



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Mécanique

## MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques  
Filière : Génie Mécanique  
Spécialité : construction mécanique

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :  
**DJITI Maamache**

Le : mercredi 27 juin 2019

### *Conception et réalisation d'un appareil d'essai de fluage en traction des matériaux composites*

---

#### Jury :

Dr.	<b>SEDIRA Lakhdar</b>	MAB	Université de Biskra	Président
Dr.	<b>DARIASS Nouredine</b>	MAB	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	<b>BRIBECHE Abdelatif</b>	MAB	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2018 - 2019

# **Remerciements**

## Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre gratitude et nos remerciements pour toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation

Nous tenons tout d'abord à remercier **DR ABDALLATIF BRIBECHE**, notre encadreur pour son aide, ses conseils, son encouragement et sa disponibilité dans ce projet.

J'exprime toute ma gratitude à Messieurs :

Monsieur **SDIRA LAKHDAR** maitre de conférences de l'université de Biskra ait accepté la présidence de ce jury.

Je remercie Monsieur **DARIASS NOUREDDINE** maitre de conférence de l'université de Biskra ait accepté d'être membre de jury.

Nous présentent notre sincère remerciement à tous nos enseignants du département génie mécanique de l'université Mohamed khider Biskra.

## ***Dédicaces***

*Au nom du dieu le clément et le miséricordieux louange à **ALLAH** le tout puissant.*

*Je dédie ce modeste travail en signe de respect, reconnaissance et de remerciement :*

*A mes chers parents, A mes chers frères et sœurs  
Qui m'ont aidé de, près et de loin.*

*A ma femme et mes enfants rissell et sadjed et kassim*

*A toutes mes chères amies*

*A tout l'équipe de Société algérien de production l'électricité*

*A toute ma famille, qui porte le nom **djiti**.*

*A tout ceux qui ont participé à l'élaboration de ce modeste travail et tous ceux qui nous sont chers.*

***Djiti Maamache***

# **Sommaire**

# SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Déformation et Mise en forme de métaux</b>	
I.1. Introduction	2
I.2. déformation	2
I.2.1.déformation élastique	2
I.2.1.1. origine physique	3
I.2.2.déformation plastique	3
I.3. mécanisme de la déformation plastique	4
I.3.1. déformation par maclage	5
I.3.2. exemple de déformation plastique	5
I.3.2.1 Le tréfilage	6
I.3.2.2 Principe	6
I.3.2.3 Rupture par tréfilage	7
I.4. Effet des traitements thermiques sur une structure déformé	8
I.4.1. Restauration et recristallisation	8
I.4.1.1. Restauration	8
I.4.1.2 Recristallisation	9
I.4.2 Evolutions microstructurales lors de déformations à chaud	10
<b>Chapitre II : Les Essais Mécaniques</b>	
II.1. Généralités	12
II.2.Essai de dureté	12
II.2.1. Définition de dureté	12

II.2.2. Principe de l'essai de pénétration	12
II.2.3. Procédé avec action statique	13
II.2.3.1. L'essai de dureté Brinell	14
II.2.3.1.1. Symboles et désignations	14
II.2.3.1.2. Conditions d'essais	15
II.2.3.1.3. Expression des résultats	15
II.2.3.2. Essai Vickers	15
II.2.3.2.1. Symboles et désignations	16
II.2.3.2.2. Conditions d'essais	16
II.2.3.2.3. Domaine d'utilisation	17
II.2.3.3. Essai de dureté Rockwell	17
II.2.3.3.1. Principe de l'essai	17
II.2.3.3.2. Exécution de l'essai	17
II.2.3.3.3. Conditions d'essais	18
II.2.3.3.4. Expression des résultats	19
II.3. Essais de résilience	19
II.3.1. Principe de l'essai	19
II.3.2. Machine d'essai	20
II.3.3. Exécution de l'essai	21
II.3.4. Essai Charpy	21
II.3.4.1. Essai sur éprouvette entaillé en U et V	21
II.4. Essais de fatigue	22
II.4.1. But	22
II.4.2. Eprouvettes et essai	23
II.4.3. Dimensions	23

## SOMMAIRE

II.4.4. Machine d'essai	24
II.4.5 Description de la machine	25
II.4.6. Courbe de Wöhler	26
II.4.7. Diagramme d'endurance	27
II.5. Essai de traction	28
II.5.1. But d'essai	28
II.5.2. Principe	28
II.5.3.Eprouvettes	28
II.5 .3.1. Forme et dimension	28
II.5.3.2. Longueur entre repères	29
II.5.4. Machine de traction	29
II.5.5. Diagramme de traction	30
II.5.6 Caractéristiques de l'essai	31
II.6. Essai de fluage	32
II.6.1 .Définition	33
II.6.2. Principe	33
II.6.3. Caractéristiques de fluage	34
II.6.3.1. Fluage logarithmique	34
II.6.3.2. Fluage de puissance	35
II.6.4. Les différents mécanismes de fluage	36
II.6.5. Effets de la température et de la contrainte sur le Comportement en fluage	37
II.6.6. Effets de la taille de grain sur le comportement en fluage	37
II.6.7. Variations de $\epsilon$ et de $\dot{\epsilon}$ avec le temps	37



## SOMMAIRE

II.6.8. Variation de la vitesse de déformation ( $\epsilon$ ) avec La température	38
II.6.9. exemple d'un appareils d'essai de fluage	39
<b>Chapitre III : Description de l'appareil réalisé</b>	
III.1. Description de la machine de fluage	42
III.2 Conception de la machine	43
III.2.1. Bâti	44
III.2.1.1. La base	44
III.2.1.2 Le support	44
III.2.2 Bras de levier	46
III.2.3. Mors mobile et mors fixe	46
III.2.3. Mors mobile et mors fixe	46
III.2.4 Axe et pignon	48
III.2.4.1. Axe et pignon	48
III.2.4.2. Couvercle de roulement	49
III.2.4.3. Roulement	50
III.2.5. Four électrique	51
III.2.6. Système d'acquisition	53
III.2.7. Etalonnage de l'appareil	57
III.3 Etude de la résistance	59
III.3.1 Etude de la résistance à la flexion du bras de levier	59

## SOMMAIRE

### **Chapitre IV : Résultats et Interprétation**

IV.1. Introduction	60
IV.2. Matériau étudié	60
IV.2. a. Le Polyamide (PA6) seul	60
IV.2.b. Mélange PA6+ verre recyclé (0.08 mm)	61
IV.3.Eprouvettes forme et dimension	62
IV.4. Essais de fluage	63
IV.4.2.Courbe de fluage du Polyamide (PA6) seul	64

### **Conclusion générale**

### **References bibliographiques**

# Liste des Figures

## LISTE DES FIGURES

- Figure I.1 Variations de l'énergie d'interaction et de la force d'interaction entre deux atomes en fonction de leur distance  $d$ . De part et d'autre de la distance d'équilibre  $d_0$ , la force de rappel est approximativement proportionnelle à l'écart  $d - d_0$ .
- Figure I.2 Glissement dans les éprouvettes.
- Figure I.3 Réseau cristallin
- Figure I.4 Mécanisme de déformation plastique par maclage
- Figure I.5. Schéma de principe d'une filière
- Figure I.6 Evolution des décohésions et formation d'une inclusion lors du tréfilage.
- Figure I.7 Structure de cellules de dislocations dans un alliage d'aluminium.
- Figure I.8 Mécanisme de recristallisation
- Figure I.9 Déformation à chaud d'un acier biphasé (compression globale 30%).
- Figure II.1 Essai Brinell
- Figure II.2 (a) Principe de l'essai Vickers (b) Géométrie du pénétrateur
- Figure II.3 Mesure de l'empreinte
- Figure II.4 Condition pour les mesures répétitives
- Figure II.5 (a) Principe de l'essai Rockwell avec cône, b) avec bille
- Figure II.6 Schéma de principe de l'essai de choc.
- Figure II.7 Calcul de l'énergie dissipée dans un choc
- Figure II.8 Géométrie des éprouvettes de choc Charpy
- Figure II.9 Essai de fatigue
- Figure II.10 Eprouvette de fatigue

## LISTE DES FIGURES

- Figure II.11      Eprouvette d'essai de fatigue.
- Figure II.12      La machine d'essai de fatigue GUNT WP 140
- Figure II.13      Courbe de Wöhler
- Figure II.14      (a) Formation de stries de fatigue dans de l'aluminium, b)  
dans de laiton
- Figure II.15      Géométrie des éprouvettes de traction
- Figure II.16      Machine de traction
- Figure II.17      Diagramme de traction
- Figure II.18      (a) Allure générale d'une courbe de fluage, Evolution de la  
déformation et (b) la vitesse de déformation en fonction du temps
- Figure II.19a      fluage logarithmique
- Figure II.19b      fluage de puissance
- Figure II.20      Représentation schématique des modes de déformation en fonction  
de la température
- Figure II.21      Courbe d'Arrhenius
- Figure II.22      Les constituants de machine de fluage
- Figure II.23      Machine de fluage complète
- Figure II.24      Schéma de l'appareil d'essai de fluage
- Figure III.1a      Schéma d'une machine de fluage

## LISTE DES FIGURES

Figure III.1b	Schéma d'une machine de fluage
Figure III.2a	Dessin d'ensemble du bâti
Figure III.2b	Dessin d'ensemble du bâti
Figure III.3a	dessin du bras de levier
Figure III.3b	Dessin de définition de bras de levier
Figure III.4a	dessin du mâchoire d'acier.
Figure III.4b	dessin de la mâchoire
Figure III.5a	dessin du bras mobile (long) et bras fixe.
Figure III.5b	dessin du mors mobile
Figure III.6	dessin de l'axe de transmission
Figure III.6a	Dessin de définition d'axe de transmission
Figure III.6b	Dessin de définition du Pignon
Figure III.6c	Dessin de définition de couvercle
Figure III.6d	dessin de définition de roulement
Figure III.7	four électrique (a : vue de l'extérieure. b : vue de l'intérieure)
Figure III.7.c	Le thermorégulateur
Figure 7.d	schéma d'un circuit électrique "thermocouple"
Figure III.7.E	Le four complet et le thermorégulateur.
Figure III.8a	Situation du système d'acquisition
Figure III.8b	étalonnage du système d'acquisition par la règle.
Figure III.8c	étalonnage du système d'acquisition par pied à coulisse
Figure III.9a	Montage d'étalonnage de l'appareil

## LISTE DES FIGURES

- Figure III.9b Courbe d'étalonnage (effort sur l'échantillon N en fonction de la charge Q)
- Figure III.10 Schéma représentatif des forces appliquées sur le bras de levier
- Figure III.11 Diagramme d'effort tranchant
- Figure III.12 Diagramme de moment fléchissant
- Figure. IV.1 Courbes contrainte/déformation pour le PA6 seul
- Figure. IV.2 Courbes contrainte/déformation pour le PA6+particule de verre
- Figure. IV.3 dessin d'éprouvette
- Figure. IV.4 Courbe de déformation de fluage en fonction du temps du Mélange PA6+ verre recyclé (0.08 mm) à charge de  $\sigma=9.2\text{Mpa}$  et  $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Figure IV.5 photo présenté la rupture de l'éprouvette du Mélange PA6+ verre recyclé (0.08 mm) à charge de  $\sigma=9.2\text{Mpa}$  et  $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Figure. IV.6a Courbe de déformation de fluage en fonction du temps du polyamide PA6 à charge de  $\sigma=9.2\text{Mpa}$  et  $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Figure. IV.6b Courbe Vitesse de déformation de fluage en fonction du temps du polyamide PA6 à charge de  $\sigma=9.2\text{Mpa}$  et  $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Figure. IV.7a Courbe de déformation de fluage en fonction du temps du polyamide PA6 à charge de  $\sigma=9.2\text{Mpa}$  et  $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Figure. IV.7b Courbe Vitesse de déformation de fluage en fonction du temps du polyamide PA6 à charge de  $\sigma=9.2\text{Mpa}$  et  $T = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Figure. IV.8a Courbe de déformation de fluage en fonction du temps du polyamide PA6 à charge de  $\sigma=9.2\text{Mpa}$  et  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Figure. IV.8b Courbe Vitesse de déformation de fluage en fonction du temps du polyamide PA6 à charge de  $\sigma=9.2\text{Mpa}$  et  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

# Liste des tableaux



## Liste des tableaux

- Tableau II.1    Tableau pénétrateurs Brinell, Rockwell, Vickers et Knoop
- Tableau III.1    étalonnage du système d'acquisition par la règle 50mm
- Tableau III.2    étalonnage du système d'acquisition par la règle 60mm
- Tableau III.3    étalonnage du système d'acquisition par pied à coulisse
- Tableau III.4    étalonnage de l'appareil
- Tableau IV.1    Résultat caractéristiques mécaniques du mélange PA6  
seul
- Tableau IV.2    Résultat caractéristiques mécaniques du mélange PA6  
+verre recyclé 0.08 mm. [31]

# **Introduction générale**









## **Introduction générale:**

La connaissance des propriétés mécaniques des matériaux nécessitent des tests mécaniques. Parmi ces tests, on a l'essai de fluage qui a pour but de connaître le comportement d'un matériau lors de l'application d'une charge constante mais à une température donnée. Parmi ces matériaux, on peut citer l'exemple des matières composites qui sont utilisés aujourd'hui dans plusieurs domaines et qui nécessitent la connaissance de leurs résistances au fluage.

Par conséquent, un appareil d'essai de fluage est nécessaire pour effectuer ce genre d'essai. D'autre part, et d'après nos recherches bibliographiques, on a remarqué qu'il y a plusieurs types d'appareil d'essai de fluage, tel que chaque laboratoire réalise sa propre machine.

Pour ce projet de mémoire de master, nous avons réalisé un appareil d'essai de fluage qui a une caractéristique différente par rapport aux autres machines déjà réalisés.

Après une introduction générale, le manuscrit est composé de quatre chapitres.

- Le premier chapitre est consacré aux déformations et mise en forme de métaux.
- Le deuxième chapitre est réservé aux différents types d'essais mécaniques, c'est-à-dire, des essais comme la dureté, la résilience, la traction, la fatigue et le fluage sont bien détaillés.
- Le troisième chapitre décrit la machine d'essai de fluage réalisé, ou des dessins techniques de chaque pièce et aussi de l'ensemble de l'appareil ont été expliqués.
- Le quatrième chapitre comprend quelques résultats de fluage, c'est-à-dire des courbes de fluage obtenues sur une éprouvette de matière composite ont été présentées et interprétées.

Enfin une conclusion générale qui rassemble l'essentiel de cette étude.

# **Chapitre I**

## **Déformation et Mise en forme de métaux**



## **I. Déformations et mise en forme de métaux:**

### **I.1. Introduction:**

Pour toute construction ou fabrication mécanique, le choix du matériau à utiliser est souvent le résultat d'un compromis entre plusieurs propriétés. Une des propriétés les plus importantes est la ductilité, nécessaire pour la mise en forme des matériaux. Elle caractérise la capacité d'un matériau à se déformer de manière irréversible (plasticité) sans se rompre. La déformation plastique des matériaux métalliques est essentiellement régie par le glissement des dislocations. Dans ce qui suit, on verra en quoi ces défauts sont nécessaires pour expliquer la déformation plastique des matériaux métalliques.

### **I.2. Déformation:**

On donne le nom de déformation à la modification des dimensions et de la forme d'une substance sous l'action des forces appliquées. La déformation est provoquée par l'application des forces extérieures ou par des processus physiques et mécaniques variés, dont le corps est le siège (par exemple, modification du volume des cristaux isolés sous l'effet des transformations de phase ou du gradient thermique). [1]

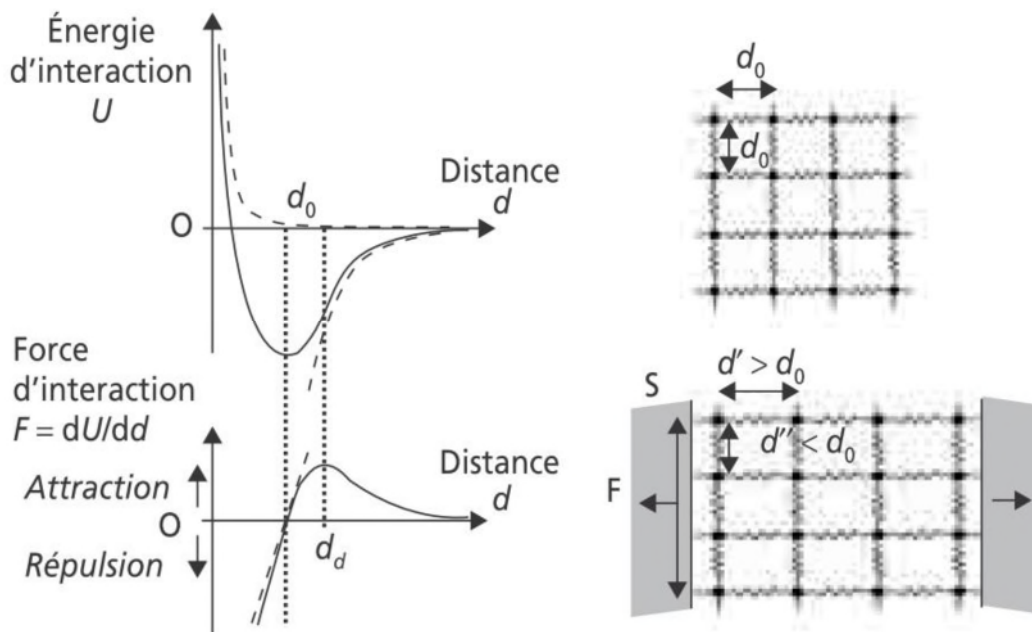
#### **I.2.1 Déformation élastique :**

Est une déformation dont l'action sur la forme, la structure et les propriétés d'un corps cesse complètement lorsque la charge appliquée est supprimée, cette déformation ne provoque pas de modifications permanentes perceptibles de structures et de propriétés du métal ; la charge appliquée ne produit qu'un déplacement relatif et parfaitement réversibles des atomes ou le pivotement des blocs de cristal.

En traction d'un monocristal les atomes s'éloignent l'un de l'autre, et en compression, ils se rapprochent. Un tel écart à partir d'un état d'équilibre compromet le bilan des forces d'attraction et de répulsion électrostatique. C'est pourquoi après la suppression de la charge, les forces d'attraction et de répulsion remettent les atomes déplacés à l'état d'équilibre de départ et les cristaux reprennent leur forme et leurs dimensions initiales. [1].

### I.1.2.1. Origine physique:

Dans un solide, la distance moyenne  $d$  entre deux atomes s'établit à une valeur  $d_0$  fonction de la nature des liaisons (Fig. I.1). Si on impose aux atomes un déplacement au voisinage de leur position d'équilibre, la force d'interaction les rappelle à la distance  $d_0$  (sauf dans le cas d'un écartement au-delà de  $d_d$ , distance de dissociation des atomes). De telles déformations élastiques nécessitent donc l'application d'une force extérieure pour vaincre la force de rappel et sont réversibles lorsque cette force extérieure est supprimée [2].

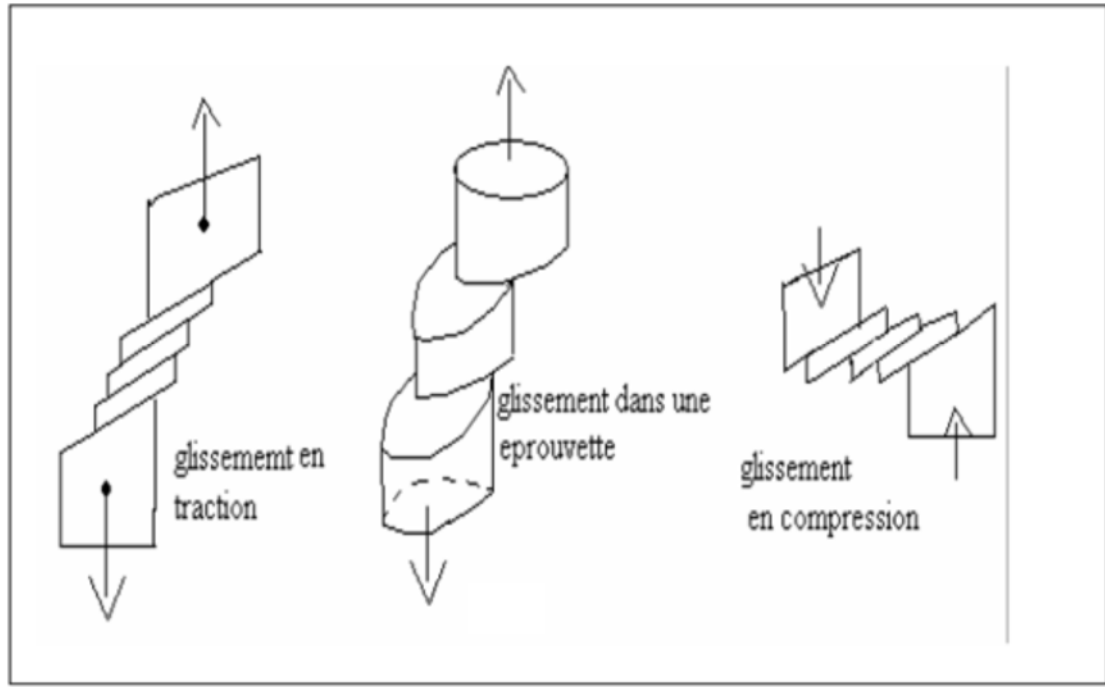


**Figure I.1 :** Variations de l'énergie d'interaction et de la force d'interaction entre deux atomes en fonction de leur distance  $d$ . De part et d'autre de la distance d'équilibre  $d_0$ , la force de rappel est approximativement proportionnelle à l'écart  $d - d_0$  [2].

### I.2.2. Déformation plastique :

Lorsque les contraintes tangentielles dépassent une certaine valeur (limite d'élasticité), la déformation devient irréversible. La suppression de la charge n'élimine que la composante élastique de la déformation, alors que la partie de la déformation dite plastique subsiste. Dans les cristaux, la déformation plastique peut se produire par glissement ou maclage le glissement (déplacement) des parties isolées

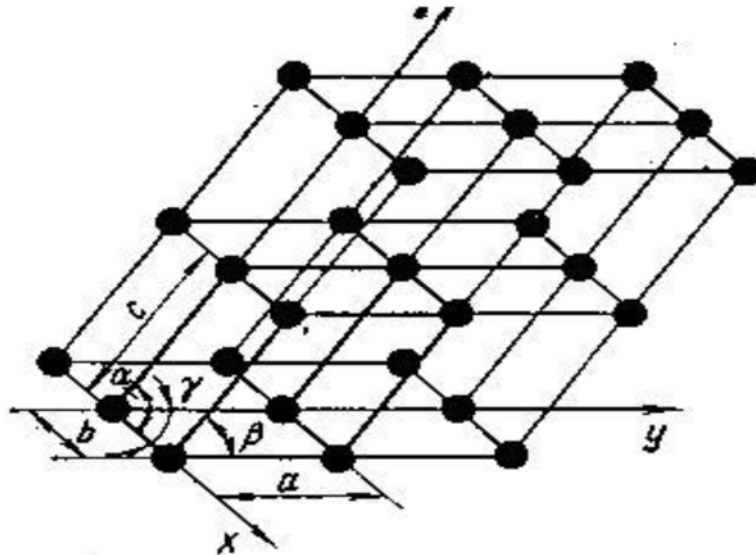
d'un cristal l'une par rapport à l'autre se produit sous l'effet des contraintes tangentielles, lorsque ces contraintes atteignent une valeur critique déterminé ( $\tau_{cr}$ ) dans le plan et la direction du glissement [1].



**Figure I.2 :** Glissement dans les éprouvettes [1].

### **I.3. Mécanisme de la déformation plastique:**

Les métaux, en général, peuvent être décrits comme étant des cristaux composés d'une infinité d'atomes (ou molécules) rangés en motifs périodiques tridimensionnel. Cet arrangement périodique se présente alors comme un réseau tridimensionnel composé de mailles élémentaires caractérisées par les dimensions  $a$ ,  $b$ ,  $c$  du parallélépipède de forme entièrement définit par les trois angles  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . (Fig. 1.3) [1].



**Figure 1.3:** Réseau cristallin [1]

Pour le cas de structure cubique, ces angles valent  $90^\circ$ , la définition des plans et des directions atomiques est directe, ces plans seront définis par leurs intersection avec les trois axes principaux, les plus petits entiers déduits des rapports inverses de ces intersections avec les paramètres de maille étant ses indices de Miller (h, k, l). [3]

Dans les cristaux la déformation plastique peut se produire par glissement ou maillage [1]

### **I.3.1 Déformation par maillage :**

Le maillage se produit lorsqu'une force de cisaillement provoque des déplacements atomiques tel que la position des atomes situés d'un côté du plan de maillage correspond à l'image spéculaire de celle des atomes situés de l'autre côté. La portion d'un matériau cristallin qui se trouve entre deux plans de maillage est appelée : zone maillée, et on appelle cristaux maillés ou macles, les cristaux comportant plusieurs zones maillées. Le maillage se produit le long d'un plan cristallin dont l'orientation dépend de la structure cristalline c'est-à-dire on trouve des macles d'origines thermiques dans les métaux qui ont une structure CFC, et les macles d'origines mécanique on les trouve dans les métaux qui ont une structure CC et HC (Fig. 1.4). [4].

