

République Algérienne Démocratique Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique



P0002/05B

Département de Génie Mécanique

**PROJET DE FIN D'ETUDE**

Présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état  
en Génie Mécanique



Thème

**Conception et réalisation d'un montage  
sur machine de traction, adaptation  
d'un capteur de force et instrumentation**

---

Encadré par :  
M<sup>r</sup>. Y. BELKACEMI  
M<sup>r</sup>. B. GUERGUEB

Présenté par :  
BOUNADJA Abderrahmane

## Remerciements



Je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donnée la volonté et le courage afin d'arriver à la finalité de ce modeste travail.

Je remercie aussi ma famille, à qui revient la gloire de m'avoir éduqué, encouragé et soutenu.

Je tiens tout particulièrement à remercier mes promoteurs M<sup>r</sup> BELKACEMI et M<sup>r</sup> GUERGUEB d'avoir accepté de diriger cette étude.

Je remercie également messieurs les membres du jury, qui ont accepté de discuter et d'examiner ce modeste travail.

Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

J'adresse aussi ma profonde reconnaissance à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Un hommage particulier au défunt M<sup>r</sup> BENAZZOUZ Bouabdela qui m'a aidé à la réalisation des pièces du montage.

Que tout le personnel de la bibliothèque de l'ENP

## Dédicaces

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

A mon père et ma mère;

A mes frères et mes sœurs;

A la mémoire de mon grand père;

A ma grande mère et toute la familles;

A mes promoteurs Y.BELKACEMI et B.GUERGUEB;

A tous mes amis;

Et tout qui j'ai connus durant ma formation

Je dédie ce travail.

Abderrahmane.

الموضوع : تصور و انجاز تركيب على آلة اختبار الشد ، تكييف لجهاز قياس القوة و التجهيزات.

الملخص : يهدف هذا العمل الى تصور و انجاز تركيب لجهاز قياس القوة على آلة اختبار الشد، بعد أن أنجزنا التركيب قمنا ببعض التجارب على عينات مسطحة من الالمنيوم ملساء، بشجة و بثقب، هذا لملاحظة تأثير الأخطاء على مقاومة المواد.

كلمات مفتاحية : آلة اختبار الشد، جهاز قياس القوة، عينة اختبار ملساء، عينة اختبار بشجة ، عينة اختبار بثقب.

Sujet : conception et réalisation d'un montage sur machine de traction, adaptation d'un capteur de force et instrumentation.

Résumé : notre travail consiste a concevoir et réaliser un montage du capteur de force sur la machine d'essai de traction, après avoir réaliser le montage on a fait des essais sur des éprouvettes plates en aluminium lisses, entaillées et percées pour voir l'influence des défauts sur les matériaux.

Mots clés : machine d'essai de traction, capteur de force, éprouvette lisse, éprouvette entaillée, éprouvette percée.

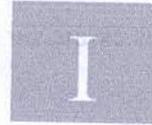
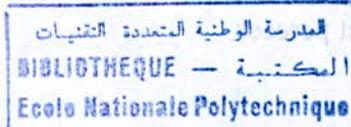
Subject : conception and realization of an installation on machine of traction, adaptation of a sensor of force and instrumentation.

Summary: our work consists in conceiving and to achieve an installation of the sensor of force on the trial machine of traction, after have achieve the installation one made some tests on flat plate test made of aluminum smooth, cut and breakthroughs to see the influence of the shortcomings on the materials.

Key words: trial machine of traction, sensor by force, smooth plate test, cut plate test, plate test breakthrough. Subject : conception et réalisation d'un montage sur

**Sommaire :**

|            |   |    |
|------------|---|----|
| I.         | Introduction .....  | 1  |
| II.        | Généralités .....   | 3  |
| II.1.      | But des essais .....  | 3  |
| II.2.      | Classification des essais .....   | 3  |
| II.2.1.    | Les essais statiques .....  | 3  |
| II.2.2.    | Les essais dynamiques .....   | 4  |
| II.2.3.    | Les essais complémentaires .....  | 4  |
| II.2.4.    | Les essais de travail .....   | 4  |
| II.2.5.    | Les essais chimiques .....  | 4  |
| II.2.6.    | Les essais de texture .....   | 4  |
| III.       | Essai de traction .....   | 5  |
| III.1.     | Machines d'essai de traction .....  | 5  |
| III.2.     | Condition d'exécution de l'essai .....  | 6  |
| III.2.1.   | Mise en place de l'éprouvette .....   | 6  |
| III.2.2.   | Vitesse de la machine .....   | 6  |
| III.2.2.1. | Limite d'élasticité .....   | 7  |
| III.2.2.2. | Résistance à la traction .....  | 7  |
| III.2.2.3. | Régularité .....  | 7  |
| III.2.3.   | Charge .....  | 8  |
| III.2.4.   | Appareils d'attache .....   | 8  |
| III.3.     | Détermination des caractéristiques .....  | 8  |
| III.3.1.   | Détermination de l'allongement à rupture .....  | 8  |
| III.3.2.   | Détermination de la limite d'allongement rémanent et la limite conventionnelle d'élasticité ..... | 9  |
| III.3.2.1. | Méthode de détermination de la limite d'allongement rémanent .....                                | 9  |
| III.3.2.2. | Méthode de détermination de la limite conventionnelle d'élasticité .....                          | 9  |
| III.4.     | Eprouvettes .....   | 11 |
| III.4.1.   | Forme générale .....  | 11 |
| III.4.2.   | Forme et dimensions de la partie calibrée .....   | 11 |
| III.4.2.1. | Dimension des éprouvettes cylindriques .....  | 11 |
| III.4.2.2. | Dimension des éprouvettes en tôles et feuillards .....  | 12 |
| III.5.     | Phénomène de la traction .....  | 13 |
| III.5.1.   | La déformation élastique .....  | 13 |
| III.5.2.   | La déformation plastique .....  | 14 |
| III.5.2.1. | Le glissement .....   | 14 |
| III.5.2.2. | Le maclage .....  | 15 |
| III.5.3.   | La rupture .....  | 16 |
| III.6.     | Calcul des caractéristiques mécaniques .....  | 16 |
| III.6.1.   | Limite élastique $R_e$ .....  | 16 |
| III.6.2.   | Résistance à la rupture .....   | 16 |
| III.6.3.   | Allongement à la rupture $A\%$ .....  | 17 |
| III.6.4.   | Module d'élasticité ou module de Young .....  | 17 |
| III.6.5.   | La striction .....  | 17 |
| III.7.     | Machines d'essais .....   | 18 |
| III.7.1.   | Machines hydrauliques .....   | 18 |
| III.7.2.   | Machines à vis .....  | 19 |
| IV.        | Les capteurs de forces .....  | 20 |
| IV.1.      | Rôle et place du capteur dans la chaîne de mesure .....   | 20 |



# Introduction

Si la connaissance des matériaux d'après leur nature, leurs caractéristiques et leurs comportements en service, constitue la base de toute technique en construction mécanique, par contre l'essai des métaux est le noyau indispensable pour pouvoir déterminer quantitativement leurs caractéristiques et celle des pièces mécaniques.

Les contraintes statiques appliquées à une pièce mécanique peuvent être réparties en contraintes statiques, contraintes par chocs et contraintes dynamiques.

- Contrainte statique: le métal est sollicité par une charge constante (traction compression, torsion, cisaillement, flexion).
- Contrainte par choc: la charge est appliquée très vite en un temps très court.
- Contrainte dynamique: variation régulièrement répétée de la charge (variation de grandeur et de sens).

Afin d'obtenir des résultats reproductibles à la suite de mesures répétées et afin de pouvoir conclure à la validité des essais en tout temps et en tout lieu, pour que les contrôles puissent être considérés comme fiables, on procède à des essais mécaniques fondamentaux de telle sorte que les éprouvettes spécialement utilisées soient sollicitées par une contrainte mécanique simple.

L'essai de traction qui permet de déterminer:

- La résistance à la traction.
- La limite élastique. Module de Young, Coefficient de Poisson
- L'allongement à la rupture.
- La striction à la rupture.

L'essai de traction est considéré comme le plus important, puisqu'il permet de donner des valeurs qui sont utilisables comme base de calcul pour les bureaux d'études.

L'objet du présent travail est de concevoir un montage de capteur de force sur la machine d'essai de traction, et de le réaliser au sein de l'atelier mécanique.

