluminium, mais elle rest extrêmement coûteuse. Le métal est d'ailleurs utilisé pour fabriquer des bijoux, dont la valeur sera

évidemment réduite à néant quelques décennies plus tard [5].

- 1855: Les nouveaux métaux sont exposés à l'exposition universelle de Paris. La société Pechiney est créée en France.
- Le premier site industriel producteur d'aluminium au monde s'installe à Salindres dans le Gard, et commence son activité dès 1860.
- 1876: William Frishmuth réalise la première coulée d'aluminium. En 1884, il réalise la coiffe du Washington Monument en ce métal.
- 1886: de manière indépendante, Paul Héroult et Charles Martin Hall découvrent une nouvelle méthode de production de l'aluminium en remarquant qu'il est possible de dissoudre l'alumine et de décomposer le mélange par électrolyse (procédé Héroult-Hall) pour donner le métal brut en fusion. Pour cette découverte, Hall obtient un brevet (400655) la même année. Ce procédé permet d'obtenir de l'aluminium de manière relativement économique. La méthode mise au point par Héroult et Hall est toujours utilisée aujourd'hui.
- 1887: Karl Josef Bayer décrit une méthode connue sous le nom de *procédé Bayer* pour obtenir de l'alumine à partir de la bauxite. Cette découverte permet de faire entrer l'aluminium dans l'ère de la production de masse.
- 1888: les premières sociétés de production d'aluminium sont fondées en Suisse, France et aux États-Unis [6].

I.2. Obtention de l'aluminium

I.2.1. La bauxite

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre, le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%) constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal.

I.2.2. L'alumine

L'alumine est extraite de la bauxite par le procédé **Bayer**: la bauxite est broyée puis attaquée à chaud par la soude. La liqueur obtenue, après séparation des oxydes de fer et de silicium, est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine.

I.2.3. L'aluminium

L'aluminium est obtenu à partir de l'alumine par électrolyse dans une cuve comportant un

garnissage en carbone (cathode). L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve. Il est d'une structure cubique à face centrée très malleable [7].

I.3. Principaux stades de la fabrication de l'aluminium

Selon le Procédé Bayer, la méthode d'élaboration de l'aluminium est la suivante, Figure.I.1.

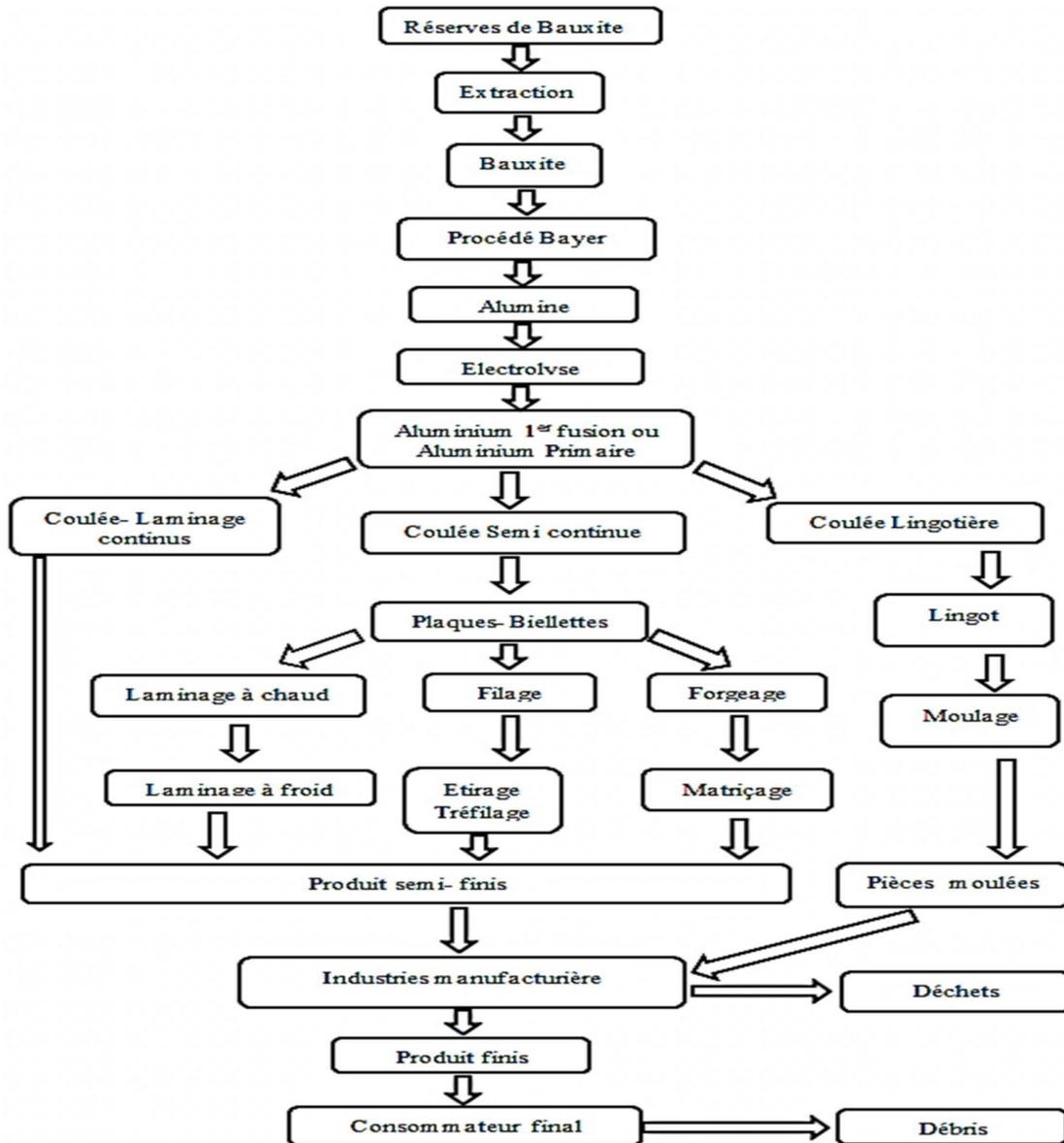


Figure I.1 : Les stades d'élaboration de l'aluminium [8].

I.4. L'aluminium et ses alliages

Pour une solubilité qui dépasse le 0.5% dans l'aluminium à l'état solide, seulement neuf éléments sont capables de s'allier à l'aluminium, ces éléments sont: l'argent, le cuivre, le gallium, le lithium, le germanium, le manganèse, le magnésium, le silicium et le zinc. Pour diverses raisons de coût (l'argent), de disponibilité (le gallium, le germanium) et de difficultés de mise en œuvre (le lithium), la métallurgie de l'aluminium est fondée, depuis son début, sur uniquement cinq éléments d'alliage qui sont:

- ❖ Le cuivre.
- ❖ Le manganèse.
- ❖ Le magnésium.
- ❖ Le silicium.
- ❖ Le zinc.

Ces cinq éléments sont à la base des huit familles d'alliages d'aluminium. L'action d'un élément sur les propriétés de l'aluminium dépend bien évidemment de sa nature et de la quantité ajoutée. Mais, pour certains d'entre eux, leur influence sur les propriétés de l'alliage peut aussi dépendre de la présence d'un, ou plusieurs autres éléments, parce qu'ils peuvent former des composés intermétalliques entre eux [9].

Tableau I.1: Simplifié des aptitudes technologiques et d'usage [8].

Alliage	Résistance Mécanique	Usinabilité	Soudabilité	Malléabilité à froid	Malléabilité à chaud	Résistance à la corrosion			Aptitude à l'anodisation	
						Normale	Marine	Coulabilité	De profondeur	De décoration
Al	1	1	4	4	4	4	4	1	4	4
Al Cu	4	4	0	1	3	1	0	2	2	2
Al Si	2	1	3	-	2	4	3	4	4	1
Al Mg	2	2	4	3	1	4	4	1	4	3
Al Mn	2	2	4	3	3	4	3	1	4	3
Al Mg Si	3	3	3	2	4	4	3	4	4	4
Al Zn Mg	3	3	3	2	3	3	2	2	3	2
Al Zn Mg Cu	4	4	0	1	2	1	0	-	2	2

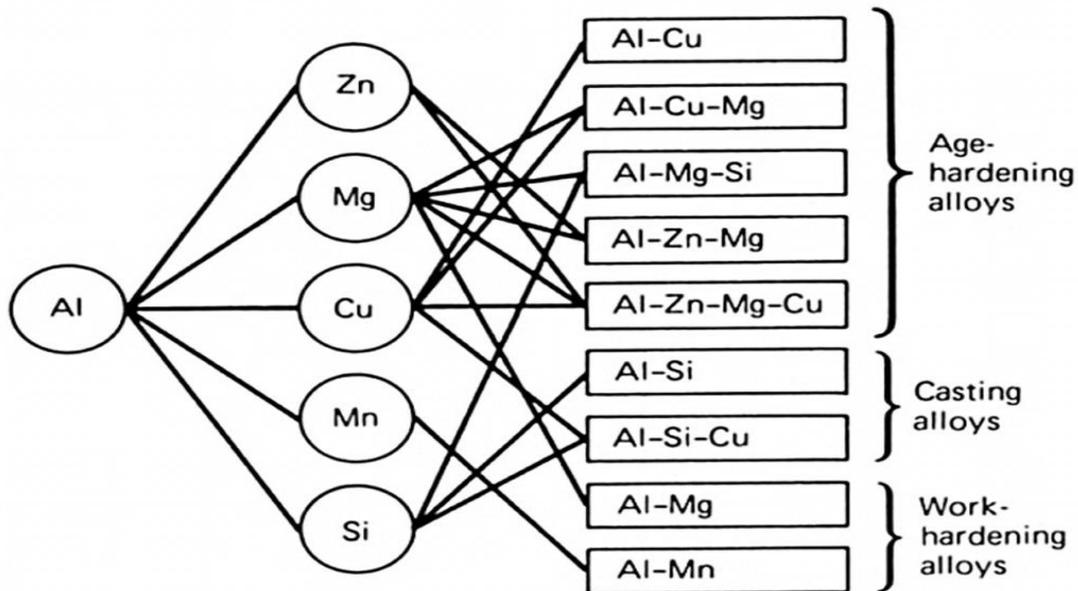


Figure I.2 : Les principaux éléments d'addition pour les alliages d'aluminium [9].

Certains éléments sont ajoutés en quantité plus faible (moins de 1%) dans quelques alliages d'aluminium pour modifier les propriétés particulières, mais sans changer le groupe d'appartenance, appelés éléments d'additions secondaires, ces éléments sont: le Fer, le Chrome, le Zirconium, le Nickel, le Strontium, le Cobalt, le Plomb, le Bismuth, le Cadmium, le Titane, l'Antimoine, l'Etain, le Béryllium, et le Bore [10].

I.4.1. Influence des éléments d'addition

L'aluminium non allié ayant des propriétés très réduites, il est possible d'améliorer ses propriétés en ajoutant des éléments qui modifient plus ou moins profondément la microstructure [11].

Les atomes des éléments d'addition peuvent :

- Être en solution solide de substitution : ils prennent la place des atomes d'aluminium dans le réseau. Leur taille est plus petite ou plus grande que l'atome d'aluminium ce qui perturbe le réseau qui devient plus difficile à déformer.
- Former des précipités hors solution solide : cohérents, semi-cohérents, ou incohérents avec la matrice d'aluminium. L'effet provoqué est le même sur la difficulté de déformation du réseau.

Le durcissement de l'aluminium sera ainsi d'autant plus conséquent que le nombre et l'importance de ces perturbations seront plus grands : la nature, la teneur, la répartition de ces éléments d'addition sont primordiales à cet égard.

Les éléments d'addition sont peu nombreux : cuivre, silicium, magnésium, manganèse, titane et des associations magnésium + silicium, zinc + magnésium, zinc + magnésium + cuivre.

A- le détail de la majorité des éléments pouvant servir dans les alliages d'aluminium

❖ **Béryllium** : À haute température, cet élément améliore la fluidité des alliages, raffine les grains et augmente les propriétés mécaniques. De même, il contribue à réduire l'oxydation et la retient le sodium, un agent modifiant. Comme l'arsenic, il est à éviter dans les alliages en contact avec la nourriture, car c'est un poison et il provoque des allergies.

❖ **Bore** : lorsqu'il est combiné à d'autres métaux, il forme des borures comme le borure de titane (TiB_2). Ce composé forme des sites stables de germination qui interagissent avec les phases de l'affineur de grain (T_1Al_3) dans l'aluminium en fusion. Il contribue également à l'accroissement de la conductivité électrique par précipitation de d'autres éléments (exemple : Va, Ti, Cr, etc.).

❖ **Chrome** : Cet élément réduit la susceptibilité des alliages Al-Zn-Mg à la corrosion sous tension. Plutôt vu comme une impureté, son effet est remarquable au niveau de la résistivité électrique. Dans certains cas, il sert à contrôler la structure des grains.

❖ **Cuivre** : Cet élément forme avec l'aluminium le composé Al_2Cu servant au durcissement des alliages. De plus, il contribue à l'augmentation de la résistance mécanique, à la réduction du retrait lors de la coulée et à l'amélioration de l'usinabilité. Toutefois, il diminue généralement la résistance à la corrosion. Les alliages contenant de 4 à 6 % de cuivre sont ceux qui répondent le plus fortement aux traitements thermiques.

❖ **Étain** : L'étain, en petite quantité (moins de 1 %), améliore l'usinabilité des alliages d'aluminium et facilite le vieillissement artificiel, d'où émane l'augmentation de la résistance mécanique et à la corrosion. Cependant, en quantité plus importante il favorise la fissuration à

chaud.

❖ **Fer** : Le fer accroît la résistance au craquage à chaud et réduit la tendance de l'alliage à se coller ou à se souder aux parois du moule. Or, l'augmentation de la proportion de fer est normalement accompagnée d'une réduction de la ductilité. Le fer réagit pour former plusieurs phases insolubles dans les alliages d'aluminium, les plus communes étant le **FeAl₃**, **FeMnAl** et **AlFeSi**. Ces phases insolubles ou intermétalliques sont responsables de l'amélioration de la résistance, spécialement à température élevée, même s'elles donnent des structures grossières et fragiles. Comme le pourcentage de phases insolubles croît avec l'augmentation de la proportion de fer, les caractéristiques de l'écoulement du métal liquide sont affectées. On doit alors tenir compte de ce facteur lors de la procédure de mise en forme. Le fer participe également à la formation de plaquettes ségréguées avec le manganèse, le chrome et d'autres éléments.

❖ **Hydrogène** : Dû à sa grande solubilité à l'état liquide, l'hydrogène a tendance à former des pores au cours de la solidification, ce qui résulte en une baisse des propriétés mécaniques.

❖ **Magnésium** : Le magnésium est la base du développement de la résistance et de la dureté lors des traitements thermiques des alliages Al-Si. Il est en général utilisé dans les alliages Al-Si plus complexes qui contiennent du cuivre, du nickel et d'autres éléments dont le but est également de durcir l'alliage. La phase de Mg₂Si qui durcit l'alliage montre une solubilité limite de 0.70 % de magnésium. Au-delà de cette limite, il n'y a pas davantage de durcissement et il peut même survenir un adoucissement de l'alliage. La composition de magnésium habituellement employée pour les alliages de la famille Al-Si varie de 0.070 à 0.40 % [12].

Les alliages binaires Al-Mg sont largement utilisés dans des applications qui requièrent un bon fini de surface, une bonne résistance à la corrosion et une combinaison intéressante de résistance, de ductilité et d'usinabilité. La composition de magnésium de ces alliages varie généralement de 4 à 10 % et les compositions contenant plus de 7 % de magnésium peuvent subir un traitement thermique. L'instabilité ainsi que les caractéristiques de vieillissement de ces alliages à l'ambiante obligent à leur faire subir un traitement thermique. D'un côté plus négatif, le magnésium contribue à accélérer l'oxydation de l'aluminium liquide et les précipités aux frontières des grains rendent l'alliage susceptible à la fissuration intergranulaire. L'ajout de magnésium peut augmenter la Microdureté de la matrice d'aluminium de 100 à 115 KHN (dureté **Knoop**).

❖ **Manganèse** : Il sert à augmenter la résistance mécanique à haute température des alliages de fonderie (suite à la formation d'une structure fibreuse) et à réduire le retrait lors de la solidification. Mais, comme ces alliages ne possèdent pas d'opération de durcissement, le manganèse n'offre pas d'effets bénéfiques pour ces derniers. Certains le considèrent comme une impureté à cause de sa faible solubilité. Cependant, un pourcentage élevé en volume de $MnAl_6$ dans les alliages contenant plus de 0.5 % de manganèse peut influencer favorablement l'équilibre interne de la pièce après la mise en forme.

❖ **Molybdène**: Même s'il est considéré par plusieurs comme une impureté, le molybdène peut servir de raffineur de grains

❖ **Nickel**: Ce dernier augmente la résistance mécanique des aluminiums de haute pureté mais réduit la ductilité. De plus, dans les alliages Al-Si, il accroît la dureté et diminue le coefficient d'expansion thermique. Il est souvent employé avec le cuivre à température élevée pour améliorer les propriétés mécaniques.

❖ **Silicium**: L'effet le plus remarquable du silicium dans les alliages d'aluminium, c'est l'amélioration des caractéristiques de mise en forme (moulage). L'addition du silicium à l'aluminium pur augmente beaucoup la fluidité, la résistance au craquage à chaud et les caractéristiques de l'écoulement du métal liquide. La composition la plus utilisée dans les alliages d'aluminium de fonderie est d'ailleurs celle de la famille Al-Si. Les alliages commerciaux hypoeutectiques et hypereutectiques ont une proportion de silicium qui peut varier jusqu'à environ 25 % en poids.

En général, la proportion optimale de silicium est déterminée par la procédure de mise en forme. Pour une procédure nécessitant un taux de refroidissement lent (moule de sable ou de plâtre - réfractaire), une proportion de 5 à 7 % est recommandée; 7 à 9 % pour un moule permanent et 8 à 12 % pour un moulage sous pression. Ces recommandations sont basées sur la relation entre le taux de refroidissement, la fluidité et les effets du pourcentage de la phase de silicium eutectique sur le front de l'écoulement du métal liquide. L'addition de silicium réduit également la densité de l'alliage ainsi que le coefficient d'expansion thermique. Sa présence associée à celle du magnésium forme le Mg_2Si rendant ainsi l'alliage propice aux traitements thermiques.

❖ **Strontium:** Le strontium est utilisé pour la modification de la phase de silicium eutectique des alliages d'Al-Si. Une modification efficace peut être réalisée par une addition très faible de strontium de l'ordre de 0.008 à 0.04 %. Cette modification consiste principalement en la sphéroïdisation fine des constituants aluminium-silicium. Toutefois, une addition plus élevée entraîne la formation de porosités, spécialement dans les procédures de mise en forme où la solidification survient rapidement (e.g: moule avec sections minces). Le strontium sert également à la stabilité dimensionnelle et à neutraliser les effets négatifs du magnésium.

❖ **Titane:** Le titane est ajouté pour raffiner la structure des alliages d'aluminium, notamment pour les pièces moulées en sable ou en coquille (alliages de fonderie). Surtout employé en compagnie du Bore, il est nécessaire que le titane soit en excès dans la stœchiométrie du composé T_1B_2 pour obtenir un affinage de grain efficace. En moulage sous pression, le taux élevé de refroidissement joue ce rôle. Il contribue aussi à la diminution de la conductivité thermique et de la fluidité, mais il améliore la ductilité, la résistance mécanique et la résistance au craquage à chaud lorsque la quantité utilisée est plus grande que celle qui est requise [13].

❖ **Zinc:** Seul, le zinc n'a aucun effet bénéfique sur un alliage particulier. Cet élément combiné avec le magnésium sert plutôt à produire des alliages ductiles à haute résistance mécanique. Additionné au cuivre, il donne une microstructure intéressante après traitement thermique. En petite quantité, il améliore l'usinabilité mais également le retrait et la criquabilité lors du moulage [14].

❖ **Scandium:** il peut réduire la taille de grain pour un taux inférieur à 0.7% en poids. Cet avantage est éliminé pour la marge de 0.7 à 1 % en poids, la présence de la phase primaire Al_3Sc est proportionnel au taux de scandium ce qui a un effet néfaste sur la repense de l'alliage au traitement thermique [15].

I.4.2. Effet de taille

Dans les alliages qui sont aptes aux durcissements structuraux, les propriétés d'emploi sont sous la dépendance de trois types de précipitations:

- De grosses particules de composées intermétalliques (0,5 à 1 μm) formées durant la solidification ou le traitement ultérieur de formage à chaud (wrought alloys), composées de

l'aluminium avec les éléments peu solubles comme le silicium ou plus solubles comme Mg_2Si .

- Des dispersoïdes de taille voisine de (0.05 à 0.5 μm), composées intermétalliques de l'aluminium avec des métaux de transition tel que le manganèse, permet de contrôler la taille de grain et bloque les joints de grains au cours de la recristallisation.
- Des précipites fins (moins de 0.01 μm) ou très fins (**Zones GP**) formées durant les traitements de revenu, qui sont à l'origine du durcissement des alliages (**Fig I.3**) [16].

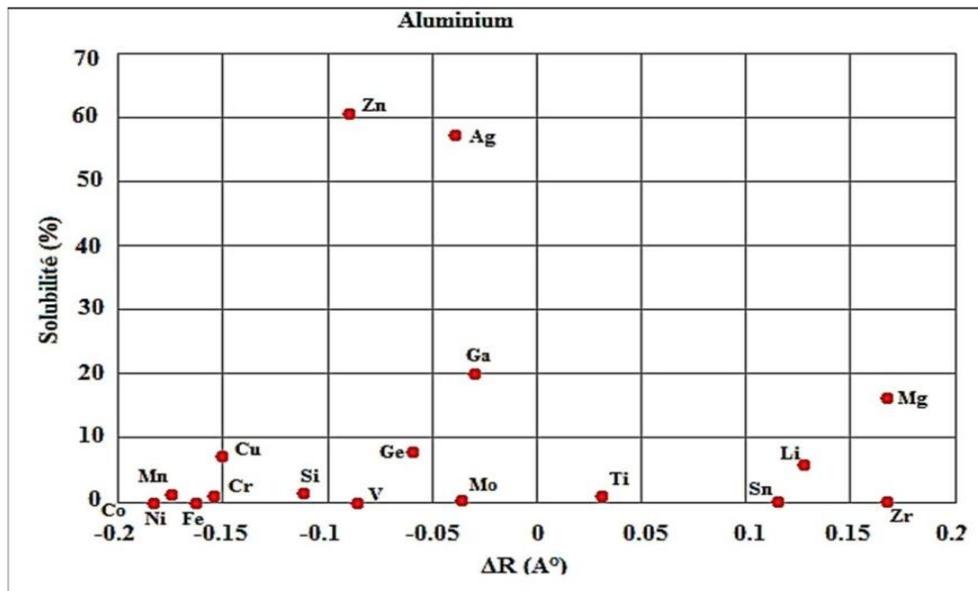


Figure I.3: Solubilité des éléments métalliques dans l'aluminium en fonction de la différence des rayons de Goldschmidt [8].

I.4.3. L'effet chimique

Les réactions chimiques entre les atomes de la matrice et les solutés peuvent conduire à la formation de certaines composées intermétalliques à des caractéristiques spéciales.

I.4.4. L'effet du regroupement

Un durcissement de la solution solide peut être engendré par le regroupement d'atomes de soluté au voisinage des macles (effet Suzuki), ou à l'entourage des défauts linéaires, bloquant le déplacement des dislocations à travers les joints de grain (effet de Cottrell).

I.5. Classification des alliages d'aluminium

Vue la température de fusion relativement basse, d'environ 660°C. Les alliages d'aluminium présentent un avantage certain pour les opérations de fonderie. Et vue leurs ductile (coefficient d'érouissage $n = 0.2$ à 0.3), on peut aisément les mettre en forme à l'état solide, par déformation plastique.

Les alliages peuvent être mis en forme selon deux techniques:

- Mise en forme par corroyage (déformation à chaud),
- Mise en forme par fonderie.

Le nombre total des alliages élaboré est plus de 3000 alliages industriels [9].

I.5.1. Mise en forme par corroyage

C'est un mode d'obtention des produits semi fini et fini par déformation à chaud des lingots, des billettes ou des brames de coulée continue. Elle se devise en deux catégories:

- Alliages, mis en forme par corroyage, non trempants: catégorie apte seulement pour le traitement mécanique dit "écrouissage" afin d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques. Séries 1000, 3000, 5000, 4000 partiellement.
- Alliages, mis en forme par corroyage, trempants: catégorie apte pour le traitement thermique dit "durcissement structural" pour l'amélioration de leurs caractéristiques mécaniques. Série 2000, 6000, et 7000, (voir **tableau I.2**) [17].

Tableau.I.2. Familles d'alliages d'aluminium et type de durcissement associé [17].

Famille	Elément d'alliage	Etendue de la teneur (en % de masse)	Additions possibles	Résistance mécanique R_m (Mpa)
Durcissement par écrouissage				
1000	Aucun		Cuivre	50-150
3000	Manganèse	0.5-1.5	Magnésium-cuivre	100-200
5000	Magnésium	0.5-5	Magnésium-Chrome	100-340
8000		Si: 0.3-1, Fe: 0.6-2	Nickel	130-190
Durcissement structural				
6000	Mag-Silicium	Mg: 0.5-1.5, Si: 0.5-1.5	Cuivre-Chrome	150-310
2000	Cuivre	2-6	Si-Mg-Li	300-450
7000	Zinc –Magnésium	Zn: 5-7 Mg: 1-2	Cuivre	Sans cuivre: 320-350 Avec cuivre: 430-600
4000	Silicium	0.8-1.7		150-400

I.5.2. mise en forme par fonderie

Ce mode a pour but l'obtention des produits semi fini et fini par fusion et moulage des lingots, avec une qualité différentes de celle des produite corroyés, et l'absence des zones de déformations plastiques dans les pièces moulées, les qualités demandées pour le mode d'obtention par fonderie sont :

- Aptitude du métal liquide à bien remplir l’empreinte du moule est satisfaite par lacoulabilité des alliages d'aluminium.
- Fissuration à chaud causée par le retrait du métal est évité par l'absence de formationde criques.
- Le peu de retrait qui accompagne la solidification engendré par la bonne répartition dela porosité.
- L'emploi des moules métalliques convenant à la basse température de fusion desalliages d'aluminium.

Selon la même normalisation de l’Aluminium Association INC; les alliages d’aluminium de fonderie sont désignés par un nombre à quatre chiffres avec un point séparant les deux derniers. (Tableau I.3). Le premier chiffre indique l'élément principal d'addition. Certains alliages de fonderie sont aptes aux traitements thermiques et dites trempants, ce sont de série:200.0, 300.0, 400.0 et 700.0, l'écrouissage n'est généralement pas utilisés sur ces alliages [18].

Les alliages de fonderie sont obtenus de deux façons:

- Soit à partir d'aluminium provenant directement des cuves d'électrolyse auquel on ajoute les éléments d'addition de l'alliage (alliages dits de première fusion) ;
- Soit à partir de rebuts récupérés, assortis et purifiés. Ils sont dits de deuxième fusion et assurent pratiquement 50% de la production totale des pièces de fonderie.