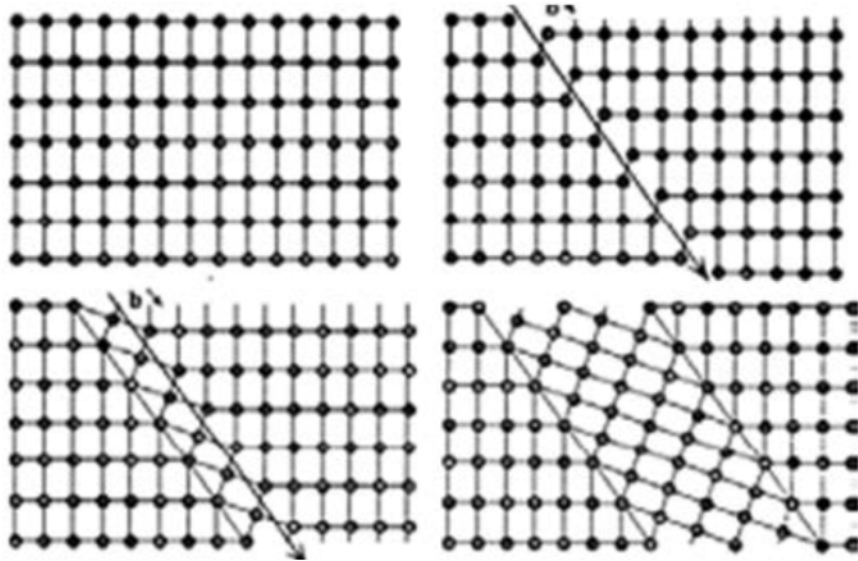


Figure 1.4 : Mécanisme de déformation plastique par maclage. [4]

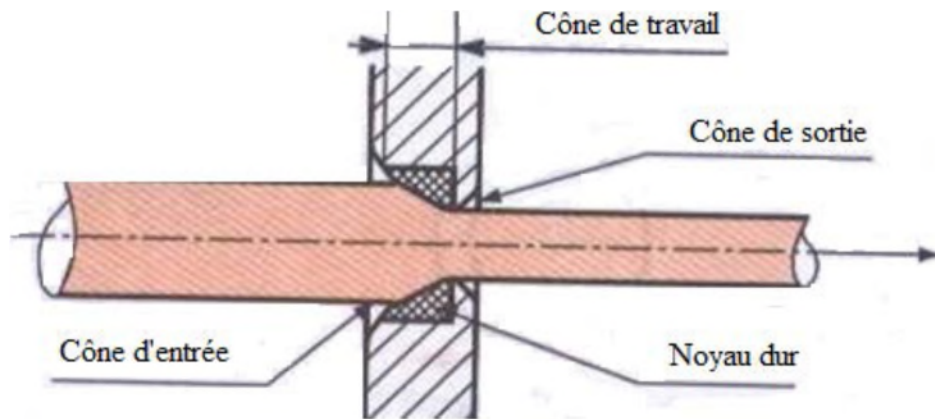
### I.3.2 Exemple de déformation plastique :

#### I.3.2.1 Le tréfilage

C'est une opération qui consiste à déformer un métal par traction pour le transformer en fils. Pour cela, on fait passer dans une filière de forme et de dimensions déterminées, le métal se déforme plastiquement, et en le faisant passer dans des filières de plus en plus étroites, il est possible de lui imposer un allongement total très supérieure à celui obtenu par traction simple sans passage dans une filière. Les filières sont en aciers où en chrome et pour les fils fins en diamant [5].

#### I.3.2.2 Principe :

Le tréfilage permet d'obtenir une pièce cylindrique en forçant son passage dans une filière, le métal s'allonge et sa section se réduit : on dit qu'il file. La filière forme un cône de demi-angle au sommet appelé «angle de filière ». Du fait de la symétrie axiale du procédé, la déformation est dite axisymétrique. (Fig.1.5) [5].



**Figure 1.5:** Schéma de principe d'une filière. [5].

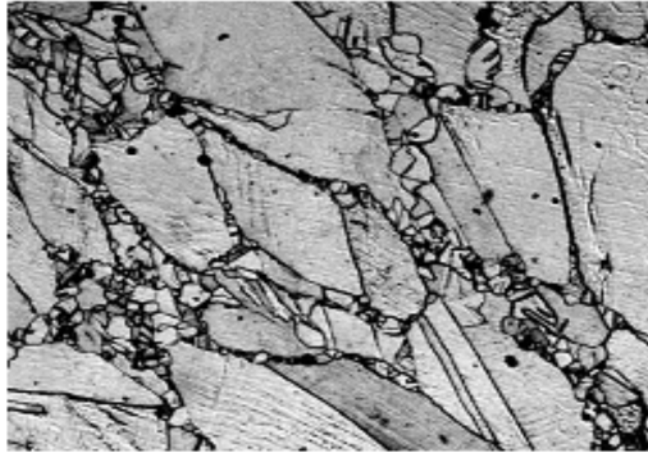
De plus, la filière est un bloc en général cylindrique percé en orifice calibré ayant les dimensions et la forme que l'on désire du produit à tréfiler, elle est composée de quatre parties :

- Le cône d'entrée qui contribue à entrainer le lubrifiant dans la filière.
- Le cône de travail partie essentielle dans laquelle le métal subit sa déformation par compression.
- La portée, qui guide le fil après déformation.
- Le cône de sortie [6] .

### **I.3.2.3 Rupture par tréfilage:**

Les déformations plastiques produites par tréfilage sont hétérogènes du centre à la périphérie du fil, si les contraintes de cisaillement créées dépassent la résistance du matériau, il apparait des décohésions de forme conique au centre, qui peuvent provoquer des ruptures :

- \* Pendant le tréfilage (casse).
- \* Lors de la mise en tension du fil.
- \* Après quelques cycles de chargement-déchargement du fil (fatigue). (Fig. 1.6) [7]



**Figure 1.6 :** Evolution des décohésions et formation d'une inclusion lors du tréfilage. [7]

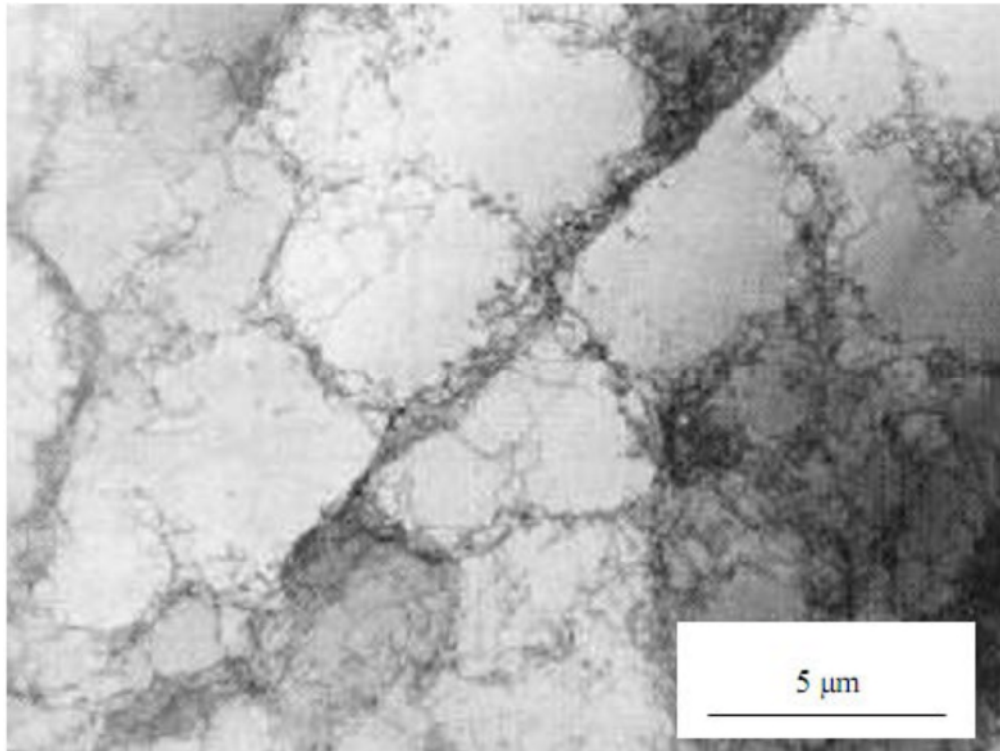
#### **I.4. Effet des traitements thermiques sur une structure déformé :**

##### **I.4.1. Restauration et recristallisation:**

Après la déformation plastique le métal est écroui, donc sa micro structure et ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques sont modifiée et altérées et un certains quantité d'énergie est emmagasinée. Le métal écroui peut être utilisé dans cet état en fonction des propriétés désirées, ou subit des traitements ultérieurs. Un recuit permet de revenir à un état plus stable, l'élévation de température permet d'activer divers processus, qui conduisent à une restauration de la micro structure, ou bien à la construction d'une nouvelle micro structure, c'est la recristallisation [8].

##### **I.4.1.1. Restauration :**

Au cours de la restauration, les grains initiaux demeurent la base de la micro structure, mais il se produit une diminution du nombre des défauts ponctuels ainsi qu'une diminution de la densité de dislocations, accompagnée de réarrangements de celle-ci en configuration de plus basse énergie. Maintient d'un métal écroui à une température inférieure à la température de recristallisation ( $T < 0,4 T_f$ ). La restauration dynamique apparait, quant à elle, directement pendant le processus de déformation, auquel elle est directement liée. Le domaine concerné est alors celui des fortes vitesses de déformation. Elle est en particulier présente dans les expériences de torsion sur barreaux cylindriques plein, menées pour étudier l'aptitude à la mise en forme des métaux. (Fig. 1.7) [8].



**Figure 1.7 :** Structure de cellules de dislocations dans un alliage d'aluminium [8].

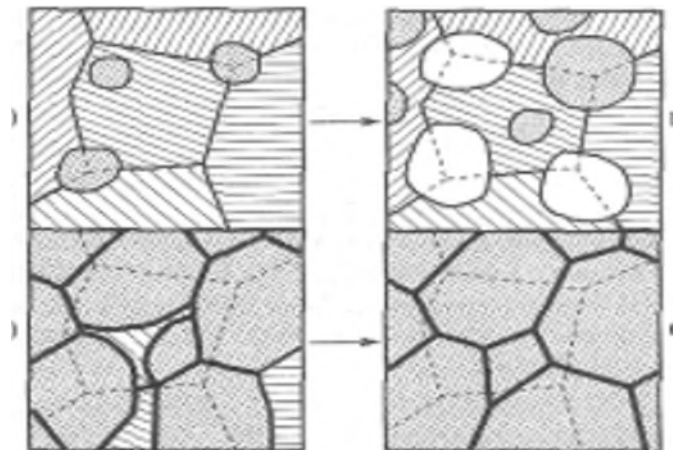
#### **I.4.1.2 Recristallisation:**

La recristallisation se caractérise par le développement de nouveaux grains très pauvres en dislocations, aux dépens des grains écrouis. L'énergie motrice de cette transformation structurale est l'énergie de l'érouissage. Ces nouveaux grains croissent à partir de ce qu'il est convenu d'appeler des germes. Un certain nombre de grains se développent en « mangeant » la matrice écrouie au sein de laquelle ils baignent. Cette croissance se poursuit jusqu'à ce que ces nouveaux grains arrivent au contact les uns des autres. La recristallisation proprement dite est alors achevée.

L'apparition et le développement de nouveaux grains qui occupent bientôt tout le volume de l'échantillon; les défauts ont alors presque totalement disparu, l'orientation cristallographique a changé en chaque point alors que la restauration avait pratiquement conservé l'orientation locale d'érouissage. Partir de ce stade, le

C'est donc un phénomène typique de germination croissance schématisé à la figure (fig1.8) Mais comme la déformation se poursuit, les grains recristallisés s'érouissent à leur tour, dans différentes zones du matériau, se mettent alors en place des cycles d'érouissage et de recristallisation successifs qui ne sont pas a priori synchronisés. A Matériau est donc constitué de volumes de matière présentant différents taux d'érouissage. [9]





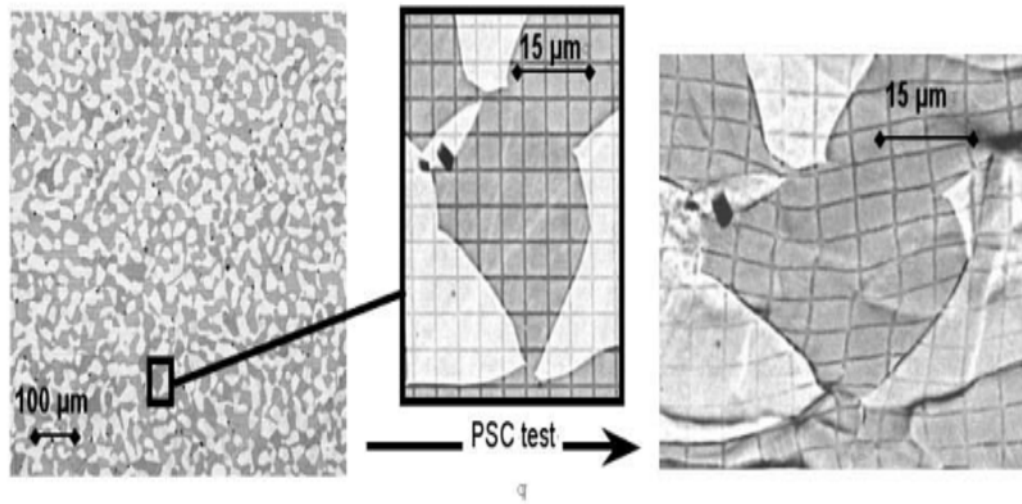
**Figure 1.8 :** Mécanisme de recristallisation. [9]

### **I.4.2 Evolutions microstructurales lors de déformations à chaud:**

On distingue deux classes de sollicitations des solides en fonction de la température, celles à basses températures et celles à hautes températures. En effet, au-delà d'environ  $0,5.T_f$  ( $T_f$  désignant la température de fusion en Kelvin), l'agitation thermique est telle que des mécanismes de réorganisations atomiques spécifiques apparaissent. La diffusion peut en effet changer les conditions de mobilité des atomes, ou des dislocations et donc les modes de déformation. Le taux de déformation imposé et la vitesse à laquelle on sollicite le matériau jouent également un rôle notable dans l'activation de ces mécanismes.

Si l'on s'intéresse à la mise en forme à chaud (opérations industrielles telles que le forgeage, le matriçage, l'estampage ou le laminage à chaud), on est amené à considérer des quantités de déformation souvent très importantes réalisées sur des périodes de temps relativement courtes, c'est à dire à des vitesses de déformation typiquement comprises entre  $0.1$  et  $100 \text{ s}^{-1}$ . Au cours de ces opérations, les matériaux vont être le siège d'évolutions microstructurales importantes qui vont permettre d'agir sur l'organisation atomique et l'architecture, et donc conditionner leurs caractéristiques mécaniques finales.

Ces évolutions microstructurales pendant la déformation à chaud sont essentiellement des combinaisons de l'écroutissage avec la restauration dynamique et avec la recristallisation dynamique. (Fig. 1.9) [7]



**Figure 1.9 :** Déformation à chaud d'un acier biphasé (compression globale 30%). [7].

# **Chapitre II**

## **Les Essais Mécaniques**

## **II. Les essais mécaniques:**

### **II.1. Généralités :**

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

Cependant, la déformation d'une pièce dépend de la géométrie de la pièce et de la manière dont sont exercés les efforts extérieurs sur cette pièce. Il faut donc normaliser les essais. Des normes définissent donc :

- la forme de la pièce d'essai dont on teste le matériau, on parle alors d'éprouvette normalisée ;
- comment sont exercés les efforts sur l'éprouvette, on parle alors d'essai normalisé.

### **II.2.Essai de dureté :**

Si la notion de dureté est l'une des plus intuitives, sa mesure correspond en pratique à celle de la résistance à la pénétration locale du matériau considéré. Les essais de la dureté permettent de définir quelques caractéristiques des matériaux tels que ; (les modules d'Young et de Coulomb, coefficient de poisson, dureté, viscosité, forces d'adhésion (entre la pointe et le substrat) ou encore ténacité et énergie de rupture, etc.), mais aussi de la nature et de la forme du pénétrateur et du mode de pénétration [10, 11].

#### **II.2.1. Définition de dureté:**

La définition valable pour la dureté est la résistance qu'oppose un corps à la pénétration d'un corps plus dur. La dureté est un complément indispensable de l'examen métallographique, qui donne une première impression sur les caractéristiques mécaniques et corrobore souvent l'interprétation des textures. Selon le

type de charge du corps d'essai lors de la pénétration dans le matériau, on distingue deux procédés: [12].

- procédé avec action statique (par pénétration).
- procédé par action dynamique (par rebondissement) [12].

### II.2.2. Principe de l'essai de pénétration:

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

$$H = \frac{F}{S} \quad (\text{II.1})$$

Les essais les plus classiques sont les essais Brinell, Vickers et Rockwell (Tableau. II.1) [13].






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

Tableau II.1 : Tableau pénétrateurs Brinell, Rockwell, Vickers et Knoop [10].

### II.2.3. Procédé avec action statique:

Les différentes méthodes d'essai faisant partie de ce procédé sont les essais du domaine macro avec force d'essai  $F > 30 \text{ N}$  tels que:

- essai Brinell

- essai Rockwell
- et l'essai Vickers [12].

### **II.2.3.1. L'essai de dureté Brinell:**

Il consiste à imprimer dans la pièce à essayer une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre  $D$  sous une charge  $F$ , et à mesurer le diamètre  $d$  de l'empreinte laissée sur la surface après l'enlèvement de la charge (figure II.1). La dureté Brinell HB est un nombre proportionnel au rapport  $F/S$ , où  $S$  est la surface en millimètre carrés de l'empreinte[14].

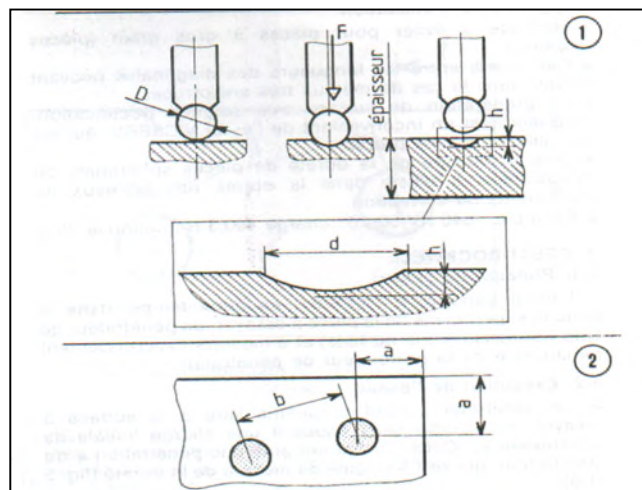


Figure II.1 : Essai Brinell[14].

#### **II.2.3.1.1. Symboles et désignations:**

$F$  = charge d'essai en Newton.

$D$  = diamètre de la bille en millimètres.

$d$  = diamètre de l'empreinte en millimètres

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}. \quad (\text{II.2})$$

$h$  = profondeur de l'empreinte en millimètres :

$$h = \left( \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \right). \quad (\text{II.3})$$

HBS = bille en acier ; HBW = bille en carbure.

### II.2.3.1.2. Conditions d'essais:

- L'essai est normalement conduit à température ambiante.
- La charge est appliquée progressivement, sans choc ni vibrations, et maintenue à sa valeur finale pendant 10 à 15 secondes.
- On prépare la surface pour éviter toute altération.
- Les charges d'essais utilisées doivent être choisies de telle façon que le diamètre  $d$  de l'empreinte soit compris entre les valeurs  $0.24D$  et  $0.6D$ .
- L'épaisseur minimale de l'éprouvette est fonction du diamètre de l'empreinte.
- La pièce doit reposer sur un support rigide.

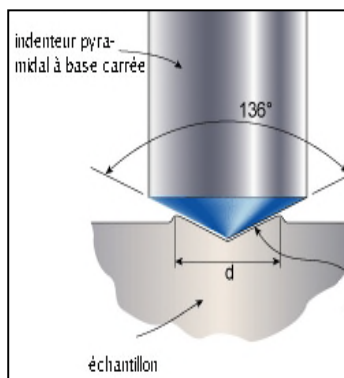
### II.2.3.1.3. Expression des résultats:

Le symbole HBS ou HBW est précédé de la valeur de dureté et complété par un indice précisant les conditions d'essai dans l'ordre suivant :

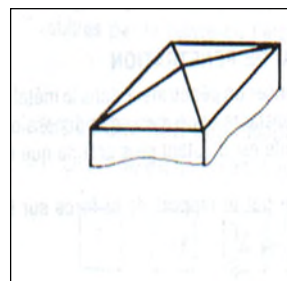
- diamètre de la bille en millimètres ;
- nombre représentant la charge d'essai ;
- durée d'application de la charge en secondes.

### II.2.3.2. Essai Vickers:

La détermination de la dureté selon Vickers s'effectue de la même façon que le procédé brinell, il consiste à imprimer dans le métal testé un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidal à base carrée, d'angle au sommet entre deux faces opposées de  $136^\circ$ , On mesure la diagonale de l'empreinte carrée laissée par le pénétrateur [12, 15]



(a)



(b)

Figure II.2 :(a) Principe de l'essai Vickers (b) Géométrie du pénétrateur

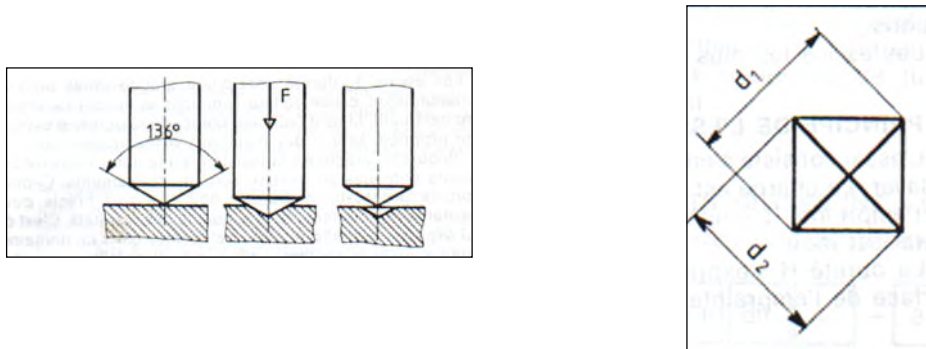


Figure II.3 : Mesure de l'empreinte

### II.2.3.2.1. Symboles et désignations:

Angle au sommet du pénétrateur :  $136^\circ$ .

F : charge d'essai en newton à  $\pm 1\%$ .

d : diagonale de l'empreinte en mm.

Avec  $d = (d_1 + d_2) / 2$  (figure II.4).

$$HV = 0.189 F / d^2. \quad (II.4)$$

### II.2.3.2.2. Conditions d'essais:

- L'essai est normalement effectué à température ambiante.
- La charge est appliquée progressivement, sans choc ni vibrations, et maintenue à sa valeur finale pendant 10 à 15 secondes.
- On prépare la surface pour éviter toute altération.
- On choisira l'épaisseur de la pièce  $\geq 1.5xd$ .
- Pour des essais successifs on choisira,

b et a  $\geq 2.5xd$  (pour les aciers).

a  $\geq 3xd$  et b  $\geq 6xd$  (pour Al, Cu et alliages) (figure II.4).

La charge d'essai sera :  $49 \text{ N} \leq F \leq 981 \text{ N}$  (pour les aciers), la charge normale étant  $F = 294 \text{ N}$ .

$49 \text{ N} \leq F \leq 1180 \text{ N}$  (pour Al, Cu et alliages).



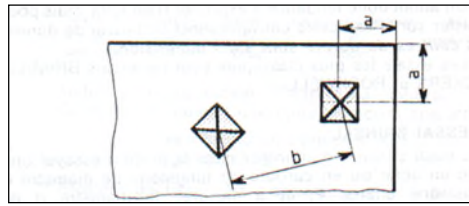


Figure II.4 : Condition pour les mesures répétitives[14].

### II.2.3.2.3. Domaine d'utilisation:

- Méthode à éviter pour des pièces à gros grains (pièces moulées).
- Des écarts entre les longueurs des diagonales peuvent exister dans le cas des métaux très anisotropes.
- La préparation de surface très soignée (rectification, polissage) est un inconvénient de l'essai Vickers, qui est par ailleurs le plus précis.
- Pour la mesure de la dureté de pièces sphériques ou cylindrique, il existe dans la norme des tableaux de coefficients de correction.

### II.2.3.3. Essai de dureté Rockwell:

L'essai Rockwell consiste à imprimer dans la couche superficielle du métal une empreinte à l'aide d'une bille ou pointe de diamant sous l'action d'une charge connue. La détermination de la dureté Rockwell se réduit par la mesure de la profondeur de pénétration. Plus le métal sera dur, moins il y aura de pénétration et plus grand sera le chiffre de Rockwell lu sur le comparateur de mesure [16].

