

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DU TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE
FILIERE : GENIE MECANIQUE
OPTION : MODELISATION NUMERIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par:

CHARIK issam

BELARIBI ammar

Intitulé

**ETUDE DE LA TRACTION D'UN MATERIAU PAR
CORRELATION D'IMAGE NUMERIQUE**

Soutenu devant le jury composé de:

ROKBI. M	Université M'sila	Président
ZEMMAMOUCHE. R	Université M'sila	Rapporteur
HOUCINE. M	Université M'sila	Examineur

Année universitaire : 2016 /2017

REMERCIER

Tout d'abord, je tiens à remercier sincèrement zammamuoché.R pour avoir proposé, accepté et encadré ce Modest travail et pour la qualité de son encadrement. C'est grâce à ses conseils, au soutien moral et financier que j'ai pu mener à bien ma recherche. Et ne pouvons oublier de remercier tous les enseignants D'avoir contribuer à mon formation, ainsi que à tout l'équipe du département de génie mécanique.

Un remerciement spécial pour mon père Je tiens également à remercier toute ma famille pour son soutien constant tout au long de mes études et de mon licence.

Enfin, permettez-moi d'adresser mes salutations et mes remerciements sincères à les amis et tout les étudiants de bronche St option modélisation numérique , promotion 2016/2017

Sommaire

Introduction générale.....	01
Chapitre I \ Métallurgie d'Aluminium	
I.1. Introduction.....	02
I.2. Structure et propriétés de l'aluminium.....	02
I.2.1. Structure de l'aluminium.....	02
I.2.2. Défauts microscopiques	05
I.2.3. Les propriétés de l'aluminium	05
I.2.3.1 Les propriétés mécaniques	05
I.2.3.2. Propriétés physiques	10
I.2.3.3. Propriétés thermiques	11
I.2.3.4. Propriétés électriques	13
I.2.3.5. Propriétés magnétiques.....	14
I.2.3.6. Propriétés optiques	14
I.3. Propriétés chimiques et de surface	15
I.3.1. Résistance à la corrosion	15
I.3.1.1. Passivation de l'aluminium	15
I.3.1.2. Corrosion par piqures	16
I.3.1.3. Corrosion trans ou intercrystalline	17
I.3.1.4. Corrosion galvanique	17
Chapitre II Méthodes de caractérisation Mécanique des matériaux	
II.1. Introduction.....	18
II.2. Types de matériaux	19
II.2.1. Les métaux	19
II.2.2. Les polymères et les élastomères.....	19
II.2.3. Les céramiques et les verres.....	19
II.2.4. Les composites.....	19
II.3. Essais mécaniques.....	20
II.3.1. Essai de traction:.....	20
II.3.1.1. Eprouvette.....	21
II.3.1.2. Exécution de l'essai.....	22
II.3.1.3. Exploitation des résultats de l'essai.....	23

II.3.1.4. Déformation élastique et rigidité.....	26
II.3.1.5. Déformation plastique et écrouissage.....	28
II.3.2. Essai de dureté.....	28
II.3.2.1. Principe de l'essai de dureté	29
II.3.2.2. Dureté Brinell (symbole HB)	29
II.3.2.3. Dureté Vickers (symbole HV).....	29
II.3.2-4 Dureté Rockwell (symbole HR).....	30
II.3.3. Essais de fatigue.....	30
II.3.3.1. Principe de fatigue en flexion rotative.....	30
II.3.3.2. Courbes de résistance à la fatigue.....	31
II.3.3.3. Rupture selon le type de matériau	32
II.3.3.4. Fractographie.....	33
II.3.4. Paramètres importants.....	33
II.3.4.1. élément de volume représentatif.....	33
II.3.4.2. Vitesse de déformation et température.....	34
II.3.4.3. Direction de sollicitation.....	37
II.4. Technique de corrélation d'images numériques	39
II.4.1. Calcul du champ de déplacement.....	41
II.4.2. Calcul des déformations.....	42
 Chapitre III Partie expérimentale	
III.1 Machines d'essais.....	44
III.2. Caractéristiques de la machine de traction.....	45
III.3. Dimension de l'éprouvette de traction.....	45
III.4. Montage expérimentale.....	46
III 5. Résultat expérimentaux de l'essai de traction.....	47
III.6. La simulation de plaque avec SolidWorks	48
III 6.1. les résultats des Simulation.....	48
III.7. Application du code DIC pour la mesure des déplacements de l'éprouvette sous traction.....	55
III.7.1 Définition du code DIC.....	55
III.7.2 Les étapes du code	55

III 7.3. Résultats obtenues par corrélation d'images (DIC)	57
III 7.3.1 Calcule de déplacement	58
III.8 Conclusion.....	58
Conclusion général.....	59

Liste de Figure

CHAPITRE I :

Figure1.1 : Perspective-----	03
Figure 1.2 : Projection -----	03
Figure1.3 : Simulation d'une pièce en alliage d'aluminium, sur SolidWorks -----	07
Figure 1.4 : Simulation des contraintes qui agissent sur la plaque d'aluminium-----	08
Figure 1.5 : Simulation des déplacements du matériau sous l'effet des forces appliquées -----	09
Figure 1.6 : Simulation de l'état de déformation que subit l'aluminium-----	09
Figure 1.7: les différentes caractéristiques mécaniques de l'aluminium -----	10
Figure 1.8 : Effet de la température de solidification sur le comportement en traction d'un alliage en aluminium -----	10
Figure 1.9 : Influence du titre de l'aluminium sur le pouvoir réflecteur -----	15
Figure 1.10 : Résistance à la corrosion de l'aluminium et de ses alliages -----	16
Figure 1.11: Principe de la corrosion galvanique -----	17

CHAPITRE II :

Figure 2.1 : Dimension de l'échantillon pour l'essai de traction -----	21
Figure 2.2 : évaluation des caractéristiques d'un cordon de soudure -----	22
Figure 2.3 : Schéma d'une éprouvette de traction cylindrique et de son évolution en cours d'essai-----	22
Figure 2.4 : Courbes conventionnelles typiques de traction-----	23
Figure 2.5 : Détail pour le calcul de E (pente de la partie élastique) et Rp0.2 -----	24
Figure 2.6 : Exploitation des résultats de traction -----	25
Figure 2.7 : Le module d'Young E décrit le comportement en traction et en compression -----	26

Figure 2.8: Schéma des déformations élastiques provoquées par différentes sollicitations. a) Contrainte de traction uni-axiale σ_x . b) Contrainte de cession τ_{xy} dans le plan -----	27
Figure 2.9 : Machine de flexion rotative et courbe contrainte-temps -----	31
Figure 2.10 : Deux types d'essais de fatigue par flexion rotative-----	31
Figure 2.11 : Courbe de Wöhler -----	31
Figure 2.12 : Rupture ductile-----	31
Figure 2.13 : Quatre modes de rupture fragile(a) cisaillement en extension, (b) fracture normale et séparation en extension,(c) cisaillement en compression, (d) fracture axiale-----	32
Figure 2.14 : Courbes rationnelles typiques de différents matériaux -----	33
Figure 2.15 : Barres de Hopkinson -----	36
Figure 2.16 : Impact de plaques -----	36
Figure 2.17 : Courbe de traction typique avec sauts de vitesse -----	36
Figure 2.18 : Schématisation de l'essai de traction-compression-----	38
Figure 2.19 : Schématisation de l'essai de compression-----	38
Figure 2.20 : Schématisation de l'essai de torsion -----	39
Figure 2.21 : Schématisation de l'essai de flexion quatre points -----	39
Figure 2.22 : Dispositif de corrélation d'image-----	40
Figure 2.23 : Principe de la technique de corrélation d'images numériques bidimensionnelles -----	41
Figure 2.24 : Zone d'étude « masque » sur l'éprouvette papillon -----	41
Figure 2.25 : Schématisation de la position relative d'une cellule d'une image déformée par rapport à l'image non déformée, en surface -----	43
 <u>CHAPITRE III :</u>	
Figure 3.1 : Machine de traction-----	44
Figure 3.2 : Eprouvette de traction -----	46

Figure 3.3 : Montage expérimentale de l'essai de traction par corrélation d'images numériques -----	46
Figure 3.4 : diagramme de Stress-élongation -----	47
Figure 3.5 : Simulation d'une pièce en alliage d'aluminium, sur SolidWorks -----	48
Figure 3.6 : Simulation des contraintes du matériau sous l'effet des forces appliquées -----	48
Figure 3.7 : Simulation des déplacements du matériau sous l'effet des forces appliquées -----	49
Figure 3.8 : Simulation des déformations du matériau sous l'effet des forces appliquées.-----	49
Figure 3.9 : Simulation des contraintes du matériau sous l'effet des forces appliquées -----	50
Figure 3.10 : Simulation des déplacements du matériau sous l'effet des forces appliquées -----	50
Figure 3.11 : Simulation des déformations du matériau sous l'effet des forces appliquées.-----	51
Figure 3.12 : Simulation des contraintes du matériau sous l'effet des forces appliquées -----	51
Figure 3.13 : Simulation des déplacements du matériau sous l'effet des forces appliquées -----	52
Figure 3.14 : Simulation des déformations du matériau sous l'effet des forces appliquées -----	52
Figure 3.15 : Simulation des contraintes du matériau sous l'effet des forces appliquées.-----	52
Figure 3.16 : Simulation des déplacements du matériau sous l'effet des forces appliquées -----	53
Figure 3.17 : Simulation des déformations du matériau sous l'effet des forces appliquées -----	53

Figure 3.18 : Simulation des contraintes du matériau sous l'effet des forces appliquées -----	54
Figure 3.19 : Simulation des déplacements du matériau sous l'effet des forces appliquées -----	54
Figure 3.20 : Simulation des déformations du matériau sous l'effet des forces appliquées.-----	54
Figure 3.21 : image de contour du déplacement vertical -----	57
Figure 3.22 : déplacements vertical entre images -----	57
Figure 3.23 : amplitude des déplacements entre images-----	57

Liste de Tableau

Tableau.1.1: Les principales caractéristiques mécaniques de l'aluminium.....	07
Tableau .1.2: Masse volumique de L'Aluminium solide et liquide en fonction de la température.....	11
Tableau.1.3: La résistivité électrique de l'aluminium en fonction de la température d'un chauffage.....	14 25
Tableau 2.1: Valeur typique du module d'élasticité pour différent métaux.....	26
Tableau.2.2: Lois d'écrouissage usuelles.....	28
Tableau.2.3: éléments de volumes macroscopiques.....	34
Tableau 2.4: Temps caractéristiques et types d'essais.....	35
Tableau.3.1: de force-élongation.....	47
Tableau.3.2: test report.....	47

Notation et symbole

CFC : Cubique à Faces Centrées

C : la compacité

Re : limite d'élasticité

Rm : contrainte à laquelle est soumise le matériau au maximum de la charge

Ar: allongement après rupture

λ : conductivité thermique.

ρ : masse volumique.

c_p : capacité thermique massique a pression constante.

EN : fait référence à la normalisation européenne;

A : indique qu'il s'agit d'aluminium;

W : précise qu'il s'agit de métal corroyé.

S0 : section initiale

L0 : longueur initiale entre repères

LC : longueur de la partie calibrée

Lu : Longueur ultime après rupture

Su : section minimale après rupture

σ_C : la contrainte conventionnelle

ϵ_C : la déformation conventionnelle

$E = R_e/\epsilon_e$: module de Young

R_m : la résistance à la traction

σ : contrainte

HV :Dureté Vickers

HR : Dureté Rockwell

Introduction générale:

L'histoire des essais mécaniques se confond avec l'histoire de la résistance des matériaux. On peut penser que les premiers essais mécaniques ont été destinés à tester les matériaux en vue de la construction et ce dans un but de bonne adaptation du matériau, dans le cadre de mécanique de la rupture: le matériau doit être suffisamment solide pour l'usage.

Dans ce contexte, nous sommes particulièrement intéressés par la technique de corrélation d'images numériques pour calculer les déplacements engendré par l'essai de traction.

Cet essai ou expérience consiste à placer une petite barre du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur la barre jusqu'à sa rupture. On enregistre l'allongement et la force appliquée, que l'on convertit ensuite en déformation et contrainte. L'avantage que peu fournir la méthode de corrélation est quel est une technique de mesure sans contact. La technique permet de mesurer les champs de déplacements et la distribution des contraintes par comparaison d'une image de référence correspondant à l'état non déformé de l'éprouvette avec une série d'images enregistrées après déformation de l'éprouvette de traction sans aboutir à la rupture.

Le mémoire est structuré en trois chapitres:

Le premier décrit la théorie de la métallurgie d'Aluminium, ses origines et ses applications.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté et exposé les méthodes de caractérisation mécanique des matériaux et de corrélation d'images numérique.

Le troisième chapitre sera consacré a la représentation des résultats expérimentales de l'essai de traction avec leur simulation numérique, ainsi que les résultats obtenus par l'application de la méthode de corrélation d'images numériques.

En fin on terminera par un conclusion générale.

Chapitre I

Métallurgie d'Aluminium

I.1. Introduction:

L'aluminium est l'élément chimique de numéro atomique 13, de symbole Al. Il appartient au groupe 13 du tableau périodique ainsi qu'à la famille des métaux pauvres.

Le corps simple aluminium est un métal malléable, de couleur argent, remarquable pour sa résistance à l'oxydation et sa faible densité. C'est le métal le plus abondant de l'écorce terrestre et le troisième élément le plus abondant après l'oxygène et le silicium ; il représente en moyenne 8 % de la masse des matériaux de la surface solide de notre planète. L'aluminium est, en règle générale, trop réactif pour exister à l'état natif dans le milieu naturel : on le trouve au contraire sous forme combinée dans plus de 270 minéraux différents, son minerai principal étant la bauxite, où il est présent sous forme d'oxyde hydraté dont on extrait l'alumine. Il peut aussi être extrait de la néphéline, de la leucite, de la sillimanite, de l'andalousite et de la muscovite[1].

L'aluminium métallique est très oxydable, mais est immédiatement passivé par une fine couche d'alumine Al_2O_3 imperméable de quelques micromètres d'épaisseur qui protège la masse métallique de la corrosion. On parle de protection cinétique, par opposition à une protection thermodynamique, car l'aluminium reste en tout état de cause très sensible à l'oxydation. Cette résistance à la corrosion et sa remarquable légèreté en ont fait un matériau très utilisé industriellement.

L'aluminium est un produit industriel important, sous forme pure ou alliée, notamment dans l'aéronautique, les transports et la construction. Sa nature réactive en fait également un catalyseur et un additif dans l'industrie chimique ; il est ainsi utilisé pour accroître la puissance explosive du nitrate d'ammonium[1].

I.2. Structure et propriétés de l'aluminium:**I.2.1. Structure de l'aluminium :**

La structure de l'aluminium émane de celle du CFC, c'est-à-dire Cubique à Faces Centrées (compact) [2].

Le CFC correspond donc à la maille présentée en figure (1.1) qui montre la structure en perspective :

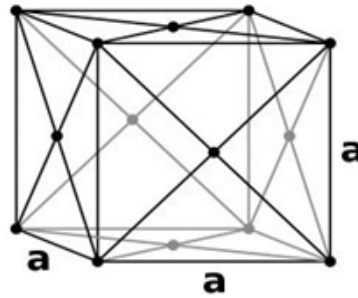


Figure.1.1: Perspective

De plus, pour simplifier la schématisation, cette maille peut être réalisée en projection afin de faciliter la lecture, et donc se « dessine » sous la forme d'un cube, représenté en figure 1.2 [2].

Pour une structure de type cubique à faces centrées, les plans d'empilement sont de type ABC car le système cristallin est un cube posé sur un sommet [2].

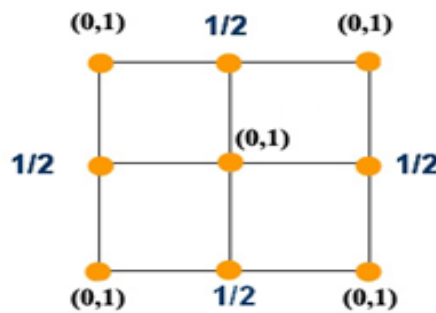


Figure.1.2: Projection

On note « a » la valeur du côté du cube formé par chaque arête ($a = 400\text{pm}$), et « r » le rayon des particules considérées comme des sphères dures ($r = 140\text{pm}$). Ainsi pour une structure CFC, le lien entre le paramètre de maille et le rayon est : $a\sqrt{2} = 4r$.

En effet, les sphères sont en contact selon les diagonales de face, ainsi il y a 3 sphères qui se touchent, et donc 4 rayons au total sur la diagonale. Cependant, toutes les sphères ne sont pas entières dans la maille, elles sont toutes partagées entre plusieurs mailles. Les 8 particules aux sommets du cube sont partagées en 8 mailles et donc divisées par 8 et les 6 particules aux centres des faces appartiennent à 2 mailles, et sont donc divisées par 2 [2].

Ainsi, soit « n » le nombre de motif : $n = 8 \cdot 1/8 + 6 \cdot 1/2 = 4$ sphères entières par maille.

La coordinence est le nombre de sphères proches d'une autre sphère dans l'édifice cristallin qui sont en contact. Ainsi, chaque particule d'aluminium dans le cubique à faces centrées est en contact avec 12 sphères voisines (issues des autres mailles).

En outre, la compacité, notée « C », correspond au taux d'occupation réel de l'espace dans la maille. Elle s'obtient en réalisant le rapport du volume occupé par les sphères et du volume total de la maille. L'aluminium étant un cristal métallique, il obtient ainsi une grande compacité.

En effet, en utilisant le modèle des sphères dures pour représenter les particules, on obtient le calcul suivant :

$$C = n \times \frac{V_{\text{sphères}}}{V_{\text{total}}} = 4 \times \frac{\frac{4}{3} \pi \times r^3}{a^3} = 4 \times \frac{\frac{4}{3} \pi \times \left(\frac{a\sqrt{2}}{4}\right)^3}{a^3} = \frac{\pi\sqrt{2}}{6} = 0.74 \quad (1.1)$$

Enfin, il est également possible d'obtenir la masse volumique par le rapport entre la masse des particules et le volume total du cube.

Or, la masse molaire de l'aluminium étant de 27 g/mol et son paramètre de maille « a » étant de 400 pm, on en déduit la masse volumique par la relation suivante :

$$\rho = \frac{m_{\text{cristal}}}{V_{\text{total}}} = n \times \frac{M_{\text{atome}}}{V_{\text{total}}} = 4 \times \frac{27}{(400 \times 10^{-12})^3 \times 6.02 \times 10^{23}} = 2803.1 \text{ kg} / \text{m}^3 \quad (1.2)$$

L'aluminium a une électronégativité de 1.61 et ne possède pas d'électrons localisés, en effet les électrons sont libres de leurs mouvements. La mobilité de ces électrons est à l'origine des propriétés conductrices de ce matériau. C'est pour cela que ce métal possède des liaisons (interaction stabilisante entre deux particules) fortes appelés « liaisons métalliques ». La particularité de cette liaison est qu'elle est l'interaction de groupe entre les cations et un nuage d'électron libre. Ainsi cette liaison est non dirigée (les électrons ne se déplacent pas suivant un axe). De plus, la liaison métallique est caractérisée par une énergie de cohésion en moyenne plus faible que la liaison covalente ou ionique. Cette énergie vaut 311 kJ/mol ainsi qu'une longueur de liaison comprise entre 100 à 200 pm pour l'aluminium [2].

I.2.2. Défauts microscopiques:

a. Défauts de fabrication: ou de manipulation comme des rayures ou une macro-rugosité (ex : traces de laminage).

b. Défauts liés à la microstructure: tels que les joints de grains intermétalliques. La surface occupée par de tels défauts est faible (0,2%), mais ses grains réduisent la résistance à la corrosion et la durée de vie des alliages [3].

I.2.3. Les propriétés de l'aluminium:**I.2.3.1 Les propriétés mécaniques :**

L'aluminium est un métal ductile et très malléable, le modèle à électrons libres de la liaison dans les métaux peut expliquer la malléabilité et la ductilité du métal, en effet il est malléable car ses liens métalliques sont non-directionnels, et ductile car les ions métalliques sont entourés par un nuage d'électrons ainsi une force d'attraction agit dans toutes les directions, quand un stress est appliqué au métal, les électrons de valence délocalisés, se déplaçant librement continuent d'exercer une attraction uniforme sur les ions positifs.

Si les caractéristiques de l'aluminium pur sont faibles, comme pratiquement celles de tous les métaux purs, la gamme d'alliage très étendue permet de trouver celui qui correspond aux contraintes d'utilisation envisagées[3].