Ensuite un travail expérimental a été achevé pour exploiter le montage en réalisant des essais sur des éprouvettes entaillées et percées.

# Introduction

Si la connaissance des matériaux d'après leur nature, leurs caractéristiques et leurs comportements en service, constitue la base de toute recherche en construction mécanique, par contre l'essai des métaux est le moyen indispensable pour pouvoir déterminer quantitativement leurs caractéristiques et celle des pièces mécaniques. Les contraintes statiques appliquées à une pièce mécanique peuvent être réparties en contraintes statiques, contraintes par choc et contraintes dynamiques.

- Contrainte statique: le métal est sollicité par une charge constante (traction, compression, torsion, cisaillement, flexion).
- Contrainte par choc: la charge est appliquée très vite en un temps très court.
- Contrainte dynamique: variation régulièrement répétée de la charge (variation de grandeur et de sens).

Afin d'obtenir des résultats reproductibles à la suite de mesures répétées et afin de pouvoir conclure à la validité des essais en tout temps et en tout lieu, pour que les résultats puissent être considérés comme fiables, on procède à des essais mécaniques fondamentaux de telle sorte que les éprouvettes spécialement utilisées soient sollicitées par une contrainte mécanique simple.

- L'essai de traction qui permet de déterminer:
- La résistance à la traction.
  - La limite élastique, Module de Young, Coefficient de Poisson.
  - L'allongement à la rupture.
  - La striction à la rupture.

L'essai de traction est considéré comme le plus important, puisque il permet de donner des valeurs qui sont utilisables comme base de calcul pour les bureaux d'études.

L'objet du présent travail est de concevoir un montage de capture de force sur la machine d'essai de traction et de le réaliser au sein de l'atelier mécanique.



# Généralités

## II.1. But des essais

Les propriétés mécaniques des métaux et alliages sont d'un intérêt considérable puisqu'elles conditionnent non seulement tous les problèmes de mise en forme des matériaux, mais aussi leur comportement en service dans des applications extrêmement diversifiées, [1].

Les organes qui constituent les machines, les constructions civiles, les ouvrages d'art doivent résister aux efforts auxquels ils sont soumis, sans risque de rupture, de détérioration ou d'usure prématurée, [1].

Les dimensions des pièces ne peuvent être déterminées que si les propriétés des matériaux employés sont connues avec la meilleure précision.

Ces différentes propriétés du matériau sont définies par des nombres appelés caractéristiques.

Les essais ont pour but la détermination de ces caractéristiques.

Les essais sont exécutés dans les laboratoires des usines, et cela nécessite des machines et des outillages spéciaux.

## II.2. Classification des essais.

### II.2.1. Les essais statiques

Dans tout les essais, les éprouvettes sont soumises à des efforts croissant progressivement à partir de zéro jusqu'à un maximum correspondant à la rupture, [4].

Les principaux essais statiques sont :

- Les essais de traction.
- Les essais de compression.
- Les essais de cisaillement.

- Les essais de torsion.
- Les essais de flexion.

### **II.2.2. Les essais dynamiques**

La plupart des éléments de construction, en particuliers les organes de machines, sont généralement soumis à des charges extrêmement variables pouvant être considérées comme des chocs , [4].

Les essais dynamiques ont pour but de placer l'éprouvette à essayer dans des circonstances analogues, ou plus défavorables que celles subies par l'organe de machine en service.

Les principaux essais dynamiques sont :

- Les essais au chocs ou essais de résilience.
- Les essais d'endurance ou essai de fatigue.

### **II.2.3. Les essais complémentaires**

Ce sont les essais de dureté d'une importance considérable dans la pratique et les essais d'usure.

### **II.2.4. Les essais de travail**

Ces essais correspondent aux diverses applications industrielles et diffèrent suivant la forme et la désignation des métaux à contrôler.

Les principaux essais de travail sont:

- Les essais de pliage à froid.
- Les essais de pliages a chaud.
- Les essais de rabatement et de perçage.
- Les essais d'emboutissage.
- Les essais d'aplatissement.

### **II.2.5. Les essais chimiques**

Ces essais ont pour but de déterminer exactement la composition qualitative et quantitative des produits employés ou élaborés.

### **II.2.6. Les essais de texture**

C'est une étude micrographique et macrographique de la structure des matériaux.



# Essai de traction

L'essai de traction est, depuis bien des années, le procédé expérimental le plus largement utilisé dans l'étude du comportement mécanique. Il consiste à appliquer à une éprouvette, un effort de traction et à mesurer l'allongement correspondant, ou bien à imposer un allongement et à mesurer l'effort de traction.

L'éprouvette est soumise généralement à un effort de traction jusqu'à rupture, en vue de déterminer les différentes caractéristiques mécaniques de cette éprouvette, sauf spécification contraire, l'essai doit être exécuté à la température ambiante, [4].

L'essai de traction nous permet de déterminer :

- La résistance à la rupture.
- La limite élastique, Module de Young, Coefficient de Poisson.
- L'allongement à la rupture.

L'essai de traction est considéré comme le plus important des essais, puisqu'il permet de donner des valeurs exactes qui sont utilisables comme base de calcul.

## III.1. Machines d'essai de traction

Les éprouvettes sont solidement maintenues par leur tête entre des mâchoires de la machine. Ces mâchoires, en s'écartant l'une de l'autre, exercent une force de traction suivant l'axe géométrique de l'éprouvette.

Des appareils adaptés à la machine, permettent de mesurer à chaque instant l'effort de traction ou la charge et l'allongement correspondant de l'éprouvette, [6].

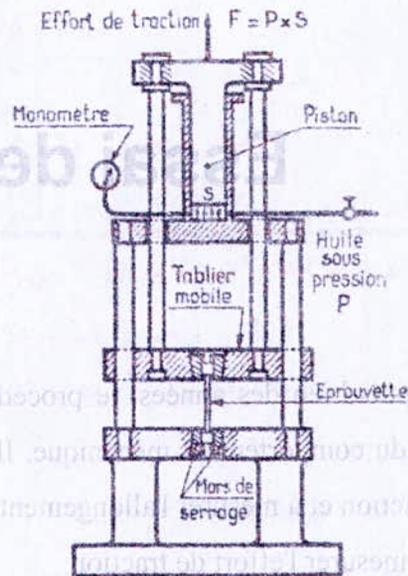


Fig. 1 Schéma de la machine d'essai de traction

### III.2. Condition d'exécution de l'essai

#### III.2.1. Mise en place de l'éprouvette

Les têtes de l'éprouvette doivent être serrées dans les mâchoires de la machine d'essai, de telle manière que la charge soit appliquée suivant l'axe de l'éprouvette et que la sollicitation soit répartie uniformément sur toute la largeur des extrémités.

#### III.2.2. Vitesse de la machine

Pour tous les métaux, le comportement au cours d'un essai de traction dépend de la vitesse d'application de la charge. (fig. 2)

Par traction rapide nous obtenons des résistances apparentes plus élevées et des allongements plus faibles que par traction en quasi statique.

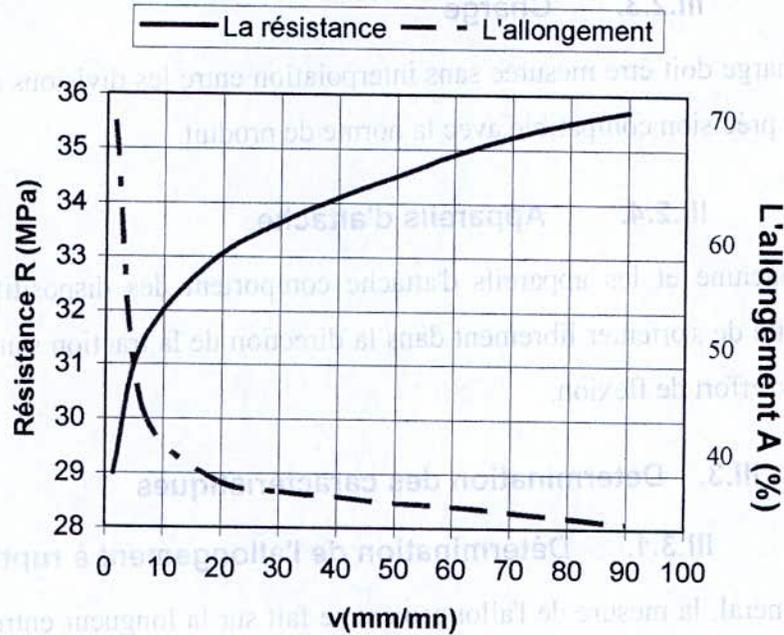


Fig. 2 Influence de la vitesse de traction sur les valeurs de R et de A dans le cas des aciers, [4].