#### II.2.3.3.1. Principe de l'essai:

L'essai consiste à imprimer, en deux temps, dans la couche superficielle de la pièce à essayer, un pénétrateur de type normalisé (cône ou bille) et à mesurer l'accroissement rémanent  $h$  de la profondeur de pénétration.

#### II.2.3.3.2. Exécution de l'essai:

D'après la figure II.5 l'essai s'effectue comme suit :

- Le pénétrateur étant perpendiculaire à la surface à essayer, il est soumis sans chocs à une charge initiale de pénétration  $F_0$ . Cette charge entraîne une pénétration  $a$  du pénétrateur, qui sert d'origine de mesure de la dureté.
- On applique au pénétrateur, progressivement et sans choc (de 2 à 8 secondes), une charge  $F_1$  entraîne un accroissement de pénétration  $b$  du pénétrateur.

- On enlève la charge  $F_1$  pour revenir à la charge initiale  $F_0$ . La pénétration du pénétrateur est alors égale à  $c$ .

On mesure alors l'accroissement rémanent de la profondeur de pénétration  $h$ . C'est à dire la différence entre la pénétration  $c$  sous charge  $F_0$  à la fin de l'essai et la pénétration  $a$  sous charge  $F_0$  au début de l'essai.

A partir de la valeur  $h$  est déduit le nombre appelé « dureté Rockwell », selon la formule :

$$\text{Dureté Rockwell} = N - \frac{h}{S} \quad (\text{II.5})$$

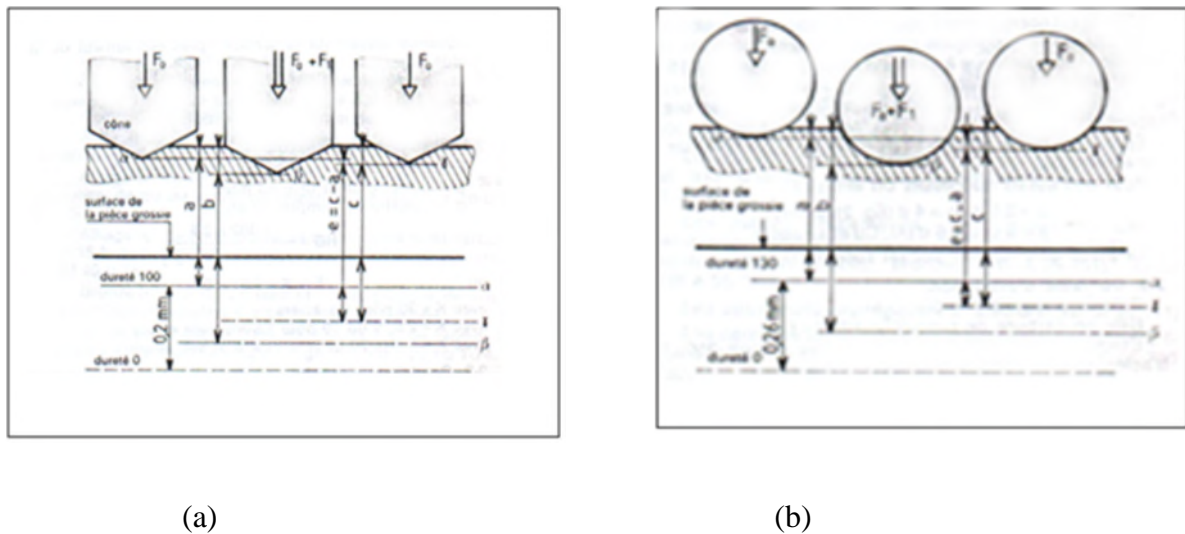


Figure II.5 : (a) Principe de l'essai Rockwell avec cône, (b) avec bille[16].

### II.2.3.3.3. Conditions d'essais:

- L'essai est effectué à température ambiante.
- Les charges doivent être appliquées sans chocs.
- On prépare la surface pour éviter toute altération.
- La pièce doit reposer sur un support rigide.
- Aucune marque ne doit apparaître au dos de la pièce.
- L'épaisseur de l'éprouvette ou de la couche superficielle à essayer doit être au moins égale à  $10 h$  pour les essais effectués avec le pénétrateur conique, et à  $15 h$  pour les essais effectués avec le pénétrateur sphérique.
- Pour les essais successifs, la distance entre centres de deux empreintes voisines doit être au moins égale à 4 fois le diamètre de l'empreinte (mais avec un minimum de 2 mm).

- la distance du centre d'une empreinte au bord de la pièce doit être au moins égale à 2.5 fois le diamètre de l'empreinte (mais avec un minimum de 1 mm).
- Le nombre de la dureté Rockwell est habituellement lié sur le cadran de l'appareil de mesure.
- Pour la mesure de la dureté de pièces sphériques ou cylindriques, il existe dans la norme des tableaux de coefficients de correction.

#### **II.2.3.3.4. Expression des résultats:**

La dureté Rockwell pour les échelles A, B, C, D, E, F, G, H et K est désignée par le symbole HR précédé par la valeur de la dureté et complété par une lettre indiquant l'échelle.

Exemple : 59 HRC = dureté Rockwell de 59, mesurée sur l'échelle C.

La dureté Rockwell pour les échelles N et T est désignée par le symbole HR précédé par la valeur de la dureté et complété par un nombre (représentant la charge totale) et une lettre indiquant l'échelle.

Exemple : 70 HR 30 N = dureté superficielle 70, mesurée sur l'échelle 30 N avec une charge de 294.2 N [17].

### **II.3. Essais de résilience:**

Les essais de résilience permettent de caractériser la fragilisation d'un matériau. Ils consistent à rompre une éprouvette entaillée (l'entaille a pour but de fragiliser le matériau) éprouvette Charpy sous l'impact d'un "mouton pendule". On mesure l'énergie absorbée par la rupture, ce qui permet de remonter à la résilience du matériau (énergie absorbée ramenée à la surface (en J/cm<sup>2</sup>)). Cet essai permet également d'accéder au taux de rupture fragile (cristallinité - évalué par l'opérateur ou par analyse d'images) ou à l'expansion latérale des éprouvettes suite à la rupture [18].

#### **II.3.1. Principe de l'essai:**

L'essai consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie W absorbée dont on déduit la résilience.

La résilience est l'énergie exprimée en joules par  $\text{cm}^2$ , nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette.

$$\text{Résilience} = \frac{\text{énergie absorbée par la rupture } W \text{ (joule)}}{\text{section au droit de l'entaille} (\text{cm}^2)}$$

### II.3.2. Machine d'essai:

Un couteau fixé sur un marteau oscille dans plan vertical autour d'un axe O. Une partie de l'énergie emmagasinée dans la chute du pendule est utilisée pour rompre l'éprouvette.

Le centre de gravité du pendule est toujours très voisin de l'arête du couteau du pendule (figure II.6).

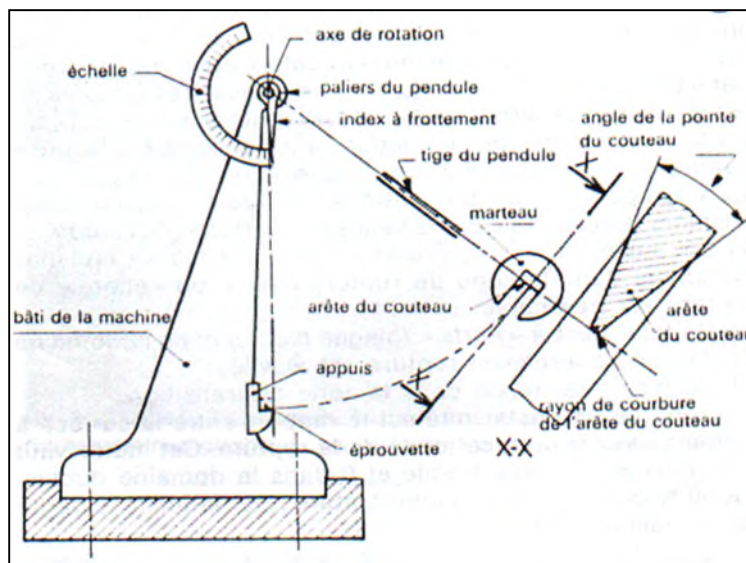


Figure II.6 : Schéma de principe de l'essai de choc.

### II.3.3. Exécution de l'essai:

Le couteau est écarté de la verticale à une hauteur correspondant à une énergie départ  $W_0=300$  Joules.

- On libère le couteau, dans sa chute, en passant à la verticale, il brise l'éprouvette.
- On mesure la hauteur à laquelle remonte le pendule pour calculer l'énergie non absorbée  $W_1$ .
- On calcule la différence  $W_0-W_1=W$  (énergie absorbée). (figure II.7) [19].

$$W = p (h_0-h_1).$$

(II.7)

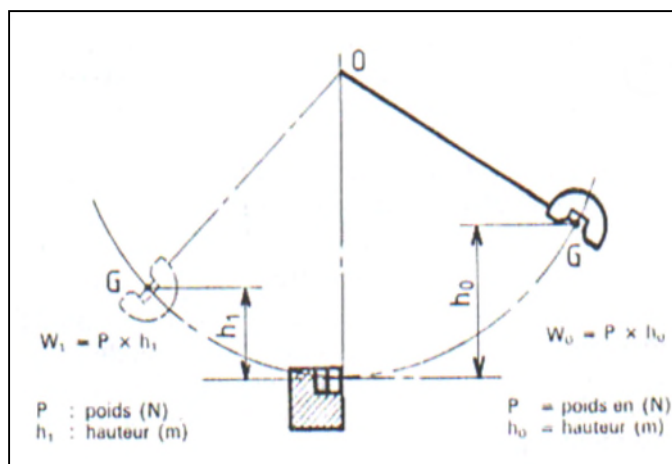


Figure II.7 : Calcul de l'énergie dissipée dans un choc[19].

### II.3.4. Essai Charpy:

#### II.3.4.1. Essai sur éprouvette entaillé en U et V

Les éprouvettes les plus fréquemment utilisées aujourd'hui sont les types ISO-V et ISO-U (figure II.8).

Ils ont une entaille en forme de V ou U pour fixer l'endroit de la fissure. L'énergie de rupture est finalement indiquée en J (Joule), précédée par les lettres KV ou KU pour désigner qu'il s'agit d'une énergie de rupture (K, de l'allemand: Kerbschlagzähigkeit) mesurée avec une éprouvette ayant une entaille en forme de V ou U[18].

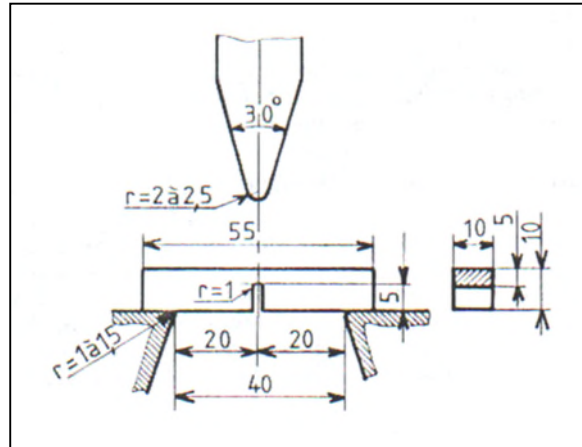


Figure II.8 : Géométrie des éprouvettes de choc Charpy [19].

## II.4. Essais de fatigue:

La fatigue est la modification des propriétés des matériaux consécutive à l'application de cycles d'efforts, cycles dont la répétition peut conduire à la rupture des pièces constituées avec ces matériaux [18].

### II.4.1. But:

Le but de l'essai de fatigue est de déterminer les conditions de résistance des matériaux soumis à des efforts variables dans le temps et de la limite pratique de fatigue. Considérons une éprouvette cylindrique soumise à des efforts de flexion (Fig. II.9) [12].

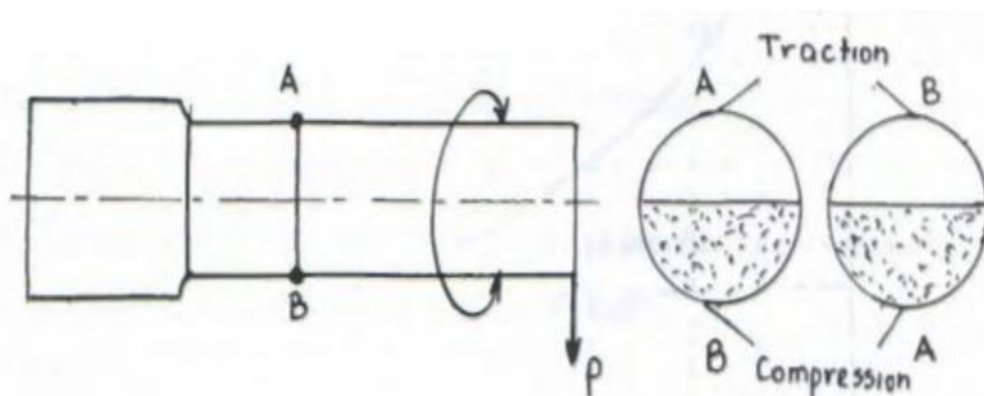


Figure II.9 : Essai de fatigue [12].

### II.4.2. Eprouvettes et essai:

Les éprouvettes peuvent être de géométries variées, en fonction de ce que l'on cherche à caractériser. Classiquement, elles peuvent être à section circulaire ou parallélépipédique, et d'épaisseur constante ou variable. Les plus générales sont les éprouvettes toroïdales, à section circulaire variable, comme celle présentée sur la figure II.10. Enfin, les éprouvettes peuvent être lisses ou entaillées. L'état de surface doit être particulièrement soigné et répétitif, et l'usinage ne doit pas introduire de contraintes résiduelles importantes. Comme on peut le voir, la surface de l'éprouvette est parfaitement polie pour retarder au maximum la rupture par fatigue [20].

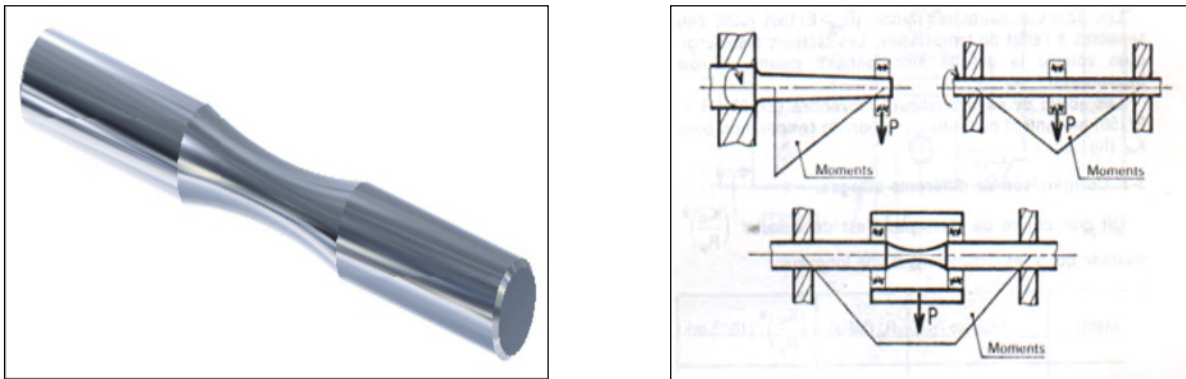


Figure II.10 : Eprouvette de fatigue [20].

### II.4.3. Dimensions:

Elles dépendent de la capacité de la machine (charge d'essai maximale : 25% de la capacité de la machine) et de ces caractéristiques (fréquence propre de l'éprouvette supérieure à deux fois la fréquence d'essai) [21].

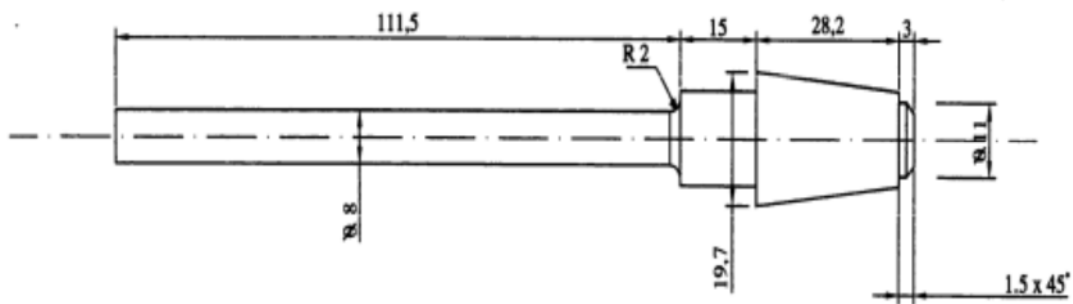


Figure II.11 : Eprouvette d'essai de fatigue.

#### II.4.4. Machine d'essai:

On distingue plusieurs machines d'essai de fatigue, selon le mode de sollicitation (flexion plane, flexion rotative, torsion, traction compression, etc.), et selon les facteurs d'influence (température, fatigue sous corrosion, etc.). Comme exemple, le laboratoire de la résistance des matériaux (RDM) du département de génie mécanique de l'université de Biskra contient une machine d'essai de fatigue en flexion rotative modèle : GUNT, de type : WP 140, qui a les caractéristiques suivantes.

- Courant alternatif: 220 V.
- Fréquence: 50 Hz.
- Charge maximale: 500 N.
- Échelle de graduation : 5 N.
- Environnement: air ambiant.
- Température: ambiante [21].



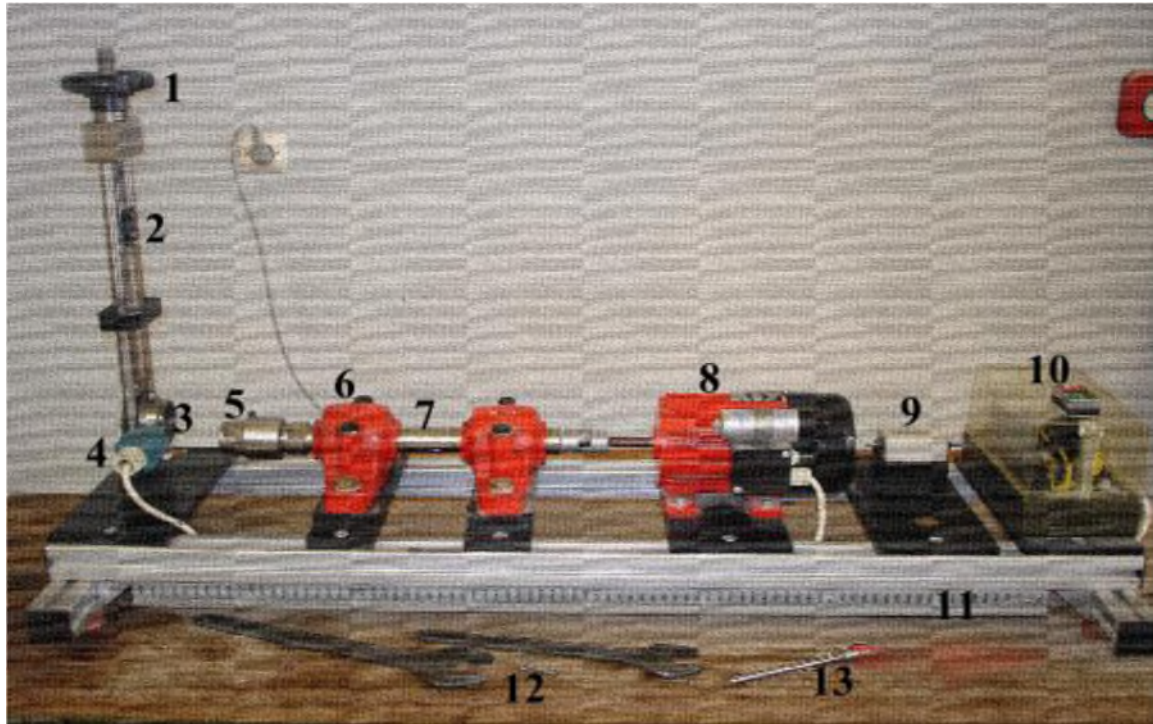
**II.4.5 Description de la machine:**

Figure II.12 : La machine d'essai de fatigue GUNT WP 140 [21].

1 Volant.

2 Chariot transversal gradué.

3 Roulement.

4 Fin de course.

5 Mandrin.

6 Palier lisse.

7 Arbre de transmission

8 Moteur électrique.

9 Compteur.

10 Tableau de commande.

11 Châssis.

12 Clés.

13 Eprouvette

### II.4.6. Courbe de Wöhler:

Les essais de fatigue permettent de déterminer le nombre de cycles à rupture pour une sollicitation donnée. Ces résultats sont présentés sous la forme d'une courbe semi-logarithmique dite de Wöhler (ou courbe SN, pour Stress et Number of cycles to failure, en anglais). Une courbe type est présentée (figure II.13) On y distingue les zones de :

- Zone de fatigue oligocyclique : sous une forte contrainte, la rupture intervient après un très petit nombre de cycles et succède à une forte déformation plastique.
- Zone d'endurance limitée ou de fatigue : la rupture est atteinte après un nombre limité de cycles, nombre qui croît lorsque la contrainte diminue.
- Zone d'endurance illimitée ou de sécurité : sous faible contrainte, la rupture intervient après un nombre très grand de cycles, d'une durée supérieure à la durée de vie de la pièce (figure II. 14) [22].

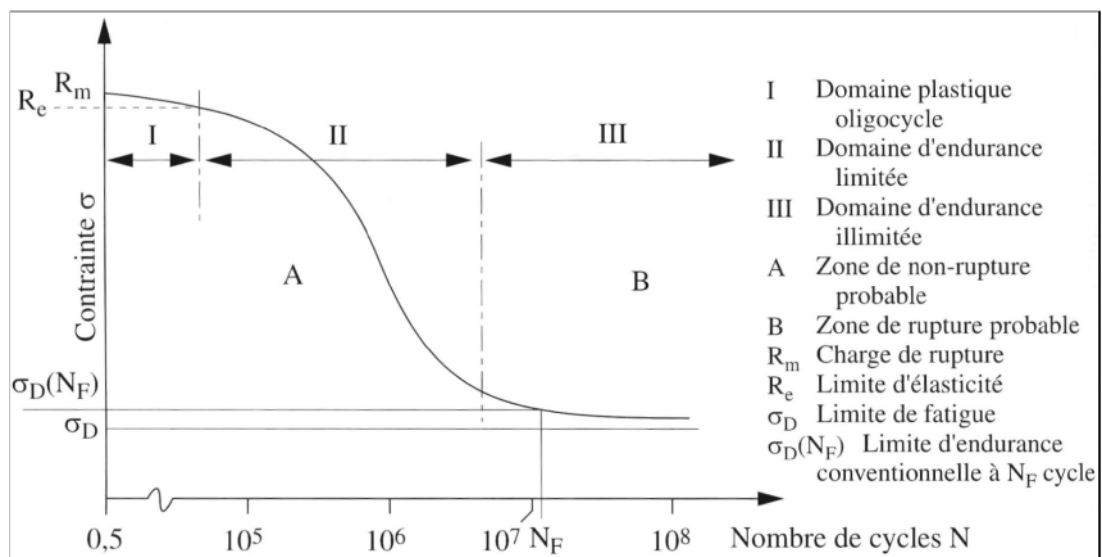
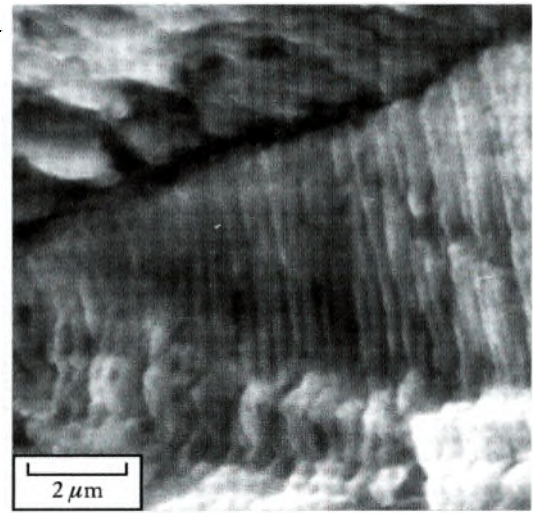


Figure II.13: Courbe de Wöhler [22].



(a)



(b)

Figure II.14 : (a) Formation de stries de fatigue dans de l'aluminium, b) dans de laiton [23].

#### II.4.7. Diagramme d'endurance:

Pour une durée de vie donnée, on peut considérer trois types de diagrammes :

- $\sigma_{max}$  et  $\sigma_{min}$  en fonction de la contrainte moyenne  $\sigma_m$  : diagramme de Goodman-Smith ;
- $\sigma_{max}$  en fonction de  $\sigma_{min}$  : diagramme de Ros ;
- $\sigma_{max}$  en fonction de  $R_\sigma$  diagramme de Moore.

La limite d'endurance pour une pièce en service dépend de la contrainte moyenne.