A. Diversité des alliages :

Les propriétés mécaniques de l'aluminium peuvent être modifiées avec l'addition d'autres métaux, notamment le cuivre, le magnésium, le manganèse, le silicium, le lithium et le zinc, formant ainsi des alliages.

Certains éléments sont présents dans l'alliage sans qu'ils y aient été ajoutés volontairement : ce sont les impuretés dont les plus importantes sont le fer et le silicium, et dont il faut contrôler précisément la teneur pour certaines utilisations car elles peuvent avoir une influence défavorable. Tous les éléments jouent, par leur nature et leur teneur, sur les caractéristiques de l'alliage.

Il est possible d'augmenter les caractéristiques mécaniques, mais aussi de réduire significativement la ductilité de l'aluminium ainsi que de tous ses alliages, par déformation à

froid appelée écrouissage. L'écrouissage réduit également la conductivité électrique et la résistance à la corrosion des alliages, en revanche la charge de rupture et la dureté sont augmentées [2].

B. Usinage:

L'aluminium et ses alliages s'usinent avec facilité à condition de prendre quelques précautions aux grandes vitesses de coupe et d'utiliser des outils adaptés. Les alliages d'aluminium s'usinent mieux que l'aluminium pur et ne provoquent pas d'étincelles lors de leur usinage.

D'une manière générale, les alliages à hautes caractéristiques mécaniques c'est à dire ayant des capacités de déformation à froid faibles, s'usinent bien, (Fraisage, perçage, cisaillement...) [2].

C. Contraintes mécaniques élevées :

Lorsque les constructions sont soumises à des contraintes importantes, l'emploi des alliages communs conduirait à des épaisseurs ou à des sections incompatibles avec le but recherché.

Il est nécessaire alors d'utiliser des alliages à très hautes caractéristiques mécaniques. Les alliages les plus résistants peuvent avoir une charge de rupture supérieure à 700 MPa, donc largement équivalente à celles des aciers trempés.

A poids égal, la résistance mécanique d'un produit en alliage d'aluminium est 2,3 fois plus forte que celle du bronze et 1,5 fois plus forte que celle d'un acier trempé.

Les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium diminuent lorsque la température augmente. Ainsi à basse température, grâce à leur structure cristalline CFC, les alliages d'aluminium ont une bonne ductilité .

Allongement à la rupture	Module d'élasticité (Young)	Coefficient de poisson	Capacité calorique volumique	Limite Elastique à la traction	Module de torsion	Limite de résistance à la rupture
	E			Re		Rm
%	(GPa)	(sans Dim)	(MJ/m ³ K)	(MPa)	(GPa)	(MPa)
20 à 30	67.5	0.34	2.39	30	27	60 à 125

Tableau.1.1: Les principales caractéristiques mécaniques de l'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; dans ces 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 » ($20 \text{ MPa} < Re < 100 \text{ MPa}$). Après traitement(s), la résistance mécanique est augmentée ($100 \text{ MPa} < Re < 500 \text{ MPa}$) mais l'allongement à la rupture diminue fortement ($1 < A\% < 20$) [4].

Le module d'Young de l'aluminium (70 Gpa) montre qu'il est peu rigide mais cela peut être compensé par des traitements ou des alliages.

Bien sur, la pureté du métal joue quand même un rôle essentiel, car plus le métal est pur, plus la dureté, et la charge à la rupture diminuent alors que l'allongement augmente. De plus les produits en aluminium ont une surface fragile : ils sont sensibles aux coups et aux rayures.

Pour illustrer ces propriétés et ces contraintes, nous présentons les résultats d'une simulation d'une pièce en alliage d'aluminium, sur SolidWorks, un logiciel de simulation et de conception en 3D [4]:

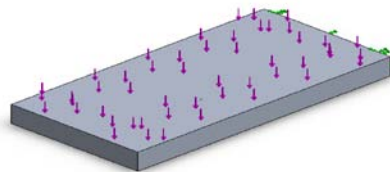


Figure.1.3: Simulation d'une pièce en alliage d'aluminium, sur SolidWorks[4].

Les forces appliquées sont réparties sur toute la pièce qui est fixé avec une liaison d'encastrement pour voir comment la pièce réagit aux contraintes.

(Figure.1.4), nous montre les contraintes qui agissent sur l'aluminium, ainsi nous pouvons apercevoir que les forces appliquées sur l'ensemble de la pièce montrent des contraintes importantes concentrées à l'endroit ou la pièce est encastrée.

Ainsi, si la pièce devait faire une rupture, elle commencerait par casser au niveau de la zone rouge, le lieu de la fixation.

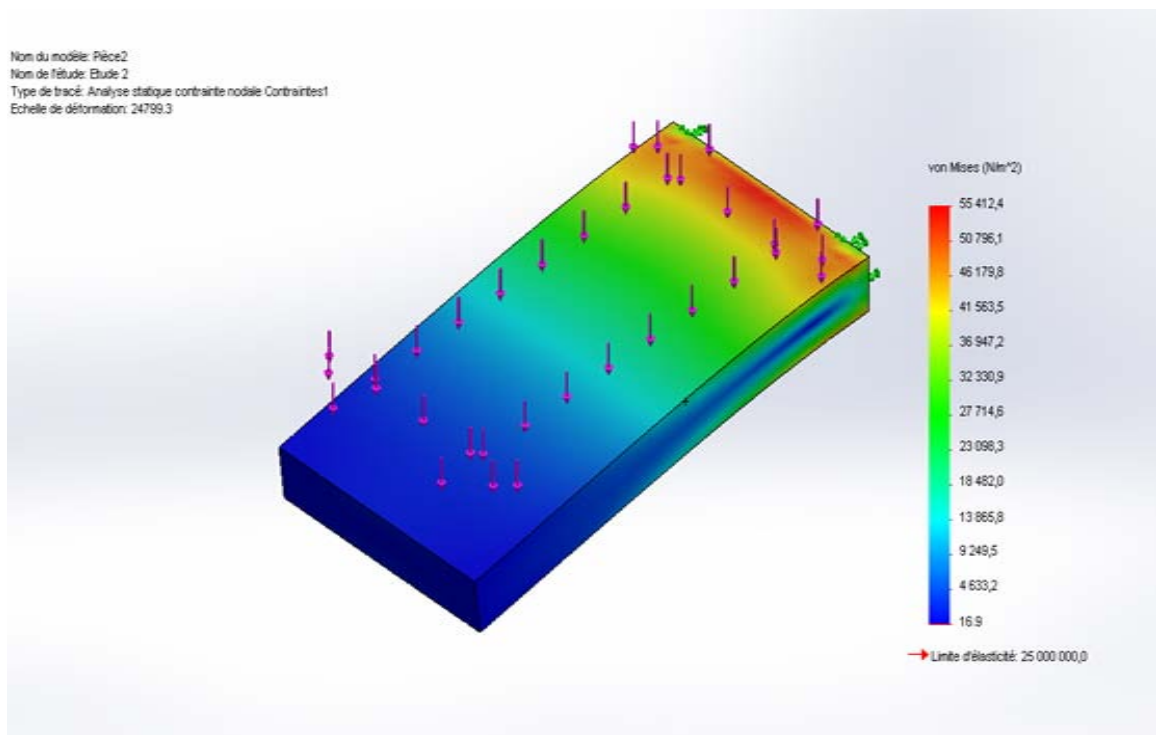


Figure.1.4: Simulation des contraintes qui agissent sur la plaque d'aluminium [4].

(Figure.1.5), montre le déplacement qu'effectue le matériau lors de l'application de toutes ces forces. L'aluminium étant ductile, on peut s'apercevoir que celui-ci a un allongement et un déplacement très prononcé au niveau de la poutre dans le vide. Le matériau va donc se courber.

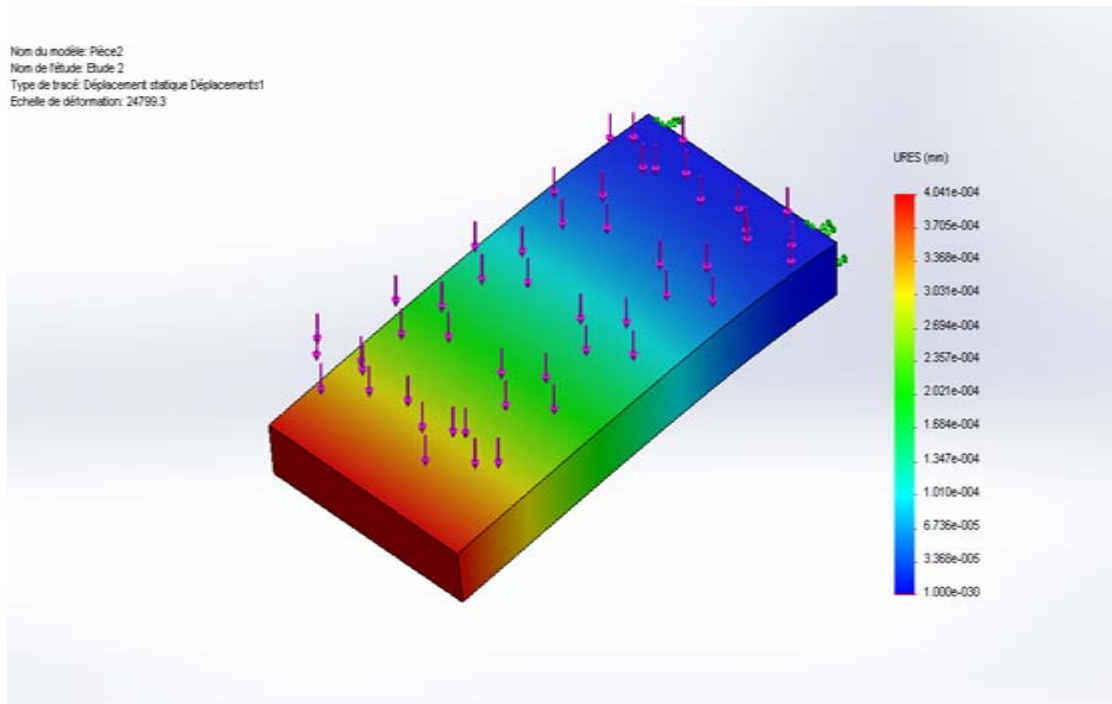


Figure.1.5: Simulation des déplacements du matériau sous l'effet des forces appliquées [4].

Pour finir, (Figure.1.6), nous montre la déformation que subit l'aluminium, et on s'aperçoit que le matériau va beaucoup se déformer au niveau de l'encastrement. La déformation plastique due au déplacement des dislocations s'effectuera donc dans la zone rouge, d'où l'origine d'une éventuelle rupture.

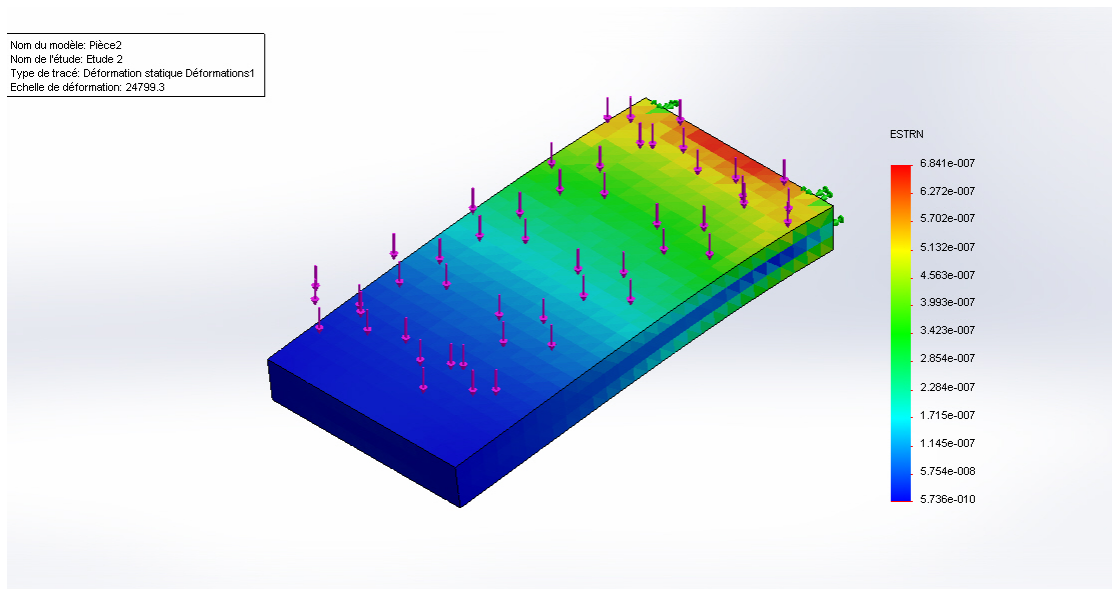


Figure.1.6: Simulation de l'état de déformation que subit l'aluminium [4].

La courbe de traction ci-dessous nous montre les différentes caractéristiques mécaniques de l'aluminium :

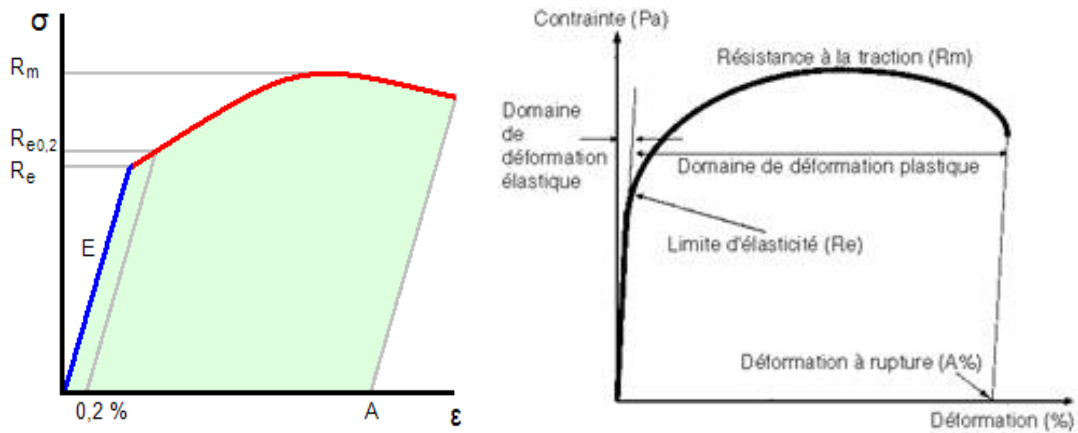


Figure.1.7: les différentes caractéristiques mécaniques de l'aluminium.

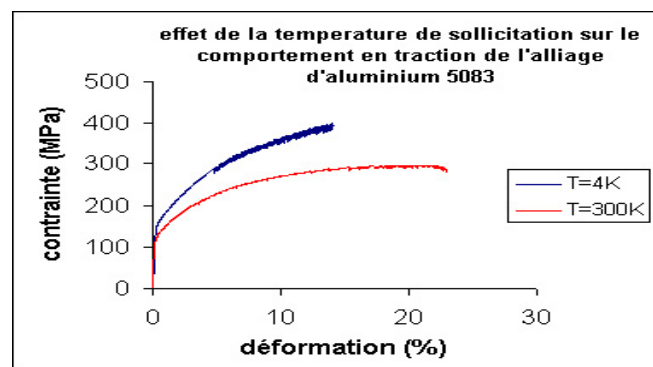


Figure.1.8: Effet de la température de solidification sur le comportement en traction d'un alliage en aluminium

Re : limite d'élasticité : c'est la contrainte qui marque la fin du domaine élastique et le début du domaine plastique. Elle n'est pas toujours facile à repérer notamment sur les métaux purs de structure CFC.

Rm : contrainte à laquelle est soumise le matériau au maximum de la charge, c'est à dire avant que n'apparaisse la striction.

Ar (A%) : allongement après rupture : c'est la mesure exprimée en pourcentage de l'allongement plastique total obtenu.

$$Ar = A\% = (l - l_0) / l_0 \tag{1.3}$$

I.2.3.2. Propriétés physiques:

L'aluminium est, après le magnésium, le métal le plus léger qui puisse être utilisé industriellement. Sa densité est environ le tiers de celle du cuivre ou de celle de l'acier. Son point de fusion relativement bas associé à une parfaite stabilité à toute température même à l'état fondu rend aisé la fusion de l'aluminium et seul l'argent, le cuivre et l'or possèdent une

conduction thermique supérieure à celle de l'aluminium. Enfin sa haute conductibilité électrique et son absence de magnétisme le désignent au même titre que le cuivre [4].

A. Densité :

L'aluminium est un métal dont la densité est faible (2,7), c'est le plus léger de tous les métaux usuels, sa masse volumique est de 2700 kg/ m³ et la masse volumique des alliages d'aluminium est comprise entre 2600 et 2800 kg/ m³.

La masse volumique est fortement influencée par la température et diffère suivant que l'aluminium est à l'état solide ou liquide :

Etat	Température		Masse volumique Kg/m ³
	K	°C	
Solide	298	25	2698
	373	100	2680 (2)
	573	300	2660 (2)
	773	500	2620 (2)
	933	660	2550 (2)
Liquide	933	660	2368(3)
	973	700	2357(3)
	1023	750	2345(3)
	1073	800	2332(3)
	1123	850	2319(3)
	1173	900	2304 (3)

Tableau .1.2: Masse volumique de L'Aluminium solide et liquide en fonction de la température

En revanche, sa masse volumique est faiblement influencée par la présence d'impuretés. La présence de certains éléments (ex: B, Si, Mg, Li) dans l'aluminium diminue la masse volumique alors que d'autres éléments (ex: Ti, Zn, Cr, Fe, Cu) augment la masse volumique de l'aluminium.

I.2.3.3. Propriétés thermiques:

A. Température de fusion :

Pour casser la liaison métallique de l'aluminium, il faut fournir une énergie qui est atteinte à température de fusion qui dépend de la pureté de l'aluminium. Celle-ci varie suivant les mesures de 657 à 660 °C :

- 657 °C pour un aluminium « commercial » ;
- 659 °C et 660 °C pour le métal dont le titre est de 99,99 %.

La valeur maintenant admise de l'enthalpie de fusion de l'aluminium (encore couramment appelée chaleur latente de fusion) est de : **397 J .g⁻¹** Même pour le métal très pur, la fusion commence toujours aux joints de grain car les liaisons au niveau des défauts sont moins énergétiques.

Lors de la fusion, l'aluminium (pur ou allié) subit une augmentation de volume d'un peu plus de 6,26% qui, à l'inverse, se traduit à la solidification par une contraction de volume dont il faut impérativement tenir compte lors du moulage de pièces en fonderie [3].

Le coefficient de dilatation thermique linéaire de l'aluminium est de $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ entre $+20^{\circ}\text{C}$ et $+100^{\circ}\text{C}$ et varie en fonction de la température. Ce coefficient de dilatation thermique est donné par la formule :

$$\alpha_T = \frac{d}{dT} \left(\frac{\Delta L}{L_0} \right) = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dT} \quad (1.4)$$

B. Conduction thermique :

L'aluminium a une conductivité thermique très élevée environ 66 % de celle du cuivre, celle des alliages d'aluminium, étant plus faible car les électrons dans l'aluminium ont une grande mobilité de mouvement (électrons libres), donc la structure de l'aluminium permet une grande diffusion de l'énergie cinétique par chocs de particule et ainsi transmettre rapidement la chaleur.

La diffusivité thermique de l'aluminium est du même ordre de grandeur que celle du cuivre. La diffusivité thermique a exprime l'aptitude d'un métal à transmettre la chaleur plutôt qu'à l'absorber. Une diffusivité élevée signifie que la chaleur y transite rapidement, ce qui est le cas pour l'aluminium [3].

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (1.5)$$

Avec:

λ : conductivité thermique.

ρ : masse volumique.

c_p : capacité thermique massique à pression constante.

D'une manière générale, à température ambiante, cette propriété est peu affectée par l'état métallurgique du métal.

Les déformations plastiques et élastiques, même importantes, ne réduisent que de 2 à 3 % la conductivité thermique.

Dans le cas d'un aluminium de haute pureté à l'état recuit (état zéro) et présentant une résistivité résiduelle p_0 de $5,94 \cdot 10^{-12} \Omega \cdot m$ et à température ambiante, la valeur de la conductivité thermique de l'aluminium non allié est de $237 \text{ W} \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

Remarque : sa conductivité thermique est à son maximum entre 6 et 12k.

I.2.3.4. Propriétés électriques :

L'aluminium conduit très bien l'électricité puisqu'il se place immédiatement après le cuivre dans les métaux communs. Cela est dû au fait que l'aluminium a une électronégativité de $1,61 < 2$, donc possède des liaisons métalliques, donc il s'agit d'un conducteur par conséquent ses électrons de valence sont délocalisés, sont libres de se déplacer à travers le métal, et peuvent monter très facilement d'un niveau d'énergie à un autre dans la même bande d'énergie.