Tableau I.3 : Les séries d'alliage de fonderie selon l’Aluminium Association [18].

Code	Elément(s) d'addition
1xx.x	Moins de 1% (aluminium à 99.00% ou plus)
2xx.x	Cuivre
3xx.x	Silicium avec l'ajout de cuivre et/ ou de Magnésium
4xx.x	Silicium
5xx.x	Magnésium
7xx.x	Zinc
8xx.x	Etain
9xx.x	Autres elements
6xx.x	Série no utilise

I.6. Désignation des alliages d'aluminium

I.6.1. Désignation des alliages corroyés

I.6.1.1. Désignation numérique (Norme européenne EN 485-2) :

La désignation, conforme à la norme Afnor NF EN 573 ainsi qu'aux spécifications internationales de l'Aluminium Association, est numérique à quatre chiffres dans lequel le premier chiffre indique la famille (ou la série) à laquelle appartient l'aluminium ou l'alliage d'aluminium [19].

Le premier chiffre désigne la famille d'alliage comme la suite:

- Aluminium sans élément d'addition: (série 1000)
- Aluminium + cuivre: (série 2000)
- Aluminium + manganèse: (série 3000).
- Aluminium + silicium (alliages de moulage): (série 4000).
- Aluminium + magnésium: (série 5000).
- Aluminium + magnésium + silicium: (série 6000).
- Aluminium + zinc + magnésium :(série 7000)
- Autres alliages d'aluminium: (série 8000)

Le deuxième chiffre: pour famille d'aluminium non allié (1000) indique les limites de certaines impuretés, mais pour les autres familles représente les modifications successives de l'alliage.

Le troisième chiffre: indique pour la famille 1000, le pourcentage d'aluminium au-delà de 99% et pour les autres familles, l'identification de l'alliage.

Le quatrième chiffre: indique comme le troisième.

Tableau I.4: Désignations et teneur en masse des alliages de corroyage [19].

Famille	Durcissement par écrouissage A sans traitement thermique alliages non trempant				Durcissement structural alliages trempant traitement thermique			
	1000	3000	5000	8000	2000	4000	6000	7000
Éléments d'alliage	Aucun	Mn	Mg	Si+Fe	Cu	Si	Mg+Si	Zn+Mg
Teneur en masse (%)	0	0.5-1.5	0.5-5	Si: 0.3-1 Fe: 0.6-2	2-6	0.8-1.7	Mg : 0,5-1,5 Si: 0,5-1,5	Zn : 5-7 Mg: 1-2

I.6.1.2. Désignation symbolique (Norme européenne)

Elle est destinée à compléter la précédente.

La désignation de l'aluminium non allié destiné au corroyage est constituée du symbole chimique du métal (Al) suivi d'un espace et du pourcentage de pureté exprimé avec une ou deux décimales. Par Exemples: EN AW-2014 [Al Cu4SiMg [19].

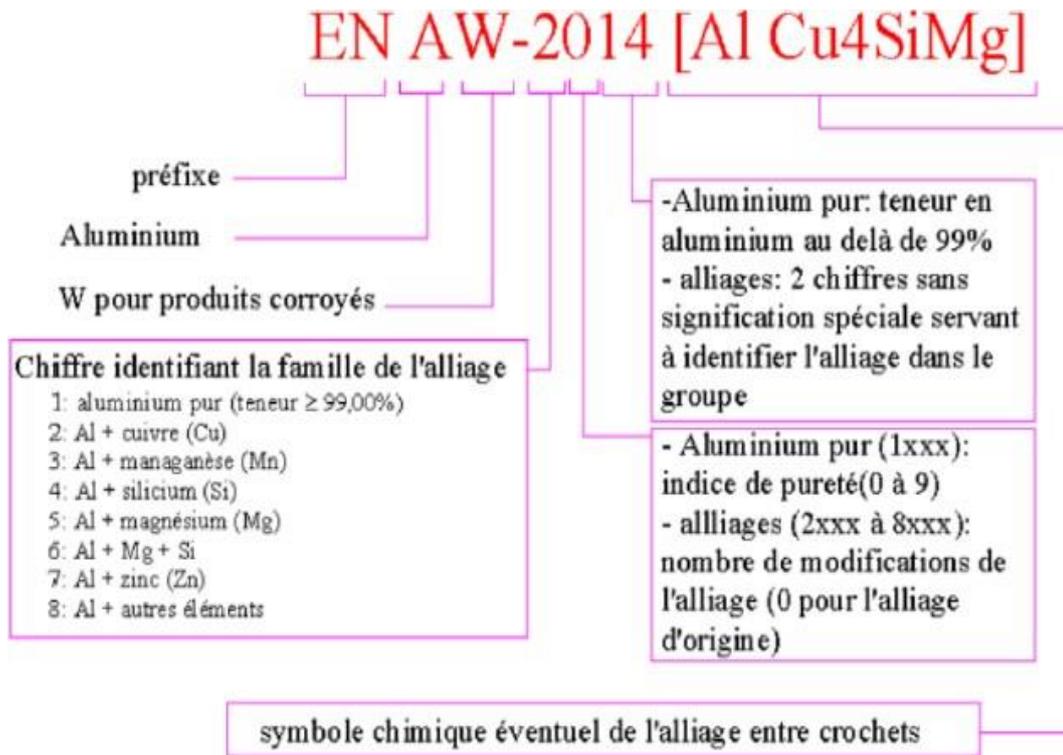


Figure I.4 : Désignation des aluminiums et alliages – produits corroyés NF EN 573 [19].

I.6.2. Désignation des alliages de moulage

I.6.2.1. Désignation numérique (Norme européenne)

La désignation alphanumérique, autre fois en usage en France, a été remplacée par une désignation numérique, comme pour les alliages de corroyage, mais en 5 chiffres, suivant la norme Afnor NF EN 1780-1. On trouvera au la correspondanceentre le premier chiffre et l'élément d'alliage [20].

Pour faciliter la compréhension du texte concernant les alliages de moulage, nousavons indiqué les deux désignations : l'ancienne alphanumérique et la nouvelle, numérique, en vigueur depuis 1998.

Le premier chiffre indique l'élément d'addition principal de l'alliage :

-Aluminium + cuivre : (série des 20000)

-Aluminium + silicium : (série des 40000)

-Aluminium + magnésium : (série des 50000)

-Aluminium + zinc : (série des 70000)

Le deuxième chiffre indique le groupe de l'alliage, il présente un ensemble de caractéristiques mécaniques et/ou physiques similaires. Les trois chiffres suivant indiquent une variante deux alliages, dans des proportions similaires). Les trois chiffres suivant sont des numéros d'ordre et servent à identifier la composition chimique de l'alliage. (exemple : 43100 comporte 0,10 % de cuivre et le 43200 plus pur comporte 0,35% de cuivre, les proportions de zinc et nickel, de plomb et de titane varient aussi entre ces.

Tableau I.5: Indique les groupes de l'alliage d'aluminium [20].

Élément d'alliage	famille
Aucun	10000
Cuivre	20000
silicium	40000
magnésium	50000
Zinc et cuivre	70000

I.6.2.2. Désignation symbolique (Norme européenne)

La désignation comporte les éléments suivants :

- le préfixe EN suivi d'un espace
- la lettre A qui représente l'aluminium
- la lettre C qui représente les produits moulés
- un tiret
- les symboles chimiques des éléments d'addition, successivement suivis de leur teneur dans l'ordre

Décroissant de celle-ci. Par Exemple: EN AB -45400 [AL Si5Cu3].

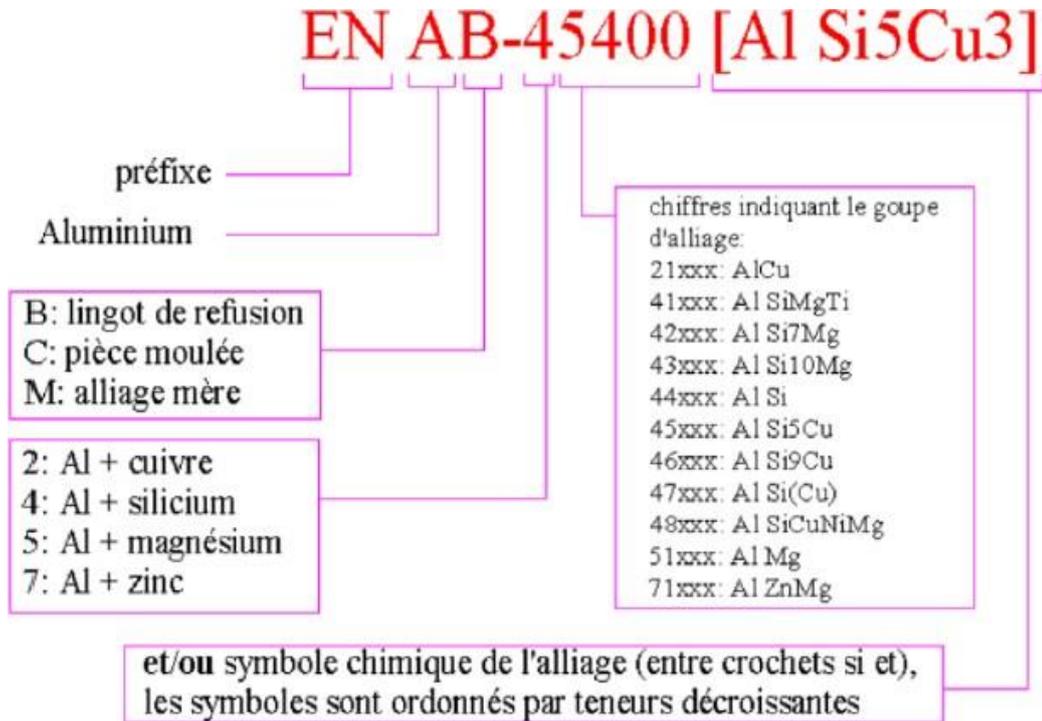


Figure I.5. Désignation des aluminiums et alliages pour la fonderie NF EN 1780 [20].

Tableau I.6: Comparaison entre les types d'alliage d'aluminium.

Série d'aluminium de fonderie	Série d'aluminium corroyé
1xx.x Aluminium pur (>99,0%)	1xxx Aluminium pur (>99,0%) E
2xx.x Cu (4% à 4,6 %) TT	2xxx Cu (1,9% à 6,8 %) TT
3xx.x Si (5% à 17 %) +Cu et/ou Mg(TT)	3xxx Mn (0,3% à 1,5%) E
4xx.x Si (5% à 12 %)	4xxx Si (3,6% à 13,5%) E
5xx.x Mg (4% à 10 %)	5xxx Mg (0,5% à 5,5%) E
6xxx Mg (0,4%...1,5%)	6xxx Si (0,2%...1,7%) TT
7xx.x Zn (6,2% à 7,5%) TT	7xxx Zn (1% à 8,2%) TT
8xx.x Sn	8xxx Autre

I.7. Les domaines d'applications de l'aluminium et ses alliages

Les caractéristiques physiques et chimiques de l'aluminium expliquent ses succès industriels et commerciaux. En effet, l'aluminium avec sa légèreté, (presque trois fois plus léger que l'acier), sa résistance aux sollicitations mécaniques; son aptitude à l'amélioration de ses caractéristiques par traitement ou à froid, sa résistance à la corrosion, sa bonne tenue justifient ses utilisations dans le bâtiment, l'équipement des territoires ou la construction navale.

La variété des alliages d'aluminium en nombre, famille et composition a élargi ses champs d'utilisation, vu la conductivité électrique de l'aluminium (de l'ordre de deux tiers de celle du cuivre) ; en utilisant comme conducteur électrique l'aluminium plutôt que le cuivre, on réalise une économie de 50 % sur le poids. La conductivité thermique de l'aluminium est de l'ordre de 60% de celle du cuivre, ce qui est remarquable et justifie son utilisation pour les ustensiles de cuisine, les capteurs solaires, les éléments frigorifiques, les disques de frein etc. L'utilisation de l'aluminium est aussi importante dans l'électronique, dans le dessalement de l'eau de mer; dans tous ces domaines, il est question d'échanges thermiques. L'aluminium est un excellent réflecteur de la chaleur, de la lumière et des ondes électromagnétiques. Dans les alliages d'aluminium avec le fer, celui-ci n'a pratiquement plus aucun effet magnétique.

L'aluminium est facile à mettre en forme suivant la plupart des méthodes, cette qualité est exploitée lors du filage des profilés en aluminium et du laminage de bandes et de feuilles.

L'aluminium peut être soudé ou collé. Son aptitude aux traitements de surface de tous genres permet la réalisation de solutions esthétiques. L'aluminium permet un grand choix de demi-produits selon les applications à réaliser. Il existe environ 80 alliages couramment utilisés. Les feuilles d'aluminium et de profilés peuvent être standardisés ou personnalisés à la demande du client utilisateur. L'aluminium est indéfiniment recyclable. Sa réintroduction dans le circuit n'utilise que 5 % des quantités d'énergie nécessaires à la production d'aluminium de première fusion. En usine, les chutes de production sont recyclées à 100 %. Le taux de recyclage des produits en aluminium en fin de vie est de 85 % dans le bâtiment, 80 % dans le transport, 70% dans les applications mécaniques et électriques, et 65% dans l'électroménager [10 et 21].

L'ensemble de ces atouts de l'aluminium en font aujourd'hui le métal le plus utilisé après le fer. La combinaison des diverses propriétés de l'aluminium explique la vaste gamme d'applications économiques de ce produit.

L'aluminium est très utilisé dans le transport. En effet dans l'aéronautique et l'aérospatiale, grâce à l'aluminium et à ses alliages, le poids de la structure d'un avion a été divisé par deux. La prépondérance de l'aluminium dans l'aéronautique n'a pu être conservée que par une évolution considérable au fil des ans des alliages utilisés. Aujourd'hui encore l'aluminium représente près de 80 % de la masse à vide des avions civils modernes (Airbus, Boeing, Tornado...).

L'aluminium est utilisé pour les pièces de moteurs en automobile, il a un emploi dans les éléments de châssis, de carrosserie et d'équipements. L'allègement des véhicules automobiles par l'utilisation de l'aluminium est synonyme d'économies de carburant pour les utilisateurs.

L'aluminium est aussi très utilisé dans le bâtiment. Après la seconde guerre mondiale, son utilisation dans la fabrication des fenêtres puis des façades a débouché sur la naissance d'une nouvelle architecture de murs rideaux, symbole de l'architecture moderne. Aujourd'hui, il se rencontre partout dans le bâtiment: toitures, bardages, panneaux d'isolation, fenêtres, portes, volets, vérandas, pare-soleil, cloisons, faux plafonds, cabines de douche.

Le secteur de l'emballage apprécie les multiples propriétés de l'aluminium, en particulier ses propriétés de barrières aux liquides, aux gaz et à la lumière. L'emballage constitue un débouché important pour l'aluminium.

L'aluminium sert à la fabrication de câbles de transport et de distribution d'énergie: lignes haute tension, câbles souterrains, fils de bobinage pour transformateurs... L'excellente conductivité de l'aluminium, mais aussi sa légèreté et sa solidité expliquent son développement dans ce domaine.

L'aluminium est présent dans l'équipement des maisons (ustensiles de cuisine, appareils électroménagers, réfrigérateurs, radiateurs), le revêtement des disques compacts laser, le mobilier urbain, la signalisation routière.

Les spécificités physico-chimiques de l'aluminium en font donc un métal très demandé par les industriels et les ménages pour beaucoup d'objets de la vie quotidienne. **(Figure I.6)** [21].

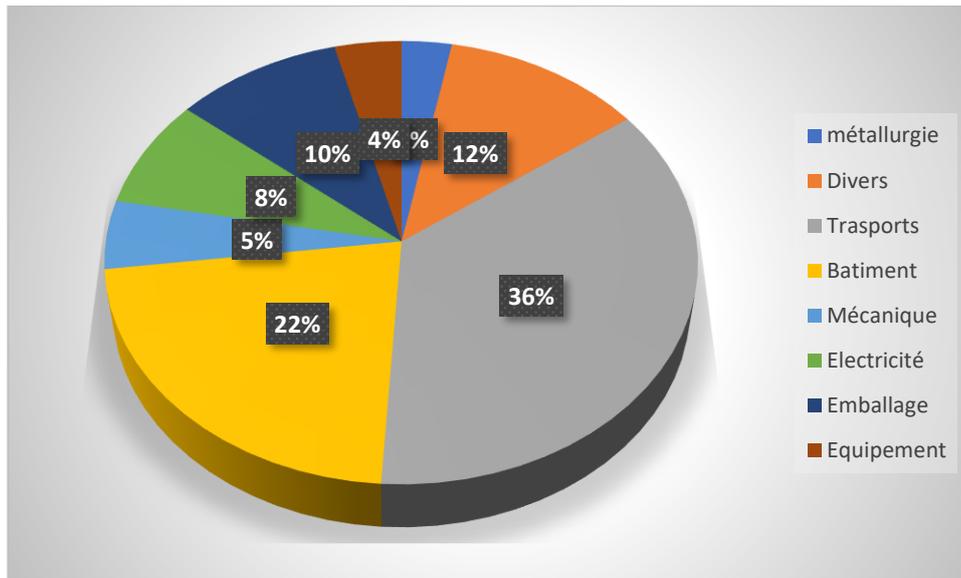


Figure I.6: Répartition de la consommation d'aluminium [21].

I.8. Corrosion des alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium ont une très bonne tenue à la corrosion due à la présence permanente, sur le métal, d'un film continu d'oxyde d'aluminium, appelé «alumine», ce film le rend passif à l'environnement, ce qui explique le développement de ses nombreuses applications dans l'industrie, le développement du phénomène dépend des propriétés intrinsèques telles que (composition, état métallurgique, l'état de surface, teneur et la taille des précipités) et extrinsèques dues à l'environnement (humidité, température, présence d'agents agressifs de l'alliage). Plusieurs types de corrosions peuvent être présentés :

I.8.1. Corrosion uniforme ou généralisée

Résulte d'une attaque uniforme et une décroissance continue de l'épaisseur de la couche d'oxyde à travers toute la surface du métal. Ce type de corrosion est observé dans des milieux acides ou alcalins de PH inférieur à 4 ou supérieur à 9. Elle est caractérisée par la dissolution rapide de la couche d'oxyde naturel. Inversement à la formation de la couche d'oxyde, l'hydroxyde d'aluminium, se développe à travers les petites piqûres, de diamètre micrométrique. (**Figure I.7**) [8 et 22].

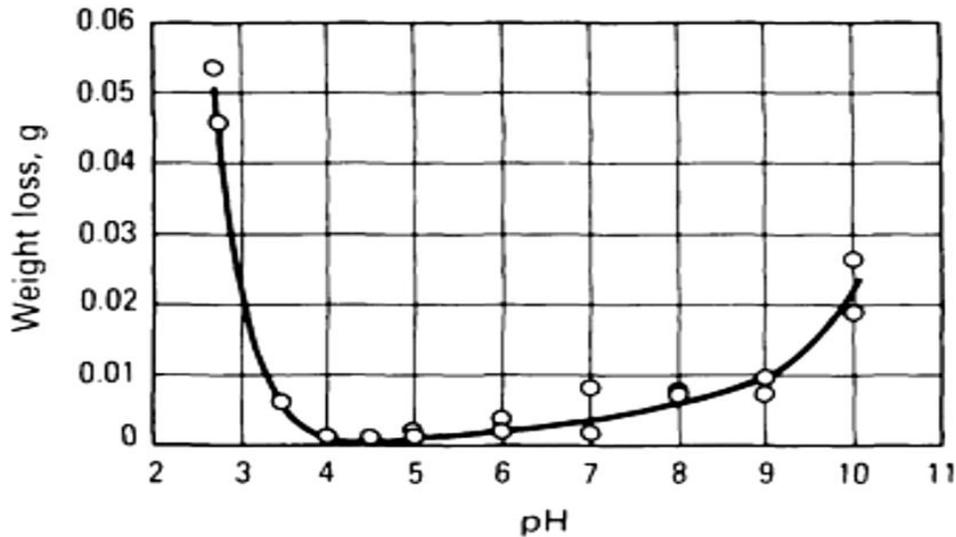


Figure I.7: Perte de poids de l'alliage 3004 H 14 en fonction du PH milieu après une semaine dans l'eau distillée [23].

I.8.2. Corrosion localisée

Lorsque les zones cathodiques et anodiques sont physiquement séparées, la corrosion est dite localisée. La présence des hétérogénéités microstructurales dans la matière et des espèces agressives dans le milieu électrolytique sont les causes principales d'activation de cette corrosion et dont les types sont :

- **La corrosion galvanique** : est une forme de corrosion localisée dans la zone de contact entre deux matériaux de potentiels électrochimiques différents.
- **La corrosion par piqûres** : Tant que la résistance à la corrosion des alliages d'aluminium est liée à la présence d'une couche passive (oxyde), ces alliages sont sensibles à la corrosion par piqûre, elle se développe sur les sites où les films d'oxyde présentent des défauts tels que l'amincissement, lacune..., liées aux éléments d'addition ou aux conditions de mise en œuvre.
- **La corrosion filiforme** : elle est observée pour les matériaux revêtus (protection par peinture) ou recouverts d'un film épais et peu adhérent, Elle s'initie au niveau d'un défaut du revêtement et progresse sous forme de filaments.
- **La corrosion caverneuse "corrosion sous dépôt"** : elle se développe dans des coins d'assemblage. Sous ces zones confinées, qui forment des micropiles, il y aura réaction

électrochimique entre le métal et l'eau ou l'humidité pénétrante sans renouvellement dans ces zones [7 et 21 et 23].

I.8.3. Corrosion structurale

Ce type de corrosion est dû aux hétérogénéités microstructurales. Elle comporte:

- **Corrosion transcristalline ou intercristalline** : si la corrosion progresse dans toutes les directions, elle est dite transcristalline mais s'elle emprunte un chemin préférentiel, le long des joints de grains, donc c'est une corrosion intercristalline.
- **La corrosion exfoliante ou feuilletante** : la corrosion feuilletante est une forme de corrosion qui se propage dans une multitude de plans parallèles à la surface de la pièce. Ces plans sont séparés par des feuillets de métal non attaqués qui sont repoussés de la surface du métal, par le gonflement des produits de corrosion des zones attaquées.
- **La corrosion sous contrainte** : est un mode d'endommagement de matériaux exposés à une superposition de deux sollicitations, environnementale et une contrainte mécanique. Ce mode de corrosion est caractérisé par la propagation de fissures perpendiculairement à la contrainte mécanique et en général le long des joints de grains dans le cas des alliages d'aluminium [8 et 22 et 24].

I.9. Les propriétés mécaniques

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 $2,7 \text{ g/cm}^3$, soit environ un tiers de celle de l'acier ($7-8 \text{ g/cm}^3$) ou du cuivre ($8,96 \text{ g/cm}^3$)

➤ Résistance mécanique

L'aluminium est utilisé très majoritairement sous forme d'alliages dont le constituant

principale 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**

Sa résistance à la corrosion est élevée car le métal, bien que très oxydable, se couvre, au contact de l'air, d'une couche d'oxyde protectrice (couche naturelle étanche d'alumine $< 0,1 \mu\text{m}$). Les éléments d'addition diminuent plus ou moins cette résistance.

➤ **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, une ductilité élevée ($A\% \approx 40\%$).

➤ **Recyclable**

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

➤ **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.

➤ **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

odeurni 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 [25].

I.10. Conclusion du chapitre I

Dans ce chapitre nous avons, présenté quelques, notions sur, L'aluminium et ses alliages les plus utilisés, et on à décrit avec plus, de détails les propriétés mécanique, l'effet des éléments d'addition, domaine d'application et aussi les types de corrosion, sachant que les alliages d'aluminium ont une très bonne tenue à la corrosion.

Chapitre II
Comportement mécanique des
alliages d'aluminium

II.1 Introduction

Le comportement mécanique relève de la réponse du matériau lorsqu'une force lui est appliquée. Sous contrainte un matériau, peut soit se déformer soit se rompre. Le type de déformation engendrée dépend de l'intensité de la contrainte [26].

Ce deuxième chapitre est consacré aux comportements mécaniques des alliages d'aluminium. Et selon le type d'aluminium on a pu reconnaître les types de comportement mécanique de ce matériau "élasticité, plasticité, et la rupture".

II.2. Comportement élastique linéaire

Pendant la première partie de l'essai, l'éprouvette a un comportement élastique linéaire et obéit la loi de Hooke. Théoriquement la pente de la droite est égale au module d'Young ; en pratique, le module d'élasticité est très rarement mesuré de cette façon, car, dans le domaine élastique, les déformations sont très faibles, et la précision des mesures laisse alors à désirer. La limite de ce domaine est marquée par une propriété importante. C'est la limite élastique Re .

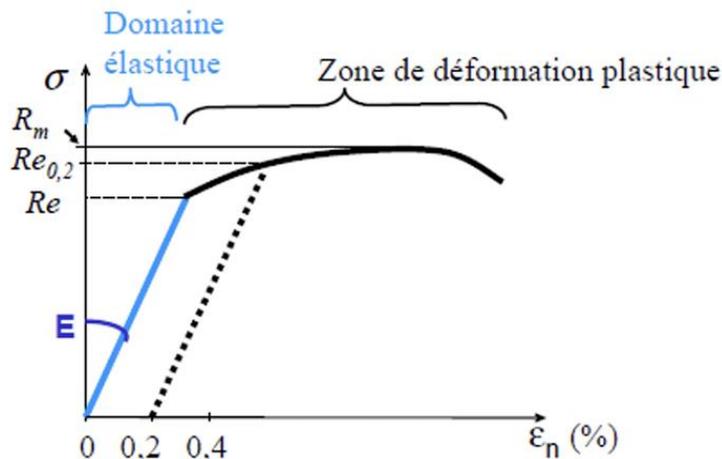


Figure II.1: la limite d'élasticité à 0,2 % ($Re_{0,2}$).

En toute rigueur, la limite d'élasticité Re correspond à la contrainte à partir de laquelle le comportement du matériau s'écarte de la loi de Hooke, c'est-à-dire au moment où apparaît la première déformation plastique irréversible. En d'autres termes, La limite d'élasticité devrait donc correspondre, à la contrainte à partir de laquelle il n'y a plus proportionnalité entre contrainte et

déformation. En pratique, même si sa définition est simple, une telle limite de proportionnalité est très difficile à apprécier, car le passage du domaine élastique au domaine plastique se fait de façon progressive ; la limite de proportionnalité, ou limite d'élasticité vraie R_e dépend donc de la précision que l'on a sur la mesure de l'allongement. On lève toute ambiguïté en définissant une limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 %, notée $R_{e0.2}$: Elle définit la contrainte à laquelle correspond une déformation plastique permanente égale à 0,2% .

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

Certains alliages (c'est le cas en particulier des aciers doux) ont un comportement en traction telle que la transition entre les domaines élastique et plastique est discontinue. Dans ces cas, la limite d'élasticité R_e ou $R_{e0.2}$ est définie comme la valeur inférieure de la discontinuité.

