

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'enseignement supérieur et de la Recherche scientifique*



**Université Mouloud Mammeri - Tizi-Ouzou**  
**Faculté du Génie de la Construction**  
**Département de génie mécanique**



***Spécialité : Construction Mécanique***

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique en Génie Mécanique

**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES**

**Thème**

**Banc d'essai en flexion**

Réalisé par :

- **FERHANI Abdelhakim**
- **OUNNAS Yacine**

Encadré par :

❖ **Mr. ALI BILEK**

**2019 - 2020**

## *REMERCIEMENTS*

*A l'issue du cycle de notre formation nous tenons à remercier notre Dieu qui nous a donné le courage, la volonté et la force d'accomplir ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et notre gratitude à notre promoteur Mr. Le professeur ALI BILEK pour ses conseils, ses orientations ainsi que sa disponibilité tout au long de notre travail.*

*Ce travail que nous avons fait sous le suivi de Mr. MUSTAPHA BELDI que nous remercions beaucoup pour son aide et son orientation tout au long de notre travail. Sans oublier d'exprimer notre reconnaissance aux techniciens du hall technologie de OUED AISSI.*

*Nous remercions, sincèrement tout l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation, et nous remercions ainsi, l'ensemble d'étudiants du département de Génie mécanique de l'U.M.M.T.O, pour leurs soutien.*

## TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION GENERAL :</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : ESSAIS MECANIQUES.</b> .....	<b>2</b>
I.1 INTRODUCTION :	3
I.2 ESSAI DE TRACTION :	3
I.2.1 Les éprouvettes :	4
I.2.2 Interprétation des résultats :	5
I.3 ESSAI DE FLEXION :	8
I.3.1 Les éprouvettes :	8
I.3.2 Essais de flexion trois points :	9
I.3.2.1 Étude théorique :	11
I.3.3 Essai de flexion quatre points :	15
I.3.3.1 Étude théorique :	16
I.4 ESSAI DE COMPRESSION :	19
I.4.1 Epreuve de compression :sd <sup>2</sup> .....	19
I.5 ESSAI DE CISAILLEMENT :	20
I.6 ESSAI DE TORSION :	21
<b>CHAPITRE II : LES CAPTEURS A JAUGES D'EXTENSOMETRIE</b> .....	<b>22</b>
II.1 INTRODUCTION :	23
II.2 LES CAPTEURS :	23
II.2.1 Acquisition de données :	24
II.2.2 Chaîne d'acquisition :	25
II.2.2.1 Rôle et construction :	25
II.2.3 Les principaux composants de la chaine d'acquisition :	26
II.2.4 Les caractéristiques métrologiques des capteurs :	28
II.2.5 Type de capteur :	31
II.2.5.1 Types de capteurs suivant l'information délivrée :	31
II.2.5.2 Types de capteurs suivant la grandeur physique mesurée délivrée :	32
II.3 LES JAUGES EXTENSOMETRE :	34
II.3.1 Corps d'épreuve :	35
II.3.2 Schéma électrique des capteurs extensométriques :	37

II.3.2.1	Principe de montage en pont : .....	37
II.3.3	Disposition des jauges sur le corps d'épreuve : .....	39
II.3.4	Conception mécanique des capteurs extensométriques : .....	41
II.3.4.1	Calcul des capteurs : .....	41
II.3.4.2	Métal du corps d'épreuve : .....	43
<b>CHAPITRE III :</b>	<b>PARTIE PRATIQUE.....</b>	<b>45</b>
III.1	<b>INTRODUCTION :</b> .....	46
III.2	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL : .....	46
III.3	ETUDE ET CONCEPTION DU DISPOSITIF : .....	46
III.3.1	Solution technique proposée : .....	46
III.3.2	Principe de fonctionnement : .....	47
III.3.3	La conception : .....	49
III.3.4	Le choix des matériaux : .....	51
III.3.5	Vérification de la structure : .....	51
III.4	LA REALISATION : .....	55
III.5	LE MOTEUR ELECTRIQUE : .....	57
III.6	LES CAPTEURS : .....	59
III.6.1	Capteur de déformation : .....	59
III.6.2	Capteur de force : .....	60
III.6.3	Collage des capteurs : .....	60
III.6.4	Vérification des capteurs : .....	61
III.7	<b>ETALONNAGE DES CAPTEURS :</b> .....	63
III.7.1	Etalonnage de capteur de force : .....	63
III.7.2	Etalonnage du capteur de déplacement : .....	65
III.8	LA CHAINE D'ACQUISITION : .....	67
III.9	TESTES DE VALIDATION : .....	70
III.9.1	Teste de flexion trois points : .....	70
III.9.2	Teste flexion quatre points : .....	72
III.9.3	Interprétation des résultats : .....	73
III.9.4	Solution proposée : .....	73
<b>CONCLUSION GENERALE :</b>	<b>.....</b>	<b>74</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : machine d'essai de traction. ....	3
Figure I.2: Eprouvette de traction selon la norme ASTM E8 . ....	4
Figure I.3 : Types d'éprouvettes de traction. ....	5
Figure I.4 : Courbe charge-allongement d'essai de traction .....	5
Figure I.5 : L'essai de flexion trois points et l'essai de flexion quatre points. ....	8
Figure I.6 : L'essai de flexion trois points. ....	9
Figure I.7 : Essai de flexion quatre points, selon EN ISO 14125. ....	15
Figure I.8 : d'essai de flexion quatre points. ....	16
Figure I.9 : Histogramme des contraintes à la rupture de certains matériaux testés en flexion 3 points et en traction. ....	18
Figure I.10 : Machine d'essai de compression.....	19
Figure I.11 : Essai de cisaillement. ....	20
Figure I.12 : Schéma de l'essai de torsion .....	21
Figure II.1 : Principe d'un capteur.....	24
Figure II.2 : Courbe d'étalonnage d'un capteur : a) son établissement, à partir de valeurs connues du mesurande m; b) son exploitation, à partir des valeurs mesurées de réponse s du capteur. ....	25
Figure II.3 : Rôle et construction d'une chaîne d'acquisition. ....	25
Figure II.4 : Les éléments d'une chaîne d'acquisition. ....	27
Figure II.5 : Etendue de mesure d'un capteur. ....	29
Figure II.6 : Domaine de linéarité d'un capteur. ....	29
Figure II.7 : Sensibilité d'un capteur.....	30
Figure II.8 : Temps de réponse d'un capteur. ....	31
Figure II.9 : jauges extensomètre. ....	35
Figure II.10 : Montage en pont de Wheatstone. ....	37
Figure II.11 : Disposition des jauges sur une pièce en traction et un.....	39
Figure II.12 : Disposition des jauges sur une lame et montage en pont pour .....	40
Figure II.13 : Disposition des jauges sur un arbre soumis à une torsion.....	40
Figure III.1 : conception du sopprt moteur sur solidworks. ....	47

Figure III.2 : conception de poinçon sur SOLIDWORKS.....	47
Figure III.3 : Le banc d'essai de flexion.....	48
Figure III.4 : La conception de système poulie courroie.....	49
Figure III.5 : dimension de système poulie courroie.....	50
Figure III.6 : dimension des poulies.....	51
Figure III.7 : Flexion quatre points.....	51
Figure III.8 : La coupe A-A du haut du support.....	53
Figure III.9 : la coupe A-A du poinçon quatre points.....	54
Figure III.10 : scie mécanique.....	55
Figure III.11 : les opérations de fraisage.....	56
Figure III.12 : les opérations de tournage.....	56
Figure III.13 : moteur pas à pas 57HS22.....	57
Figure III.14 : Raccordement bipolaire en séries.....	58
Figure III.15 : Schéma de raccordement du moteur.....	58
Figure III.16 : Capteur de déformation.....	59
Figure III.17 : Capteur de force.....	60
Figure III.18 : les étapes du collage des jauges.....	61
Figure III.19 : étalonnage du capteur de force.....	63
Figure III.20 : graphe de signal de sortie.....	64
Figure III.21 : courbe d'étalonnage de capteur de force.....	65
Figure III.22 : Etalonnage de capteur de déplacement.....	66
Figure III.23 : graphe de signal de sortie.....	66
Figure III.24 : courbe d'étalonnage de capteur de déplacement.....	67
Figure III.25 : La chaine d'acquisition.....	68
Figure III.26 : carte ARDUINO.....	69
Figure III.27 : courbe d'évolution contrainte-déformation en flexion trois points.....	71
Figure III.28 : la pente de graphe.....	71
Figure III.29: courbe d'évolution contrainte-déformation en flexion quatre points.....	72
Figure III.30: La pente de graphe.....	73

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Caractéristiques fondamentale d'un matériau .....	6
Tableau I.2 : Caractéristiques mécaniques de quelques matériaux .....	7
Tableau I.3 : Forme et dimension normalisées de l'éprouvette compression.....	20
Tableau II.1: Quelques principaux domaines d'application des capteurs.....	32
Tableau II.2: effet et grandeurs de sortie d'un capteur.....	33
Tableau II.3: Exemples de capteurs extensométriques .....	36
Tableau II.4 : Formules utiles pour le calcul des capteurs extensométriques .	42
Tableau II.5: Exemples de métaux pour corps d'épreuve .....	44
Tableau III.1 : Nomenclature du dispositif.....	48
Tableau III.2 : Dimension des éprouvettes.....	52
Tableau III.3 : Spécifications générales du moteur .....	57
Tableau III.4 : Spécification électriques du moteur .....	57
Tableau III.5 : les formule de calcule.....	61
Tableau III.6 : formules de calcule.....	62
Tableau III.7 : signal en fonction de force applique.....	64
Tableau III.8 : signal en fonction de la flèche.....	67

## Introduction général

La construction mécanique a une grande importance dans le développement industriel car elle participe à l'amélioration des performances des moyens de production locaux.

Le choix des matériaux pour une application industrielle donnée exige une connaissance et une maîtrise de ses caractéristiques mécaniques. La caractérisation des matériaux repose sur l'étude de son comportement vis-à-vis des sollicitations extérieures qui engendrent des contraintes et des déformations. Différents types d'essais normalisés peuvent être utilisés. Ces derniers permettent de déterminer les grandeurs physiques caractérisant le comportement mécanique des matériaux testés.

Notre travail consiste à concevoir et à réaliser un système pour équiper un banc d'essai de flexion trois points d'un moteur pas à pas et le contrôler par une carte ARDUINO. Le mouvement rotatif du moteur est transmis au système d'application de la charge à l'aide d'un système poulie courroie. Deux capteurs permettent d'enregistrer en continu l'effort appliqué sur l'éprouvette et la déformation qui en résulte.

Ceci permettra de tracer en temps réel la courbe contrainte déformation et ainsi d'en extraire les caractéristiques mécaniques du matériau testé. Les deux capteurs seront connectés à une carte ARDUINO reliée à un ordinateur qui permettra de visualiser la courbe contrainte déformation en temps réel. Des essais conduits sur un matériau connu permettront de faire une validation du banc d'essai.

Ce mémoire est composé de trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons quelques rappels sur les principaux essais mécaniques et les démarches à suivre pour réaliser ces essais. Le deuxième chapitre est consacré aux capteurs à jauges d'extensométrie. Leur principe de fonctionnement ainsi que les branchements en pont de Wheatstone pour assurer une mesure correcte du signal y sont expliqués.

Le troisième chapitre est consacré à la conception et à la réalisation du banc d'essai. Les différents calculs de vérification de la structure seront traités, dans ce chapitre on explique le principe de fonctionnement du moteur et les différentes étapes pour l'acquisition des données et la réalisation des essais. Le dossier technique contenant les dessins de définition des différentes pièces ainsi que le dessin d'ensemble, constitue la dernière partie de ce travail. Nous terminerons par une conclusion générale.

# **Chapitre I : Essais mécaniques**

## I.1 Introduction

L'ingénieur ne peut calculer une pièce ni déterminer les charges admissibles sans connaître les caractéristiques mécaniques des matériaux qu'il compte utiliser. Le but des essais mécaniques est d'obtenir les valeurs des propriétés qui seront utilisables dans les calculs de résistance des matériaux et permettront d'apprécier le comportement d'un matériau en service.

En règle générale, pour être valable, les essais mécaniques doivent mettre en jeu des états de contraintes simples et connus, d'interprétation facile. De plus ils doivent être reproductible de façon universelle et avoir partout la même signification; c'est pourquoi des organismes nationaux et internationaux ont normalisé ces essais, à titre d'exemple : l'ASTM (American Society for Testing and Materials), l'ISO (Organisation Internationale de Normalisation). La normalisation des essais porte sur la géométrie des éprouvettes et sur leur prélèvement, sur les machines d'essai et leur étalonnage, et sur les techniques de présentation des résultats.

## I.2 Essai de traction

L'essai de traction est l'essai mécanique le plus fréquemment utilisé. Il consiste à soumettre une éprouvette du matériau à étudier à deux efforts  $F$  de tension de sens opposés et de même valeurs absolues. La ligne d'action est confondue avec l'axe de symétrie ou de rotation de l'éprouvette [1].

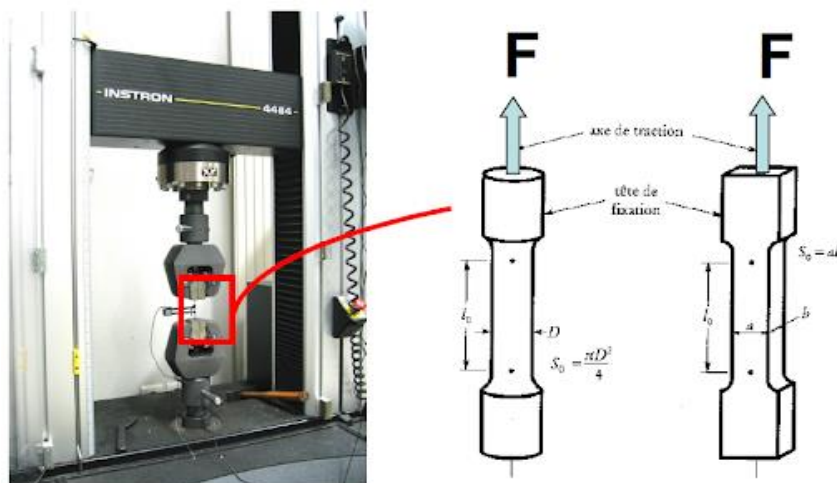


Figure I.1 : machine d'essai de traction.

## Essais mécanique

En enregistrant la force appliquée à l'éprouvette et son allongement progressif, on peut tracer le graphe de variation. En règle générale, on exprime la force  $F$  et l'allongement  $\Delta l$  par rapport aux dimensions initiales de l'éprouvette. On obtient ainsi la contrainte nominale  $\sigma$  :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} , \quad (\text{I.1})$$

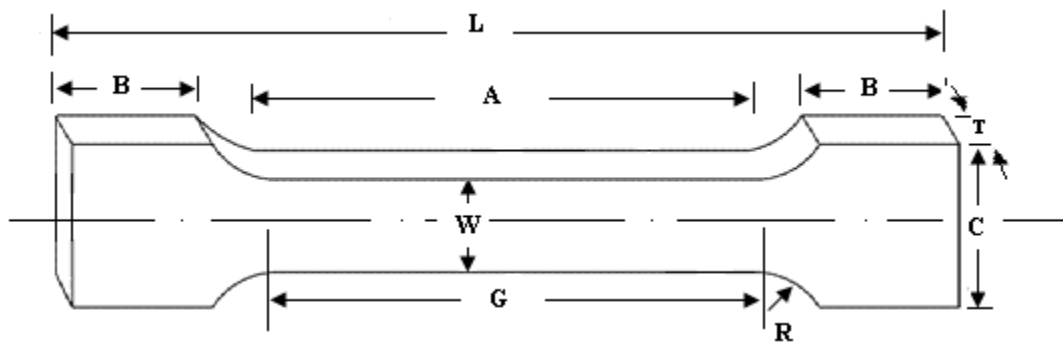
Où  $S_0$  est l'aire de la section initial. On définit alors la déformation nominale  $\varepsilon$  :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} , \quad (\text{I.2})$$

Où  $l_0$  correspond à la longueur initiale de l'éprouvette. La valeur de  $\varepsilon$ , est en général exprimé en pourcent [2].

### I.2.1 Les éprouvettes

L'éprouvette comprend toujours, entre des repères séparés par une distance  $l_0$ , une section constante  $S_0$  ; la forme de l'éprouvette est soit cylindrique, soit prismatique. Les extrémités, ou tête, de l'éprouvette ont une section supérieure à  $S_0$ , ce qui permet de les fixer sur la machine d'essai. La géométrie des têtes dépend du mode de fixation utilisé (serrage sur tête lisses, filetage ou épaulement) [1].



$B= 20 \text{ mm}$ ,  $A= 32 \text{ mm}$ ,  $G= 25 \text{ mm}$ ,  $L= 76 \text{ mm}$ ,  $C= 21 \text{ mm}$ ,  $T= 1 \text{ mm}$ ,  $W= 14,14 \text{ mm}$

**Figure I.2:** Eprouvette de traction selon la norme ASTM E8 [3].

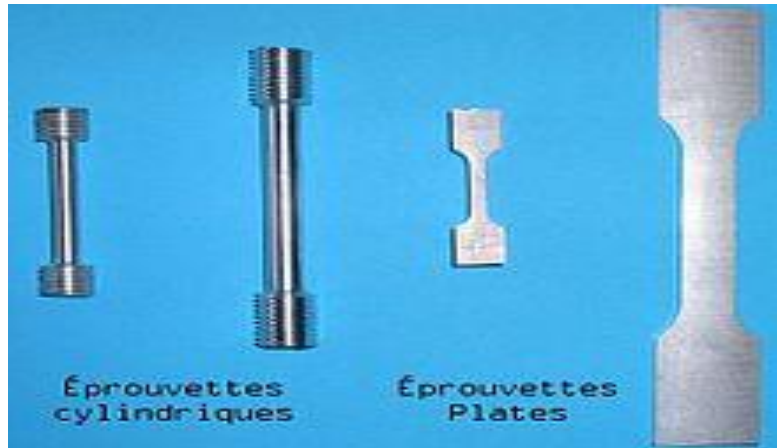


Figure I.3 : Types d'éprouvettes de traction.

## I.2.2 Interprétation des résultats

En général les résultats de l'essai, pour la plupart des matériaux font apparaitre deux phases principales [4].

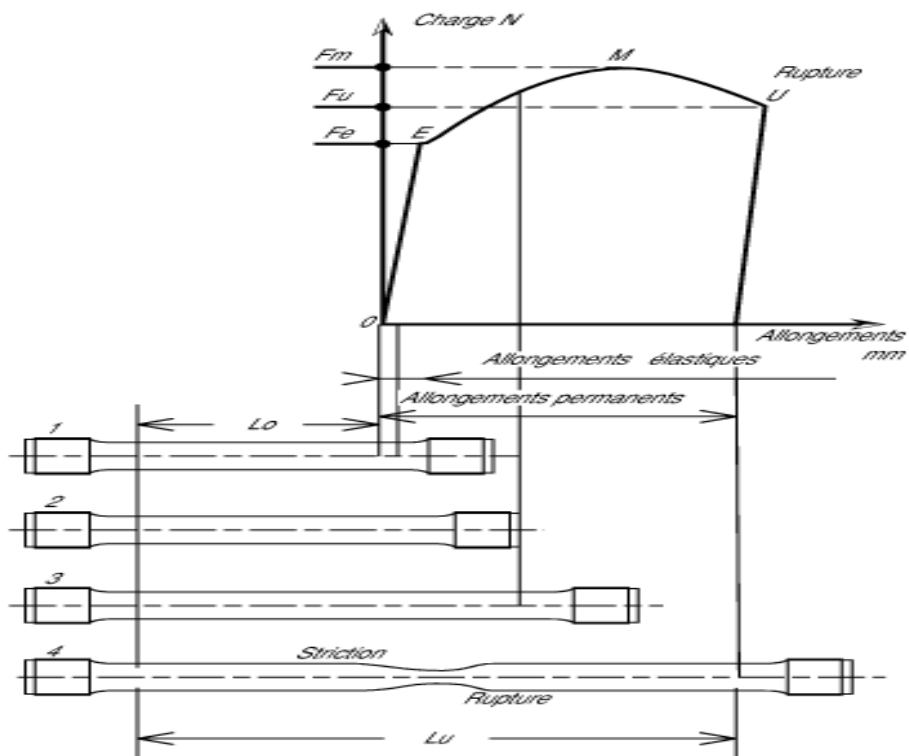


Figure I.4 : Courbe charge-allongement d'essai de traction

# Essais mécanique

## ➤ *Déformation élastique*

Cette partie est représentée par le segment **OE**, les allongements  $\Delta l$  très petits, est proportionnelle aux charges.

Si l'on supprime l'effort de traction, l'éprouvette reprend sa longueur initiale  $l_0$ , le point **E** marque la fin de la première phase ; la charge  $F_e$  correspondante est appelée charge à la limite apparente d'élasticité.

## ➤ *Déformation permanente*

A partir de  $F = F_e$  (pointe E), les allongements augmentent rapidement et l'allure du diagramme varie d'un matériau à l'autre.

La section diminue de manière appréciable et cette diminution devient visible lorsque la charge atteint la valeur  $F_m$  (charge maximale). Le point **M** correspondant marque le début de la striction, à partir de ce point l'éprouvette continue à s'allonger alors que la charge décroît, la rupture a lieu au point **U** et la charge correspondante est appelée charge ultime  $F_u$ .

Ces résultats mènent à déduire les caractéristiques mécaniques du matériau, voici dans ce tableau quelques grandeurs fondamentales :

<b><i>Module d'élasticité</i></b>	$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$	Appeler aussi module de Young, il est donné par la pente de la partie élastique de la courbe contrainte-déformation, ce module est fonction de l'énergie des liaisons entre les atomes ou molécules constituant le matériau.
<b><i>La limite élastique</i></b>	$R_e = \frac{F_e}{S_0}$	Qui donne la valeur de la contrainte nominale à partir de laquelle le matériau commence à se déformer plastiquement.
<b><i>La limite à la rupture</i></b>	$R_m = \frac{F_m}{S_0}$	Qui est définie par la contrainte nominale maximale supportée par l'éprouvette.
<b><i>Allongement</i></b>	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$	On rapporte l'allongement $\Delta l$ à la longueur initiale $l_0$ pour obtenir la déformation nominale $\varepsilon$ .

**Tableau I.1 :** Caractéristiques fondamentale d'un matériau [2].

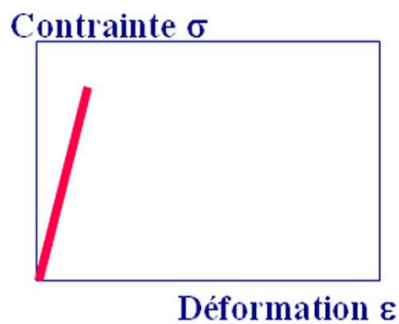
## Essais mécanique

Matériau	Module de Young E (MPa)	Coefficient de poisson (sans unité)	Limite à rupture $R_y$ (MPa)
Acier	210 000	0.3	450 à 1600
Aluminium	70 000	0.33	180 à 600
Diamant	1 000 000	0.1	Rupture 4 000 à 10 000
Béton	20 000 à 50 000	0.2	20 à 40 (compression) 2 à 5 (traction)

**Tableau I.2 :** Caractéristiques mécaniques de quelques matériaux

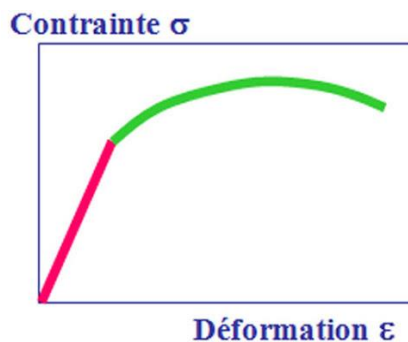
On peut avoir trois types de courbes qui correspondent à trois comportements possibles des matériaux [1] :

➤ *Comportement fragile*



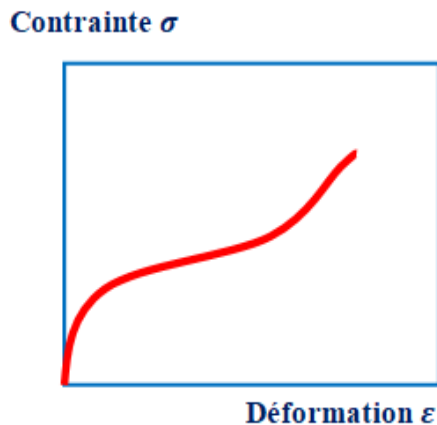
La rupture se produit alors que les déformations sont élastiques.

➤ *Comportement ductile*



Une déformation plastique permanente, accompagnée d'un durcissement du matériau, suit la déformation élastique.

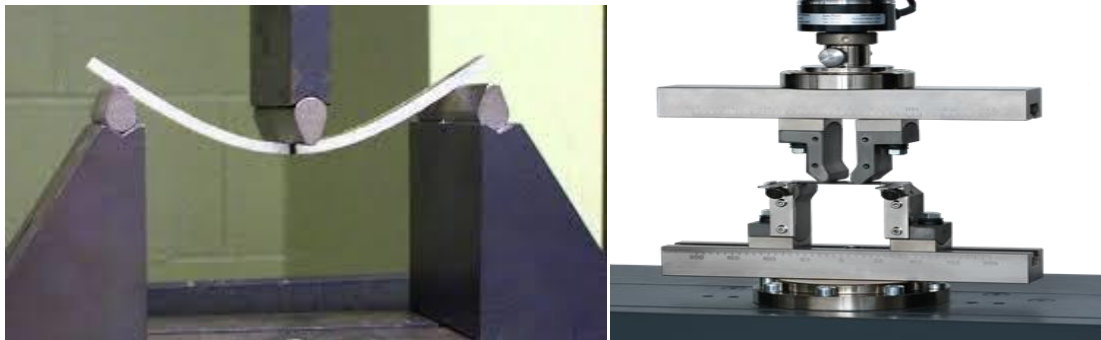
## ➤ Comportement élastique non-linière



La déformation n'est pas proportionnelle à la charge qui la provoque.