Dans la pratique, on détermine en général  $\sigma_D$  pour  $R_\sigma = -1$  ( $\sigma_m = 0$ ) et on adopte diverses courbes limites quand  $\sigma_m \neq 0$ , donc la courbe de Goodman sera :

$$\sigma_a = \sigma_D \left( 1 - \frac{\sigma_m}{R_m} \right) \quad (\text{II.8})$$

Fixant la contrainte alternée  $\sigma_a$  pour chaque  $\sigma_m$ . Ce diagramme ne représente que le cas de contraintes moyennes de traction, il peut être étendu à des contraintes moyennes de compression [15].

## **II.5. Essai de traction:**

Il s'agit d'un des essais les plus pratiqués et qui permet de déterminer des caractéristiques mécaniques fondamentales des matériaux : limite d'élasticité, charge de rupture, allongement de rupture notamment. Il consiste à réaliser, dans une éprouvette, un champ de contrainte uniforme uni axiale de traction et à enregistrer l'allongement résultant [17].

### **II.5.1. But d'essai:**

Ces essais permettent de tracer une courbe de traction à partir de laquelle les caractéristiques suivantes peuvent être déduites :

- \* La déformation élastique en fonction de la force appliquée d'où on peut déduire, connaissant les dimensions de l'éprouvette, le module d'Young.
- \* la limite élastique souvent notée  $R_e$ , ou bien la limite d'élasticité à 0,2%  $R_{e0,2}$ .
- \* la déformation plastique.
- \* la résistance à la traction ou tension de rupture souvent notée  $R_r$  [21].

### **II.5.2. Principe:**

L'essai est réalisé sur une machine de traction. On applique progressivement et lentement (sans choc) à une éprouvette cylindrique de formes et de dimensions normalisées, un effort de traction croissant à une éprouvette sur laquelle on a tracé deux repères initialement distants de  $L_0$ , et on mesure simultanément l'effort  $F$  et l'allongement.  $\Delta L = L - L_0$  (II.10) [21].

### **II.5.3. Eprouvettes:**

#### **II.5.3.1. Forme et dimension:**

L'éprouvette est généralement obtenue par usinage d'un prélèvement d'un produit ou d'une ébauche moulée. Cependant les produits de section constante (profilés, barres, fils, etc.), ainsi que les éprouvettes de fonderie (fontes, alliages non ferreux) peuvent être soumis à l'essai sans être usinées. La section droite des éprouvettes peut être circulaire, carrée, rectangulaire, annulaire, ou, dans des cas particuliers d'une autre forme. Elle comporte une partie calibrée de longueur  $L_c$  qui est raccordée par un congé de raccordement aux têtes d'amarrage dans le cas

D'éprouvettes usinées. Des repères définissent la longueur initiale  $L_0$  (figure II.15). Dans le cas d'éprouvettes non usinées, la longueur libre entre mâchoires doit être suffisante pour que les repères soient à une distance raisonnable de ces mâchoires [19].

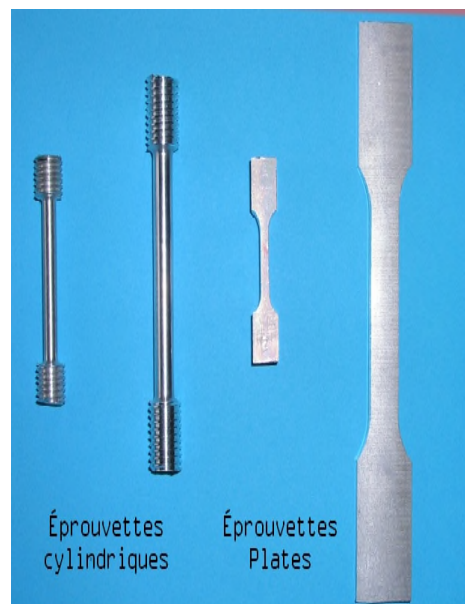
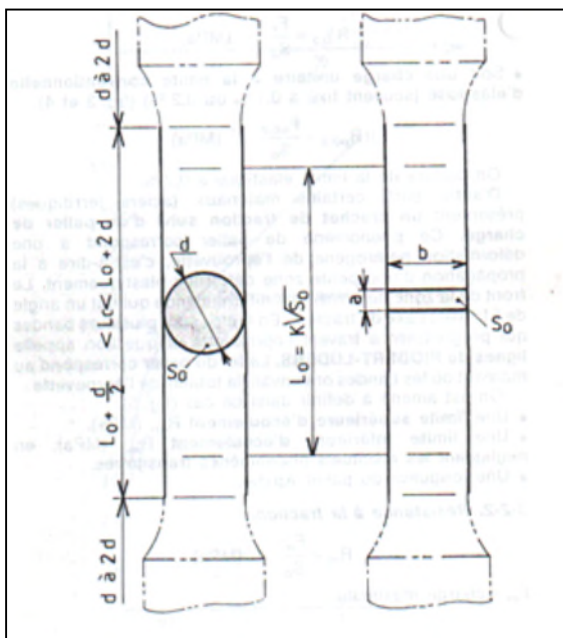


Figure II.15 : Géométrie des éprouvettes de traction [24].

### II.5.3.2. Longueur entre repères:

Les éprouvettes pour lesquelles la longueur libre initiale entre repères est reliée à l'aire de la section initiale selon la relation  $L_0 = k\sqrt{S_0}$  sont dites proportionnelles ( $k = 5.65$  avec  $L_0 \geq 20 \text{ mm}$ ). Si la section droite est trop faible pour répondre à la condition  $L_0 \geq 20 \text{ mm}$ , on peut utiliser une valeur  $k$  supérieure ( $k = 11.3$  de préférence). Dans le cas d'éprouvettes non proportionnelles, la longueur initiale entre repère  $L_0$  est prise indépendamment de la valeur  $S_0$  [19].

### II.5.4. Machine de traction:

Une machine de traction est constituée d'un bâti portant une traverse mobile. L'éprouvette de traction, vissée ou enserrée entre des mors, selon sa géométrie, est amarrée à sa partie inférieure à la base de la machine et à sa partie supérieure à la traverse mobile (dans le cas d'une machine mécanique) ou au vérin de traction (dans le cas d'une machine hydraulique). Le déplacement de la traverse vers le haut réalise la traction. Une machine de traction comporte une cellule de charge, qui permet de mesurer l'effort appliqué à l'éprouvette et le déplacement de l'éprouvette peut être



suivi de diverses façons. Les dispositifs expérimentaux sont généralement asservis et peuvent être pilotés à vitesse de montée en charge, à charge constante, à vitesse de

Déformation constante, etc. selon ce qui peut être proposé par le système de pilotage (figure II.16) [24].

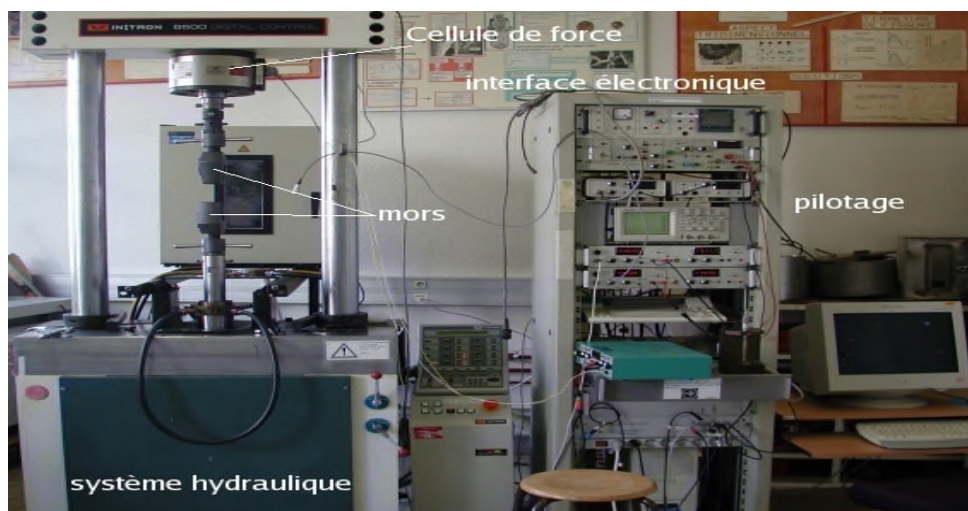


Figure II.16 : Machine de traction [24]

### II.5.5. Diagramme de traction:

Les valeurs mesurées directement lors d'un essai de traction sont la force  $F$  et l'allongement  $\Delta L$ , plutôt que les contraintes et la déformation. La contrainte  $\sigma$ , rapportée dans un diagramme de traction est la force divisée par la section initiale  $S_0$  de l'éprouvette (contrainte nominale).

$$\sigma = F/S_0 \quad (II.11)$$

De même la déformation, se réfère à la longueur initiale  $L_0$  de la partie délimitée par l'extensomètre (déformation nominale) [22].

$$e = (L-L_0/L_0) \quad (II.12)$$

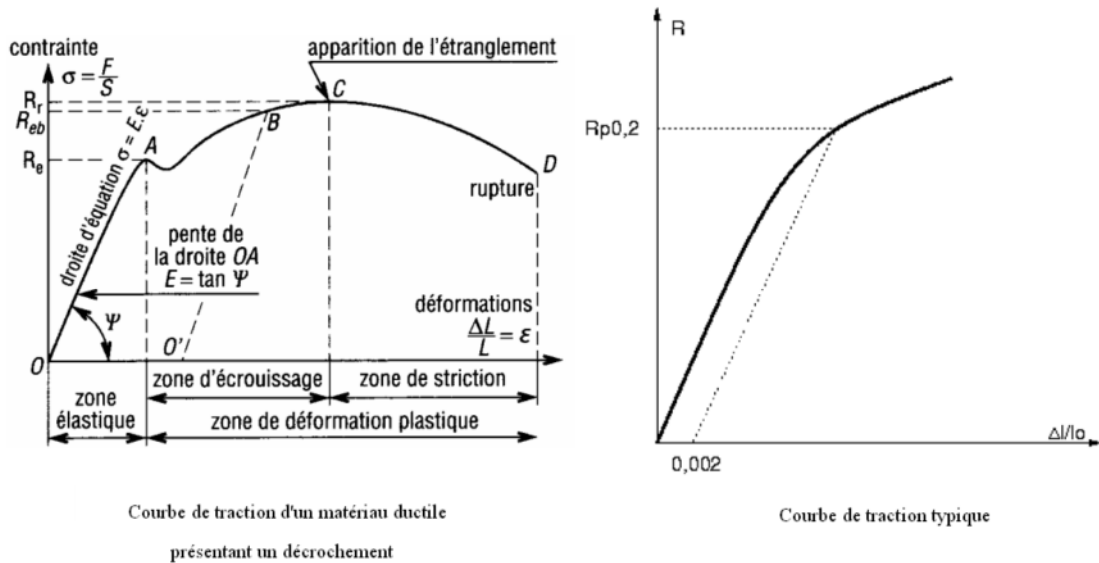


Figure II.17 : Diagramme de traction [22].

**Première période :** c'est la période élastique ou de résistance à la déformation des matériaux. Si on relâche les forces appliquées avant d'atteindre la limite ( $R_e$ ) t1 le matériau reprend sa forme initiale, c'est la limite élastique.

**Deuxième période :** c'est la période de déformation permanente ou période de mise en forme des matériaux. Le matériau se déforme, mais ne rompt pas et gardera la déformation même si on relâche les forces appliquées.

**Troisième période :** c'est la période de striction ou de décohésion structurale localisée entraînant la rupture de l'éprouvette [21].

## II.5.6 Caractéristiques de l'essai:

Limite élastique ( $R_e$ ) t :

C'est la charge unitaire (charge par unité de section) exprimée en hb (hectobar) ou 107 Pa (environ 102 kgf/cm<sup>2</sup> pour les anciens) correspondant à la fin de la premier période.

$$R_e t = \text{Force } \acute{e}(F_e) / \text{Section } \acute{e}\text{prouvette}(S_0) \quad (\text{II.13})$$

Résistance de rupture ( $R_r$ ) t :

C'est la charge unitaire maxi que peut supporter l'éprouvette avant rupture exprimée en hb (hectobar) ou 107 Pa (environ 1,02 kgf/mm<sup>2</sup> pour les anciens).

$$(Rr) t = Force (Fr) / Section ép(S0) \quad (II.14) \text{ Allongement (A \%):}$$

C'est le rapport de changement de longueur après rupture de la partie travaillante ( $l_0$ ) exprimé en %.

$$A\% = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100 \quad (II.15)$$

Striction (Z%) :

C'est le rapport de changement de section après rupture

$$Z\% = (S_f - S_0) / S_0 \cdot 100 \quad (II.16)$$

Dans cette expression,  $L_0$  et  $L_f$  sont respectivement les longueurs initiales et finales après rupture.

Module d'élasticité longitudinal ou module de YOUNG : Il caractérise la stabilité dimensionnelle sous charge pendant la première période. C'est le rapport de la charge unitaire sur l'allongement unitaire correspondant dans la première période de proportionnalité.

$$E = Re \cdot t \Delta l / l_0 \quad (II.17)$$

Plus le module est important et plus la stabilité dimensionnelle de la pièce est grande [21].

## **II.6. Essai de fluage:**

La déformation d'un matériau induite pendant le maintien constant de la température et de la contrainte est appelée fluage. Il s'agit d'une déformation permanente évoluant avec le temps, autrement dit de nature viscoplastique. Si ce genre de déformation est possible à toute température au dessus du zéro absolu, elle n'intervient de manière significative qu'à des températures relativement élevées. Typiquement, ce genre de phénomène est pris en compte à partir de températures avoisinant  $0,2.T_f$ , où  $T_f$  est la température de fusion du matériau [25]



### **II.6.1 .Définition:**

A basse température, et en l'absence d'effet d'environnement, l'application d'une contrainte statique sur une éprouvette lisse (élément de volume) provoque, si celle-ci est suffisante, une déformation plastique qui, très rapidement, demeure constante. A haute température, un matériau se déforme plastiquement sous l'application d'une contrainte constante, même si elle est inférieure à la limite élastique. Ce phénomène est appelé fluage. Le domaine " haute température" correspond à un rapport  $T/T_f$  supérieur à 0.3. Pour un matériau donné, la résistance au fluage dépend du domaine de température, du niveau de contrainte appliquée et des paramètres microstructuraux [26]

### **II.6.2. Principe:**

Une expérience de fluage consiste à appliquer une charge à l'extrémité d'une éprouvette, l'autre extrémité étant maintenue solidaire d'un bâti fixe. On mesure au cours du temps le déplacement de l'extrémité libre de l'éprouvette. Une courbe type de fluage, exprimant la déformation en fonction du temps, est représentée en (figure II.18). On distingue trois stades, primaire, secondaire et tertiaire définis par Andrade depuis 1910 [27].

-Pendant le **stade primaire ou transitoire (AB)**, se caractérise par une vitesse de fluage décroissante, c'est-à-dire que la pente de la courbe diminue en fonction du temps, la résistance du matériau augmente ou qu'il fait objet d'un durcissement par écrouissage, des sous structure stables de dislocations se forment.

-Pendant le **stade secondaire ou stationnaire (BC)**, lors duquel la vitesse de déformation atteint sa valeur minimale et reste constante. Cette étape de fluage dure généralement plus longtemps que les deux autres. La vitesse de fluage constante s'explique par l'équilibre qui s'instaure entre le processus de durcissement par écrouissage et la restauration favorisée par la température et la contrainte.

-Pendant le **stade tertiaire(CD)**, la vitesse de fluage augmente jusqu'à la rupture. Celle-ci résulte de modifications structurales ou métallurgiques, tel que la séparation de joints de grains et la formation de fissures, de cavités, de vides internes. En outre une striction peut se former au sein de la région qui se déforme lors de l'application

d'une charge de traction. Il en découle une diminution de l'aire du matériau et une hausse de la vitesse de déformation [27].

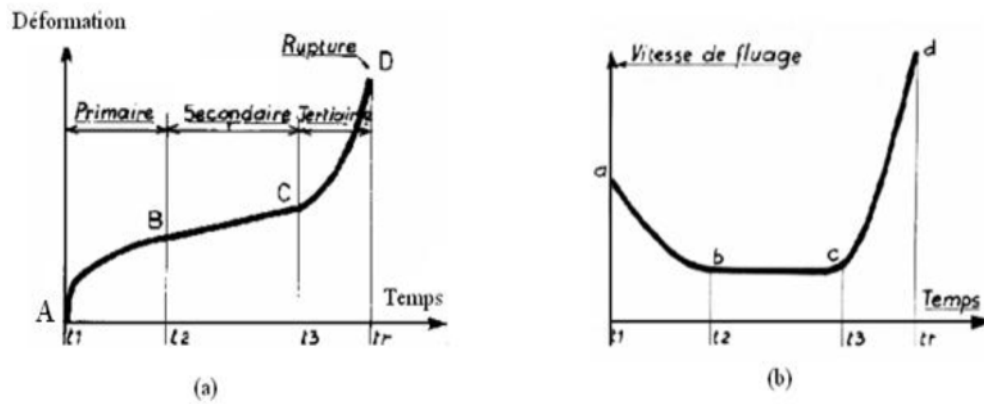


Figure II.18 : (a) Allure générale d'une courbe de fluage, Evolution de la déformation et (b) la vitesse de déformation en fonction du temps [25].

### II.6.3. Caractéristiques de fluage:

#### II.6.3.1. Fluage logarithmique:

A basse température et à faible contrainte la courbe montre seulement la transition du fluage avant que la déformation devient constante (figure II.19-a). Ce fluage est décrit par l'équation :

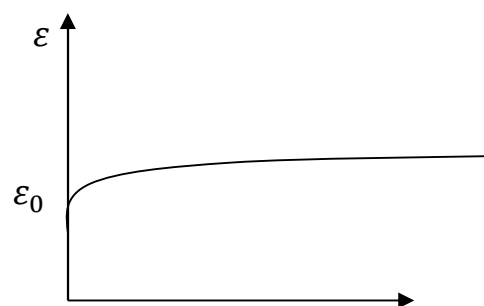
$$\varepsilon = \varepsilon_0 + a \log t. \quad (\text{II.15})$$

Où  $\varepsilon$  : représente la déformation après un temps  $t$ ,

$a$  : est une constante,

instantanée,

$\varepsilon_0$  : est la déformation



Ce type de fluage est appelé logarithmique

Figure II.19-a : Fluage logarithmique[28].

### II.6.3.2. Fluage de puissance:

A haute température et forte contrainte l'équation de fluage est de la forme :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \beta t^m \quad (\text{II.16})$$

Où  $\beta$  et  $m$  sont des constantes avec la valeur de  $m$  compris entre 0 et 1. Pour plusieurs matériaux polycristalin à température élevée  $m = 1/3$ .

$\beta$  : constante en fonction de la température et la contrainte.

Ce type est appelé fluage de puissance (figure II.19-b).

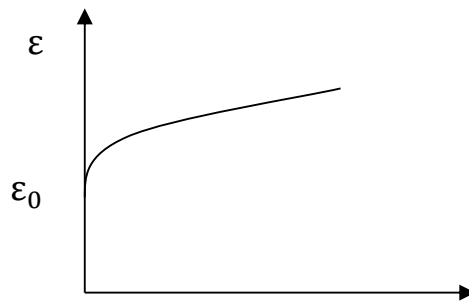


Figure II.19-b : Fluage de puissance [28].

Les deux équations (a) et (b) indiquent la diminution de la vitesse de

déformation  $\frac{d\varepsilon}{dt}$  avec le temps, l'équation de la vitesse de déformation s'écrit :

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = t^{-n}, \text{ où } n \text{ est une constante.}$$

A des basses températures  $n = 1$  et à haute température  $n = 1-m$ .

La transition du premier stade de fluage vers le deuxième stade est caractérisée par l'équation :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \beta t^m + \dot{\varepsilon}_s t \quad (\text{II.17})$$

où  $\dot{\varepsilon}_s$  : vitesse de déformation secondaire [28].

### II.6.4. Les différents mécanismes de fluage:

Il existe deux grandes classes de mécanismes à l'origine de la déformation plastique à haute température: le **fluage dislocation** et le **fluage diffusion**. La déformation du matériau est gouvernée par l'un ou l'autre des mécanismes, en fonction de la température ou de la contrainte appliquée. Nous exposerons ici les mécanismes prédominants par ordre croissant de température, ce qui correspond à un ordre décroissant de la contrainte[29,30]. La figure II.20 présente schématiquement les différents modes de déformation aux joints de grains.

- Fluage –dislocation contrôlé par le glissement thermique activé.
- Fluage-dislocation contrôlé par la restauration ou la montée.
- Fluage-diffusion aux joints de grains ou dans la matrice. Le fluage –diffusion est associé au mécanisme de glissement inter granulaire pour assurer la cohésion de la déformation au joint de grains.

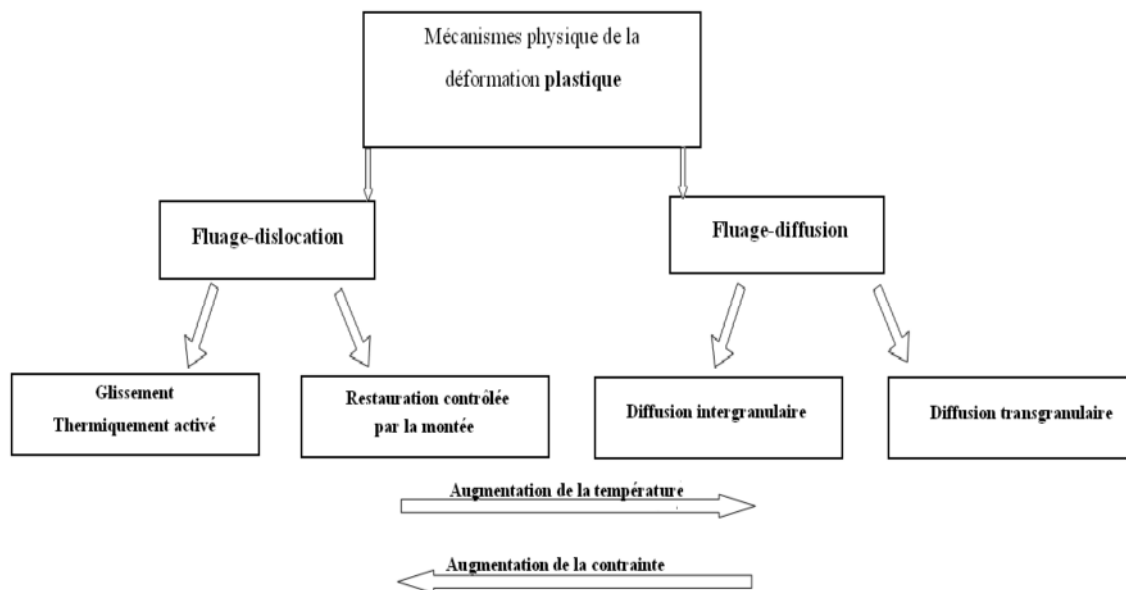


Figure II.20 : Représentation schématique des modes de déformation en fonction de la température [29].

### **II.6.5. Effets de la température et de la contrainte sur le comportement en fluage:**

On a vu différents types de fluage que le fluage présentait trois stades différents si la température était supérieure à environ  $0,3 T_f$  et se réduisait à un fluage de nature logarithmique pour des températures inférieures. On distingue aussi les essais réalisés à des contraintes  $\sigma$  inférieures à la limite d'élasticité  $\sigma_e$  et ceux réalisés à des contraintes supérieures. Dans ce dernier cas, le stade secondaire est d'autant plus réduit que le taux d'écroutissage  $d\varepsilon/d\sigma$  du matériau est faible lors d'un essai de traction. C'est le cas, en particulier, pour les superalliages base nickel. D'une manière générale, la vitesse de fluage augmente avec la contrainte  $\sigma$  et la température  $T$ . La durée du fluage primaire et tertiaire augmente avec  $\sigma$  et  $T$ , tandis que celle du fluage secondaire diminue [24].

### **II.6.6. Effets de la taille de grain sur le comportement en fluage:**

La vitesse de déformation  $\dot{\varepsilon}$  varie de façon inversement proportionnelle à la taille de grain. Pour augmenter la résistance au fluage, il faut augmenter la taille de grain [24].

### **II.6.7. Variations de $\varepsilon$ et de $\dot{\varepsilon}$ avec le temps:**

Les variations de  $\varepsilon$  (et de  $\dot{\varepsilon}$ ) avec le temps sont souvent données par la somme de quatre fonctions : Avec  $\varepsilon_1$  Déformation instantanée correspondant à la mise en charge,  $\varepsilon_2$  fonction du temps de type  $\lambda t^x$ , avec  $x < 1$  (stade primaire),  $\varepsilon_3$  fonction linéaire du temps (stade secondaire),  $\varepsilon_4$  fonction du temps de type  $\lambda t^y$ , avec  $y > 1$  (stade tertiaire). Cette expression permet de décrire une courbe de fluage à une température et une contrainte données. Pour chacune des fonctions  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  et  $\varepsilon_4$ , il existe un très grand nombre d'équations différentes. Les fonctions  $\varepsilon$  qui décrivent le mieux les courbes de fluage sont la somme d'une fonction puissance avec une fonction linéaire et une fonction logarithmique. Il faut garder à l'esprit que bien souvent ces fonctions ne sont valables que dans un intervalle de contrainte et de températures données. L'expression la plus courante est la loi d'Andrade [24]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \lg(1 + k t) \quad (\text{II.18})$$

Ou encore, pour la vitesse de déformation :

$$\dot{\epsilon} = \beta / (3(1+\beta t^{1/3})^{2/3}) + k \quad (\text{II.19})$$

Où  $k$  et  $\beta$  sont des paramètres ajustables.