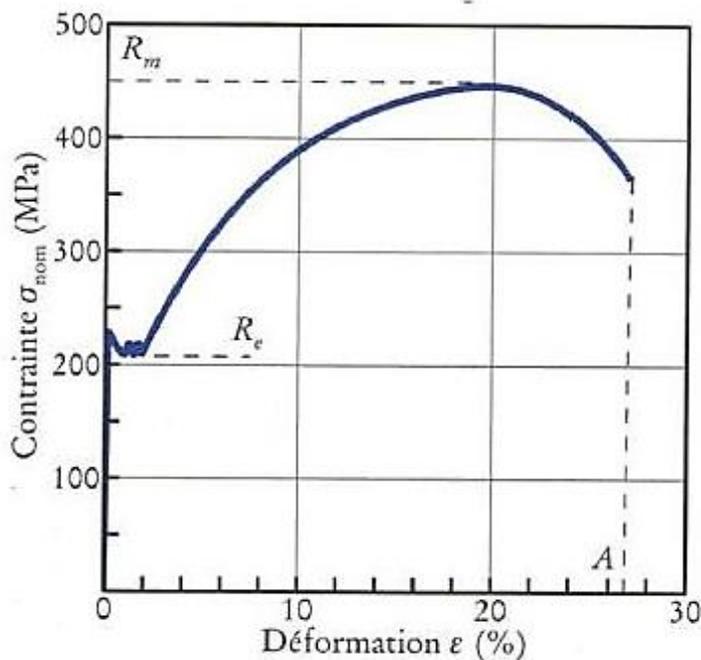


Figure II.2: Courbe de traction (Fe-0,15 % C) présentant une discontinuité à la limite d'élasticité [26].

II.3. Comportement plastique

Dans la seconde phase de l'essai, le comportement du matériau n'est plus linéaire puisque la déformation élastique est suivie de la déformation plastique qui se manifeste de deux façons :

II.3.1. Déformation plastique homogène

Dans ce sous-domaine qui est compris entre la limite élastique et se poursuit jusqu'à la valeur maximale de la contrainte, le matériau se consolide par phénomène d'érouissage. Le taux de consolidation $d\sigma/d\varepsilon$ pente de la courbe $\sigma = (\varepsilon)$, diminue quand la contrainte augmente et devient nul à la valeur maximale de la contrainte nominale appliquée. Cette dernière caractérise.

La résistance à la traction Rm qui se définit comme la contrainte maximale atteinte durant l'essai de traction. Les matériaux fragiles n'ont pas de domaine de déformation plastique, dans ce cas, la limite d'élasticité et la résistance à la traction sont confondues [27].

II.3.2. Déformation plastique

Une fois que la courbe de traction ait atteint un maximum, la contrainte nominale diminue bien que l'allongement continue de croître. Quand l'allongement augmente au-delà de celui qui correspond à la charge maximale atteinte, un nouveau phénomène apparaît :

Localement, la consolidation du matériau ne peut plus compenser l'augmentation de la contrainte. La déformation n'est plus homogène, mais elle est localisée dans la zone de striction Ce phénomène se traduit par une réduction localisée des dimensions transversales de l'éprouvette se produisant au cours de l'essai. Il est caractérisé par L'allongement.

$$A = \frac{L_F - L_0}{L_0} \times 100\% = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \quad (\text{II.2})$$

L'allongement permanent après rupture est une mesure de la ductilité ; il est nul pour les matériaux fragiles [28].

II.4. Striction et la rupture

Finalement, la rupture se produit dans la zone de striction, là où la section est la plus faible. Le comportement ductile du matériau peut mis en relief à partir de l'allongement à la rupture. Cette caractéristique peut être lue directement sur la courbe de traction ou mesurée sur l'éprouvette rompue.

$$Z = \frac{S_0 - S_F}{S_0} \times 100\% = \frac{\Delta S}{S_0} \times 100\% \quad (\text{II.3})$$

S_0 est la section initiale de l'éprouvette en (mm²).

S_F est la section finale de l'éprouvette en (mm²) [28].

II.4.1. Allongement à la rupture pour les alliages d'aluminium

L'allongement à la rupture de l'aluminium pur ou presque est de l'ordre de 30%. Il en va de même pour les alliages n'ayant subi ni écrouissage ni traitement thermique (état métallurgique 0) ; dans ce cas, l'allongement à la rupture est compris entre 20 et 40%. L'aluminium pur et les alliages non traités ont des propriétés mécaniques, médiocres, ils sont « mous » ($20 \text{ MPa} < R_e < 100 \text{ MPa}$). Après traitement(s), la résistance mécanique est augmentée ($100 \text{ MPa} < R_e < 500 \text{ MPa}$) mais l'allongement à la rupture diminue fortement ($1 < A\% < 20$) [29].

II.5. Essai de traction

II.5.1 Intérêt et déroulement de l'essai

L'essai de traction est l'essai l'un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique des matériaux. Il consiste à exercer deux forces mécaniques opposées sur une éprouvette normalisée qui vont la déformer progressivement jusqu'à sa rupture tout en enregistrant, à chaque instant, la déformation provoquée en fonction de la contrainte appliquée. [30]. La ligne d'action étant confondue avec l'axe de symétrie ou de rotation de l'éprouvette. On mesure instantanément l'allongement Δl , correspondant [31].

Afin de pouvoir utiliser les courbes brutes de traction, on doit les modifier pour que les résultats obtenus ne soient fonction que du matériau étudié et non de la géométrie de l'éprouvette. Pour ce faire, on rapporte la charge à la section initiale S_0 de l'éprouvette en vue d'obtenir la contrainte nominale σ .

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (\text{II.4})$$

Et on rapporte l'allongement Δl à la longueur initiale entre repères l_0 , pour obtenir la déformation nominale ε .

L'essai est le plus souvent normalisé. La forme de l'éprouvette est soit cylindrique, soit prismatique.

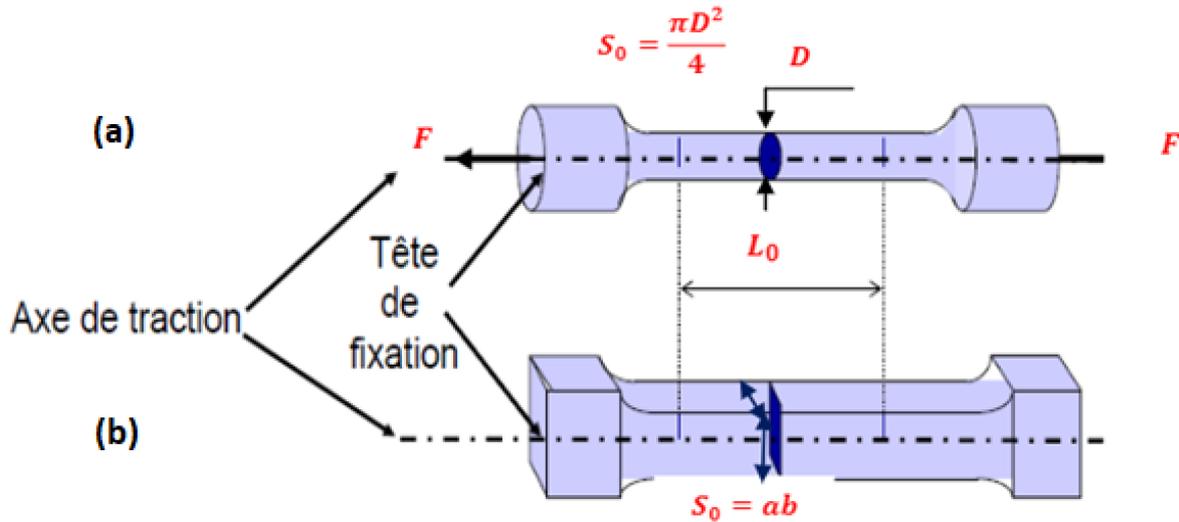


Figure II.3: Eprouvette de traction : a) cylindrique, b) prismatique. [31]

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (\text{II.5})$$

Les extrémités, ou têtes, de l'éprouvette ont une section supérieure à S_0 ce qui permet de les fixer sur la machine d'essai. La géométrie des têtes dépend du mode de fixation utilisé (serrage sur têtes lisses, filetage ou épaulement). Le raccordement entre la partie centrale et les têtes doit toujours être progressif afin de minimiser l'effet de concentration des contraintes. L'éprouvette comprend toujours, entre deux repères séparés par une distance L_0 , une section constante S_0 [32]. Comme la charge de traction est appliquée selon l'axe de l'éprouvette, on comprend que dans la zone centrale, entre les repères, la contrainte soit uniforme tant que la section demeure constante.

II .5.2. Courbes de traction conventionnelle et rationnelle

L'essai de traction nous permet d'obtenir la réponse du matériau sous forme d'une courbe, dite courbe de traction du matériau.

Dans le cas général, les machines d'essai fournissent une courbe dite conventionnelle puisqu'on l'on rapporte les efforts F à la valeur initiale S_0 de la section. Cela peut être accepté dans le domaine des petites déformations ($\varepsilon \leq 20\%$). Cependant lorsque les déformations deviennent importantes ($\varepsilon \rightarrow \infty$), la réduction de la section le devient aussi à cause de l'instabilité plastique à

tel point que la contrainte réelle ou vrai σ soit représentée par le rapport de la force à la section instantanée S .

Une courbe rationnelle de traction est donc la représentation graphique de la contrainte vraie σ en fonction de la déformation relative ϵ_r .

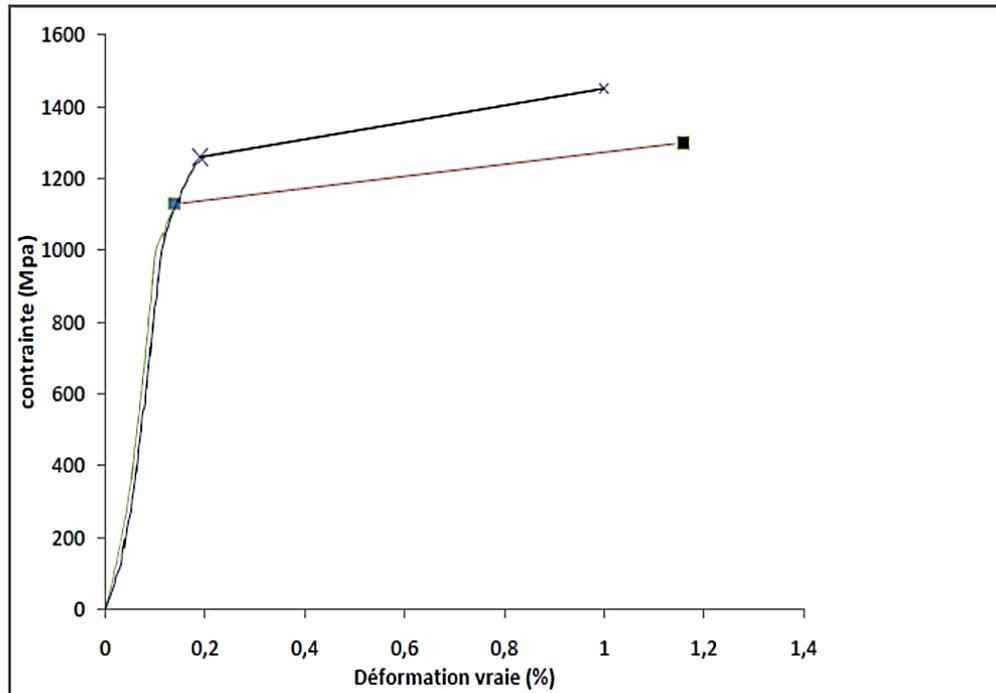


Figure II. 4 : Courbes rationnelles de traction [33].

La courbe de traction rationnelle délivre donc des informations plus importantes que l'essai classique. L'intérêt est d'en déduire des lois permettant de modéliser le comportement du matériau. Cependant les propriétés de traction sont souvent définies à partir d'une courbe conventionnelle de traction [33].

II.6. Propriétés de traction

D'une façon générale, on peut estimer les principales propriétés mécaniques à partir d'une courbe conventionnelle de traction d'un matériau à comportement ductile en traction. L'exploitation de la courbe de traction permet de distinguer deux domaines fondamentaux : Domaine de déformation plastique et domaine de déformation élastique.

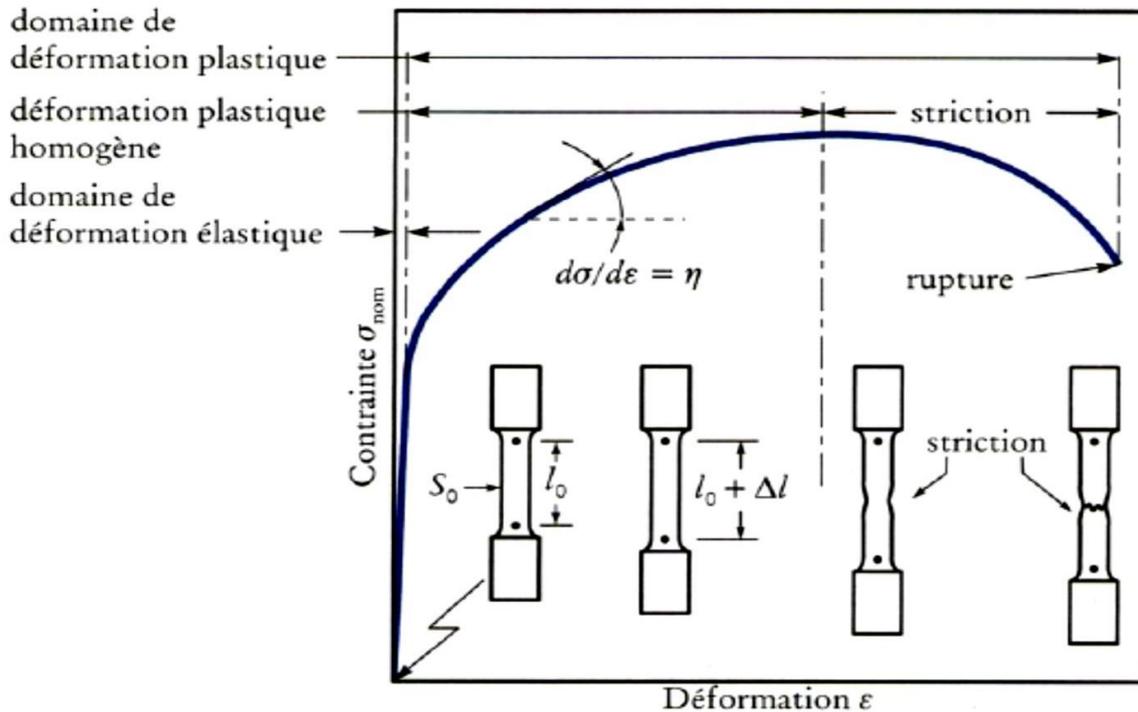


Figure II.5 : Représentation d'une courbe de traction (matériau ductile) [32].

II.7. Phénomène d'écroutissage

II.7.1. Mécanisme et effet de l'écroutissage

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

Au cours d'un essai de traction, la consolidation d'un matériau est le résultat d'un mouvement et d'une multiplication des dislocations qui balayent les plans de glissement et s'entrecroisent entre elles en augmentant leur densité [32].

Pour un matériau poly-cristallin, cette consolidation se traduit par une augmentation de la contrainte dans le domaine plastique lorsque la déformation augmente. Cette augmentation de la contrainte persiste jusqu'à ce que sa valeur atteigne un maximum c'est à dire celle de la résistance à la traction.

L'érouissage c'est l'effet des interactions entre dislocations qui augmente avec la multiplication des dislocations au cours de la déformation plastique. Cet effet est responsable du fort durcissement des alliages de structure cubique à faces centrées [34].

II.7.2. Influence de l'érouissage sur les caractéristiques mécaniques

L'érouissage a une influence sur les propriétés mécaniques des aciers. Les effets de ce phénomène se traduisent par l'amélioration des caractéristiques telles que [35] :

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

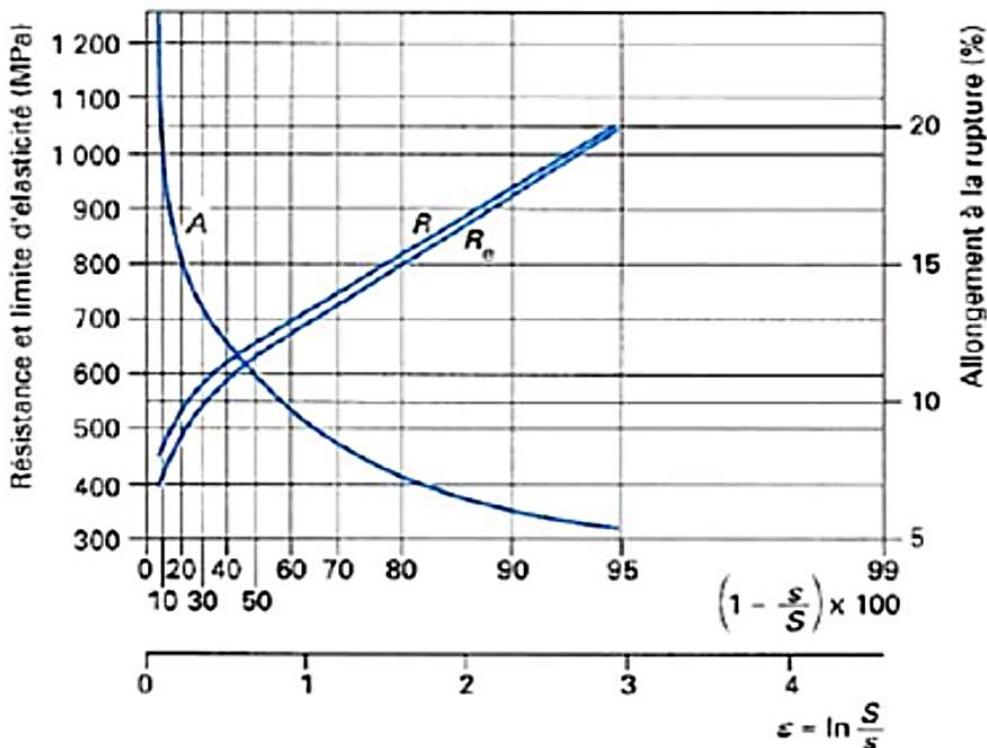


Figure II. 6 : Variations des caractéristiques mécaniques en fonction de l'érouissage [33].

II.7.3. Courbe et coefficient d'érouissage

Dans le domaine des déformations plastiques homogènes (avant l'apparition de la striction), le phénomène d'érouissage peut être évalué sur les courbes rationnelles de traction. Sur une courbe de traction classique, la charge à la rupture est une grandeur conventionnelle puisqu'elle ne tient compte que de la section initiale S_0 ; $R_m = \sigma_{max} / S_0$. Cela empêche de tenir compte dans les calculs

de plasticité car la section est variable dans le temps. A cet effet, on définit une contrainte vraie σ_v qui correspond à la charge appliquée rapportée à la section instantanée $S = (t)$.

$$\sigma_v = \frac{F}{S} \quad (\text{II.6})$$

Une portion parabolique AB de cette Courbe peut être mise sous une certaine forme empirique qui relie la contrainte vraie σ_v à la déformation relative ε_v .

L'expression la plus utilisée est celle de Lüduik [36].

$$\sigma_v = \sigma_0 + K \cdot (\varepsilon_v)^n \quad (\text{II.7})$$

σ_0 et k sont des constantes du matériau Et n est le coefficient d'écroutissage

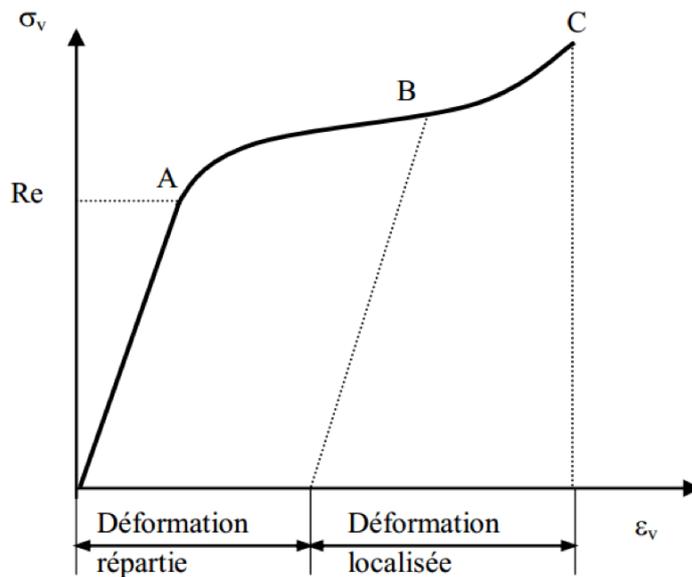


Figure II.7: Phénomène d'écroutissage sur une courbe rationnelle de traction [36].

Le coefficient d'écroutissage caractérise la déformation rationnelle répartie (homogène) que peut subir un matériau et l'aptitude à répartir uniformément cette déformation. Ce coefficient dépend du matériau et du traitement qu'il a subi. En général

On a :

$$0,1 \leq n \leq 0,4$$

N.B:

Si $n = 0,1$: le matériau a une faible consolidation ;

Si $n = 0,4$: le matériau a une forte consolidation ;

Si $n = 0$: Le matériau ne subit aucune consolidation, C'est donc que ce matériau est parfaitement plastique [37].

Remarque : Pour mettre en évidence le coefficient d'écroutissage, il est commode de tracer la courbe rationnelle en coordonnées logarithmiques :

on a (pour $\sigma_0 = 0$)

$$\ln \sigma_v = \ln [k \cdot (\varepsilon_v)^n] \quad (\text{II.8})$$

Où :

$$\ln \sigma_v = \ln k + n \cdot \ln (\varepsilon_v)$$

Dans ce cas, la courbe :

$$\ln \sigma_v = f (\ln \varepsilon_v)$$

Représente une droite de pente n.

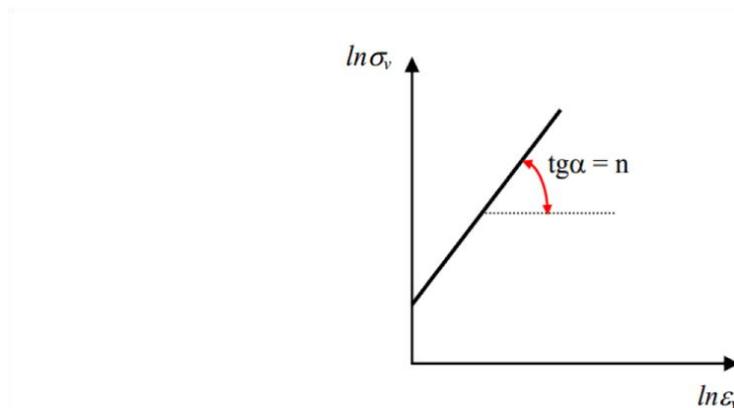


Figure II.8 : Courbe rationnelle de traction en coordonnées logarithmiques [33].

II.8. Essais duresté

II.8.1. Domaines de la duresté

La détermination des propriétés mécaniques des couches mince et de la surface des matériaux est souvent délicate. Les raisons principales en sont les hétérogénéités de la matière. L'essai de duresté consiste à mesurer l'effet occasionné par le contact, sous une pression donnée, d'un matériau de géométrie définie (indenteur) et de la surface d'un échantillon. De nouvelles techniques ont élargi le champ d'application de l'essai de duresté. Ainsi les fabricants proposent maintenant des appareils permettant de mesurer quelques caractéristiques supplémentaires (module Young, module de Coulomb, coefficient de Poisson, viscosité, forces d'adhésion (entre la pointe et le substrat) ou encore ténacité et énergie de rupture, etc.) à partir de l'enregistrement de la courbe force-déplacement [38]. Plusieurs domaines de duresté peuvent être définis en fonction de la charge appliquée : Buckle [39]. A introduit en 1965 la notion de la macro duresté pour des charges supérieures à 3÷5 kgf et celle de micro duresté pour des charges inférieures à 100÷200 gf. Le domaine intermédiaire étant celui de la duresté sous charge réduite.

Dans les années 80, est apparu le domaine de nano duresté qui correspond à des charges appliquées inférieures à 1gf.

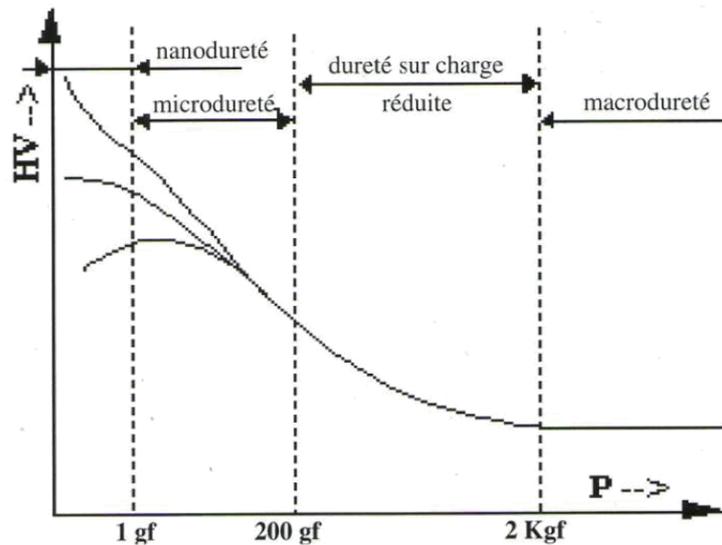


Figure II.9 : Définitions des différents domaines de duresté [39].

L'essai peut être conduit selon les méthodes statique et dynamique. La méthode statique qui regroupe les essais par indentation est la plus répandue. La méthode dynamique dans laquelle, la pointe du pénétrateur est en mouvement relatif par rapport à la surface du matériau à tester, permet d'avoir une idée de l'amortissement et de la rigidité de la surface soit par oscillation d'un uromètre pendulaire, soit par rebond d'une masse tombante, ou soit par la rayure d'indenteur de forme géométrique bien définie. Les essais de dureté (dynamique ou statique), présentent l'avantage d'être simples, rapides, et non destructifs. Ils offrent un moyen intéressant et très employé dans l'industrie et les laboratoires [38]. La littérature rapporte l'existence de plusieurs critères de dureté qui dans la majorité des cas sont classés selon :

La géométrie de l'indenteur (pyramide, cône, sphère etc.)

- Le type et le mode de sollicitation, suivant le comportement viscoélastique que l'on désire mettre en évidence : fluage, recouvrance, relaxation ou amortissement.
- Les normes et les appareils correspondant à chaque classe.
- La taille de l'empreinte laissée par l'indenteur sur la surface.
- Les techniques de mesure peuvent être groupées essentiellement en 3 catégories.

II. 8.2. Essais sclérométriques ou par rayures

Dans ces essais proposés par Moh [28] ; Une pointe en diamant raye le matériau. La dureté est qualifiée par la géométrie de la rayure engendrée. Le pénétrateur de forme géométrique bien déterminé (sphère, cône, pyramide, etc.), glisse sur la surface du corps à tester, selon une direction parallèle à la surface du corps à une vitesse constante. On impose une charge perpendiculaire constante. Les grandeurs mesurées sont principalement la force tangentielle, et la profondeur de pénétration.

L'essai de dureté par rayage impose un niveau de déformation au matériau de la surface à tester par l'intermédiaire de la pointe. Plus précisément c'est la géométrie de la pointe qui va déterminer le niveau de déformation.