### I.3 Essai de flexion

Les deux essais de flexion les plus utilisés sont l'essai de flexion trois points, caractérisé par un moment fléchissant variable le long de l'éprouvette et un cisaillement constant, et l'essai de flexion quatre points (flexion pure) avec un moment constant dans les sections entre appuis et un cisaillement nul [5].



**Figure I.5 :** L'essai de flexion trois points et l'essai de flexion quatre points.

#### I.3.1 Les éprouvettes

En général, l'éprouvette utilisée en flexion trois points et en flexion quatre points sont identiques. Leur forme est prismatique et leur dimensionnement est régi par des normes

## Essais mécanique

spécifiques à chaque matériau. Toutes ces normes obéissent à un certain nombre de principes dont les plus importants sont [5] :

- La longueur  $L$  et l'épaisseur  $h$  de l'éprouvette doivent être dans un rapport fixe :

$$L_{min} = 20.h \text{ (ISO 178 relatives aux matières plastiques rigides).}$$

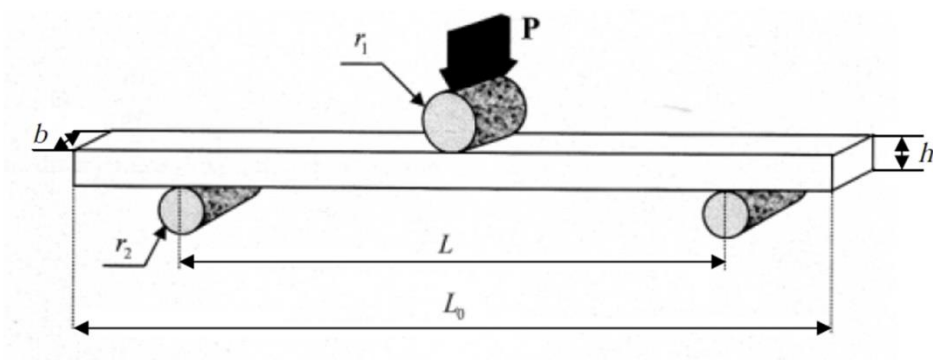
$$L_{min} = (16 + 1).h \text{ (EN 63 relatives aux matières plastiques renforcées au verre textile).}$$

$$L_{min} = 4.h \text{ (NFP 18-401 pour les bétons).}$$

- La largeur  $b$  de l'éprouvette peut être quelconque et sa valeur est comprise entre 10 et 25 cm pour les produits sidérurgiques. Pour des matériaux ayant des fibres grossières, la largeur doit être comprise entre 20 et 50 cm spécifiques à la norme ISO 178.

### I.3.2 Essais de flexion trois points

La déformation d'un barreau rectangulaire reposant sur deux appuis par l'intermédiaire d'un poinçon (ou panne) appliquée à égale distance des appuis et se déplaçant à vitesse constante, est la méthode la plus couramment rencontrée, c'est l'essai de flexion 3 points, elle fait l'objet des normes NF EN ISO 178, ASTM D 790, D 5934 et D 5943 pour les matériaux polymères et s'appuie sur un matériel et un mode opératoire simples [6].



**Figure I.6 :** L'essai de flexion trois points.

Avec :

- $P$  : charge appliquée ;
- $r_1$  : rayon de cylindre de la panne ;
- $r_2$  : rayon des cylindres d'appuis ;
- $L$  : longueur entre appuis ;

## Essais mécanique

---

- $L_0$  : longueur totale de l'éprouvette ;
- $h$  : hauteur de la poutre ;
- $b$  : largeur de la poutre

En flexion trois points, Les contraintes varient de façon continue de part et d'autre de l'axe neutre, sur lequel elles sont nulles, du côté concave de l'éprouvette elles sont en compression, alors que du côté convexe elles sont en tension. Il existe aussi une troisième contrainte de cisaillement; sa valeur maximale est située au niveau de la ligne neutre. En fonction de la géométrie de l'éprouvette d'essai, il ya compétition entre une rupture en flexion et une rupture en cisaillement. La valeur maximale de la contrainte normale d'une éprouvette rectangulaire et donnée par [1] :

$$\sigma_f = \pm \frac{3FL}{2bh^2} , \quad (\text{I.3})$$

Et la contrainte de cisaillement est donnée par la relation :

$$\tau = \frac{3F}{4bh} \quad (\text{I.4})$$

Dans un essai de flexion, deux types de diagrammes peuvent être prélevés : contrainte-déformation et charge-flèche.

Ces diagrammes montrent en général une phase linéaire élastique puis s'écartent progressivement de la linéarité caractérisant une phase plastique ou une phase d'endommagement et de microfissuration. Différentes caractéristiques mécaniques des matériaux peuvent être mesurées dont les principales sont [5]:

- La contrainte à la rupture (équation I.3).
- Le module de Young ou d'élasticité ( $E$ ) peut être relevé directement en considérant la pente de la partie élastique linéaire du diagramme contrainte-déformation, des études montrent que cette mesure est bonne et correspond à celle donnée par un essai de traction directe.

Dans le cas du diagramme charge-flèche, le module de Young est déterminé à partir de la portion linéaire élastique du diagramme par la formule suivante en utilisant au moins cinq valeurs de la flèche et de la charge [7] :

## Essais mécanique

---

$$E = \left( \frac{L^3}{2bh^3} \right) \frac{\Delta F}{\Delta Y}$$

$L$  : distance entre appuis

$b$  : largeur de l'éprouvette

$h$  : épaisseur de l'éprouvette

$\Delta F$  : Variation de la charge sur la partie rectiligne du diagramme

$\Delta Y$  : Variation de la flèche correspondant a la variation de la charge

### 1.3.2.1 Étude théorique

Soit une poutre (éprouvette) de section rectangulaire ( $b, h$ ) posée sur deux appuis distants de  $L$ , soumise à une force  $F$  appliquée à égale distance des deux appuis.

Pour raison de symétrie les réactions aux appuis sont :

$$R_A = R_B = \frac{F}{2}$$

Pour l'effort tranchant on a :

$$0 \leq x \leq L/2 : T = R_A = F/2$$

$$L/2 \leq x \leq L : T = -R_B = -F/2$$

Le moment fléchissant est donné par :

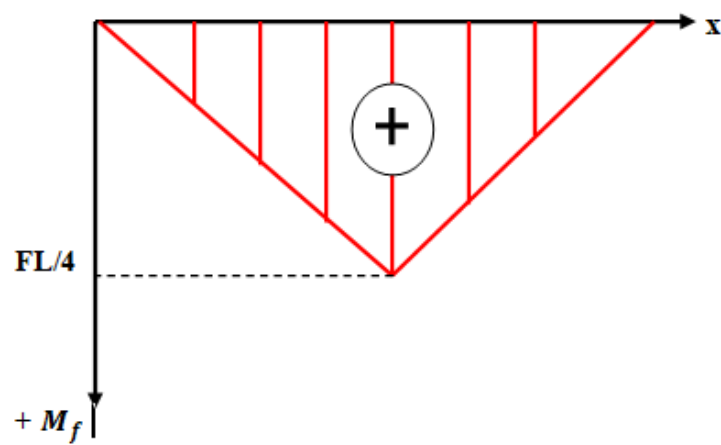
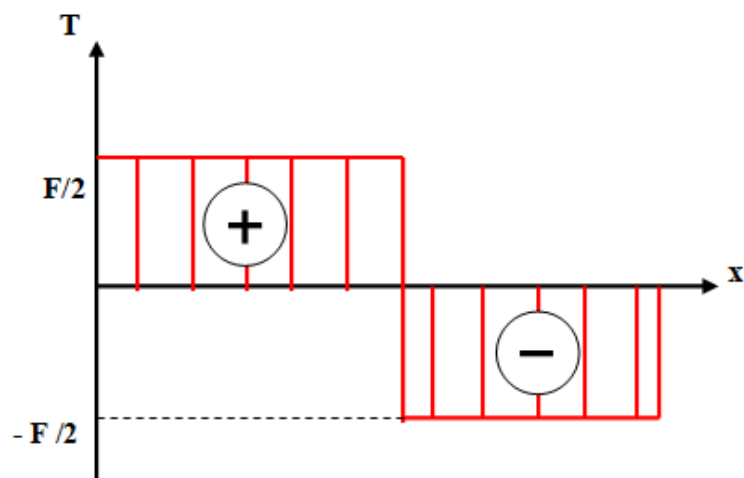
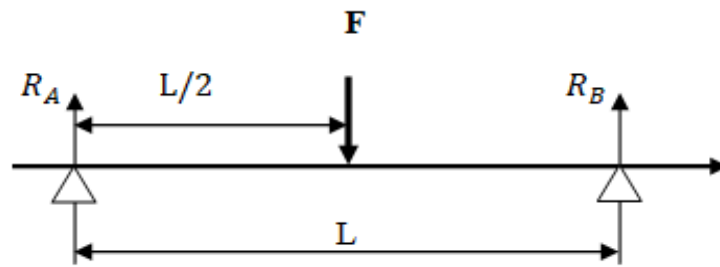
$$M_f = \int_0^x T dx \tag{I.5}$$

$$\text{Pour : } 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \Rightarrow M_f = R_A \cdot x = \frac{F}{2} \cdot x \Rightarrow \begin{cases} x = 0 : M_f = 0 \\ x = \frac{L}{2} : M_f = \frac{FL}{4} \end{cases}$$

$$\text{Pour : } \frac{L}{2} \leq x \leq L \Rightarrow M_f = \frac{F}{2} \cdot \frac{L}{2} + \frac{F}{2} \left( x - \frac{L}{2} \right) = -\frac{F}{2} (x - L) \Rightarrow \begin{cases} x = \frac{L}{2} : M_f = \frac{FL}{4} \\ x = L : M_f = 0 \end{cases}$$

# Essais mécanique

Le diagramme des moments fléchissant et des efforts tranchants :



➤ *La flèche de la poutre*

L'équation de la déformation s'écrit :

$$EIY' = -M_f$$

$$Y'' = -\frac{1}{EI} \left( \frac{F}{2} x \right)$$

E : le module de Young

I : le moment d'inertie de l'éprouvette :

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

$$x \in \left[ 0, \frac{L}{2} \right]$$

En intégrant on aura :

$$Y' = -\frac{1}{EI} \left( \frac{F}{4} x^2 + C_1 \right)$$

$$Y = -\frac{1}{EI} \left( \frac{F}{12} x^3 + C_1 x + C_2 \right)$$

$C_1$  Et  $C_2$  étant des constantes déterminées par des conditions aux limites :

$$x = 0 \Rightarrow Y = 0, \quad \text{D'où} \quad C_2 = 0$$

$$x = \frac{L}{2} \Rightarrow Y' = 0, \quad \text{D'où} \quad C_1 = -\frac{FL^2}{16}$$

L'équation de la flèche sera :

$$Y = -\frac{1}{EI} \left( \frac{F}{12} x^3 - \frac{FL^2}{16} x \right) \quad (\text{I.6})$$

## Essais mécanique

La flèche est maximale au centre de la poutre, c'est-à-dire pour la valeur  $x = L/2$

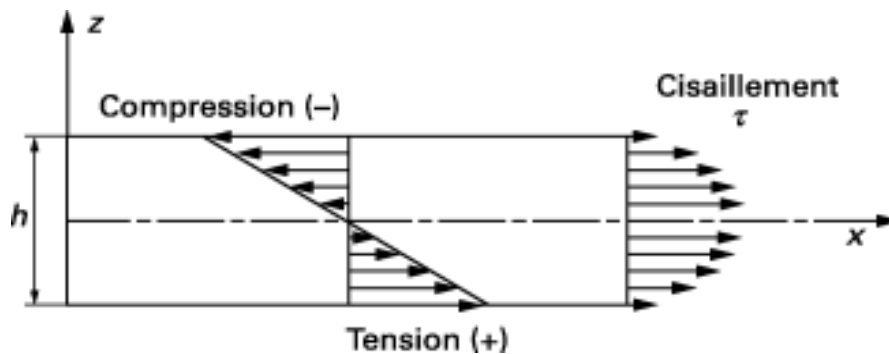
$$Y_{max} = \frac{FL^3}{48EI}$$

De cette relation on déterminera le module de Young :

$$E = \frac{FL^3}{48Y_c I} = \frac{FL^3}{4Y_c b h^3} \quad (I.7)$$

$Y_c$  : La flèche au centre (la flèche maximale)

### ➤ La contrainte normale



$$\sigma_f = \frac{M_f}{I_{zz}} y \quad (I.8)$$

Avec :  $M_{fmax} = \frac{FL}{4}$  ;  $I_{zz} = \frac{bh^3}{12}$  et  $y_{max} = \frac{h}{2}$

La formule la contrainte maximale est donnée par :

$$\sigma_{fmax} = \pm \frac{3FL}{2bh^2} \quad (I.9)$$

L'expression de la déformation maximale peut être déduite des deux équations (1.9) et (I.7)

$$\varepsilon_{max} = \frac{6Y_c h}{L^2}$$

➤ *La contrainte tangentielle :*

$$\tau = \frac{QS_Z}{bI_{ZZ}} \quad (\text{I.10})$$

Avec :  $S_Z = \Omega \cdot Y_G$  ;  $\Omega = b\left(\frac{h}{2} - y\right)$  ;  $Y_G = \left[y + \left(\frac{h}{2} - y\right)\right] / 2$

Ainsi la relation (I.10) s'écrit :

$$\tau = \frac{3F}{4bh^3} (h^2 - 4y^2)$$

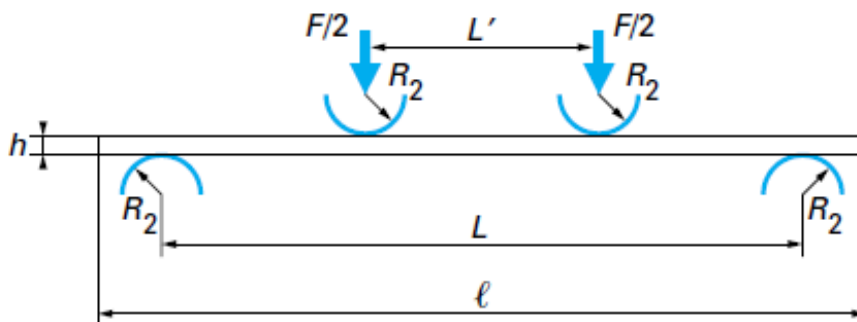
Pour  $y = \frac{h}{2}$  la contrainte tangentielle est nulle.

Pour  $y = 0$  (fibre neutre, la contrainte est maximale) la contrainte tangentielle est maximale :

$$\tau_{max} = \frac{3F}{4bh}$$

### I.3.3 Essai de flexion quatre points

Pour éviter l'influence des contraintes de cisaillement (sur la déformée et le mécanisme de rupture) qui se superpose aux contraintes normales de flexion, on utilise quelques fois la méthode de flexion quatre points pour laquelle l'effort tranchant est nul dans la zone des contraintes maximales. L'essai de flexion à quarts points consiste à exercer entre les appuis deux points d'applications de la charge [8].



**Figure I.7 :** Essai de flexion quatre points, selon EN ISO 14125.

Le montage couramment utilisé consiste à transmettre les charges par l'intermédiaire d'une poutre de charge reposée sur deux galets sur la partie extérieure de l'éprouvette ; n'importe quelle position peut être adoptée pour l'application des charges pour autant que ces charges soient à égale distance des supports [5].

Dans ce cas, la contrainte normale, s'exprime par :

$$\sigma = \frac{3}{2} \left( \frac{F(L-L')}{bh^2} \right) \quad (\text{I.11})$$

### I.3.3.1 Étude théorique

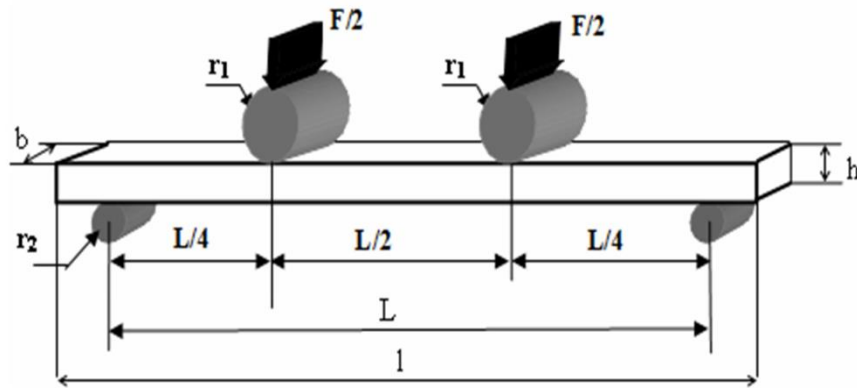


Figure I.8 : d'essai de flexion quatre points.

Les réactions aux appuis sont :

$$R_A = R_B = \frac{F}{2}$$

Pour l'effort tranchant on a :

$$0 \leq x \leq L/4 : T = F/2$$

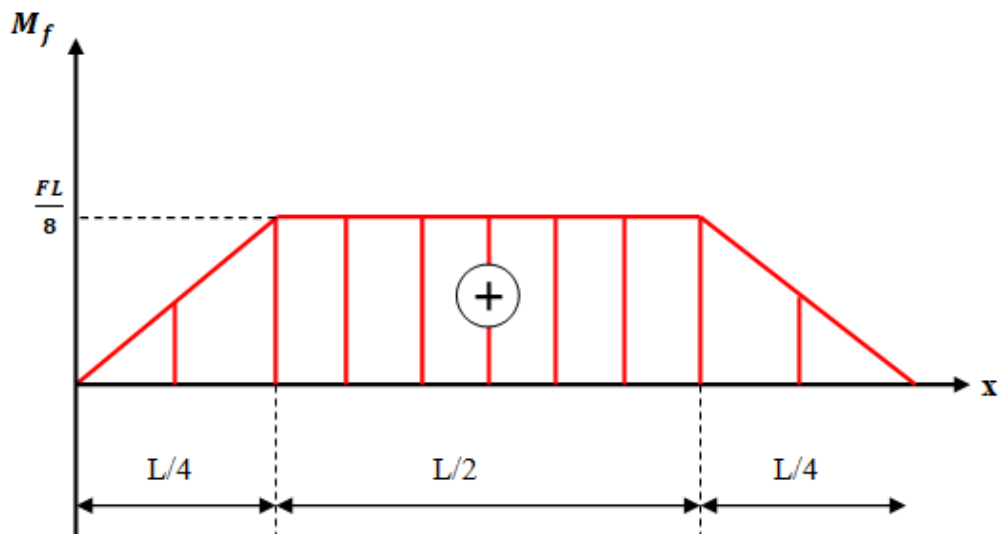
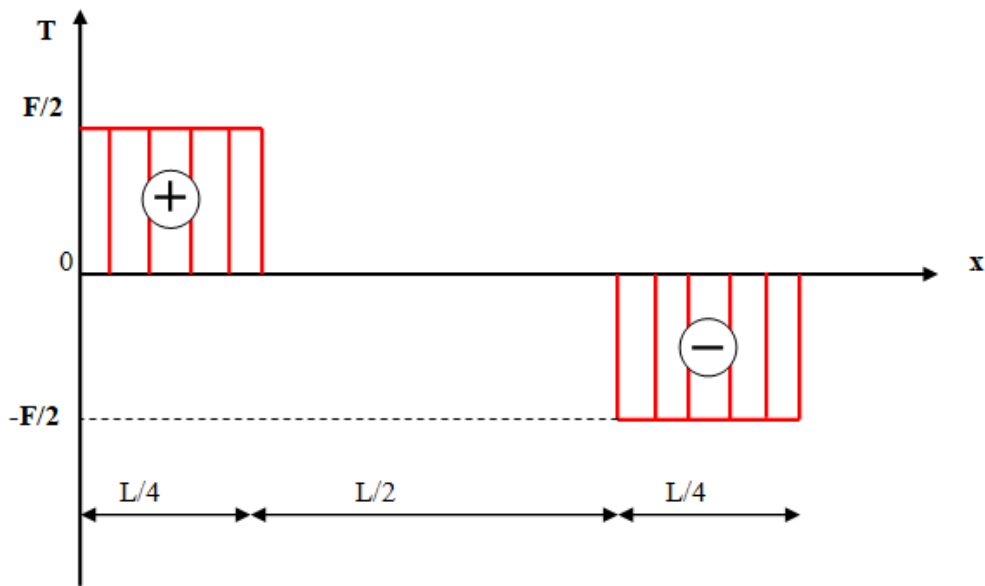
$$L/4 \leq x \leq L/2 : T = 0$$

## Essais mécanique

$$\text{Pour : } 0 \leq x \leq \frac{L}{4} \Rightarrow M_f = \frac{F}{2} \cdot x \Rightarrow \begin{cases} x = 0 : M_f = 0 \\ x = \frac{L}{4} : M_f = \frac{FL}{8} \end{cases}$$

$$\text{Pour : } \frac{L}{4} \leq x \leq \frac{L}{2} \Rightarrow \begin{cases} x = \frac{L}{4} : M_f = \frac{FL}{8} \\ x = \frac{L}{2} : M_f = \frac{FL}{8} \end{cases}$$

Le diagramme des efforts tranchants et des moments fléchissant :



## Essais mécanique

Pour  $x = \frac{L}{4}$  la contrainte normale maximale s'écrit :

$$\sigma = \frac{3FL}{4bh^2}$$

La flèche maximale s'écrit :

$$Y_{max} = \frac{11 FL^3}{64 E bh^3}$$

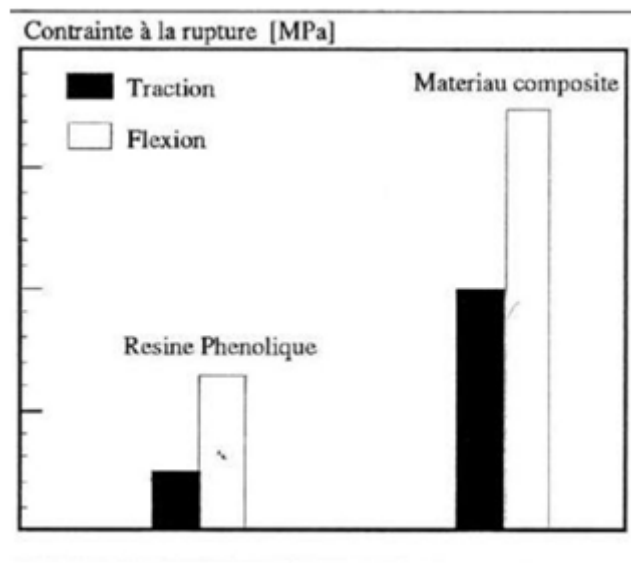
Le module de Young :

$$E = \frac{11 FL^3}{64 Y_{max} bh^3}$$

L'expression de la déformation maximale :

$$\varepsilon = \frac{48 Y_{max} h}{11L^2}$$

Cependant plusieurs recherches ont montré qu'il existe souvent un écart entre les valeurs des contraintes à la rupture, mesurées par l'essai de flexion et l'essai de traction. Ceci pose le problème de la validité des résultats des essais de flexion; plusieurs recherches quantitatives contribuent actuellement à modéliser ces phénomènes. Notamment celle de G. Dreux qui consiste à utiliser le coefficient correcteur 0.6 dans le cas des bétons [5].



**Figure I.9 :** Histogramme des contraintes à la rupture de certains matériaux testés en flexion 3 points et en traction.

## I.4 Essai de compression

L'essai de compression est l'un des essais les plus faciles à réaliser : il consiste à soumettre une éprouvette de forme cylindrique ou prismatique, placée entre les plateaux d'une presse, à deux forces axiales égales et directement opposées, qui tendent à la comprimer. Si le matériau étudié est ductile, la rupture ne peut être atteinte avec ce test. L'essai de compression est surtout utilisé pour déterminer la contrainte de rupture des matériaux fragiles (céramiques, pierres, fontes, ...) [9].

Si l'éprouvette est trop haute par rapport à son diamètre, il y a risque d'apparition d'une instabilité élastique ; pour éviter ce problème le rapporte  $h/b$  est maintenue inférieur à 3 [1].

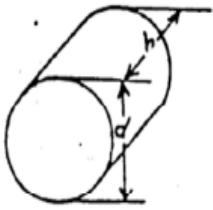
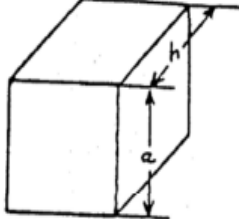
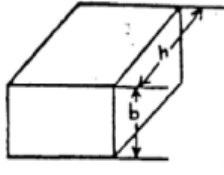
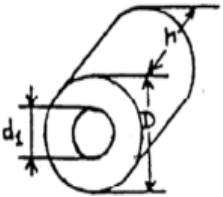


Figure I.10 : Machine d'essai de compression.

### I.4.1 Eprouvette de compression

L'éprouvette doit être constituée d'un cylindre droit, d'un prisme droit ou d'un tube droit. Les extrémités des éprouvettes doivent être parallèles entre elles et perpendiculaires à la direction de l'application de l'effort.