La conductivité électrique, inverse de la résistivité électrique, mesure l'aptitude d'un matériau à conduire l'électricité. Elle est généralement exprimée en pourcentage IACS (International Copper Annealed Standard) d'un échantillon standard de cuivre recuit dans des conditions normalisées.

La valeur de la conductivité électrique de l'aluminium recuit (état O), à 20 °C, généralement admise est de : **$37,66 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot m^{-1}$ (64,94 % IACS)**

Soit une résistivité de : **$2,6545 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m < 10^{-5} \Omega \cdot m \Rightarrow$ conducteur**

A. Influence de la température :

La résistivité augmente d'autant plus que la température du métal est élevée ainsi que l'illustrent les données du (tableau 1.3) concernant l'aluminium. Si la température augmente, sa résistivité augmente car les électrons sont gênés dans leur déplacement par les chocs des particules qui vibrent (vibration thermique) [4].

Température (°C)	Résistivité électrique ρ (en n Ω .m)
0	25,0
100	36,2
200	47,8
300	60,0
400	72,9
500	86,3
600	101
650	109

Tableau.1.3: La résistivité électrique de l'aluminium en fonction de la température

I.2.3.5. Propriétés magnétiques:

Du fait de sa valence impaire et du peu d'électrons célibataires sur les derniers niveaux d'énergies, l'aluminium est paramagnétique. Il ne possède donc pas une aimantation spontanée mais, sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, acquiert une aimantation dirigée dans le même sens que ce champ d'excitation. Cette aimantation disparaît lorsque le champ d'excitation est coupé, il n'y a donc pas de phénomène d'hystérésis. Sa susceptibilité magnétique décroît avec la température[3].

I.2.3.6. Propriétés optiques :

Le pouvoir réflecteur de l'aluminium poli est excellent et varie avec la longueur d'onde. Dans le spectre visible il est de l'ordre de 85% à 90%, seul l'argent peut faire mieux. Cette propriété peut être améliorée par des traitements de surface comme le polissage et le brillantage, ainsi que par un titre plus élevé, en effet, le pouvoir réflecteur dépend de l'état de la surface du métal.

Une surface rugueuse perd beaucoup en pouvoir réflecteur. Le pouvoir réflecteur dépend du titre de l'aluminium non allié (figure1.9), c'est la raison pour laquelle les produits « grand brillant » sont en aluminium à 99,99 %.

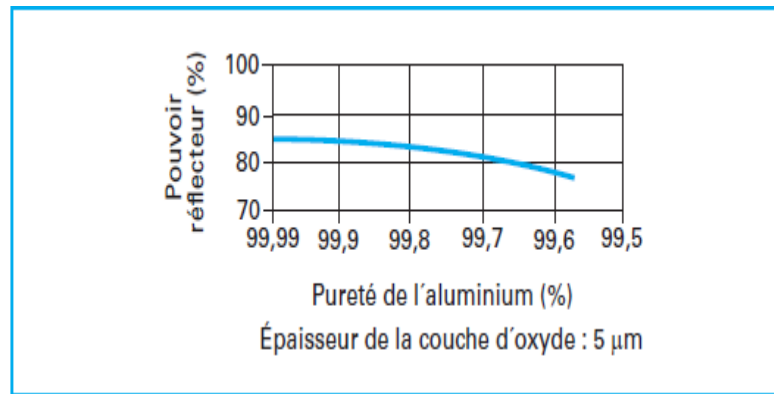
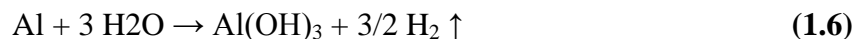


Figure.1.9:Influence du titre de l'aluminium sur le pouvoir réflecteur

L'aluminium est un métal qui possède des électrons libres c'est pourquoi il est opaque et non transparent.

I.3. Propriétés chimiques et de surface:

La tendance naturelle du métal est de retourner à son état stable d'oxyde, cette réaction inverse est la corrosion dont la réaction s'écrit :



Cette réaction globale est en fait la somme de deux demi-réactions électrochimiques:



La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium explique le développement de ses nombreuses applications dans des milieux dans lesquels les conditions d'emploi peuvent être difficiles. Sa tenue à la corrosion dépend de différents paramètres tels que son état métallurgique (traitement qu'à subit le matériau), l'état de surface, des caractéristiques du milieu dans lequel il est exposé c'est-à-dire selon l'humidité, la température, ou encore la présence d'agents agressifs et dépend aussi de la fréquence d'entretien.

I.3.1. Résistance à la corrosion:

I.3.1.1. Passivation de l'aluminium :

La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium et de ses alliages est due à la présence permanente sur le métal d'un film continu d'oxyde d'aluminium, appelé «alumine» qui le rend passif à l'environnement. Ce film se forme dès que le métal est mis au contact

d'un milieu oxydant : l'oxygène, l'air, l'eau. Il se reforme instantanément au contact de l'air lors des opérations de mise en forme : pliage, découpage, perçage et même lors du soudage. Son épaisseur est comprise entre 5 et 10 nanomètres.

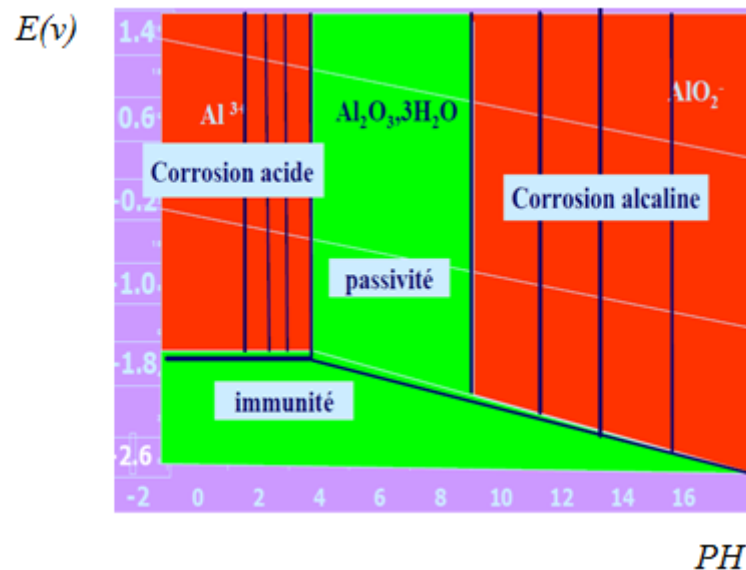


Figure.1.10: Résistance à la corrosion de l'aluminium et de ses alliages

Sa stabilité physico-chimique dépend en particulier des caractéristiques du milieu. La vitesse de dissolution du film d'oxyde dépend du pH du milieu corrosif. Elle est très forte en milieu acide et alcalin, elle est faible dans les milieux proches de la neutralité de pH 5 à 9, le film est donc particulièrement résistant dans ces milieux (Figure.1.10) [4].

Le pH n'est pas le seul critère à prendre en compte pour prévoir la tenue à la corrosion des alliages d'aluminium, il faut aussi tenir compte de la nature de l'acide base, par exemple les acides chlorhydriques et sulfuriques attaquent fortement l'aluminium et la soude caustique et la potasse même à faible concentration attaquent l'aluminium.

I.3.1.2. Corrosion par piqûres :

La corrosion par piqûre est un phénomène électro chimique qui se produit sur des zones très restreintes de la surface de l'aluminium. Dans ces zones, la couche passive ne joue plus son rôle protecteur. Cette corrosion se caractérise par l'apparition de fines perforations après une phase d'amorçage qui peut être plus ou moins longue. Là où survient la corrosion par piqûres, il y a rupture de la couche passive. La corrosion par piqûres se produit principalement dans les milieux neutres chlorurés contenant de l'oxygène ou un oxydant et se traduit par la formation de cavités dans le métal, généralement recouvertes de pustules blanches d'alumine hydratée gélatineuse très volumineuses.

I.3.1.3. Corrosion trans ou intercrystalline :

Cette corrosion résulte de la présence d'une zone anodique. Elle peut se propager de deux manières :

- La corrosion est trans-cristalline lorsque celle-ci progresse dans toutes les directions.
- La corrosion est inter-cristalline lorsque celle-ci se propage le long des joints de grains.

Elle peut provoquer une détérioration très conséquente des caractéristiques mécaniques et provoquer la ruine de la structure si la propagation est profonde [4].

I.3.1.4. Corrosion galvanique :

L'aluminium et ses alliages sont plus électronégatifs que la plupart des métaux usuels. Dès que deux métaux ou alliages de nature différente sont en contact direct ou reliés électriquement par des boulons, dans un milieu humide et conducteur, par exemple l'eau de mer, l'un des métaux peut se consommer tandis que l'autre conservera son intégrité (figure.1.11).

Pour qu'il y ait corrosion galvanique il faut la présence d'un électrolyte et une continuité électrique entre les deux matériaux donc l'un des moyens simple pour éviter cette corrosion est d'interposer un isolant entre les deux.

Dans un milieu aqueux, le premier métal qui sera attaqué sera celui qui est le plus électronégatif. Si tous deux ont un potentiel électronégatif, ce sera celui qui est électronégatif, si l'autre est électropositif. Donc la différence de potentiel indique le sens de la menace, mais pas son ampleur, ce n'est donc pas le seul facteur à prendre en compte. La conduction électrique du milieu, la température sont aussi des facteurs importants.

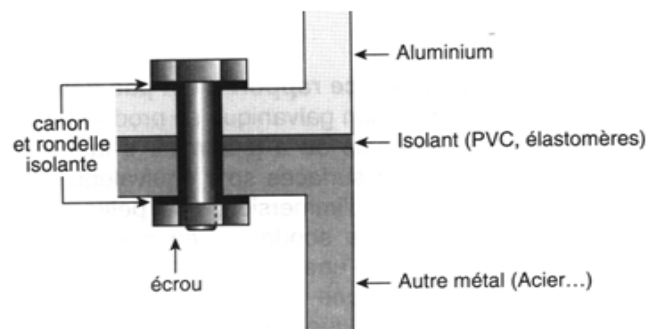


Figure1.11:Principe de la corrosion galvanique

Chapitre II

Méthodes de caractérisation Mécanique des matériaux

II.1. Introduction:

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

Le deuxième chapitre portera donc sur la caractérisation mécanique usuelle indispensable pour les calculs de structures et de dimensionnement des pièces mécaniques en vue de prédire leur aptitude de résistances aux différentes sollicitations mécaniques imposées en service. On s'y adresse, donc, à décrire les techniques expérimentales associées permettant la caractérisation mécanique des matériaux : soient leur résistance à la déformation évaluée par les essais de traction et de dureté ainsi que leur résistance au choc mécanique évalué par un essai de résilience.

La maîtrise de nouveaux matériaux a été à l'origine des révolutions dans l'histoire de technologies inventées. Les âges de la préhistoire sont d'ailleurs définis par les matériaux employés, âge de la pierre, âge du bronze, du fer. Aujourd'hui, le nombre de matériaux ou en tout cas le nombre de références est considérable et en constante croissance. En effet, la science des matériaux permet de concevoir de nouveaux matériaux adaptés à chaque nouvelle application. On pourra distinguer deux grandes catégories de matériaux :

- Les matériaux de structure, qui seront l'objet de ce chapitre et qu'on utilise essentiellement pour leurs capacités à soutenir des sollicitations mécaniques et/ou thermiques.
- Les matériaux fonctionnels, qu'on utilise pour leurs propriétés physiques, telles que conductivité ou semi-conductivité électrique, magnétisme, propriétés optiques ...

Cependant, même en se restreignant aux matériaux de structure, le nombre de matériaux existant reste considérable. L'objectif de ce chapitre n'est donc pas de les étudier de manière exhaustive, mais de se donner les éléments de compréhension permettant de trouver pour une application particulière la solution matériau la plus adaptée. Une solution matériau pour une application comprend trois volets, la structure, le procédé de mise en œuvre et la tenue en service. L'accent sera mis sur les relations entre la structure du matériau et ses propriétés mécaniques[5].

II.2. Types de matériaux :**II.2.1. Les métaux :**

On obtient les métaux (liaisons métalliques) soit par réduction à haute température de leurs oxydes en présence de carbone (ex. fer) ou par électrolyse à haute température (ex. aluminium). Ce sont les matériaux les plus employés pour les applications structurales et pour l'essentiel des métaux ferreux (90% ferreux, les non-ferreux étant des alliages de Al, Cu, Ni et Ti). Ils sont capables de se déformer de manière permanente (ductiles) ce qui permet de réaliser des opérations de mise en forme par déformation plastique (emboutissage, forge, estampage...) ou d'assemblage par déformation plastique. Par ailleurs les matériaux métalliques sont denses, et bons conducteurs thermiques et électriques[5].

II.2.2. Les polymères et les élastomères:

Ils possèdent des modules faibles (environ 50 fois inférieures à ceux des métaux) mais ils peuvent être résistants, et ils peuvent se déformer d'une façon importante, des pièces compliquées possèdent plusieurs fonctions peuvent être moulées en une seule opération. Leurs propriétés dépendent fortement de la température, ils résistent à la corrosion et ont des coefficients de frottements faibles. Un élastomère est un polymère présentant des propriétés « élastiques », obtenues après réticulation à différentes échelles. Il supporte de très grandes déformations avant rupture[5].

II.2.3. Les céramiques et les verres:

Cette famille de matériau possède également des modules élevés. Mais contrairement aux métaux, les céramiques et les verres sont fragiles et possèdent une faible tolérance aux concentrations des contraintes (comme les trous et les fissures). Leur résistance à la traction signifie la résistance à la rupture.

Ce sont des matériaux rigides et dures et résistent à l'abrasion, elles conservent leurs résistances à haute températures et résistent bien à la corrosion[5].

II.2.4. Les composites:

Ces matériaux combinent des propriétés intéressantes des autres familles sans en avoir leurs inconvénients. Ils sont légers, rigides et résistants et peuvent être tenace. La majorité des composites disponibles aujourd'hui sont à matrice polymère (en général époxyde ou polyester) renforcés des fibres de verre, carbone, ou kevlar (Le Kevlar est une fibre synthétique qui possède de très bonnes propriétés mécaniques en traction (résistance à

rupture, de 3100 MPa et module entre 70 et 125 GPa) mais ils ne peuvent pas être utilisés au-dessus de 250°C à cause de la matrice en polymère mais leurs performances à température ambiante sont exceptionnelles. Les pièces en composite coûtent chères et sont difficiles à mettre en forme et à assembler c'est pourquoi le concepteur ne les utilisera que lorsque le surcroît de la performance justifie le surcoût[5].

II.3. Essais mécaniques:

Les essais mécaniques sont l'étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux, du module d'Young à la limite d'élasticité, en passant par la ténacité ou la résistance à la fatigue, et ce dans des conditions variables, par exemple de température ou de vitesse de sollicitation. Le propos de ce chapitre est de présenter les techniques expérimentales les plus couramment utilisées, aussi bien dans les laboratoires universitaires qu'industriels, pour caractériser le comportement mécanique des matériaux. Les techniques abordées seront : les essais uniaxiaux (quasi statique et dynamiques), les essais multiaxiaux, les mesures d'indentation, les essais de fatigue et les techniques gravitant autour du phénomène de rupture [6].

II.3.1. Essai de traction:

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction. Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes de pièces allant d'un pignon microscopique jusqu'à la structure métallique d'un grand hall. Dans la recherche on l'applique pour la caractérisation de nouveaux matériaux et dans l'industrie pour les contrôles périodiques servant à surveiller la qualité des alliages, des polymères et des céramiques[7].

Cet essai a comme objectif :

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

II.3.1.1.Eprouvette[8]:

La forme et les dimensions des éprouvettes dépendent de la forme et des dimensions des produits métalliques dont on veut déterminer les caractéristiques mécaniques. L'éprouvette est généralement obtenue par usinage d'un prélèvement d'un produit ou d'une ébauche moulée. Cependant, les produits de la section constante (profilés, barres, files, etc.), ainsi que les éprouvettes brutes de fonderie (par exemples : fontes, alliages non ferreux) peuvent être soumises à l'essai sans être usinées.

Les éprouvettes usinées doivent comporter un congé de raccordement entre les têtes de fixation et la partie calibrée lorsque celles-ci sont de dimensions différentes. Les dimensions de ce congé peuvent être importantes et il est recommandé pour qu'elles soient définies dans la spécification du matériau. Les têtes de fixation peuvent être de toute forme adaptée aux dispositifs de fixation de la machine. Les éprouvettes non usinées (par exemple celles brutes fonderie) doivent comporter un congé de raccordement entre les têtes de fixation et la partie calibrée. Les dimensions de ce congé sont importantes et il est recommandé pour qu'elles soient définies dans la norme de produit [7].

On note :

S0 : section initiale en mm² **Su** : section minimale après rupture

L0 : longueur initiale entre repères **Lu** : Longueur ultime après rupture

LC : longueur de la partie calibrée

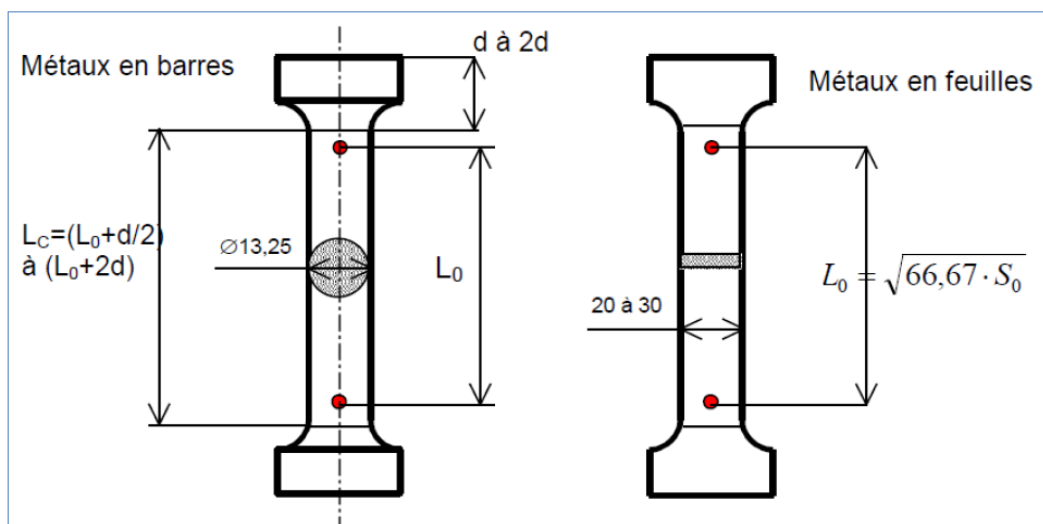


Fig2.1: Dimension de l'échantillon pour l'essai de traction [7]

Tous les paramètres qui sont déduits de l'essai de traction traduisent les propriétés du matériaux dans la direction de l'essai. Ces valeurs dépendent donc de la direction de prélèvement de l'éprouvette par rapport à d'éventuelles directions d'anisotropie (par exemple en carrosserie, la

direction de laminage de la tôle mince). Pour les tôles laminées, la direction de prélèvement doit donc toujours être précisée :

- Sens long SL (repéré par l'indice 0°)
- Sens travers ST (repéré par l'indice 90°)
- Sens "oblique" (repéré par l'indice 45°).

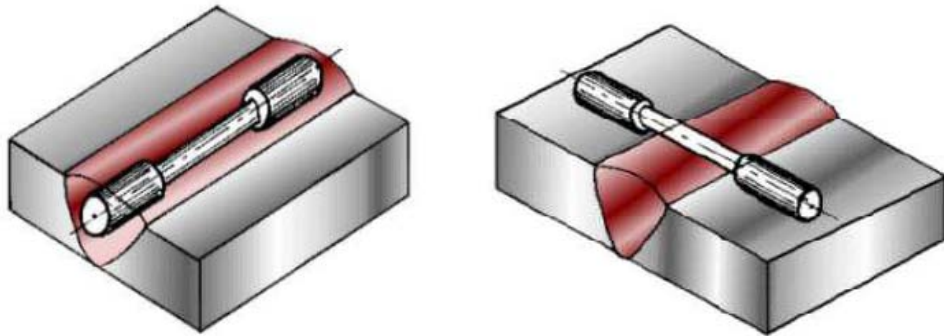


Fig.2.2 :évaluation des caractéristiques d'un cordon de soudure

II.3.1.2. Exécution de l'essai:

Une machine de traction est constituée d'un bâti rigide équipé d'un travers fixe à laquelle est fixée l'une des têtes de l'éprouvette ; l'autre extrémité de l'éprouvette est fixée à une traverse mobile. Le mouvement de la traverse mobile est assuré soit par une commande hydraulique, soit des vis sans fin. La charge imposée à l'éprouvette est mesurée par un dynamomètre, et l'allongement par un extensomètre. Ceci, permettra d'aboutir à des résultats d'enregistrement de la courbe brut de traction, $F=f(\Delta l)$, caractéristique de l'échantillon et de sa géométrie [5]:.