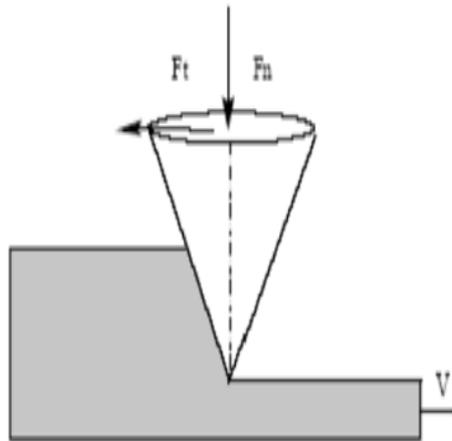


Figure II.10 : Schématisation de l'essai de glissement- rayure (pointe conique) [28].

II.8.3 Les essais par rebondissement

Dans ces essais dits de Shore, la dureté est caractérisée par la capacité du matériau à restituer l'énergie reçu au cours du choc avec une bille tombante. On fait chuter une masse d'acier terminée par un diamant arrondi. La masse est guidée dans sa chute par un tube lisse. La chute de la masse est bien verticalement et d'une hauteur fixe. La dureté est évaluée par une rebondi Mètre (du type scléroscope Shore) relie dureté et hauteur de rebond, cette dernière étant d'autant plus importante que la pénétration est faible, donc le matériau dur.

Deux gammes de dureté Shore existent : Shore A où le pénétrateur est de forme géométrique d'un cône tronqué, à sommet plat pour les produits souples et shore D pour les matériaux rigides de forme géométrique d'un cône émoussé.

II .8.4. Les essais par indentation

Il s'agit des essais les plus couramment pratiqués. Le principe est toujours le même : un pénétrateur indéformable de forme géométrique précise, pénètre dans le métal sous l'action d'une charge constante et laisse une empreinte dans le matériau à tester. On mesure les dimensions de l'empreinte et on en déduit la dureté.

Dans une première approche, On peut relier de manière assez simple la limite d'élasticité R_e avec la surface de l'empreinte : plus l'objet pénétrant s'enfonce, plus la surface S de pression s'agrandit, donc la force F étant constante, plus la contrainte diminue. Lorsque la contrainte n'est pas

suffisante pour déformer plastiquement le solide à tester, l'objet pénétrant s'arrête et la dureté est calculée à partir du rapport de la force appliquée sur la surface indentée.

$$R_e = \frac{F}{S} \quad (\text{II.9})$$

II.8.4.1 Essai de dureté Brinell

L'essai a été édité dès 1924. Il consiste à faire pénétrer dans le métal à tester, une bille polie de forme sphérique en acier trempé ou en carbure de tungstène. Le diamètre D utilisé peut valoir 1 mm, 2,5 mm, 5 mm et 10 mm. La charge appliquée sur le métal est maintenue pendant 15 à 30 s selon le solide. Après l'annulation de la charge, la bille laisse dans le métal une empreinte circulaire permanente dont on mesure le diamètre d .

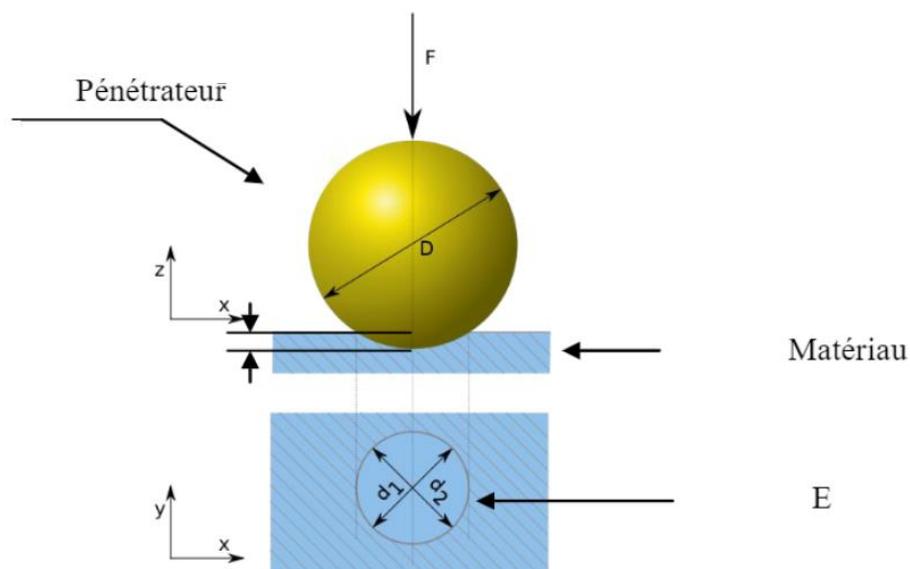


Figure II.11 : Principe de dureté brinell [33].

La force étant exprimée en kgf, le diamètre de l'empreinte d en mm et la dureté Brinell est exprimée en kgf/mm² selon la relation suivante.

$$HB = \frac{2P \times 0,102}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Avec :

(II.10)

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

II.8.4.2. Essai de dureté Rockwell

L'essai consiste à mesurer la profondeur rémanente de l'empreinte indentée. Le pénétrateur de forme géométrique conique pour le critère ou bien sphérique pour le critère est appuyé sous faible charge, sur la surface à essayer et dans des conditions bien précises. Le pénétrateur conique est en diamant de section circulaire et d'angle au sommet 120° à pointe arrondie sphérique de rayon de 0,2mm. Le pénétrateur sphérique est une bille d'acier trempée polie de diamètre 1,588mm ou 3,175 mm. L'essai se déroule en trois phases.

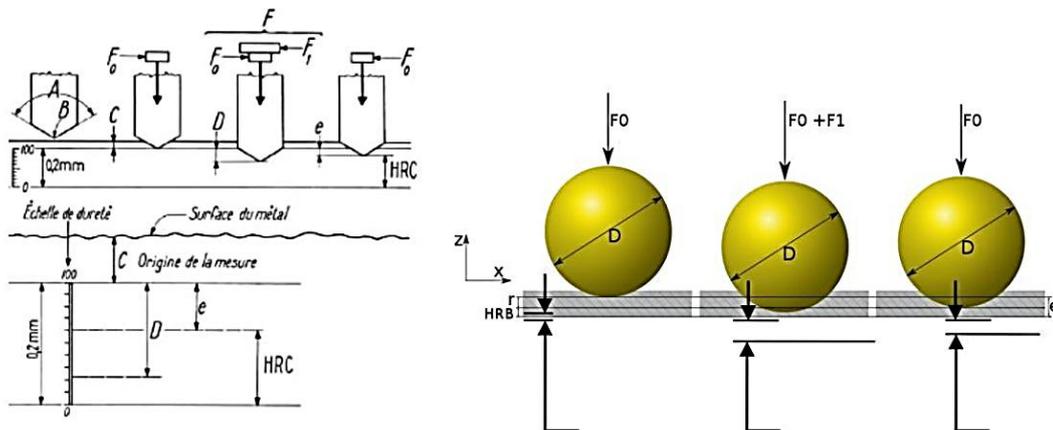


Figure II.12: Principe de mesure de la dureté Rockwell : a) échelle HRC, b) échelle HRB.

1) Une phase I de pénétration initiale avant charge additionnelle : après application d'une charge initiale $F_0 = 98\text{N}$ (10 kgf). La profondeur de pénétration étant l'origine qui sera utilisée pour la mesure de la dureté.

- 2) Une phase P de pénétration avec charge additionnelle : Sous la charge supplémentaire F_1 , le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur P .
- 3) Une phase R de pénétration rémanente sans la charge additionnelle : La force F_1 est relaxée et on lit les indications de l'enfoncement.

II.8.4.3. L'essai de dureté Vickers

Il consiste à imprimer dans le métal testé une empreinte avec un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidale à base carrée et d'angle au sommet entre deux faces opposées de 136° , sous l'action d'une force connue. On mesure la diagonale de l'empreinte carrée laissée par le pénétrateur [33].

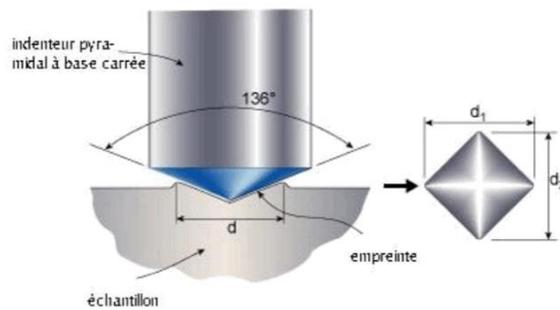


Figure II.13 : Principe de dureté Vickers [33].

Généralement la gamme des forces utilisables (5 à 100 kgf) permet d'appliquer cette méthode avec toutes les dimensions d'échantillons. Pour des raisons de fiabilité de l'essai, la force est choisie de telle manière à donner une empreinte ayant la diagonale moyenne inférieure aux deux tiers de l'épaisseur. D'autres sources préconisent que la profondeur de pénétration ne dépasse pas le huitième de l'épaisseur de la pièce à tester.

La force F étant exprimée en kgf, le diamètre de l'empreinte d en mm et la dureté Vickers est exprimée en kgf/mm² selon la relation suivante.

$$HV = \frac{1.845P}{d^2}$$

Avec :

(II.11)

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

L'essai de Vickers celui qui fournit la plus grande diversité de renseignement. Il possède deux avantages principaux : être souvent non destructifs et pouvoir être répété un grand nombre de fois ; c'est-à-dire se prêter à une interprétation statistique (dislocation des diagonales d'empreinte suivant une loi gaussienne) [33].

II.9. Essais de résilience

La résilience caractérise la résistance de la rupture par choc d'un matériau. Un métal résistant bien au choc à une grande résistance symbole K, le plus souvent l'essai de résilience est réalisé à l'aide d'appareil appelle (mouton pendule de CHARPY), avec des éprouvettes standardisées [40].

II.9.1. Principe de l'essai

Cet essai est destiné à mesurer l'énergie nécessaire en choc mécanique. On utilise un mouton pendule muni à son extrémité d'un couteau qui permet de développer une énergie cédée au moment du choc. Cette énergie est généralement de 300 joules, (cas des normes européennes) [41].

L'énergie absorbée est obtenue en comparant la différence d'énergie potentielle entre le départ du pendule et la fin de l'essai. La machine est munie d'index permettant de connaître la hauteur du pendule au départ ainsi que la position la plus haute que le pendule atteindra après la rupture de l'éprouvette. L'énergie obtenue, en négligeant les frottements, est égale à :

$$K = m \cdot g \cdot (h - h') \quad (\text{II.12})$$

m = masse du mouton-pendule [kg].

g = Accélération de la pesanteur. [m s⁻²] (9.80665).

h = hauteur du mouton-pendule à sa position de départ [m].

h' = hauteur du mouton-pendule à sa position d'arrivée [m].

La graduation de la machine permet généralement d'obtenir directement la valeur de l'énergie en Joule [42].

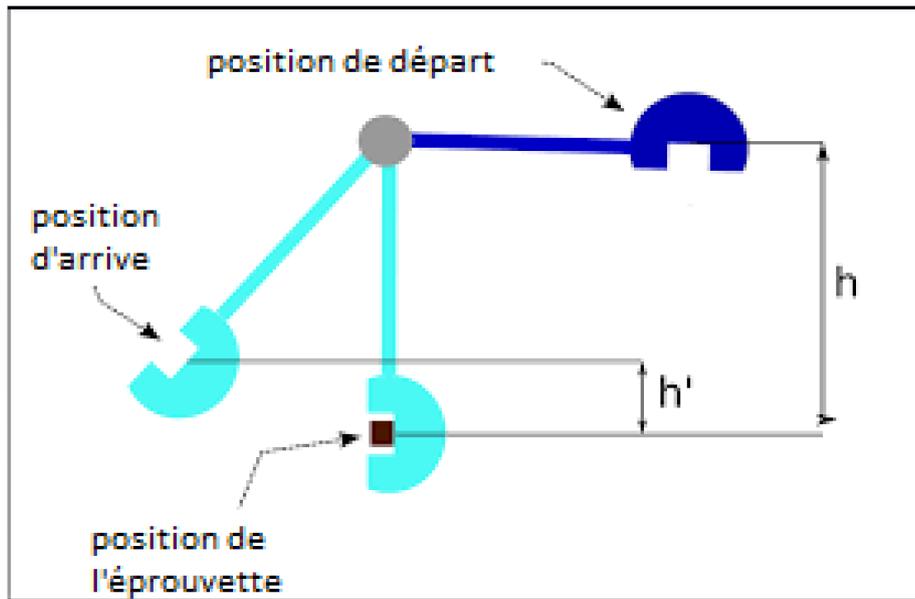


Figure II.14 : Schématisation de l'essai de résilience [42].

II.9.2. Principe de CHARPY

La résistance au choc CHARPY d'une éprouvette, souvent notée ac_U dans les cas d'éprouvettes non-entaillées et ac_N dans le cas d'éprouvettes entaillées, représente l'énergie de choc absorbée par la rupture de l'éprouvette, rapportée à la section droite initiale de l'éprouvette [43].

Masse pendulaire tombant d'une hauteur (H) (W_i = Énergie initiale) et, après rupture, remontant d'une hauteur (h) sous l'effet de l'énergie résiduelle (W_r).

$$K = \frac{P(H-h)}{D} = \frac{\text{énergie absorbée par la rupture } W \text{ (joule)}}{\text{section au droit de l'entaille (cm}^2\text{)}} \quad (\text{II.13})$$

Le pendule mouton de Charpy est conçu pour répondre à la demande grandissante d'essai d'impact et de choc précis et reproductible sur une vaste gamme de matériaux. Il est utilisé pour déterminer la caractéristique de résistance de métaux, polymères, composites et autres matériaux pour la recherche et le développement (R&D) et le contrôle qualité (CQ) [44]. Il permet de réaliser des essais Charpy selon les normes intentionnelles.

Les systèmes non instrumentés fournissent des valeurs d'énergie absorbée. En instrumentant le mouton pendule, on peut obtenir des valeurs plus précises et fiables.

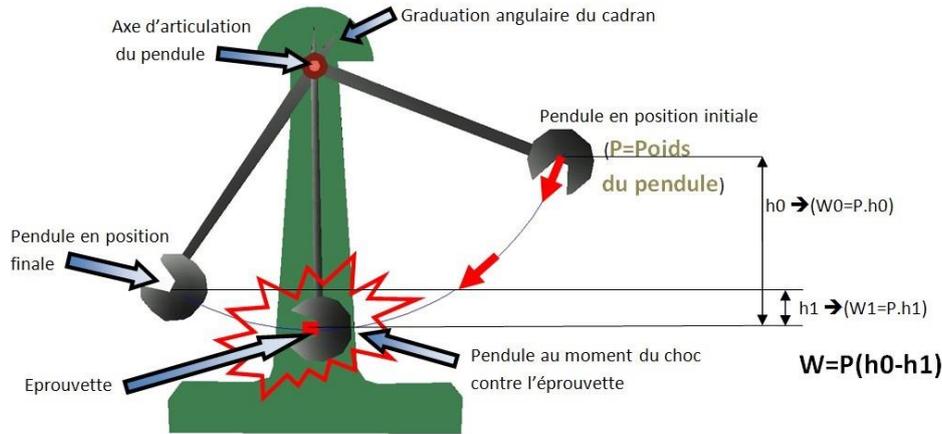


Figure II.15 : Schématisation de l'essai de résilience du Charpy [44].

II.9.3. Normes utilisées

Américaine (ASTM) : ASTM pour American Society for Testing and Materials, La norme ASTM E23 décrit l'essai d'impact d'éprouvettes métalliques entaillées. La norme régit les essais de type Charpy et souligne les méthodes d'essai permettant de mesurer l'énergie absorbée par l'éprouvette rompue.

La norme internationale ISO :

- EN ISO 179-1 : décrit l'essai Charpy non instrumenté pour la détermination de la résistance au choc dans le cas des matériaux plastiques.
- EN ISO 179-2 : décrit l'essai Charpy instrumenté pour la détermination de la résistance au choc dans le cas des matériaux plastiques.
- NF EN 10045-1, remplacée par ISO 148-1 : ancienne norme française, décrit l'essai Charpy dans le cas des matériaux métalliques.
- NF EN 10045-2, remplacé par ISO 148-2 : sert à la vérification des machines d'essai [27].

II.10. Traitements thermiques des alliages d'aluminium

Les traitements thermiques n'ont pas comme seul but d'agir sur le niveau de résistance mécanique, ils sont susceptibles d'influencer un grand nombre d'autres propriétés parfois très importantes pour les utilisateurs.

Dans la métallurgie des alliages d'aluminium, la tendance est de mettre au point de définir des traitements thermiques vraiment spécifiques en vue d'améliorer une propriété donnée d'un alliage déterminé.

II.10.1. Durcissement structural

La résistance et la dureté de certains alliages d'aluminium peuvent être améliorées par une série de traitements thermiques. Cette série de traitements constitue un processus nommé durcissement structural.

La série provoque de très fines particules appelées précipités, d'une deuxième phase répartie uniformément dans la matrice initiale.

Le durcissement structural se réalise à l'aide de trois traitements thermiques :

La mise en solution.

La trempe.

Le revenu (vieillesissement).

II.10.1.1. La mise en solution

La mise en solution consiste à chauffer l'alliage jusqu'à une température T_0 située dans le domaine de la phase α , et maintenir cette température jusqu'à ce que la phase β soit entièrement dissoute, on obtient ainsi un alliage constitué uniquement de la phase α et de composition C_0 .

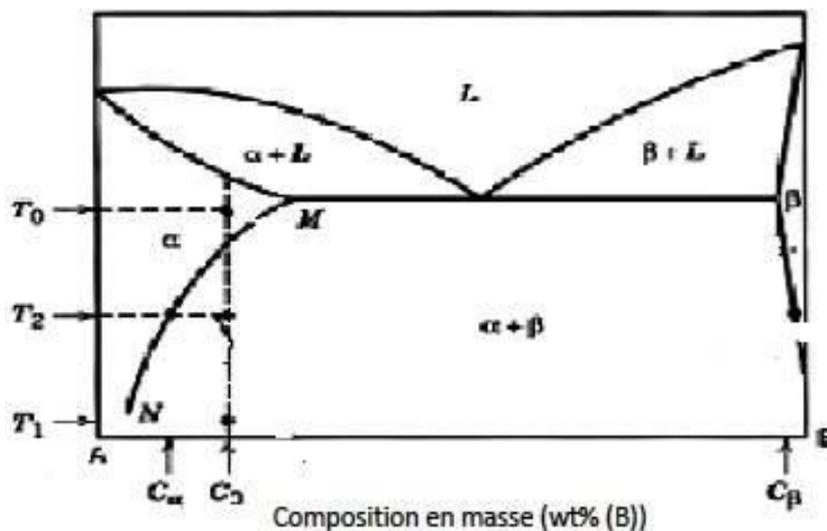


Figure II.16 : Diagramme d'équilibre hypo- eutectique d'un alliage à durcissement structural de composition C_0 [45].

II.10.1.2. La trempe

La trempe est, d'une façon générale, la plus importante étape dans la séquence des opérations de traitement thermique. L'objectif de la trempe est de préserver la solution solide formée à la température de traitement thermique de la solution, par refroidissement rapide à des basses températures, généralement à la proximité de la température ambiante. Cette énonciation ne s'applique pas seulement à maintenir les atomes de soluté dans la solution, mais également pour maintenir un certain nombre de sites vacants dans le réseau. Les atomes de soluté précipités sur les joints de grains, les dispersoïdes, ou d'autres particules, ainsi que les sites vacants qui migrent (avec une rapidité maximale) aux régions désordonnées, sont irrécupérables et perdus et ne contribuent pas à la consolidation.

Dans la plupart des cas, pour éviter ces types de précipitation qui sont préjudiciables aux propriétés mécaniques ou à la résistance à la corrosion, la solution solide formée durant le traitement thermique de la solution doit être trempée assez rapidement (et sans interruption) pour produire une solution sursaturée à température ambiante avec les conditions optimales pour les précipitations de durcissement.

Ainsi, pour éviter la précipitation préjudiciable au cours du refroidissement, deux conditions doivent être satisfaites :

- Tout d'abord, le temps requis pour le transfert de la charge à partir du four au milieu de trempe doit être assez court pour exclure le pré-refroidissement lent dans l'intervalle de température où la précipitation très rapide a lieu. Des erreurs importantes peuvent résulter de l'hypothèse que la précipitation est négligeable en dehors de ce qu'on appelle intervalle critique.
- La deuxième condition est que le volume, la capacité d'absorption de la chaleur, et le taux d'écoulement du milieu de la trempe doivent être tels qu'aucune précipitation ne se produise au cours du refroidissement.

➤ **Influence du temps de transition entre mise en solution et trempe**

Lorsqu'on trempe des produits de faible épaisseur, il y a lieu de tenir compte du temps de transition qui s'écoule entre la sortie du four de mise en solution et l'immersion dans le fluide de trempe. Pendant ce temps de transition, les produits refroidissent généralement à faible vitesse. Si le temps de transition est assez long pour que la température des produits pénètre dans l'intervalle critique, une partie au moins de cet intervalle est parcouru à faible vitesse. Les effets du temps de

transition sont similaires à ceux déjà indiqués concernant la diminution de la vitesse de refroidissement.

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

➤ **L'effet de la vitesse de trempe sur les propriétés mécaniques**

Les effets relatifs des méthodes de trempe peuvent être comparés en termes de vitesse moyenne de trempe.

Les vitesses moyennes de trempe sont utiles pour comparer les résultats expérimentaux des différentes méthodes de trempe. Cependant, les vitesses moyennes de trempe comparent seulement les résultats dans un intervalle de température critique. Cette méthode n'est pas entièrement précise, car une importante précipitation.

Significative peut également se produire en dehors de l'intervalle de la température critique. D'ailleurs, pour les alliages à haute résistance, la dureté et la résistance à la corrosion peuvent être altérées sans perte significative de résistance à la traction.

La vitesse de trempe, suivant la mise en solution, détermine le point auquel les solutés diffusent aux joints de grains, le degré de précipitation au joint de grains. Il est donc un paramètre critique dans le choix du traitement.

II.10.1.3. Vieillessement thermique

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

L'évolution des propriétés mécaniques d'un métal écroui soumis à une température supérieure ou égale à environ $0.5 T_{\text{fusion}}$ par restauration ou recristallisation constitue un exemple typique de vieillissement thermique [46].

➤ **Vieillessement naturel**

Les alliages traités thermiquement voient leurs propriétés changées une fois revenus à la température ambiante après leur traitement thermique. Ceci est appelé vieillissement naturel. Le taux de vieillissement change selon le type d'alliage. Certains alliages de la série 6000 en durcissant, peuvent atteindre une dureté maximale après un mois à la température ambiante.

➤ Vieillessement artificiel

Il consiste en un chauffage à une température au-dessus de la température ambiante, et en a maintien selon les objectifs désirés et la nature du matériau traité. La précipitation s'accélère et la dureté augmente encore par comparaison au vieillissement naturel. Ceci est appelé vieillissement artificiel et il est effectué à des températures allant de 100°C jusqu'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.

II.10.2. Durcissement par écrouissage

L'écrouissage dépend du matériau, de la quantité de déformation appliquée et des conditions de déformation (température, vitesse et mode de déformation).

En particulier, on distingue la déformation à froid (température de déformation inférieure à environ 1/3 de la température absolue de fusion T_f) et la déformation à chaud ($T_{\text{déf}} > T_f/3$). Schématiquement, on peut dire que l'augmentation de la température facilite la déformation. Les relations entre la déformation appliquée et la contrainte s'appellent les lois de l'écrouissage, de l'écoulement ou du comportement.

Elles dépendent étroitement des mécanismes fondamentaux de la déformation plastique en relation avec les évolutions de la microstructure à l'intérieur des grains.

Les procédés de mise en forme sont très largement directionnels : les propriétés évoluent différemment suivant la direction de sollicitation (par exemple en filage : la direction de filage).

Ainsi, la microstructure acquiert une orientation préférentielle, appelée texture, de plus importante à mesure que la déformation augmente.

L'écrouissage crée de nombreux défauts cristallins, sources d'une énergie interne stockée hors d'équilibre, et qui peuvent éventuellement être annihilés par des traitements thermiques à température élevée afin de restaurer les propriétés initiales.

On désigne habituellement deux stades dans ce processus :

- ✓ La restauration proprement dite qui permet un adoucissement du matériau par le réarrangement et l'annihilation, en général partielle, des défauts cristallins ;
- ✓ La recristallisation au cours de laquelle les défauts sont éliminés par migration des joints de grains sur des distances relativement importantes. La recristallisation donne lieu à une évolution

rapide et profonde de la structure granulaire et contrôle en grande partie la taille des grains du matériau. En général, elle dépend des mêmes paramètres que l'écroutissage qui la précède car elle est gouvernée par les mêmes microstructures de déformations.

Dans le cas des alliages d'aluminium, la restauration dynamique peut commencer à la température ambiante mais la recristallisation dynamique est peu fréquente, même à des températures proches de la température de fusion.

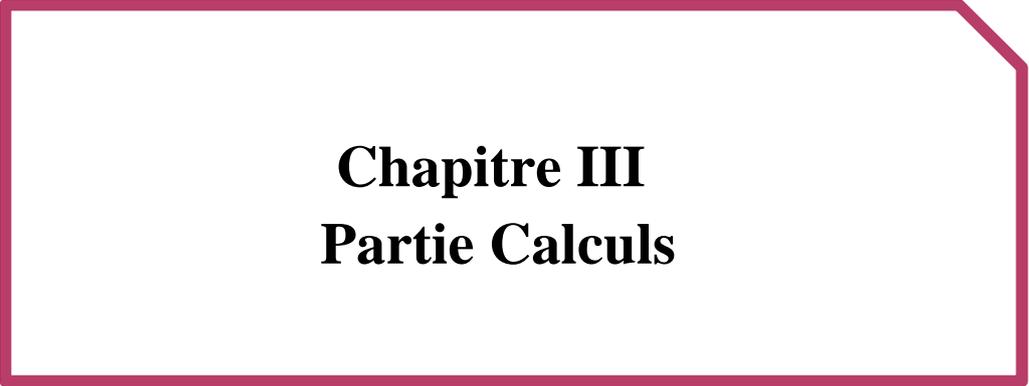
II.10.3. Durcissement par addition

Les atomes étrangers, ou éléments d'addition peuvent être en solution solide de substitution et prennent la place d'un atome d'aluminium dans le réseau. Comme cet atome étranger est plus petit ou plus gros que l'atome d'aluminium, il perturbe le réseau qui devient ainsi plus difficile à déformer.

Si l'élément étranger n'est pas en solution solide, il forme aussi des perturbations dans le réseau comme les précipités qui ont le même effet de difficulté de déformation. Cette dernière est plus importante en cas de précipités incohérents. La résistance mécanique du métal sera d'autant plus grande que le nombre et l'importance de ces perturbations seront plus grands. Cependant il faut noter que la teneur en élément d'addition est le plus souvent limitée par d'autres considérations que la résistance mécanique : difficultés de transformations (alliage à plus de 5% de magnésium), mauvaise résistance à la corrosion (alliage à haut teneur en Zinc – Cuivre) [47].