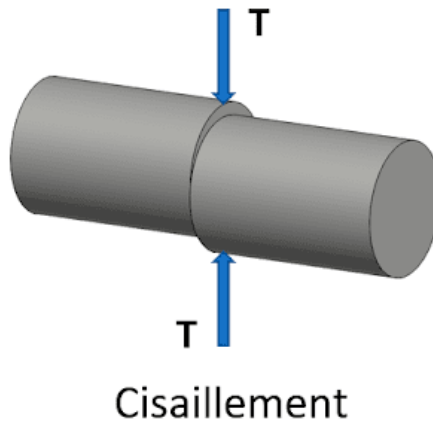
Dans le cas où un flambage des éprouvettes se produit au cours de l'essai, le rapport d'effilement doit être réduit ; ce qui conduit à des éprouvettes de hauteur  $h_1$ . (Tableau I.3)

Cylindrique	Prisme carré	Prisme rectangulaire	Tube cylindrique
			
$h = 2,5 \cdot d$	$h = 2,9 \cdot a$	$h = 2,9 \cdot b$	$h = 2,5\sqrt{D^4 + d^2}$
$h_1 = 1,5 \cdot d$	$h_1 = 1,74 \cdot a$	$h_1 = 1,74 \cdot b$	$h_1 = 1,5\sqrt{D^4 + d^2}$

**Tableau I.3 :** Forme et dimension normalisées de l'éprouvette compression.

## I.5 Essai de cisaillement

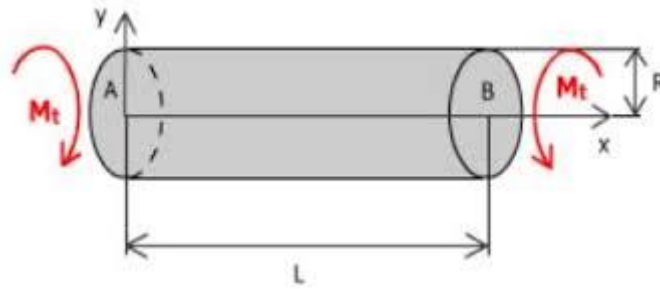
Un essai de cisaillement implique que les sollicitations soient tangentielles à la surface d'application et qu'elles soient parfaitement égales en tout point de cette surface. Il ne doit y avoir aucune sollicitation perpendiculaire à cette surface. C'est un essai très intéressant pour évaluer un collage ou une liaison céramo-métallique [10].



**Figure I.11 :** Essai de cisaillement.

## I.6 Essai de torsion

C'est une méthode utilisée pour caractériser le comportement d'un matériau soumis à une charge de torsion. Les résultats de l'essai de torsion sont utilisés pour tracer une courbe de contrainte déformation qui permet de déterminer la limite d'élasticité, le module d'élasticité en torsion, le module de rupture en torsion et la résistance à la torsion [9].



**Figure I.12 :** Schéma de l'essai de torsion

# **Chapitre II : Les capteurs à jauges d'extensométrie**

## II.1 Introduction

Les nouvelles exigences imposées aux systèmes industriels dans leur fonctionnement et dans la qualité de leur production, nécessitent une stratégie très élaborée dans la maîtrise de ces installations. Tous la difficulté est de posséder des informations pertinentes et fiables qui permettent de générer une action correctrice efficace. Les capteurs sont ces pourvoyeurs d'information.

Les extensomètres à fils résistants, que l'on désigne aussi sous le nom de jauges de contrainte, furent inventés pour mesurer les déformations des structures en vue d'en évaluer l'état de contraintes. Il s'agit de petits circuits électriques très fins qui, collés sur les pièces à étudier, en subissent les déformations, ce qui entraîne une variation de leur résistance électrique. Les mesures électriques peuvent être très précises et très sensibles puisque l'on atteint facilement des déformations de l'ordre du micromètre par mètre.

La fidélité des jauges permet dès l'origine d'envisager leur usage pour fabriquer des capteurs. Avec les mêmes jauges et la même instrumentation en aval, il est possible d'imaginer de nombreux types de capteurs.

## II.2 Les capteurs

Un capteur est un dispositif qui sous l'effet d'une grandeur physique que l'on souhaite connaître et caractériser délivre une grandeur physique exploitable (signal électrique par exemple). On parle aussi de transducteur (*Figure II.1*), puisque la grandeur physique d'entrée est généralement transformée en une autre grandeur physique de sortie comme un signal électrique tel qu'un courant, une tension, une charge, une impédance, etc.

Le capteur permet de prélever une grandeur abstraite, appelée information, qui sélectionne un événement particulier parmi un ensemble d'événements possibles. Pour pouvoir être traitée, cette information sera portée par un support physique, appelé alors le signal. L'information délivrée par un capteur pourra être logique (2 états), numérique ou analogique. D'une façon générale, les capteurs peuvent être classés selon deux critères [11] :

- Les grandeurs mesurées : capteur de position, de température, de vitesse, de force, de pression, etc.
- Les différents types d'informations délivrées : pour tous les capteurs qui envoient des valeurs binaires (capteur Tout Ou Rien ~ TOR), digitales ou analogiques/numériques.

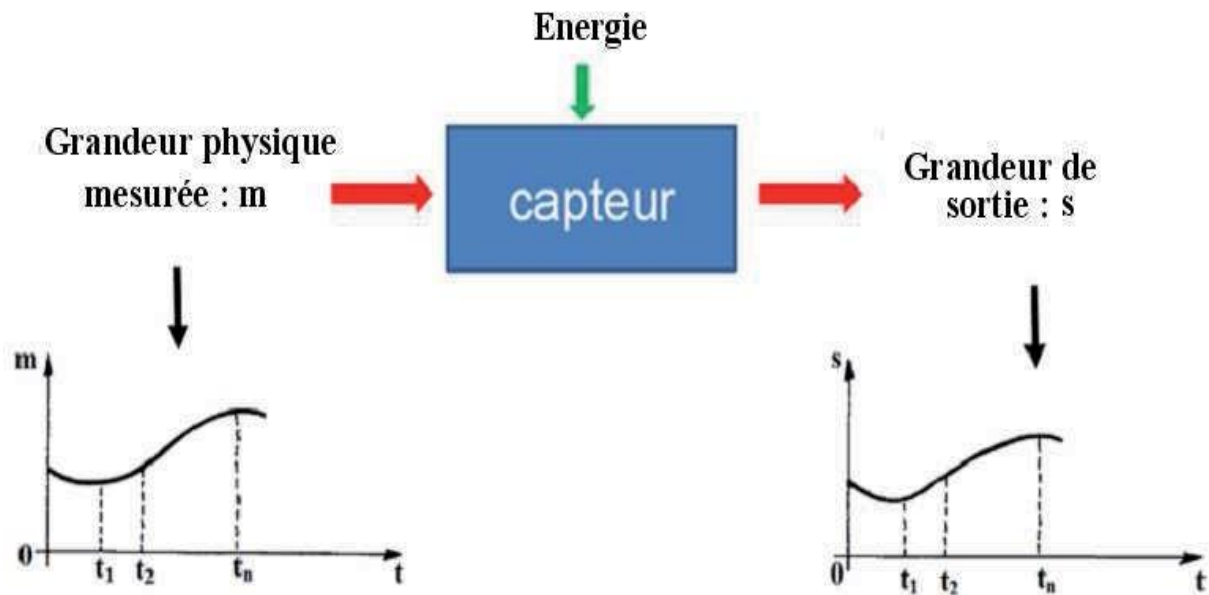


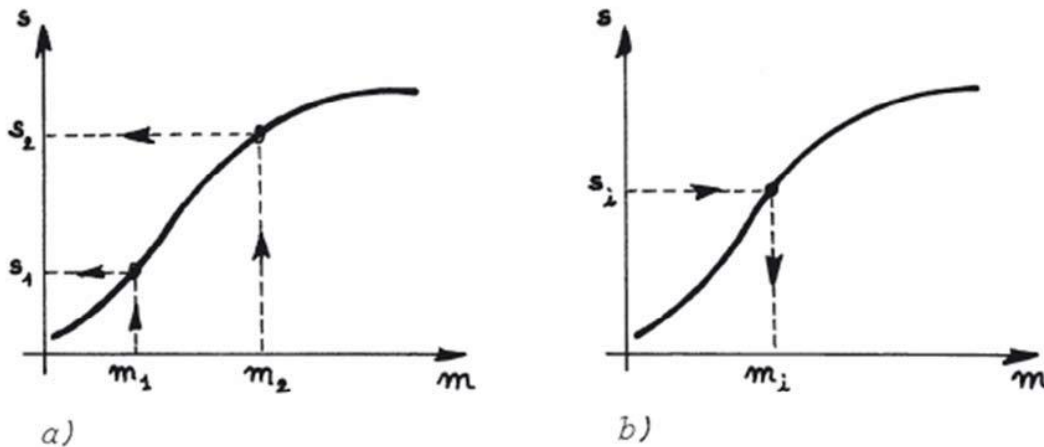
Figure II.1 : Principe d'un capteur.

### II.2.1 Acquisition de données

Quel que soit le domaine d'emploi, un capteur n'est pas utilisé seul, il intervient dans une chaîne dite chaîne d'acquisition ou de mesure.

L'acquisition se fait par le biais d'un transducteur, comme par exemple une jauge de déformation. Le signal mécanique (un allongement) est transformé en signal électrique (une variation de résistance). Le transducteur est conditionné de manière à permettre la lecture de l'information qu'il contient. Dans le cas de la jauge, il s'agit d'un pont de Wheatstone, puis d'une carte d'acquisition. L'ensemble des éléments entrant dans le processus d'acquisition constitue la chaîne de mesure.

Ensuite, un étalonnage permet de convertir la différence de potentielle à la grandeur mécanique souhaitée (le mesurande). Il s'agit d'utiliser un modèle correspondant à la chaîne de mesure ou un étalonnage expérimental [12].

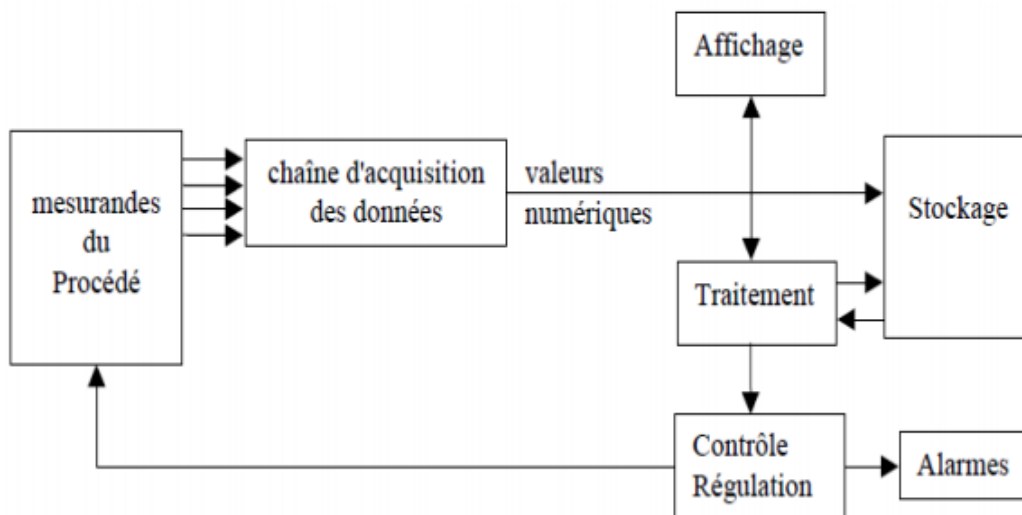


**Figure II.2 :** Courbe d'étalonnage d'un capteur : a) son établissement, à partir de valeurs connues du mesurande  $m$ ; b) son exploitation, à partir des valeurs mesurées de réponse  $s$  du capteur.

### II.2.2 Chaîne d'acquisition

#### II.2.2.1 Rôle et construction

Une chaîne d'acquisition recueille les informations nécessaires à la connaissance et au contrôle d'un procédé : elle délivre ces informations sous une forme appropriée à leur exploitation.



**Figure II.3 :** Rôle et construction d'une chaîne d'acquisition.

## Les capteurs a jauge extensometrie

---

La chaîne de mesure est constituée, en particulier, de blocs ou d'éléments derrière le capteur destinés à traiter le signal délivré soit par le capteur actif, soit par l'ensemble capteur passif plus conditionneur. En sortie de la chaîne, le signal est traité pour aboutir à sa mesure. Une chaîne de mesure doit pouvoir assurer au moyen de dispositifs appropriés les fonctions suivantes :

- **L'extraction de l'information** : concernant chacune des grandeurs physiques à connaître et la traduction en signal électrique au moyen de capteurs et de conditionneurs.
- **Le traitement analogique du signal** : afin d'éviter la dégradation du signal par le bruit et les parasites : amplification, filtrage.
- **La sélection** : à l'aide d'un multiplexeur parmi l'ensemble des signaux disponibles du seul signal requis.
- **La conversion du signal sous forme numérique** : adaptée au ordinateur chargé de l'exploiter, au moyen de l'échantillonneur bloqueur et du convertisseur analogique numérique.
- **La coordination des opérations** : précédente est assurée par un ordinateur, qui peut être chargé de divers traitements sur les signaux numériques destinés à faciliter leur exploitation (linéarisation) ou corriger des défauts d'appareillage (dérives thermiques compensées après auto-zéro et auto étalonnage par exemple).

La conception d'une chaîne doit satisfaire à des conditions imposées par l'application envisagée, définies par le cahier des charges, et qui concernent en particulier : l'étendue de mesure, la précision, la rapidité, la résolution, l'immunité aux grandeurs d'influence de l'environnement de mesure [13].

### II.2.3 Les principaux composants de la chaîne d'acquisition

- **Le capteur** : Il est l'interface entre le monde physique et le monde électrique. délivre un signal électrique qui est l'image du phénomène physique que l'on souhaite numériser.
- **Le conditionneur** : le conditionneur a pour rôle d'apporter l'énergie nécessaire pour transformer la variation d'impédance en une grandeur électrique. Il s'agit pour les capteurs résistifs soit d'un montage diviseur de tension ou potentiométrique soit d'un

## Les capteurs a jauge extensometrie

pont de Wheatstone. S'il s'agit de capteur actif, il n'est pas nécessaire d'utiliser un conditionneur, le signal issu est identique à celui issu d'un générateur.

- **L'amplificateur du signal** : c'est un élément indispensable lorsque le signal de sortie du conditionneur est faible, ce qui est le cas le plus fréquent. Sachant que ces signaux de sortie sont de l'ordre de quelques millivolts ou microampères, ou moins, il est nécessaire de les amplifier dans des rapports de 10 à 1000, ou plus. Après amplification, on atteint des tensions comprises généralement entre 0 et 5 ou 10 V. Ces signaux amplifiés sont alors dirigés vers les éléments suivants de la chaîne de mesure.
- **Le filtre** : son rôle est de limiter le contenu spectral du signal aux fréquences qui nous intéressent. Ainsi il élimine les parasites.
- **L'échantillonneur- bloqueur** : L'échantillonneur a pour rôle de prélever, à chaque période d'échantillonnage, la valeur du signal. Par la suite, il l'associe d'une manière quasi systématique à un bloqueur qui va la figer pendant le temps nécessaire à la conversion.
- **Le convertisseur analogique numérique (CAN)** : son rôle est de transformer le signal analogique, signal continument variable pouvant prendre une infinité de valeurs, en un signal numérique, signal discontinu, pouvant être représenté au moyen des données binaires (0 et 1) [14].

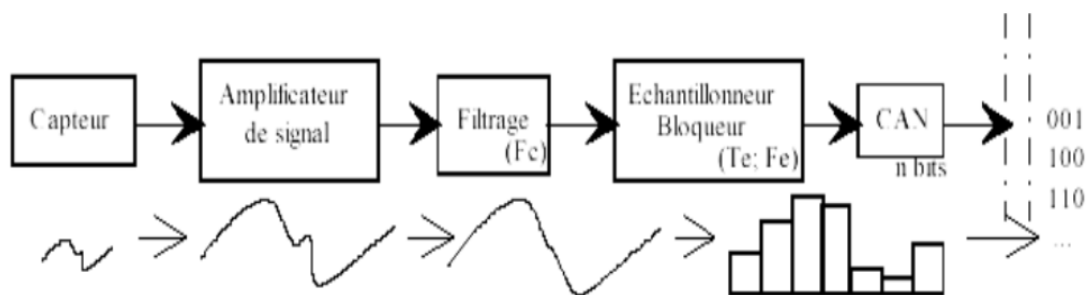


Figure II.4 : Les éléments d'une chaîne d'acquisition.

### II.2.4 Les caractéristiques métrologiques des capteurs

#### - *Réponse statique d'un capteur*

A chaque mesurande  $m$  est associé un capteur dont le rôle est de traduire ce mesurande en une grandeur électrique  $E(m)$  qui peut être une tension, un courant, une charge ou encore une impédance. Lorsqu'on trace la courbe  $E(m)$ , implicitement on suppose :

- que chaque point de la courbe correspond à une position d'équilibre (statique).
- que toutes les grandeurs d'influence (température, humidité, ...) sont fixes.

#### - *Grandeurs d'influence*

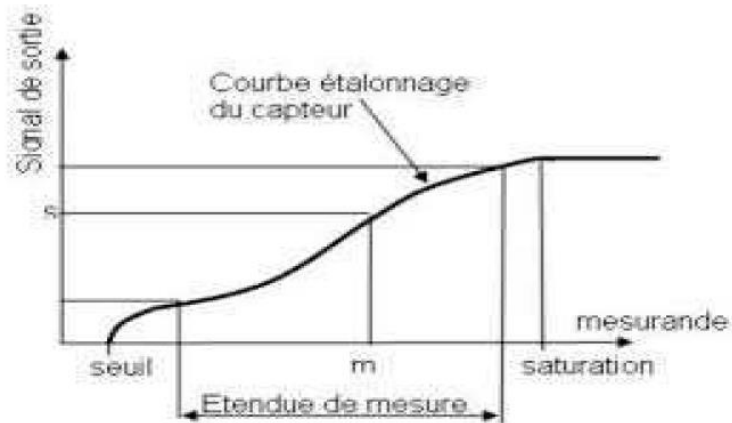
La relation  $E = F(m)$  entre mesurande et grandeur électrique n'est de cette forme que dans le cas idéal. En réalité, beaucoup d'éléments autres que le mesurande peut modifier la grandeur  $E$ . La relation est de la forme :  $E = F(m, g_1, g_2, \dots)$  où les  $g_i$  sont les grandeurs d'influence. Les grandeurs d'influence sont variables d'un capteur à l'autre car elles dépendent du processus physique mis en œuvre. On retrouve les grandeurs du type mécanique ou thermique mais aussi des grandeurs électriques.

#### - *L'étendue de mesure*

L'étendue de mesure est définie sur la courbe d'étalonnage du capteur (ci-dessous). A l'extérieur de cette zone se trouvent deux valeurs particulières : le seuil et la saturation. Le phénomène de saturation est fréquemment rencontré en physique. Même si la valeur du mesurande augmente, la grandeur de sortie ne peut dépasser une valeur maximale  $E_{max}$  :

Pour  $m > m_{max}$   $E = E_{max}$  On ne peut donc pas effectuer du mesurage pour des valeurs au-dessus de  $m_{max}$ . L'origine peut être mécanique (butées...) ou électrique (limitation en courant ou tension...). La saturation n'existe pas forcément, et l'on peut arriver dans le domaine de détérioration du capteur sans atteindre de saturation.

## Les capteurs a jauge extensometrie

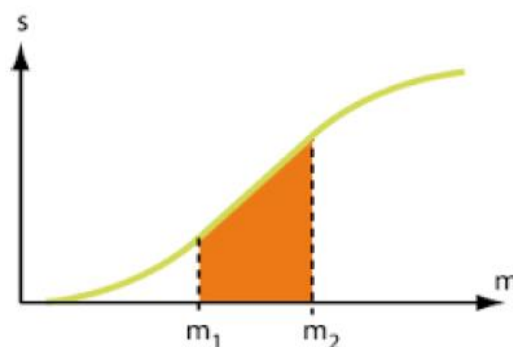


**Figure II.5 :** Etendue de mesure d'un capteur.

Le seuil correspond à la valeur minimale du mesurande nécessaire pour obtenir une grandeur de sortie non nulle : pour  $m < m_0$   $E = 0$ . Cet effet de seuil peut provenir fortement, du fonctionnement des diodes... En résumé, on ne peut mesurer alors que des mesurandes comprises entre  $m_0$  et  $m_{max}$ . La portion linéaire de la courbe d'étalonnage est alors, plus réduite.

### - *Domaine de linéarité*

Le domaine de linéarité est le domaine pour lequel la courbe d'étalonnage est une portion de droite. Dans ce domaine, la variation de la grandeur de sortie est proportionnelle à la variation du mesurande. Si le capteur est parfaitement linéaire, la courbe d'étalonnage est une droite.



**Figure II.6 :** Domaine de linéarité d'un capteur.

Dans la réalité, un capteur décrit comme linéaire présente toujours un écart par rapport à la linéarité.

## Les capteurs a jauge extensometrie

### - *La précision*

C'est un paramètre qui n'apparaît pas directement sur la courbe de réponse mais qui est une caractéristique de la réponse. C'est la plus petite variation de mesurande que peut détecter le capteur.

### - *La sensibilité*

La sensibilité ( $S$ ) d'un capteur est une grandeur qui donne la valeur de la grandeur de sortie en fonction du mesurande.

$$S = \frac{\Delta g}{\Delta m}$$

Où  $g$  est la grandeur de sortie et  $m$  le mesurande. Si la caractéristique du capteur est linéaire, la sensibilité est une constante. Cependant, dans le cas général, la caractéristique qui donne la sortie en fonction du mesurande n'est pas linéaire, la sensibilité d'un capteur n'est pas une constante. Elle n'est valable alors qu'autour d'un point de repos. Elle est alors égale à la pente au voisinage du point de repos de la fonction :

$$g = f(m, \theta)$$

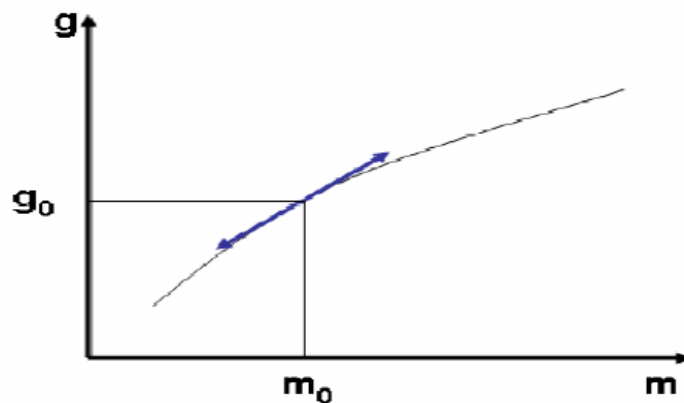


Figure II.7 : Sensibilité d'un capteur.

### - *Rapidité – temps de réponse*

Jusqu'à maintenant, on ne s'est intéressé qu'au régime permanent. Or, il y a toujours un régime transitoire avant l'établissement de ce régime permanent. Il faut donc évaluer le temps au bout

## Les capteurs a jauge extensometrie

duquel ce régime transitoire devient négligeable. La rapidité est caractérisée par le temps que met le capteur à réagir à une variation brusque du mesurande [15].

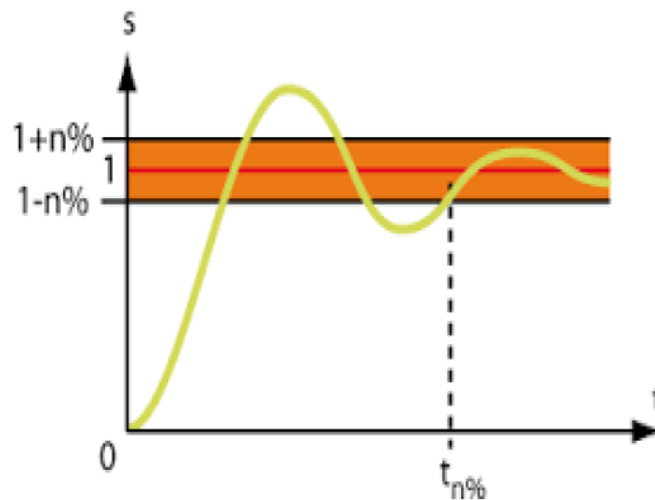


Figure II.8 : Temps de réponse d'un capteur.

### II.2.5 Types de capteurs

#### II.2.5.1 Types de capteurs suivant l'information délivrée

Il existe deux grandes familles de capteurs qui sont :

- *Capteurs analogiques*

Ce type de capteurs fournit un signal analogique en fonction d'une grandeur physique, électrique ou mécanique. C'est la catégorie la plus importante. Il y a une relation mathématique entre la grandeur d'entrée  $E$  et le signal de sortie :  $S = f(E)$ .

Cette famille se décompose en deux grands groupes :

- *Les capteurs physiques*

Sont caractérisés par une relation permanente entre la grandeur à mesurer et le signal de sortie du capteur.

- *Les capteurs chimiques*

Ne possèdent pas cette caractéristique et vont donc impliquer un processus d'utilisation séquentiel beaucoup plus complexe et beaucoup plus susceptible de conduire à des erreurs d'interprétation.

## Les capteurs a jauge extensometrie

Quelques principaux domaines d'application des capteurs sont représentés dans le (Tableau II.1) [15].

Capteurs Physiques	Capteurs Chimiques
Capteurs optique	Capteurs de gaz
Capteurs de déformation (force, pression, accélération, etc.)	Capteurs d'humidité
Capteurs de température	Capteurs ioniques
Capteurs magnétique	Capteurs biochimiques
Capteurs acoustiques	

**Tableau II.1:** Quelques principaux domaines d'application des capteurs.

### - *Capteurs logiques*

Ils sont représentés par deux états (0 et 1) dont le modèle est le contact ouvert ou fermé (fin de course, capteur de niveau...). C'est la catégorie appelée (Key sensor) en anglais.

Ils interviennent le plus souvent en tant qu'éléments de sécurité,  $S = 0$  ou  $1$ .

### *II.2.5.2 Types de capteurs suivant la grandeur physique mesurée délivrée*

#### - *Capteurs actifs*

Fonctionnant en générateur, dont une partie de l'énergie physique prélevée sur le mesurande est transformée directement en énergie électrique qui constitue le signal de sortie.

Ce signal est un courant, une tension ou une quantité d'électricité. Les signaux de sortie délivrés par les capteurs actifs sont de très faible puissance. Ils sont dits de bas-niveaux et doivent être amplifiés pour pouvoir être ensuite exploités.