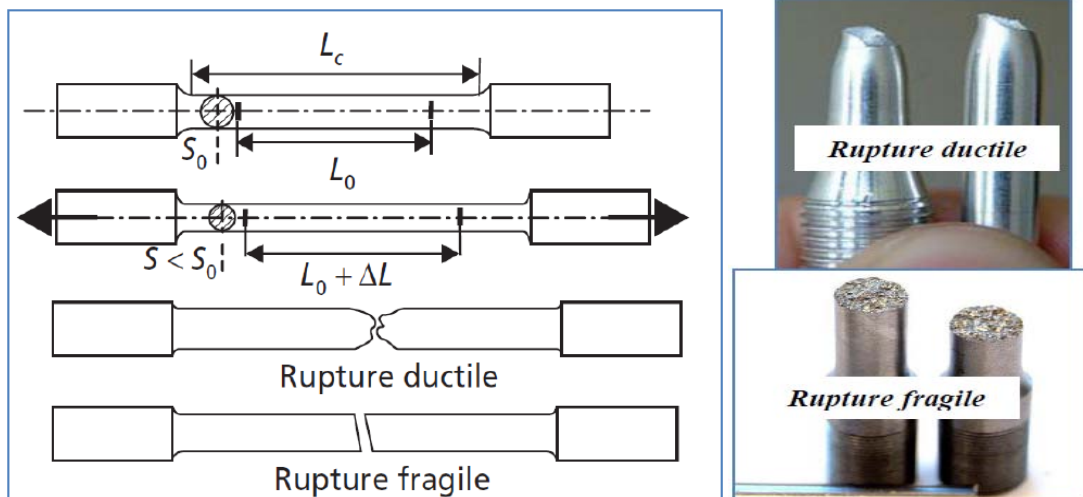


Fig. 2.3:Schéma d'une éprouvette de traction cylindrique et de son évolution en cours d'essai.

II.3.1.3. Exploitation des résultats de l'essai:

A. Courbe conventionnelle:

Afin de pouvoir utiliser les courbes brutes de traction, on doit les modifier pour que les résultats obtenus soient fonction que de matériau étudié et non de la géométrie de l'éprouvette. Pour ce faire, on rapporte la charge $F(N)$ à la section initiale S_0 (mm²) de l'éprouvette en vue d'obtenir la contrainte conventionnelle $\sigma_c(MPa)$. Et on rapporte l'allongement Δl (mm) à la longueur initiale, l_0 , pour obtenir la déformation conventionnelle (ϵ_c), soient :

$$\sigma_c = \frac{F}{S_0} [Mpa] \quad (2.1)$$

$$\epsilon_c = \frac{\Delta l}{\Delta l_0} [\%] \quad (2.2)$$

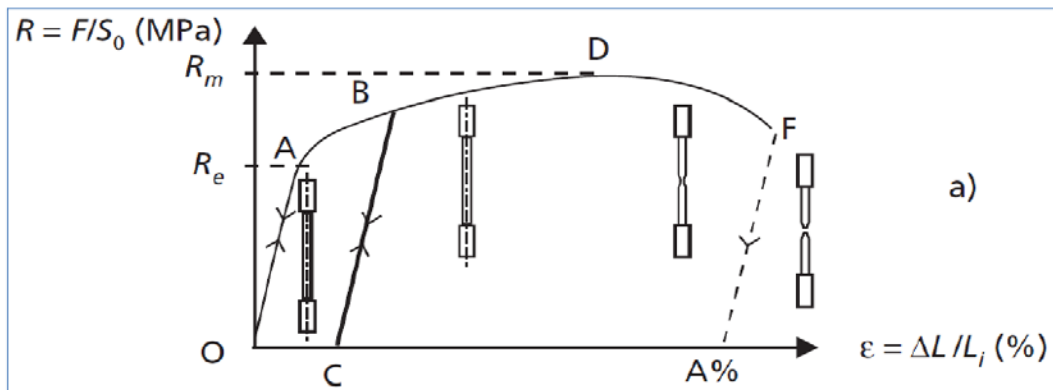


Fig. 2.4: Courbes conventionnelles typiques de traction

OA : allongement élastique linéaire, réversible.

Au-delà de A : déformation plastique permanente + déformation élastique.

La suppression de la force appliquée (BC) laisse apparaître un allongement plastique rémanent (**OC**). Une remise en charge conduit à une nouvelle limite d'élasticité (CB).

$R_e = F_e / S_0$: limite apparente d'élasticité (MPa) :

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (2.3)$$

Rp_{0,2}: limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % d'allongement plastique; sa détermination nécessite souvent l'usage d'un extensomètre.

AD : allongement élastique + allongement plastique réparti.

$R_m = F_m / S_0$: résistance à la traction (MPa).

DF : apparition et progression d'une striction (réduction de section localisée) dans les matériaux ductiles. En F : la rupture de l'éprouvette.

Z% : Coefficient de Striction, Avec **S_u** : la section à la rupture :

$$Z \% = 100 \cdot \frac{S_0 - S_u}{S_0} \quad (2.4)$$

A % = $\Delta L_u / L_i$: allongement pour cent après rupture (%) :

$$A \% = 100 \cdot \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad (2.5)$$

E = R_e/ε_e: module de Young. En pratique, seule l'utilisation d'un dispositif extenso métrique très précis permet d'exploiter la pente de la montée élastique pour la mesure de E.

Cas d'un à comportement fragile : Dans le cas d'un matériau fragile, la rupture survient en fin de domaine élastique. L'allongement à la rupture est nul ou très faible. On ne peut déduire de la courbe que le module de Young E, et la résistance à la traction **R_m**

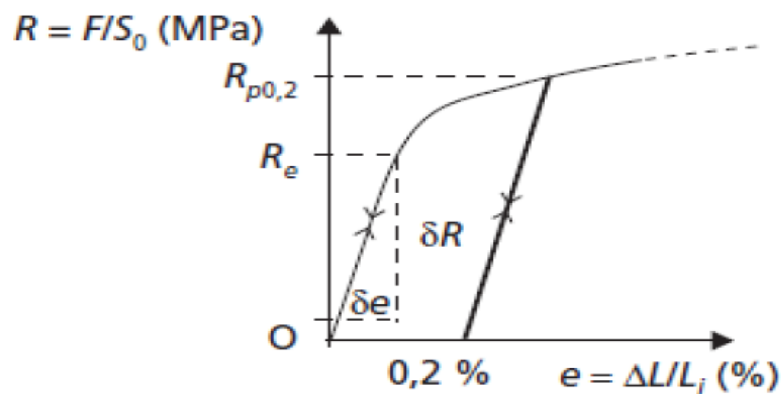


Fig. 2.5: Détail pour le calcul de E (pente de la partie élastique) et Rp0.2

La courbe conventionnelle est donc obtenue à partir d'enregistrement F-Δl effectué lors de l'essai en rapportant la force à la section initiale pour raisonner en terme de contrainte, et en rapportant l'allongement à la longueur initiale pour raisonner en termes d'allongement relatif. On obtient ainsi une courbe intrinsèque au matériau, indépendante des dimensions de l'éprouvette utilisée[5].

B. Courbe rationnelle de traction:

C'est la courbe obtenue en rapportant la force à la section minimale instantanée S, pour raisonner en termes de contrainte vraie $\sigma = F/S$, et en rapportant l'allongement à la longueur instantanée pour raisonner en termes de déformation rationnelle $\epsilon = \delta l/l$. La courbe ainsi obtenue est croissante, même pendant la striction. Le volume de l'éprouvette restant constant et la déformation étant uniformément répartie de O à D, on a :

Contrainte vraie σ_v : Elle tient compte de la variation de section au cours de l'essai, et est égale à la charge rapportée à la section instantanée :

$$\sigma = \frac{F}{S} [MPa] \quad (2.6)$$

En admettant que le volume de la partie calibrée (de longueur utile) de l'éprouvette reste constant en raison d'une déformation plastique homogène avec conservation du volume, on a :

$$S_0 L_0 = S l = S (l_0 + \Delta l)$$

Ce qui permet d'écrire :

$$S = \frac{S_0}{1 + \frac{\Delta l}{l_0}} = \frac{S_0}{1 + e} \quad (2.7)$$

Portant l'expression de la section dans la relation de la contrainte vraie, nous obtenons :

$$\sigma_v = \frac{F}{S_0} (1 + e) = \sigma_c (1 + \varepsilon_c) \quad (2.8)$$

Déformation rationnelle ε_r : L'allongement instantané est égal à $d l / l$ et, au même instant, l'allongement depuis le début de l'essai est, en considérant des allongements infiniment petite $d l$

$$\varepsilon_r = \int_{l_0}^l \frac{d l}{l} = L n (1 + \varepsilon_c) \quad (2.9)$$

L'avantage de cette définition est la mise en évidence de la propriété d'additivité, utile pour les calculs de plasticité. La différence entre ε_c et ε_r devient important au-delà de 20% de déformation. Elle peut-être comme le travail nécessaire par unité de volume pour provoquer la rupture.

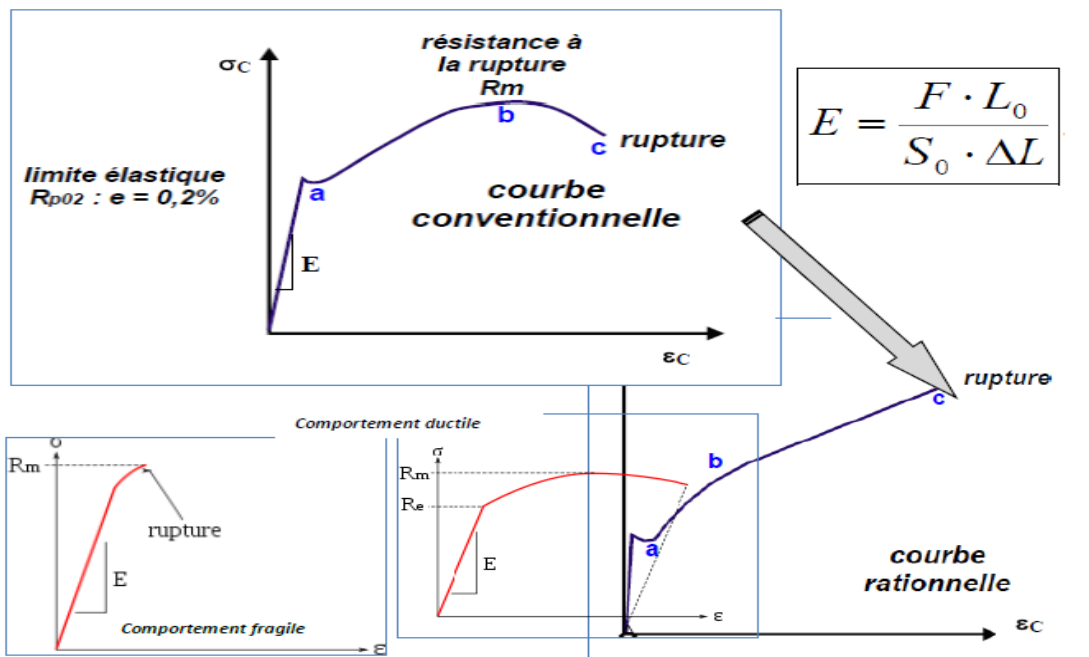


Fig.2.6: Exploitation des résultats de traction [8]

II.3.1.4. Déformation élastique et rigidité:

Le module de Young ou module d'élasticité (longitudinale) ou, noté « E », encore module de traction est la constante mesurable et qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et le début de la déformation d'un matériau élastique. Le module d'Young E décrit le comportement en traction et en compression[9].

Pour de faibles déplacements, la force de rappel peut être considérée comme proportionnelle au déplacement : $d-d_0$ (pour le cas d'une éprouvette cylindrique par exemple)

Matériaux	Module d'élasticité (GPa)
Acier Carbone	210
Fer	211
Alliage de cuivre	124
Cuivre	130
Alliage d'aluminium	72
Aluminium	70

Tableau 2.1: Valeur typique du module d'élasticité pour différent métaux

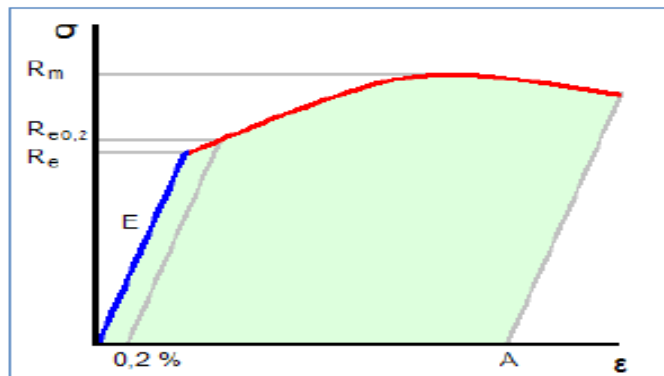


Fig.2.7:Le module d'Young E décrit le comportement en traction et en compression..

Les allongements (ou raccourcissements) relatifs ou déformations ϵ du solide (sans dimension), sont alors proportionnels à la densité surfacique de force, ou contrainte σ , ce qui traduit la loi de Hooke [9]:

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \cdot \frac{d - d_0}{d} = E \epsilon \quad (2.10)$$

Les contraintes s'exprimant en MPa (ou N/mm²) et les déformations étant sans dimensions, le coefficient E, appelé module d'élasticité à la traction ou module de Young du matériau, s'exprime en MPa. Simultanément à la déformation dans la direction d'application de la force, des déformations de signe opposé se produisent dans les directions orthogonales.

Dans les axes de la figure ci-dessous, les déformations élastiques peuvent toutes s'exprimer en fonction de la contrainte σ_x appliquée dans la direction x [9].

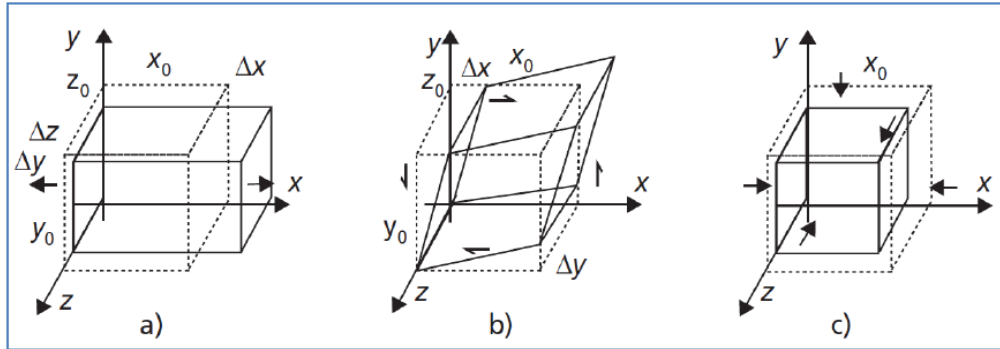


Fig. 2.8: Schéma des déformations élastiques provoquées par différentes sollicitations. a) Contrainte de traction uni-axiale σ_x . b) Contrainte de cession τ_{xy} dans le plan xy. c) Pression hydrostatique p [9].

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta x}{x_0} = \frac{\sigma_x}{E} \text{ et } G = \frac{E}{2(1+\nu)} K = \frac{E}{3(1-2\nu)} G = \frac{3}{2} K \frac{(1-2\nu)}{(1+\nu)} E = \frac{9KG}{G+3K} \quad (2.11)$$

« ν », sans dimension, est ici le coefficient de Poisson, autre constante caractéristique du comportement élastique du matériau. Dans le cas d'une contrainte tangentielle de cession « τ », une déformation par distorsion « γ » apparaît, qui est approximativement proportionnelle à la cession appliquée.

$$\gamma = \frac{\Delta y}{x_0} = \frac{\Delta x}{y_0} = \frac{\tau}{2G} \quad (2.12)$$

La constante G (ou μ) est appelée module d'élasticité au cisaillement du matériau, en MPa. Par ailleurs, une compression hydrostatique sous une pression p permet de définir le module de compressibilité K (ou χ) du matériau, en MPa, à partir de la variation relative de volume :

$$\frac{\Delta V}{V_0} = -\frac{p}{K} \quad (2.13)$$

Dans le cas courant d'un matériau isotrope, deux constantes d'élasticité (E et par exemple) suffisent à caractériser son comportement élastique. Les constantes E, G et K ne sont donc pas indépendantes, mais peuvent toutes s'exprimer en fonction de deux d'entre elles grâce aux relations :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} K = \frac{E}{3(1-2\nu)} G = \frac{3}{2} K \frac{(1-2\nu)}{(1+\nu)} E = \frac{9KG}{G+3K} \quad (2.14)$$

II.3.1.5. Déformation plastique et écrouissage:

Le comportement élastique, caractérisé par la réversibilité des déformations lors de la suppression des contraintes, ne se manifeste seul que pour des contraintes inférieures à une valeur limite, appelée limite d'élasticité. Au-delà de cette valeur, des déformations permanentes s'ajoutent aux déformations élastiques ou bien la rupture se produit. Pour compléter la modélisation de la plasticité anisotrope dans le cadre des modèles d'écrouissage isotrope, il convient de préciser la loi d'écrouissage $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}^p)$ reliant la contrainte équivalente et la déformation plastique équivalente. Les lois empiriques usuelles sont récapitulées dans le tableau ci-dessous [8].

Loi d'écrouissage	$\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}^p)$	$\gamma = \frac{1}{\bar{\sigma}} \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}^p}$	Remarques
Loi de Hollomon	$\bar{\sigma} = K(\bar{\epsilon}^p)^N$ <i>N exposant d'écrouissage</i>	$\gamma = \frac{N}{\bar{\epsilon}^p}$	<i>Limite élastique nulle (La limite élastique doit être faible devant l'écrouissage)</i>
Loi de Swift	$\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon}^p)^N$ <i>$K\epsilon_0^N$ limite élastique</i>	$\gamma = \frac{N}{\epsilon_0 + \bar{\epsilon}^p}$	<i>Bien adaptée aux aciers doux, aciers faiblement alliés</i>
Loi de Ludwik	$\bar{\sigma} = \sigma_E + K(\bar{\epsilon}^p)^N$ <i>σ_E limite élastique</i>	$\gamma = \frac{N(\bar{\sigma} - \sigma_E)}{\bar{\sigma}\bar{\epsilon}^p}$	<i>Fort écrouissage à faible déformation</i>
Loi de Voce	$\sigma = \sigma_s(1 - \alpha \exp(-\beta \epsilon))$ <i>σ_s contrainte de saturation</i> $0 < \alpha < 1 \quad \beta < 0$	$\gamma = -\frac{\alpha\beta}{\exp(-\beta\bar{\epsilon}^p) - \alpha}$	<i>Bien adaptée aux alliages d'aluminium Hautes température</i>

Tableau.2.2: Lois d'écrouissage usuelles [10]

La modélisation de la partie élastique peut être établie selon les capacités de la matière à supporter les déformations plastiques avant de se rompre.

II.3.2. Essai de dureté:

La dureté, de symbole général H, caractérise la capacité d'un matériau à résister au marquage (empreintes, rayures. . .), à l'usure et à l'érosion. Elle peut être évaluée en mesurant une empreinte laissée en surface par un poinçon agissant sous l'action d'une force connue mais aussi par une hauteur de rebondissement d'un objet très dur sur la surface à tester (essai Shore pour élastomères et plastiques).

L'essai de dureté est relativement économique (pas d'éprouvettes à réaliser). On peut mesurer la dureté sur la pièce elle-même. Cet essai peut renseigner sur la résistance à l'usure par frottement, la capacité à s'usiner, l'homogénéité du matériau, l'efficacité des traitements thermiques.

En soudage, les duretés sont mesurées dans des zones précises :

- dans la soudure,
- dans les zones de liaison,
- les zones thermiquement affectées (ZAT)
- les métaux de base.

II.3.2.1. Principe de l'essai de dureté:

L'essai de dureté a pour but de déterminer la dureté superficielle des métaux. Il consiste à enfoncer un pénétrateur, dont les formes et les dimensions varient en fonction du type d'essai, dans le métal à tester. La charge est constante et on mesure la surface ou la profondeur de l'empreinte laissée dans le matériau.