II.11. Conclusion du chapitre II

Les propriétés mécaniques des alliages sont d'un grand intérêt, puisqu'elles conditionnent non seulement les problèmes de mise en forme des matériaux, mais également leurs comportements en service dans des applications industrielles extrêmement diversifiées. On présente les comportements mécaniques des alliages d'aluminium. Ainsi que les différents essais, qui nous permettent la détermination des propriétés mécaniques avec leurs courbes d'analyse.



Chapitre III
Partie Calculs

III.1. Introduction

Les essais sur un matériau apportent des renseignements précis et fiables sur ses qualités et ses performances. Il en existe un grand nombre, standardisé par des normes internationales, dont les principaux essais mécaniques sont (traction, dureté, résilience).

Dans ce chapitre nous nous intéressons aux essais les plus fondamentales (traction, dureté, résilience) dans un alliage d'aluminium : alliage 6005 A, pour trouver les meilleurs résultats.

Malgré le manque de l'expérience, on a tenté par les méthodes de calculs.

III.2. L'alliage Aluminium-Magnésium - Silicium série 6000

Les alliages de la série 6000, dont les principaux éléments d'addition sont le magnésium (0.4- 1.4) et silicium (0.4- 1.3 en poids), sont traitable thermiquement. Ses alliages sont très utilisés en extrusion des profilés, vue leurs bonnes aptitude à l'extrusion et la résistance à la corrosion. Les éléments d'addition secondaires sont le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le fer (Fe) et le cuivre en petites quantités, les alliages de la série 6000 peuvent être traités pour améliorer la résistance soit thermiquement par la formation des dispersoïdes sous forme de précipité Mg_2Si , ou mécaniquement par la réduction de la taille de grain, [48]. Le système ternaire Aluminium-Silicium-Magnésium est à la base de plusieurs alliages sensibles aux traitements thermiques. Le diagramme de phase obtenu à l'équilibre peut être relativement simplifié si on le considère comme étant binaire c'est-à-dire : aluminium et Mg_2Si , pour une proportion de magnésium - silicium voisine de 1.73 pour 1.



Figure III.1 : série 6000 (alliage d'aluminium) [49].

III.2.1. L'alliage 6005 A

L'alliage d'aluminium 6005A est un alliage de la famille aluminium-magnésium-silicium corroyé (séries 6000 ou 6xxx). Il est étroitement lié, mais pas identique, à l'alliage d'aluminium 6005. Entre ces deux alliages, le 6005A est plus fortement allié, mais la différence n'a pas d'impact marqué sur les propriétés du matériau.

Il peut être formé par extrusion, forgeage ou laminage, mais en tant qu'alliage corroyé, il n'est pas utilisé dans le moulage. Il ne peut pas être écroui, mais est généralement traité thermiquement pour produire des trempes avec une résistance plus élevée au détriment de la ductilité.

Il existe deux types d'alliage d'aluminium :

III.2.1.1. L'alliage d'aluminium 6005-T5

L'aluminium 6005-T5 est de l'aluminium 6005 à l'état T5. Pour obtenir cette trempe, le métal est vieilli artificiellement jusqu'à ce qu'il réponde aux exigences de propriété mécanique standard. Il a la ductilité la plus faible par rapport aux autres variantes d'aluminium 6005.

Les barres du graphique sur les cartes de propriétés des matériaux ci-dessous comparent l'aluminium 6005-T5 à : les alliages de la série 6000 (en haut), tous les alliages d'aluminium (au milieu) et l'ensemble de la base de données (en bas). Une barre pleine signifie qu'il s'agit de la valeur la plus élevée de l'ensemble correspondant. Une barre à moitié pleine signifie qu'elle est à 50 % de la valeur la plus élevée, et ainsi de suite.

III.2.1.2. L'alliage d'aluminium 6005-T6

L'aluminium 6005-T6 est de l'aluminium 6005 à l'état T6. Pour obtenir cette trempe, le métal est traité thermiquement en solution et vieilli artificiellement jusqu'à ce qu'il réponde aux exigences de propriété mécanique standard.

Il a la deuxième résistance la plus élevée et la deuxième ductilité la plus faible par rapport aux autres variantes d'aluminium 6005.

Les barres du graphique sur les cartes de propriétés des matériaux ci-dessous comparent l'aluminium 6005-T6 à : les alliages de la série 6000 (en haut), tous les alliages d'aluminium (au milieu) et l'ensemble de la base de données (en bas). Une barre pleine signifie qu'il s'agit de la valeur la plus élevée de l'ensemble correspondant. Une barre à moitié pleine signifie qu'elle est à 50 % de la valeur la plus élevée, et ainsi de suite [50].

III.2.1.3. L'aluminium 6005-T5 contre l'aluminium 6005-T6

L'aluminium 6005-T5 et l'aluminium 6005-T6 sont des variantes du même matériau. Ils partagent la composition de l'alliage et de nombreuses propriétés physiques, mais développent des propriétés mécaniques différentes à la suite de différents traitements.

Pour chaque propriété comparée, la barre supérieure est en aluminium 6005-T5 et la barre inférieure est en aluminium 6005-T6 [50].

III.3. Composition chimique

La composition de l'alliage d'aluminium 6005A est :

Tableau III.1 : Composition chimique d'alliage 6005 A [51].

Cr	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Cu	Al
0.30	0.35	0.4-0.7	0.50	0.5-0.9	0.1	0.2	0.3	Le reste

III.4. Utilisation d'aluminium 6005 A

Même si les aciers sont les matériaux les plus utilisés dans l'industrie automobile, les besoins récents de véhicules dont le degré de sécurité et de confort est très élevé pour une consommation en carburant réduite font des alliages d'aluminium des candidats naturels. En effet, ils peuvent posséder des caractéristiques mécaniques excellentes pour une masse plus faible. Le marché de l'automobile représente donc pour les fabrications d'aluminium un marché important, dont les potentialités sont plus grandes encore.

Il a été resurgi des recherches intéressantes sur les alliages d'aluminium dans les récentes années, peut-être du aux grandes demandes de l'utilisation des matériaux légers dans l'industrie d'automobile. Les alliages d'aluminium ont une importance spéciale pour les panneaux externes d'automobile, où la haute résistance et la résistance de bosselure sont exigées et pour les amortisseurs, où la bonne résistance et le choc d'absorption sont nécessaires [52].

L'alliage 6005A trouvant généralement une application dans les extrusions complexes comme : pylônes, plate-forme et pipelines, échelles portables. En structures pour bâtiment, produits laminés d'usage générale (barres étirées, tubes filés, barres filées...) [53].

III.5. Equivalences Internationales d'alliage 6005 A

Tableau III.2 : équivalence de la nuance d'alliage d'aluminium 6005 AA [54].

USA AA	Espagne UNE	France AFNOR	Allemagne DIN (1712-1725)	GB BS	Suède SIS	Suisse VSM	Canada ALCAN	Italie UNI
6005A	L-3454	A-SG0.5	AlMgSi0.7	H10	-	-	51S	-

III.6. Résultat des calculs sur l'alliage AA 6005

III.6.1. Résultat d'essai de traction

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

Il consiste à exercer sur une éprouvette normalisée, cylindrique ou plate, deux actions mécaniques et opposées qui vont la déformer progressivement puis le rompre.

L'éprouvette est tenue en deux points (par une pince ou un crochet).

Ces essais permettent de tracer une courbe de traction à partir de laquelle les caractéristiques mécaniques [55].

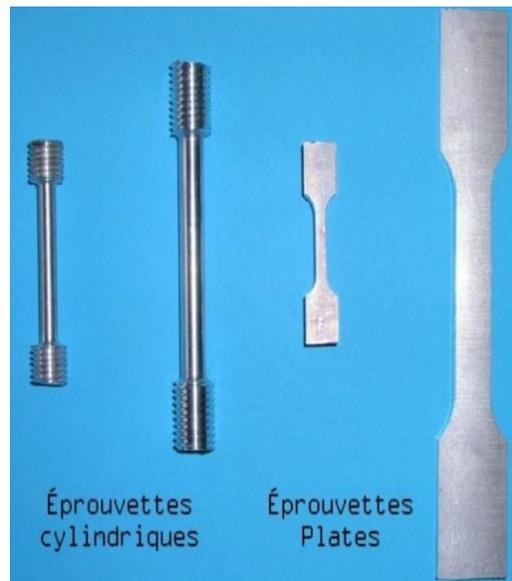


Figure III.2 : Éprouvette normalisées de traction [56].

III.6.1.1. Principe

L'éprouvette est allongée le long de son axe principal à une vitesse constante jusqu'à sa rupture ou jusqu'à ce que la contrainte (charge) ou la déformation ait atteint une valeur prédéterminée [55].



Figure III.3 : Essai de traction [57].

III.6.1.2. Donnée d'alliage 6005 A

Les données enregistrées dans le (tableau III.3) ci-dessous sont théorique :

Tableau III.3 : Déterminés les paramètres et les propriétés mécaniques de l'alliage AA 6005 [58] [59].

Alliage	Eprouvette	Rm (MPa)	Re (MPa)	A	n	E (GPa)
AA 6005	Avant déformation	260 - 285	200 - 215	12	0.24	70
	Après déformation	322	250	9	0.24	70

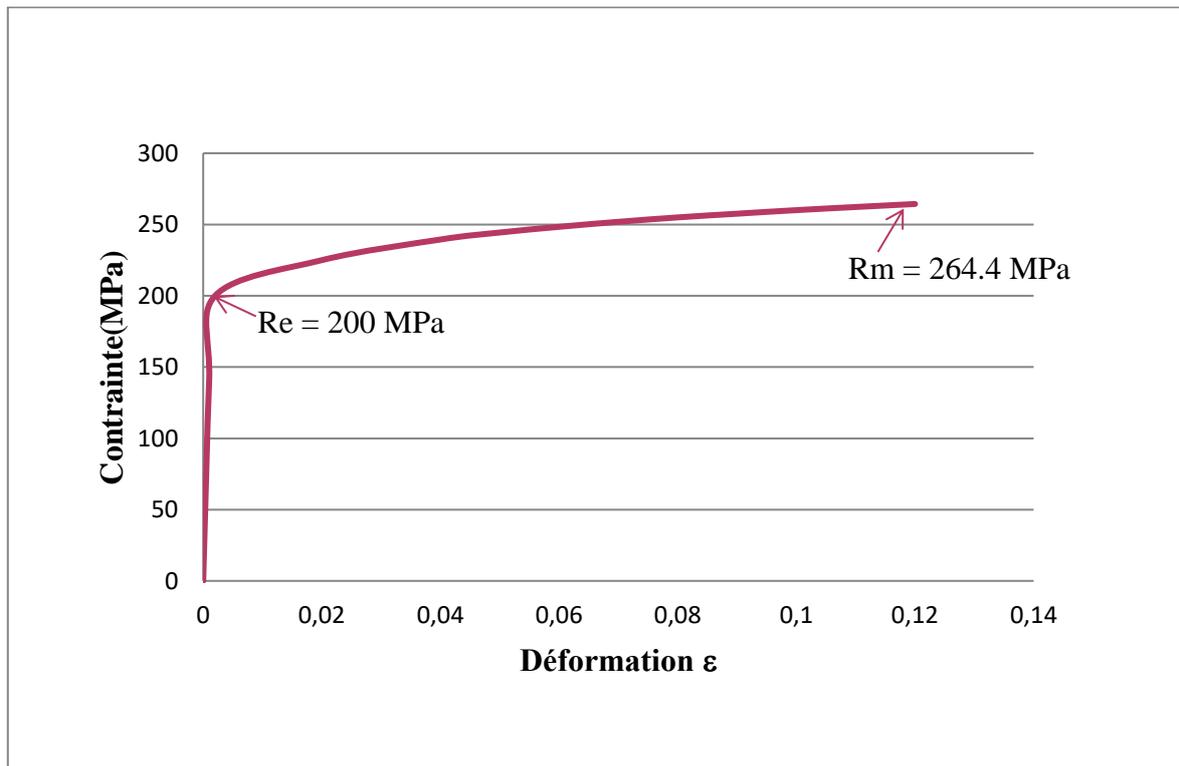


Figure III.4 : Courbe rationnelle de traction de l'alliage AA 6005 avant déformation.

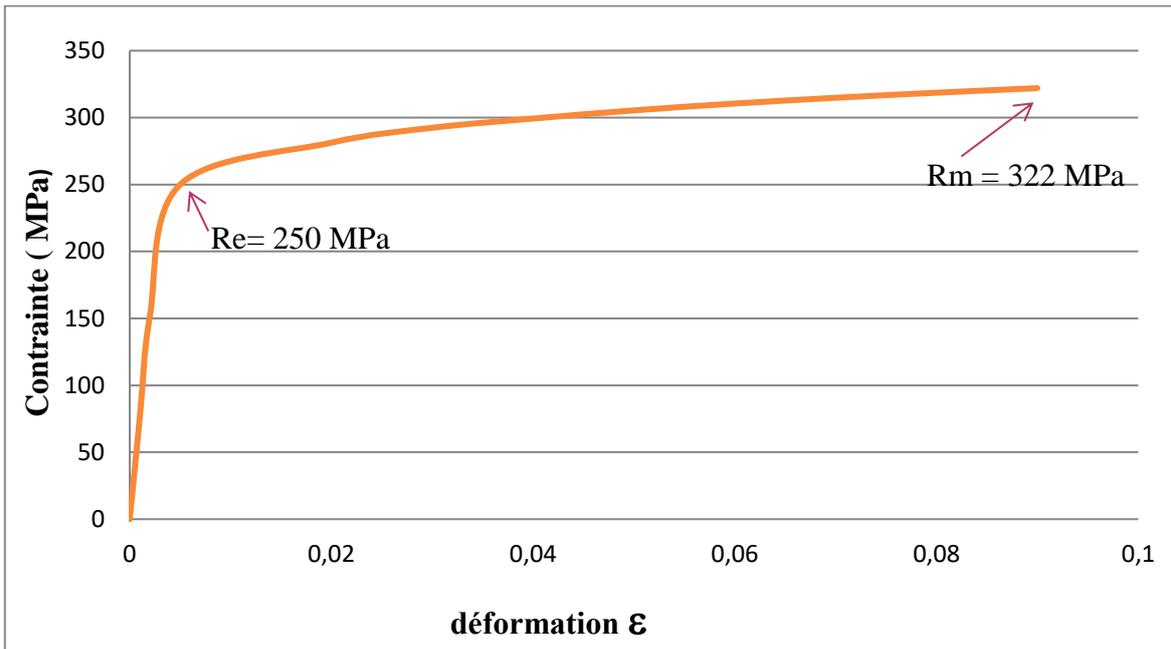


Figure III.5 : Courbe rationnelle de traction de l'alliage AA 6005 après déformation.

III.6.2. Résultat d'essai de dureté

La dureté quantifiée résistance d'un matériau à la pénétration sous une certaine charge F , est une propriété mécanique qui dépend non seulement des caractéristiques de matériau, mais aussi de la nature et de la forme de pénétrateur et du mode de pénétration. Donnée en méga-pascal (MPa) puisqu'elle est le rapport d'une force en Newton (N) sur une surface calculée en millimètres carrés (mm^2) [27].

III.6.2.1. Donnée d'essai de dureté

Tableau III.4 : paramètre de la dureté BRINELL d'alliage AA 6005 [60].

Alliage	Eprouvette	HB
AA 6005	Avant	90
	Après	120

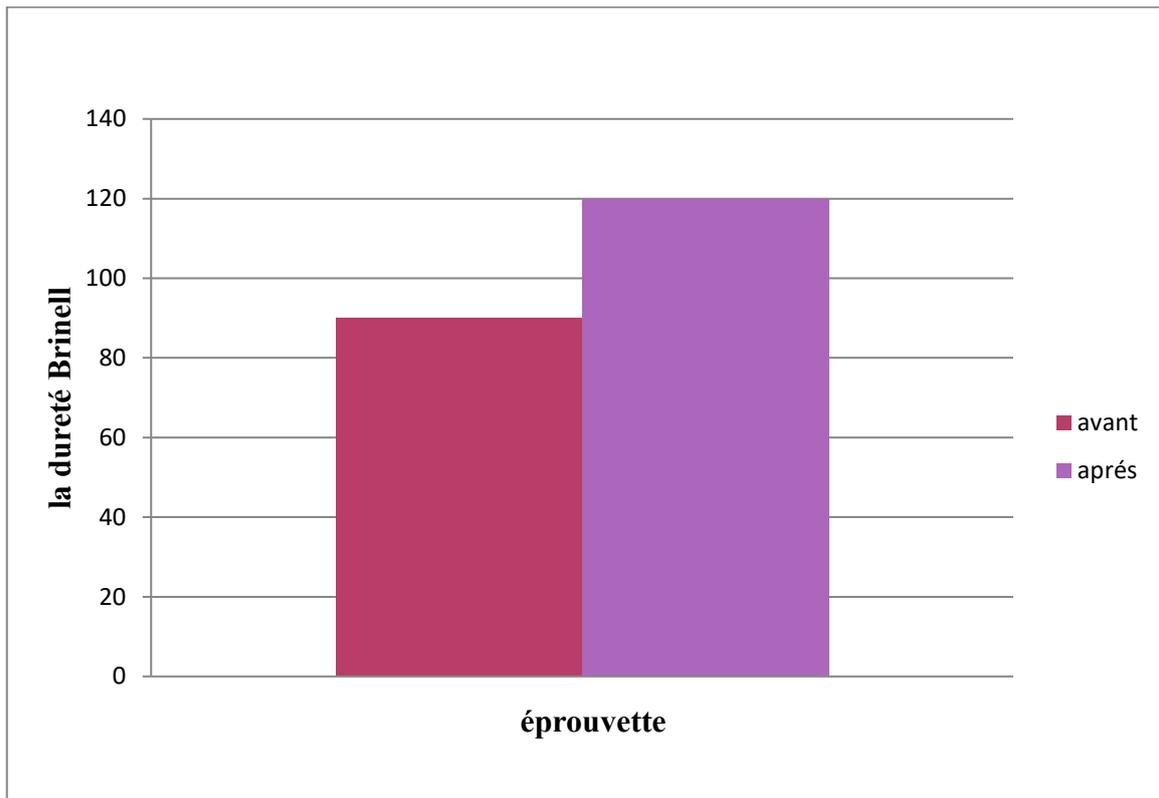


Figure III.6 : Histogramme d'essai de dureté Avant et Après déformation.

III.6.3. Résultat d'essais de résilience

III.6.3.1. Donnée d'essai résilience

Tableau.III.5 : Kv et Kcv moyenne de la resiliance [61].

Epreuve	KV	KCV
1	141.5	176.3
2		
3		
4		

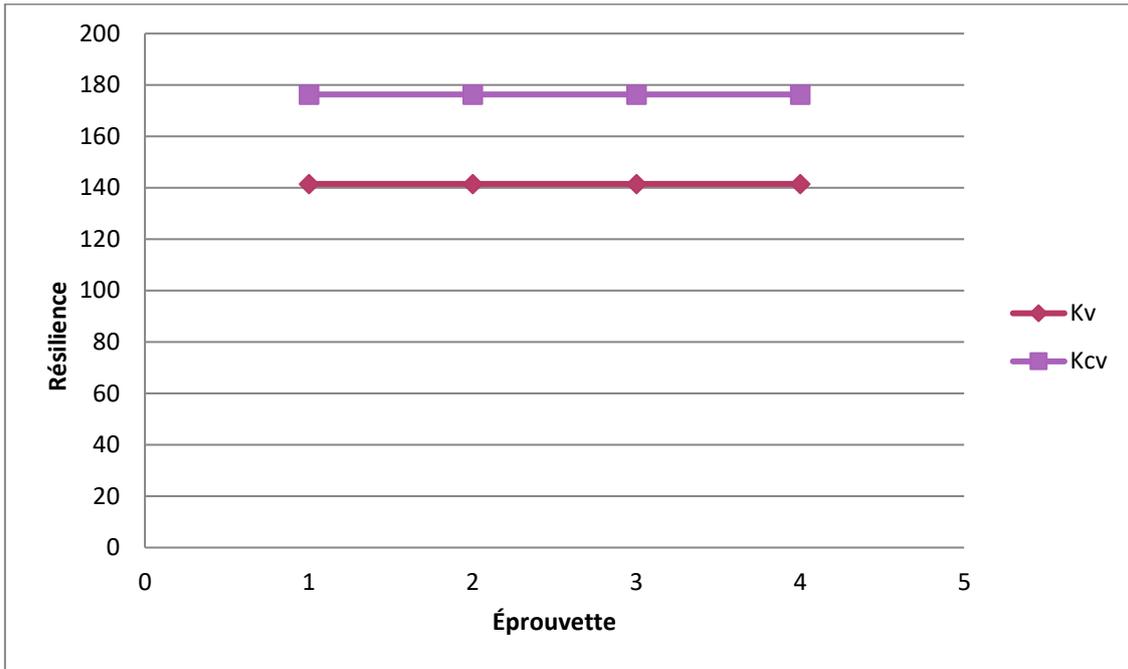


Figure III.7: Courbe rationnelle d'essai de resilience.

III.7. Méthode comptage de nombre des grains à partir d'un alliage 6005 A

Le volume moyen des cristaux, c'est-à-dire la grosseur de grain d'un matériau métallique, peut être caractérisée par différentes grandeurs conventionnelles déduites de l'observation d'une coupe plane du matériau préparée pour faire apparaître les contours des cristaux par le plan de coupe

Les méthodes de détermination de ces grandeurs sont purement géométriques. Il en résulte qu'elles sont absolument indépendantes du métal ou de l'alliage considéré. Ces grandeurs conventionnelles sont :

Nombre de grains par unité d'aire de la surface de l'éprouvette (m) : l'unité d'aire est le mm^2

Aire moyenne du grain (a) :

$$a = 1/m \text{ mm}^2 \quad (\text{III.1})$$

Taille moyenne du grain (d_m) ou diamètre moyen du grain :

$$d_m = \sqrt{a} = 1/\sqrt{m} \quad (\text{III.2})$$

Longueur moyenne d'intersection (L) : Quotient de la longueur totale d'un ou plusieurs segments tracés sur l'image de l'éprouvette par le nombre de grains dénombrés sur ces lignes.

Indice conventionnel de grosseur de grain : nombre sans dimension relié à m par une relation mathématique et des règles d'application pouvant différer d'un métal à l'autre ces indices sont désignés par G suivi d'une lettre propre à chaque système.

La grosseur moyenne est caractérisée soit par G , soit par L dans les cas les plus fréquents.

III.8. Méthode par comptage

III.8.1. Comptage du nombre grains

Le grossissement est choisi de tel sort que le nombre minimal de grains soit de 50.

Pour un grossissement linéaire g , la superficie de l'éprouvette correspondant à l'aire du cercle est :

$$S = \frac{5000}{g} \text{ mm}^2$$

n_T = nombre de grains dans la circonférence tracée.

n_1 = nombre de grains complètement à l'intérieure.

n_2 = nombre de grains coupés par circonférence (arrondi au nombre supérieur si n_2 est impair) [62].

$$\mathbf{n_T = n_1 + \frac{n_2}{2}} \quad \text{(III.3)}$$

$$n_1 = 12 \quad , \quad n_2 = 18/2 = 9 \quad \Rightarrow \quad n_T = 21$$

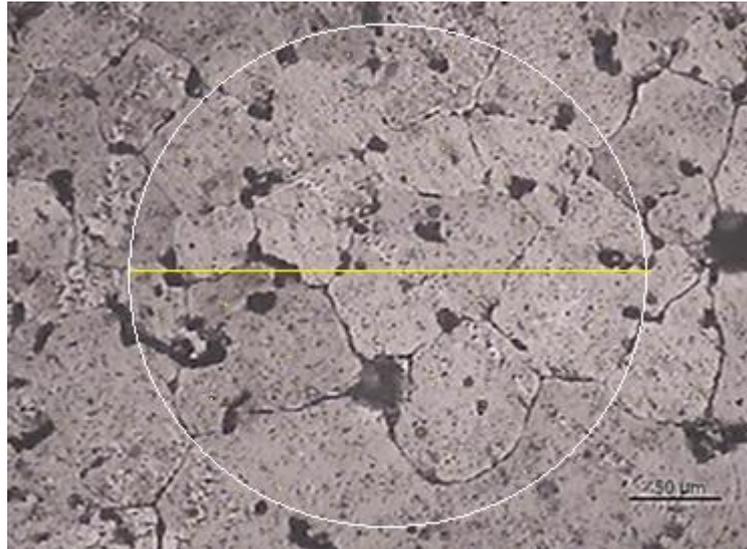


Figure III.8 : Microstructure obtenue par M.O de l'alliage étudié à l'état de réception [2].

Détermination du nombre m .

$$m = 2 \times \left(\frac{g}{100}\right)^2 \times n_T \quad (\text{III.4})$$

Détermination de d_m

$$d_m = \frac{1000}{\sqrt{m}} \text{ en } \mu\text{m} \quad (\text{III.5})$$

Tableau III.6 : Nombre des grains et diamètre moyen de la microstructure d'alliage 6005 A.

Alliage 6005 A	n_1	n_2	n_T	D (mm)
	12	18	21	60

Tableau III.7 : Résultat obtenue sur l'alliage 6005 A.

Alliage 6005 A	Surface vrai mm^2	Grossissement	Nombre de grain par unité d'air (m) mm^2	Taille moyen de grain d_m (μmm)	Air moyenne de grain (a) mm^2
	5538.96	1	0.004	0.154	250

La méthode de comptage des grains de la microstructure de l'alliage (AlMgSi), utilise un contour circulaire appliquée sur l'image micrographique. Les méthodes de détermination de ces grandeurs sont purement géométriques. Finalement les tailles moyennes des grains sont bien déterminées. Tableau (III.7).

III.9. Initiation à la simulation numérique par la méthode des éléments finis avec FreeCAD

III.9.1. A propos de FreeCAD

FreeCAD est un modéleur paramétrique 3D de CAO d'utilisation générale. FreeCAD est directement destiné à l'ingénierie mécanique et à la conception de produits mais s'adapte également à une gamme plus large d'utilisations autour de l'ingénierie, comme l'architecture, l'analyse par éléments finis, l'impression 3D et d'autres tâches.

FreeCAD propose des fonctionnalités similaires à CATIA, [63] ou Solid Edge. Il vise la conception paramétrique avec une architecture modulaire qui permet l'ajout facile de fonctionnalités supplémentaires sans modifier le cœur du programme.

FreeCAD est aussi multiplateforme, et fonctionne présentement parfaitement sous Windows, Linux/Unix et Mac OSX, avec la même apparence et les mêmes fonctionnalités sous toutes les plateformes [63].

L'atelier FEM fournit un flux de travail moderne d'analyse par éléments finis (FEA) pour FreeCAD. Cela signifie principalement que tous les outils permettant d'effectuer une analyse sont combinés dans une seule interface utilisateur graphique (GUI).

Les étapes pour effectuer une analyse d'éléments finis sont les suivantes :

1. Prétraitement : configuration du problème d'analyse.
2. Modélisation de la géométrie : création de la géométrie avec FreeCAD, ou importation depuis une autre application.
3. Créer une analyse.
 - ❖ Ajout de contraintes de simulation telles que des charges et des supports fixes au modèle géométrique.
 - ❖ Ajout de matériaux aux parties du modèle géométrique.
 - ❖ Créer un maillage d'éléments finis pour le modèle géométrique, ou l'importer d'une autre application.
4. Résolution : exécution d'un solveur externe à partir de FreeCAD.