## Les capteurs a jauge extensometrie

Les effets physiques qui assurent la conversion de la forme d'énergie propre au mesurande (énergie thermique, mécanique ou rayonnement), en énergie électrique sont [16]:

Mesurande	Effet utilisé	Grandeurs de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Pyroélectricité Photoémission Effet photovoltaïque Effet photo-électromagnétique	Charge Courant Tension Tension
Force Pression Accélération	Piézo-électricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant)	Effet Hall	Tension

**Tableau II.2:** effet et grandeurs de sortie d'un capteur.

### - *Capteur passifs*

Doivent être alimentés par une source d'énergie électrique extérieure, cette source d'énergie peut être une tension continue ou un courant. Ce signal de sortie est également une tension continue en module.

Ces modules de fonctionnement correspondent à des principes de base et s'adaptent essentiellement aux capteurs à sortie numérique et logique.

Il s'agit d'impédance dont l'un des paramètres déterminants est sensible au mesurande. Dans l'expression littérale d'une impédance sont présents des termes liés d'une part à sa géométrie et ses dimensions et d'autre part aux propriétés électriques des matériaux : la résistivité  $\rho$ , la perméabilité magnétique  $\mu$  et la constant diélectrique  $\epsilon$ .

La variation d'impédance peut donc être due à l'action du mesurande soit sur les caractéristiques ou les dimensions, soit sur les propriétés électriques des matériaux, soit rarement sur les deux simultanément.

## Les capteurs a jauge extensometrie

---

Les paramètres géométriques ou dimensionnels de l'impédance peuvent varier si le capteur comporte soit un élément mobile, soit un élément déformable.

Dans le premier cas, à chaque position de l'élément mobile correspond une valeur de l'impédance et la mesure de celle-ci permet de connaître la position ; c'est le principe d'un grand nombre de capteurs de position ou de déplacement : potentiomètre, inductance à noyau mobile, condensateur à armature mobile.

Dans le second cas, la déformation résulte de forces appliquées soit directement soit indirectement au capteur : armature d'un condensateur soumis à une pression différentielle, jauge d'extensomètre lié rigidement à une structure soumise à contrainte. La modification d'impédance qu'entraîne la déformation du capteur est liée aux efforts auxquels celui-ci se trouve soumis et elle en assure une traduction électrique.

Les propriétés électriques des matériaux, selon la nature de ces dernières, peuvent être sensibles à des grandeurs physiques variées : température, éclairage, pression, humidité...

Si l'une de ces grandeurs varie l'impédance variera avec la variation de celle-ci [16].

### II.3 Les jauges extensomètre

La jauge de déformation est constituée par un fil conducteur replié en accordéon et colle entre deux feuilles fines isolantes. La jauge est parfaitement collée sur la pièce dans le sens de l'allongement à mesurer. Le fil qui constitue la jauge s'allonge aussi comme la pièce. En fait, on remplace la mesure de la variation de la longueur par une mesure de la résistance électrique du fil constituant la jauge. La relation qui définit la résistance d'un fil est donnée par [5]:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

Où :

$R$  : est la résistance électrique.

$\rho$  : La résistivité du matériau.

$L$  : la longueur du fil.

$S$  : la section du fil.

Pour des variations relatives de résistance, on obtient :

## Les capteurs a jauge extensometrie

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S}$$

La variation de la résistivité peut être négligée. La variation relative de la section  $\Delta S/S$  peut s'exprimer en fonction de la variation relative du diamètre par la relation suivante :

$$\frac{\Delta S}{S} = 2 \frac{\Delta d}{d}$$

Entre  $\Delta d/d$  et  $\Delta L/L$ , il existe une relation de proportionnalité telle que :

$$\frac{\Delta d}{d} = -\nu \frac{\Delta L}{L}$$

$\nu$  Représente le coefficient de poisson.

Ainsi la variation de la résistance électrique peut s'exprimer par l'équation suivante :

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{\Delta L}{L}\right) (1 + 2\nu) = K \frac{\Delta L}{L}$$

Cette relation montre que l'on peut remplacer la mesure de la variation de longueur par la mesure de la variation de la résistance électrique.  $K$  est une constante caractérisant la jauge. Sa valeur est donnée par le fabricant. La mesure de  $\Delta R/R$  peut se faire à l'aide d'un appareillage nécessitant dans les plus par des cas un pont de Wheatstone [5].

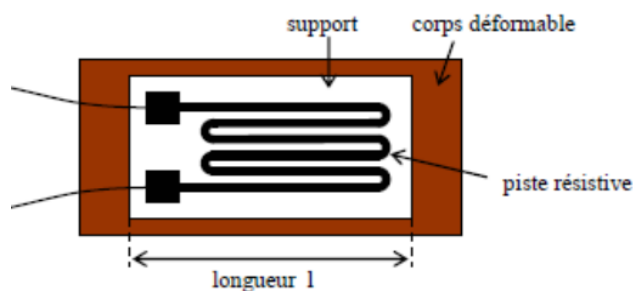


Figure II.9 : jauges extensomètre.

### II.3.1 Corps d'épreuve

Par des dispositifs mécaniques particuliers, on peut, sous l'effet du phénomène physique à mesurer, provoquer la déformation d'une pièce dite corps d'épreuve (cylindre, lame, membrane, etc.). Des jauges collées sur le corps d'épreuve en détectent les déformations. Leurs variations de résistance sont liées aux variations de la grandeur physique, dont la mesure se ramène ainsi à celle d'une résistance électrique.

## Les capteurs a jauge extensometrie

Outre les cas simples représentés par les schémas du (tableau II.3), on peut imaginer des capteurs dont le corps d'épreuve détecte simultanément plusieurs paramètres. Ceci par une disposition judicieuse des jauges, ses composantes sont mesurées séparément [17].

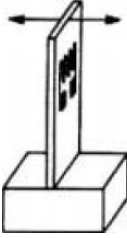
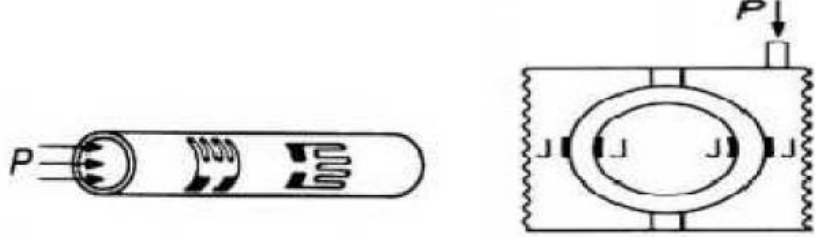
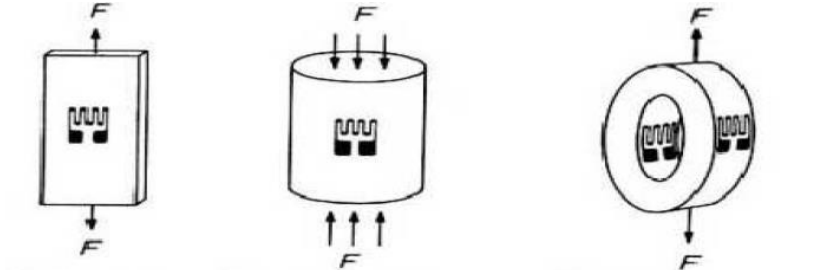
Grandeur à mesurer	Schémas associés
Déplacement	 <p data-bbox="922 786 1118 819">Ⓐ lame fléchie</p>
Pression	 <p data-bbox="427 1249 699 1323">Ⓒ tube mince sous pression</p> <p data-bbox="906 1227 1278 1335">Ⓔ capsule anéroïde agissant sur un anneau dynamométrique</p>
Force	 <p data-bbox="496 1756 655 1800">Ⓚ lame en traction</p> <p data-bbox="715 1756 943 1800">Ⓛ cylindre en compression</p> <p data-bbox="1050 1756 1334 1800">Ⓝ anneau dynamométrique</p>

Tableau II.3: Exemples de capteurs extensométriques [17].

## II.3.2 Schéma électrique des capteurs extensométriques

### II.3.2.1 Principe de montage en pont

Soit un circuit constitué par quatre résistances égales  $R_1, R_2, R_3, R_4$  montées en pont (figure II.2). Si nous l'alimentons par une source de courant  $P$  suivant une diagonale, nous avons à l'équilibre une tension nulle entre  $B$  et  $D$ . La variation de l'une quelconque des résistances fait apparaître une tension  $V_s$  entre  $B$  et  $D$  qui peut être mesurée par un instrument  $G$ . Pour de très faibles variations de résistance (de l'ordre de quelques microhms dans le cas des jauges), la tension de sortie  $V_s$  est pratiquement proportionnelle aux variations relatives de résistance  $\Delta R / R$  de chacune des jauges. Négligeant les termes d'ordre supérieur, elle vaut [17] :

$$V_s = \frac{V_e}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (\text{II.1})$$

Le montage peut être avec :

- une seule jauge active : c'est un quart de pont.
- deux jauges actives : demi-point.
- quatre jauges actives : pont complet.

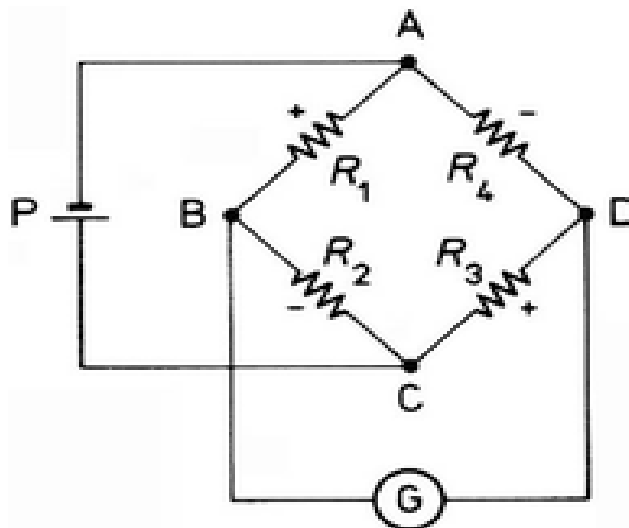


Figure II.10 : Montage en pont de Wheatstone.

## Les capteurs a jauge extensometrie

---

Les signes alternés + et – de cette équation caractérisent la propriété fondamentale des ponts : deux résistances adjacentes agissent en sens inverse, cependant que deux résistances opposées agissent dans le même sens.

Un capteur est constitué par un tel pont dont une, deux ou quatre des résistances sont des jauges électriques collées sur le corps d'épreuve, les autres étant des résistances fixes. Le cas le plus fréquent est celui de quatre jauges. D'après la règle des signes on voit qu'il est possible d'ajouter ou de retrancher les effets séparés des jauges. C'est ainsi que sont éliminés les phénomènes parasites au profit de la grandeur recherchée.

La tension de sortie  $V_s$  peut être exploitée de différentes manières :

- on peut la mesurer directement à l'aide d'un millivoltmètre ;
- on peut la comparer, par méthode d'opposition, à une tension de référence ;
- on peut l'utiliser comme indication de déséquilibre pour rétablir la symétrie par variation de potentiomètres montée en parallèle sur les jauges.

Ces trois procédés sont les principes de base des instruments, mais, quel que soit le type utilisé, la règle des signes est la même. Lorsque les quatre bras du pont ne sont pas tous occupés par des jauges, on peut théoriquement les disposer à l'extérieur du capteur. Toutefois, comme l'on mesure de très faibles variations de résistance, tous les circuits qui constituent le carré ABCD du pont doivent être très stables. Une instabilité est très perturbatrice dans ce carré, alors qu'elle a moins d'importance sur les circuits extérieurs reliant les diagonales du pont à  $P$  et à  $G$ . C'est pourquoi, sauf cas de force majeure, il est préférable d'inclure les quatre branches du pont dans le corps du capteur.

La (*relation II.1*) est une approximation ne comportant que des  $\Delta R$  du premier degré, ceux de degrés supérieurs ayant été négligés. De ce fait, il s'agit d'une fonction qui ne peut être considérée comme linéaire que pour de faibles variations ( $\Delta R/R$  de l'ordre de  $10^{-6}$ ). Pour assurer une meilleure linéarité dans le cas de variations importantes, on alimente le pont non pas par une tension constante mais par intensité constante. Le choix entre ces solutions dépend de l'étendue des variations de la grandeur mesurée et de la précision requise. Nous retiendrons que les caractéristiques d'un capteur donné ne sont pas toutes intrinsèques mais dépendent aussi des instruments qui, avec lui, constituent la chaîne de mesure.

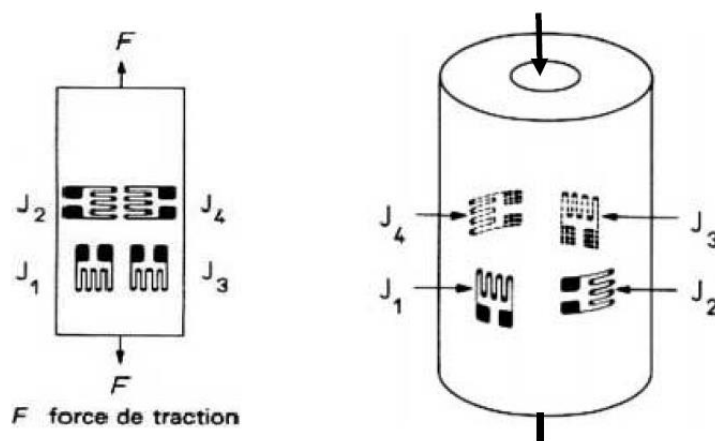
Nous retiendrons que les caractéristiques d'un capteur donné ne sont pas toutes intrinsèques mais dépendent aussi des instruments qui, avec lui, constituent la chaîne de mesure [17].

### II.3.3 Disposition des jauges sur le corps d'épreuve

D'après la (relation II.1), le signal sera maximal si l'on dispose judicieusement les jauges pour obtenir des  $\Delta R/R$  les plus importants possible.

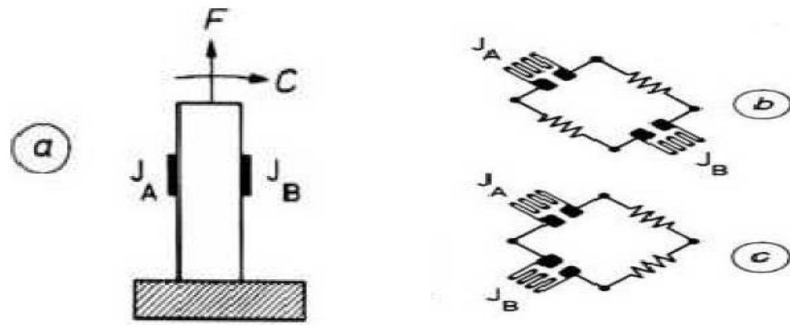
Par exemple, une pièce soumise à une traction (figure II.10) subit un allongement dans le sens de la traction et une contraction, égale à environ 30 % du précédent allongement, dans le sens perpendiculaire (effet de Poisson). En conséquence, les jauges **J1** et **J3** sont disposées longitudinalement, et **J2** et **J4** transversalement. Cela est essentiellement théorique.

Pratiquement, on dispose les jauges qui agissent dans le même sens le plus symétriquement possible : sur un cylindre par exemple, elles doivent être diamétralement opposées ; sur une lame, elles sont de part et d'autre. Ces montages symétriques ont pour effet, d'après la règle des signes de la (relation II.1), d'éliminer des effets parasites [17].



**Figure II.11 :** Disposition des jauges sur une pièce en traction et un Cylindre en compression

Autre exemple, une poutre ou une lame de section symétrique soumise à une flexion pure subit des déformations égales et de signes contraires en des points symétriques par rapport à la ligne neutre. Ainsi, les deux jauges **JA** et **JB** de la (figure II.11.a) subissent, sous l'effet du couple **C** de flexion pure, des déformations égales et de signes contraires, alors que, sous l'action d'une traction pure **F**, elles subissent des déformations égales et de mêmes signes.

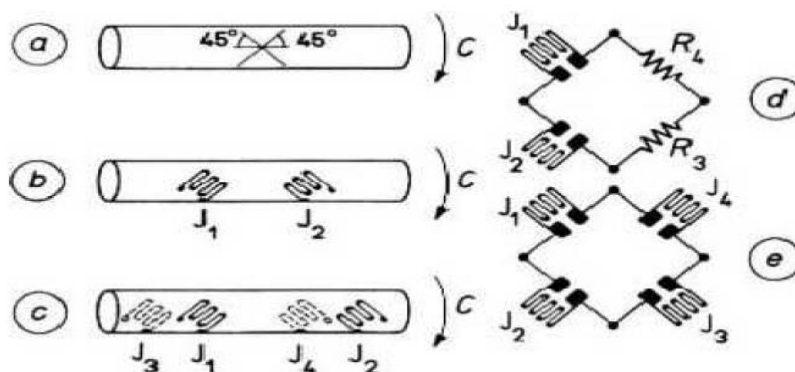


**Figure II.12 :** Disposition des jauges sur une lame et montage en pont pour Compensation des efforts.

En groupant les jauges suivant la (figure II.11.b), on obtient  $F$  à l'exclusion de  $C$ , cependant que par le montage de la (figure II.11.c) on mesure  $C$  à l'exclusion de  $F$ .

Dans ce dernier cas, on peut même doubler la sensibilité avec deux jauges supplémentaires respectivement juxtaposées à  $J_A$  et  $J_B$  et montées dans le pont, chacune en opposition à celle qui donne le même signe qu'elle. Par contre, il n'est pas possible d'obtenir un montage analogue à quatre jauges pour la seule traction. Seul le montage de la (figure II.10) est possible.

Citons comme dernier exemple, un arbre circulaire soumis à un couple  $C$  de torsion pure (figure II.12).



**Figure II.13 :** Disposition des jauges sur un arbre soumis à une torsion.

## Les capteurs a jauge extensometrie

---

L'arbre subit ses déformations maximales suivant les directions situées à 45° de la direction des génératrices (*figure II.12.a*). Ces déformations sont égales et des signes contraires.

Deux jauges **J1** et **J2** (*figure II.12.b*) placées sur la même génératrice, collées perpendiculairement l'une à l'autre à ± 45° de l'axe et câblées comme en (*figure II.12.d*), donnera une information liée au couple de torsion. Ce montage est cependant sensible à certaines flexions.

Par contre, en complétant le pont par deux jauges J3 et J4 sur la génératrice opposée (*figure II.12.c*), et en les montant comme en (*figure II.12.e*), on obtient un montage sensible à la seule torsion à l'exclusion des tractions-compressions ou des flexions [17].

### II.3.4 Conception mécanique des capteurs extensométriques

#### II.3.4.1 Calcul des capteurs

Le calcul d'un capteur, ou plus précisément de son corps d'épreuve, se ramène généralement à des cas simples de la résistance des matériaux (traction, flexion, torsion de poutres, de plaques, de membranes). Ayant choisi l'emplacement des jauges, on peut calculer, pour chacune d'elles, la déformation  $\varepsilon$  (avec son signe). Il lui correspond une variation de résistance (avec son signe) :

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (\text{II.2})$$

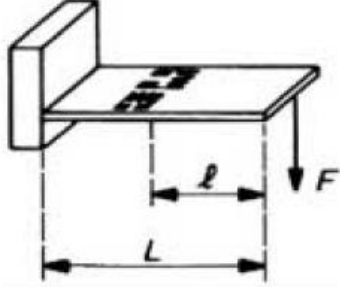
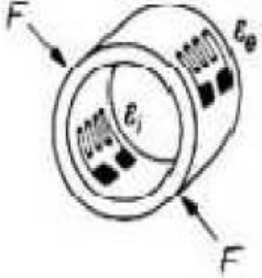

Avec **K** facteur de jauge, généralement de l'ordre de 2.

En appliquant la (*formule II.1*), on obtient le  $\Delta R/R$  total d'où, éventuellement, le signal  $V_s/V_e$  (en mV/V).

En plus du calcul des déformations aux emplacements des jauges, il faut également calculer les contraintes maximales, par exemple sur une lame encastrée, à la hauteur de l'encastrement. Enfin, il faut parfois tenir compte du déplacement du capteur. C'est ainsi que, sur certains dynamomètres, on peut être dans l'obligation de limiter le déplacement du point d'appui.

Le tableau qui suit donne des formules destinées à simplifier le calcul de quelques types de corps d'épreuve [17].

## Les capteurs a jauge extensometrie

Type de corps d'épreuve	Schémas Correspondants.	Equation de la déformation de chaque jauge.
<p style="text-align: center;"><b>Lame en flexion</b></p>		$\varepsilon_1 = \frac{6F \cdot l}{E \cdot a \cdot t^2}$ $\varepsilon_2 = -\nu \varepsilon_1$ $\omega_1 = 0.16 \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ <p><math>\omega_1</math> : Première fréquence propre.</p> <p><math>\rho</math> : Masse volumique.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Anneau dynamométrique En traction ou en compression</b></p>		$\varepsilon_e = \frac{3F \cdot R}{E \cdot a \cdot t^2} \left(1 - \frac{2}{\pi}\right)$ $\varepsilon_i = -\varepsilon_e$ $f = 1.79 \frac{FR^3}{E \cdot a \cdot t^3}$ <p><math>\varepsilon_e</math> : Déformation de la jauge extérieur.</p> <p><math>\varepsilon_i</math> : Déformation de la jauge intérieure.</p> <p>R : Rayon moyen.</p> <p>f : Flèche totale (rapprochement sur le diamètre)</p>
<p style="text-align: center;"><b>Cylindre sous pression</b></p>		$\varepsilon_1 = \frac{P \cdot R}{E \cdot t} \left( \frac{L}{L + 2R} - \frac{\nu}{2} \right)$ $\varepsilon_2 = \frac{P \cdot R}{E \cdot t} \left( \frac{1}{2} - \nu \frac{L}{L + 2R} \right)$ <p><math>\varepsilon_1</math> : Déformation de la jauge latérale.</p> <p><math>\varepsilon_2</math> : Déformation de la jauge longitudinale.</p> <p>P : pression.</p>

**Tableau II.4** : Formules utiles pour le calcul des capteurs extensométriques [14].

### II.3.4.2 Métal du corps d'épreuve

La pièce fondamentale d'un capteur est le corps d'épreuve qui subit les déformations et sur lequel les jauges sont collées. La tendance est d'en obtenir une information électrique de grande amplitude donc, d'après les formules (II.1) et (II.2), d'avoir des grandes déformations. Il faut cependant tenir compte des performances recherchées. Avec de grandes déformations, on risque des ruptures de fatigue, des déformations permanentes, des non-linéarités, qui altèrent les performances du capteur.

En conséquence, le retour au zéro d'un capteur dépend des déformations maximales appliquées. Suivant les caractéristiques exigées, on ne devra faire travailler le métal qu'à 1/5 ou même 1/10 de la limite élastique. Un acier dont la limite élastique est, par exemple, de 1000 MPa ne sera utilisé que jusqu'à 100 MPa. De plus, la linéarité du capteur dépend de la propre linéarité de la courbe contrainte-déformation du métal.

Parmi les métaux les plus recommandables pour la réalisation de corps d'épreuves, citons :

- les aciers mangano-siliceux (acier à ressorts à haute limite élastique) ;
- le bronze au béryllium ;

Encore que certaines réalisations aient pu donner satisfaction dans un domaine de précision limité, les alliages d'aluminium, malgré leurs grandes déformations, donnent de moins bons résultats que l'acier ou le bronze. De l'avis des spécialistes, les aciers à haute limite élastique et le bronze au béryllium viennent en tête de leurs préférences et, à quelques détails près, à égalité. Les résultats sont analogues. Le bronze est plus cher et d'usinage plus délicat que l'acier. En revanche, sa meilleure conductivité thermique (environ quatre fois plus grande que celle de l'acier) peut parfois être un avantage.

Le (*tableau II.5*) donne les caractéristiques des métaux considérés comme les plus satisfaisantes pour la réalisation de capteurs, dans chacune des trois catégories : aciers, bronzes, alliages d'aluminium [17].

## Les capteurs a jauge extensometrie

Caractéristiques	Aciers au Chrome- silicium- molybdène Désignation AFNOR 45 SCD 6	Bronze au béryllium Be 2 %	Alliages d'aluminium 7049A (A.Z8GU)
Masse volumique..... (en $10^3 \text{ kg /m}^3$ )	7,80	8.25	2.80
Coefficient de dilatation.....(en $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )	13	17	23.5
Module d'élasticité $E$ ..... (MPa)	220 000	130 000	72 000
Variations $\Delta E / E$ ..... (en $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )	-260	-380	-580
Coefficient de Poisson $\nu$ .....	0.285	0.34	0.34
Limite élastique à 0,2 %..... (MPa)	1 450	800	450
Déformations à la limite élastique.... ( $\mu\text{m /m}$ )	6 600	4 700	6 400
Traitements thermiques garantissant les caractéristiques ci- dessus (indications approximatives : pour les détails du traitement, s'informer auprès du producteur)	Trempe 890 °C à l'huile Revenu 2 h à 450 °C	Trempe 780 °C à l'eau Revenu 2 h à 320 °C	Trempe 460 °C à l'eau 30 à 50 °C Revenu 8 h à 130-140 °C

**Tableau II.5:** Exemples de métaux pour corps d'épreuve

# **Chapitre III : Partie pratique**

## III.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré à la description et la réalisation de notre projet, on commencera par la conception des pièces mécaniques de ce projet. Ensuite, on donnera une description concernant la réalisation des pièces, et aussi les différentes parties électroniques constituant notre banc d'essai. Cette partie regroupant la partie Software, programmation sur carte ARDUINO et Logiciel MATLAB, et la partie Hardware portera l'aspect électronique qui est le circuit de commande du moteur pas à pas, ainsi que la partie des capteurs et mesure, nous terminerons par le test de validation de notre banc d'essai.