#### III.2.2.1. Limite d'élasticité

Lorsque l'on se propose de déterminer une des limites d'élasticité, la vitesse de mise en charge de l'éprouvette ne doit pas dépasser  $3 \text{ daN/mm}^2/\text{s}$  à partir de la charge spécifique de  $5 \text{ daN/mm}^2$  et jusqu'à ce que la limite d'élasticité soit atteinte.

Pour la détermination de la limite supérieure d'écoulement, de la limite inférieure d'écoulement et la limite apparente d'élasticité, la longueur entre repère ne doit pas croître de plus de 15% par minute pendant la déformation plastique, [5].

#### III.2.2.2. Résistance à la traction

Pour la détermination de la résistance à la traction, la vitesse de séparation des têtes de la machine d'essai, exprimée en pourcent de la longueur calibrée par minute, dans le domaine plastique ne doit pas dépasser deux fois l'allongement minimal spécifique plus 10.

#### III.2.2.3. Régularité

Aussi bien dans le domaine élastique que dans le domaine plastique, la vitesse doit être aussi uniforme que possible et la variation de vitesse de l'un à l'autre doit se faire progressivement et sans à-coup.

### III.2.3. Charge

La charge doit être mesurée sans interpolation entre les divisions de la graduation avec une précision compatible avec la norme de produit.

### III.2.4. Appareils d'attache

La machine et les appareils d'attache comportent des dispositifs permettant à l'éprouvette de s'orienter librement dans la direction de la traction sans qu'il puisse se produire d'effort de flexion.

## III.3. Détermination des caractéristiques

### III.3.1. Détermination de l'allongement à rupture

En général, la mesure de l'allongement se fait sur la longueur entre repère  $L_0$ ; qui est marqué avant l'essai à  $\pm 1\%$  près.

Les deux fragments de l'éprouvette sont à cet effet soigneusement rapprochés, de manière que leurs axes soient dans le prolongement l'un de l'autre.

La variation de la longueur entre repère est mesurée à **0,25 mm** près.

Cette règle se heurte parfois (cas où la cassure est en sifflet) à des difficultés de raccordement des deux fragments de l'éprouvette. La détermination de l'allongement après rupture est alors entachée de quelque incertitude, [5].

Ce mode de détermination n'est valable que si la distance de la section de rupture la plus voisine n'est pas inférieure à 1/3 (pour les aciers) à 1/4 (pour tôles et feuillards en aciers) et à 1/5 (pour le cuivre et alliages de cuivres) de la longueur entre repère après rupture pour les éprouvettes proportionnelles

$$L_0 = K \cdot \sqrt{S_0} \quad (1)$$

La mesure reste toute fois valable, quelque soit la position de section de rupture, si l'allongement atteint la valeur spécifiée.

### **III.3.2. Détermination de la limite d'allongement rémanent et la limite conventionnelle d'élasticité**

#### **III.3.2.1. Méthode de détermination de la limite d'allongement rémanent**

La méthode par retour de la charge au zéro, pour la détermination de la limite d'allongement rémanent est la suivante :

Des charges croissantes sont successivement appliquées à l'éprouvette et maintenues chacune pendant dix à douze seconde, après suppression de chacune de ces charges, on mesure l'allongement rémanent pris par l'éprouvette, on arrête l'essai lorsque cet allongement dépasse 0,2% de la longueur initial, [4].

On détermine alors par interpolation entre les résultats obtenus la charge correspondante à l'allongement rémanent prescrit.

#### **III.3.2.2. Méthode de détermination de la limite conventionnelle d'élasticité**

On construit avec précision convenable la courbe des forces ou contrainte (en ordonnées) en fonction des allongements ou déformations -- pourcent (en abscisses).

On trace sur ce diagramme une droite parallèle à la partie rectiligne de la courbe et dont l'écart avec cette partie de la courbe, mesuré sur l'axe des allongement, est égale ou pourcentage prescrit de la longueur initiale entre repère. La charge à la limite conventionnelle d'élasticité correspond à l'intersection de cette droite avec la courbe lorsque la partie rectiligne du diagramme charge - allongement n'est pas définie clairement de façon que la droite parallèle ne peut être tracée avec une certitude suffisante, le procédé suivant est alors recommandé.

Après que la limite conventionnelle d'élasticité présumée ait été dépassée, la charge est réduite jusqu'à une valeur à environ 10% de la charge atteinte, puis on croit de nouveau la charge jusqu'à ce quelle dépasse la valeur atteinte initialement, [4].

Pour la détermination de la limite conventionnelle d'élasticité recherchée, une droite est tracée en travers de la boucle d'hystérésis, on trace en suite une droite parallèle à cette dernière dont la distance à l'origine de la courbe, mesurée sur l'axe des abscisses est égal à la valeur prescrite de l'allongement non proportionnelle. La charge qui correspond à l'intersection de cette parallèle et de la courbe de charge – allongement est la limite conventionnelle d'élasticité recherché.

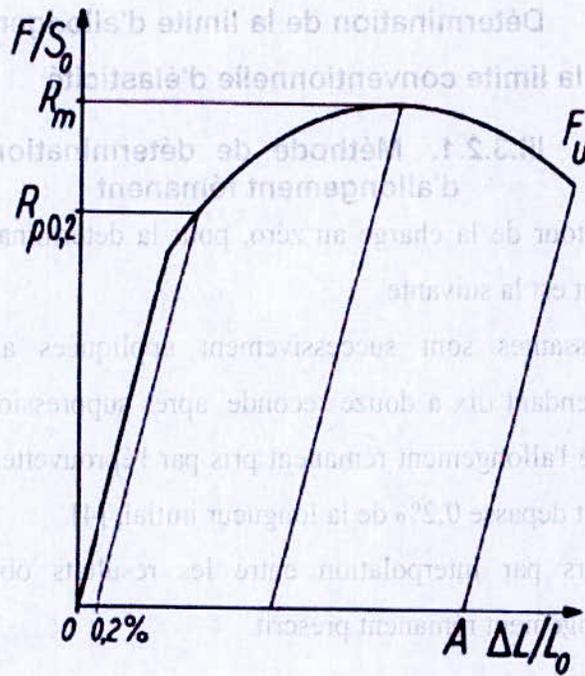


Fig. 3 Courbe de traction

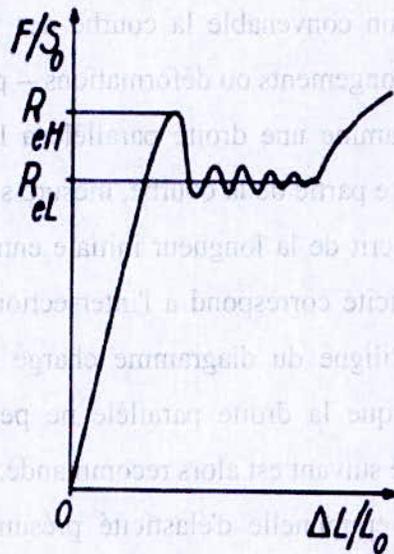


Fig. 4 Limite supérieur et inférieur d'écoulement

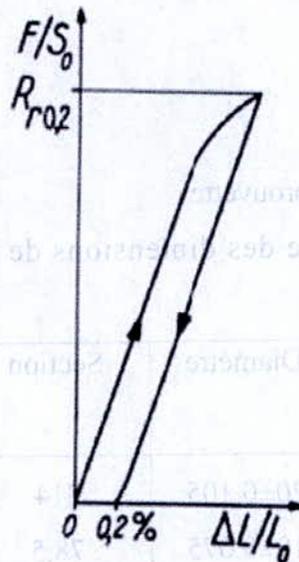


Fig. 5 Limite d'allongement rémanent

### III.4. Eprouvettes

#### III.4.1. - Forme générale

La partie calibrée doit être raccordée par des congés aux têtes d'amarrage, celle-ci pouvant être de toute forme adaptée aux dispositifs de fixation de la machine d'essai.

#### III.4.2. Forme et dimensions de la partie calibrée

La section de l'éprouvette peut être circulaire, carré, rectangulaire ou dans des cas spéciaux d'une autre forme.