L'empreinte sera d'autant plus importante que le matériau sera mou[10].

II.3.2.2. Dureté Brinell (symbole HB):

Elle est obtenue par calcul. Après essai, on mesure l'empreinte laissée par une bille polie (diamètre : 1-2,5-5-10 mm) et la valeur de la charge F appliquée pour obtenir cette empreinte (essai usuel : F = 3 000daN, d = 10 mm, pendant 15 à 60 secondes).

Utilisation : tous métaux.

$$HB = \frac{F}{10\pi \cdot \left(5 - \sqrt{25 - \frac{d^2}{4}} \right)} \quad (2.15)$$

II.2.2.2. Dureté Vickers (symbole HV):

Elle est obtenue par calcul ; le principe est identique au précédent mais avec une pyramide droite en diamant à base carrée dont l'angle au sommet est de 136°. Utilisation : tous métaux.

$$HV = \frac{0,189 \times F}{d^2} \quad (2.16)$$

Tel que $d = d_1 + d_2$

Variante : essai Knoop (micro dureté, empreinte en forme de losange, matériaux durs pour petites pièces et pièces à sections fines).

II.3.2-3 Dureté Rockwell (symbole HR):

C'est l'essai de dureté le plus connu mondialement. Dans ce cas, la dureté, contrairement à Brinell et Vickers, est obtenue par lecture directe d'une longueur d'enfoncement d'un pénétrateur bille acier ou cône diamant.

Une pré charge (F_0) permet de faire une empreinte initiale et, par là, d'éliminer les incertitudes propres aux défauts de la surface [10].

II.3.3. Essais de fatigue:

Différents types d'essais sont utilisés pour les biomatériaux dentaires tels que l'essai de fatigue en flexion rotative, la fatigue par simulateur de mastication.

II.3.3.1. Principe de fatigue en flexion rotative:

Une illustration du phénomène de fatigue est fournie par l'un des essais les plus simples à mettre en œuvre, à savoir l'essai de flexion rotative. Cet essai consiste à encastrier un arbre à une extrémité, et à le soumettre simultanément à un effort de flexion à l'autre extrémité et à un mouvement de rotation de fréquence f . au temps $t=0$, le moment de flexion engendre pour une section droite une contrainte de traction sur la génératrice supérieure de l'arbre et une contrainte de signe opposé de compression sur la génératrice inférieure (figure 2.9). Au cours d'une période de rotation $T=1/f$, un élément de matière est soumis à une contrainte de traction et à une contrainte de compression simultanément. Le point considéré sur cette génératrice subit donc une contrainte alternée sinusoïdale. C'est cette variation de la contrainte au cours du temps qui conduit à la rupture de l'arbre au bout d'un certain nombre de cycle de rotation comme le montre la figure. 2.9et 2.10 [11].

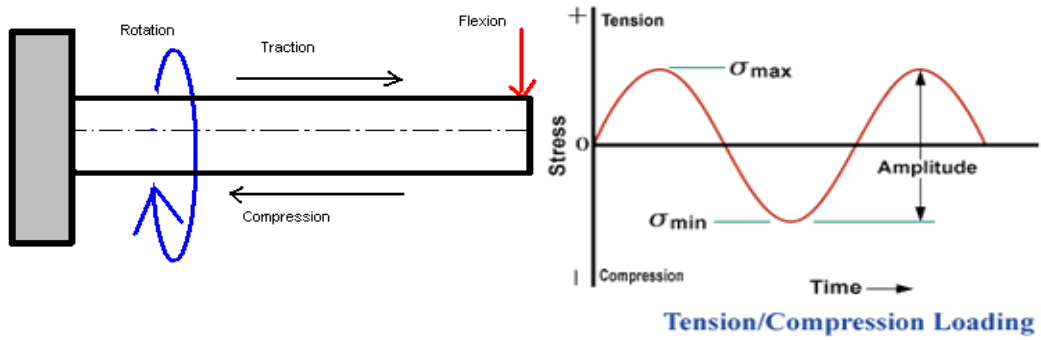


Fig. 2.9 : Machine de flexion rotative et courbe contrainte-temps.

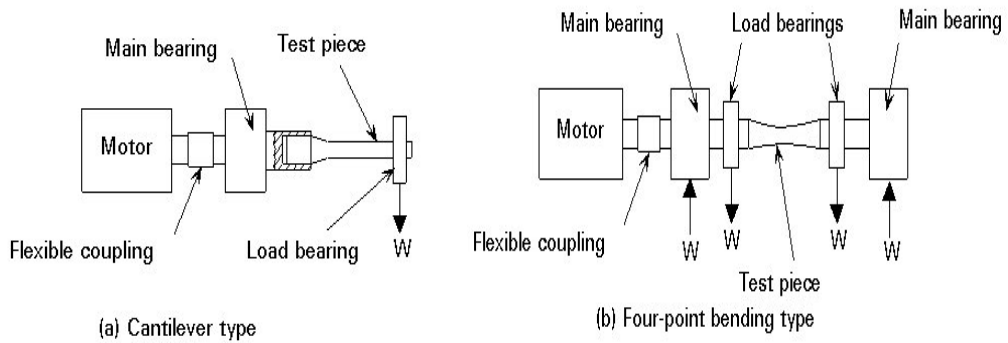


Fig. 2.10: Deux types d'essais de fatigue par flexion rotative.

II.3.3.2. Courbes de résistance à la fatigue:

Les essais les plus simples consistent à imposer sur des séries d'éprouvettes (cylindriques ou rectangulaires) des cycles d'efforts périodiques sinusoïdaux soit par charge axiale soit par flexion rotative. A chaque niveau de contrainte σ_{max} , le nombre de cycles à la rupture est déterminée. Le diagramme de Wöhler qui représente la relation expérimentale entre σ_{max} et N durée de vie de l'éprouvette est ainsi obtenu, voir Figure 2.11[11].

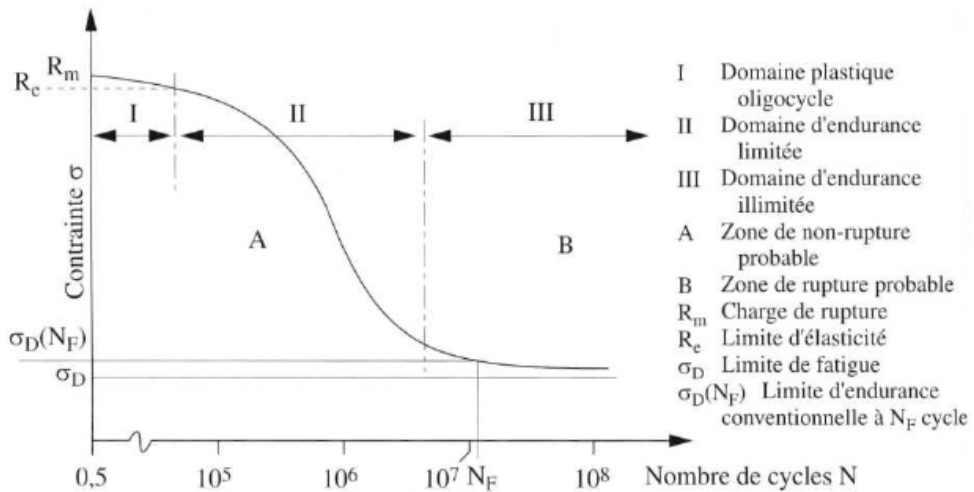


Fig.2.11: Courbe de Wöhler

II.3.3.3. Rupture selon le type de matériau :

Les matériaux peuvent être classés en deux catégories : ceux comme les alliages métalliques, les polymères, qui sont malléables, qui se déforment avant de se rompre, et ceux, comme les oxydes, les carbures, les sulfures, les matériaux cimentaires, les verres, qui sont au contraire fragiles.

A. La rupture ductile:

La ductilité est au sens macroscopique la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement de façon relativement importante avant rupture et au sens microscopique, elle caractérise un matériau qui s'endommage par formation de cavités qui croissent par déformation plastique [11].

La rupture ductile, qui correspond à une très forte déformation, est obtenue par le développement, à l'intérieur du matériau, de cavités qui naissent autour des inclusions. La rupture apparaît au niveau des ligaments entre ces cavités internes, donnant une surface de rupture en cupules, comme indiqué sur la figure 2.12.

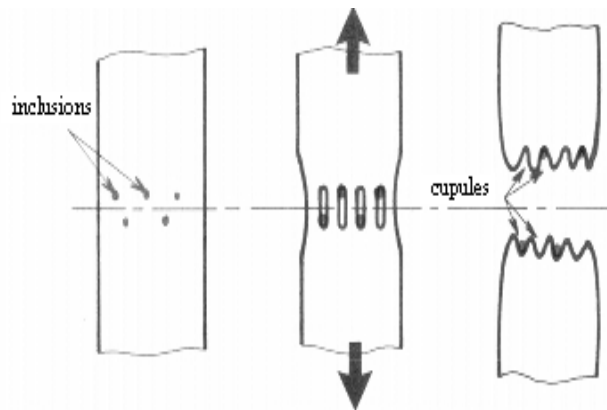


Fig.2.12: Rupture ductile [11].

B. La rupture fragile:

La fragilité au sens macroscopique l'incapacité d'un matériau à supporter des déformations plastiques (comportement mécanique tel qu'après relâchement des efforts, il subsiste une déformation résiduelle indépendante du temps) un peu importantes sans se rompre ; au sens microscopique, la fragilité caractérise un matériau qui s'endommage par clivage [11].

Les matériaux fragiles comme les verres, les céramiques et les aciers à basse

température subissent une rupture brutale par la propagation d'une fissure venant "déchirer" l'éprouvette. La rupture fragile est obtenue par clivage, mode de rupture dont le mécanisme principal est la séparation des plans atomiques pratiquement sans déformation.

Quatre modes de rupture fragile tels que le cisaillement en extension, la fracture normale et la séparation en extension, le cisaillement en compression et la fracture axiale sont illustrées dans la figure 2.13.

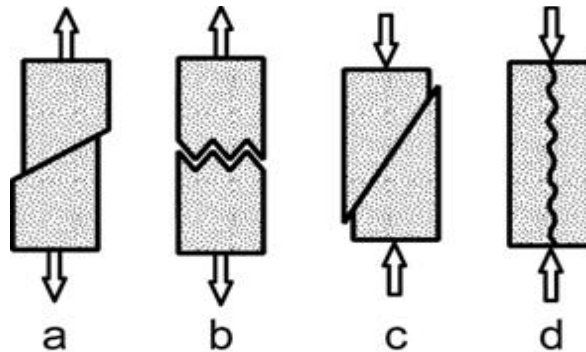


Fig.2.13: Quatre modes de rupture fragile(a) cisaillement en extension, (b) fracture normale et séparation en extension,(c) cisaillement en compression, (d) fracture axiale.

II.3.3.4.Fractographie:

La fractographie consiste à étudier la topographie d'une surface de fracture, d'identifier l'origine de la fissure et son cheminement de propagation. Une surface fracturée contiendra des informations sur les forces en action qui ont amené le matériau à se rompre. L'examen porte sur les particularités du faciès de rupture mis en évidence lors de l'analyse morphologique.

La fractographie a été utilisée en médecine dentaire pour déterminer la ténacité (K_{Ic}), la contrainte critique (σ_c) ou la longueur critique (a) de la fissure au niveau de matériaux céramiques. En appliquant le protocole décrit par Thompson *et al.* pour calculer la longueur de la fissure en utilisant la ténacité déterminée pour les composites en question [12].

II.3.4. Paramètres importants:

II.3.4.1.élément de volume représentatif:

Pour réaliser un essai mécanique, un élément de volume "représentatif" du

matériau doit être utilisé, afin que les hypothèses des milieux continus soient satisfaites. Le tableau 2.3 donne, en fonction du type de matériau, la taille caractéristique minimale de l'éprouvette qu'il conviendra d'utiliser[13].

Type de matériau	Type et taille des hétérogénéités	Elément de volume caractéristique
Métaux et alliages	Grain: 0,001 à 0,1mm	0,5X0,5 X 0,5mm
Polymères	Molécule: 0,01 à 0,05mm	1 X 1 X 1mm
Bois	Fibres: 0,1 à 1mm	10 X 10 X 10mm
Béton	Granulats : ≈ 10mm	100 X 100 X 100mm

Tableau.2.3: éléments de volumes macroscopiques

Le dépouillement des essais consiste ensuite souvent à transformer les courbes "force-déplacement" obtenues en courbes "contrainte-déformation", appelées "courbes rationnelles". La figure 2.14 donne une courbe rationnelle typique obtenue pour différents types de matériaux. Il faut noter ici que la courbe rationnelle relie deux scalaires entre eux (une "contrainte" σ et une "déformation" ϵ), et non deux tenseurs. Le choix de ces scalaires dépend du type d'essai et du type de matériau[13].

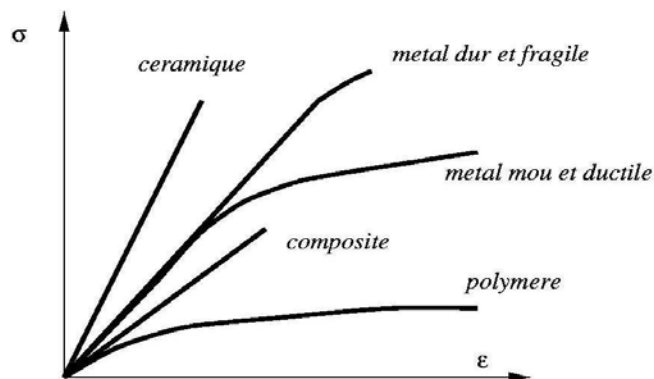


Fig.2.14: Courbes rationnelles typiques de différents matériaux

II.3.4.2. Vitesse de déformation et température:

La vitesse de déformation peut avoir une influence déterminante sur le comportement des matériaux. Lors de la réalisation d'un essai, on doit donc utiliser une vitesse aussi proche que possible de celle qui sera utilisée par la suite (e.g. lorsque l'on utilisera la loi de comportement obtenue dans un calcul de dimensionnement). Par exemple, si l'objectif est de valider la tenue en fluage d'une structure, sous l'effet de son propre poids, la vitesse de déformation à considérer sera très faible. Par contre, si l'objectif est de valider la

tenue aux séismes de cette structure, alors cette même vitesse de déformation pour reprendre des valeurs beaucoup plus élevées, et la loi de comportement à utiliser ne sera sans doute pas la même. Ceci conduit à différents types d'essais, qui peuvent être classés en fonction de la vitesse de déformation mise en jeu (tableau 2.4) [13].

Par exemple, un essai quasi-statique de compression uniaxiale sera réalisé à l'aide d'une machine hydraulique ou mécanique. L'éprouvette est fixée d'un côté sur une traverse fixe, et de l'autre sur une traverse qui se déplacera à une vitesse donnée, relativement lente. Le dépouillement de l'essai se fera dans le régime "quasi-statique", c'est-à-dire sans prendre en compte les effets d'inertie dans les équations d'équilibre. Par contre, dans le régime dynamique, la machine classique ne suffira plus car la traverse ne pourra plus atteindre la vitesse requise. L'essai sera alors réalisé sur un système de barres de Hopkinson (figure 2.15), où l'éprouvette est sollicitée par l'onde élastique de compression arrivant de la barre incidente.

Temps Caractéristique (s)	Vitesse de déformation (s ⁻¹)	Régime mécanique	Régime thermique
10 ⁶	10 ⁻⁶	fluage	isotherme
10 ⁴ à 10 ²	10 ⁻⁴ à 10 ⁻²	Quasi-statique	isotherme
1	1	intermédiaire	intermédiaire
10 ⁻² à 10 ⁻⁴	10 ² à 10 ⁴	dynamique	intermédiaire
10 ⁻⁶	10 ⁶	impact	adiabatique

tableau 2.4: Temps caractéristiques et types d'essais

Pour dépouiller l'essai, il faudra prendre en compte l'inertie mécanique du matériau, qui produit un "pic" de force au début de la sollicitation. Enfin, dans le régime d'impact, on utilisera par exemple un essai d'impact de plaques (figure 2.16). Une plaque incidente vient impacter à 500m/s environ la plaque étudiée, qui est sollicitée directement en traction lors du croisement des ondes élastiques de traction issues de la réflexion des ondes de compression sur les faces libres avant et arrière. Le dépouillement de ce type d'essais est relativement complexe, d'une part à cause de l'électronique nécessaire pour "capter" des phénomènes se produisant en quelques nanosecondes, et d'autre part à cause du comportement mécanique du matériau, qui s'approche ici plus d'une courbe pression volume (diagramme de Clapeyron) que d'une courbe classique contrainte déformation.

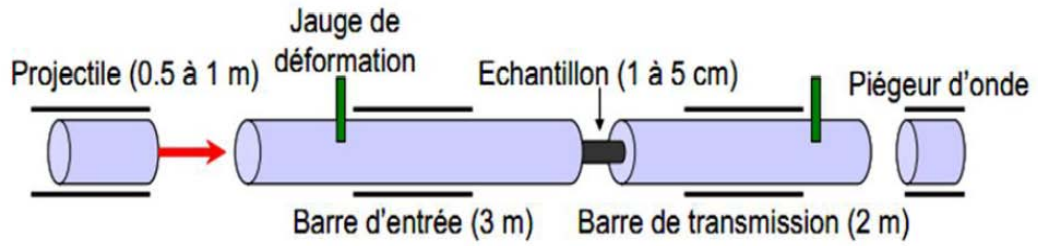


Fig.2.15: Barres de Hopkinson [12]

On se limite aux régimes mécaniques de fluage quasi-statiques, c'est-à-dire à une vitesse de déformation comprise en 10^{-6} et $102s^{-1}$. Cette plage de variation couvre la majorité des procédés de mise en forme actuels, bien que la tendance soit à l'augmentation des cadences, et donc de la vitesse de déformation. Par exemple, lors du laminage à froid d'une tôle d'acier, la vitesse de déformation peut parfois atteindre $100s^{-1}$. Dans ce type de régime, les effets d'inertie sont négligés dans le dépouillement de l'essai, et également lors de la simulation du procédé. Par contre, même à l'intérieur de ces régimes, la vitesse de déformation peut avoir une forte influence sur le comportement mécanique du matériau.

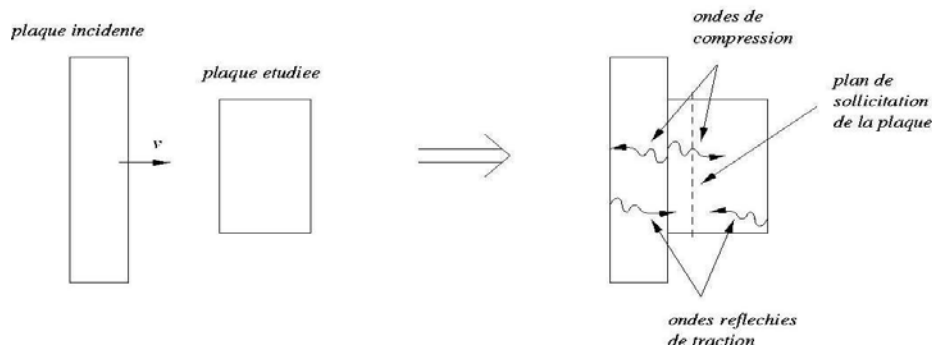


Fig.2.16: Impact de plaques

La figure 2.17 illustre cette influence (résultat typique d'un essai de traction réalisé en changeant la vitesse de déformation). On dit alors que le matériau est "sensible à la vitesse de déformation". Cette sensibilité sera d'autant plus forte que les deux courbes en pointillés de la figure 2.17 seront éloignées.

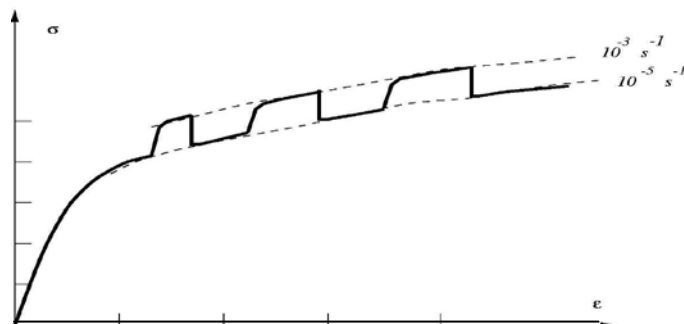


Fig.2.17: Courbe de traction typique avec sauts de vitesse

Dans le cadre thermodynamique général des milieux continus, les aspects mécaniques et thermiques sont "naturellement" couplés. Ceci met clairement en évidence l'importance de la température de l'éprouvette lors de la réalisation d'un essai, et le couplage de cette influence avec la vitesse de déformation[12].