5. Post-traitement : visualiser les résultats de l'analyse depuis FreeCAD, ou exporter les résultats pour qu'ils puissent être post-traités avec une autre application.

III.9.1.1. Resultat du simulation d'éprouvette de traction

Tableau III.8 : Données mécaniques et géotechniques des éprouvettes de traction.

Données géométriques des éprouvettes de traction			
Longueur initiale L_0 (mm)	Largeur l_0 (mm)	Epaisseur e_0 (mm)	
80	40	4	
Données mécaniques des éprouvettes de traction			
Contrainte Appliquée (MPa)	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Densité (Kg.m ⁻³)
300	70	0,33	2700

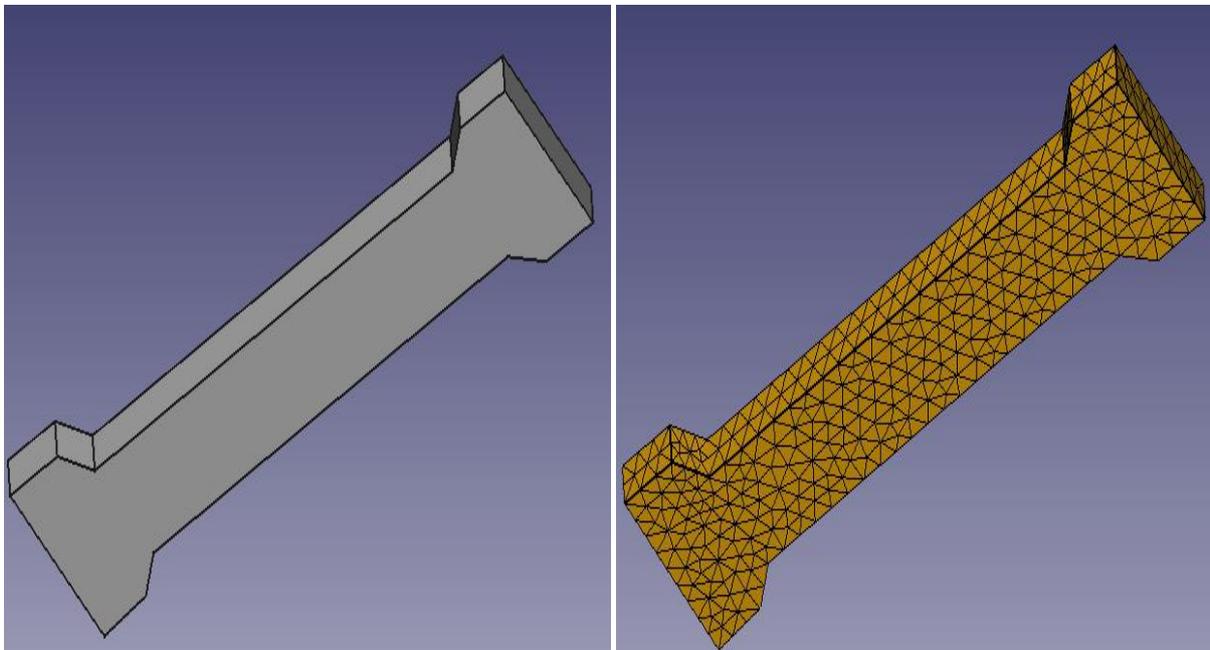


Figure III.9: éprouvette de traction et son maillage.

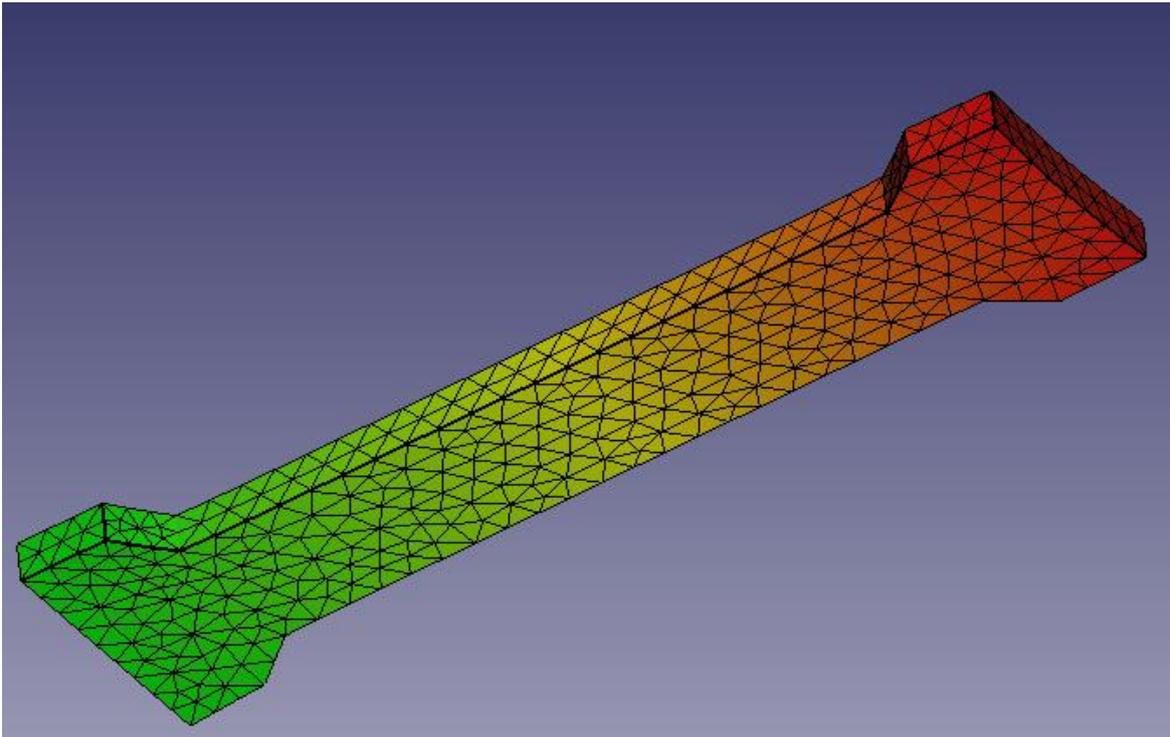


Figure III.10: Déplacement à amplitude de 20%.

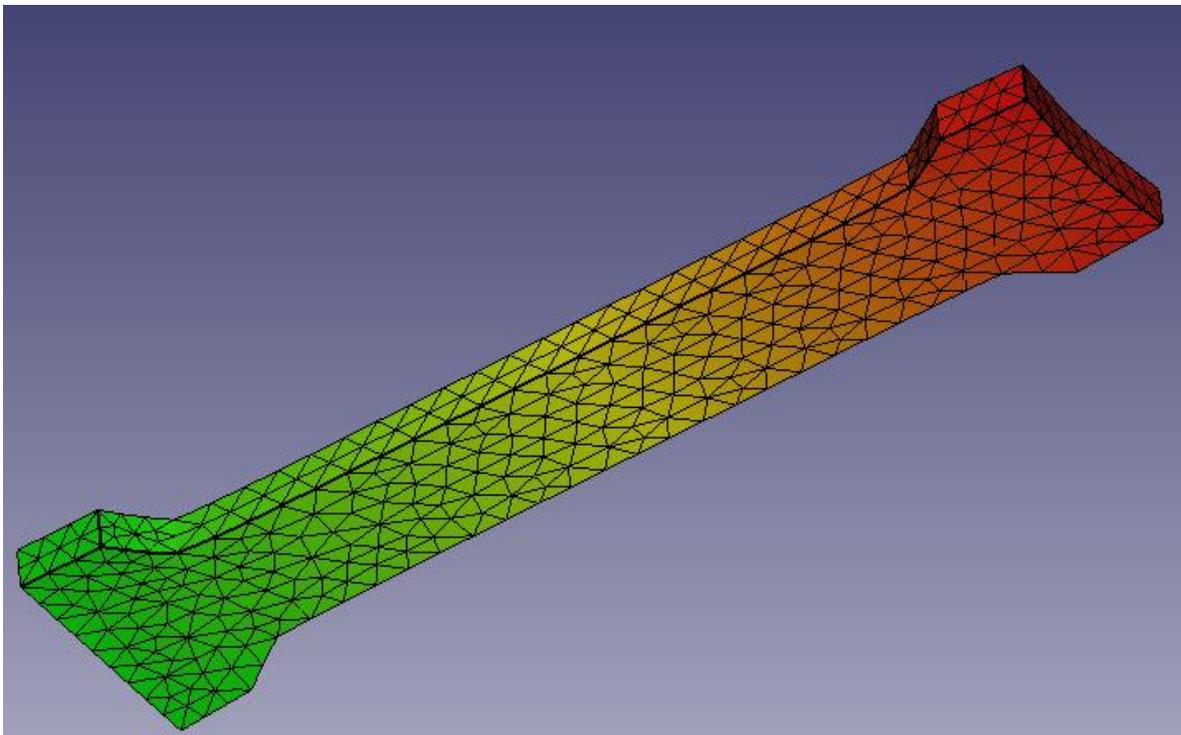


Figure III.11: Déplacement à amplitude de 30%.

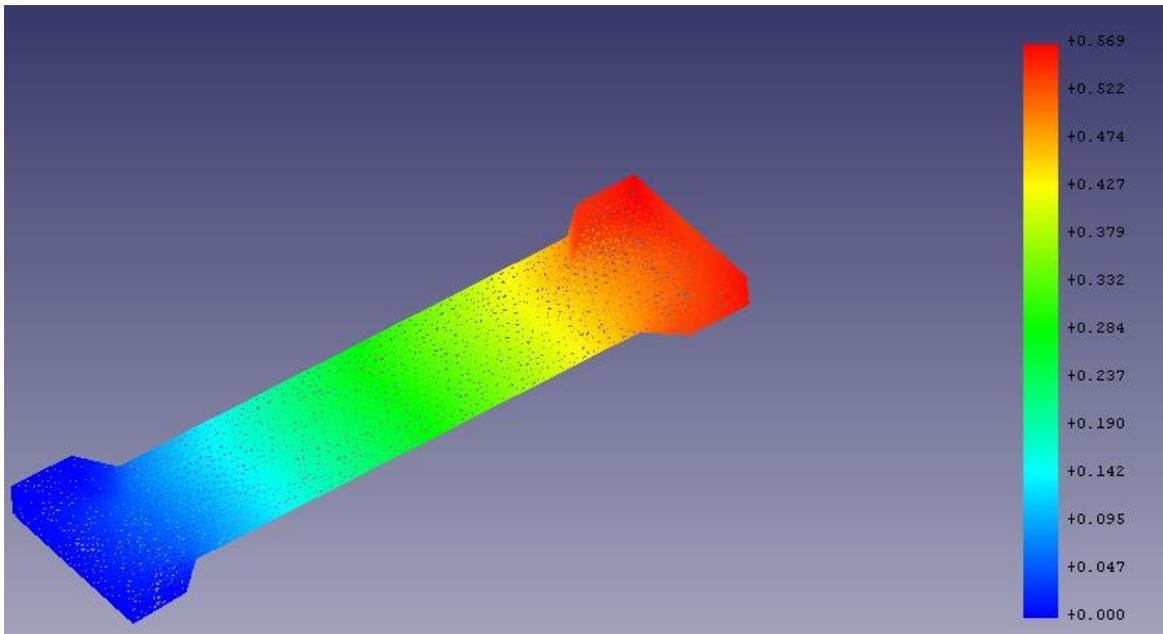


Figure III.12: Déformation maximale de l'éprouvette.

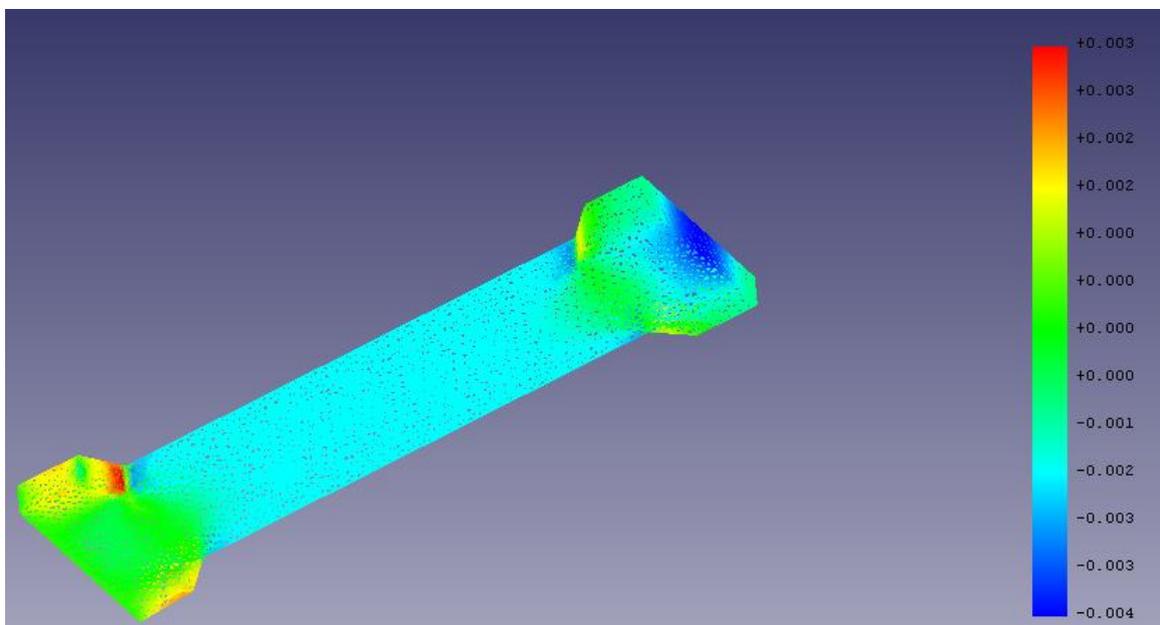


Figure III.13 : Déformation de l'éprouvette suivant l'axe XX.

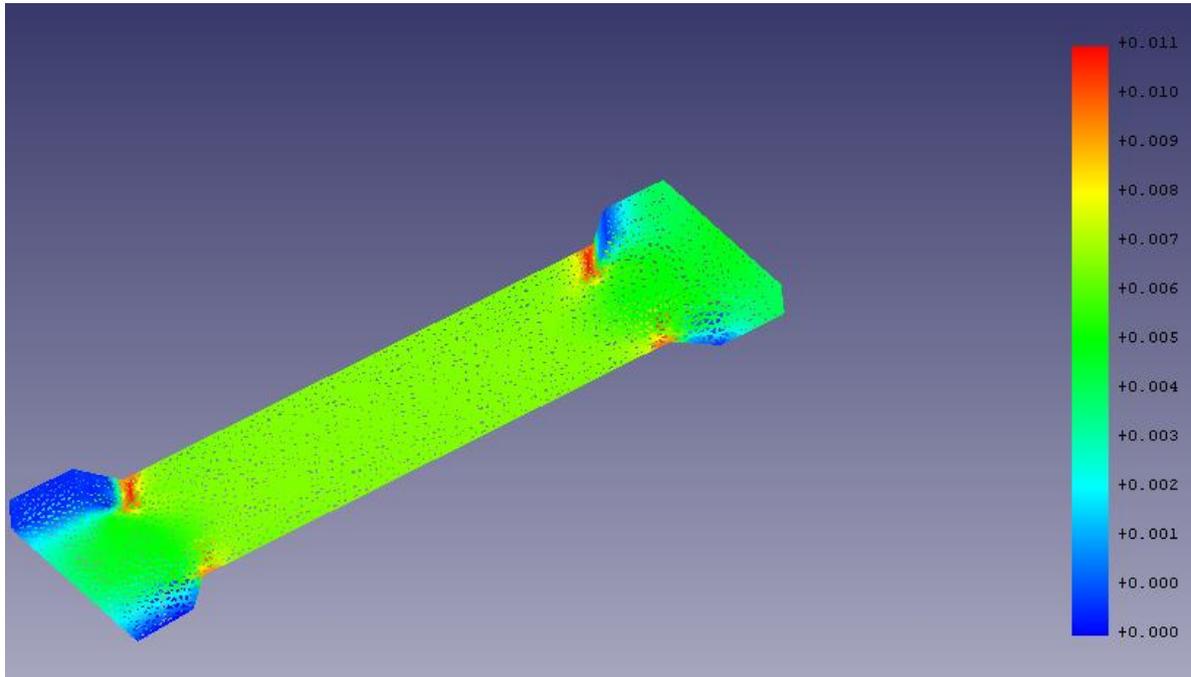


Figure III.14 : Déformation de l'éprouvette suivant l'axe YY.

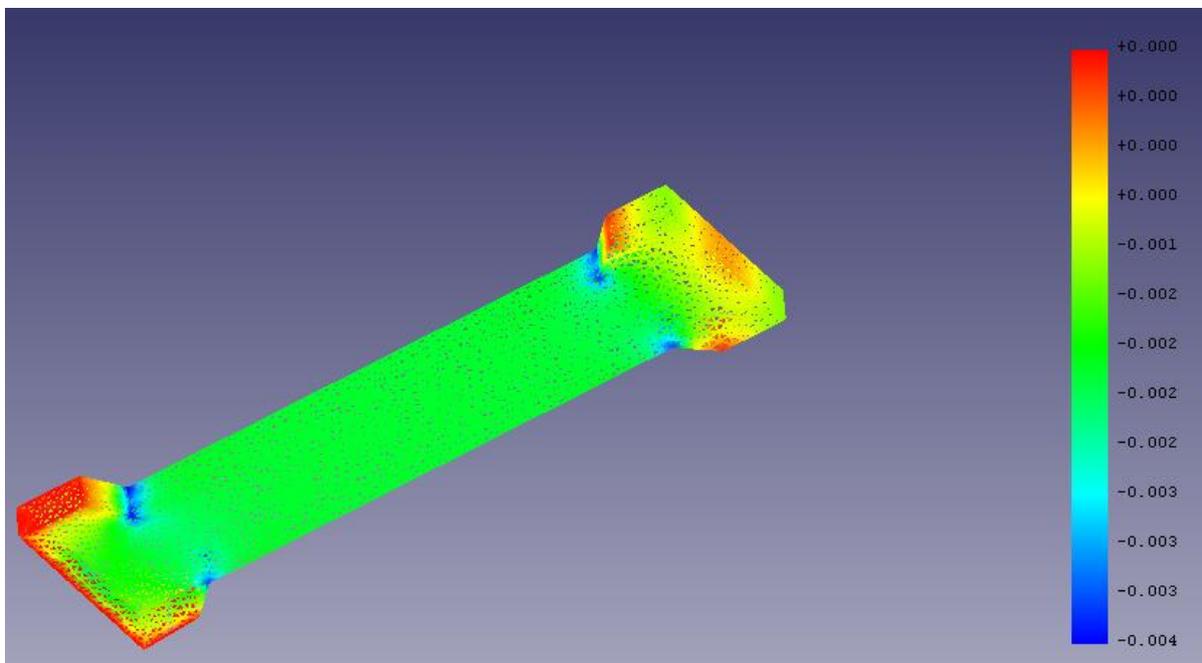


Figure III.15: Déformation de l'éprouvette suivant l'axe ZZ.

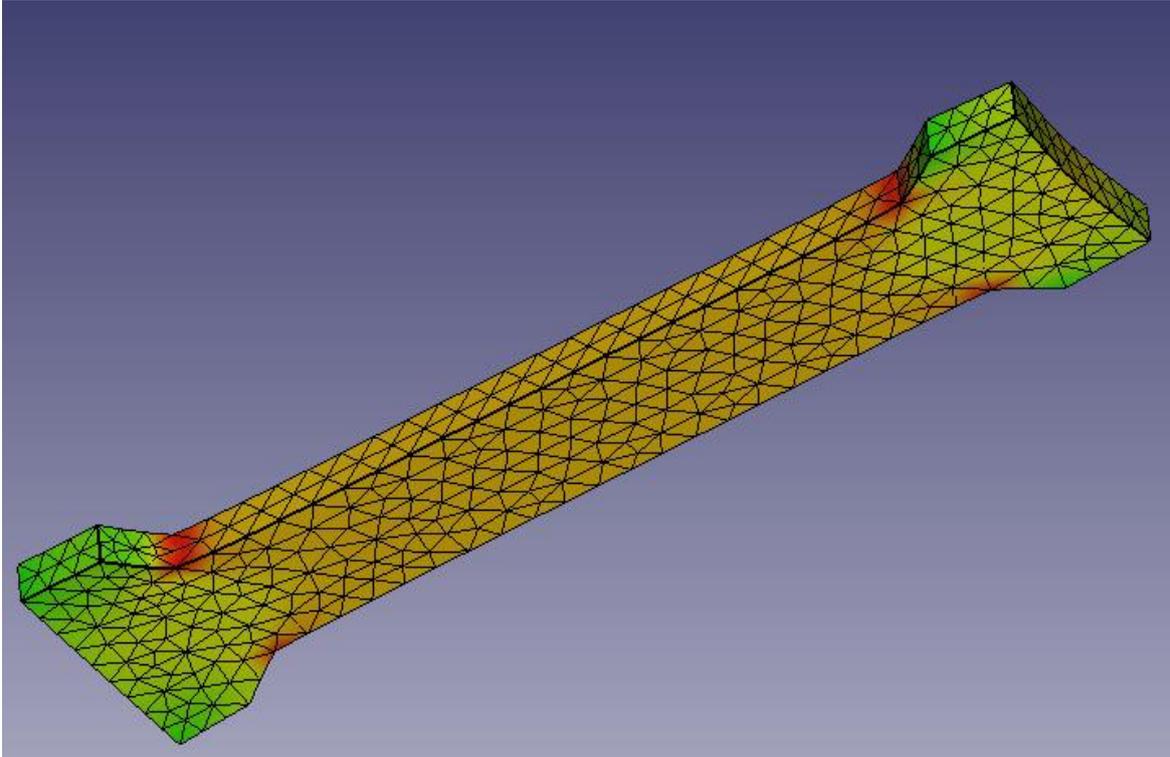


Figure III.16 : Contrainte de Von Mises à 20 % de déformation.

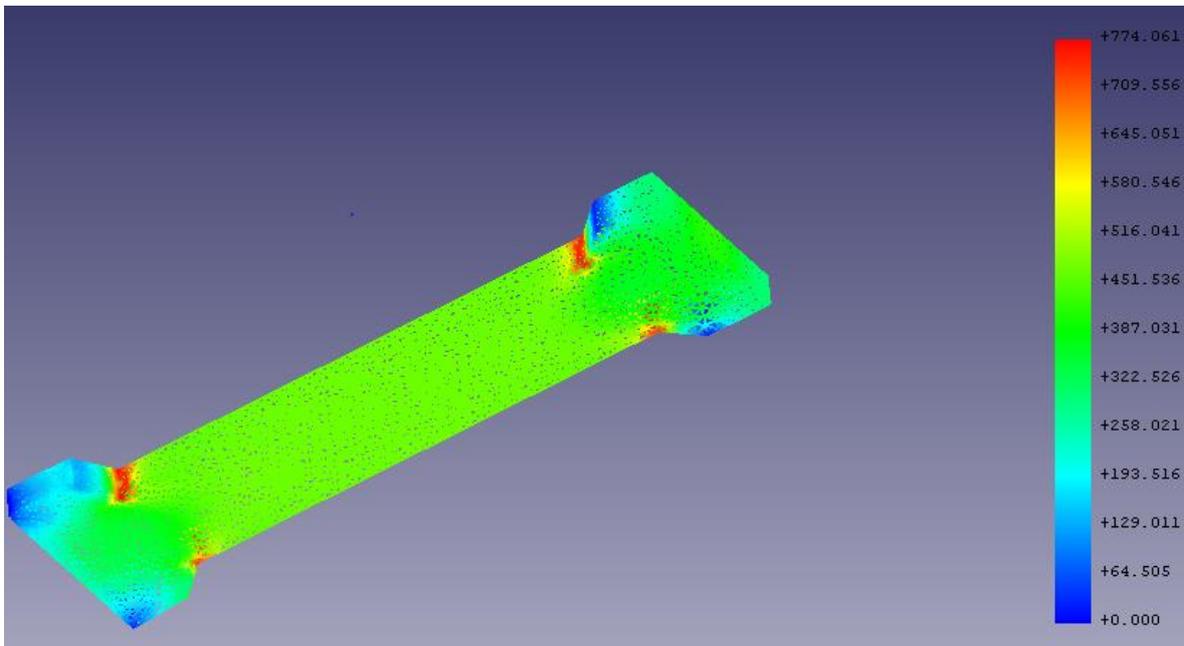


Figure III.17 : Contrainte maximale de Von Mises de 20% de déformation.

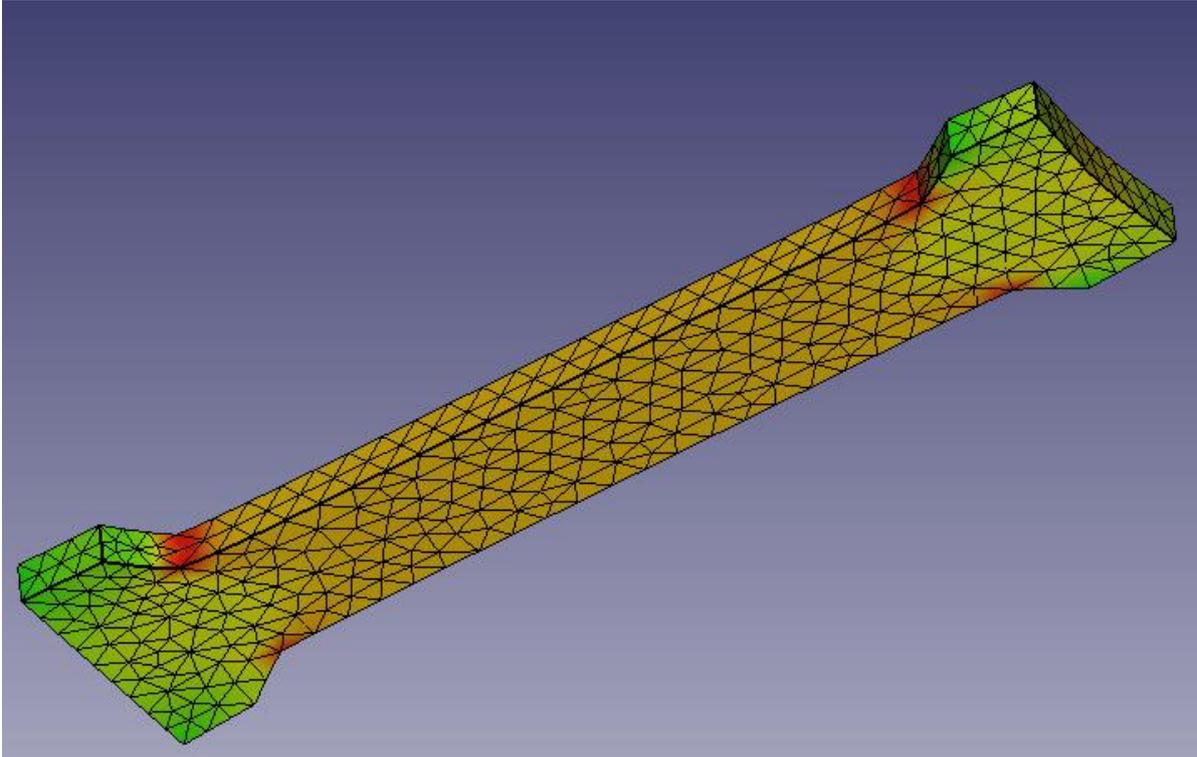


Figure III.18: Contrainte de Von Mises à 30% de deformation.