En règle générale, le diamètre de la partie calibrée des éprouvettes cylindriques usinées ne doit pas être inférieur à **4 mm**.

Pour les éprouvettes en tôle, les têtes d'amarrage doivent être plus large que la partie calibrée, la longueur  $L_0$  doit être raccordée à ces têtes par un congé de rayon au moins égal à **20mm**. La largeur de ces têtes doit être de **20mm** au moins et de **40mm** au plus.

##### III.4.2.1. Dimension des éprouvettes cylindriques

La longueur de la partie calibrée  $L_c$  doit être comprise entre  $L_0+d/2$  et  $L_0+2d$

La longueur entre repère généralement est déterminé a partir de l'équation

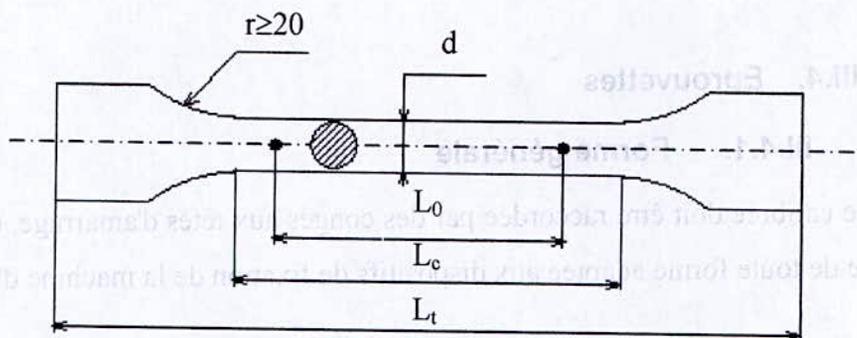
$$L_0 = K \cdot \sqrt{S_0} \quad (2)$$

Ou  $K=5,65$  pour les aciers

$S_0$ =la section initiale de l'éprouvette

Le tableau suivant donne des dimensions de l'éprouvette selon la norme **NFA03-15A**

| K    | Longueur entre repère | Diamètre       | Section | Longueur calibrée | Longueur totale  |
|------|-----------------------|----------------|---------|-------------------|--|
| 5,56 | $100 \pm 1,0$         | $20 \pm 0,105$ | 314     | 110 à 140         | Dépend du mode de fixation dans les attaches de la machine |
|      | $50 \pm 0,5$          | $10 \pm 0,075$ | 78,5    | 55 à 70           |  |



$$\text{avec } L_0 = K \cdot \sqrt{S_0}$$

$$L_c = L_0 + d/2 \text{ à } L_0 + 2 \cdot d$$

$$L_t = L_c + 2 \cdot d \text{ à } L_c + 4 \cdot d$$

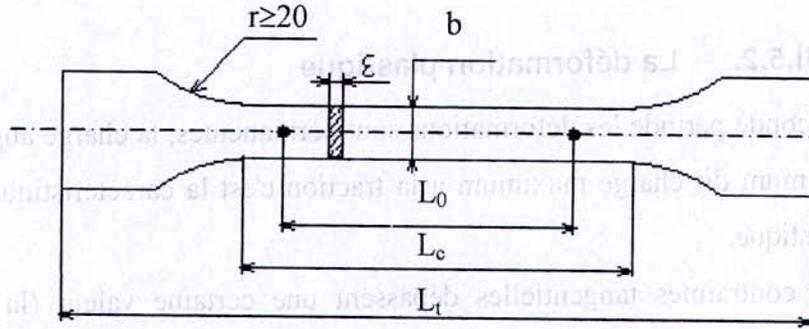
Fig. 6 Schéma d'une éprouvette cylindrique

#### III.4.2.2. Dimension des éprouvettes en tôles et feuillards

Les éprouvettes en tôle et feuillards ont une épaisseur nominale égale ou supérieure à **0,5 mm** et inférieure à **3 mm**.

Le tableau suivant donne des dimensions de l'éprouvette selon la norme **NFA03-160**

| Eprouvette | Epaisseur | Largeur | Longueur entre repère | Longueur calibrée |
|------------|-----------|---------|-----------------------|-------------------|
| 1          | 0,5 à 3,0 | 20      | 80                    | 120               |
| 2          | 0,5 à 2,0 | 12,5    | 50                    | 750               |



$$\text{avec } L_0 = K \cdot \sqrt{S_0}$$

$$L_c = L_0 + d/2 \text{ à } L_0 + 2 \cdot d$$

$$L_t = L_c + 2 \cdot d \text{ à } L_c + 4 \cdot d$$

Fig. 7 Schéma d'une éprouvette en tôle

### III.5. Phénomène de la traction

Suivant le diagramme de l'essai de traction nous remarquons trois parties :

- Une partie rectiligne correspondante à la zone d'élasticité du métal.
- Une deuxième partie suit la partie rectiligne qui correspond à la zone de plasticité du métal.
- Une troisième zone qui correspond à la rupture du métal

#### III.5.1. La déformation élastique

Dans une première période l'éprouvette soumise à des charges croissantes se déforme élastiquement. On constate que les allongements sont proportionnels aux efforts. Cette propriété est caractéristique des déformations élastiques.

On appelle déformation élastique une déformation dont l'action sur la forme, la structure et les propriétés d'un corps cesse complètement lorsque la charge appliquée est supprimée

La déformation élastique ne provoque pas de modifications permanentes perceptibles de structures et de propriétés du métal.

La charge appliquée ne produit qu'un déplacement relatif et parfaitement réversible des atomes ou le pivotement des blocs de cristal.

Lors de la traction d'un monocristal les atomes s'éloignent les uns des autres et en compression ils se rapprochent.

### III.5.2. La déformation plastique

Dans une seconde période les déformations sont permanentes, la charge augmente jusqu'à un maximum dit charge maximum à la traction c'est la caractéristique de la déformation plastique.

Lorsque les contraintes tangentielles dépassent une certaine valeur (la limite d'élasticité), la déformation devient irréversible. La suppression de la charge n'élimine que la composante élastique de la déformation, mais la partie de déformation plastique subsiste.

Dans les cristaux, la déformation plastique peut se produire par glissement ou maclage.

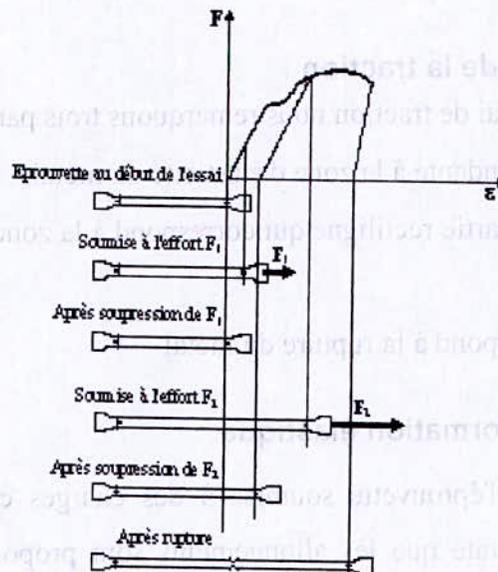


Fig. 8 Diagramme d'essai de traction

#### III.5.2.1. Le glissement

Le glissement est le déplacement des parties isolées d'un cristal d'une par rapport à l'autre qui se produit sous l'effet des contraintes tangentielles, lorsque ces contraintes atteignent une valeur critique déterminer  $\tau_{cr}$  dans le plan et la direction du glissement, [7].

Sous l'action d'une contrainte  $\tau$ , la dislocation s'incurve pour prendre la forme d'une demi sphère, à cet instant la valeur de la contrainte  $\tau$  est maximale. La dislocation poursuit spontanément sa propagation en formant deux spirales qui se touchent et forme une boucle fermée extérieure et nouveau secteur de dislocation occupe la position de départ.

La boucle fermée extérieur croît jusqu'à ce quelle atteint la surface extérieur du cristal et produit ainsi un glissement élémentaire.

La nouvelle dislocation sous l'action de la contrainte  $\tau$  commence à s'incurver de la même façon que précédemment.

Si la contrainte  $\tau$  agit encore, une source peut produire plusieurs dislocations et prendre fin seulement dans le cas ou la boucle se heurte dans son développement contre des obstacles.

Ce mécanisme de déformation des dislocations au cours d'une déformation a été découvert en 1950 par **FRANCK** et **READ**, [3].