### **II.6.8. Variation de la vitesse de déformation ( $\dot{\epsilon}$ ) avec la température:**

La vitesse de déformation ( $\dot{\epsilon}$ ) augmente avec la température : elle est thermiquement activée. ( $\dot{\epsilon}$ ) suit une loi de type Arrhenius [24]:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_d \exp(-Q/RT)$$

Avec  $\dot{\epsilon}_d$  vitesse de déformation pendant le fluage secondaire.

$Q$  (J.mol<sup>-1</sup>) énergie d'activation.

$R$  constante molaire des gaz (8.314 J · mol<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>).

$T$  (K) température.

$n$  (s<sup>-1</sup>) Paramètre de dimensionnement.

La figure II.21 présente une courbe d'Arrhenius et qui permet de déterminer l'énergie d'activation  $Q$ .

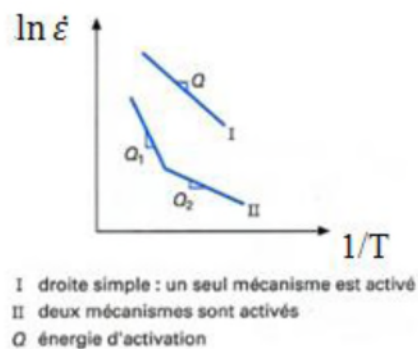


Figure II. 21 : Courbe d'Arrhenius [24].

On remarque que cette expression est indépendante de la contrainte. À partir de cette équation, il est possible d'exprimer déformation ( $\epsilon$ ) en fonction du temps et de la température par intégration [36].

### **II.6.9.exemple d'un appareil d'essai de fluage:**

Diha [30], a réalisé une machine de fluage (Fig. II.22) pour les fils de cuivre et d'aluminium [30]

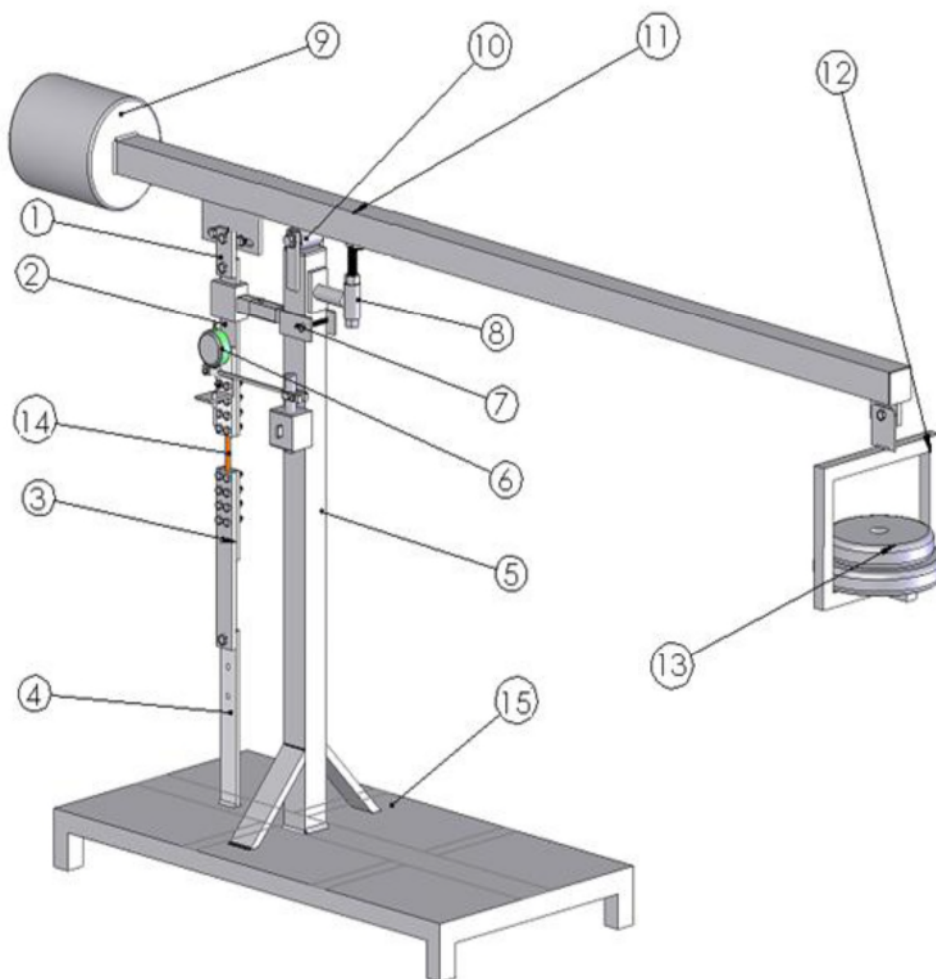


Figure II.22 : Les constituants de machine de fluage [30].

Les constituants de la machine sont :

- 1- Bielle.
- 2- Mors mobile.
- 3 -Mors fixe

- 4- Porte mors fixe.
- 5 -Support.
- 6- Compateur
- 7 -Système de guidage.
- 8 -Buté.
- 9 -Contre poids.
- 10- Articulation.
- 11 -Bras de levier.
- 12- Porte La charges (masses).
- 13- Mass
- 14 -Eprouvette
- 15-Bâti.



Figure II.23 : Machine de fluage complète [30]



# **Chapitre III**

## **Description de l'appareil réalisé**

### **III.1. Description de la machine de fluage:**

En général, les essais de fluage sont réalisés sur des machines à charge constante utilisant la force de pesanteur : une masse est fixée à l'éprouvette ou, bien souvent, pour les essais de longue durée, un système d'amplification de la charge à bras de levier est utilisé. Notre dispositif de fluage est composé d'un bâti et d'un bras de levier relié à une chaîne relié à un mors mobile sur lequel l'éprouvette est fixée dans le mors fixe et d'un four électrique et thermorégulateur (fig. III.1). La machine de fluage que nous avons réalisé est d'une capacité de 268.51 N à levier à force constante. La force est imposée par un ensemble de masses calibrées via un levier qui permet d'appliquer une multiplication de l'effort d'un facteur 10.83. L'allongement de l'éprouvette est mesuré par un système d'acquisition lié à un ordinateur.



Figure III.1a : Schéma d'une machine de fluage

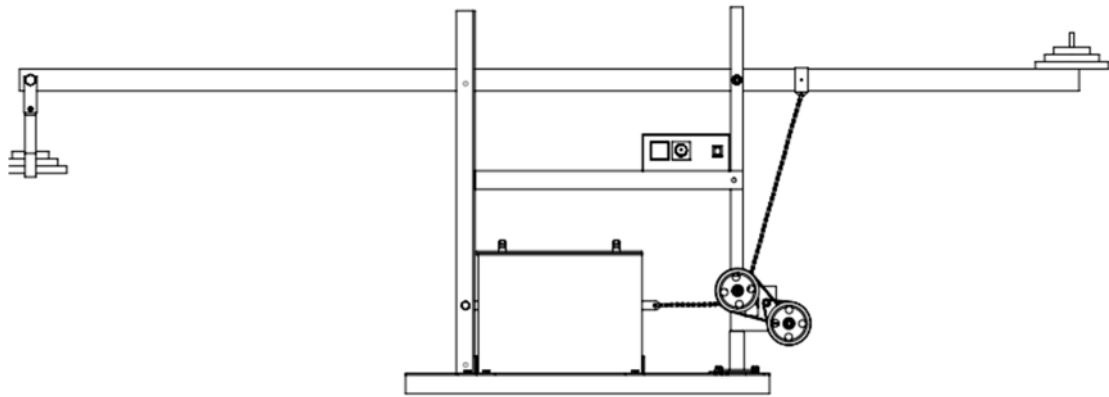


Figure III.1b : Schéma d'une machine de fluage

### **III.2 Conception de la machine:**

Notre but consiste à réaliser une machine de fluage qui servira comme un support d'équipement pour le laboratoire de recherche des sciences des matériaux. Pour la réalisation de cette machine nous avons procédé tout d'abord à l'établissement de : - Schéma de principe de l'ensemble. - Dessin de définition de chaque pièce. - Dessin d'ensemble de la machine. - Dessin d'ensemble du four électrique. Ensuite nous avons choisi un matériau convenable pour chaque élément de la machine suivi d'un calcul de résistance aux différentes sollicitations qui lui sont appliquées. Finalement nous avons procédé à l'usinage des différentes pièces et ensuite le montage de l'ensemble. Les constituants de la machine sont :

- Bâti.
- Bras de levier.
- Mors mobile.
- Mors fixe.
- Système de guidage.
- La chaîne.
- Axe et pignon.
- Porte La charges.
- Four électrique.
- Thermorégulateur.

**III.2.1. Bâti:**

Le bâti se compose de deux parties, à savoir la base et le support (Fig. III.2).

**III.2.1.1. La base:**

La base de la machine de fluage qui est composé de cinq pièces essentielle en acier et qui seront présentées successivement:

**Les pièces 1 et 2:** composent le levier. Il a une longueur de 1000 mm et une section carrée de distance  $50 \times 50$  mm et une épaisseur de 5 mm. Les deux pièces fabriquées en acier, et forment la base de l'appareil.

**Les Pièces 3 et 4,** des cornières en acier, de longueur 500 mm et de section  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  et une épaisseur de 5 mm. Les pièces 3 et 4, sont montées sur les pièces 1 et 2.

**La pièce 5 :** est une cornière en acier, de longueur 500 mm et de section  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ , La pièce 5 est montée sur les pièces 1 et 2.

**III.2.1.2 Le support:**

Le support de l'appareil de fluage est composé de six pièces essentielles en acier (Fig. III.2a et 2b).

**Les pièces 1 et 2 :** de longueur 1000 mm et de section carré  $50 \times 50$  mm fixées verticalement sur la base, La fonction des pièces 1 et 2 est de porter le bras de levier.

**Les pièces 3 et 4 :** fabriquées en cornières de longueur 1000 mm et de section carrée  $50 \times 50$  mm fixées verticalement sur la pièce 5. Les pièces 3 et 4 ont deux rôles :

- Porteur du bras de lever, en mouvement et au repos.
- Guidage du bras de lever en mouvement.

**Les pièces 5 et 6 :** aussi fabriquées de deux cornières de longueur 736.5 mm et de section de  $30 \times 30$  mm et fixé horizontalement sur et entre 1,2 et 3,4 fonction de les pièces 5 et 6 rigidité de l'appareil et portage du thermocouple.

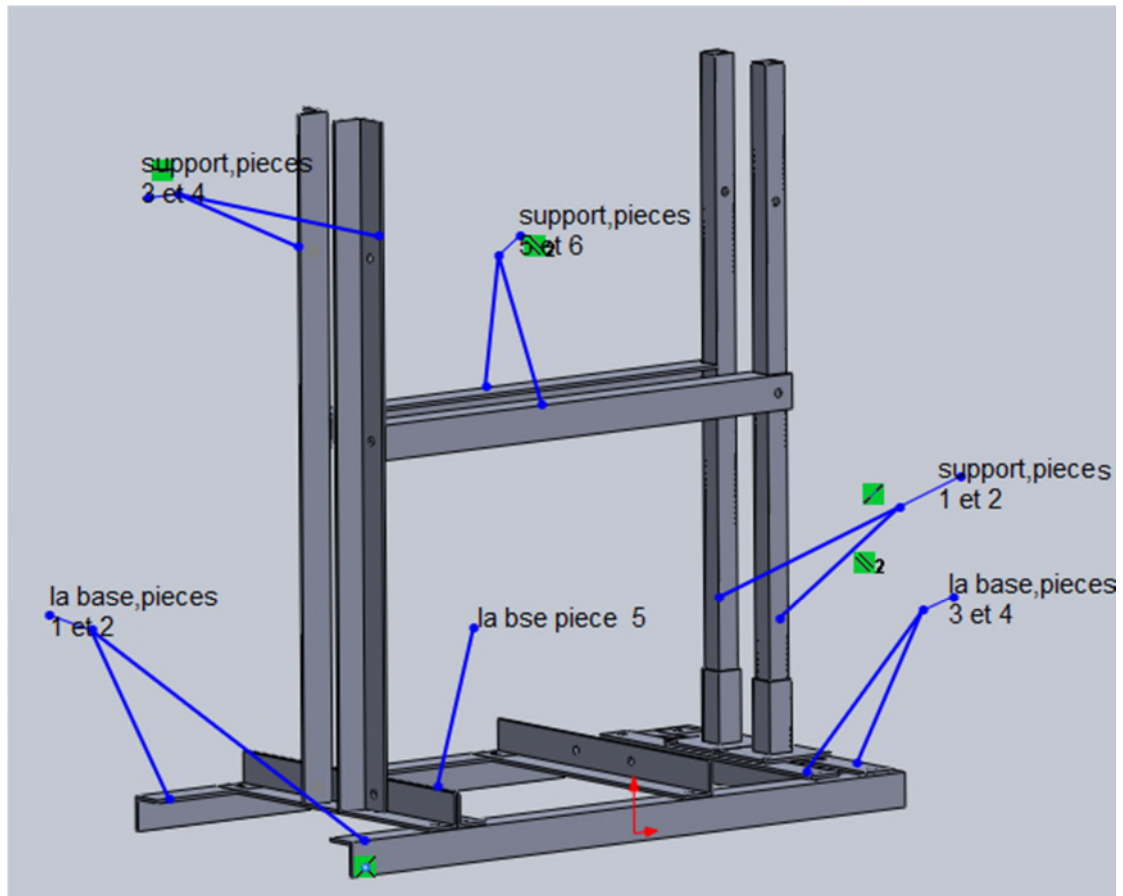


Figure III.2a : Dessin d'ensemble du bâti

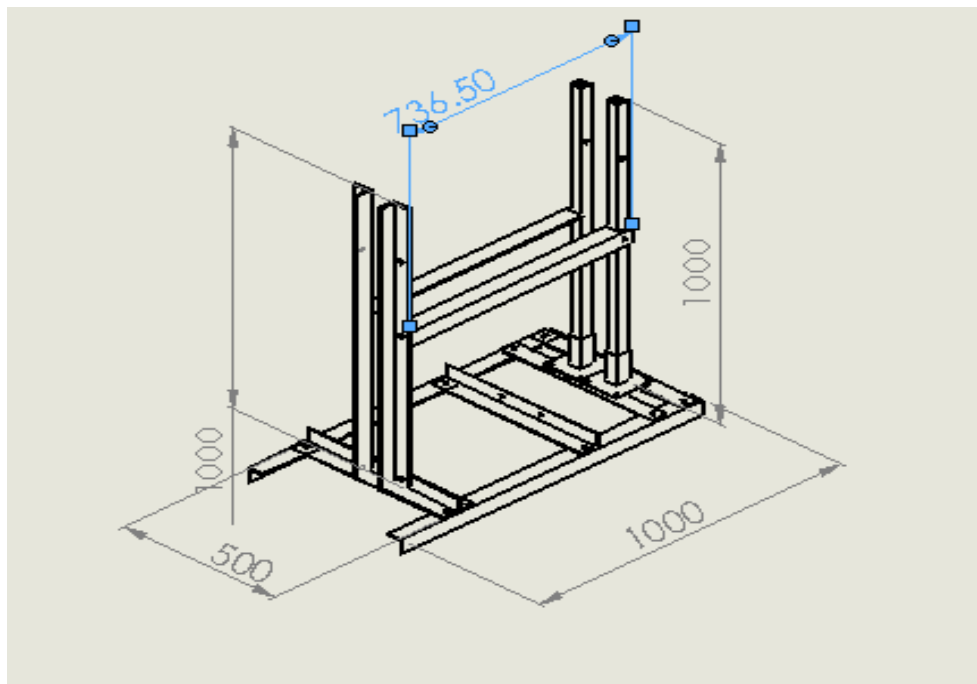


Figure III.2b : Dessin d'ensemble du bâti

### **III.2.2 Bras de levier:**

C'est un élément important dans le dispositif, fabriqué en acier, de longueur 2910 mm et de section rectangulaire de 60x30 mm. L'intérêt du bras de levier (Fig. III.3) est de multiplier l'effort (force) appliqué sur l'éprouvette pendant l'essai de fluage.

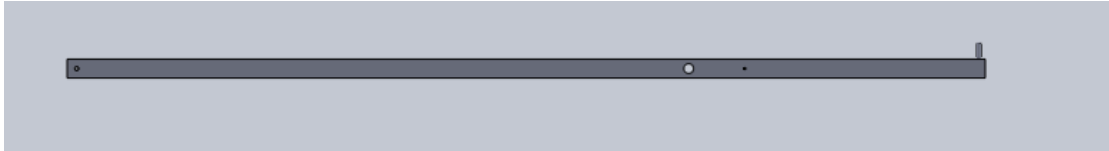


Figure III.3a : dessin du bras de levier

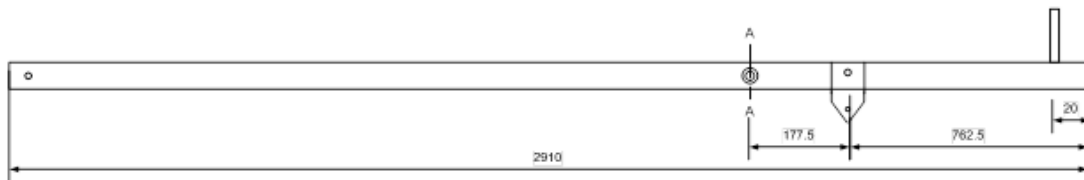


Figure III.3b : Dessin de définition de bras de levier

### **III.2.3. Mors mobile et mors fixe:**

Les deux mors représentant les éléments les plus importants dans le dispositif. Ils sont en acier (fig. III.4), la fonction des mors est la fixation de l'éprouvette. Ils sont composés de deux pièces (une mâchoire et un bras) (fig. III.5a et fig. 5b).

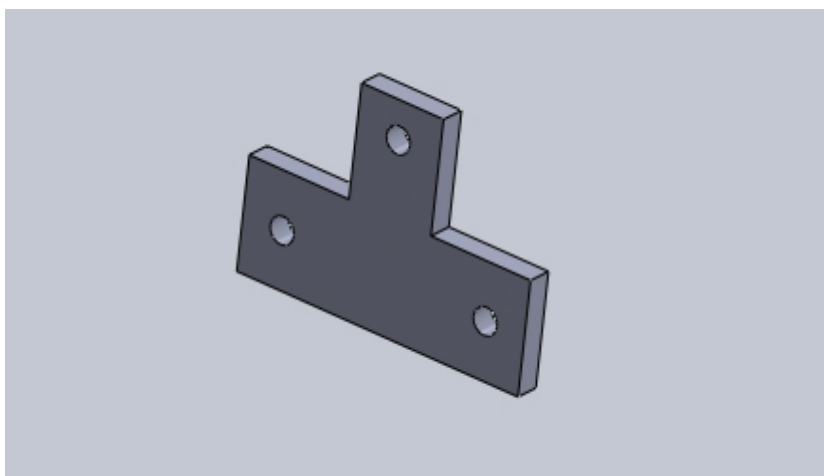


Figure III.4a: dessin de la mâchoire d'acier.

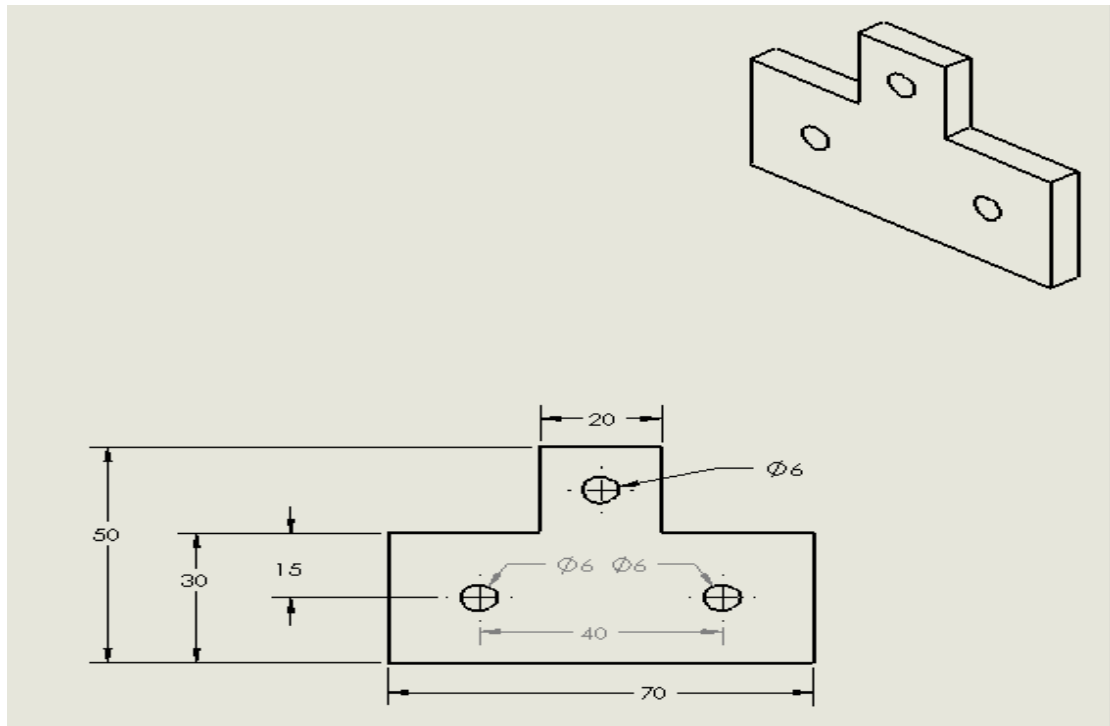


Figure III.4b: dessin de la mâchoire

\*Dessin du deux bras (mobile et fixe)

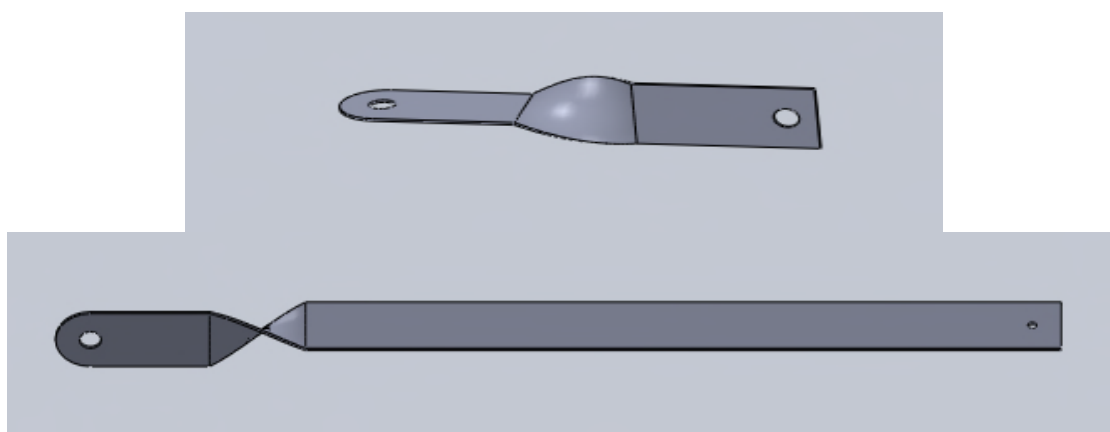


Figure III.5a: dessin du bras mobile (long) et bras fixe.

\*dessin du mors mobile

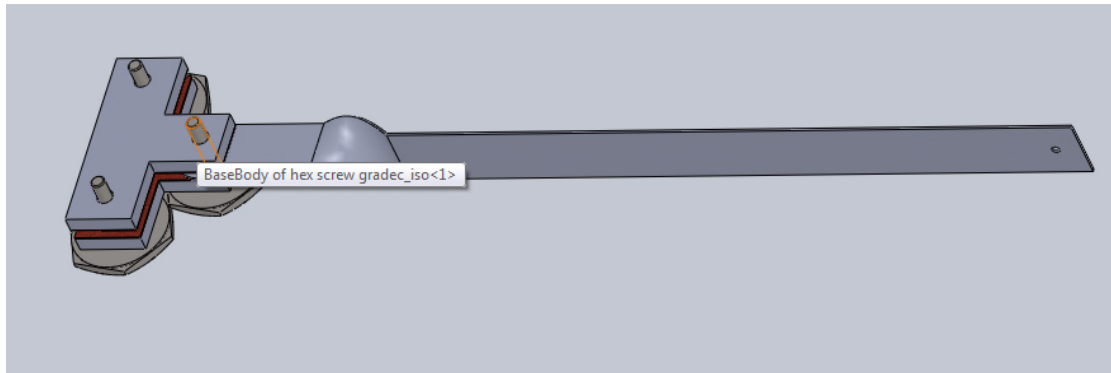


Figure III.5b: dessin du mors mobile

### **III.2.4 Axe et pignon:**

. La fonction de cet axe et la transmission (Fig. III.6), et de provoquer le mouvement rotatif du système d'acquisition.