Dans le tableau 2.3, le régime thermique d'un essai est indiqué, en fonction de la vitesse de déformation mise en jeu. La puissance de déformation plastique $\sigma : \varepsilon^p$ est essentiellement dissipée en chaleur dans l'élément de volume considéré. Par exemple, il est aujourd'hui communément admis que, dans les métaux, environ 90% de la puissance de déformation plastique est dissipée en chaleur, le reste étant stocké dans le matériau. Cette chaleur doit donc être évacuée par conduction thermique. Lors d'essais "lents" (régimes mécaniques de fluage ou quasi-statiques), la chaleur a le temps de se dissiper, se sorte que l'on peut considérer que l'essai est isotherme. Dans un régime intermédiaire ou d'impact, l'éprouvettes chauffe vite, et la chaleur produite n'a pas le temps de se dissiper. Ceci a une conséquence sur le comportement du matériau, et sur l'évolution de sa structure.

Pour simuler un procédé de mise en forme, la loi de comportement du matériau est donc souvent donnée à différentes températures. Des essais à différentes températures sont donc réalisés. Ceci peut changer non seulement le niveau de contrainte (pour une déformation donnée), mais aussi la forme de la loi elle-même (présence ou non de recristallisation dynamique, . . .).

II.3.4.3. Direction de sollicitation:

Lors de la réalisation d'essais mécaniques, le choix de la direction de sollicitation peut s'avérer primordial. En effet, il conditionne souvent le domaine de validité de la loi de comportement obtenue. On peut classer les directions de sollicitation en deux grandes catégories : les sollicitations uniaxiales et les sollicitations multiaxiales. On parle alors d'essai "uniaxial" ou d'essai "multiaxial". Les principaux essais uniaxiaux utilisés sont :

- la traction-compression
- la torsion
- la flexion

L'éprouvette est alors sollicitée dans une direction de l'espace des contraintes. La variation d'un paramètre de l'essai ne change pas cette direction. Les essais multiaxiaux sont nombreux et variés. Ils sont plus difficiles à interpréter. Ils consistent le plus souvent à combiner plusieurs sollicitations uniaxiales entre elles au cours du temps, de façon à tester l'influence de la direction de sollicitation sur le comportement du matériau. L'essai multiaxial le plus courant est celui de "traction-torsion"[12].

A. Traction-Compression:

La traction-compression est l'essai le plus couramment utilisé sur les métaux (figure 2.18). Toutefois, les déformations atteintes par ce type d'essai sont limitées par la rupture du matériau (en traction), et par le flambage de l'éprouvette (en compression). Ce type d'essai est donc principalement utilisé pour obtenir une loi de comportement simple et rapide en traction, ou pour solliciter cycliquement le matériau en traction-compression, à faibles déformations, et obtenir une loi de comportement en fatigue. 2.18.

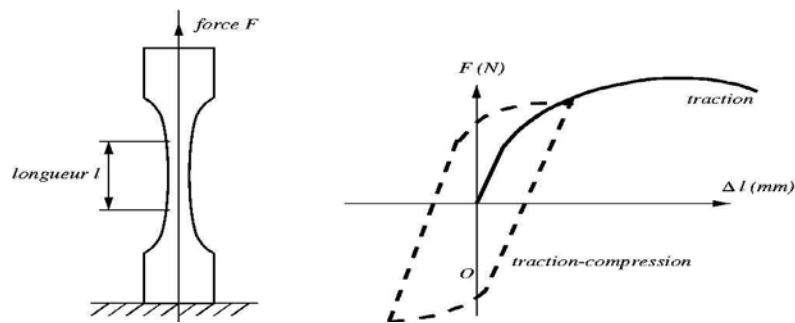


Fig.2.18: Schématisation de l'essai de traction-compression

Pour avoir accès à une loi de comportement valable pour de plus grandes déformations qu'en traction, on réalise donc des essais spécifiques de compression (figure 2.19). Le dépouillement de l'essai est cependant rendu délicat par la présence de frottement à l'interface éprouvette-outil[13].

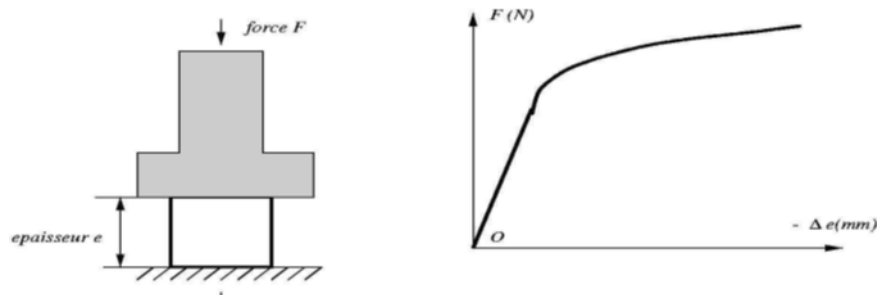


Fig.2.19: Schématisation de l'essai de compression

B. Torsion:

L'essai de torsion (figure 2.20) permet d'avoir accès à une loi de comportement pour de grandes déformations, sans problèmes de frottement entre l'éprouvette et l'outil. Cependant, la déformation et la contrainte ne sont pas homogènes le long du rayon de l'éprouvette. On utilise donc parfois un cylindre à paroi mince comme éprouvette.

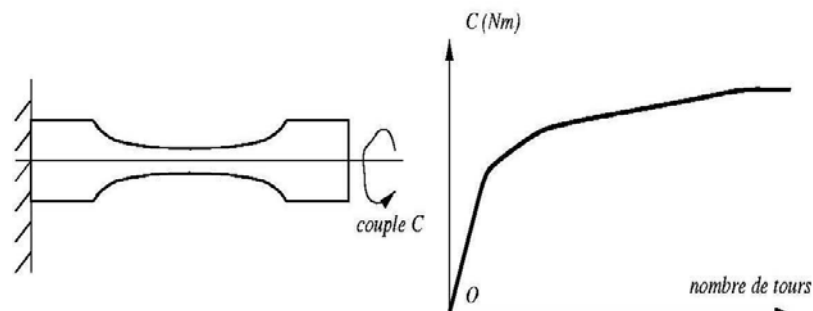


Fig.2.20:Schématisation de l'essai de torsion

C. Flexion:

La flexion (figure 2.21) est l'essai le plus couramment employé sur les céramiques. La flexion quatre points permet de solliciter le matériau avec un moment constant entre les deux points d'application de la charge. Comme en torsion, la déformation et la contrainte ne sont pas constantes dans l'épaisseur de l'éprouvette.

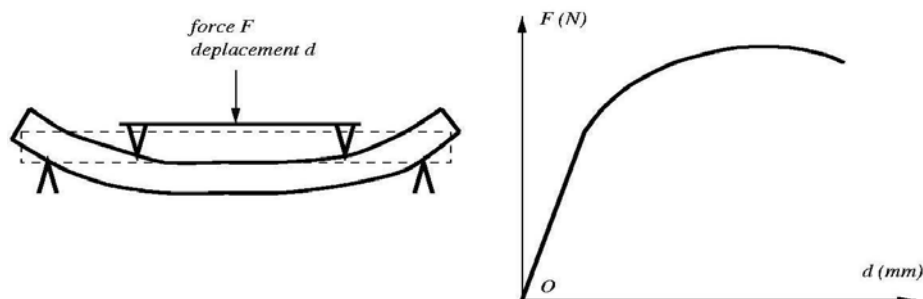


Fig.2.21:Schématisation de l'essai de flexion quatre points

II.4. Technique de corrélation d'images numériques :

La méthode de corrélation d'images numérique, est basée sur la comparaison de deux images à niveaux de gris aléatoires enregistrées avant et après déformation. La première image est dite de «référence» et la deuxième «déformée». Elle consiste donc à rechercher le degré de ressemblance entre ces deux images. La mesure du déplacement consiste à retrouver « le déplacement » nécessaire pour que le motif de l'image de référence se superpose avec celui de l'image déformée. Cette mesure est devenu possible avec les nouveaux systèmes de

camera ultra rapides. La technique de corrélation d'image numérique couplée à ces systèmes peut fournir alors les champs de déplacement désirés[14] .

Dans le cadre de cette étude, un mouchetis de peinture blanche est projeté sur la surface de l'éprouvette papillon de manière aléatoire. La surface de l'échantillon est éclairée en lumière blanche et les images sont prises par une camera CCD (1376x1040 pixels) montée sur un support réglable. La distance entre l'éprouvette et la camera est ajustée de telle manière que la zone de l'étude reste dans la portée de la camera le long de l'essai (figure 2.22).

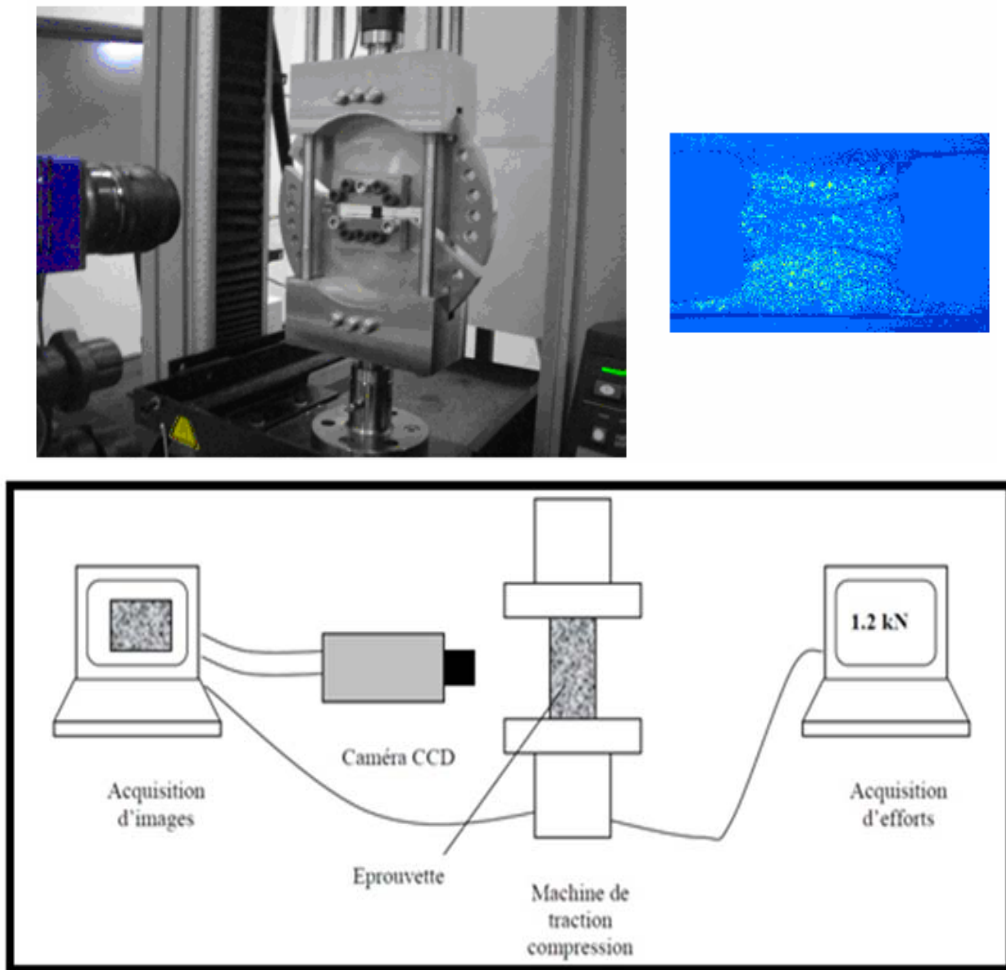


Figure 2.22: Dispositif de corrélation d'image

Les images sont stockées durant tout l'essai dans un PC par l'intermédiaire d'un logiciel d'acquisition et de traitement de données. Il numérise le mouchetis et établit après traitement pour chaque image enregistrée une cartographie planaire des points. Les points sont matérialisés par le centre des cellules « NxN pixels » constituant le maillage virtuel de la surface. Sur les images, l'utilisateur choisit une zone d'étude appelé « masque » qui contient un ensemble de points (centres de cellules) où il souhaite faire une mesure. Cet ensemble, pouvant comporter plusieurs centaines de « points », est adapté au type d'éprouvette étudiée.

Ainsi, lors de la corrélation entre deux images, chaque point va fournir la valeur du vecteur déplacement. Par dérivation du champ de déplacement, on obtient le champ de déformation de la zone de l'étude (figure 2.23).

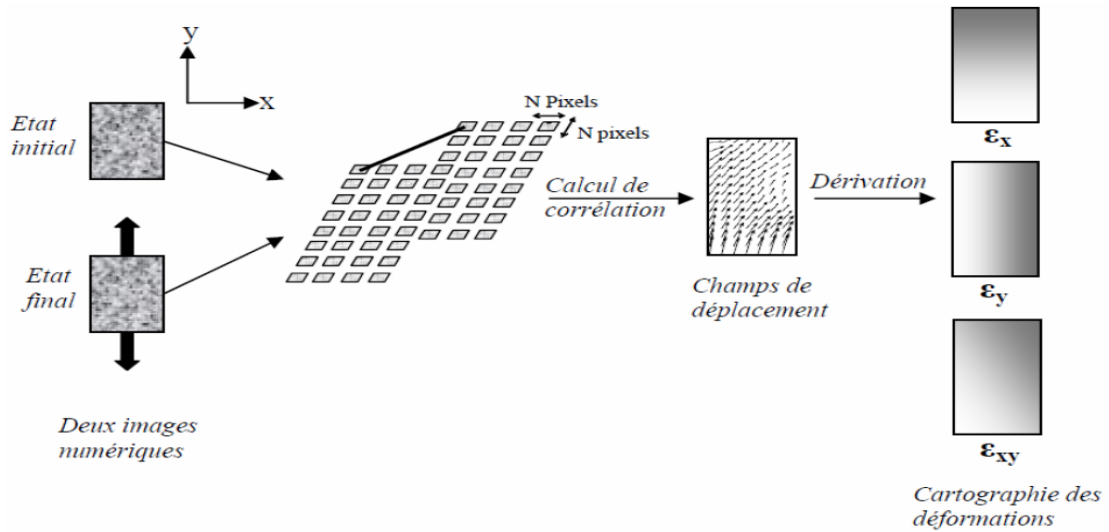


Figure 2.23: Principe de la technique de corrélation d'images numériques bidimensionnelles[17]

Comme exemple, le masque est un rectangle ($13 \times 3 \text{ mm}^2$) délimitant la région centrale de l'éprouvette papillon (figure 2.24). Chacun des « points » de mesure est une petite surface de l'image de 36×36 pixels contenant un nombre suffisant de motifs aléatoires pour être unique dans le champ de l'image. Les champs de déplacement sont déterminés par corrélation en mode absolu: les images acquises successivement au cours de l'essai sont comparées à l'image initiale (non déformée).

L'opération est répétée pour toutes les images enregistrées durant l'essai. Le champ de déplacement de l'ensemble des points du masque est obtenu, ce qui permet, par dérivation, d'avoir le champ de déformation dans tout le masque considéré[14].

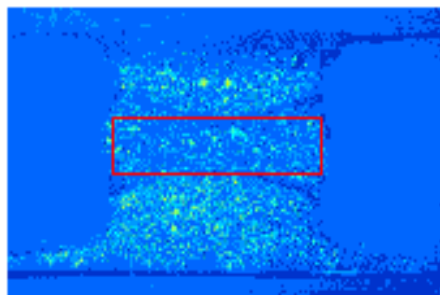


Figure 2.24: Zone d'étude « masque » sur l'éprouvette papillon

II.4.1. Calcul du champ de déplacement:

Les coordonnées du vecteur déplacement U pour tout point de l'image acquise de la surface de la zone d'étude, sont déterminées à partir de l'image de référence. Chaque point P

(centre de la cellule) de la surface du matériau est défini par des coordonnées (x_0, y_0) sur l'image de référence. Sur l'image déformée, ces points sont définis par les coordonnées (x'_0, y'_0) (figure 2.25). Le vecteur de déplacement définissant tout point Q proche du point P est défini pour chaque image par la relation suivante :

$$u(X, Y) = u_0 + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy \quad (2.17)$$

$$v(X, Y) = v_0 + \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy \quad (2.18)$$

Avec : $u(X, Y)$ et $v(X, Y)$ sont les coordonnées du vecteur déplacement d'un point Q dans les direction X et Y respectivement.

u_0 et v_0 sont les coordonnées du vecteur déplacement du point de référence P.

dx et dy sont les différences de position entre le point de référence p et le point proche Q.

$\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}$ et $\frac{\partial v}{\partial y}$ sont les composantes du gradient de déplacement du premier ordre.

II.4.2. Calcul des déformations :

Les déformations sont calculées directement par dérivation de la fonction déplacements du premier ordre décrite précédemment. Ainsi les composantes du tenseur de déformation de Green-Lagrange sont définies de la manière suivante [14]:

$$E = \frac{1}{2} [F^T \otimes F - 1] \quad (2.19)$$

Où F^T est la tenseur transposée de F

F est le gradient de déplacement défini comme suit :

$$F \text{ Grad } U(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

x est le vecteur position d'un point dans la configuration de référence.

$U(x)$ est le déplacement de ce point.

Les champs de déformation sont calculés par le un logiciel de corrélation d'images dont on peut déterminé les valeurs des déformations en tout point de la zone d'étude et visualisé graphiquement les champs de déplacements.

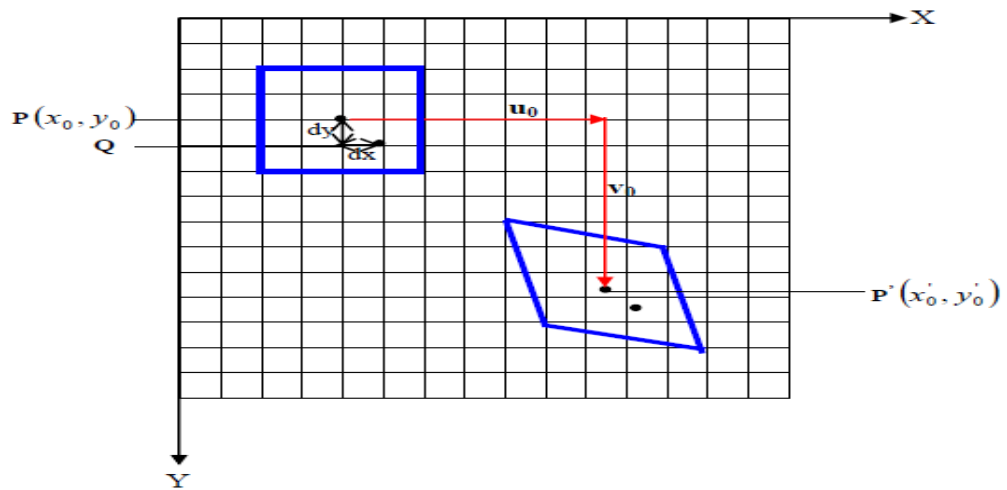


Figure 2.25: Schématisation de la position relative d'une cellule d'une image déformée par rapport à l'image non déformée, en surface[14].

Chapitre III

Partie expérimentale

III.1. Machines d'essais:

Une machine de traction moderne dispose d'un entraînement électrique réglable pour effectuer des essais simples ou cycliques à vitesse contrôlée. Elle doit être équipée de capteurs de force et d'allongement, ainsi que d'un système d'amarrage. Grâce au micro-ordinateurs, le contrôle de l'essai et l'acquisition des données sont devenus très simples. Des capteurs combinés avec des cartes d'acquisition de données, gérés par des logiciels hautement polyvalents, permettent de contrôler la machine et pouvant développer des forces jusqu'à 50 kN, à l'aide de quelques touches[15].



Figure.3.1:Machine de traction[18]

Le dispositif d'amarrage est composé d'une paire de mordaches ou d'un autre système de fixation adapté à la forme de l'éprouvette (p.ex. : pour éprouvette avec tête filetée ou tête à épaulement). Afin d'éviter tous moments de flexion, il est important que les fixations soient bien orientées et alignées suivant l'axe de traction. Ceci n'est pas toujours facile à réaliser, mais est particulièrement critique lorsqu'on doit mesurer des matériaux fragiles, tels que les céramiques, qui ne peuvent pas s'adapter. De même toute composante de torsion est à éviter. L'effort est exercé par l'entraînement soit mécanique soit hydraulique sur l'une des fixations.

Un système de réglage assure une vitesse de déformation constante. Ce système permet également d'effectuer des cycles de déformation (p.ex. : vitesse d'accroissement constante, cycles sinusoïdaux, etc.) ou d'imposer la contrainte au lieu de la déformation.