Le glissement dans un réseau cristallin à lieu suivant les plans et les directions de l'empilement les plus compacts des atomes ou la résistance au déplacement  $\tau_{cr}$  est minimale alors que la contrainte  $\tau$  est important. Ceci s'explique par la distance maximale entre les plans atomique connexes qui rendent minimale la liaison entre ces plans.

Plus le nombre de plan et de direction de glissement d'un métal est grand, plus son aptitude à la déformation plastique est élevée.

Un métal a réseau cubique sont très plastique. Le glissement dans ces métaux peut s'effectuer suivant plusieurs directions.

La plasticité des métaux à réseau hexagonal à empilement compact est plus faible, ils se prêtent donc plus mal au laminage, à l'estampage et à d'autres modes de déformation que les métaux à réseau cubique.

### III.5.2.2. Le maclage

On appelle maclage, un mode de déformation suivant lequel une partie du cristal se trouve en relation d'orientation avec le reste du cristal.

La séparation entre les deux parties du cristal au niveau de la macle.

Le maclage mécanique c'est celui qui apparaît au cours de la déformation, correspondant à un cisaillement du réseau par rapport au plan de macle.

Dans ce mode de déformation chaque atome situé à une distance donnée du plan de macle est l'objet d'une translation constante parallèle au plan de macle et dans une direction dite de maclage, [3].

Ce mode de déformation est très important dans les métaux à réseau hexagonal compact dont les systèmes de glissement sont peu nombreux

Au cours de la déformation, la formation des macles est sonore et leur développement est très rapide.

### III.5.3. La rupture

Enfin l'allongement continue à se produire provoquant une baisse se la charge unitaire. En un point de l'éprouvette se produit une striction puis il y a rupture.

Une rupture en se développant passe par deux étapes dont la première est la naissance d'une fissure et la seconde sa propagation à travers toute la section de l'éprouvette, [4].

Une rupture peut être ductile ou fragile.

Une rupture ductile s'accompagne d'une déformation plastique très importante, dans le cas d'une rupture fragile la déformation plastique est faible.

La rupture ductile est déterminée par la faible vitesse de propagation d'une fissure, pour une rupture fragile cette propagation de la fissure est très rapide.

## III.6. Calcul des caractéristiques mécaniques

### III.6.1. Limite élastique $R_e$

C'est l'effort de la limite élastique  $F_e$  divisé par la section initial  $S_0$  de l'éprouvette

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (3)$$

### III.6.2. Résistance à la rupture

C'est le quotient de l'effort de rupture  $F_r$  divisé par la section initiale  $S_0$  de l'éprouvette.

$$R_r = \frac{F_r}{S_0} \quad (4)$$

### III.6.3. Allongement à la rupture A%

L'allongement maximum de rupture  $L_r$  est égal à la différence des longueurs de l'éprouvette après rupture  $L_u$  et avant l'essai  $L_0$ .

$$L_r = L_u - L_0$$

D'où

$$A\% = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100 \quad (5)$$

### III.6.4. Module d'élasticité ou module de Young

L'allongement relatif élastique, c'est le quotient de l'allongement de la limite élastique  $a$  par la longueur initial de l'éprouvette

$$\varepsilon = \frac{a}{L_0} \quad (6)$$

Le module d'Young est la contrainte mécanique qui engendrerait un allongement de 100 % de la longueur initiale d'un matériau, si on pouvait l'appliquer réellement : dans les faits, le matériau se déforme de façon permanente, ou se rompt, bien avant que cette valeur soit atteinte, [7].

Le module de Young  $E$  est donné par la relation suivante

$$E = \frac{R_e}{\varepsilon} \quad (7)$$

D'où

$$E = \frac{F_e \cdot L_0}{S_0 \cdot a} \quad (8)$$

### III.6.5. La striction

La striction est la réduction localisée des dimensions transversales de l'éprouvette se produisant au cours de l'essai sous l'influence de la charge.

Le coefficient de striction  $Z$  est le rapport de la variation ultime de section transversale produite par l'essai  $S_0-S_u$  à la section initiale  $S_0$ .

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \quad (9)$$

L'allongement de striction  $Z_u$  est le rapport de variation ultime de section transversal produite par l'essai  $S_0-S_u$  à la section après rupture  $S_u$ .

$$Z_u = \frac{S_0 - S_u}{S_u} \quad (10)$$

$S_0$  est la section initiale de l'éprouvette avant déformation.

$S_u$  est la section de l'éprouvette après la rupture.

### III.7. Machines d'essais

Une machine d'essai est composée d'un bâti, d'un dispositif de mise en marche et un dispositif de mesure des efforts et des allongements.

La commande des efforts peut être mécanique, ou hydraulique elle peut être fait manuellement ou par un moteur.

Lorsqu'on utilise une commande hydraulique, la mise en marche croit régulièrement avec le temps, tandis qu'avec une commande mécanique c'est l'allongement qui augmente régulièrement, ce qui entraîne au début un accroissement très rapide de la charge.

Lorsque nous voulons obtenir une vitesse d'allongement absolument constante, il y a lieu de choisir une machine à commande et mise en charge mécanique, pour obtenir un allongement régulier.

#### III.7.1. Machines hydrauliques

L'effort peut être exercé par un vérin hydraulique ou par un moteur électrique agissant sur une vis attaquant une traverse mobile.

Les machines les plus anciennes était généralement hydrauliques l'admission de l'huile dans le vérin se faisait à travers un robinet à pointeau. L'opérateur a aussi la possibilité de régler manuellement le débit et de contrôler approximativement la vitesse de déplacement de la traverse.

Dans ces machines, la pression d'huile est mesurée à l'aide d'un dynamomètre à pendule. Le déplacement de ce pendule est transmis par une crémaillère à l'aiguille du cadran de mesure des charges, et par ailleurs cette crémaillère est prolongée par une tige qui porte un stylet enregistreur.

Le déplacement de la traverse commande simplement la rotation de l'enregistreur à l'aide d'un fil tendu par un contre poids.

Ces machines ont le mérite de la simplicité et de la robustesse et elles rendent encore de très grands services dans de nombreux laboratoires. Leur inconvénient principal est le manque de stabilité et de contrôle de la vitesse de déplacement de la traverse, or dans de nombreux essais, il est important d'évaluer correctement l'influence de ce paramètre sur les propriétés mécaniques.

### III.7.2. Machines à vis

On utilise maintenant de plus en plus des machines à vis mues par moteur électrique. Un système de boîte à vitesse permet de choisir la vitesse de déplacement de la traverse dans une gamme élevée et de charger instantanément.

La mesure de la charge se fait à l'aide de cellules placées généralement à la partie supérieure du bâti. Il s'agit d'anneaux ou de cylindres dynamométriques équipés de jauges de contraintes ou de capteur de déplacement à induction, le signal est envoyé à un enregistreur potentiométrique, la charge commande le déplacement du stylet

Le déplacement du papier est lié à celui de la traverse. Les systèmes d'amplification procurent une grande souplesse d'enregistrement, On peut aisément choisir les échelles les mieux appropriées, décaler l'origine pour réaliser la fenêtre la meilleure pour la mesure visée.

Il est généralement possible de commander le déplacement du papier de l'enregistrement par un potentiomètre commandé par un extensomètre placé sur l'éprouvette, il est alors possible de piloter la vitesse de déformation de l'éprouvette, en court-circuitant la déformation parasite de la traverse.



# Les capteurs de forces

La mesure des efforts s'effectue de deux façons : soit en utilisant un capteur d'efforts, monté en série dans la chaîne d'application de l'effort, soit par l'intermédiaire d'un calcul en mesurant un autre paramètre (pression, accélération) lié par une relation mathématique à l'effort, [8].

Ainsi, on mesurera l'effort d'un vérin en mesurant la pression  $p$  et en remontant à l'effort par la relation

$$F = pS \quad (11)$$

où  $S$  est la section du vérin.

C'est la méthode généralement utilisée pour connaître l'effort généré par une presse d'essai.

De même, on pourra apprécier l'effort dans un crochet d'attelage, en phase d'accélération du véhicule et de sa remorque, en mesurant  $\gamma$  et en appliquant la relation :

$$F = m\gamma \quad (12)$$

Avec  $m$  masse de la remorque,

$\gamma$  accélération de l'ensemble roulant, abstraction faite des résistances passives.