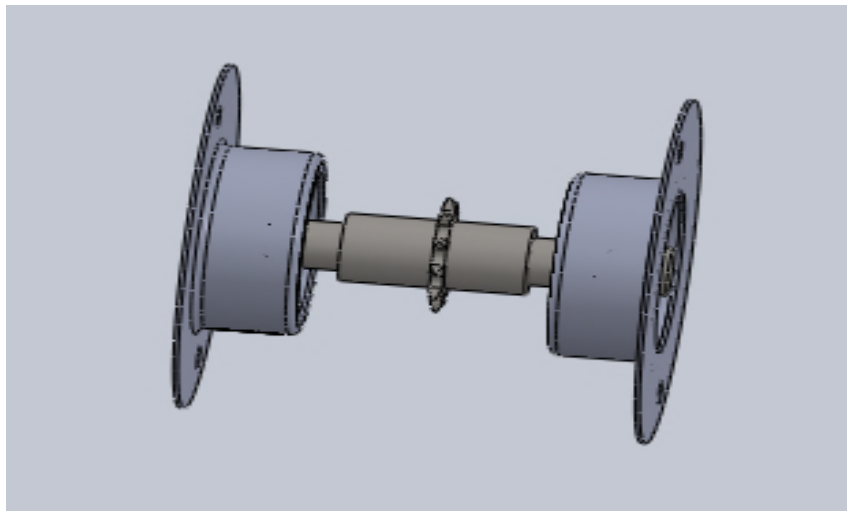


Figure III.6 :dessin de l'axe de transmission

#### **III.2.4.1. Axe et pignon**

\*L'axe est Fabriqué en acier et usiné sur la machine de tour parallèle



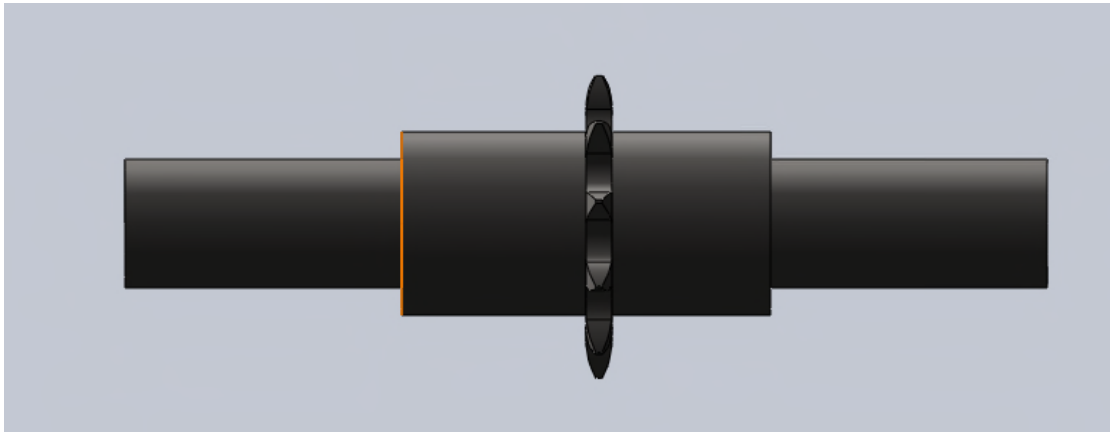


Figure III.6a : Dessin de définition d'axe de transmission

\* Le Pignon (Fig. III.6b) est fixé sur l'axe pour engrainer avec la chaîne de traction pour transformer le mouvement de translation de l'éprouvette en mouvement de rotation.

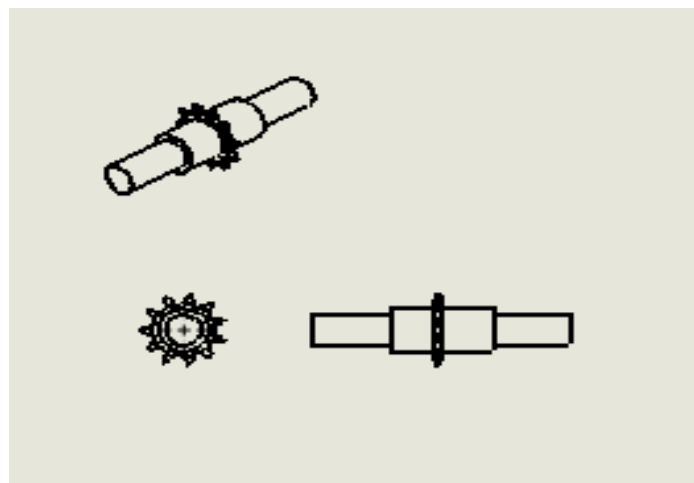


Figure III.6b : Dessin de définition du Pignon

#### **III.2.4.2. Couvercle de roulement:**

Couvercle (Fig. III.6c) en acier, réalisé sur le tour parallèle, pour une bonne localisation de roulement.

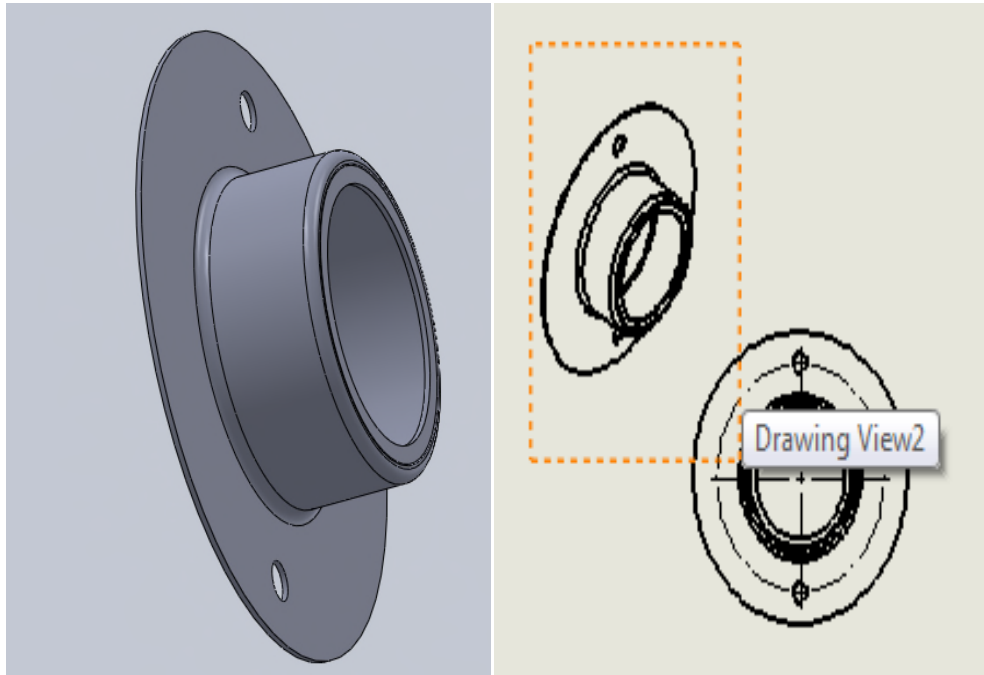


Figure III.6c : Dessin de définition de couvercle

### III.2.4.3. Roulement:

Le roulement (Fig. III.6d) est un type BC (roulement a une rangée de billes, a contact radial) et qui résiste forces radiales.

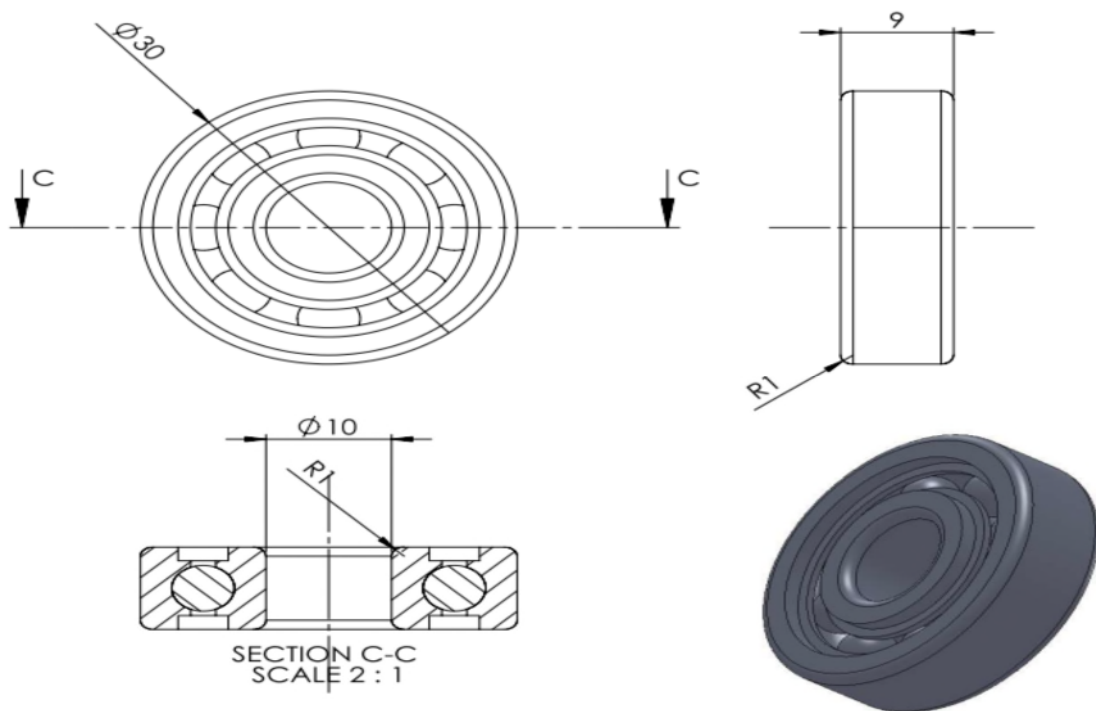


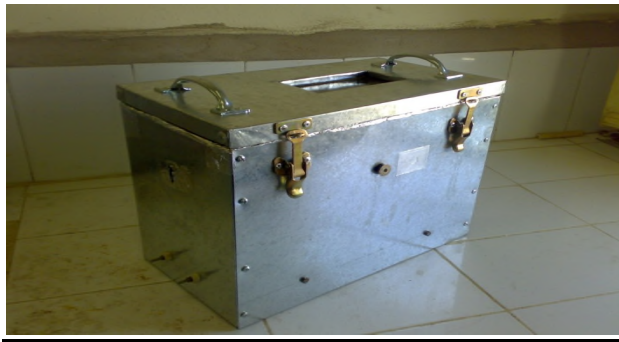
Figure III.6d : Dessin de définition de roulement

### **III.2.5. Four électrique:**

Pour effectuer des essais de fluage à chaud nous avons un four électrique qui se compose de :

- Une résistance électrique de puissance 2500 W.
- Thermorégulateur pour contrôler la température effectuée avec une gamme de 0°C à 1000°C, un thermocouple placé plus proche de l'échantillon, l'erreur de la stabilité thermique du four est environ  $\pm 3^\circ\text{C}$ .fig III.10. (a,b,c).

La figure (III.7.E) représente tous les composants de four.



a



b

**Figure III.7 :** four électrique (a : vue de l'extérieure. b : vue de l'intérieure)

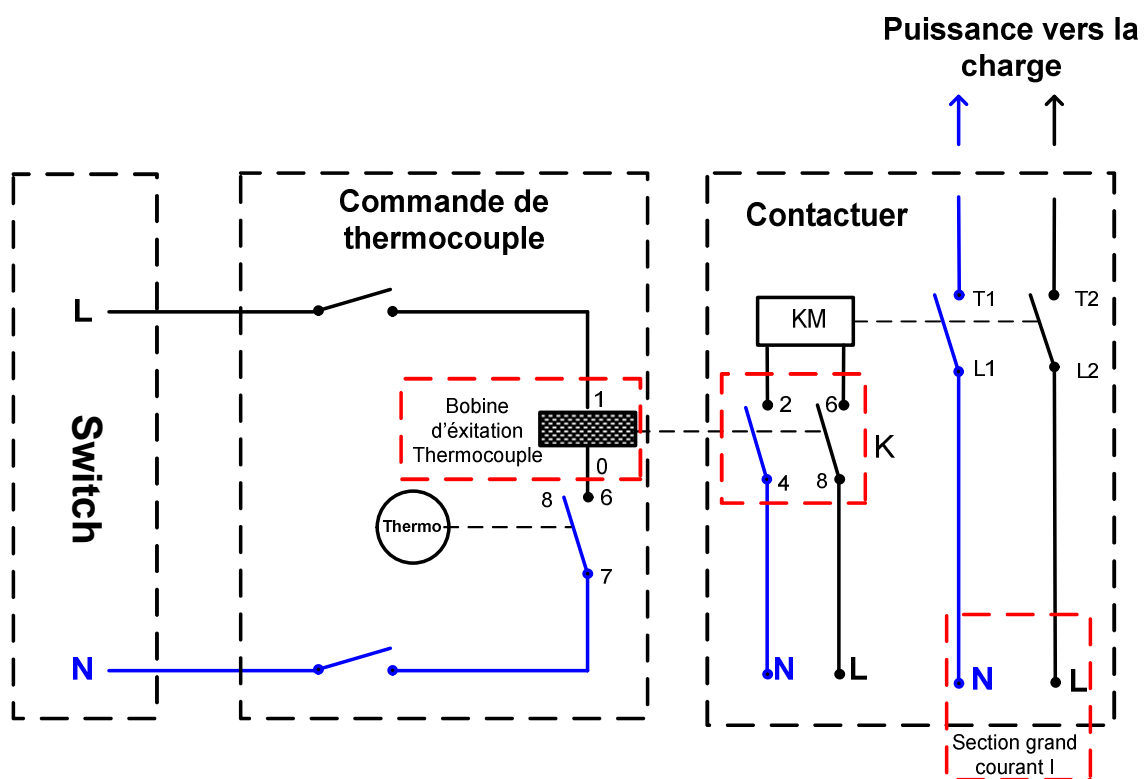


c

**Figure III.7.c :** Le thermorégulateur

- **Thermorégulateur :**

Le thermocouple est comme une sorte de capteur de température utilisé en un point spécifique pour mesurer la température sous la forme de la force électromotrice "FEM" ou d'un courant électrique, ce capteur comprend deux fils métallique dissemblable qui sort connectes ensemble à une Junction, la température peut être mesurée a cette Junction le changement de température du fils métallique stimule les tensions.



**Figure 7.d :** schéma d'un circuit électrique "thermocouple"

**\* Le principe de fonctionnement du schéma**

Au départ, vous devez courir du « Switch » pour l'alimentation 220 V vers le « thermocouple » pour alimenter la bobine d'excitation , le thermocouple la changement de la température par le capteur commander le fermeture et l'ouverture de (8.7.6) et d'abord exciter la bobine pour fermer « K » et tant que le fermeture de « k » la bobine

de contacteur « KM » a été excité pour fermer «(L<sub>1</sub> .L<sub>2</sub>.) à « k » à borne (T<sub>1</sub>.T<sub>2</sub>) pour alimenter la charge « puissance »

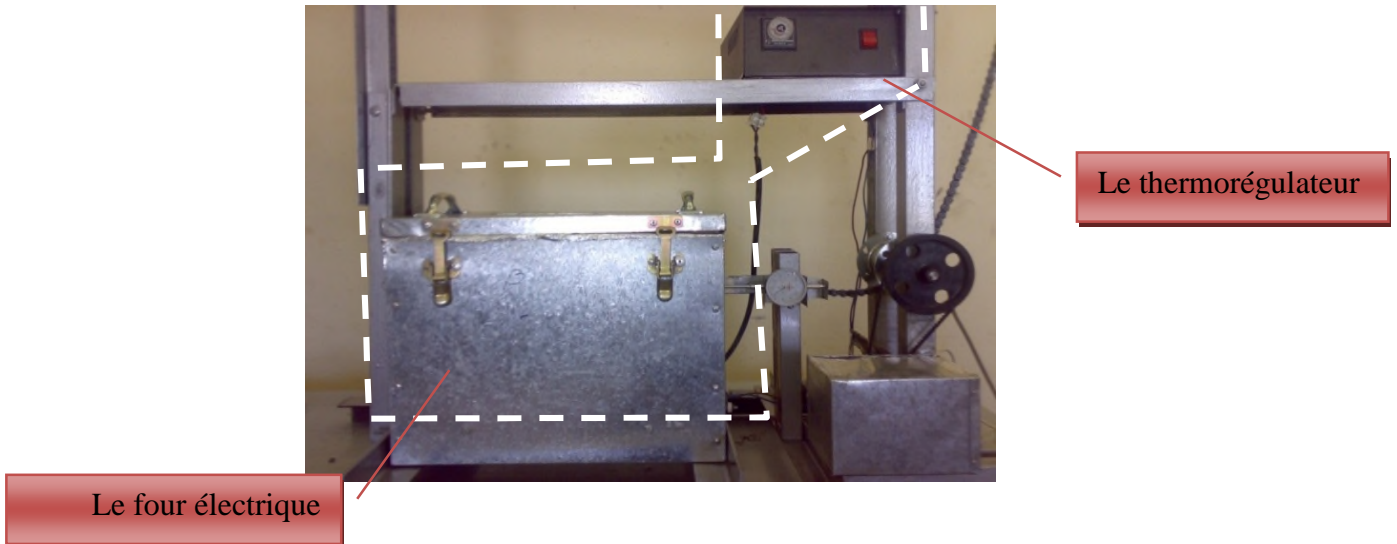
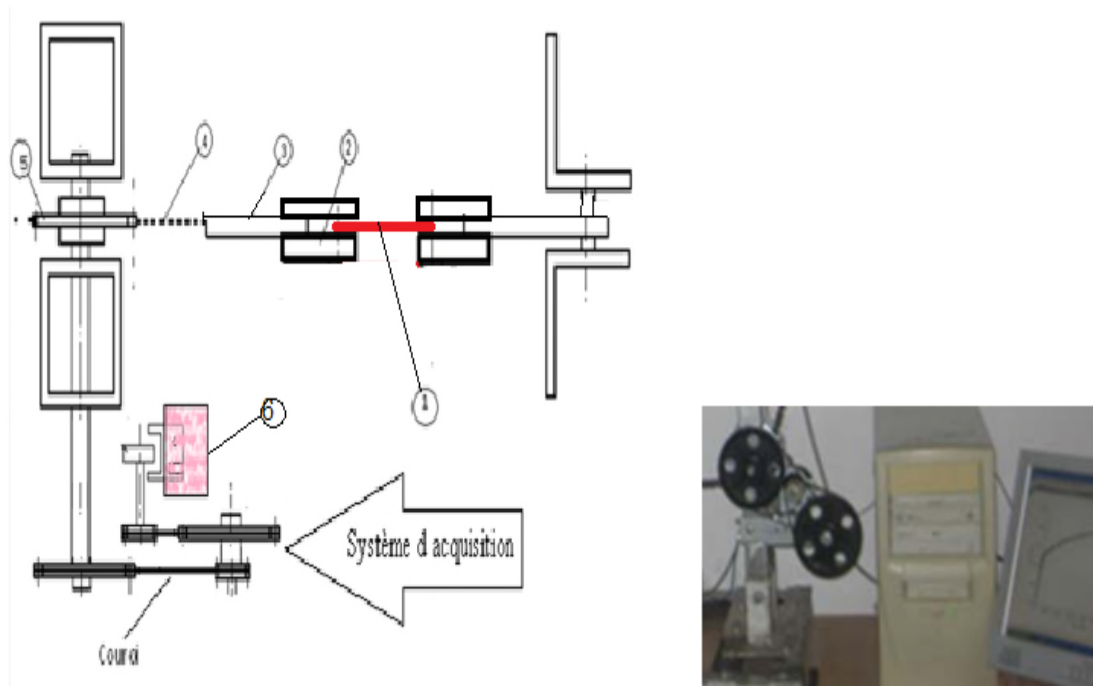


Figure III.7.E : Le four complet et le thermostat.

### III.2.6. Système d'acquisition:

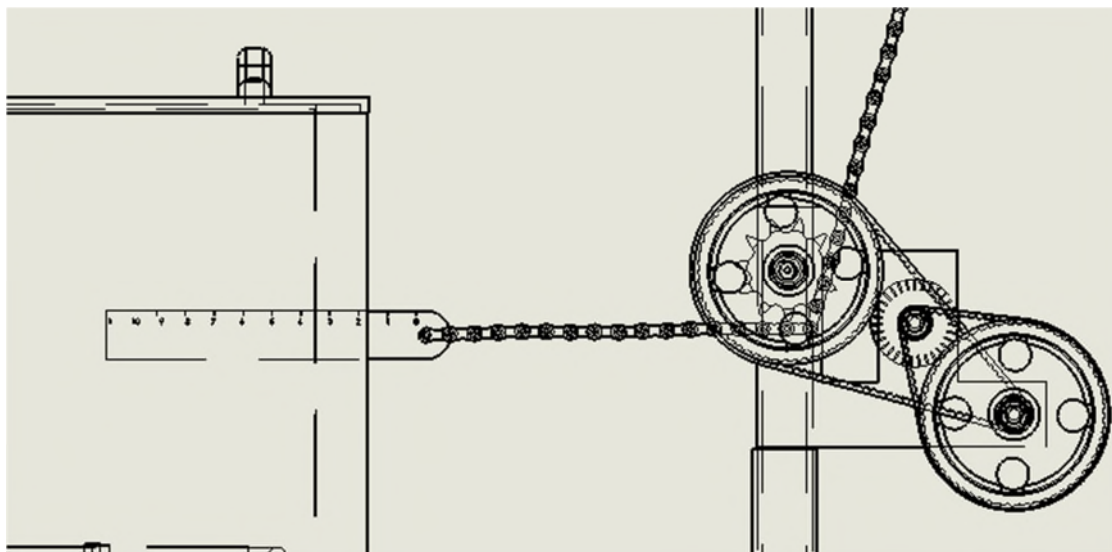
La figure III.8 : montre la situation du système d'acquisition, où son principe est le suivant:

La déformation de l'échantillon  $\Delta l$  entraîne le déplacement du mors mobile, puis le mouvement de la chaîne (4) d'amplitude  $\Delta l$ , ensuite la rotation du pignon (5) de  $\alpha = \Delta l / r$ , cette rotation sera amplifiée par un jeu de pignons courroie (7) puis l'acquisition par la carte (6) et ensuite envoyé au PC pour enregistrer cette déformation en fonction du temps.



**Figure III.8a:** Situation du système d'acquisition (1- échantillon, 2-3- mors mobile, 4- chaîne, 5-pignon, 6-carte d'acquisition et 7-élevateur de vitesse).

Et pour connaître La précision de mesure de la déformation en (mm), en à remplacé la règle a la position de l'éprouvette (fig. III.8b)



**Figure III.8b:** étalonnage du système d'acquisition par la règle.

Et après plusieurs essais on a trouvé sur les tableaux (III.1 et III.2) la distance au nombre des fentes, Et on a transformé la déformation (mm), alors la précision c'est **0.025 mm.**

**\* tableaux III.1 pour 50 mm:**

	second	Fente	60/Fente
1	38	1713	0.02918856
2	39	1873	0.02669514
3	50	1862	0.02685285
4	46	1908	0.02620545
5	51	1980	0.02525253
			<b>0.0268389</b>

**\* tableaux III.2 pour 60 mm:**

	second	Fente	60/Fente
1	32	2372	0.02529511
2	40	2607	0.02301491
3	58	2281	0.02542744
4	45	2351	0.02550101
			<b>0.02481193</b>

\* Et pour confirmer la précision on fait un deuxième essai par un pied à coulisse digital (figure III.8.c.) ; et où nous avons trouvé le résultat sur (le tableau III.3).



**Figure III.8c:** étalonnage du système d'acquisition par pied à coulisse

**\*Tableau III.3:**

<b>pied à coulisse</b>	20.52	20.36	20.9	30.25	30.20	30.17	40.43	50.53	60.56
<b>le program</b>	21.45	21.5	21.3	30.12	30.35	29.37	40.35	50.6	60.57



### **III.2.7. Etalonnage de l'appareil:**

Pour trouver la relation entre la charge  $Q$  appliquée à l'extrémité du bras de levier et l'effort  $N$  sous lequel est soumis l'échantillon, on a remplacé l'échantillon par un dynamomètre (Fig. III.9), puis on a fait une série de test.