III.2. Caractéristiques de la machine de traction[15]:

Puissance motrice: 0,55 kW

Quantité de remplissage: 6 litres

Type d'huile classe de viscosité: ISO 32

Transducteur de force:

Principe de mesure:

Jauges de contrainte en pont intégral

Plage de mesure: 50 kN

Surcharge max: 150%

Capteur de déplacement:

Principe de mesure:

Potentiomètre linéaire

Plage de mesure: 0 - 150mm

Affichages numériques pour la force et le déplacement:

Affichage: LED, 6 positions, 14,2 mm

Fréquence de répétition des mesures: 2,5 1/s

Résolution spéciales: tare, alarme, mémoire de valeur maximale interface: série, RS232,

Vitesse de transmission: 1200 bauds

Protocole: impair, 7bits de données, 1 bit d'arrêt

Fiche, face arrière: SUB-D 25

III.3. Dimension de l'éprouvette de traction:

L'éprouvette de traction est une plaque avec une couche de peinture blanche pour augmenter le contraste des images capturées par la caméra. L'éprouvette non normalisée de dimensions 200x40x2 mm, est représenté sur la figure ci-dessous.

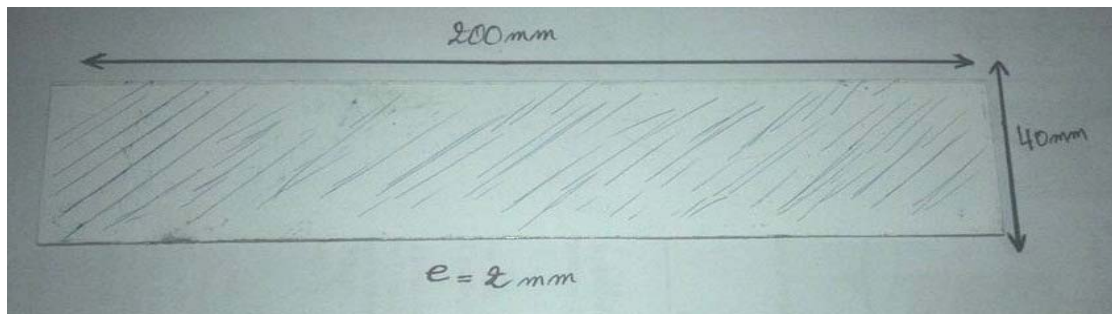


Fig 3.2: Epreuve de traction

III.4. Montage expérimentale:

Le montage expérimentale est constitué d'une machine de traction guidé par un ordinateur, d'une éprouvette en aluminium plate et d'une caméra USB placer en face de la plaque (figure 3.3). La caméra relié à un micro ordinateur est utilisé pour enregistrer les déplacements de la plaque sous l'effet des forces de traction.

Le principe consiste à enregistrer une séquence de vidéo des déplacements engendré par la plaque pendant l'essai de traction. La vidéo sera par la suite fragmentée en une série d'images par un logiciel approprié (VirtualDUB-1.9.11). Cette série d'images sera traité sous Matlab par un code de corrélation d'image numériques (DIC) pour donner les déplacements entre une image de référence (non déformée) et les autres images après déformation de l'éprouvette.

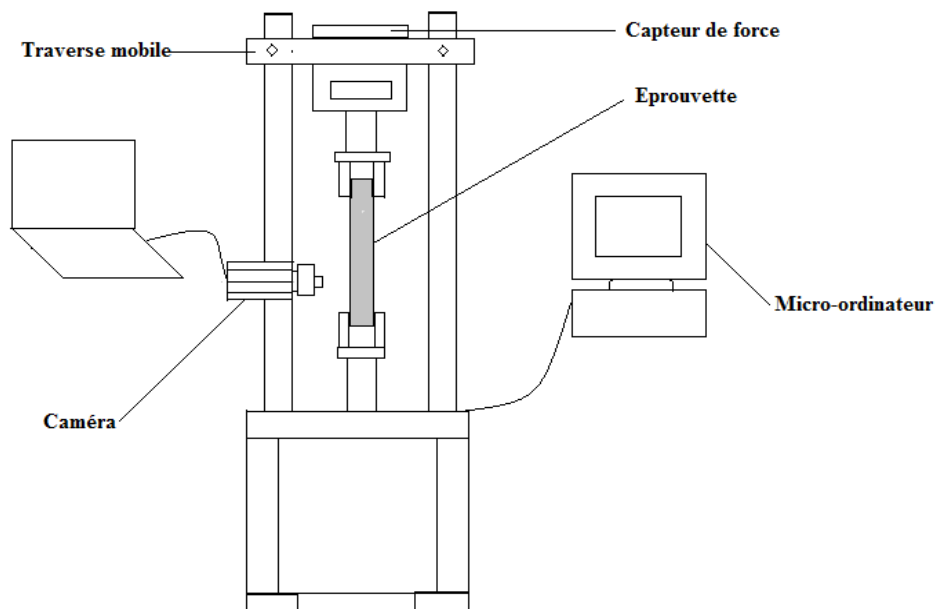


Fig. 3.3: Montage expérimentale de l'essai de traction par corrélation d'images numériques

III.5. Résultat expérimentaux de l'essai de traction:

Le tableau suivant qui présent les résultats expérimental

Force-elongation-table		
No.	F [kN]	dL [mm]
0	0,00	0,00
1	0,81	-0,02
2	0,00	0,00
3	0,42	0,65
4	4,68	3,23
5	14,25	6,29
6	16,87	9,55
7	17,32	13,40
8	3,27	17,73
9	3,27	19,79
10	0,78	19,84

Tableau.3.1: de force-élongation

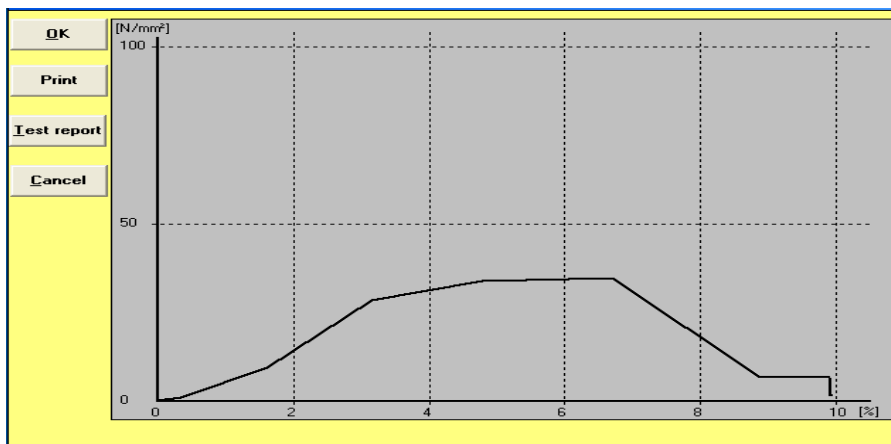


Figure.3.4:diagramme de Stress-élongation

Test report	
Kind of test:	Tensile test DIN 50106
Material of specimen:	AlMgSi0,5F22
Dimensions of specimen:	Tension specimen B40 x 200 DIN 50125
Temperature:	20°C
Upper/lower tensile yield strength ReL	
Yield stress Rp:	
Tensile Strength Rm:	34,64 N/mm²
Elongation at fracture A:	
Contraction at fracture Z:	
Date:	02.05.2017
Name of tester:	

Tableau.3.2:test report

III.6. La simulation de plaque avec SolidWorks:

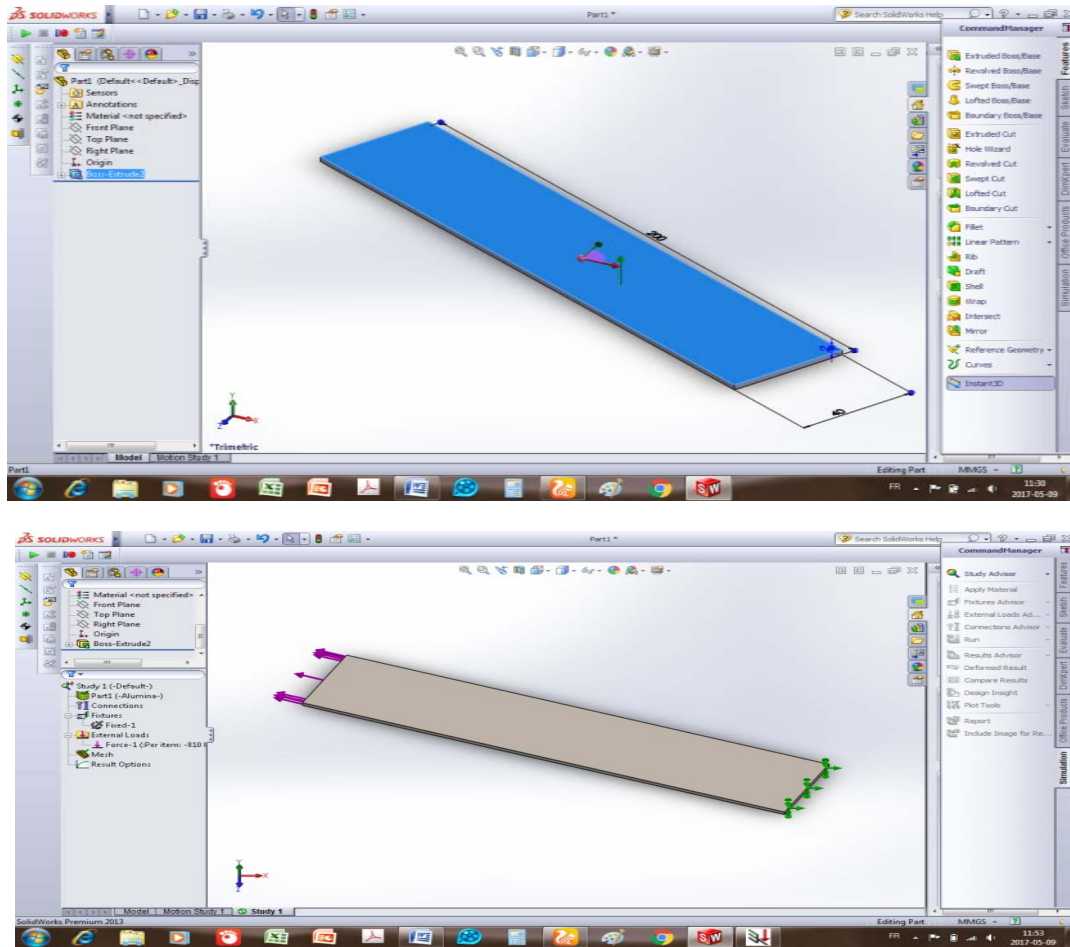


Figure.3.5: Simulation d'une pièce en alliage d'aluminium, sur SolidWorks

III 6.1. les résultats des Simulation:

- Simulation de la traction avec une force de $F=810\text{ N}$ sur la pièce. On a obtenue les résultats suivants:

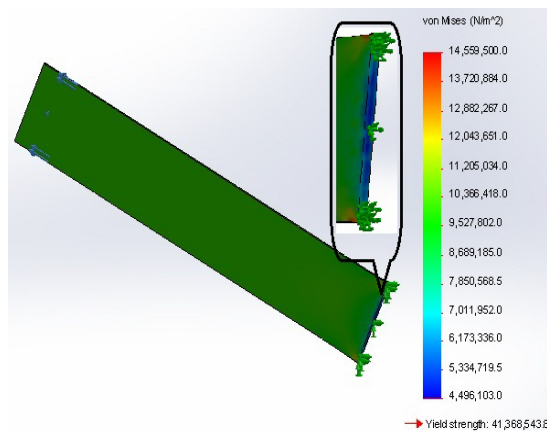


Figure.3.6: Simulation des contraintes du matériau sous l'effet des forces appliquées.

La répartition des contraintes équivalentes sont représentée dans le schéma central de la Figure.3.6, pour les nœuds de la structure situés aux bords arrondis de l'éprouvette. Ces contraintes ont des valeurs entre 4,5 et 14,6 MPa. flèches vertes représentent les points de fixation de l'éprouvette et les flèches roses représentent le chargement de charges externes de 810 N.

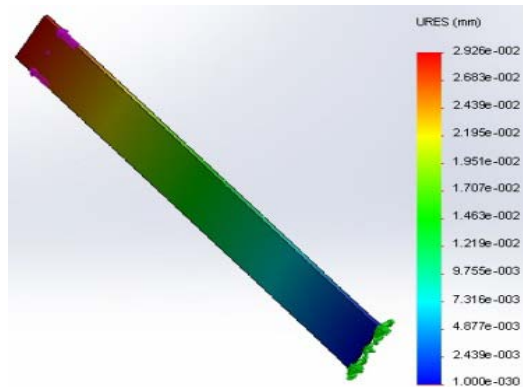


Figure.3.7:Simulation des déplacements du matériau sous l'effet des forces appliquées.

La répartition du déplacement selon l'axe Ox est représentée en Figure.3.7 et ils sont entre 1×10^{-30} mm dans la zone de serrage et $2,92 \times 10^{-2}$ mm comme valeurs maximale sur l'autre bout de l'éprouvette.

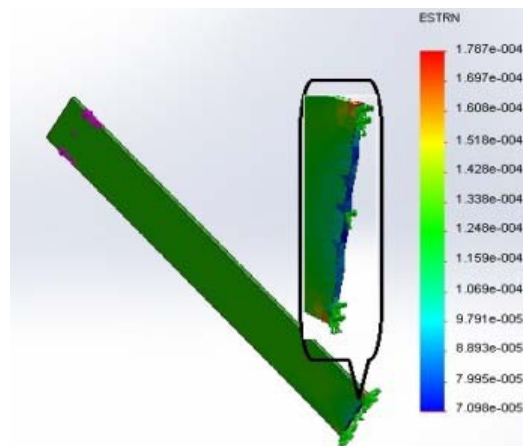


Figure.3.8:Simulation des déformations du matériau sous l'effet des forces appliquées.

La répartition des déformations spécifiques ESTRN est représentée dans la diagramme de la Figure.3.8, et leur valeurs sont entre $7,098 \times 10^{-5}$ $\mu\text{m}/\text{mm}$ et $1,787 \times 10^{-4}$ $\mu\text{m}/\text{mm}$. Les valeurs maximales de $1,787 \times 10^{-4}$ $\mu\text{m}/\text{mm}$ représentent la zone de serrage de l'éprouvette.

- Pour la force de $F=4680$ N sur la pièce , nous obtenons les résultats suivants:

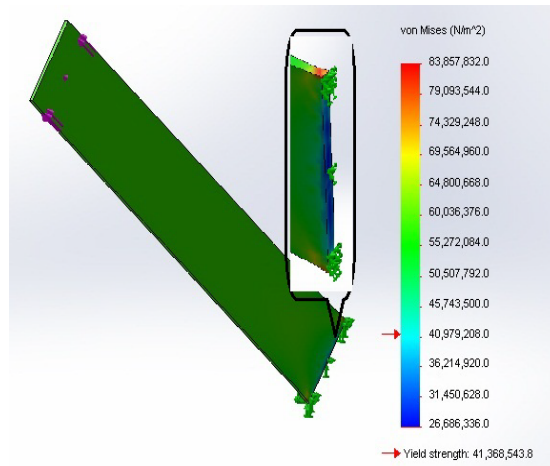


Figure.3.9: Simulation des contraintes du matériau sous l'effet des forces appliquées.

La répartition des contraintes équivalentes sont représentée dans le schéma central de la Figure.3.9, pour les nœuds de la structure situés aux bords arrondis de l'éprouvette. Ces contraintes ont des valeurs entre 26,7 et 83,85 MPa. flèches vertes représentent les points de fixation de l'éprouvette et les flèches roses représentent le chargement de charges externes de 4680 N.

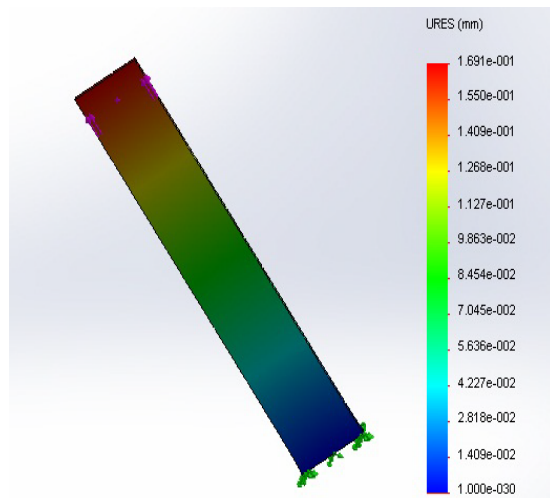


Figure.3.10: Simulation des déplacements du matériau sous l'effet des forces appliquées.

La répartition du déplacement selon l'axe Ox est représentée en Figure.3.10 et ils sont entre $1 \cdot 10^{-30}$ mm dans la zone de serrage et $1,69 \cdot 10^{-1}$ mm comme valeurs maximale sur l'autre bout de l'éprouvette.

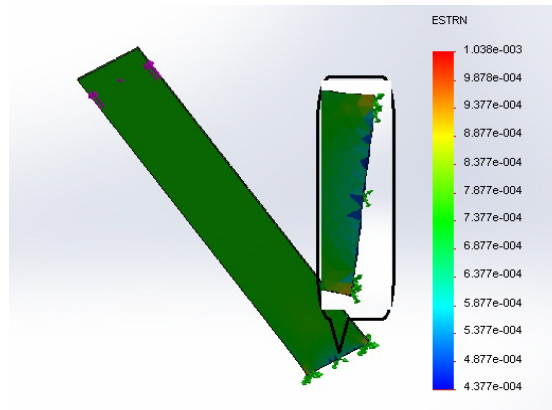


Figure.3.11: Simulation des déformations du matériau sous l'effet des forces appliquées.

La répartition des déformations spécifiques ESTRN est représentée dans le diagramme de la Figure.3.11, et leur valeurs sont entre $4,377 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}/\text{mm}$ et $1,038 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}/\text{mm}$. Les valeurs maximales de $1,038 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}/\text{mm}$ représentent la zone de serrage de l'éprouvette.

•Pour la force de $F=14250 \text{ N}$ appliqué sur la pièce , les résultats suivants sont obtenus:

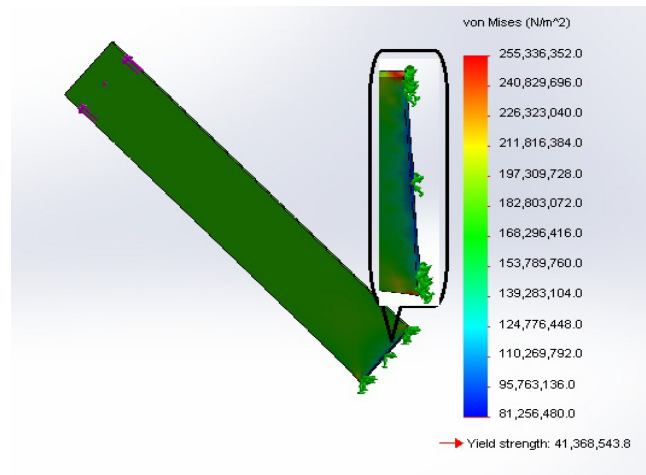


Figure.3.12: Simulation des contraintes du matériau sous l'effet des forces appliquées.

La répartition des contraintes équivalentes sont représentée dans le schéma central de la Figure.3.12 pour les nœuds de la structure situés aux bords arrondis de l'éprouvette. Ces contraintes ont des valeurs entre 81,25 et 255,33 MPa. flèches vertes représentent les points de fixation de l'éprouvette et les flèches roses représentent le chargement de charges externes de 14250 N.

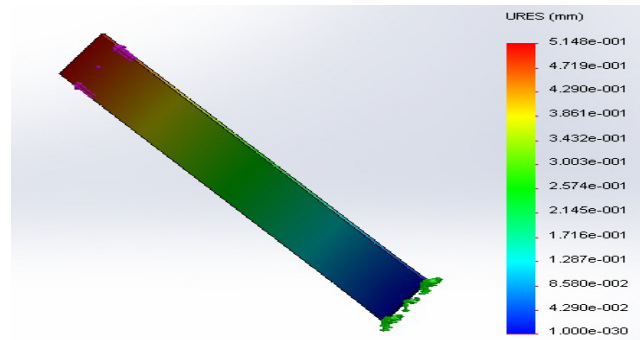


Figure.3.13: Simulation des déplacements du matériau sous l'effet des forces appliquées.

La répartition du déplacement selon l'axe Ox est représentée en Figure.3.13 et ils sont entre 1×10^{-30} mm dans la zone de serrage et $5,14 \times 10^{-1}$ mm comme valeurs maximale de déplacements.