Mais un crochet dynamométrique donnerait directement l'effort. Dans cet esprit, on ne va s'intéresser qu'aux capteurs montés en série dans la chaîne d'application de l'effort, cas de notre machine.

## IV.1. Rôle et place du capteur dans la chaîne de mesure

Un capteur d'efforts est monté en série dans le dispositif mécanique de transmission de l'effort. Le rôle du capteur est de traduire la valeur de l'effort en une grandeur ou une indication exploitable. Sur les pesons à ressort ou à amplification

mécanique, la valeur de l'effort est traduite par l'indication d'une aiguille ou d'un index mobiles. Dans les capteurs fournissant un signal électrique, l'effort est converti en une tension électrique proportionnelle à la valeur de cet effort. Ce type de capteur ne peut fonctionner qu'au sein d'une chaîne de mesure dont le rôle est de rendre l'information prélevée compréhensible et exploitable, [7].

Outre la fonction éventuelle d'alimentation électrique du capteur, la chaîne de mesure amplifie et met en forme le signal recueilli, le transmet à d'autres organes, appelés composants de la chaîne, en vue de la visualisation de la réponse (ou signal de sortie), ou bien de son enregistrement ou de son traitement. La transformation du signal et son cheminement peuvent entraîner des erreurs plus ou moins cumulables d'un composant de la chaîne à l'autre. Il conviendra d'estimer ces erreurs qui viendront entacher la précision du résultat et s'ajouter à celles résultant des caractéristiques métrologiques du capteur et de son montage.

#### IV.2. Constitution du capteur

Un capteur à réponse électrique se compose des parties constitutives suivantes :

— un corps d'épreuve : c'est l'élément mécanique du capteur qui réagit sélectivement sous l'action du mesurande avec lequel il est soit en contact direct, soit relié par un élément intermédiaire ; le corps d'épreuve est spécifique du mesurande et du principe de mesure adopté ; il a pour rôle de transformer le mesurande en une grandeur physique mesurable, [7].

— un détecteur : c'est l'élément sensible du capteur ; il est lié au corps d'épreuve et traduit les réactions de celui-ci en grandeur électrique ; il est également appelé transducteur.

— un boîtier : c'est l'élément rigide de protection et de maintien du corps d'épreuve et du détecteur, qui sert également à fixer le capteur sur le spécimen, en évitant par sa conception les déformations du corps d'épreuve dues aux conditions d'implantation (serrage, contrainte de base) ; il contient et protège tout ou partie de l'électronique de conditionnement du signal de sortie ;

— une électronique de conditionnement ; elle est indispensable pour l'alimentation du capteur s'il est « passif », ainsi que pour la mise en forme et l'amplification du signal. Elle peut être doublée d'une électronique de pré-traitement du signal ; en essais et au laboratoire. Ces éléments ne sont intégrés au capteur que s'ils ne sont pas préjudiciables à son bon fonctionnement (finesse, effets des grandeurs d'influence), [8].

La figure 10 montre un exemple de réalisation d'un capteur d'efforts en traction.

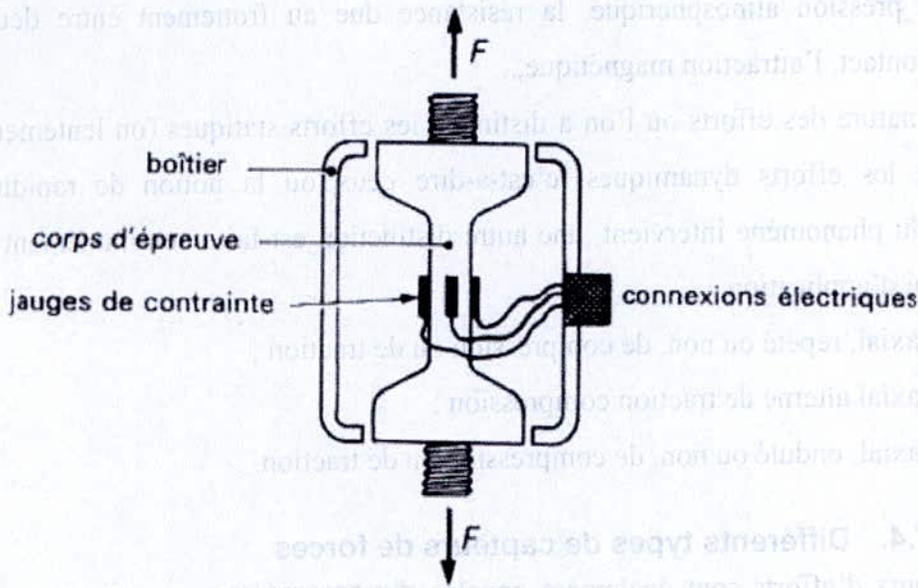


Fig.10 Capteur d'efforts de traction

Le corps d'épreuve doit être déformable et conçu pour réagir sélectivement à la seule application de l'effort selon son axe d'application. Cette déformabilité est toute relative : en fonction du type de détection, elle peut aller de quelques micromètres à quelques dixièmes de millimètre d'allongement sous effort maximal. Par la variation de leur résistance électrique, les jauges traduisent l'état de déformation du matériau du corps d'épreuve, représentatif de l'effort appliqué.

Une caractéristique des capteurs liée à la déformabilité est la raideur, qui est un élément de choix des capteurs, [8]. Une grande raideur traduit la faculté du capteur à ne perturber ni l'application de l'effort ni la mesure par la trop grande ampleur de ses déformations. C'est une caractéristique particulièrement utile à connaître dans le cas de mesure des efforts dynamiques où, bien souvent, une grande raideur est recherchée pour ne pas perturber la mesure par une déformation, donc une élasticité, excessive du capteur qui pourrait avoir pour effet de provoquer la résonance de l'ensemble monté si la fréquence du phénomène mesuré était proche de celle du montage mécanique.

### IV.3. Différents types de mesures à effectuer

En partant des principes définis précédemment, une force est donc toute cause capable de modifier l'état de repos ou de mouvement d'un point matériel ou d'un solide rigide auquel elle est appliquée.

Il existe de nombreuses sortes de forces : la force de gravité, la pression (qui correspond à une force répartie par unité de surface) qui s'exerce sur la face du piston

d'un vérin pneumatique ou hydraulique, la pression d'un gaz sur la paroi d'un réservoir, la pression atmosphérique, la résistance due au frottement entre deux surfaces en contact, l'attraction magnétique,...

Outre la nature des efforts où l'on a distingué les efforts statiques (ou lentement variables) et les efforts dynamiques, c'est-à-dire ceux où la notion de rapidité d'évolution du phénomène intervient, une autre distinction est faite communément à partir de la loi d'application

- effort axial, répété ou non, de compression ou de traction ;
- effort axial alterné de traction/compression ;
- effort axial, ondulé ou non, de compression ou de traction.

#### **IV.4. Différents types de capteurs de forces**

Les capteurs d'efforts sont également appelés dynamomètres, ou pesons, ou cellules de force.