**Figure III.9a :** Montage d'étalonnage de l'appareil

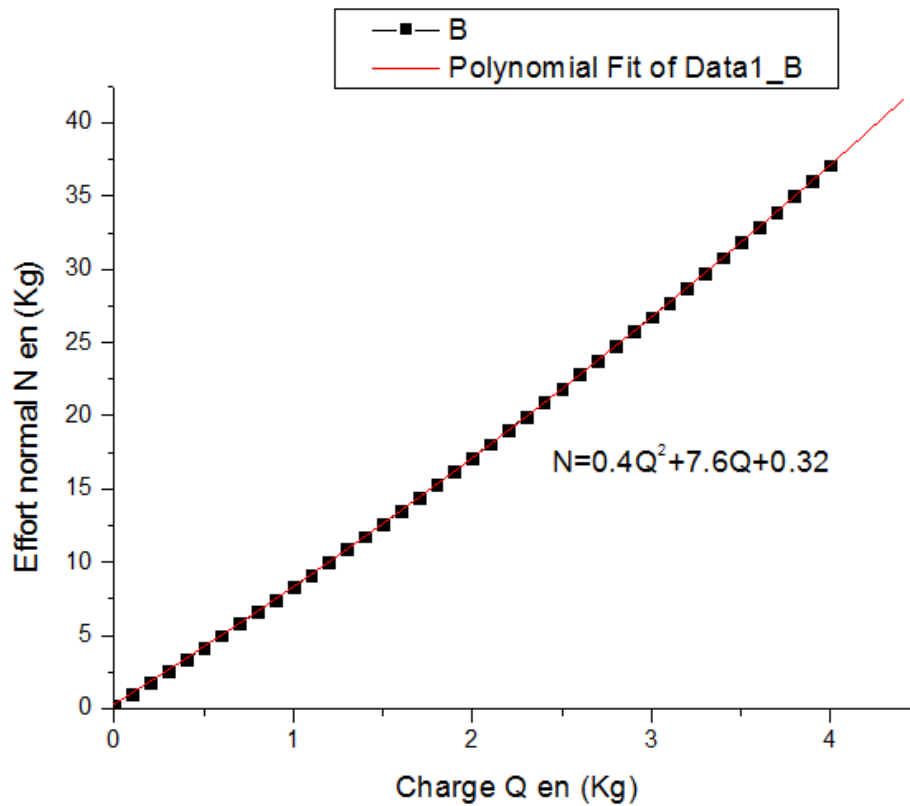
Quand on à changé la charge Q on à enregistré la force (N) qui indiqué sur le dynamomètre pour deux fois voir (le tableau III.4).

Q(g)	N1(kg)	N2(kg)	Le moyen de N (kg)
0	0.29	0.3	0.295
100	0.93	0.73	0.83
200	1.97	1.68	1.825
300	3.04	3.13	3.085
400	3.41	3.24	3.325
500	4	3.95	3.975
600	4.77	4.81	4.79
700	5.47	5.56	5.515
800	6.45	6.51	6.48
900	7.35	7.6	7.475
1000	8.05	7.9	7.975
1100	9.07	9.51	9.29
1200	9.89	10.27	10.08
1300	10.56	11.5	11.03
1400	12.50	12.56	12.53
1500	12.85	12.6	12.725
1600	13.40	13.34	13.37
1700	14.38	14.47	14.425
1800	15.42	15.67	15.545
1900	16.50	16.9	16.7
2000	17.21	17.35	17.28
2100	18.63	17.6	18.115
2200	19.80	19.9	19.85
2300	20.25	20.07	20.16
2400	21.15	21.33	21.24
2500	22.56	21.95	22.255
2600	23.15	23.48	23.315
2700	23.96	23.65	23.805
2800	24.45	24.85	24.65
2900	25.47	25.58	25.525
3000	26.28	26.98	26.63
3100	27.47	27.67	27.57
3200	28.80	28.81	28.805
3300	29.66	30.03	29.845
3400	30.05	31.05	30.55
3500	31.43	31.59	31.51
3600	32.35	32.61	32.48
3700	33.79	33.83	33.81
3800	35.02	35.61	35.315
3900	36.42	35.98	36.2
4000	37.15	38.7	37.925

Le tableau III.4

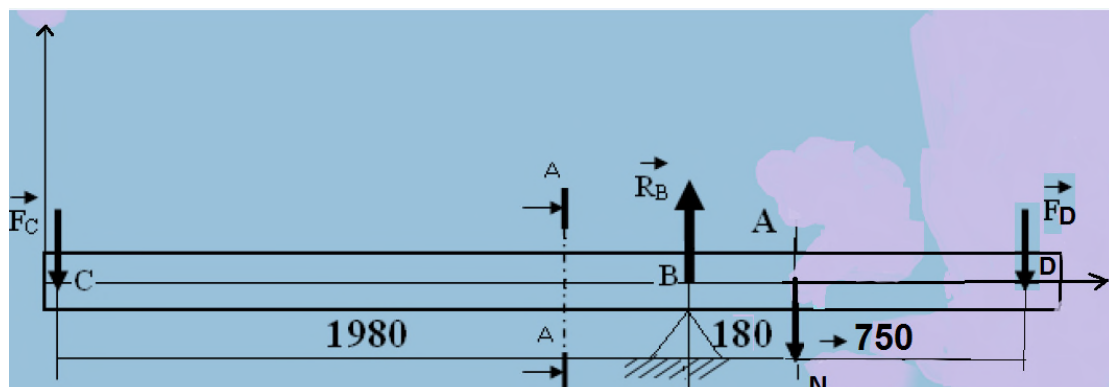
On transformer le tableau a une courbe (Figure III.9b) ont abouti à la relation suivante:

$$N = 0.4Q^2 + 7.6Q + 0.32$$

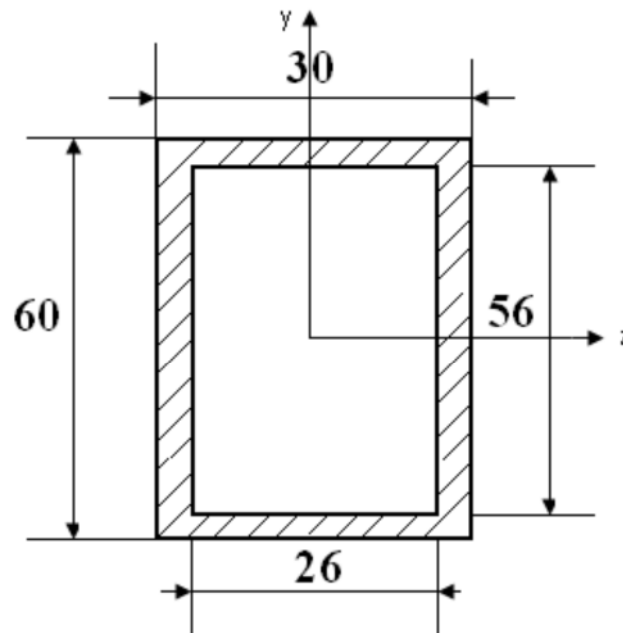


**Figure III.9b:** Courbe d'étalonnage (effort sur l'échantillon N en fonction de la charge Q)

### III.3 Etude de la résistance:



**Figure III.10 :** Schéma représentatif des forces appliquées sur le bras de levier



Section A-A

**Calcul des efforts appliqués:**

$$\sigma = N/S$$

N: effort appliquée sur l'échantillon

$\sigma$  = contrainte appliquée a l'échantillon

S: section d'échantillon

$$N = \sigma S$$

$$S = 40\text{mm} (10 \times 4)$$

$$\sigma = 30\text{Mpa}$$

$$\mathbf{AN:} \quad N = 1200\text{N}$$

$$FC = 18.43\text{N} \quad \text{selon l'équation } N = 0.4Q^2 + 7.6Q + 0.32$$

$$FD = 13\text{N}$$

**Calcul de RB:**

$$\Sigma F_{\text{ext}} = 0 \text{ ----- (1).}$$

$$\Sigma M_{f \text{ ext}/B} = 0 \text{ ----- (2).}$$

De (1), nous pouvons écrire

$$TAX + FC - RB + FD = 0$$

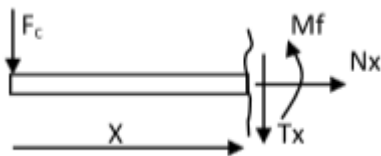
Par projection des forces sur l'axe y on aura

$$RB = TAX + ET FC + FD \text{ -----(3).}$$

donc de (3) on trouve  $R_B = 1231 \text{ N}$

### Effort tranchant et Moment fléchissant:

\*Etudions la zone I :  $1980 \geq X \geq 0$



$$T = -FC = -18.43 \text{ N}$$

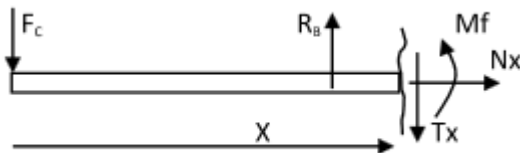
$$M_{fl} + FCX = 0$$

$$\text{Donc } M_{fl} = -FC * X$$

si  $X = 0$  donc  $M_{fl} = 0$ , si  $X = 1980$

$$M_{fl} = -36491.4 \text{ N.mm}$$

\* Etudions la zone II:  $2160 \geq X \geq 1980$



$$T = RB - FC = 1212.57 \text{ N}$$

$$M_{fl} + FC * X - RB(X - 1980) = 0$$

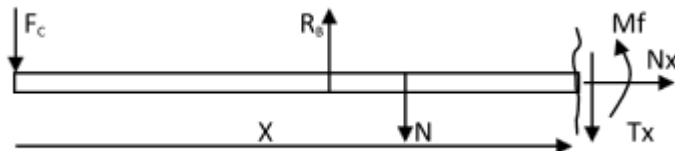
$$M_{fl} = RB(X - 1980) - FC * X$$

$$= (RB- FC) X- 1980 RB$$

si  $X = 1980$  donc  $Mfl = - 36491.4 \text{ N.mm}$

si  $X = 2160$  donc  $Mfl = - 1657648.8 \text{ N.mm}$

\* Etudions la zone III:  $2910 \geq X \geq 2160$

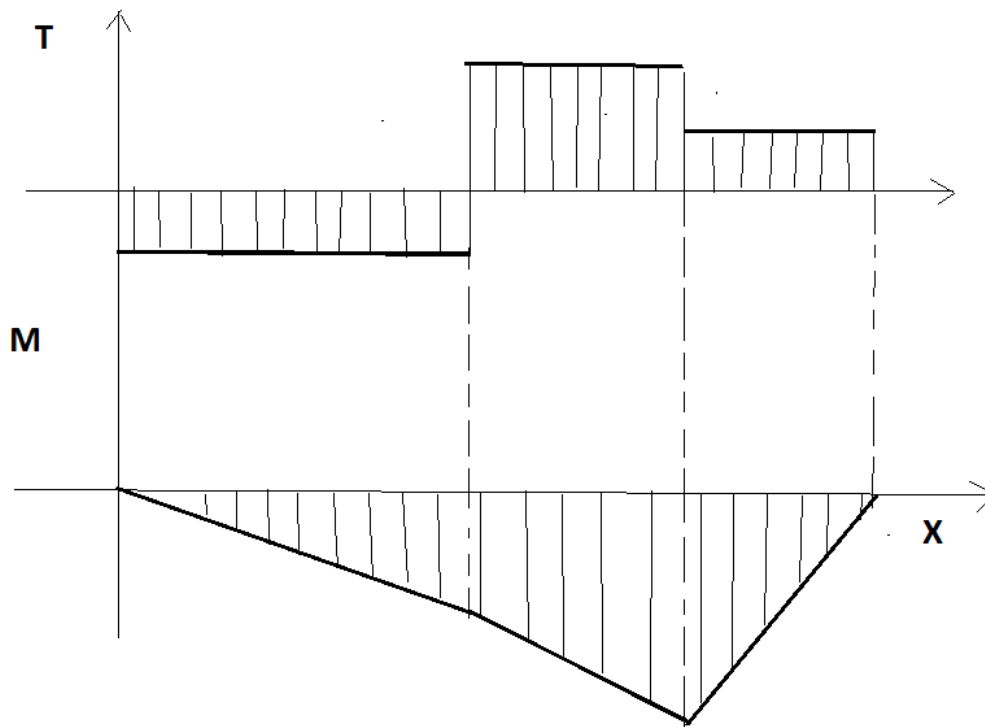


$$T=RB- FC- N= 12.57 \text{ N}$$

$$Mfl = - FC * X + RB ( X - 1980 ) - N ( X - 2160 )$$

si  $X = 2160$  donc  $Mfl = 181771.2 \text{ N.mm}$

si  $X = 2910$  donc  $Mfl = 0 \text{ N.mm}$



**Figure III.11** : Diagramme d'effort tranchant et Diagramme de moment fléchissant

# **Chapitre IV**

## **Résultats**

### **Et Interprétation**

### **IV.1. Introduction:**

L'objectif de cette partie d'étude est tester notre appareil d'essai de fluage sur une éprouvette en matières composites.

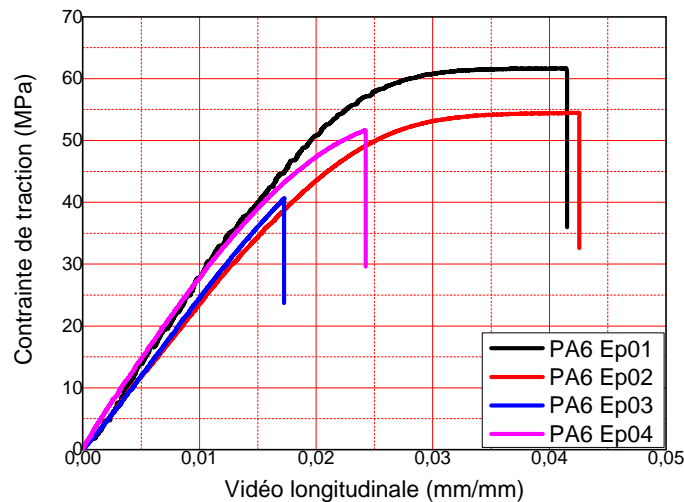
### **IV.2. Matériau étudié:**

Le matériau étudié dans ce mémoire c'est le matière composite; exactement sur deux éprouvettes :

- a. Le Polyamide (PA6) seul
- b. Mélange PA6+ verre recyclé (0.08 mm)

#### **IV.2. a. Le Polyamide (PA6) seul :**

la Figure. IV.1. les tests réalisés sur le PA6 seul. En gardant les mêmes conditions d'essai (température, humidité Relative, machine de traction,..). Les résultats sont regroupés sur le graphe de la Figure. IV.1



**Figure. IV.1 :** Courbes contrainte/déformation pour le PA6 seul. [31]

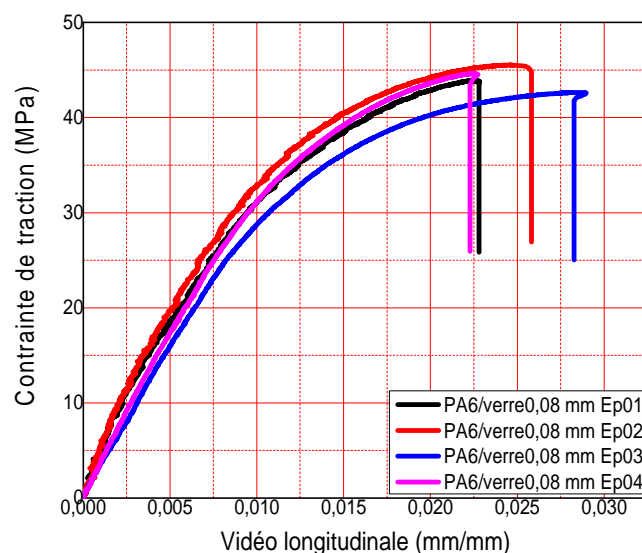


	Ep01	Ep02	Ep03	Ep04	Moyenne
<b>Module de Young calculé</b>	1781,400	2205,800	2235,100	3239,800	2365,525
<b>Module de Young(Automatique)</b>	2 981,339	2 365,67	2 539,619	2 884,437	2692,766
<b>contrainte à la rupture</b>	-	-	40,70146	51,662	46,181
<b>déformation à la rupture</b>	0,04153	0,04260	0,01729	0,02426	0,03142

**Tableau IV.1:** Résultat caractéristiques mécaniques du mélange PA6 seul. [31]

#### IV.2.b. Mélange PA6+ verre recyclé (0.08 mm):

Les courbes de la figure IV.2 montrent la réponse des éprouvettes des mélanges à base de 20% de fraction massique (particule de verre) avec diamètre 0.08 mm, les résultats obtenus montrent une différence entre les différentes caractéristiques calculées, ces écarts qu'on peut tolérer sont dus probablement au diamètre excessive de la particule incluse dans la résine et qui rend le matériau est plus durable et ne limite pas son domaine d'élasticité.



**Figure. IV.2:** Courbes contrainte/déformation pour le PA6+particule de verre 0,08mm. [31]

	Ep01	Ep02	Ep03	Ep04	Moyenne
<b>Module de Young calculé</b>	4911,300	4743,900	3350,100	3657,900	4165,8
<b>Module de Young(Automatique)</b>	3 910,061	4 008,300	3 154,929	3 554,243	3656.883
<b>contrainte à la rupture</b>	-	45,52123	-	51,662	48,591615
<b>déformation à la rupture</b>	0,02281	0,02565	0,02843	0,02241	0,024825

**Tableau IV.2:** Résultat caractéristiques mécaniques du mélange PA6 +verre recyclé 0.08 mm. [31]

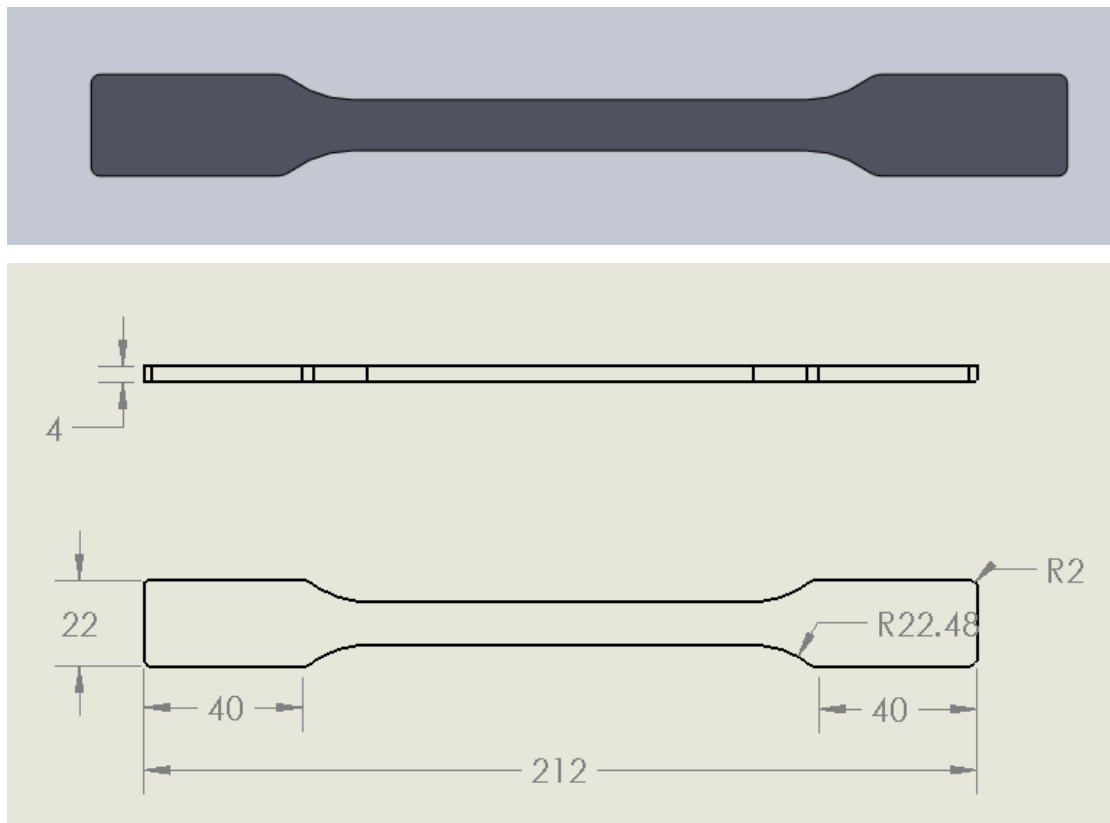
### IV.3.Eprouvettes forme et dimension:

L'échantillon que nous avons reçu c'est:

\*Le PA6+verre recyclé 0.08 mm

\* Le Polyamide (PA6) seul

est sont dimensions présenté sur la (figure.IV.1).



**Figure. IV.3:**dessin d'éprouvette.

#### **IV.4. Essais de fluage:**

L'essai de fluage permet d'évaluer les propriétés viscoélasticités du matériau. Ces essais ont été menés jusqu'à la rupture.

Dans cette partie d'étude nous présentons les courbes obtenues après les différents essais de fluage appliqués sur les éprouvettes de matières composites.

La courbe n'est pas terminée la troisième phase malgré que l'éprouvette passer a la rupture FIG IV.5, a cause d'un problème d'une roue qui bloquée le système d'acquisition pour registrèrent les résultats de la déformation.

**FIG IV.5:** photo présenté la rupture de l'éprouvette du Mélange PA6+ verre recyclé (0.08 mm) à charge de  $\sigma=9.2\text{Mpa}$  et  $T = 150\text{ }^\circ\text{C}$ .

#### **IV.4.2.Courbe de fluage du Polyamide (PA6) seul:**

Dans cette partie, notre objectif est de présenter l'effet de la contrainte sur le comportement d'un polyamide Pa6; les figures IV.6a, 6b et 6c présentent les courbes de fluage qui montrent la variation de la déformation en fonction du temps pour l'éprouvette soumis a une contrainte de  $\sigma =9.2\text{MPa}$  et différentes de températures (100 °C, 120 °C et 150 °C).

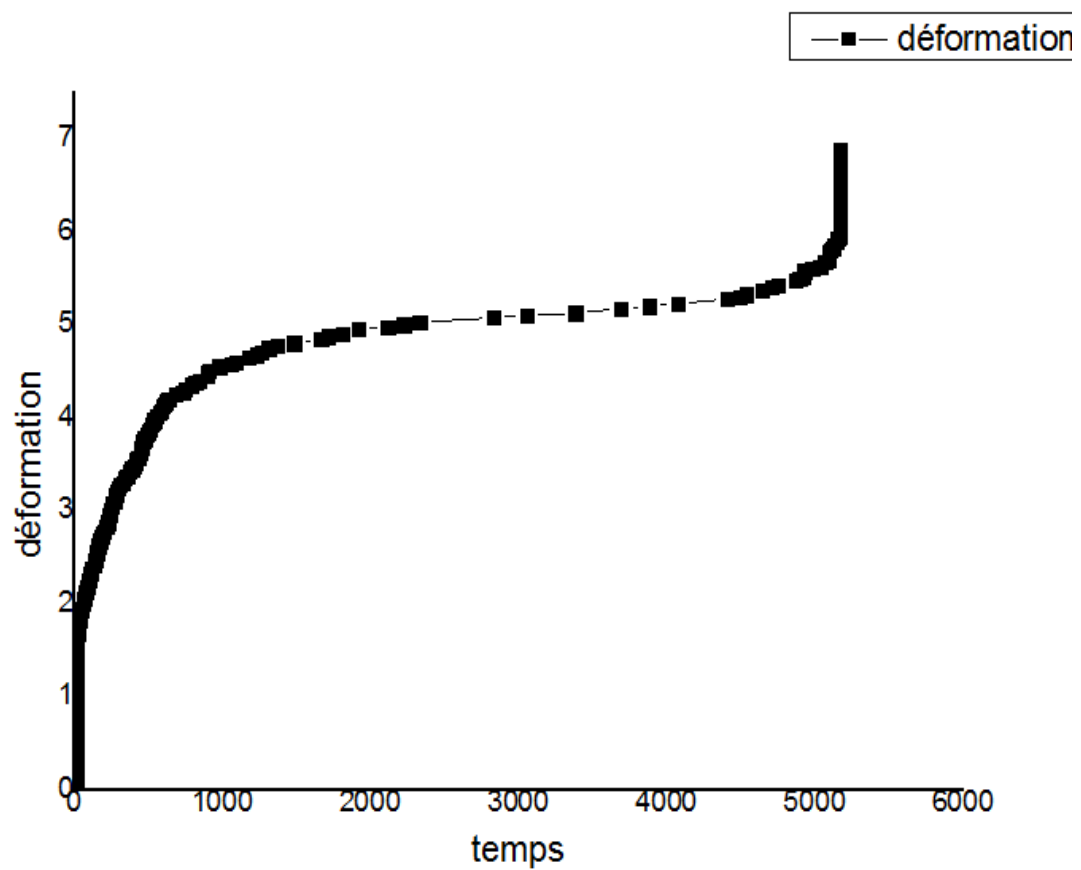
**1/** la figure IV6a : illustre la variation de la déformation en fonction du temps d'un polyamide Pa6 sous une contrainte  $\sigma=9.2\text{MPa}$  et une température  $T=150^\circ\text{C}$ .