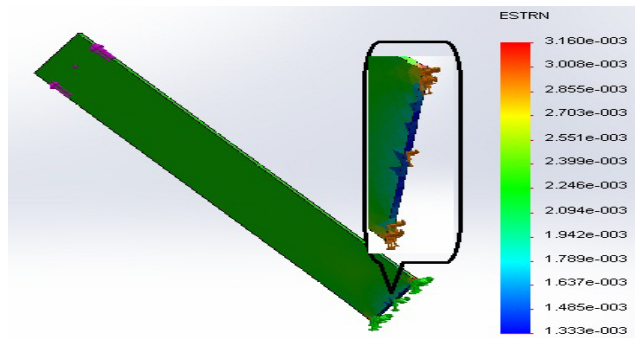


Figure.3.14: Simulation des déformations du matériau sous l'effet des forces appliquées.

La répartition des déformations spécifiques ESTRN est représentée dans le diagramme de la Figure.3.14, et leur valeurs sont entre $1.333 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\text{mm}$ et $3,161 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\text{mm}$. Les valeurs maximales de $3,161 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\text{mm}$ représentent la zone de serrage de l'éprouvette.

•Pour la force de $F=16870$ N appliqué sur la pièce , les résultats suivants sont obtenus:

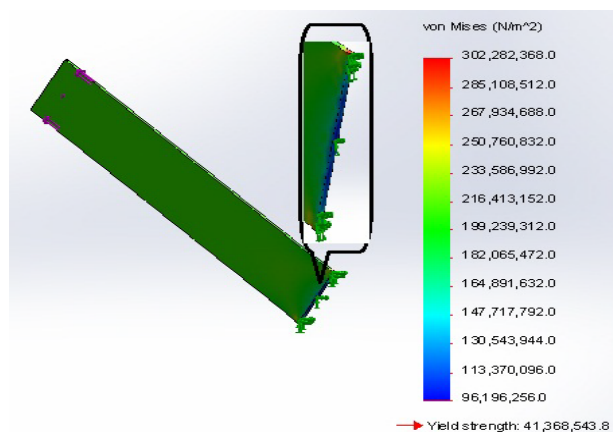


Figure.3.15: Simulation des contraintes du matériau sous l'effet des forces appliquées.

La répartition des contraintes équivalentes sont représentée dans le schéma central de la Figure.3.15 pour les nœuds de la structure situés aux bords arrondis de l'éprouvette. Ces contraintes ont des valeurs entre 96,19 et 302,28 MPa. flèches vertes représentent les points de fixation de l'éprouvette et les flèches roses représentent le chargement de charges externes de 16270 N.

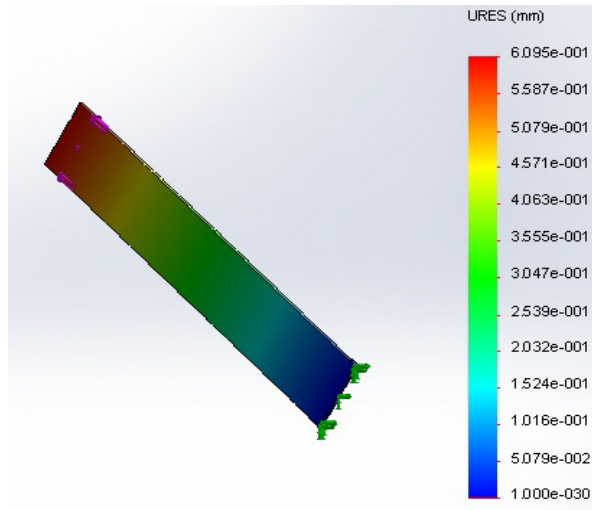


Figure.3.16:Simulation des déplacements du matériau sous l'effet des forces appliquées.

La répartition du déplacement selon l'axe Ox est représentée en Figure.3.16 et ils sont entre $1 \cdot 10^{-30}$ mm dans la zone de serrage et $6,09 \cdot 10^{-1}$ mm. Les valeurs maximale

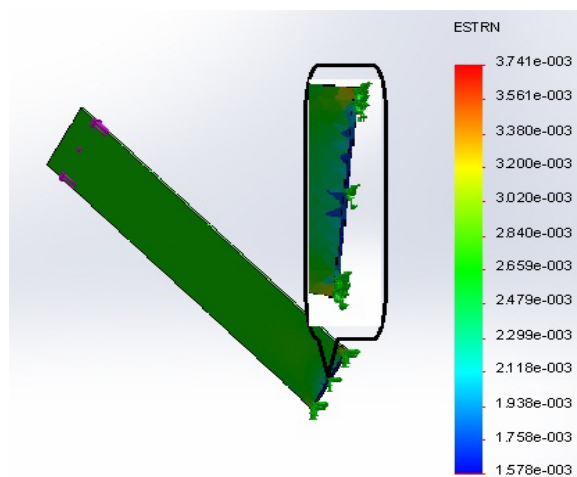


Figure.3.17:Simulation des déformations du matériau sous l'effet des forces appliquées.

La répartition des déformations spécifiques ESTRN est représentée dans la diagramme de la Figure.3.17, et leur valeurs sont entre $1,578 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}/\text{mm}$ et $3,741 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}/\text{mm}$. Les valeurs maximales de $3,741 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}/\text{mm}$ représentent la zone de serrage de l'éprouvette.

•Simulation de la traction avec une force de $F=17320$ N sur la pièce. les résultats suivants nous obtenons:

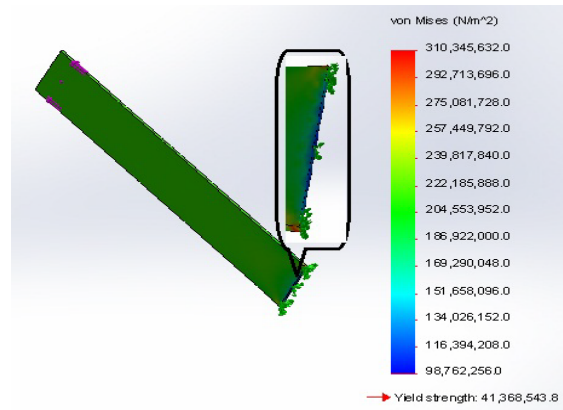


Figure.3.18: Simulation des contraintes du matériau sous l'effet des forces appliquées.

La répartition des contraintes équivalentes sont représentée dans le schéma central de la Figure.3.18 pour les nœuds de la structure situés aux bords arrondis de l'éprouvette. Ces contraintes ont des valeurs entre 98,76 et 310,34 MPa. flèches vertes représentent les points de fixation de l'éprouvette et les flèches roses représentent le chargement de charges externes de 17320 N.

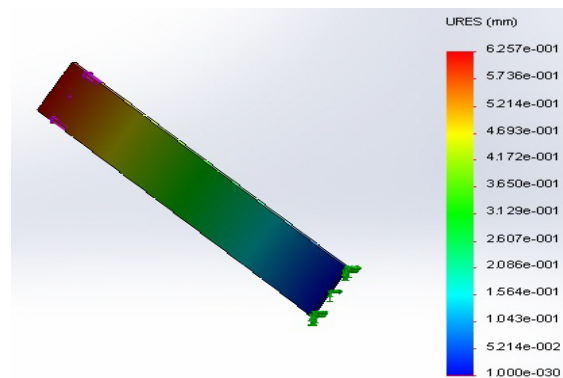


Figure.3.19: Simulation des déplacements du matériau sous l'effet des forces appliquées.

La répartition du déplacement selon l'axe Ox est représentée en Figure.3.19 et ils sont entre $1 \cdot 10^{-30}$ mm dans la zone de serrage et $6,257 \cdot 10^{-1}$ mm. Les valeurs maximale

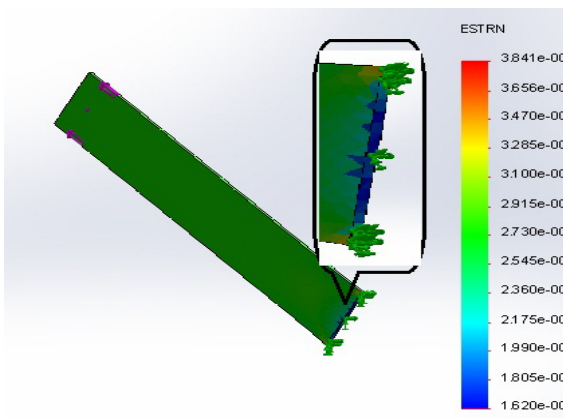


Figure.3.20: Simulation des déformations du matériau sous l'effet des forces appliquées.

La répartition des déformations spécifiques ESTRN est représentée dans la diagramme de la Figure.3.20, et leur valeurs sont entre $1,620 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}/\text{mm}$ et $3,841 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}/\text{mm}$. Les valeurs maximales de $3,841 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}/\text{mm}$ représentent la zone de serrage de l'éprouvette.

III.7. Application du code DIC pour la mesure des déplacements de l'éprouvette sous traction:

III.7.1 Définition du code DIC:

La mesure des contraintes et déplacements dans des échantillons trop petits, grands, conformes, doux ou chauds sont des scénarios typiques où des techniques sans contact sont nécessaires. Une technique qui peut couvrir tout cela et peut également traiter des champs de contraintes compliqués dans des structures ou des matériaux de structure est la corrélation d'image numérique. Avec cette technique, la contrainte ou le déplacement peut être calculée à partir d'une série d'images consécutives avec une résolution de sous-pixels comme démontré le paragraphe suivant[16].

III.7.2 Les étapes du code DIC :

Les étapes impliquées pour exécuter une corrélation typique se trouvent ci-dessous[16]:

A. Configurez les images en corrélation.

- Placez toutes les images à traiter dans un dossier.
- Réglez le répertoire de travail dans Matlab dans le dossier contenant les images.
- Exécutez `image setup GUI` pour préparer les images.

B. Déterminer si les déplacements sont suffisamment importants pour nécessiter une estimation initiale.

- a) Exécutez `correlate images GUI` et faire corrélé les images de taille normale en utilisant une grille (de taille d'environ 50-75 pixels pour les images d'environ 1000x1000 pixels).
- b) Exécutez `visualize data GUI` et regardez le tracé de contour du déplacement que vous prévoyez être plus grand.
- c) Si l'ensemble de la région d'intérêt est bien corrélé (il n'y a pas de grandes zones de données manquantes où il y a de grandes Déplacements), les

déplacements sont assez petits pour qu'aucune estimation initiale ne soit requise et les images de taille réduite n'ont pas besoin d'être corrélées.

- d) Si les images ne sont pas bien corrélées dans les régions où les déplacements sont importants, alors vous devez générer des suppositions initiales pour les déplacements en corrélant les images de taille réduite.

C. Si nécessaire, générez des suppositions initiales pour les déplacements en corrélant les images de taille réduite.

D. Déterminez la taille de sous-ensemble optimale pour la corrélation des images de taille normale

E. Exécuter correlate images GUI.

- Exécutez une image graphique de corrélation.
- Corrigez uniquement les images en taille réelle.
- Utiliser les résultats de la corrélation des images de taille réduite si nécessaire.
- Utilisez la taille de sous-ensemble optimale trouvée à l'étape précédente.
- Créez une nouvelle grille dense (taille d'environ 5 à 10 pixels pour des images d'environ 1000x1000 pixels).

F. Supprimez les régions de données mal corrélées. (Optionnel)

- Exécutez visualize data GUI.
- Déterminez s'il existe des régions où les données ne se sont pas bien corrélées.
- Exécutez delete data GUI..
- Sélectionnez une image unique pour prévisualiser et choisissez les régions de données à supprimer. Les données seront supprimées pour tous les images

G. Lissez les déplacements et calculez les contraintes en exécutons le code compute data GUI.

H. Visualiser les résultats finals

III 7.3. Résultats obtenues par corrélation d'images (DIC):

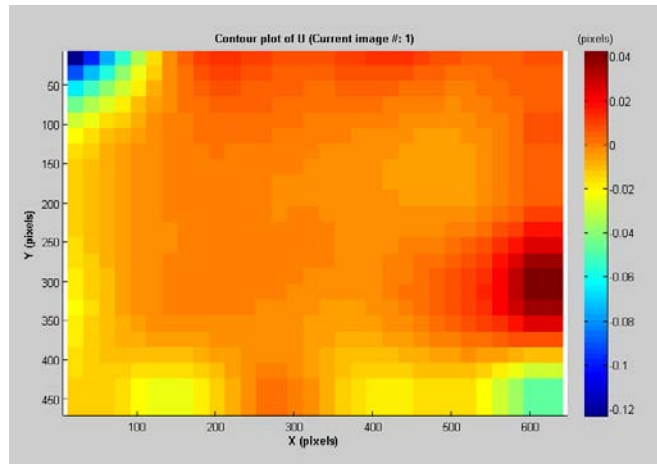


Figure3.21. : image de contour du déplacement vertical

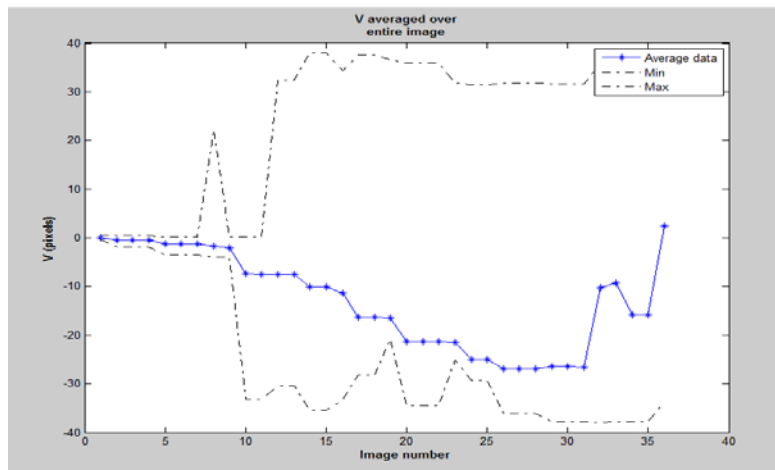


Figure3.22 : déplacements vertical entre images

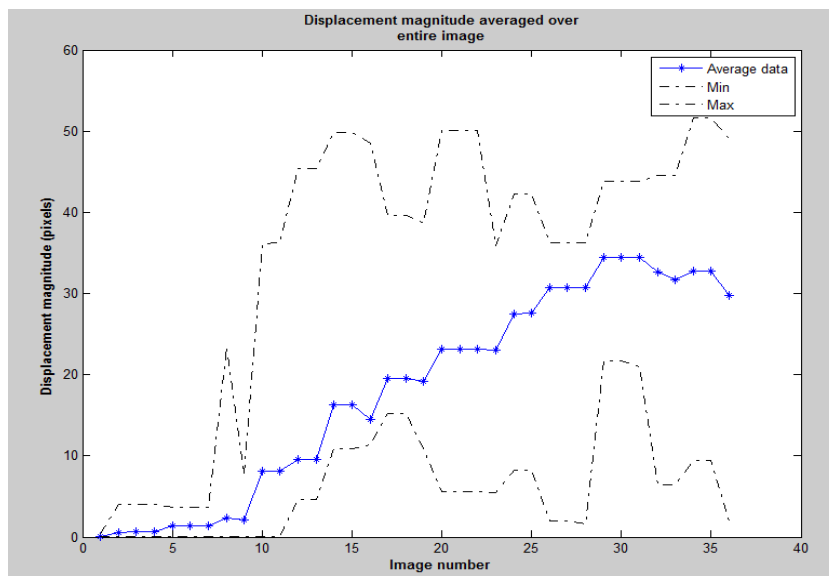


Figure3.23. : amplitude des déplacements entre images

III 7.3.1 Calcule de déplacement :

Pour calculer le déplacement on utilise la méthode suivante :

On a les données suivantes :

Largeur de la pièce : 40 mm

Largeur de l'image capturée : 640 pixel

Donc pour un déplacement de 35 pixels sur les images on a ;

$$40\text{mm} \rightarrow 640\text{pix}$$

$$X \rightarrow 1\text{pix}$$

$$x = \frac{40 \times 10^3}{640} = 62.5\text{um}$$

$$62.5 \times 35 = 2187.5\text{um}$$

Le déplacement = 2.18mm

III.8 Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats expérimentales de l'essai de traction, de la simulation de l'essai avec SolidWorks et par corrélation d'images. Le calcul des déplacements par corrélation d'images numériques a abouti à des résultats comparables aux résultats expérimentaux obtenus pour une force de traction de 4.68 KN.

Les résultats de déplacements obtenus par simulation pour la même force sont faibles par rapport à ceux obtenus expérimentalement et par corrélation d'images.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a été consacré à l'étude et le calcul de la traction d'une éprouvette d'aluminium par Corrélation d'image numérique. Les résultats sont comparés à celle obtenue expérimentalement et par simulation.

La méthode de corrélation d'images peut être un outil très important pour l'exploitation de l'essai de traction sans arrivé à la rupture de l'éprouvette. La corrélation d'images permet de fournir le champ de déplacement complet causé par les forces de traction sur la totalité de la pièce au lieu de donner une valeur unique pour le cas de l'essai de traction classique. La méthode permet aussi de donner la distribution des contraintes dans les différentes parties de la pièce et d'estimer par la suite les zones de rupture liés à la concentration des contraintes sur la surface de l'éprouvette.

Dans ce travail nous avons juste exploité le calcul des déplacements par corrélation d'images de l'essai de traction. Notre objectif dans de futures travaux est d'exploiter la distribution des contraintes sur la surface des éprouvettes et d'estimer les zones de rupture.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]: M. léon guillet, dernier mise à jour (20.05.2017).pdf ." l'aluminium et ses alliages " directeur de l'ecole centrale,membre de l'institut.
- [2]: christian vargel, dernier mise à jour (20.05.2017).pdf " corrosion de l'aluminium", ingénieur conseil en corrosion,de l'aluminium.
- [3]: Vargel, C. (2005). Propriétés générales de l'aluminium et de ses alliages. Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques, (M4661).
- [4]: Develay, R. (1989). Données numériques sur l'aluminium non allié. Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques. Formulaire.
- [5]: pdf dernier mise à jour (20.05.2017). chap. 1 méthodes de caractérisation des matériaux.
- [6]: Blétry, M. (2006). Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux.
- [7]: Dieter, G. E., & Bacon, D. J. (1986). Mechanical metallurgy (Vol. 3). New York: McGraw-Hill.
- [8]: Martin Lévesque, (2000). l'essai de tractions de matériaux Composites unidirectionnels à fibres continues, école polytechnique de Montréal.
- [9]: j. Michel baes max B. Christian. (mai 2004).la goutte essai de tractions. institut des techniques d'ingénieur de l'industrie.
- [10]: Rocdacier,(29/11/2010). Essai de dureté - Brinell - Vickers -Rockwell ! Cours technologie
- [11]: kamel,b.(2012). caracterisation optique des biomateriaux soumis a la fatigue (Doctoral dissertation, Université Ferhat Abbas de Sétif 1).
- [12]: Gary, G. (2002). Comportement des métaux à grande vitesse de déformation: modélisation. Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques, (M3036), M3036-1.
- [13] : Fortunier, R. (2001). Comportement mécanique des matériaux. cours, ENS des Mines de Saint-Etienne, 214.
- [14] : mr hachour, k. contribution a l'élaboration d'un critère de plasticité pour le pehd (Doctoral dissertation, Université Mouloud Maameri de Tizi Ouzou).
- [15] : Documentation Mode d'emploi, wp 310, Machine d'essai universelle 50 KN
- [16] : Jones, E. (2013). Documentation for Matlab-based DIC code. University of Illinois.

Résume :

L'objectif du travail effectué dans ce mémoire est l'étude et la simulation de la traction d'un matériau par corrélation d'image numérique. La corrélation d'images numériques est une technique de mesure sans contact qui nous permet la caractérisation de matériaux sans recours à la détérioration de l'échantillon. La technique consiste à suivre le déplacement d'images capturées par caméra avant et après déformation d'une éprouvette, pour fournir par la suite une cartographie des déplacements et des contraintes résultant des forces de traction.

والهدف من العمل في هذه الأطروحة هو دراسة ومحاكاة لسحب المواد عن طريق الارتباط الصور الرقمية. صورة ارتباط الرقمية

هي تقنية قياس تماس أن يسمح لنا لتوصيف المواد من دون استخدام تدهور العينة. هذه التقنية لتتبع حركة الصور التي تلتقطها

الكاميرا قبل وبعد تشوه اختبار، لتقديم الخرائط من التشريد والضغوط الناتجة عن قوات الشد.

Mots clés : •Corrélation d'image numérique •essai de traction