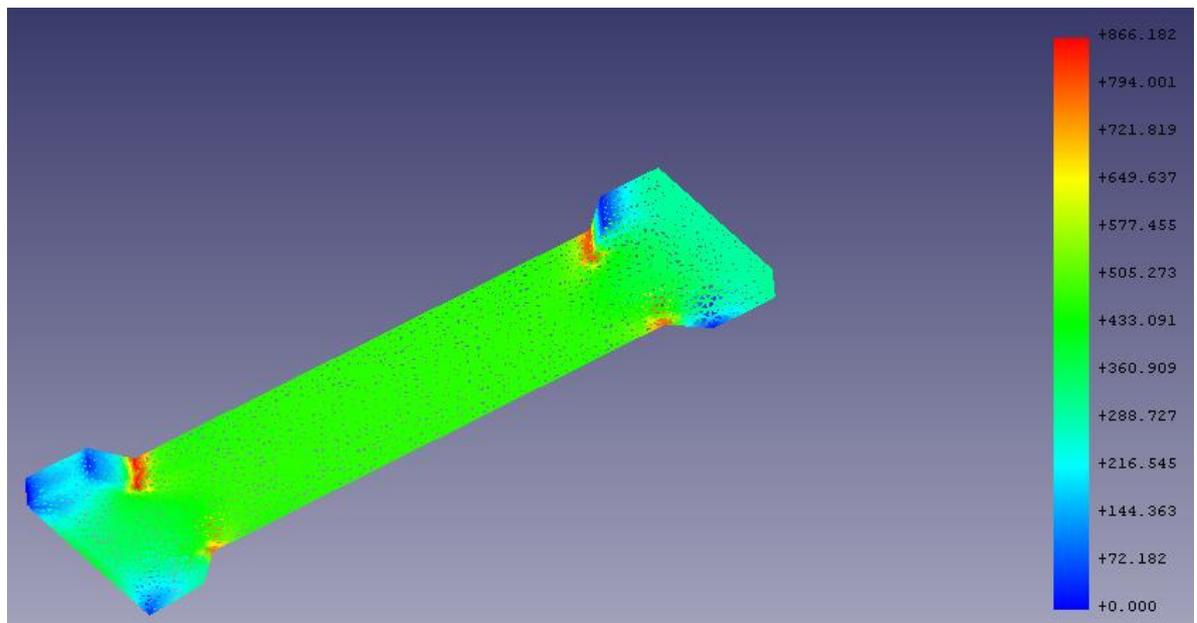


Figure III.19: Contrainte maximale de 20% de deformation.

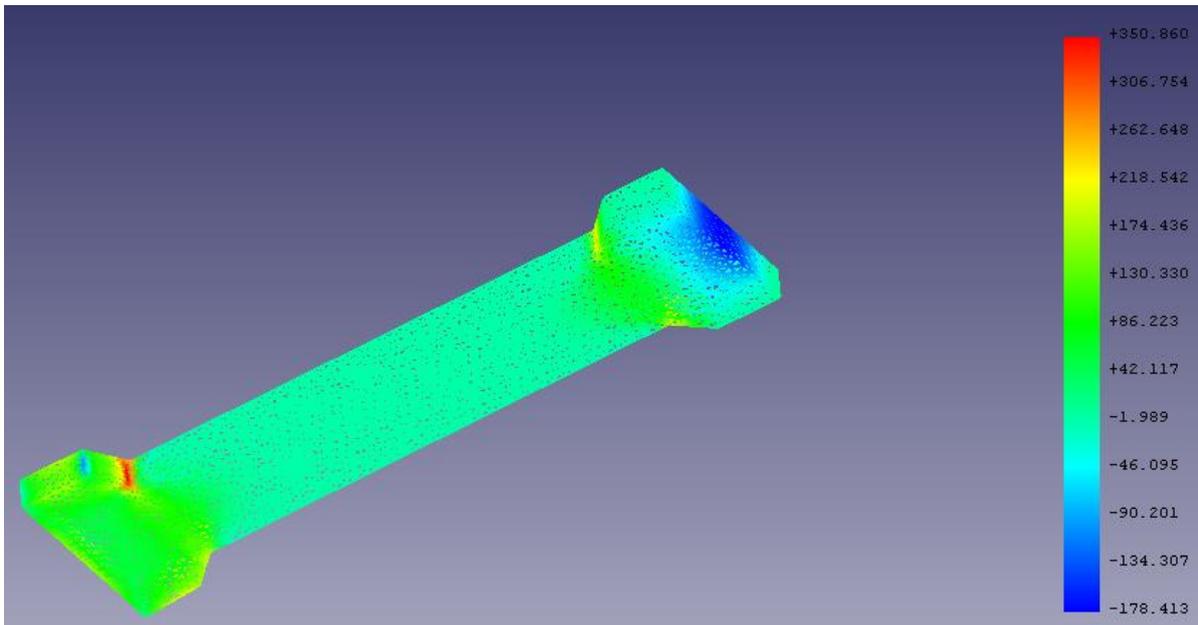


Figure III.20: Contrainte suivant l'axe XX (σ_{XX}).

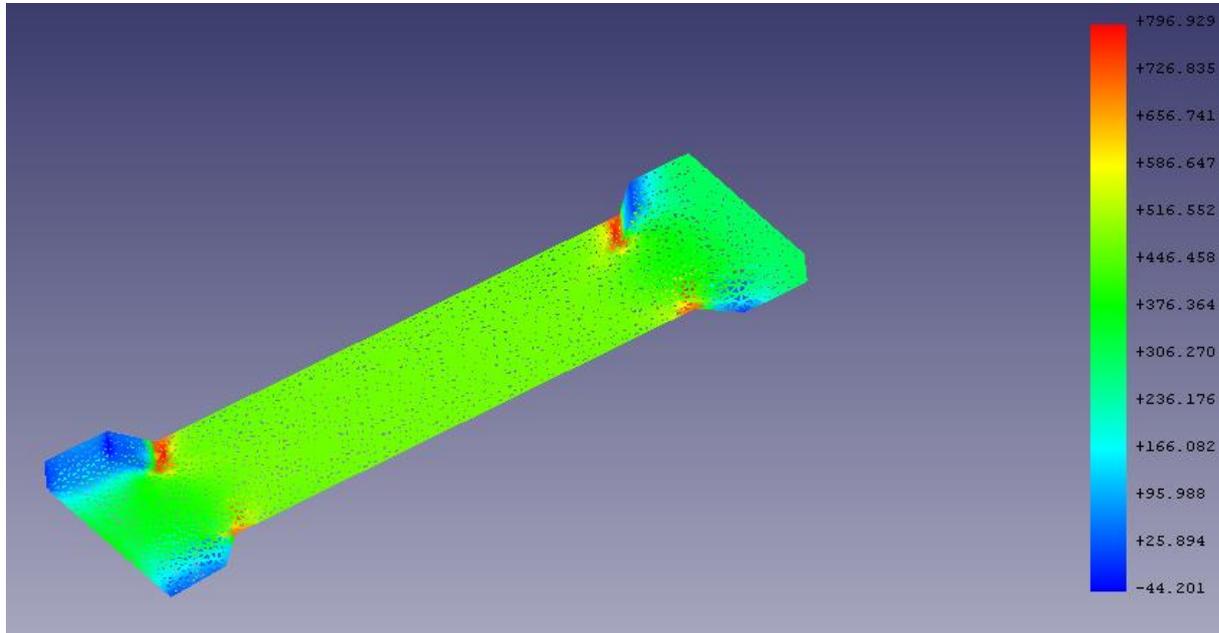


Figure III.21: Contrainte suivant l'axe YY (σ_{YY}).

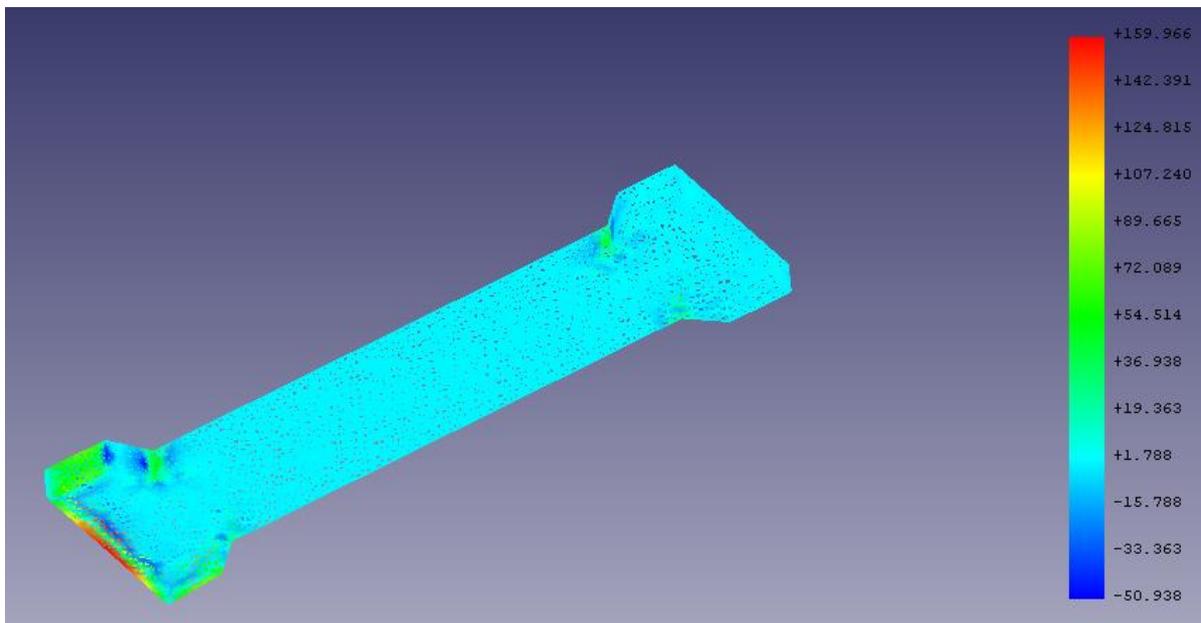


Figure III.22 : Contrainte suivant l'axe ZZ (σ_{ZZ}).

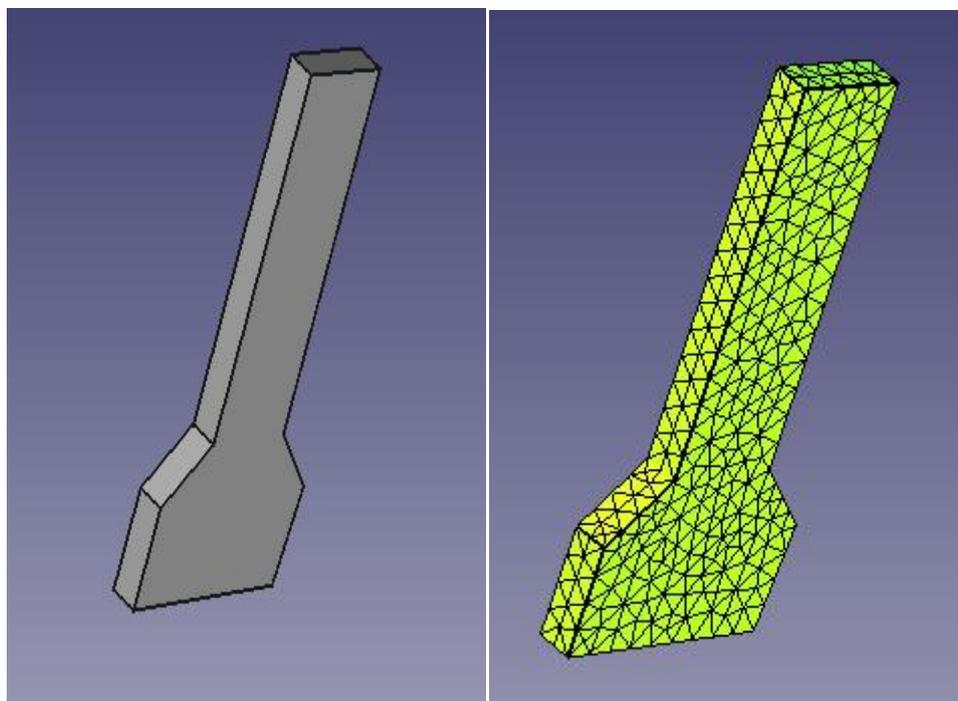


Figure III.23 : Conception et maillage de $\frac{1}{2}$ d'une éprouvette rectangulaire de traction.

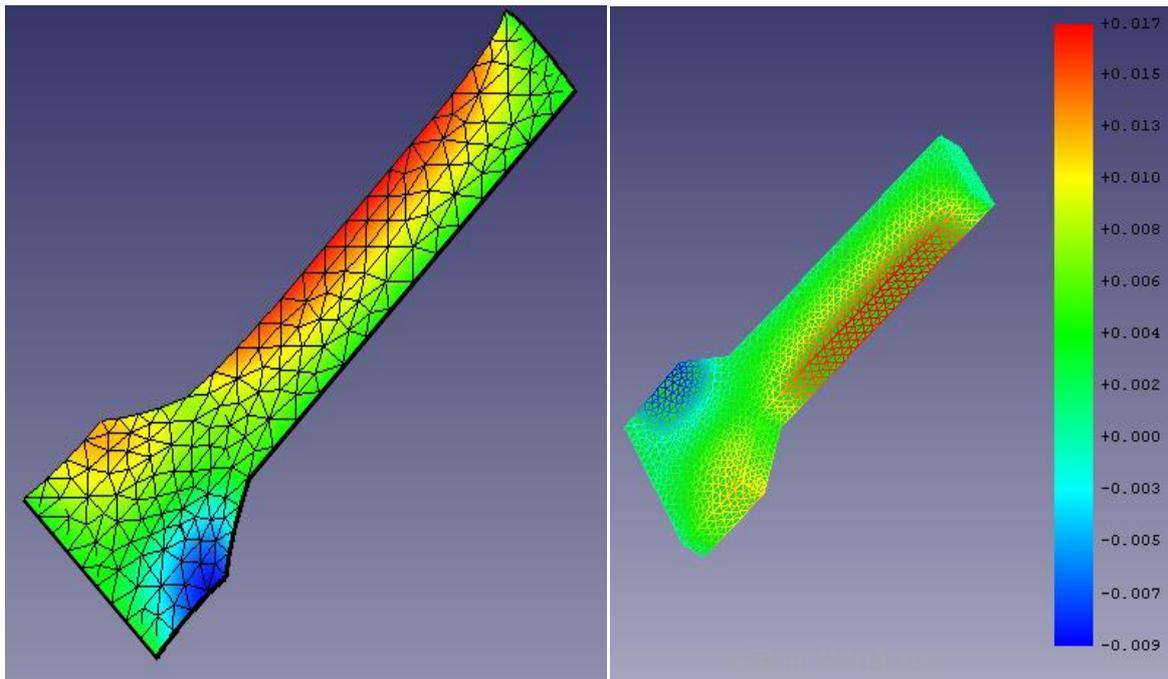


Figure III.24 : Déplacement suivant l'axe X.

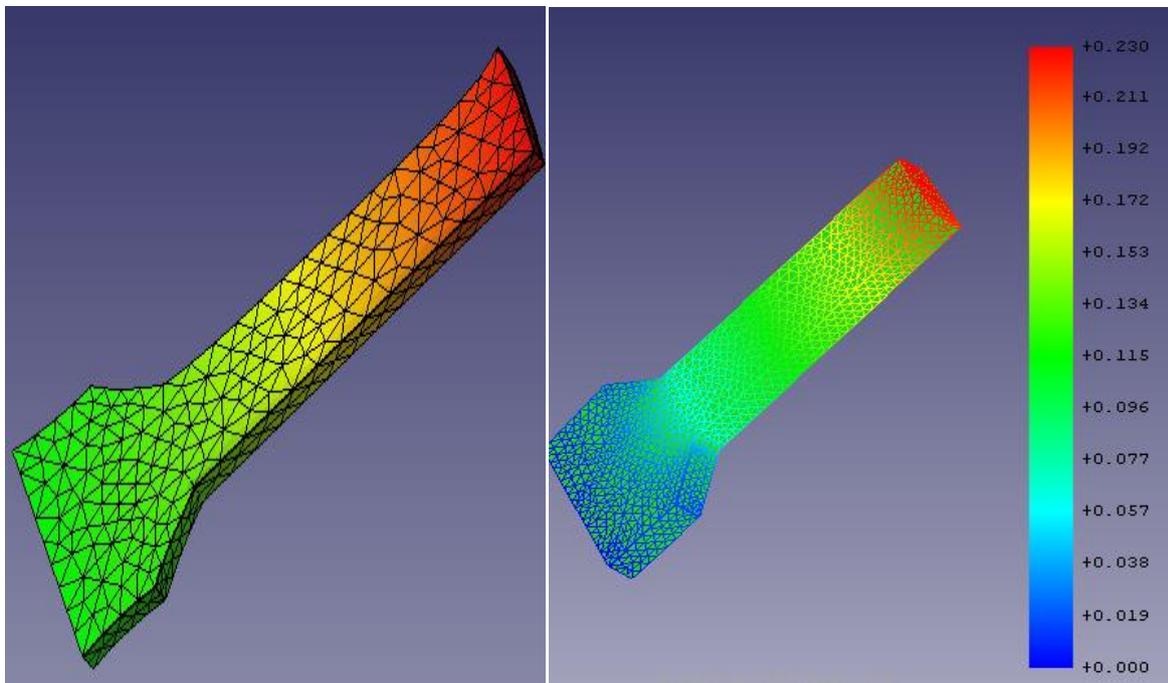


Figure III.25 : Déplacement suivant l'axe de chargement Y.

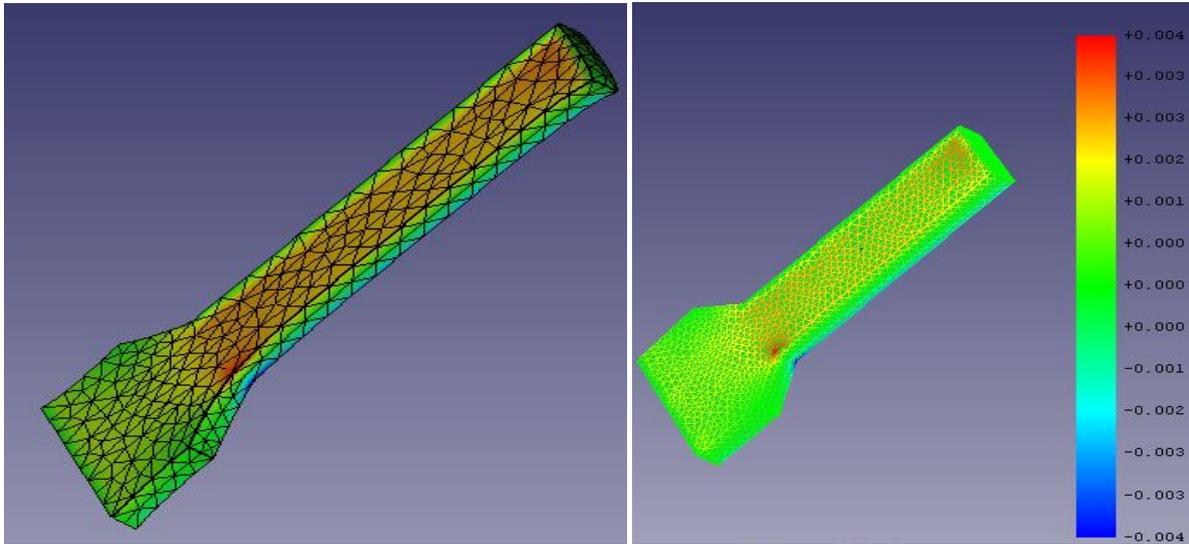


Figure III.26 : Déplacement suivant l'axe Z.

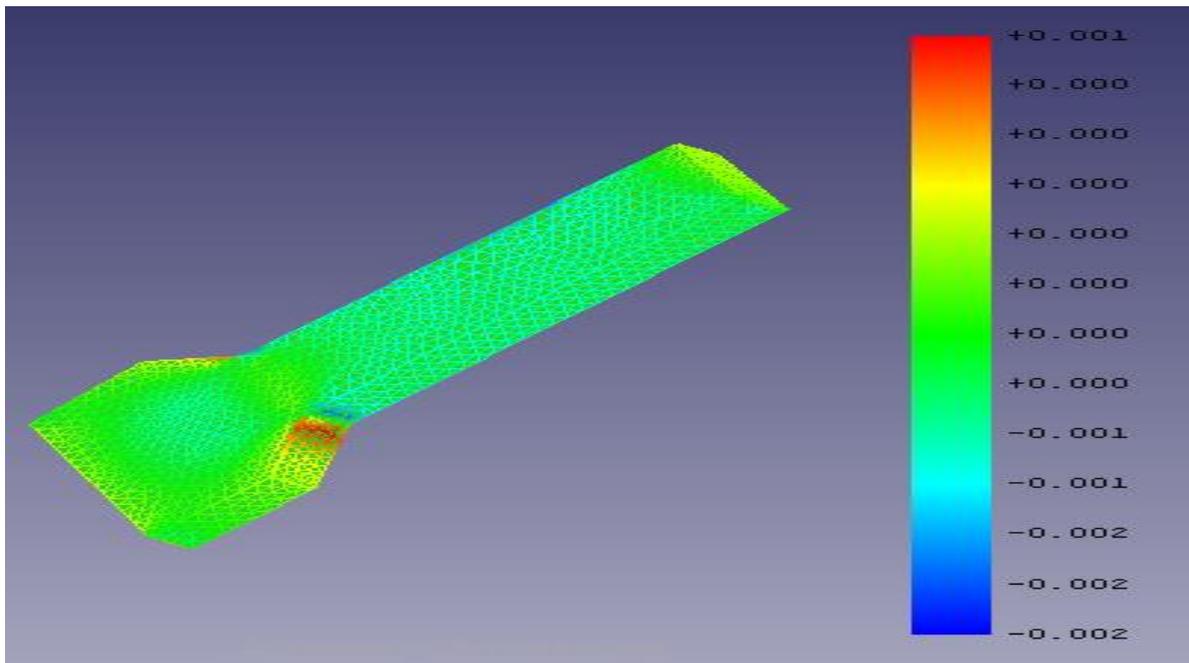


Figure III.27 : Déformation suivant l'axe X.

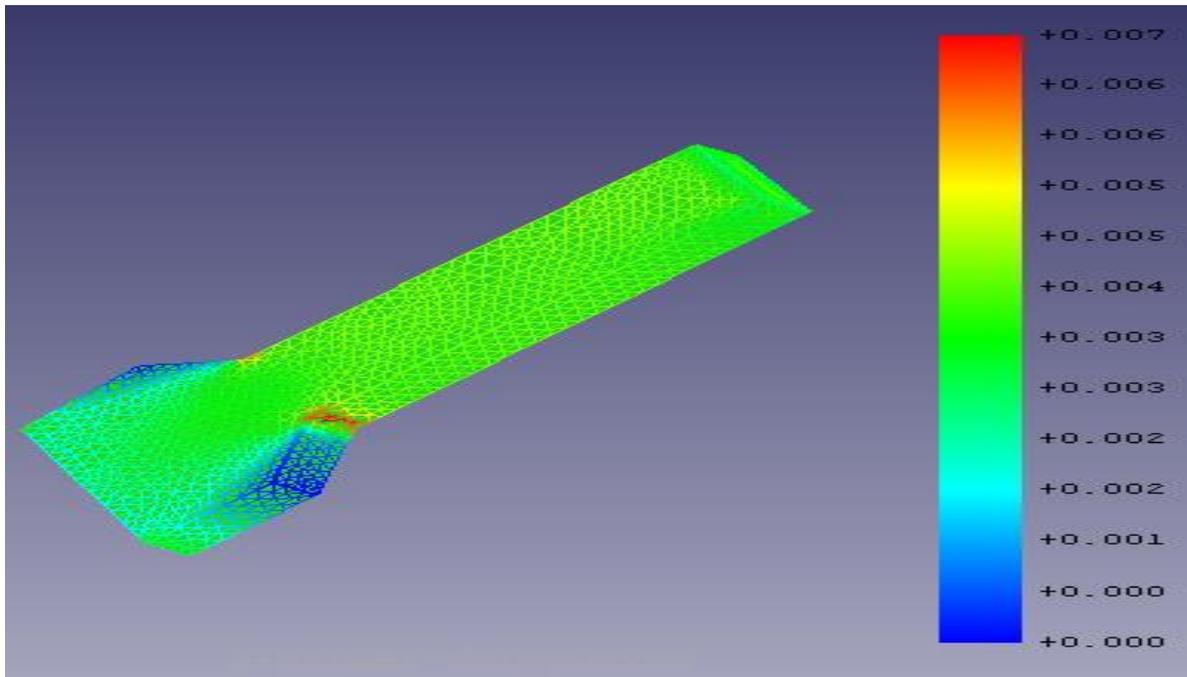


Figure III.28 : Déformation suivant l'axe Y.

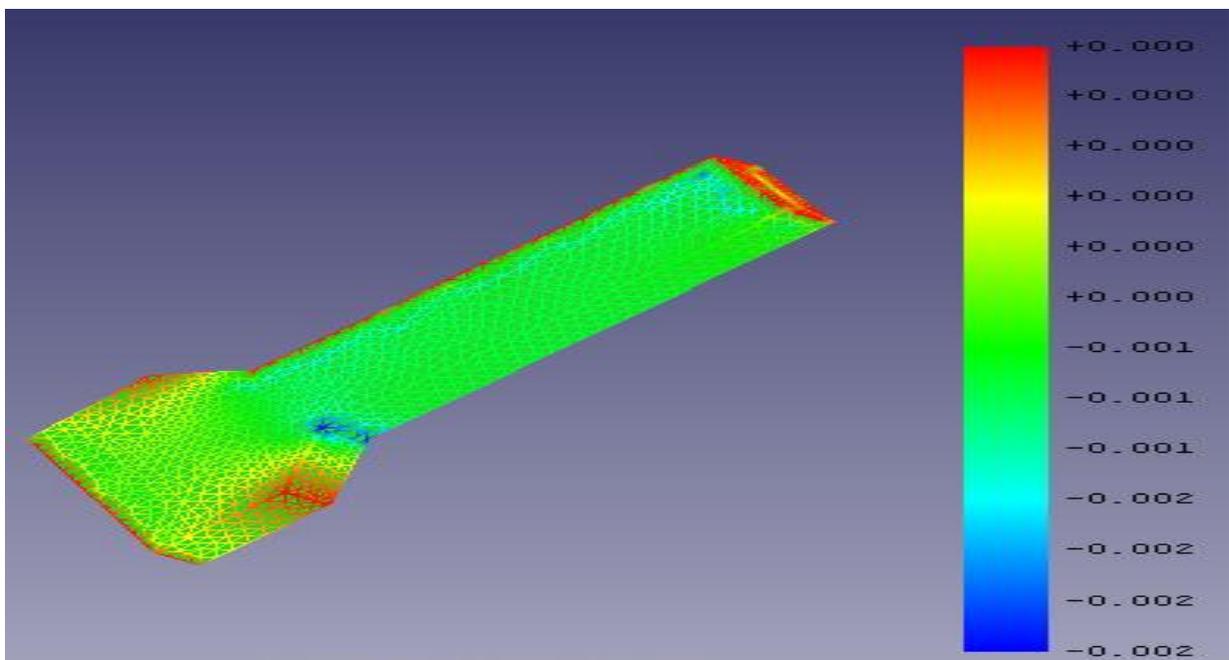


Figure III.29 : Déformation suivant l'axe Z.