## III.2 Cahier des charges fonctionnel :

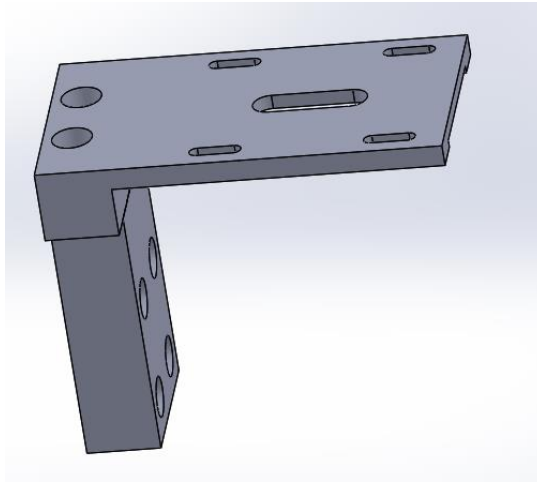
- Equiper un banc d'essai de flexion manuelle d'un moteur pas à pas.
- Commende de moteur par une carte ARDUINO.
- L'essai de flexion est réalisé suivant la norme ISO 178.
- Concevoir un concept pour réaliser des essais quatre points.
- Utiliser des capteurs extensométriques.
- Prévoir une chaine d'acquisition des données.

## III.3 Etude et conception du dispositif

### III.3.1 Solution technique proposée

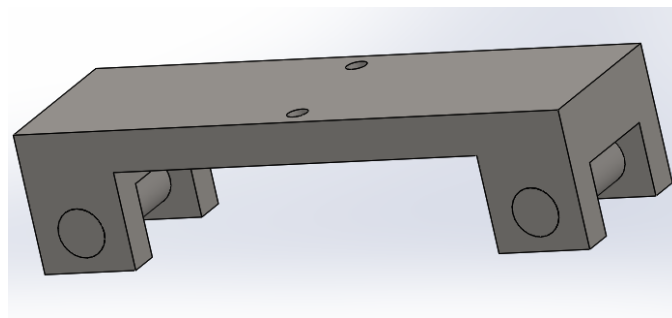
Pour répondre à l'ensemble des contraintes citées, nous avons pensé aux solutions suivantes :

- Réaliser un support moteur en aluminium sous la forme de (L) qui se fixe sur le côté du banc, puis réaliser des trous oblongs pour le réglage de l'entraxe des poulies et la fixation du moteur.



**Figure III.1** : conception du support moteur sur solidworks.

- Transmettre le mouvement rotatif de moteur à la tige filetée par le système poulie courroie.
- Réaliser un poinçon en acier qui se fixe sur le capteur de force avec deux pans pour réaliser les essais quatre points.

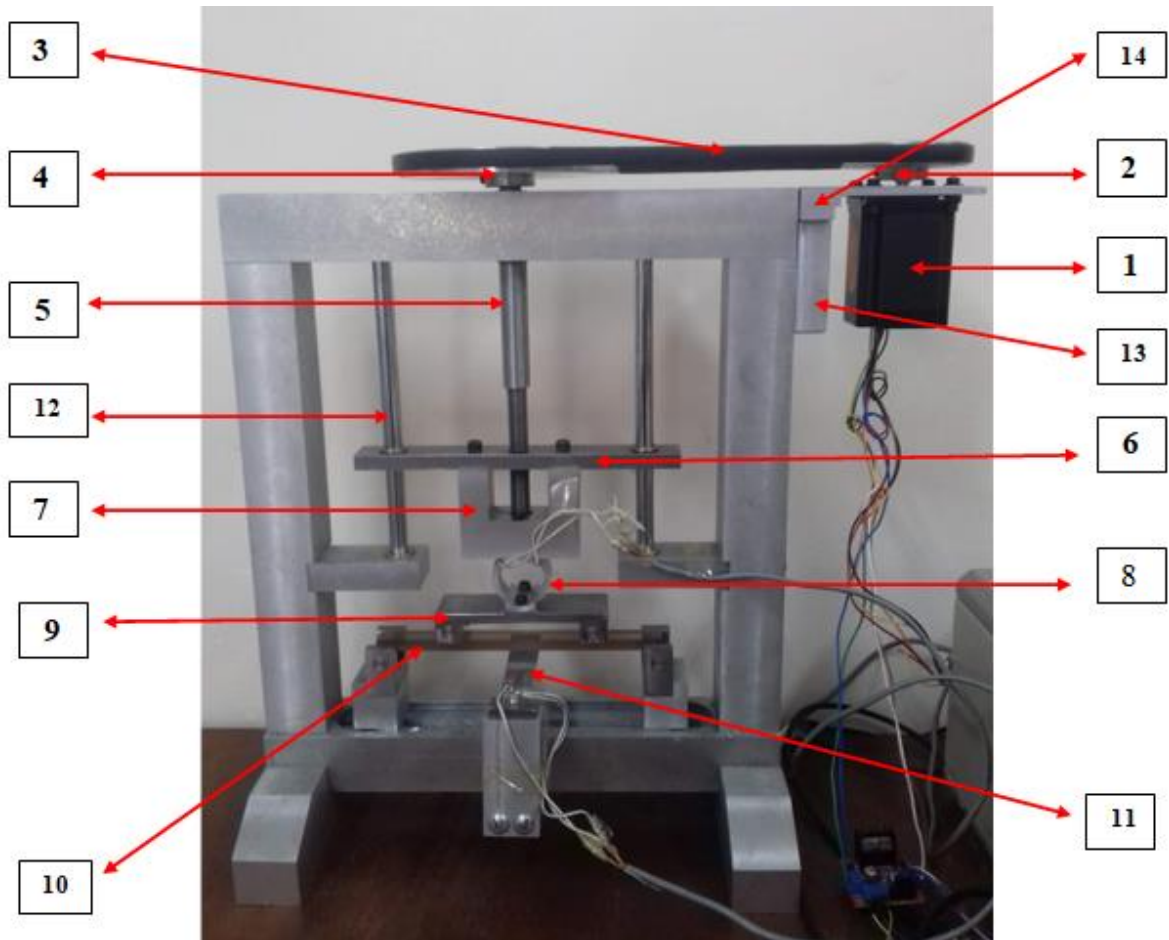


**Figure III.2** : conception de poinçon sur SOLIDWORKS.

### III.3.2 Principe de fonctionnement

Le mouvement rotatif du moteur est transmis par un système poulie-courroie à la tige filetée qui transforme ce mouvement rotatif en un mouvement de translation de la glissière, le port capteur de force et le poinçon. Ce dernier applique l'effort sur l'éprouvette. Celle-ci à son tour pousse le capteur de déformation (la lame).

## Partie pratique



**Figure III.3 : Le banc d'essai de flexion**

<b>1. Moteur pas à pas</b>	<b>8. Capteur de force</b>
<b>2. Petite poulie</b>	<b>9. Le poinçon</b>
<b>3. La courroie</b>	<b>10. l'éprouvette</b>
<b>4. Grande poulie</b>	<b>11. lame de flexion</b>
<b>5. La tige filetée</b>	<b>12. tige de guidage</b>
<b>6. La glissière</b>	<b>13. bas de support moteur</b>
<b>7. Port capteur</b>	<b>14. haut de support moteur</b>

**Tableau III.1 : Nomenclature du dispositif.**

### III.3.3 La conception

Les formes des pièces à concevoir vont dépendre :

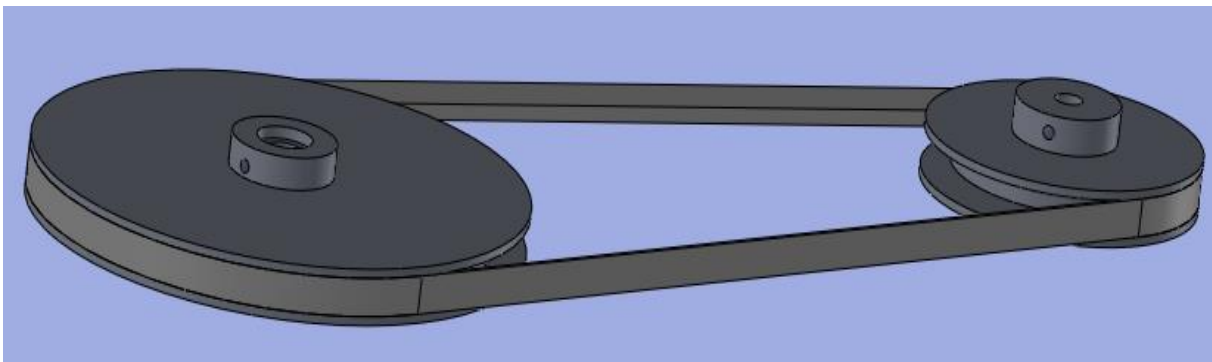
- de la fonction à remplir ;
- des moyens de fabrication ;
- du choix des matériaux à utiliser.

Leur conception consiste à déterminer leurs caractéristiques géométriques de sorte à satisfaire les critères suivants :

- Un bon fonctionnement du dispositif
- Facilité le montage et le démontage

Pour la conception de nos pièces, nous avons utilisé les commandes du logiciel SOLIDWORKS.

- *Le système poulie courroie*



**Figure III.4 :** La conception de système poulie courroie

L'assemblage est constitué de deux poulies ; la petite fixée à l'aide d'une vis M4 sur le mi-plat de la tige du moteur et la grande fixée de même sur la tige filetée, avec une courroie trapézoïdale lisse (ISO 4183 profil A 10×6) en caoutchouc.

La section en V de la courroie suit une rainure dans la poulie, ce qui fait que la courroie ne peut pas glisser, et cela améliore la transmission du couple. Elle est moins large qu'une courroie plate donc moins encombrante. Elle a moins besoin d'être tendue.

- Dimension de la transmission :

Le rapport de transmission :  $i = 2$  ; la longueur de la courroie :  $L_N = 800$  mm

## Partie pratique

$d_1 = 63 \text{ mm}$  (tire de la norme) donc :

$$i = \frac{d_2}{d_1} \Rightarrow d_2 = i \times d_1 = 126 \text{ mm}$$

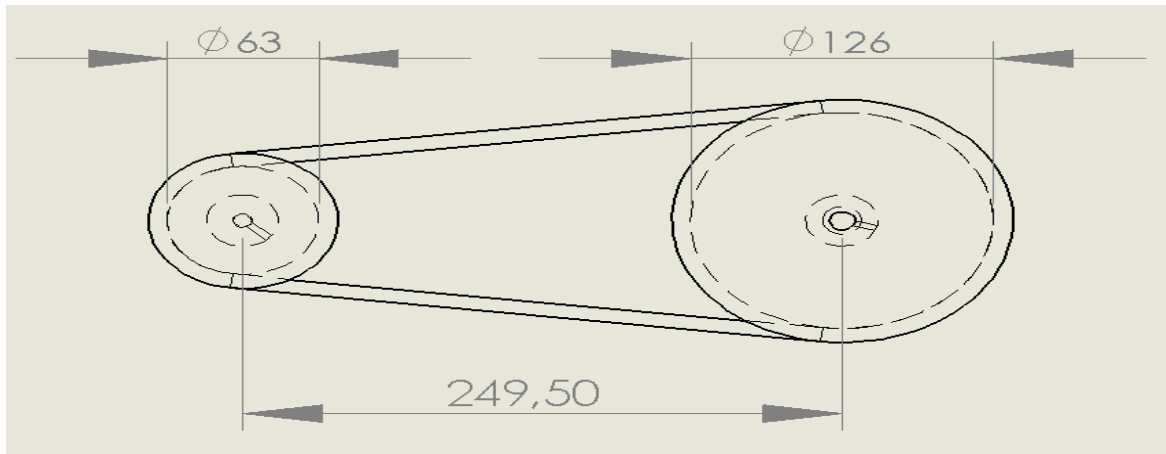
L'entraxe A :

$$A = \frac{2L_N - \pi(d_1 + d_2)}{8} + \frac{\sqrt{[2L_N - \pi(d_1 + d_2)]^2 - 8(d_2 - d_1)^2}}{8} = 249.5 \text{ mm}$$

L'entraxe doit vérifier les conditions suivant :

$$2(d_2 + d_1) \geq A \geq 0.55(d_2 + d_1) + h$$

$$378 \geq 249.5 \geq 109.95 \quad (\text{la condition est vérifiée})$$



**Figure III.5 :** dimension de système poulie courroie.

- Dimension des poulies :

La largeur :  $b = 10 \text{ mm}$

La hauteur :  $h = 6 \text{ mm}$

L'angle de gorge :  $\varphi = 38$

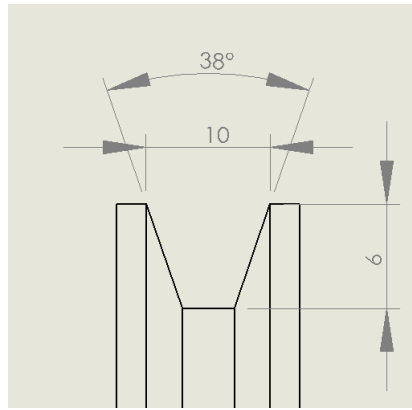


Figure III.6 : dimension des poulies.

### III.3.4 Le choix des matériaux

Pour le choix du matériau à partir duquel seront usinées les pièces, nous avons pris en considération la bonne usinabilité du matériau sa résistance aux chocs et la disponibilité au hall technologique de OUED-AISSI

Nous avons adopté pour l'aluminium pour sa bonne usinabilité pour fabriquer les poulies et le support. Pour éviter l'influence de la réaction de l'éprouvette sur le poinçon, on a choisi l'acier pour sa résistance.

### III.3.5 Vérification de la structure

Calcul de la force que peut supporter l'éprouvette :

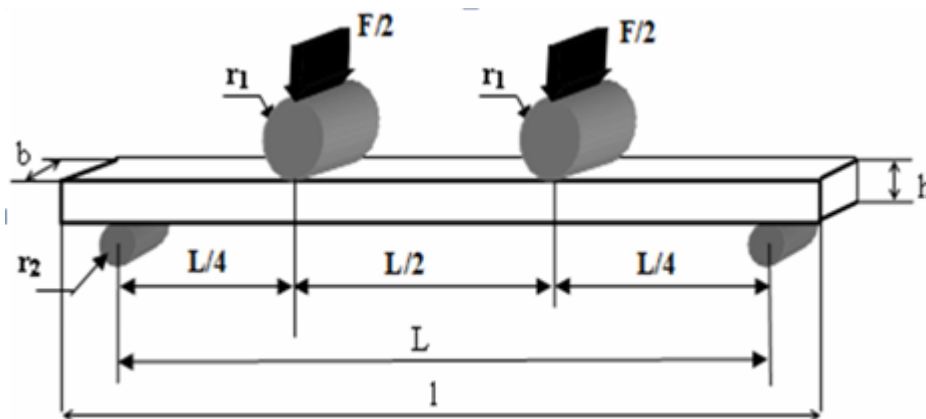


Figure III.7 : Flexion quatre points

Dimension de l'éprouvette :

Si  $h \leq 3 \text{ mm}$

$r_1 = 5\text{mm} \pm 0,1 \text{ mm}$

## Partie pratique

$$r_2 = 2 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$$

Si  $h > 3 \text{ mm}$

$$r_2 = 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$$

- la longueur et la largeur doivent rester dans le même rapport que dans l'éprouvette normale.
- $L_{min} = 20 \times h$
- la largeur et l'épaisseur doivent être choisies dans le tableau ci-dessous:

<b>h en millimètre</b>	<b>b ± 0,5 mm en millimètre</b>
$1 < h \leq 3$	25*
$3 < h \leq 5$	10
$5 < h \leq 10$	15
$10 < h \leq 20$	20
$20 < h \leq 35$	35
$35 < h \leq 50$	50

**Tableau III.2 :** Dimension des éprouvettes.

$$S_c = 1.5 \times 10 = 15 \text{ mm}$$

Donc la flèche maximale est **15 mm** ; la longueur d'éprouvette **L = 200 mm**.

Le matériau choisie pour l'éprouvette et de la Plexiglas :

$$E = 3800 \text{ MP}_A ; Re = 80 \text{ MP}_A$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \Rightarrow I = \frac{15(10)^3}{12} \Rightarrow I = 1250 \text{ mm}^4$$

$$Y_{max} = \frac{11 FL^3}{64 E bh^3} \Rightarrow F = \frac{64 Y_{max} E bh^3}{11 L^3}$$

$$F = \frac{64 \cdot 15 \cdot 3800 \cdot 15 \cdot (10)^3}{11 \cdot (200)^3} \Rightarrow F = 621,8 \text{ N}$$

Donc la force maximale que supporte l'éprouvette est **621,8 newtons**.

Les réactions aux appuis sont :

## Partie pratique

$$R_A = R_B = \frac{F}{2} = 310.9 \text{ N}$$

Pour l'effort tranchant on a :

$$0 \leq x \leq L/4 : T = F/2 = 310.9 \text{ N}$$

$$L/4 \leq x \leq L/2 : T = 0$$

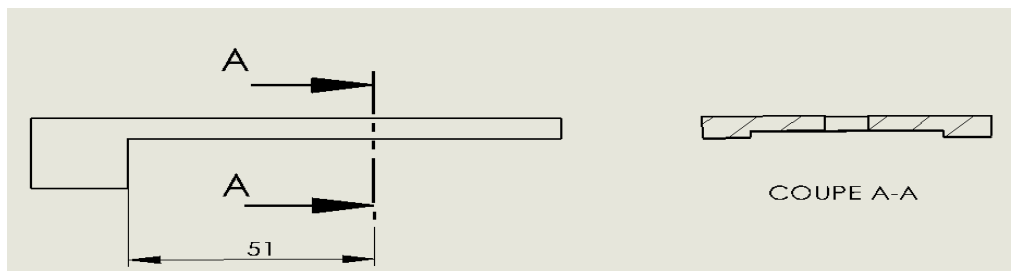
$$\text{Pour : } 0 \leq x \leq \frac{L}{4} \Rightarrow M_f = \frac{F}{2} \cdot x \Rightarrow \begin{cases} x = 0 : M_f = 0 \\ x = 100 \text{ mm} : M_f = \frac{FL}{8} = 15545 \text{ N.mm} \end{cases}$$

$$\text{Pour : } \frac{L}{4} \leq x \leq \frac{L}{2} \Rightarrow \begin{cases} x = \frac{L}{4} : M_f = 15545 \text{ N.mm} \\ x = \frac{L}{2} : M_f = 15545 \text{ N.mm} \end{cases}$$

- **Vérification de la résistance à la flexion du support moteur**

Le matériau choisi pour le support moteur est l'aluminium (Al Cu Mg 1) de caractéristique mécanique suivante :

$$E = 72500 \text{ MPa}, \sigma_e = 240 \text{ MPa}$$



**Figure III.8 :** La coupe A-A du haut du support

Nous considérons le poids du moteur comme une force qui s'exerce sur la pièce, sa valeur est :

$$P = mg \Rightarrow P = 1.15 \times 9.81 = 11.28 \text{ N}$$

Nous calculons le moment d'inertie de la section représentée par la coupe A-A :

$$I = I_1 - (I_2 + I_3)$$

## Partie pratique

$$I = \frac{60.6^3}{12} - \left( \frac{40.2^3}{12} + \frac{9.4^3}{12} \right) = 1005.34 \text{ mm}^4$$

$$M_f = P \cdot x = 11.28 \times 51 = 575.28 \text{ N.mm}$$

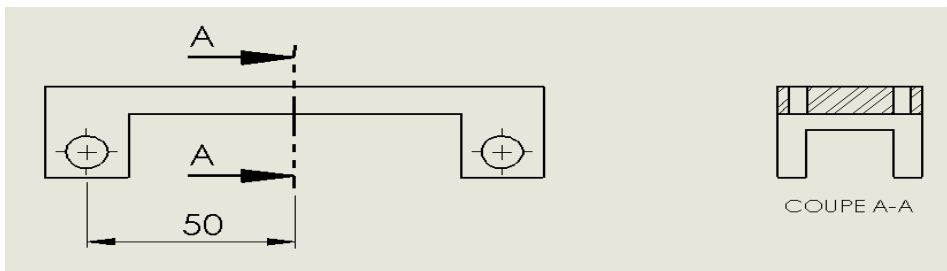
$$\sigma = \frac{M_f h}{I} = \frac{575.28}{1005.34} = 0.572 \text{ MPa} \leq R_{pe} = 120 \text{ MPa}$$

La condition est vérifiée.

- **Vérification de la résistance a la flexion du poinçon quatre points**

Le matériau choisi pour le poinçon est l'acier (A60) de caractéristique mécanique suivante :

$$E = 210000 \text{ MPa}, \sigma_e = 275 \text{ MPa}$$



**Figure III.9** : la coupe A-A du poinçon quatre points.

Nous calculant le moment d'inertie de la section représentée par la coupe A-A :

$$I = I_1 - 2I_2$$

$$I = \frac{35(8.5^3)}{12} - 2 \frac{5(8.5^3)}{12} = 1279.41 \text{ mm}^4$$

$$M_{fmax} = \frac{FL}{4} = \frac{621,8 \times 100}{4} = 15545 \text{ N.mm}$$

$$\sigma = \frac{M_f h}{I} = \frac{15545}{1279.41} = 12.15 \text{ MPa} \leq R_{pe} = 275 \text{ MPa}$$

La condition est vérifiée.

### III.4 La réalisation

Les pièces sont réalisées au niveau du hall technologie de Oued-Aissi, l'usinage par enlèvement de matière est le moyen le plus fiable pour obtenir des pièces de précision, à partir des pièces moulées. Les principaux modes d'usinage utilisés pour la mise en forme sont :

- *Sciage*

Pour le découpage du brut des pièces prismatiques ou cylindriques, nous avons utilisé une scie mécanique (figure III.12).



**Figure III.10** : scie mécanique.

- *Fraisage*

La fraiseuse (verticale) est particulièrement adaptée à l'usinage des pièces prismatiques. Sur ce poste on a utilisé différentes opérations (surfaçage, rainurage, centrage et perçage) pour la fabrication.



**Figure III.11** : les opérations de fraisage.

- *Le tournage*

Le tournage est un procédé d'usinage par enlèvement de copeaux qui consiste en l'obtention de pièces de formes cylindriques ou coniques. Le tournage permet aussi de réaliser des surfaces hélicoïdales (filetage) et des opérations de perçage, de tournage de gorge ou de dressage.



**Figure III.12** : les opérations de tournage

## Partie pratique

### III.5 Le moteur électrique

Dans notre projet on a choisi de travailler avec un moteur pas à pas de modèle 57HS22 qui est représenté dans la figure suivante :

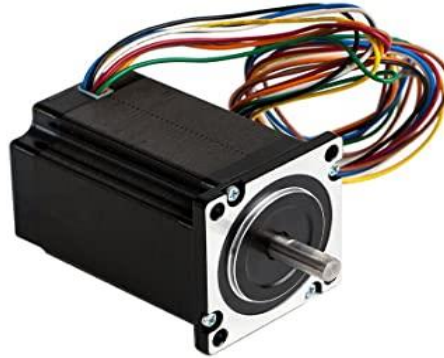


Figure III.13 : moteur pas à pas 57HS22.