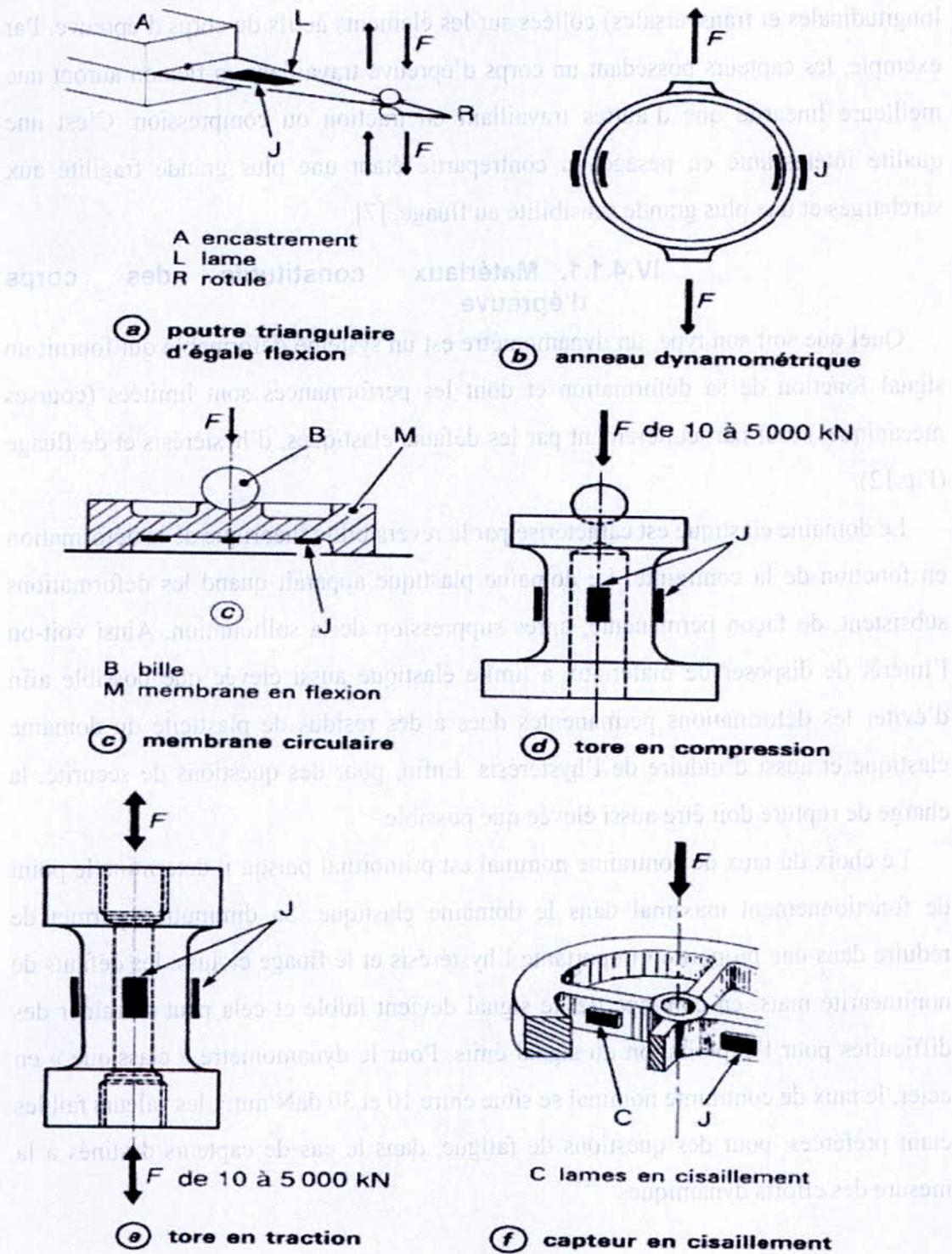
Un capteur d'efforts est monté en série dans la chaîne mécanique par laquelle chemine l'effort. Il est à la fois soumis à l'effort à mesurer et à un effort de réaction. De cet antagonisme résulte une déformation du corps d'épreuve représentative de l'effort appliqué.

C'est cette déformation qu'il convient de traduire en une grandeur mesurable. Plusieurs principes physiques permettent la mise en évidence de la déformation. Plusieurs technologies en découlent que nous allons examiner successivement ci-après, [7].

##### **IV.4.1. Capteurs à mesure directe de la déformation**

Ces capteurs possèdent un corps d'épreuve métallique. La déformation de ce corps d'épreuve est régie par la loi de Hooke, tant que cette déformation reste dans le domaine élastique. Cette loi se traduit par la règle de proportionnalité entre contrainte et déformation. Appartiennent à cette catégorie les capteurs à jauges extensométriques et à jauges piézorésistives, ainsi que les capteurs d'efforts à mesure de déplacement, [8].

Il existe plusieurs formes courantes de corps d'épreuve (barreau, cylindre, lame, etc.) (Fig.11).



Pour toutes les figures : J jauges de contrainte  
 F force

Fig. 11 Formes courantes de corps d'épreuve

La forme et la dimension du corps d'épreuve sont essentiellement liées à l'utilisation envisagée (traction, compression, efforts alternés, efforts dynamiques...). Elles dépendent de la valeur maximale de l'effort appliqué ainsi que de la nature du champ de contraintes détectées, donc de la position des jauges (contraintes

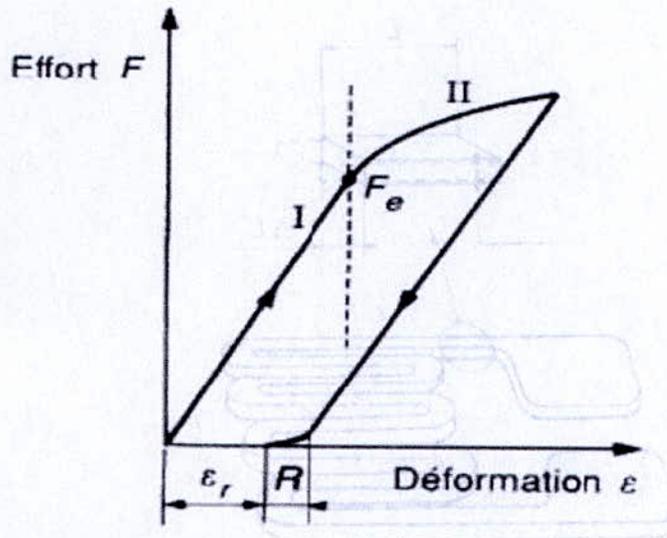
longitudinales et transversales) collées sur les éléments actifs du corps d'épreuve. Par exemple, les capteurs possédant un corps d'épreuve travaillant en flexion auront une meilleure linéarité que d'autres travaillant en traction ou compression. C'est une qualité intéressante en pesage, la contrepartie étant une plus grande fragilité aux surcharges et une plus grande sensibilité au fluage, [7].

#### IV.4.1.1. Matériaux constitutifs des corps d'épreuve

Quel que soit son type, un dynamomètre est un système déformable qui fournit un signal fonction de sa déformation et dont les performances sont limitées (courses mécaniques) tout particulièrement par les défauts élastiques, d'hystérésis et de fluage (Fig.12).

Le domaine élastique est caractérisé par la réversibilité théorique de la déformation en fonction de la contrainte. Le domaine plastique apparaît quand les déformations subsistent, de façon permanente, après suppression de la sollicitation. Ainsi voit-on l'intérêt de disposer de matériaux à limite élastique aussi élevée que possible afin d'éviter les déformations permanentes dues à des résidus de plasticité du domaine élastique et aussi d'induire de l'hystérésis. Enfin, pour des questions de sécurité, la charge de rupture doit être aussi élevée que possible.

Le choix du taux de contrainte nominal est primordial puisqu'il détermine le point de fonctionnement maximal dans le domaine élastique. Sa diminution permet de réduire dans une proportion importante l'hystérésis et le fluage et aussi les défauts de nonlinéarité mais, en contrepartie, le signal devient faible et cela peut entraîner des difficultés pour l'exploitation du signal émis. Pour le dynamomètre « classique » en acier, le taux de contrainte nominal se situe entre 10 et 30 daN/mm<sup>2</sup>, les valeurs faibles étant préférées, pour des questions de fatigue, dans le cas de capteurs destinés à la mesure des efforts dynamiques.



- I domaine élastique
- II domaine plastique
- $F_e$  limite élastique
- $\varepsilon_r$  déformation résiduelle
- $R$  réactivité (récupération en fonction du temps)

Fig. 12 Courbe effort-déformation typique

#### IV.4.1.2. Capteurs d'efforts à jauges de contrainte

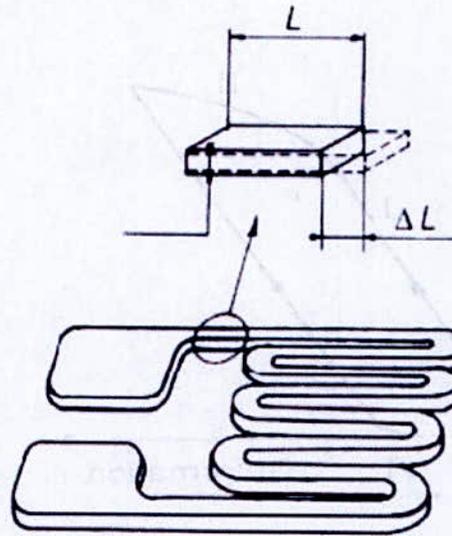
Ce sont les capteurs les plus courants (80 % du marché). Ils permettent de mesurer des efforts statiques (contrairement aux capteurs piézoélectriques décrits au paragraphe 4.2.1), la sensibilité n'étant pas affectée par le continu, et des efforts dynamiques à une fréquence pouvant atteindre 1 000 Hz environ. Le fonctionnement est fondé sur la variation de résistance électrique de la jauge proportionnellement à son allongement (Fig. 13).