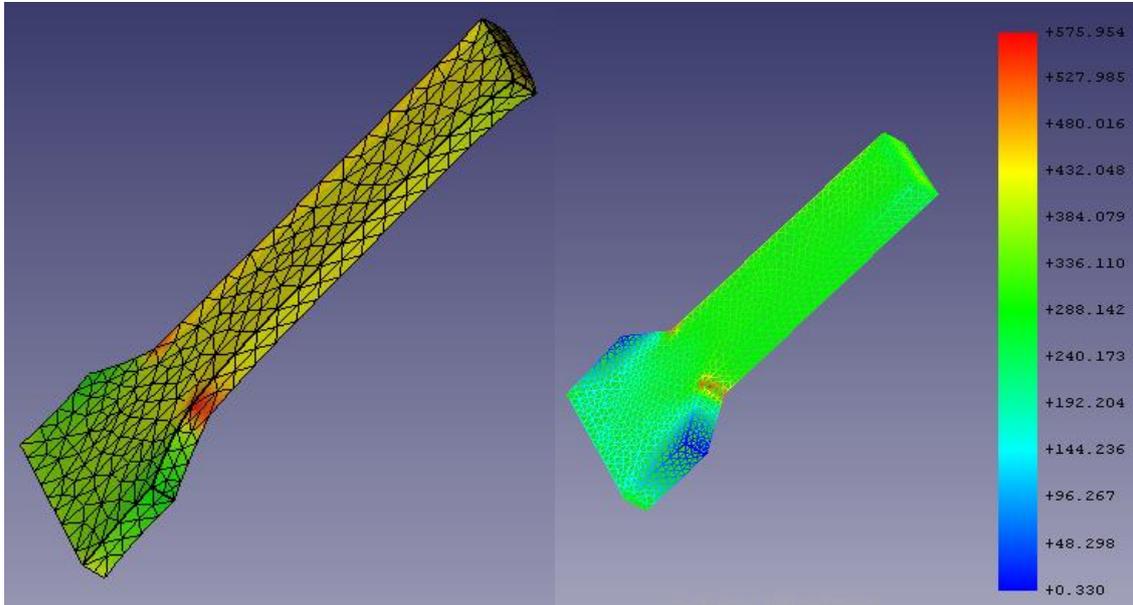


Figure III.30 : Contrainte maximale.

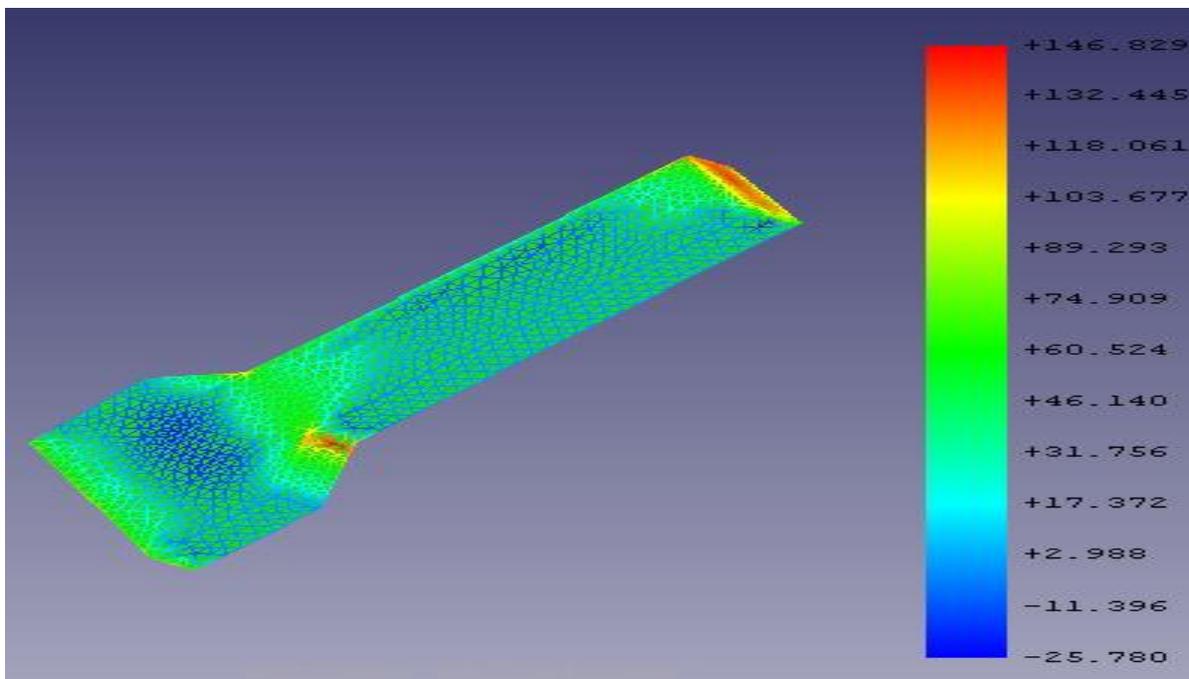


Figure III.31 : Contrainte suivant l'axe X.

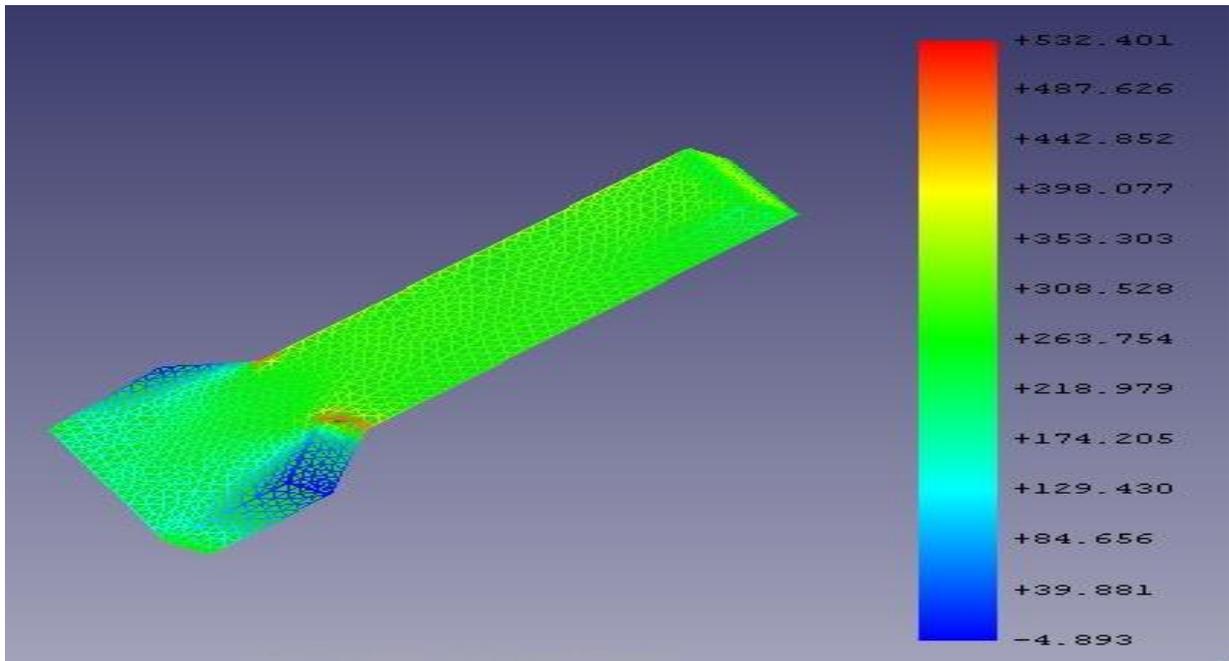


Figure III.32 : Contrainte suivant l'axe Y.

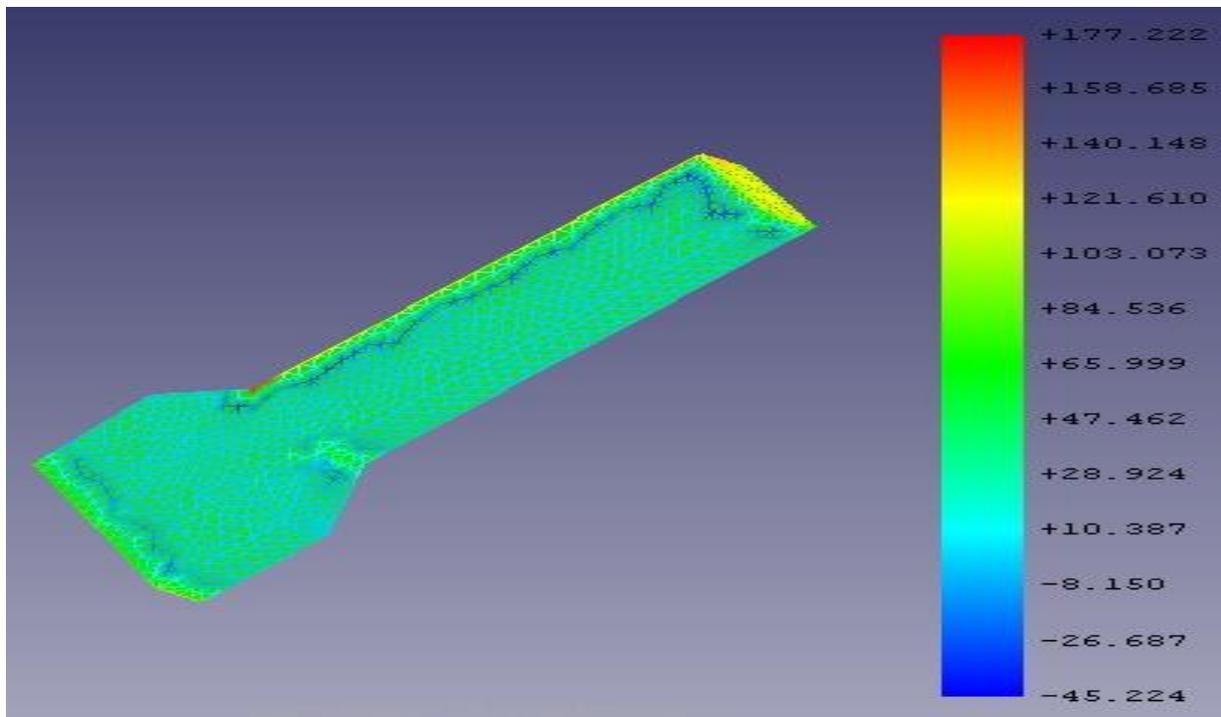


Figure III.33 : Contrainte suivant l'axe Z.

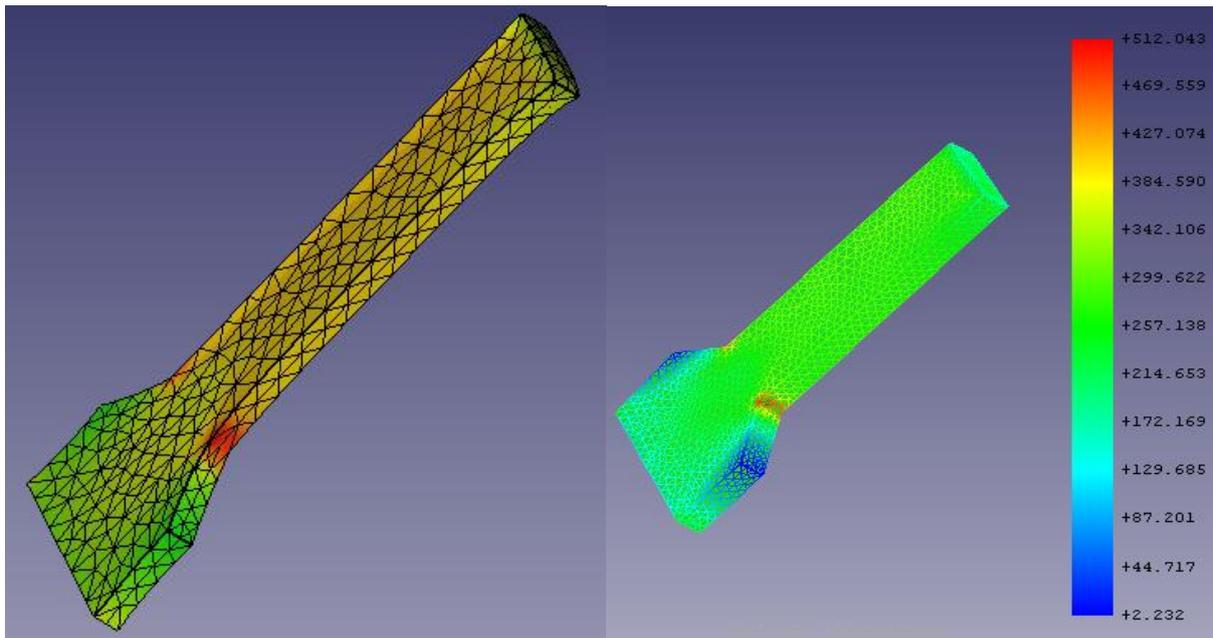


Figure III.34 : Contrainte de Von Mises.

III.10. Analyse et discussion des résultats

Les résultats sont enregistrés des figures (III.4 et III.5), représentent respectivement les courbes de traction avant et après déformations. Après l'opération de déformation, le matériau présente un durcissement en générant, des caractéristiques mécaniques différentes, avec une résistance plus élevée (R_e et R_m) et décroissance des propriétés de ductilité (A).

De même pour l'essai de dureté enregistré dans les figures (III.7). L'augmentation des propriétés mécaniques, est dû essentiellement au phénomène d'écroutissage, qui provoque le durcissement des matériaux ; ceci s'explique en considérant l'intervention des défauts linéaire (dislocations, lacunes,). Cette augmentation de la résistance à la déformation plastique s'appelle la « consolidation » du matériau ou « écroutissage » ; elle augmente au cours de la déformation plastique.

Cette consolidation constitue une adaptation du métal aux conditions de sollicitation ; en effet, si on relâche l'effort (qui a provoqué la déformation plastique) on constate que le retour est seulement élastique et que le domaine élastique s'étend désormais jusqu'au niveau de la contrainte précédemment appliquée (qui devient la nouvelle valeur de la limite d'élasticité) ; il y a donc eu augmentation de la limite d'élasticité et donc bien renforcement du métal.

La possibilité de gêner les déplacements des dislocations (et donc de retarder la déformation plastique) peut être volontairement utilisée ; elle permet d'accroître l'ampleur du domaine élastique et donc d'engendrer un durcissement du métal.

Comme les dislocations interagissent entre elles (elles se gênent mutuellement) et avec les autres défauts du réseau (précipités, joints de grains...). Notamment quand plusieurs dislocations de même signe se déplacent dans un même plan de glissement, la première vient buter sur l'obstacle et s'arrête, repousse la seconde qui repousse la troisième et ainsi de suite ; il se forme ainsi un empilement qui bloque le processus jusqu'à ce qu'un effort supérieur débloque la première dislocation.

L'essai Charpy a pour but de déterminer la résistance aux chocs des matériaux. On mesure ce que l'on appelle leur *résilience*, c'est-à-dire l'énergie consommée pour rompre une éprouvette de référence de section déterminée. L'énergie de rupture ainsi déterminée s'appelle la résilience. Plus elle est élevée, plus le matériau est tenace. L'énergie absorbée doit être désignée par KV. L'évolution des résiliences KCV et KV pour des alliages d'Aluminium sont signalées dans la figure (III.10).

Pour le bon déroulement de notre approche, et afin d'améliorer le comportement mécanique des alliages d'aluminium, on a proposé une initiation à la simulation numérique par la méthode des éléments finis, dont on a pu décrire et voir, l'essai de traction uni axiale, avec enregistrement des différents paramètres en image et en valeurs :

- Maillage d'une éprouvette de traction normalisée, avec et sans mode de symétrie.
- Enregistrement des déplacements suivant les trois axes (x, y et z). (**Figure III. 10, Figure III. 11, Figure III. 24, Figure III. 25, Figure III. 26**).
- Enregistrement des déformations suivant les trois axes (x, y et z). (**Figure III. 13, Figure III. 14, Figure III. 15, Figure III. 27, Figure III. 28, Figure III. 29**).
- Enregistrement des contraintes réparties suivant les trois axes (x, y et z). (**Figure III. 20, Figure III. 21, Figure III. 22, Figure III. 31, Figure III. 32, Figure III. 33**).
- Enregistrement des contraintes de Von Mises et maximales. (**Figure III. 16, Figure III. 17, Figure III. 18, Figure III. 19, Figure III. 30, Figure III. 34**).

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les alliages *Al-Mg-Si* (série **6xxx**) sont largement appliqués, essentiellement dans l'industrie aéronautique, automobile et navale. Ils se prêtent facilement aux durcissements structuraux soit par ajout d'éléments d'addition, par écrouissages ou traitements thermiques. Cette dernière qualité est due à leur bonne trempabilité, et à leurs basses températures de vieillissement (allant de la température ambiante à 200°C).

Les propriétés mécaniques des alliages *Al-Mg-Si* peuvent être améliorées par l'ajout des éléments d'addition ou par l'utilisation des traitements thermiques appropriés tels que le traitement thermique de mise en solution, la trempe et le traitement de vieillissement. Il est bien établi que les propriétés mécaniques des matériaux destinés à l'industrie sont étroitement liées à leurs microstructures.

La mesure des caractéristiques mécaniques des alliages d'aluminium ainsi que leurs comparaisons, à été notre méthode de calcul.

On a essayé déterminer les caractéristiques des métalliques légers, en particulier en relation avec les modes locaux de déformation qui jouent ici un grand rôle, à leurs utilisations ultérieures.

On conclut, que malgré, le manque expérimental, qui nous à beaucoup empêcher à présenter la tache comparative, en matière valeurs, mais on a pu, déterminer ces paramètres, par les méthodes de calculs, en se basant sur des données théoriques.

Références

Références :

- [1] A. Debih, Contribution à l'Etude de la Fatigue des Alliages Légers, thèse de doctorat en science, université Abbes Ferhat, Sétif. Soutenue : (22 MARS 2018). Page 2,3.
- [2] JM. DORLOT JP. BAILON J. MASOUNAVE. Des Matériaux. Montréal, Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal, (1986).
- [3] R. Develay, Données numériques sur l'aluminium non allié, Les Techniques de l'ingénieur. M443.
- [4] P. Depovere, La classification périodique des éléments. La merveille fondamentale de l'Univers, De Boeck supérieur, (2002), Page 98.
- [5] G. S Chaudron, in « La préparation industrielle de l'aluminium et la découverte de ses propriétés par un illustre français, Henry Sainte-Claire Deville », Revue de l'aluminium 211, publié par l'Institut d'histoire de l'aluminium, (juin 1954), p. 97.
- [6] I. Grinberg, L'aluminium. Un si léger métal, Découvertes Gallimard, (2003).
- [7] Akinlabi, Esther Titilayo. Thèse de Doctorat. Characterisation of Dissimilar Friction Stir Weld Between 5754 Aluminium alloy and C11000 Copper. Nelson Mandela Metropolitan University Port Elizabeth, south Africa. (2010).
- [8] M. Colombie. Matériaux métalliques. Dunod. Paris. (2000).
- [9] W. José Pireto Yespica. Thèse de Doctorat. Etude comparative du comportement électrochimique des alliages d'aluminium 2024 T351 et 7075 T7351 en milieu neutre de sulfate de sodium. Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse). (2012).
- ASM International. Métallography and Microstructure. Volume 9 of the ASM Handbook, USA. (2004).
- Xuemei Chen. Thesis Master. The effect of extrusion conditions on yield strength of 6060 Aluminium Alloy. Auckland University of technology. Auckland, New Zealand. (2008).
- [10] B. Balout. Thèse de Doctorat. Usinage à sec des alliages légers et des composites. L'école de technologie supérieure de Montréal. (2003).
- [11] T. Abid. Thèse de Doctorat. Etude et caractérisation des tôles en alliages Al-Mg-Si-(Cu). Université de Constantine 1. (2013).

- [12] F. Serradj. Thèse de Doctorat. Etude de la Cinétique de Précipitation dans les alliages Al-Mg-Si contenant différentes teneurs des éléments d'additions. Université de Constantine 1. (2014).
- [13] R. Colombie. Alcan, Banbury. Aluminium: Physical Properties, characteristics and Alloys. TTLAT. European Aluminium Association. (1994).
- [14] H. Bedboudi. Thèse de Doctorat. Etude de développement de structures dans les alliages à base d'aluminium : Al-Zn et Al-Cu-Zn. Université Badji.
- [15] S. Costa, H. Puga, J. Barbosa, A.M.P. Pinto. The effect of Sc additions on the microstructure and age hardening behaviour of as cast Al-Sc alloys. Elsevier, Materials and design 42, (2012), p 347-352.
- [16] J. Philibert, Alain Vignes, Yves bréchet, pierre combrade. Métallurgie du minerai au matériau. Masson. Paris. (1998).
- [17] Q. Puydt. Thèse de Doctorat. Comportement mécanique de soudures en alliage d'aluminium de la série 7xxx : de la microstructure à la modélisation de la rupture. Université de Grenoble. (2006).
- [18] V. Castelhana. Etude des différentes techniques induisant le durcissement des alliages d'aluminium les plus courants, en particulier évolution des microstructures et des propriétés mécaniques. Conservatoire National Des Artes et Métiers. Centre Régional de Champagne-Ardenne. (2001).
- [19] M. Colombié, matériaux métallique, fabrication de l'aluminium et de ses alliages, page (343-376).
- [20] M. Colombié, matériaux métallique, fabrication de l'aluminium et de ses alliages, page (343-376).
- [21] P. Mouak. Thèse de Doctorat. Le marché de l'aluminium : structuration et analyse du comportement des prix au comptant et à terme au London Métal Exchange. Université d'Orléans. (2010).
- [22] L. Iacroux. Thèse de doctorat. Mécanisme de corrosion localisée de l'alliage d'aluminium 2024 apport de la microscopie a force atomique (AFM) couplé au mode KELVIN (KFM) et des alliages modèles. Université de Toulouse. (2008).

- [23] A. INETRATIONAL. Corrosion. Volume 13 of the ASM Handbook. USA. (1992).
- [24] C. Vargel. Corrosion of aluminium. Elsevier. (2004).
- [25] I. Grinberg, l'aluminium. Un si léger métal, découvertes Gallimard, (2003).
- [26] Document internet, simulation matériaux <https://www.simulationmatériaux.com>
- [27] A. Saidi, Génie des matériaux, effet des traitements thermiques sur les propriétés d'alliage d'aluminium. (juin 2020). Page 35,36.
- [28] J. Mandel, propriétés mécanique des matériaux, Editions Eyrolle s, (1978).
- [29] Document internet, Allongement à la rupture <https://fr.m.wikipedia.org>.
- [30] J. Michel BAES, Max BOURCART, Christian LAGOUTE, technique de l'ingénieur, (Mai 2004).
- [31] G. Gonnet, Résistance des matériaux, université de Bourgogne (2003).
- [32] J. P. Bailon, JU-M-Dorlot, Des Matériaux, presses internationales polytechniques, (2007).
- [33] S. Touati et M. Dhia Nouiri Eddine, Génie des matériaux, comportement mécanique des alliages d'aluminium. Université Tébessa. (2021), page 17,23,24,25,26.
- [34] B. Chenel Pechiney CRV, écrouissage d'alliage d'aluminium, (étude des métaux matériau). (2012).
- [35] Groupe d'ingénieurs des tréfileries, Tréfilage de l'acier, Technique de l'ingénieur, (2012).
- [36] P. Ludwik et R. Chen. stahl and Eisen,43, (1923), pp 999 et 1427.
- [37] D. FRANCOIS Essais mécaniques des métaux détermination des lois de comportement. Edition (2012).
- [38] Nancy, « Mécanique de la rupture les essais et leurs significations, » Ecole des mines, (1988).
- [39] H. Bukle, « la machine outil française, », (1965), P 125-147.
- [40] A. P. G. Doubenski, résistance des matériaux, université d'Annaba, (1977).
- [41] C. W. Richards (traduction G. Lehr), la science des matériaux, édition Dunod, Paris, (1965).

- [42] G. Murry, Aide-mémoire métallurgie-Métaux, alliages, propriétés, collection Aide-mémoire de l'ingénieur, édition Dunod, Paris, (2004).
- [43] J. Devalloir, instrumentation d'un choc CHARPY, Ecole des mines de Douai, (2002).
- [44] W. Richards (traduction G. Lehr), la science des matériaux, édition Dunod, Paris, (1965).
- [45] S. Taabache, mémoire de magister, Université de Batna, Algérie, (2010).
- [46] M. Dupeux, Aide-mémoire science des matériaux. Dunod, Paris, (2004).
- [47] k. Boulemzaoud, science des matériaux, Analyse thermique des alliages d'aluminium AlMgSi (Cu). (Avril 2012). Page 28, 29.
- [48] T. Jacobsen Stedje, Master thesis. Characterization of screw extruded rapid solidified AA6061. Norwegian university of science and technology. (2014).
- [49] Document internet, la série 6000 alliage d'aluminium, <https://fr.made-in-china.com>.
- [50] Document internet, 6005-T5 Aluminium vs 6005-T6 Aluminium <https://www.makeitfrom.com>.
- [51] Document internet, alu-composition-chimique.pdf, <https://almet-metal.com>
- [52] A. Necib. Mémoire de master « durcissement par précipitation des alliages Al-Cu-Mg-Si ». Université de Tébessa. (2015).
- [53] R. Bourgeois, H. Chauvel, and J. Kessler. Mémotech, génie des matériaux, educalivre Edition casteilla 25 rue monge-75005 Paris, (2011), P 300.
- [54] Document internet, EN AW-6005A, www.broncesval.com.
- [55] J. Bieber et Fabien Kauffmann, élèves-ingénieurs InSic. (septembre 2008).
- [56] eprouvette-essai-mecanique.fr
- [57] Document internet, essai de traction, <https://fr.m.wikipedia.org/essai-de-traction>
- [58] caractéristiques mécaniques de nos alliages d'aluminium-Almet Metal, p 57.
- [59] S.G Green , J.J Langan, J.D Leslia, W.H – Metal Trans, 1971,2,1813.

- [60] R. Bourgeois, H. Chauvel, and J. Kessler. Mémotech, génie des matériaux, page. educalivre Edition casteilla 25 rue monge -75005 Paris, (2011)
- [61] G. Saada, Thèse Paris, 1960, Acta Met, 1960, 8, 841.
- [62] W. B. Morrison, W. C. Leslie, Metal Trans, 1973, 4, p 168.
- [63] Document internet, A propos de FreeCAD, https://wiki.freecadweb.org/Feature_list/fr.