Les caractéristiques techniques données par le constructeur sont les suivantes

<b>Angle par pas (Degré)</b>	1.8°
<b>Température maximum</b>	80°CMax
<b>Résistance d'isolement</b>	100MΩmin.500VDC
<b>Jeu radial de l'axe</b>	0.06 Max.(sous charge de 450g)
<b>Précision angulaire des pas</b>	±5% (Pas entier, à vide)
<b>Température ambiante</b>	-10°C à +50°C
<b>Isolement diélectrique</b>	500VAC pendant une minute
<b>Jeu axial de l'axe</b>	0.08 max.(sous charge de 450g)

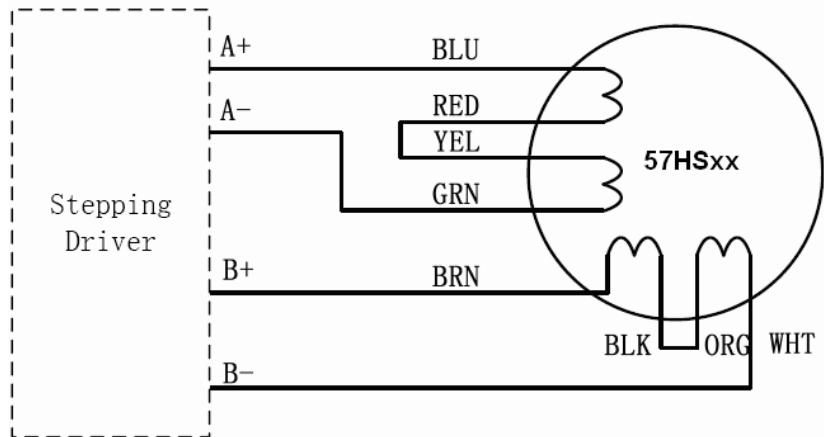
Tableau III.3 : Spécifications générales du moteur

Référence de modèle	raccordement	Couple de blocage Nm (Oz-in)	Nombre de fils	Courant par phase (Amps)	Poids kg (Oz)
57HS22	(Bipolaire) Parallèle	2.0 (283.2)	8	5.0	1.15 (40.57)
	(Bipolaire) Séries	2.0 (283.2)		2.5	
	Unipolaire	1.4 (198.24)		3.5	

Tableau III.4 : Spécification électriques du moteur

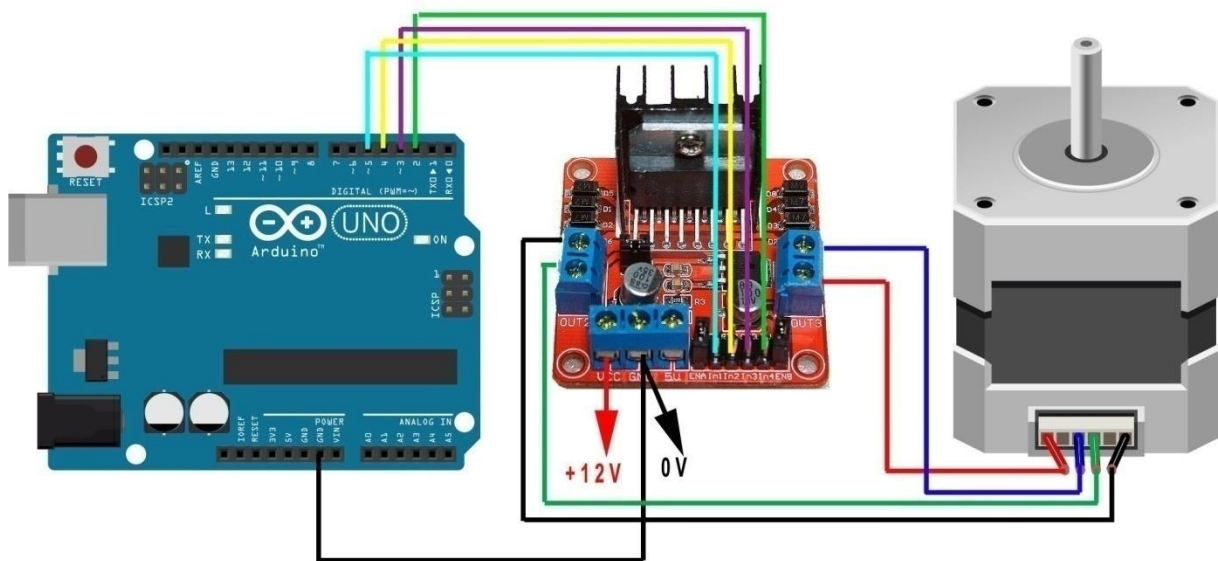
## Partie pratique

On a choisi le raccordement bipolaire en séries comme montre la (figure III.16)



**Figure III.14 :** Raccordement bipolaire en séries

Pour commander le moteur on a utilisé une carte ARDUINO et un circuit intégré L298D et une alimentation externe comme la montre la figure au-dessous :



**Figure III.15 :** Schéma de raccordement du moteur

## Partie pratique

---

Le code ARDUINO utilisé :

```
#include <Stepper.h> // Permettra d'utiliser des fonctions de la librairie externe Stepper.h,
// librairie spécifique pour contrôler les MOTEURS PAP.
const int nbrePas360 = 200; // Fixe le nombre de pas pour faire un tour complet, c'est-à-dire 360°.
Stepper monmoteur (nbrePas360, 8, 9, 10, 11); // Initialise la librairie Stepper.h

void setup()
{
  monmoteur.setSpeed(2); // Fixe une vitesse de n tours par min, n est l'argument de la fonction setSpeed.
}

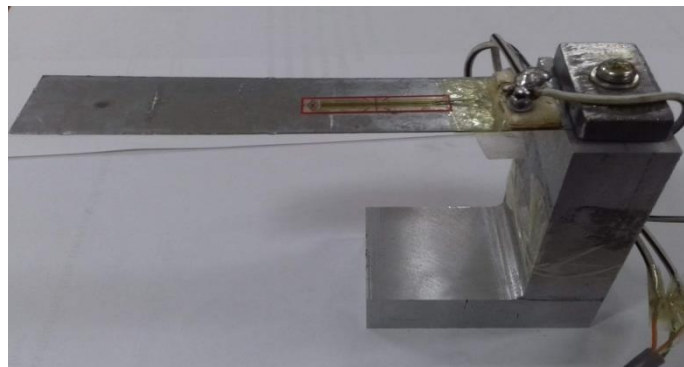
void loop()
{
  monmoteur.step(1); // Avance de n pas, n est l'argument de la fonction step.
}
```

### III.6 Les capteurs

Dans notre cas on a utilisé deux capteurs (analogique passif) à base de jauges de contraintes :

#### III.6.1 Capteur de déformation

Il permet la mesure du déplacement ou de la flèche d'une éprouvette. Dans notre cas, le corps d'épreuve est représenté par une lame en flexion ; le capteur est doté d'une jauge de contrainte (un quart du pant) d'une résistance  $R = 120\Omega$ , avec un facteur de jauge de 2, comme montre la figure ci-dessous.



**Figure III.16 :** Capteur de déformation

### III.6.2 Capteur de force

Ou a utilisé un anneau dynamométrique comme corps d'éprouve, le capteur est doté de deux jauges de contrainte adjacentes (demi-pont) comme montre la figure ci-dessous.



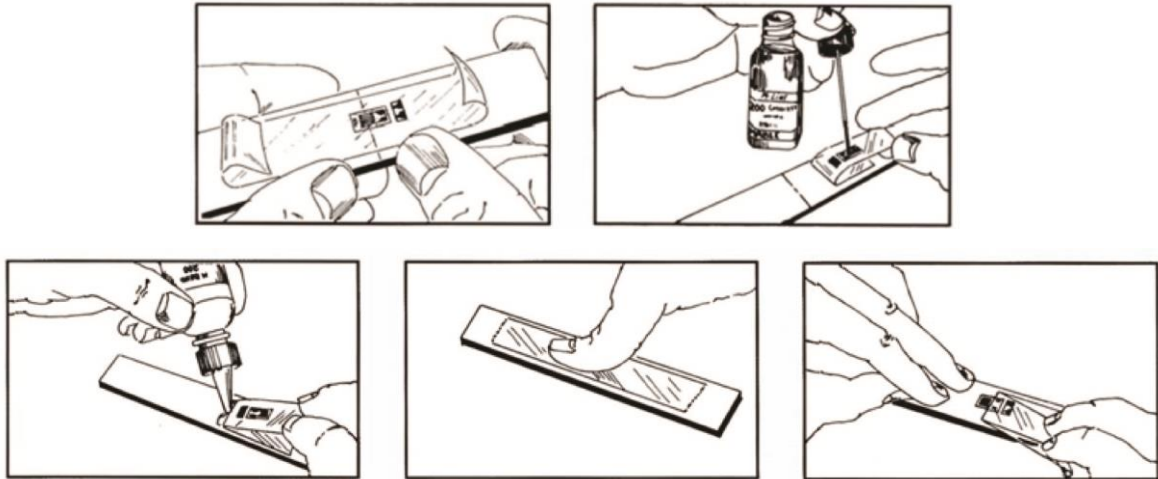
**Figure III.17** : Capteur de force

### III.6.3 Collage des capteurs

Le collage des jauges est une étape importante, il faut respecter le point suivant :

- préparation de l'état de surface : faire un nettoyage de la surface
- préparation de la jauge : préparer une bande adhésive disposée en angle sur la jauge, aligner la jauge sur la marque et fixer avec une bande adhésive, Rabattre la jauge aussitôt avec une feuille téflon en appliquant une pression uniforme d'environ une minute sur l'ensemble. Après la prise de la colle, la bande adhésive peut être enlevée de l'ensemble jauge et cosse relais
- collage avec colle : verser une goutte de colle et étaler aussitôt uniformément le produit sans exercer de pression.

## Partie pratique



**Figure III.18** : les étapes du collage des jauges.

- Raccordement du câble : dans notre cas les jauges sont des jauges pré-câblées
- Contrôle électrique et visuel de l'équipement
- Test (raccordement sur l'amplificateur)
- Teste de bon fonctionnement avec l'amplificateur

### III.6.4 Vérification des capteurs

- **Vérification de la sensibilité du capteur à de faibles efforts**

Pour calculer l'effort maximum que peut supporter le capteur, nous utiliserons les formules données ci-dessous.

<p><b>Anneau dynamométrique En traction ou en compression</b></p>		$\varepsilon_e = \frac{3F \cdot R}{E \cdot a \cdot t^2} \left(1 - \frac{2}{\pi}\right)$ $\varepsilon_i = -\varepsilon_e$ <p> <math>\varepsilon_e</math> : Déformation de la jauge extérieur.  <math>\varepsilon_i</math> : Déformation de la jauge intérieure.                      R : Rayon moyen.                      f : Flèche totale (rapprochement sur le diamètre)                 </p>
---	--	--

**Tableau III.5** : les formule de calcul.

Le matériau choisi pour la lame est de l'acier de caractéristiques mécaniques suivantes :

## Partie pratique

$$E = 70000 \text{ MP}_A, \sigma_e = 343 \text{ MP}_A$$

Diamètre extérieur : 40mm, Largeur : 15 mm, épaisseur : 4 mm

- **Calcul de la déformation de la jauge engendrée par 1 Newton**

$$\varepsilon_e = \frac{3FR}{Eat^2} \left(1 - \frac{2}{\pi}\right)$$

$$\varepsilon_e = \frac{3 \cdot 1 \cdot 16}{70000 \cdot 15 \cdot 16} \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) = 0.000001037 = 1,037 \cdot 10^{-6}$$

La déformation peut être détectée, car une jauge peut détecter des déformations de l'ordre de  $10^{-7}$ . Donc, le capteur sera sensible à de faibles efforts.

- **Calcul de l'effort maximum que peut supporter le capteur**

$$F = \frac{\sigma_e \cdot a \cdot t^2}{3R \left(1 - \frac{2}{\pi}\right)} = 4723,77 \text{ N}$$

L'effort maximum que peut supporter le capteur vaut : **4723,77 N**

- **Calcul de l'effort de flexion de la lame**

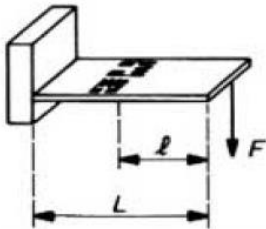
L'effort produit par la lame utilisée doit être inférieur à l'effort maximum.

- Données sur la lame en flexion :

Le matériau choisi pour la lame est de l'acier de caractéristiques mécaniques suivantes :

$$E = 210000 \text{ MP}_A, \sigma_e = 360 \text{ MP}_A$$

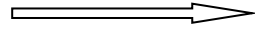
Longueur : 100 mm, Largeur : 26mm, hauteur : 0.3mm

Lame en flexion		$\varepsilon_1 = \frac{6F \cdot l}{E \cdot a \cdot t^2}$ $\varepsilon_2 = -\nu \varepsilon_1$ $\omega_1 = 0.16 \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ <p><math>\omega_1</math> : Première fréquence propre.  <math>\rho</math> : Masse volumique.</p>
-----------------	---	---

**Tableau III.6** : formules de calcul.

## Partie pratique

$$S_c = \frac{FL^3}{3EI}$$



$$F = \frac{3S_c EI}{L^3}$$

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

$$I = \frac{26(0.3^3)}{12} = 0.0585 \text{ mm}^4$$

$$F = \frac{3.15.210000.0,0585}{83^3} = 0.9 \text{ N}$$

Donc  $F = 0.9 \text{ N} \leq 654.5 \text{ N}$

### III.7 Etalonnage des capteurs

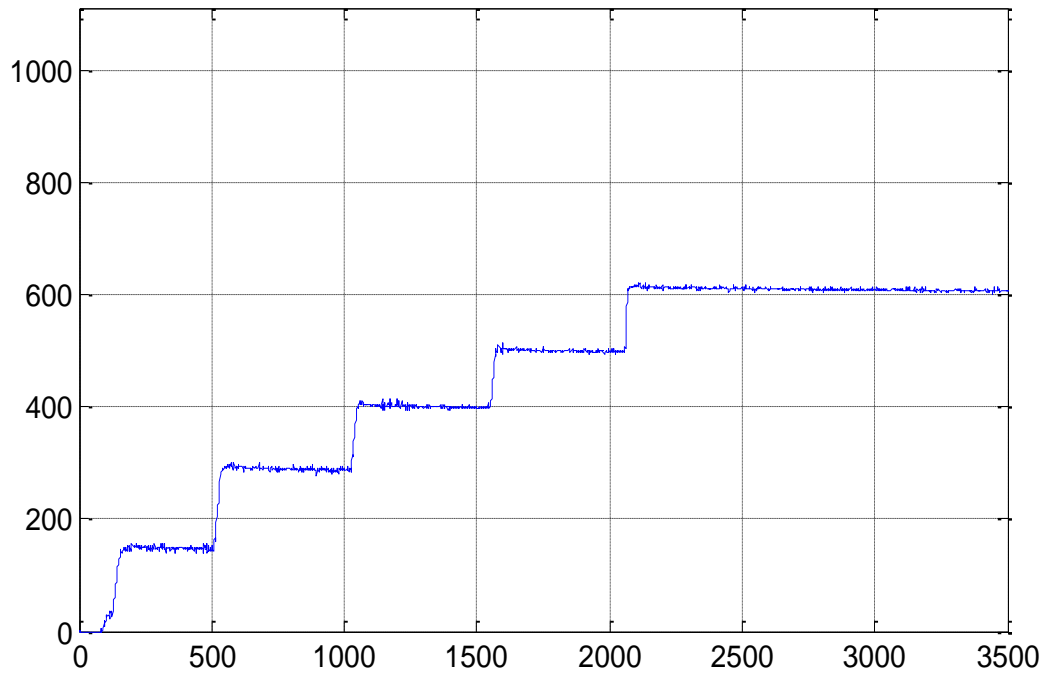
#### III.7.1 Etalonnage de capteur de force

L'étalonnage a été réalisé à l'aide d'un dynamomètre, on règle ce dernier à la valeur zéro puis on repère le signal équivalant à l'effort appliqué sur l'anneau affiché sur l'ordinateur (l'interface de logiciel MATLAB); ce dernier est connecté à la chaîne d'acquisition du capteur (amplificateur, carte ARDUINO) comme le montre la figure suivante :



Figure III.19 : étalonnage du capteur de force.

## Partie pratique

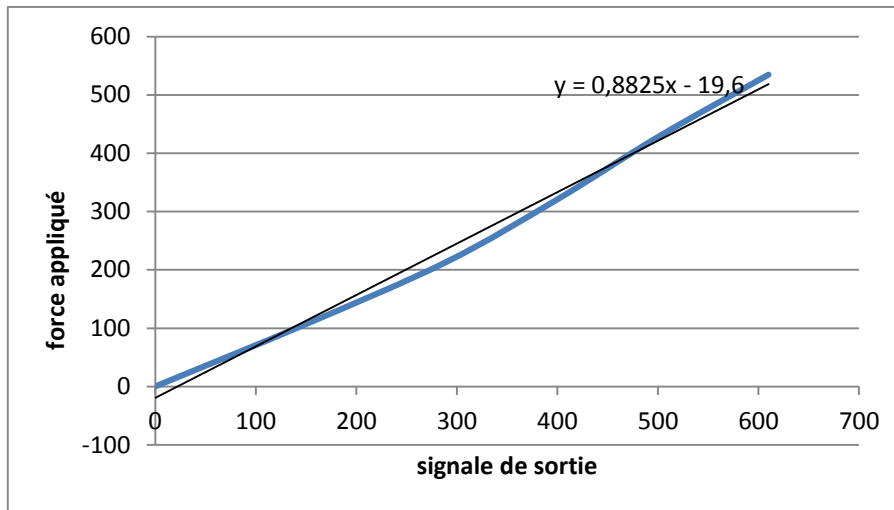


**Figure III.20** : graphe de signal de sortie.

Les valeurs de signale équivalent à la force appliquée sont données dans le tableau suivant :

<b>Signal de sortie</b>	<b>Force appliquée</b>
0	0
150	106,89
290	213,78
400	320,67
500	427,56
610	534,45

**Tableau III.7** : signal en fonction de force appliquée.



**Figure III.21** : courbe d'étalonnage de capteur de force.

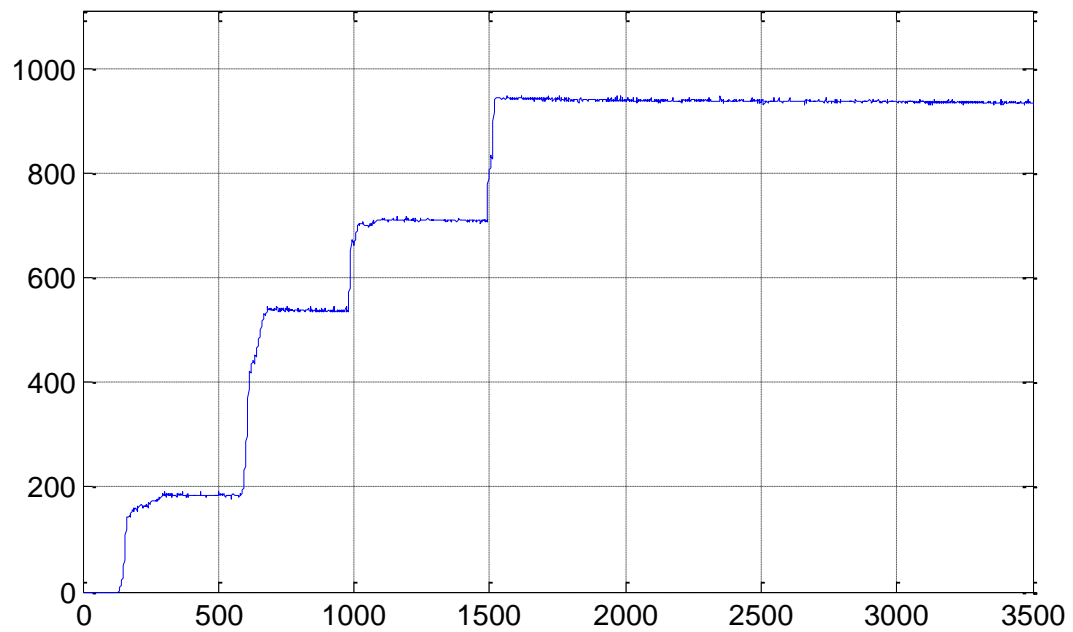
Nous obtenons un facteur d'étalonnage du capteur de force par le calcul de la pente de la droite du signal en fonction de l'effort, qui vaut 0.8825, on introduit ce facteur par la suite dans notre programme écrit en MATLAB, afin de lire directement sur la courbe tracée l'effort appliqué sur l'éprouvette.

### III.7.2 Etalonnage du capteur de déplacement

L'étalonnage a été réalisé à l'aide d'un comparateur mécanique à cadran, on règle ce dernier à la valeur zéro puis on repère le signal équivalant à la flèche de la lame qui s'affiche sur l'ordinateur (l'interface de logiciel MATLAB) ce dernier est- à la chaîne d'acquisition du capteur (amplificateur, carte ARDUINO) comme le montre la figure suivante :



**Figure III.22 :** Etalonnage de capteur de déplacement.



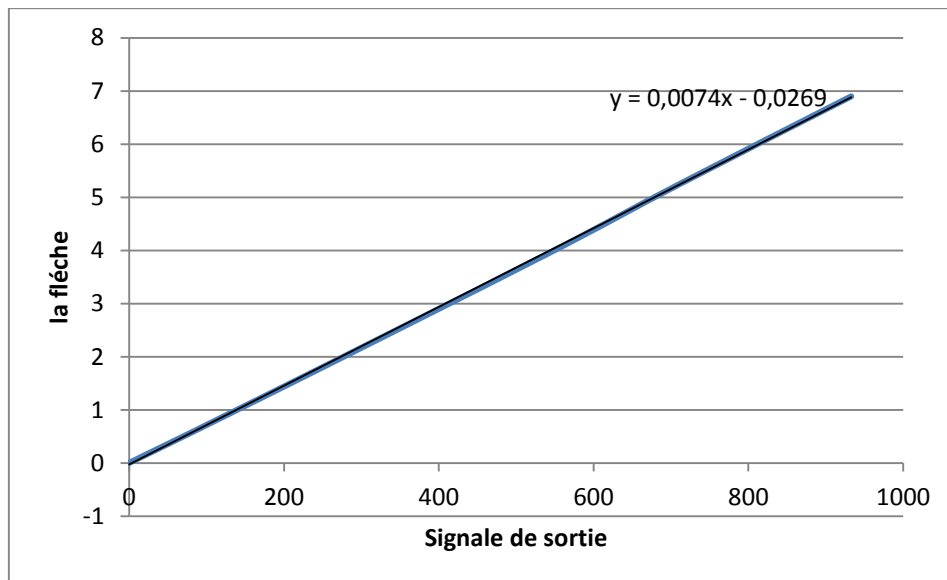
**Figure III.23 :** graphe de signal de sortie.

## Partie pratique

Les valeurs de signal équivalant à la flèche sont donne dans le tableau suivant :

Signale de sortir	La flèche
0	0
184	1,32
537	3,91
710	5,24
933	6,9

**Tableau III.8** : signal en fonction de la flèche.



**Figure III.24** : courbe d'étalonnage de capteur de déplacement.

Nous obtenons ainsi un facteur d'étalonnage du capteur de déplacement par le calcul de la pente de la droite du signal en fonction de la flèche, qui vaut 0.0074, on introduit ce facteur par la suite dans notre programme écrit en MATLAB, afin de lire directement sur la courbe tracée la flèche de l'éprouvette.

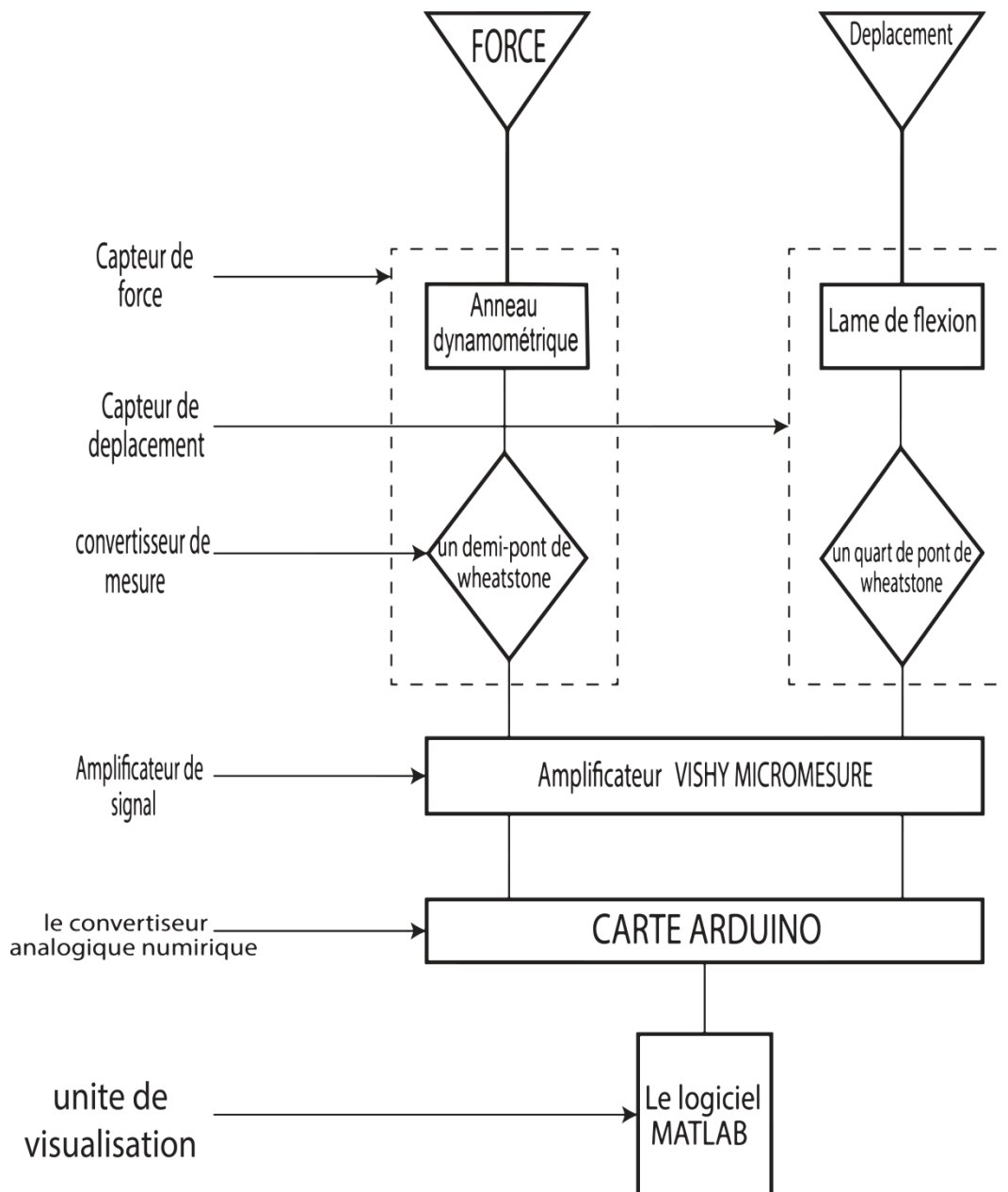
### III.8 La chaîne d'acquisition

La mesure, consiste à faire correspondre une valeur à une grandeur physique. Pour cela, il est nécessaire de mettre en œuvre toute une chaîne mécanique, optique ou électronique qui,

## Partie pratique

partant d'un capteur transforme la grandeur physique en un signal qui doit être traité (filtre, amplifié,...) avant de piloter une unité d'affichage. Cette chaîne est appelée chaîne d'acquisition.

Dans notre cas on peut schématiser la chaîne comme suit :



**Figure III.25 :** La chaîne d'acquisition

## Partie pratique

- **L'amplificateur (VISHY MICROMESURE)**

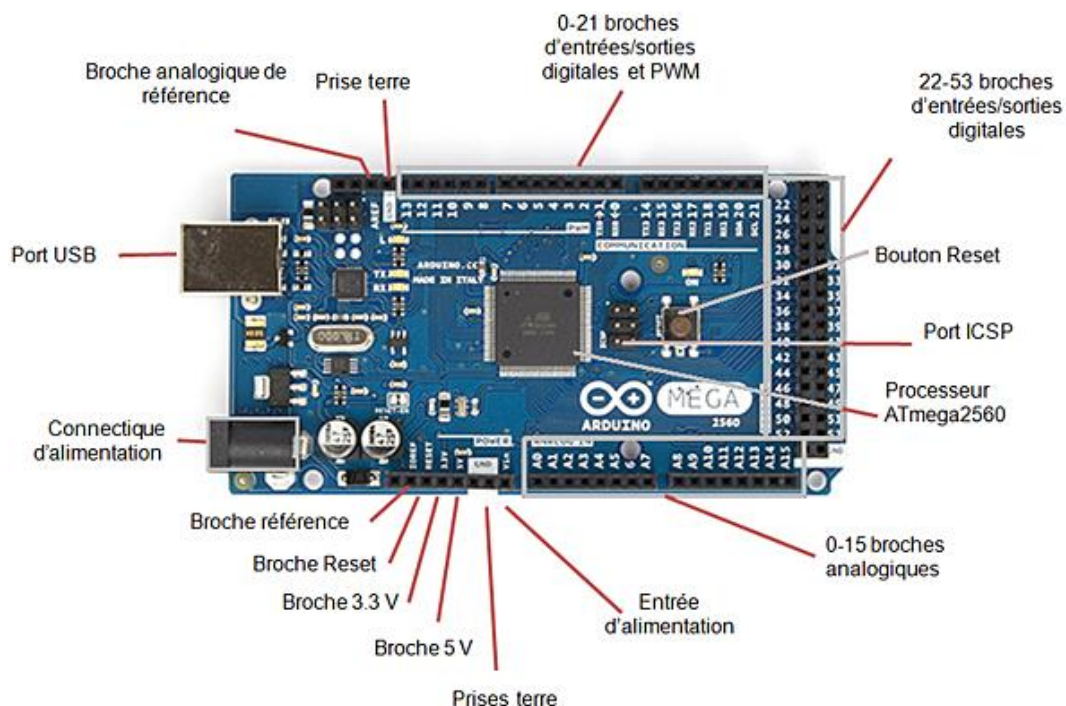
Cet amplificateur est constitué de dix entrées analogiques et dix sorties, l'appareil permet d'équilibrer le pont de Wheatstone, la remise à zéro, et l'amplification de signal jusqu'à 2000 fois, et aussi de compléter le pont.