On remarque que la courbe obtenue comporte les trois stades:

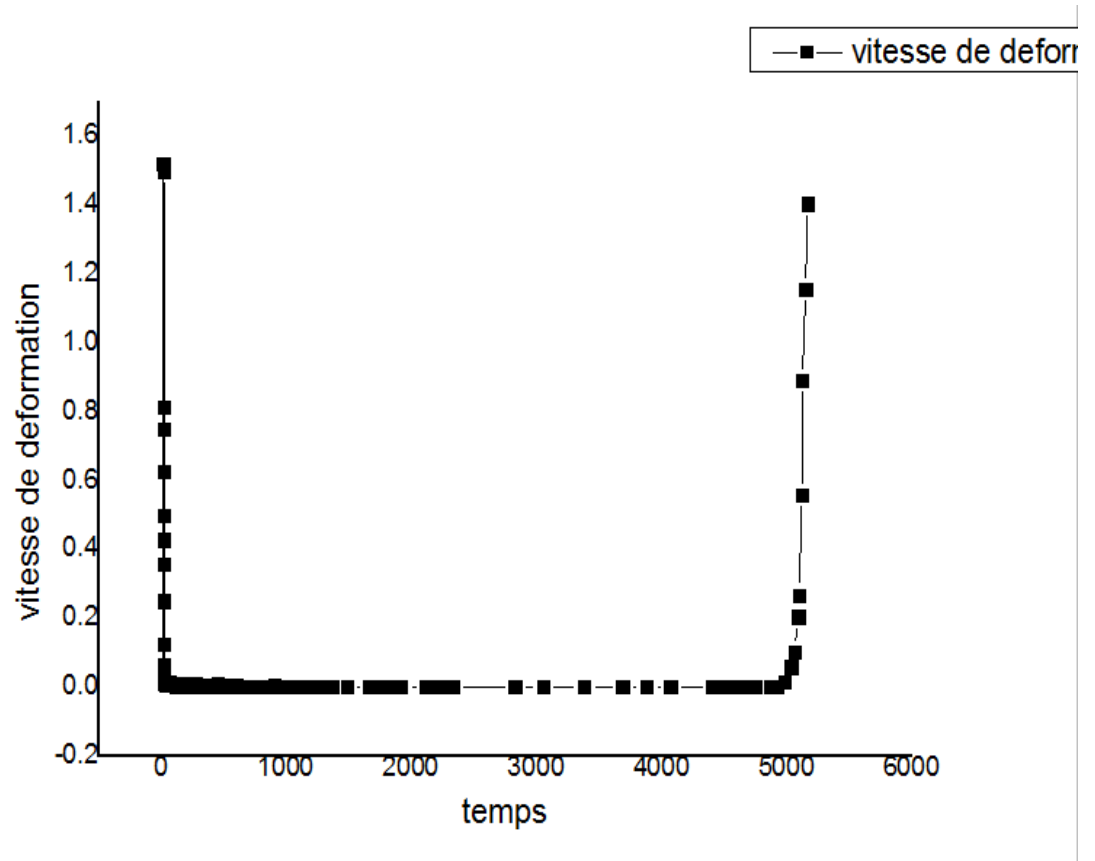
- Stade primaire ou transitoire caractérisé par une vitesse de fluage ( $\epsilon$ ) décroissante tandis que le matériau se durcit.
- Stade secondaire ou stationnaire caractérisé par une vitesse de déformation constante Ce qui rend la courbe linéaire.
- Stade tertiaire où la vitesse de fluage croit jusqu'à l'endommagement rapide.



**FIG IV.5:** photo présentée la rupture de l'éprouvette du Mélange PA6 à charge de  $\sigma=9.2\text{Mpa}$  et  $T = 150\text{ }^\circ\text{C}$ .

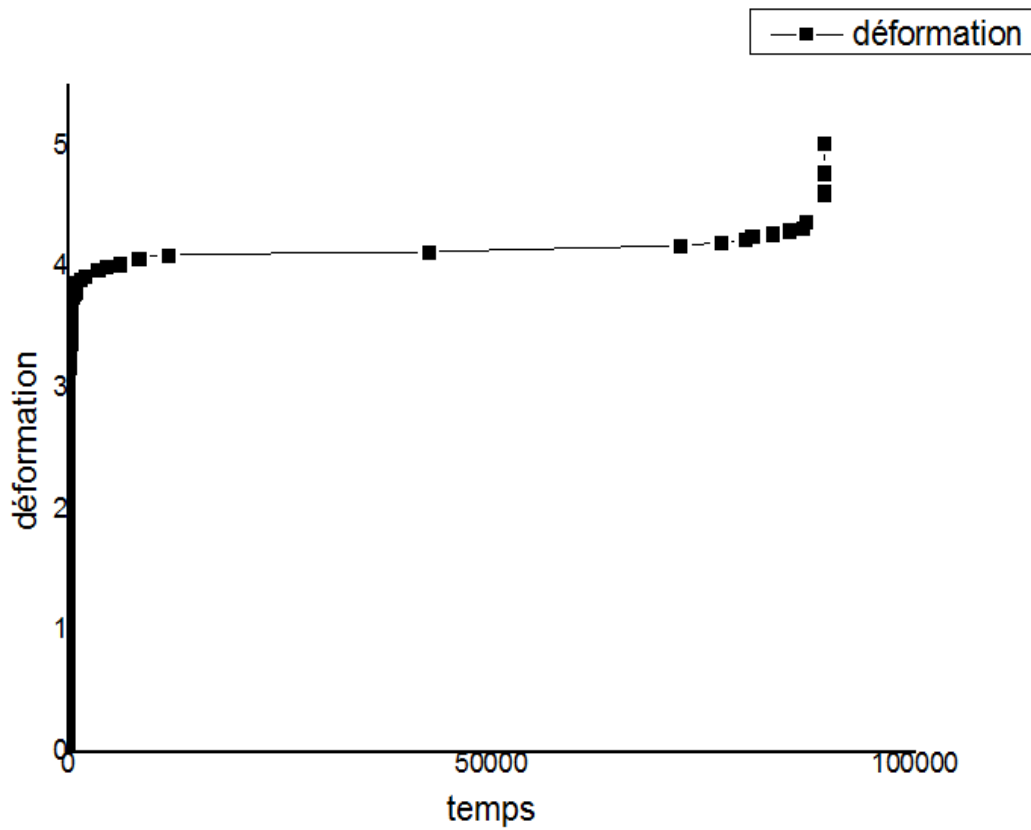


**Figure. IV.6a:** Courbe de déformation de fluage en fonction du temps du polyamide PA6 à charge de  $\sigma=9.2\text{Mpa}$  et  $T = 150\text{ }^\circ\text{C}$ .



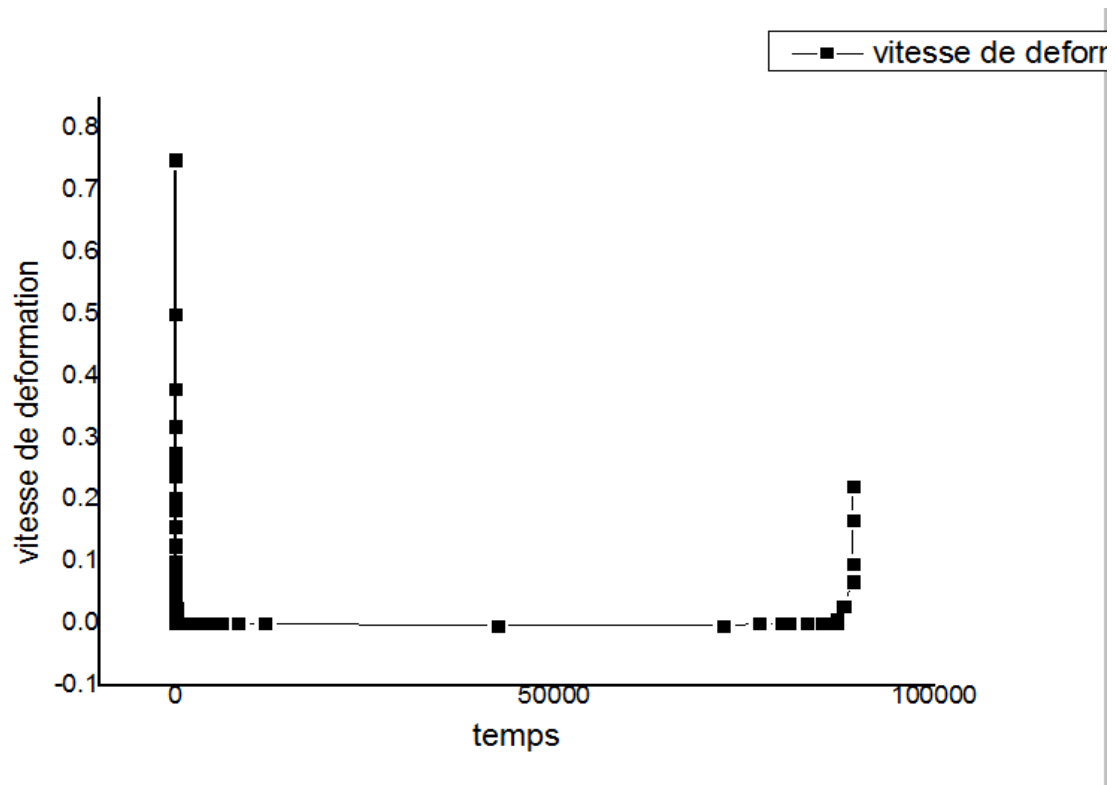
**Figure 6b** : Courbe Vitesse de déformation de fluage en fonction du temps du polyamide PA6 à charge de  $\sigma=9.2\text{Mpa}$  et  $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

2/ la figure IV.7a : présentent la variation de la déformation en fonction du temps d'un polyamide Pa6 sous une contrainte  $\sigma=9.2\text{MPa}$  et une température  $T=120^\circ\text{C}$ .



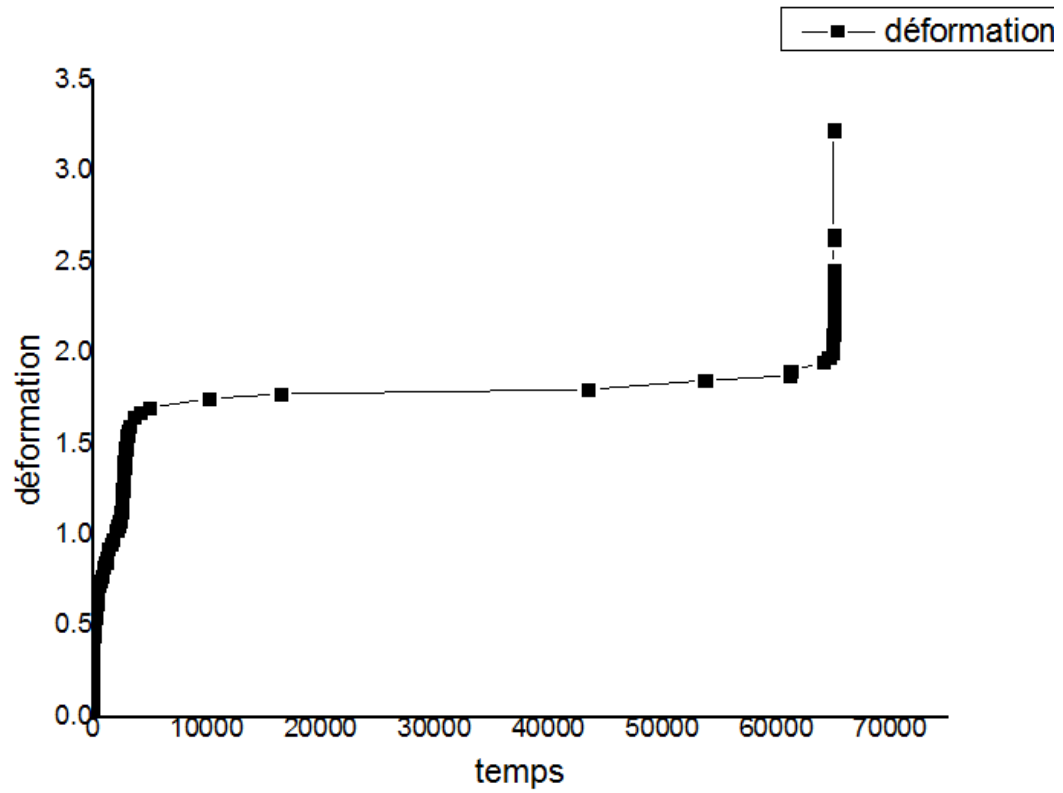
**Figure. IV.7a:** Courbe de déformation de fluage en fonction du temps du polyamide PA6 à charge de  $\sigma=9.2\text{Mpa}$  et  $T = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Les différents stades de fluage (primaire, secondaire et tertiaire) sont observés.



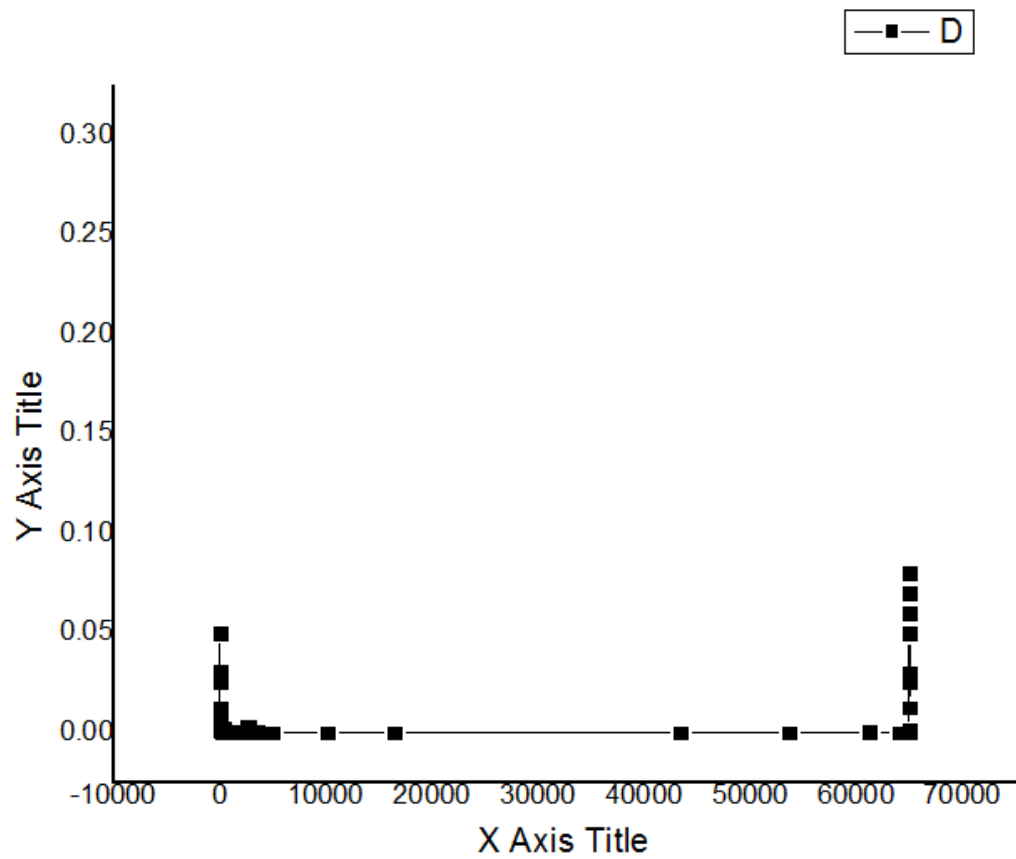
**Figure IV. 7b** : Courbe Vitesse de déformation de fluage en fonction du temps du polyamide PA6 à charge de  $\sigma=9.2\text{Mpa}$  et  $T = 120^\circ\text{C}$

3/ la figure IV.8a : présentent la variation de la déformation en fonction du temps d'un polyamide Pa6 sous une contrainte  $\sigma=9.2\text{MPa}$  et une température  $T=100^\circ\text{C}$ .

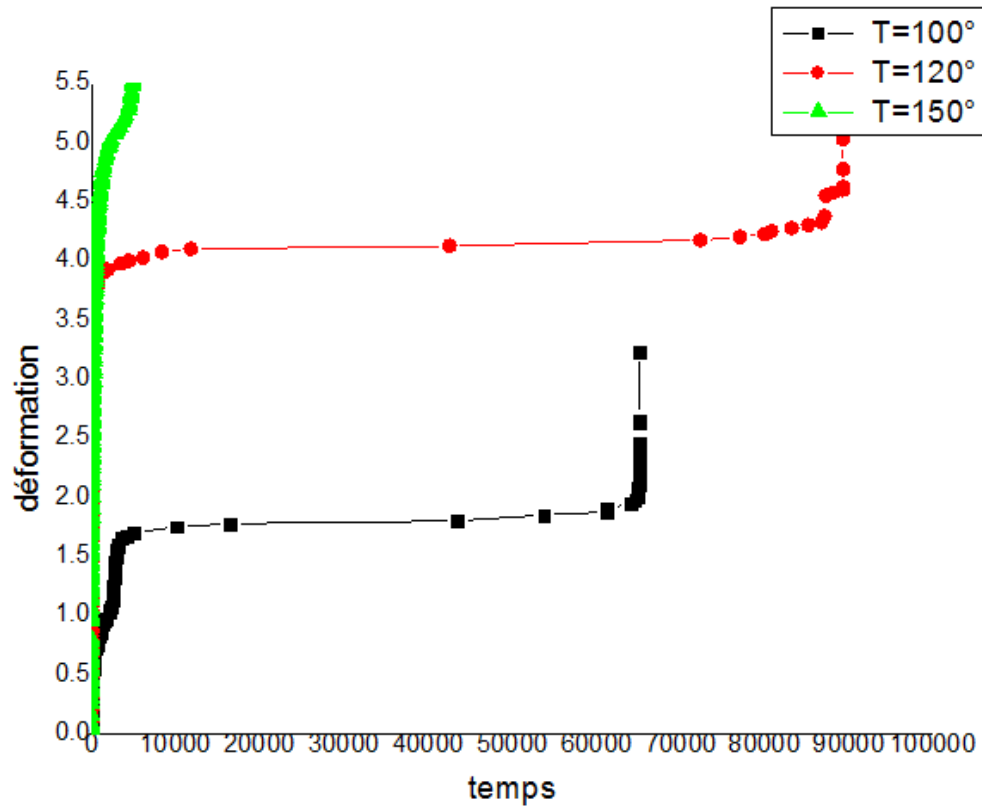


**Figure. IV.8a:** Courbe de déformation de fluage en fonction du temps du polyamide PA6 à charge de  $\sigma=9.2\text{Mpa}$  et  $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ .





**Figure IV .8b** : Courbe Vitesse de déformation de fluage en fonction du temps du polyamide PA6 à charge de  $\sigma=9.2\text{Mpa}$  et  $T = 100\text{ }^\circ\text{C}$



**Figure IV.9** : les déformations en fonctions du temps.

D'après les résultats enregistrés on a remarqué que chaque fois la température augmente, la déformation ( $\epsilon$ ) et la vitesse de déformation ( $\dot{\epsilon}$ ) augmente et le temps de rupture diminue.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale:**

L'objectif principal de ce mémoire de master était la Conception et réalisation d'un appareil d'essai de fluage en traction des matériaux composites.

L'appareil réalisé est composé d'un système de chauffage. Ce système est basé sur un four électrique horizontal qui permet d'effectuer des essais de fluage à différentes températures. De même, un système d'acquisition des données de chaque expérience en tant réel a été aussi réalisé, c'est-à-dire l'enregistrement automatique de la déformation de l'éprouvette en fonction du temps.

D'autre part, des essais de fluage sur les éprouvettes des matières composites ont été aussi réalisés afin de confirmer la fiabilité de l'appareil.

Suite aux résultats obtenus, sur le fluage d'éprouvettes des matières composites nous pouvons résumer les résultats acquis lors de cette étude comme suit :

- Nous avons constaté l'apparition des trois stades de fluage dans toutes les allures des courbes de fluage.
- l'augmentation de la température et la fixation de la contrainte qu'il y à une augmentation de la déformation enregistré ( $\epsilon\%$ ), et de la vitesse de déformation stationnaire ( $\dot{\epsilon}_{min}$ ) tandis que, le temps de rupture a diminué d'une manière générale.

# **Références bibliographiques**

- [1] I.Lakhtine, **Métallographie et traitements thermiques des métaux**, édition Mir, (1982).
- [2] M. Dupeux, **aide-mémoire science des matériaux**, Edition DUNOD, (2005).
- [3] M. Lamine Fares, **Principes physiques du comportement mécanique des matériaux**. Université Bordj Badji Mokhtar Annaba
- [4] J.C. Charmet, **Plasticité Fluage**, 2005
- [5] J. Kesler, R. Bourgeois, H. Chauvel. Memento, **Génie des matériaux**, Edition Casteila, Novembre Paris, 2001
- [6] G.Simonnet, **Tréfilage de l'acier**, Technique de l'ingénieur (Métallurgie), Edition 1996.
- [7] G.Fiorucci, **Essais mécaniques sur les alliages métalliques**, Utilisation pour la détermination des lois de comportement et de la microstructure, Paris, 2001.
- [8] D. François, **Comportement Mécanique Des Matériaux 2<sup>eme</sup> Edition**, Paris (1992).
- [9] H. Tsukahara, **"Etude thermo-mécanique et microstructurale de l'acier Z10MC18-8. Application au forgeage des frettes,**  
" l'Ecole des Mines de Paris, (1995).
- [10] D. François, **"Essais mécaniques des métaux, Essais de dureté,"** Techniques de l'Ingénieur M 123, (1995).
- [11] A. Boudilmi, **"étude théorique et expérimentale des essais de dureté pour matériaux massifs et revêtus, Thèse de magister**  
" Université M Boudiaf de M'sila, (2008).
- [12] A. P. G. Doubenski, **"Resistance des matériaux,"** université d'Annaba, (1977).
- [13] A. D. A. Castell, **"Technologie, Professionnelle générale, 3<sup>eme</sup> livre,"** (1978).
- [14] J. Devalloir, **"instrumentation d'un choc CHARPY,"** Ecole des Mines de Douai, (2002).
- [15] L. é. d. C. G. Mécanique, **guide de travaux pratiques**, ed Royaume du Maroc, (2002).
- [16] G. E. Dieter, **Mechanical Metallurgy**, Student Edition McGraw-Hill, (1976).

- [17] D. François, "**Essais mécaniques des métaux, Détermination des lois de comportement,**" Technique de l'ingénieur M120, (1996).
- [18] L. Saidani, "**etude experimentale du comportement en fatigue des metaux par flexion rotative,**" in Thèse de magister: Université Med Boudiaf de M'sila, (2007).
- [19] J. Devalloir, "instrumentation d'un choc CHARPY," Ecole des Mines de Douai, (2002).
- [20] M. T. B. marzouk, "**influence du molybdène sur la résistance mécanique a haute température** des aciers inoxydables du type 18 - 14 et particulièrement sur la tenue au fluage vers 700 °c, Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay, (1977).
- [21] LAOUINI Abdeldjalil "**Réalisation d'un appareil de fluage des métaux**" thèse magister universite de biskra 2012
- [22] A. Nadai, "**Theory of flow and fracture of solids,** Edition McGraw-Hill, (1950).
- [23] M. Arnoux, "**Etude du comportement en fluage à haute température du superalliage monocristallin à base de nickel MCNG :**  
Effet d'une surchauffe," (2006).
- [24] S. Antoine, "**Essai de fluage,**" Technique de l'ingénieur M140, vol. Vol.M1II, (1995)
- [25] T. Billot, "**Comportement et endommagement en fatigue et fatigue-fluage à haute température de différents états microstructuraux**  
du superalliage base-nickel Udimet 720," (2010).
- [26] Abdelatif BERIBECHE "**Comportement des fils métalliques lors d'un essai de fluage** these doctorat univ biskra 2014
- [27] Jacobs, "**Engineering materials technology, 3ème édition,**" éditions Odile, (1997).
- [28] U. F. Kocks, "**Realistic constitutive relations for metal plasticity, Materials Science and Engineering,**" (2001).
- [29] S. Dubiez, "**Comportement et endommagement d'un superalliage élaboré par compression isostatique à chaud,**" in ENSMP, (2003).
- [30] A. Diha, "**comportement des fils tréfilés lors de fluage,**" Thèse de magister, Biskra, (2010).
- [31] koraichi abd elraouf " " thèse de master Biskra, (2019).

## Résumé

L'objectif principal de cette étude était la Conception et réalisation d'un appareil d'essai de fluage en traction des matériaux composites, La machine réalisée est équipée d'un four électrique et d'un système d'acquisition des résultats. De plus, des tests de fluage ont été aussi effectués et qui ont confirmé la fiabilité de la machine

## ملخص

لقد كان الهدف الرئيسي لهذه الدراسة هي انجاز جهاز خاص بتجربة الزحف. إن الجهاز المنجز مجهز بفرن كهربائي ونظام تسجيل ولقد تم انجاز بعض تجارب الزحف والتي أكدت صلاحية الجهاز.



## Notations

$T_f$  : Température de fusion en Kelvin

$\varepsilon$  : Déformation

$\dot{\varepsilon}$  : Vitesse de fluage

$d$  : Dimension caractéristique des grains

$D$  : Coefficient d'autodiffusion.

$J$  : Flux d'atome transporté.

$Q_c$  : Energie d'activation de fluage

$G$  : Module de cisaillement

$B$  : Vecteur de Burgers des dislocations.

$\dot{\varepsilon}_m$  : vitesse minimale

$\sigma_e$  : contrainte de limite d'élasticité

$\sigma_R$  : contrainte de résistance à la rupture.

$A\%$  : Allongement

$E$  : module d'élasticité (module de Young)

$t_f$  : temps de rupture