- **Carte ARDUINO**

La Carte ARDUINO est un circuit imprimé sur lequel se trouve un microcontrôleur qui peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques, de manière à effectuer des tâches très diverses comme le contrôle des appareils domestiques - éclairage, chauffage..., le pilotage d'un robot, etc. C'est une plateforme basée sur une interface entrée/sortie simple. Pour la commander on utilise son propre programme (logiciel IDE).

L'ARDUINO est une carte électronique qui a assuré la liaison entre la chaîne d'acquisition et l'ordinateur pour acquérir les données issues du capteur. Elle peut servir également :

- Pour des dispositifs interactifs *autonomes* simples ;
- Comme *interface* entre capteurs/actionneurs et ordinateur ;
- Comme programmeur de certains microcontrôleurs.



**Figure III.26 :** carte ARDUINO

## Partie pratique

- *Unité de visualisation*

L'unité de visualisation est représenté par l'interface du logiciel MATLAB, pour le connecter a la carte ARDUINO on a utilisé des code (code IDE, code *MATLAB*) téléchargeables sur le site officiel de MATHWORKS.

En suit on introduit ce code suivant pour afficher la courbe contrainte déformation :

```
1 -   clc;
2 -   delete(instrfind({'Port'}, {'COM5'}))
3 -   a = arduino('COM5');
4 -   b=10;
5 -   h=4.6;
6 -   l=80;
7 -   numpts=2000;
8 -   xydata=zeros([numpts 2]);
9
10 -  for i=1:numpts
11 -      xydata(i,1)=(a.analogRead(0)*0.0074*48*h)/11*(l^2); % deformation
12 -      %xydata(i,1)=(a.analogRead(0)*0.0084); %fleche
13 -      xydata(i,2)= (a.analogRead(3)*0.8825*3*l)/(4*b*h^2); % contrainte
14 -      %xydata(i,2)= (a.analogRead(3)*0.1696); % force
15 -      plot(xydata(:,1),xydata(:,2));
16 -          axis([0,0.035,0,100]);
17 -          %axis([0,5,0,80]);
18 -          title('Capteur 2 en fonction du Capteur 1')
19 -          xlabel('déformation')
20 -          ylabel('contrainte')
21
22
23 -      grid
24 -      drawnow;
25
26 -  end
27
```

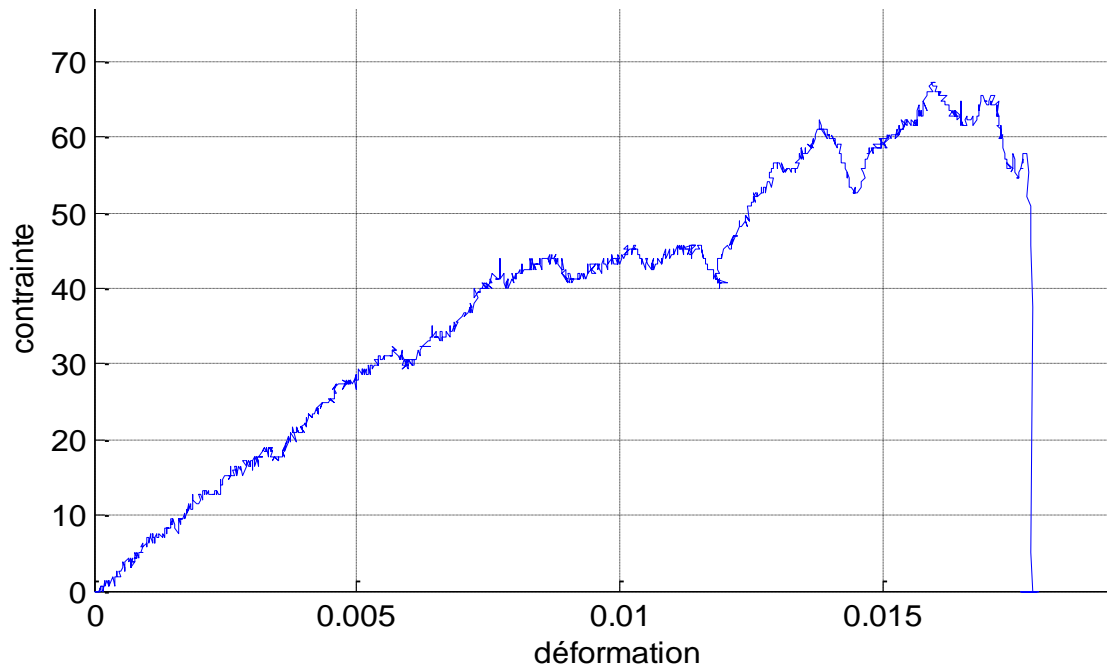
### III.9 Testes de validation

Pour valider le banc d'essai nous avons effectué des essais de flexion trois points et flexion quatre points sur des éprouvettes en plexiglas dont les caractéristiques mécaniques ont été déterminées.

#### III.9.1 Teste de flexion trois points

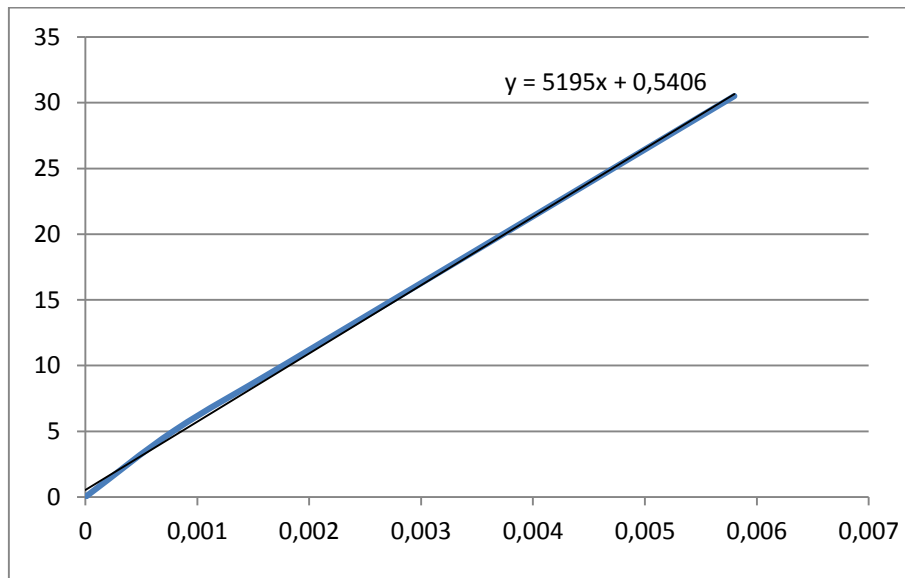
Dans notre essai nous avons chargée la poutre de 0 jusque a la rupture qu'est de  $65 MP_A$  la figure ci-dessous présente la courbe de l'essai de flexion de l'éprouvette en plexiglas, tracé en temps réelle par le logiciel Matlab.

## Partie pratique



**Figure III.27** : courbe d'évolution contrainte-déformation en flexion trois points

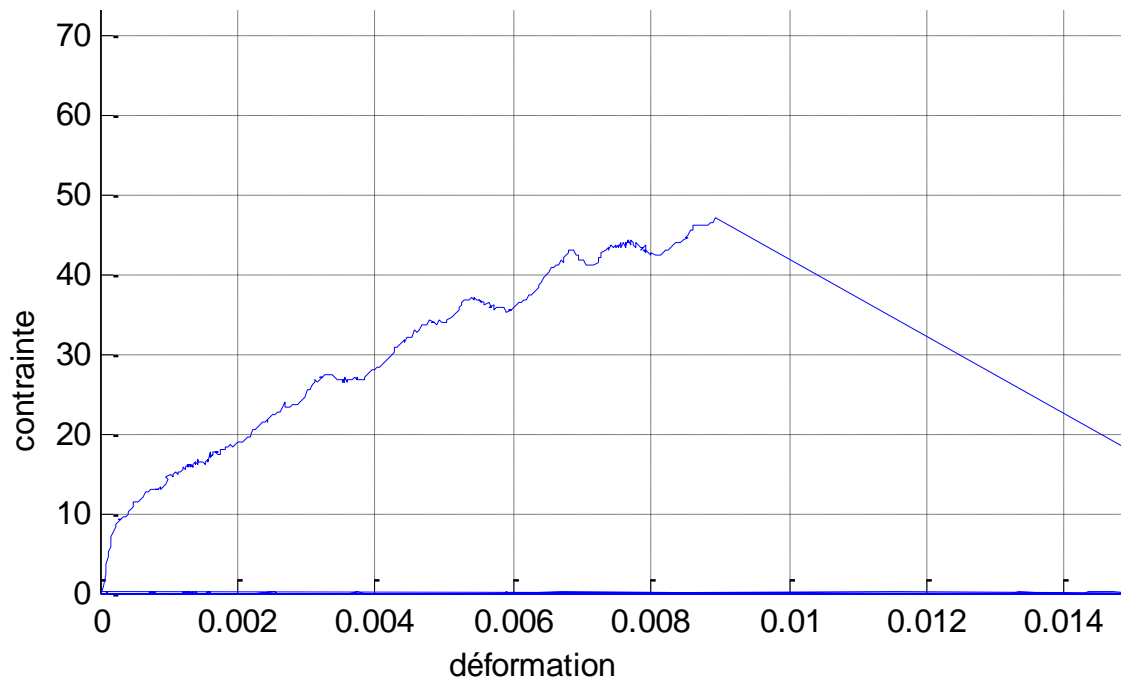
La pente de l'éprouvette est tracé grâce a la sélection des valeurs dans la partie linéaire de la courbe, qui sont enregistrées dans L'Excel. La pente de cette droite correspond au module de Young de plexiglas. Il est égal pour cette éprouvette à  $5195 MP_A$ .



**Figure III.28** : la pente de graphe

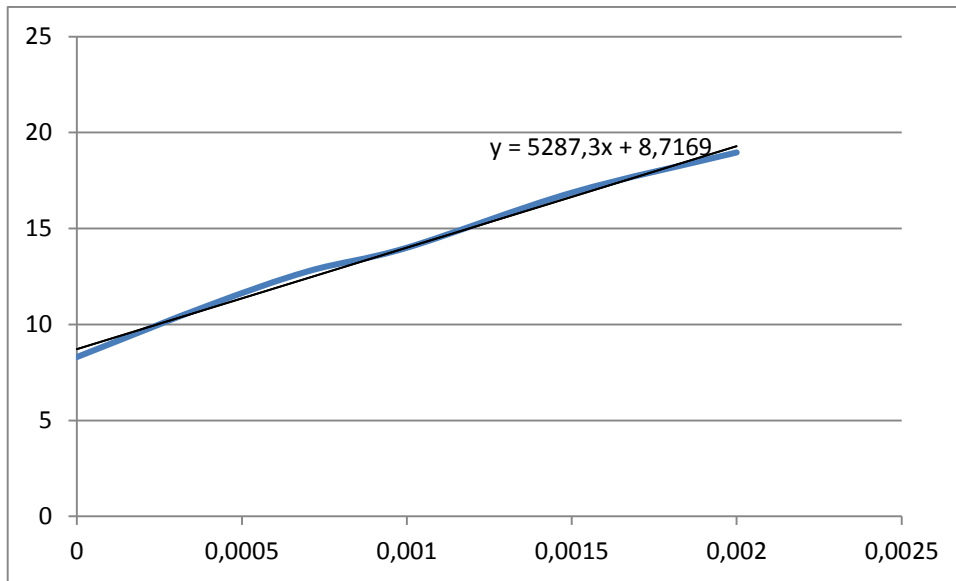
### III.9.2 Teste flexion quatre points

Dans notre essai de validation nous avons chargée la poutre de 0 jusqu'a la rupture qu'est  $48 \text{ MP}_A$ . La figure ci-dessous présente la courbe de l'essai de l'éprouvette en polycarbonate tracé en temps réelle par le logiciel MATLAB.



**Figure III.29:** courbe d'évolution contrainte-déformation en flexion quatre points

La pente de l'éprouvette est tracée avec le logiciel MATLAB grâce à la sélection des valeurs dans la partie linéaire de la courbe, qui sont enregistrées automatiquement dans l'Excel. La pente de cette droite correspond au module de Young de plexiglas étudiant. Il est égal à  $5287.3 \text{ MP}_A$ .



**Figure III.30:** La pente de graphe

### III.9.3 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus sont pas satisfaisants, cela est du à la mauvaise réalisation de la glissière qui ne répond pas a la norme exigée ( $h > 2d$ ), cela provoque le phénomène d'arc-boutement avec les deux tiges, ce phénomène influe sur le capteur de force au moment du contact avec l'éprouvette, on peut le constater dans les courbures des graphes obtenus.

### III.9.4 Solution proposée

Pour l'amélioration de ce projet, on propose aux prochains étudiants fin de cycle les solutions suivantes à savoir :

- Augmenter l'épaisseur de la glissière qui est de 13 mm à 30 mm (pour éviter l'arc-boutement)
- Refaire des bagues neuves

## Conclusion générale

La conception et la réalisation de ce projet a été pour nous une grande occasion de compléter notre formation. En effet plusieurs notions et techniques, acquises pendant notre formation, ont été mise en application pour mener à bien ce travail.

Le présent travail nous a donc permis d'élargir nos connaissances dans le domaine de la conception, de la fabrication et de la gestion d'un projet. Ainsi, à travers ce mémoire de fin d'études, nous avons pu constater la difficulté de mettre en œuvre les acquis théoriques en milieu industriel.

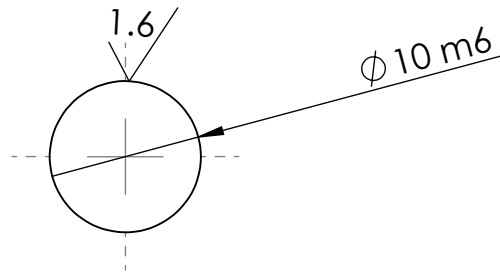
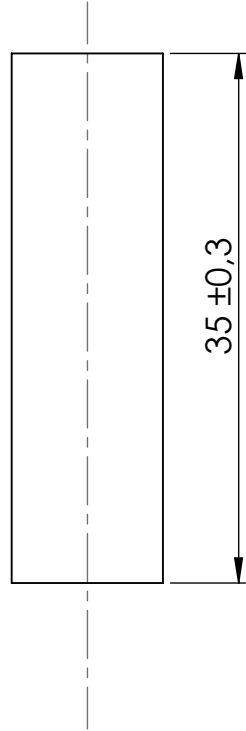
De plus, cette étude nous a permis de nous initier et de nous familiariser avec certain logiciels très utilisés dans l'industrie, tel que SOLIDWORKS pour la conception assistée par ordinateur et le logiciel MATLAB pour l'acquisition et le traitement des données ainsi que le logiciel IDE (logiciel ARDUINO ) pour contrôler le moteur pas à pas.

La conception et la fabrication des deux capteurs à jauges de contrainte, utilisés pour capter la déformation et la contrainte appliquées la l'éprouvette, nous a permis de mieux maitriser l'acquisition et le traitement des données. En effet une carte ARDUINO a été utilisée avec un amplificateur de signal disponible dans notre laboratoire.

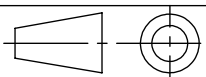
## Références bibliographiques

- [1] J.Bailon et M.Dorlot, Des Matériaux, presses internationales polytechniques, 2000.
- [2] Mercier, J. P., G. Zambelli et W. Kurz, Introduction à la science des matériaux, PPUR presses polytechniques, 1999.
- [3] Z. NACER, Influence des effets de vieillissement et du laminage à froid sur la microstructure, associés aux propriétés mécaniques et chimiques, tizi ouzou: UNIVERSITE DE MOULOU MAMMARI TIZI-OUZOU, 2011, p. 86.
- [4] G.BUHOT et P.THUILLIER, cours de mécanique, paris: MASSON, 1986.
- [5] B.Radjel et S.Benmedakhen, «la pratique des essai destructifs : l'essai de flexion,» ALGERIE EQUIPEMENT, p. 22, Mars 1996.
- [6] N.Benmanel, «technologiepro,» 00 00 2018. [En ligne]. Available: <https://www.technologuepro.com/cours-sciences-materiaux-plastiques>. [Accès le 14 01 2021].
- [7] B.Redjel, mécanique et mécanisme de rupture dans les materiaux composites SMC, universite de technologie de compiegne, 1987.
- [8] P. KRAWCZAK, «Essais mécaniques des plastiques - Caractéristiques instantanées,» 10 07 1999. [En ligne]. Available: [www-techniques-ingenieur.fr](http://www-techniques-ingenieur.fr). [Accès le 17 01 2021].
- [9] M. Béltruy, Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux, 2006-2007.
- [10] kaci, realisation et conception d'un banc d'essai en flexion, Tizi ouzou: universite mouloud mammri, 2017.
- [11] Y. Sanogo, conceptio et fabricatio de capteur et de leur technique d'interogatiopour des application dans le domaine de la sante et de l'enverenment, France, 2012.

- [12] H. Lynda, Conception et réalisation de capteurs pour l'instrumentation d'une machine de traction, automatisatio de l'aquisistio des données, TIZI-OUZOU: UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2014.
- [13] G.Asch, Acquisitio de données, Paris: Dunod, 2003.
- [14] T. Ali, Conception d'un capteur de force pour l'étude des contraintes sur un anneau en époxy a l'aide de la photoelacticimetrie et de la methode des emelemt fini, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2015.
- [15] P. POULICHET, Cours sur l'électronique de conditionnement du capteur, paris: groupe ESIEE, Novembre 2006.
- [16] G.ASCH, les capteurs en instrumentation industrielle, cinquième éd., PARIS: DUNUD, 1999.
- [17] J. J.GOËR, Capteurs à jauges extensométriques, Technique de l'ingenieur, 1992.



Echelle: 2:1



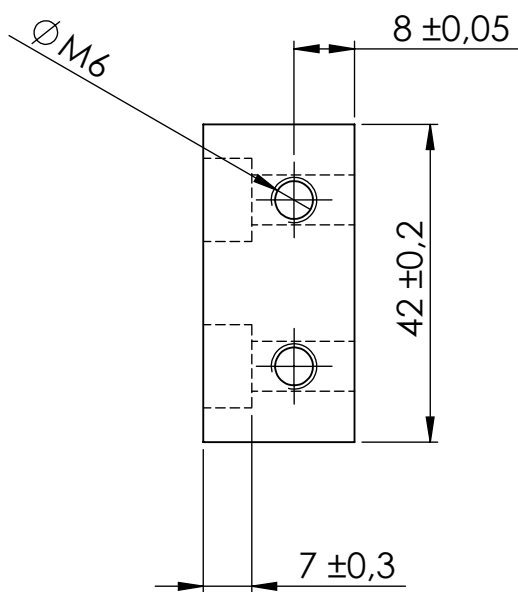
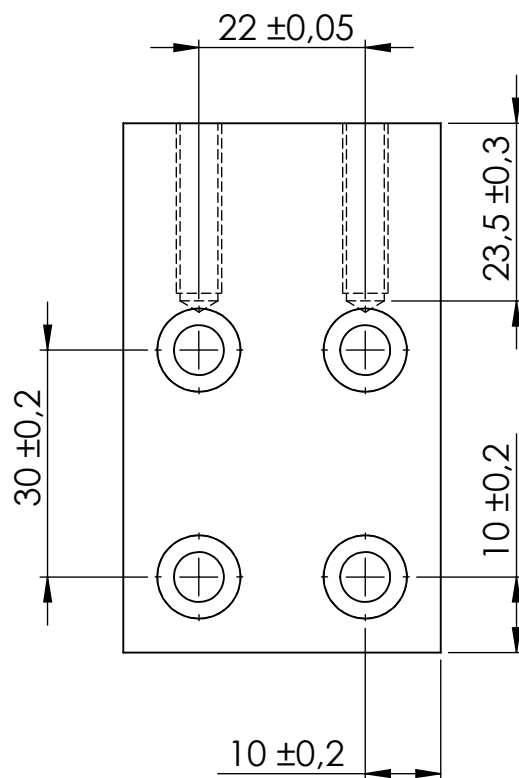
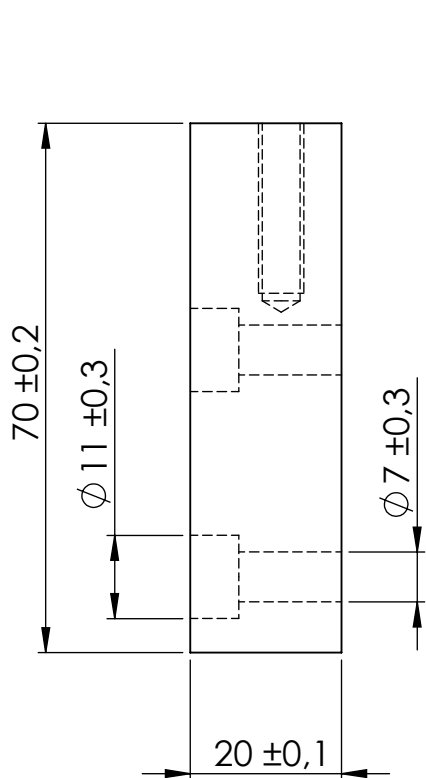
A4

**Axe de poinçon**

UMMTO

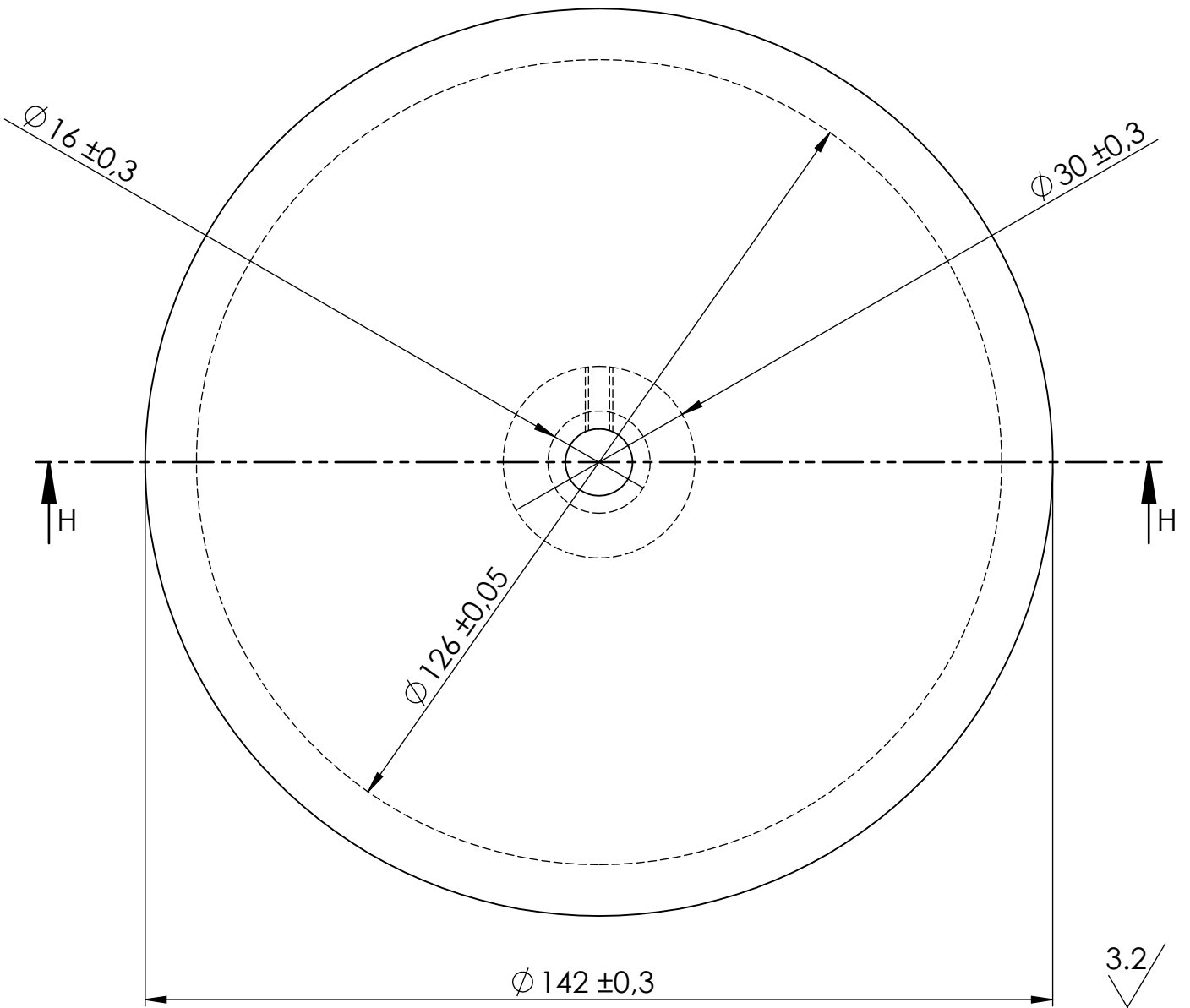
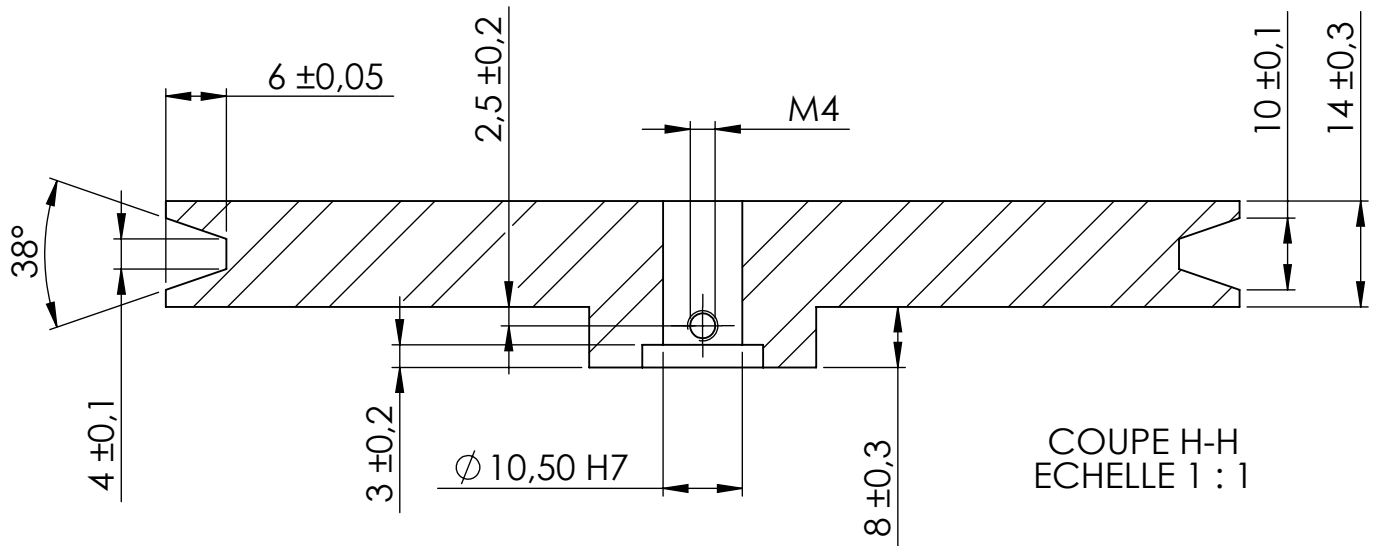
Ounnas-Yacine  
Ferhani-Abdelhakim  
M2-GM-CM

26/03/2021

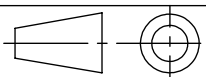


3.2/

<p>Echelle: 1:1</p> 	<h2>Bas du support moteur</h2>	<p>Ounnas-Yacine Ferhani-Abdelhakim M2-GM-CM</p>
<p>A4</p>		<p>UMMTO</p>



Echelle: 1:1



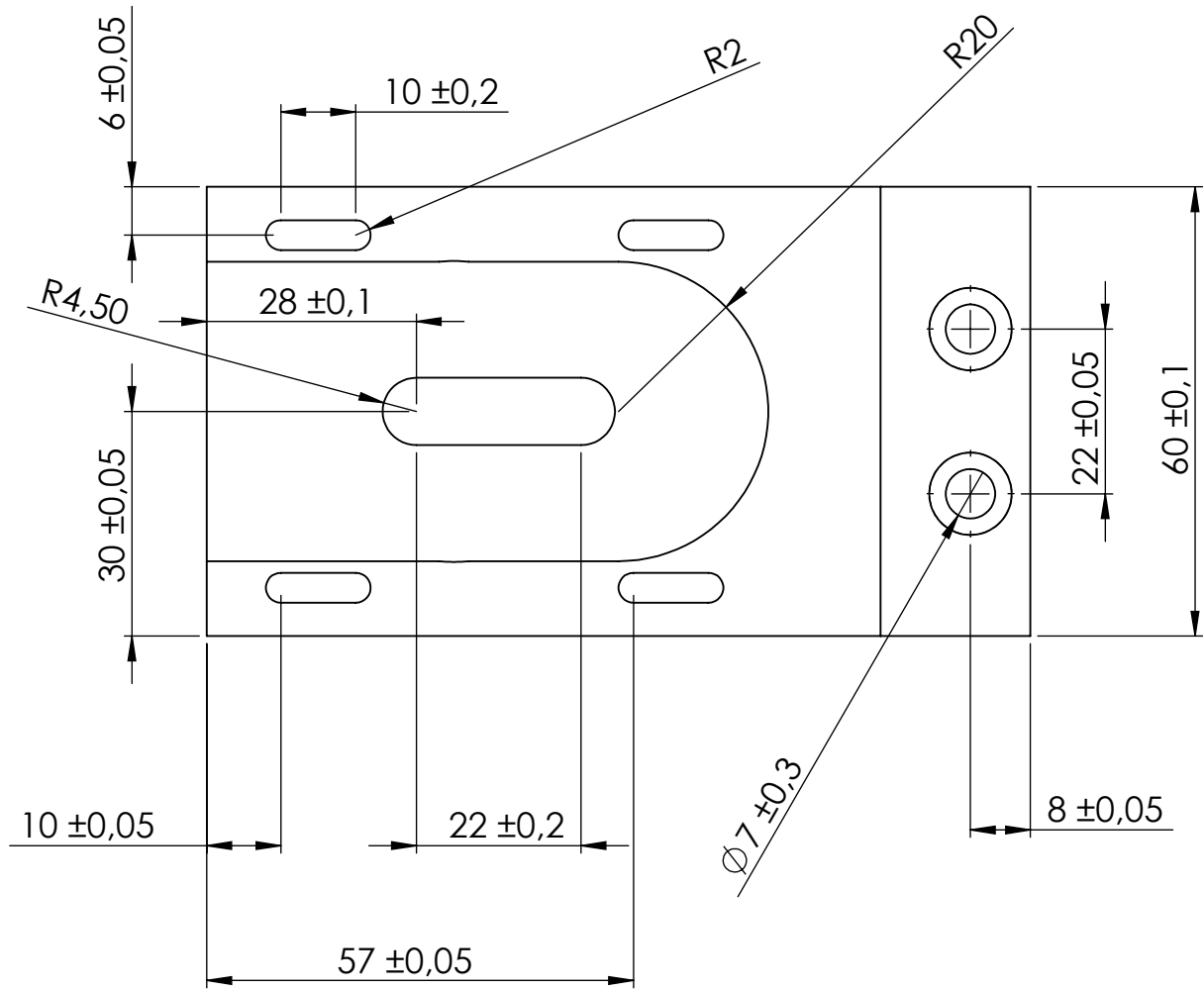
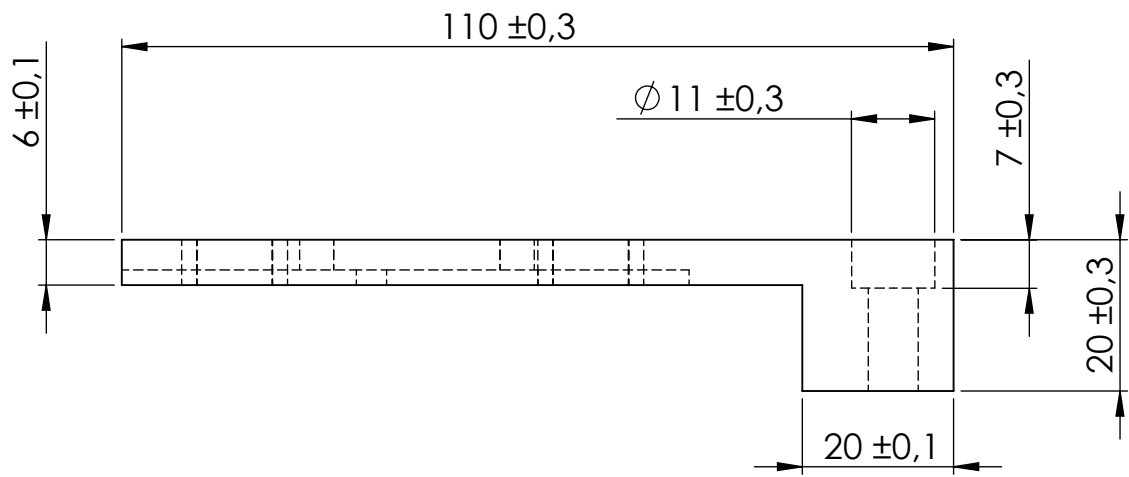
A4

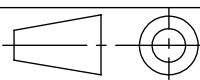
**grande poulie**

UMMTO

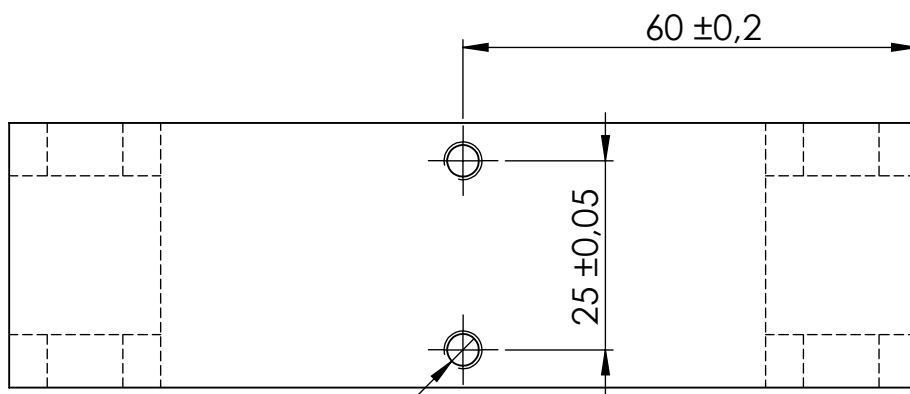
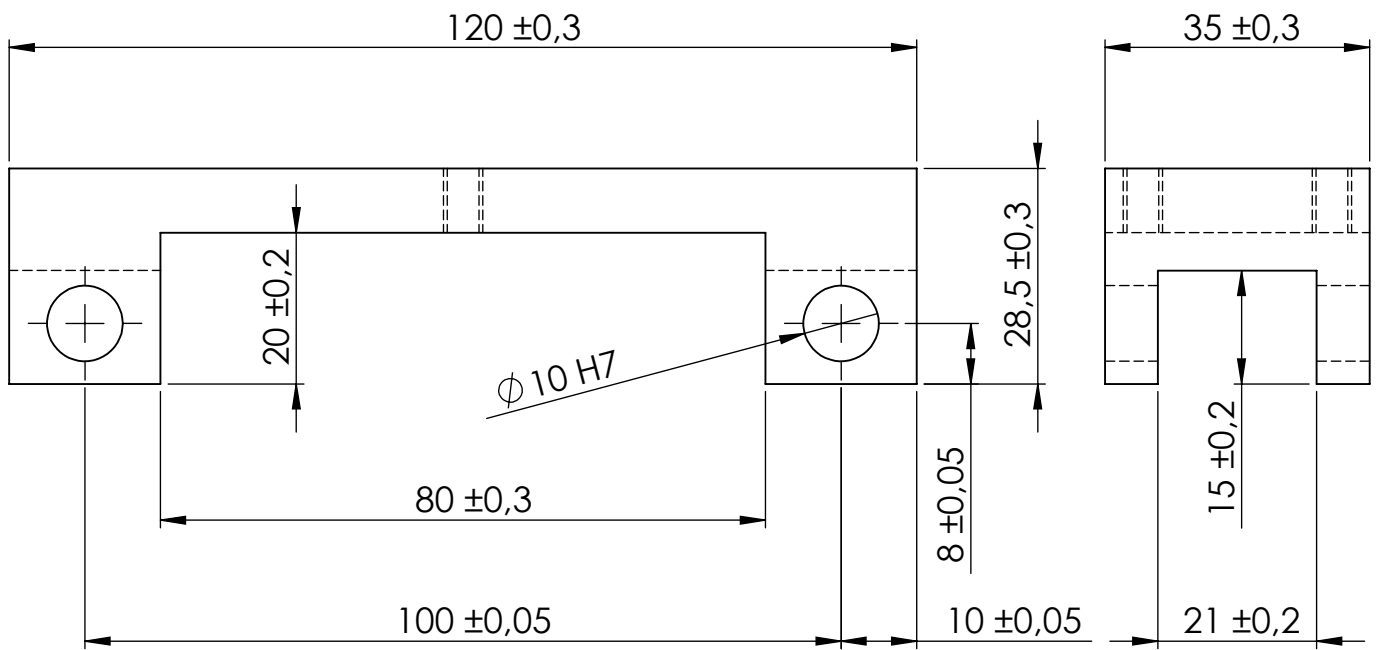
Ounnas-Yacine  
Ferhani-Abdelhakim  
M2-GM-CM

26/03/2021



<p>Echelle: 1:1</p> 	<h2>Haut du support moteur</h2>	<p>Ounnas-Yacine Ferhani-Abdelhakim M2-GM-CM</p>
<p>A4</p>	<p>UMMTO</p>	<p>26/03/2021</p>

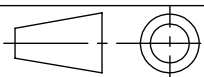




M5

3.2

Echelle: 1:1



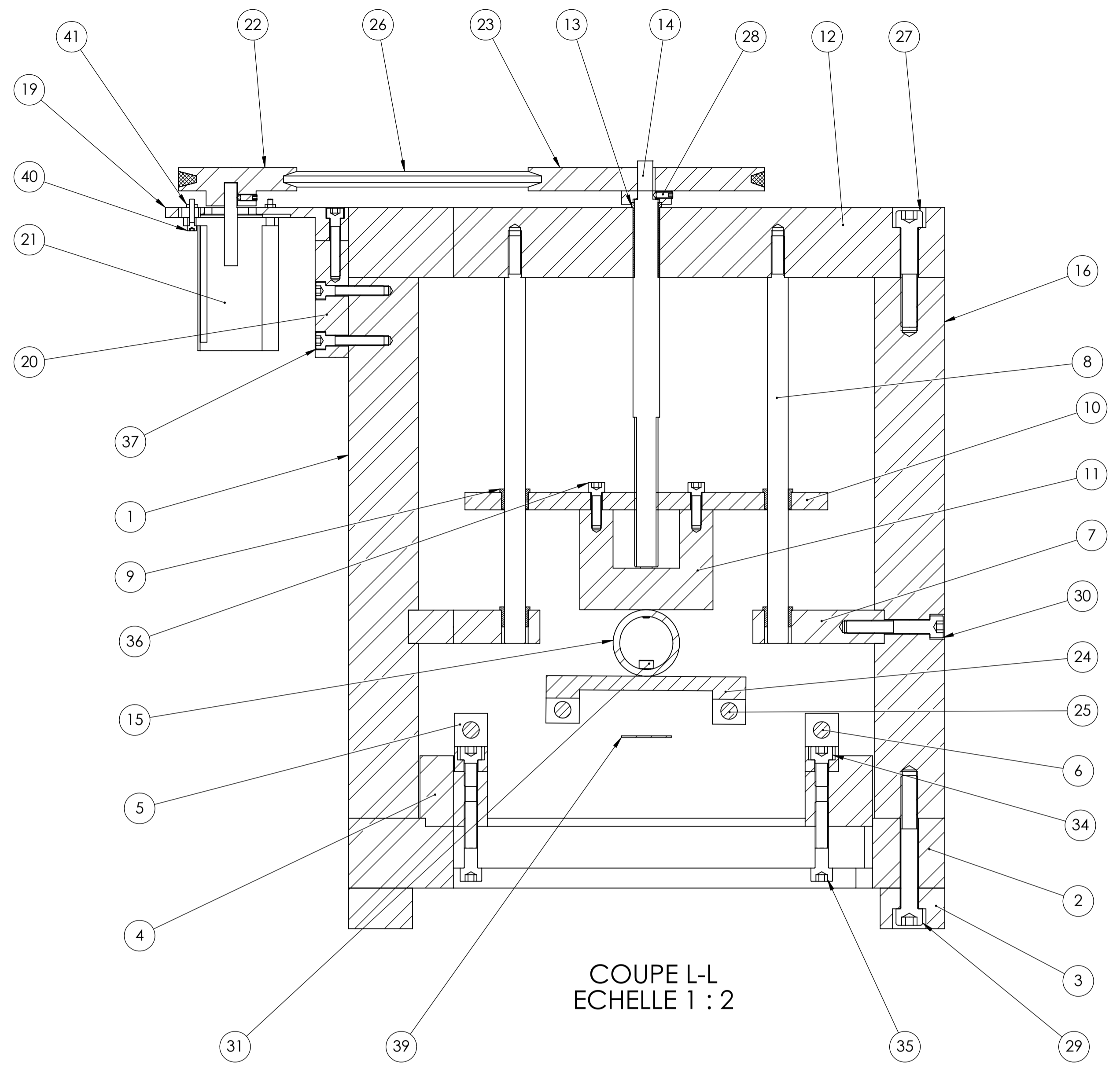
A4

**poinçon quatre points**

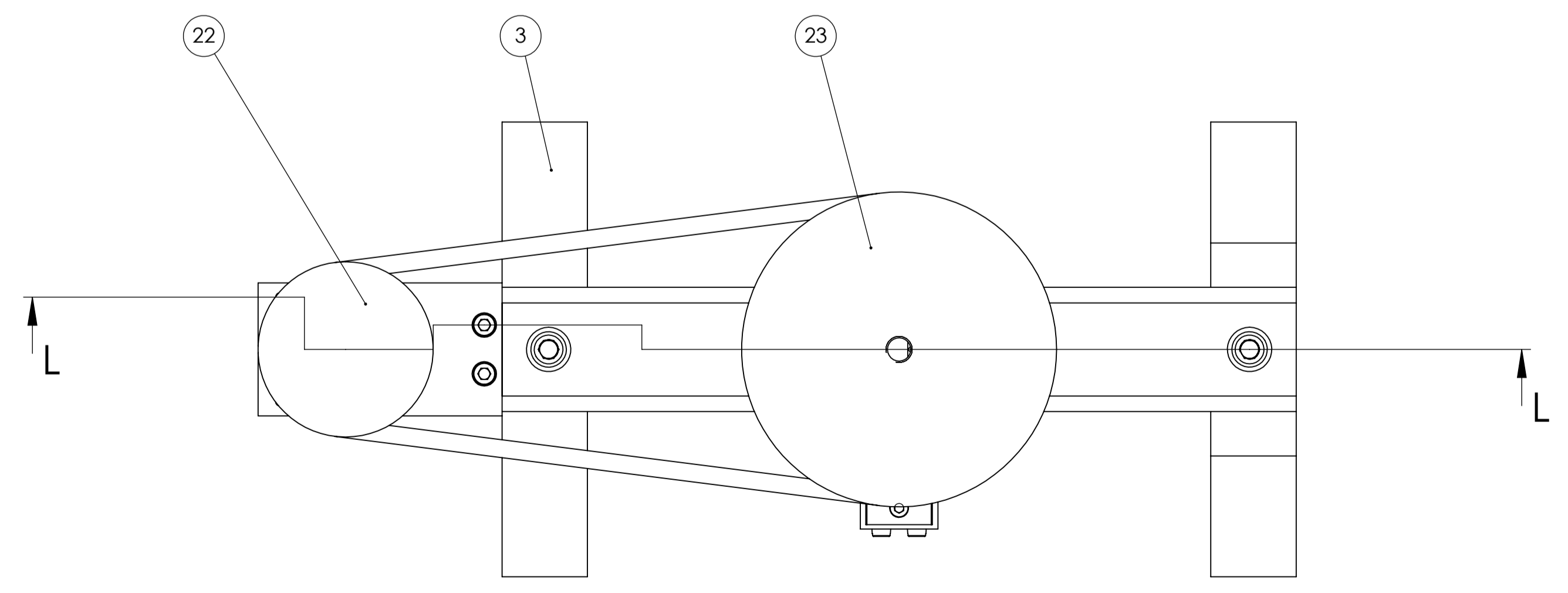
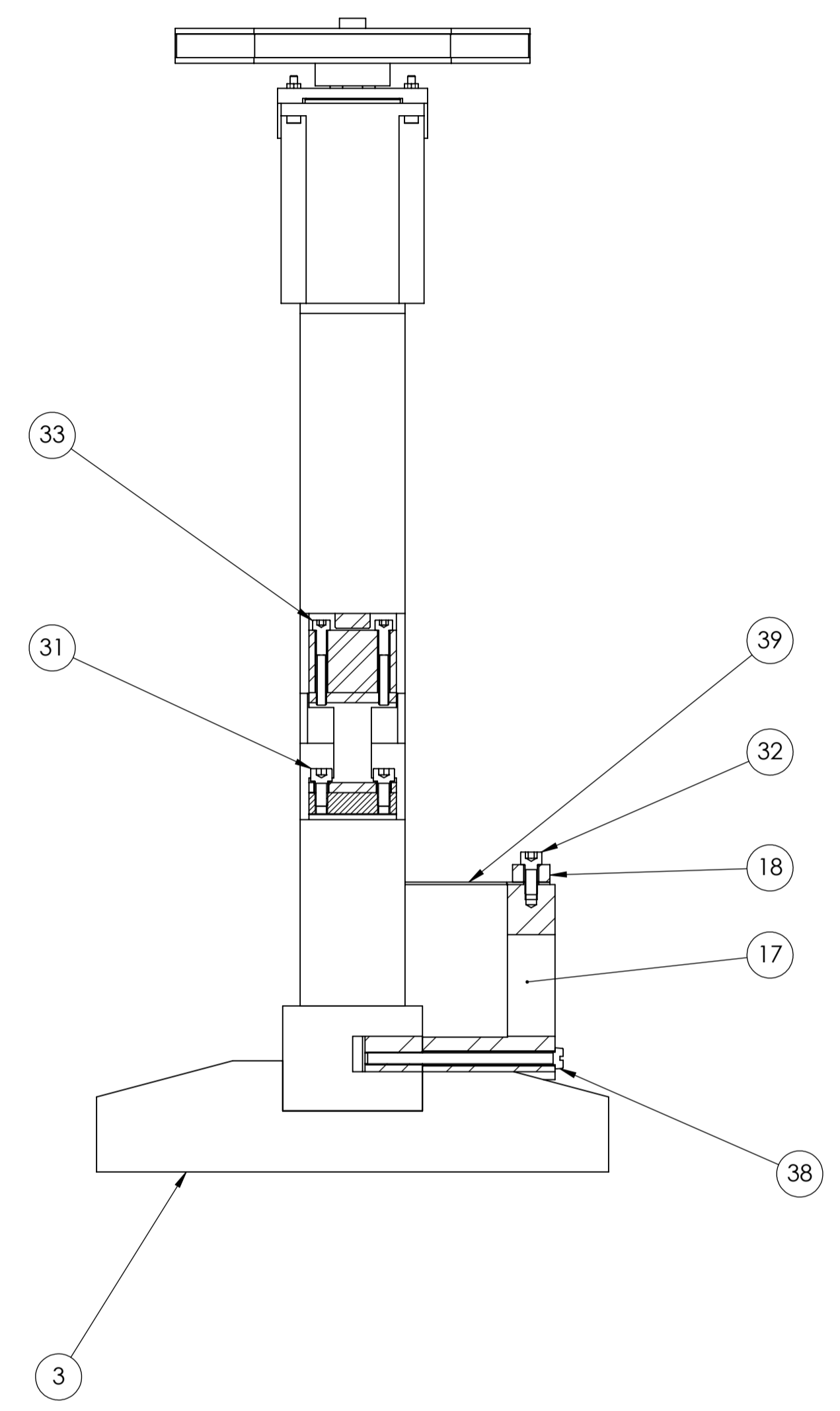
UMMTO

Ounnas-Yacine  
Ferhani-Abdelhakim  
M2-GM-CM

26/03/2021



COUPE L-L  
ECHELLE 1 : 2



41	4	Ecrou Hexagonal ISO - 4036 - M3		
40	4	VIS ISO 4762 M3 x 16		
39	1	Lame		
38	2	VIS AS 1427 - M5 x 75		
37	6	VIS ISO 4762 M6 x 35		
36	2	VIS ISO 4762 M6 x 20		
35	2	VIS ISO 4762 M8 x 40		
34	2	VIS ISO 4762 M8 x 16		
33	2	VIS ISO 4762 M4 x 30		
32	1	VIS ISO 4762 M5 x 12		
31	2	VIS ISO 4762 M5 x 10		
30	2	VIS ISO 4762 M8 x 50		
29	2	VIS ISO 4762 M10 x 80		
28	2	VIS ISO 4027 - M4 x 12		
27	2	VIS ISO 4762 M10 x 60		
26	1	Courroie	caoutchouc	
25	2	Axe de poicon	A60	
24	1	poinçon quatre points	A60	
23	1	grande poulie	2017 A	
22	1	petite poulie	2017 A	
21	1	Moteur électrique pas a pas		
20	1	Bas du support moteur	2017 A	
19	1	Haut du support moteur	2017 A	
18	1	serage de lame	2017 A	
17	1	Porte lame	2017 A	
16	1	ped de cadre 2	2017 A	
15	1	capteur de force	2017 A	
14	1	Axe	XC40	
13	1	bague de haut	Y 70	
12	1	Haut de cadre	2017 A	
11	1	Porte capteur	2017 A	
10	1	glissier	XC40	
9	4	Bague	Y 70	
8	2	Tige de Glissiere	XC40	
7	2	Cale de fixation de glessiere	2017 A	
6	2	Axe d'appuis d'eprouvette	XC40	
5	2	appuis d'eprouvette	XC40	
4	2	ped d'appuis	2017 A	
3	2	ped de table	2017 A	
2	1	table	2017 A	
1	1	ped de cadre 1	2017 A	
Rep	Nbr	Désignation	Matière	observation
Echelle: 1:2		<b>Banc d'essai en flexion</b>		Ounnas-Yacine Ferhani-Abdelhakim M2-GM-CM
A1		UMMTO		26/03/2021