Dans la pratique, plusieurs jauges sont collées sur le corps d'épreuve pour constituer un montage électrique en **pont de Wheatstone** (Fig. 14). Ce montage présente l'intérêt d'éliminer ou d'atténuer les effets de certaines grandeurs d'influence, en particulier des variations de température, [8].

Toutes les jauges sont caractérisées par leur coefficient ou facteur de jauge  $K$  qui fait correspondre une variation de résistance  $\Delta R/R$  proportionnellement à une variation d'allongement  $\Delta L/L$

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \quad (13)$$

et par le facteur  $e/E$  qui caractérise la sensibilité du capteur.



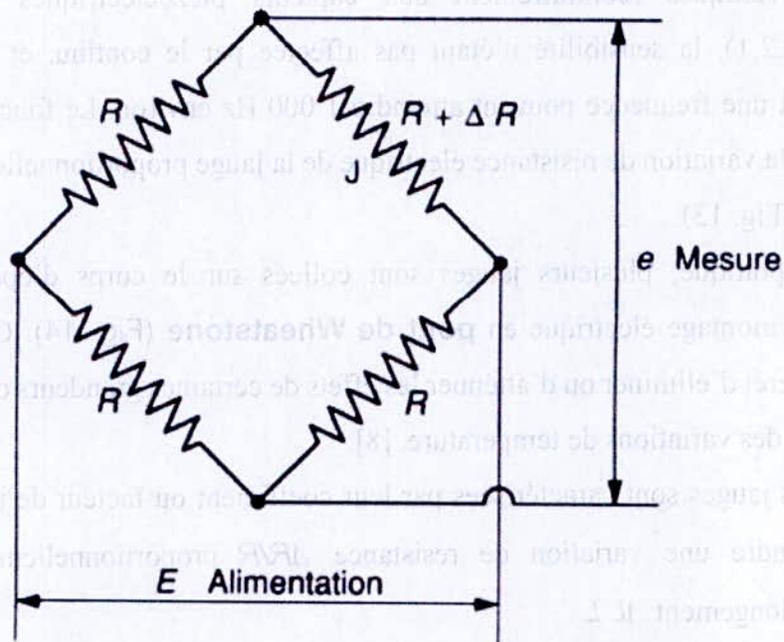
Variation de la résistance électrique :

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L}$$

avec  $K$  facteur de jauge

$\frac{\Delta L}{L}$  allongement relatif

Fig. 13 Principe de fonctionnement d'une jauge de contrainte



**J** jauge active  
**e** tension de mesure en sortie  
**E** tension d'alimentation

Fig. 14 Montage d'une jauge en pont de Wheatstone

#### IV.4.1.3. Capteurs à mesure de déplacement

Plutôt que de passer par la déformation subie par un organe collé comme dans les capteurs à jauges, le principe est ici de mesurer la variation de longueur du corps d'épreuve soumis à un effort, le problème technologique posé étant de rendre perceptibles des déformations de faible amplitude. Historiquement, le **peson à ressort hélicoïdal** (le ressort étant le corps d'épreuve) illustre le principe où l'on suit la déformation par la position d'un index sur une règle graduée (Fig. 15).

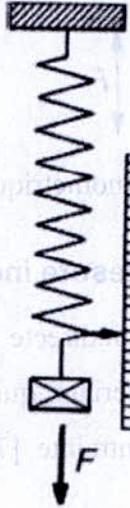


Fig. 15 Dynamomètre à ressort hélicoïdal

L'amplitude de la déformation dépend de la raideur du corps d'épreuve ou, plutôt, de son élasticité. La grande souplesse d'un corps d'épreuve de ce type améliore relativement la sensibilité du capteur (intéressante dans le cas du pesage) mais elle réduit la finesse et les caractéristiques dynamiques qui sont, dans ce cas, quasi nulles.

Pour réaliser des capteurs ayant des caractéristiques d'exploitation intéressantes, c'est-à-dire capables de fonctionner en quasidynamique dans certaines limites acceptables et aptes à ne pas perturber la transmission de l'effort par leur souplesse, il convient de conserver une raideur importante, donc d'avoir à détecter des allongements pleine échelle de valeur tout au plus millimétrique. L'anneau dynamométrique à comparateur à aiguille à mesure directe (Fig. 16), encore utilisé de nos jours, constitue un second exemple historique type. Au comparateur est parfois substitué un potentiomètre linéaire ou rotatif. L'indication devient alors enregistrable électriquement, [7].

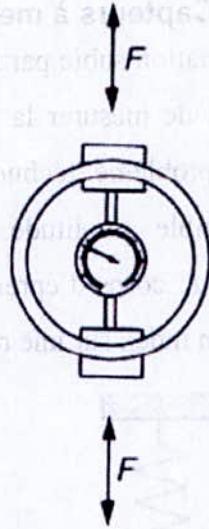


Fig. 16 Anneau dynamométrique à lecture directe

#### IV.4.2. Capteurs à mesure indirecte

Le principe de détection par mesure indirecte est fondé sur l'utilisation, pour la constitution des corps d'épreuve, de matériaux qui ont des propriétés électriques ou magnétiques dépendant de leur état de contrainte, [7]. Il s'agit :

- des capteurs piézoélectriques ;
- des capteurs à magnétostriction.

##### IV.4.2.1. Capteurs d'efforts piézoélectriques

###### IV.4.2.1.1 L'effet piézoélectrique

Certains cristaux, comme le quartz, se polarisent électriquement lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques. D'autres matériaux ferroélectriques et les céramiques piézoélectriques sont couramment utilisés pour la réalisation des capteurs piézoélectriques. C'est le phénomène piézoélectrique direct.

Lorsqu'on applique des efforts sur les faces du cristal dans la direction des axes électriques ou neutres, on fait apparaître sur les faces électriques (faces perpendiculaires à l'axe électrique) des charges électriques proportionnelles aux efforts appliqués.

Cette propriété est intéressante puisqu'elle permet de relier linéairement l'application d'un effort à la génération de charges électriques. Si l'effort change de sens, les charges électriques changent de sens également.

#### IV.4.2.1.2 Conception d'un capteur d'efforts piézoélectrique

Deux armatures métalliques sont déposées sur les faces actives du cristal (Fig. 17), elles collectent les charges générées au sein du cristal sous l'action de la force. L'ensemble est isolé électriquement et constitue un condensateur. Cet isolement ne pouvant être parfait, il y a décharge lente du condensateur, donc altération de l'information. C'est la raison pour laquelle les capteurs piézoélectriques ne « passent » que les phénomènes dynamiques qui génèrent en signe et en quantité des charges proportionnelles à la variation de l'effort exercé sur le cristal.

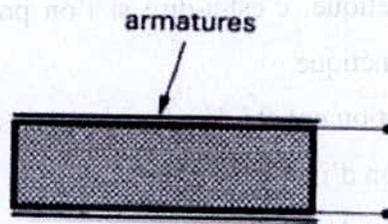


Fig. 17 Capteur piézoélectrique

Les charges électriques produites sont collectées sur les armatures du condensateur. Elles sont soit converties en tension directement sur les armatures, tension qui sera ensuite amplifiée, soit converties par utilisation d'amplificateurs présentant une fonction de transfert particulière, appelés *amplificateurs de charge*.

Le principe de fonctionnement mécanique d'un capteur piézoélectrique est assimilable à un système masse-ressort avec amortissement. Le cristal représente le ressort ; c'est également l'élément sensible (détecteur). Il se déforme sous l'action de l'effort qu'il reçoit, [8].

Cette déformation est cependant infime (quelques millièmes de millimètre) à pleine charge comparée à celle des capteurs précédemment décrits. Les capteurs piézoélectriques offrent donc, de ce fait, une grande raideur. Ils ont par conséquent une fréquence propre élevée qui les destine à la mesure des efforts dynamiques de fréquences élevées (jusqu'à plusieurs dizaines de kilohertz).

En pratique, l'effort est transmis par une plaque de répartition indéformable de manière que la contrainte soit uniforme dans toute la section du cristal. Pour rendre le cristal sensible aux efforts alternés, celui-ci est précontraint sous un effort supérieur à celui à mesurer et qui tendrait à le décharger. Aucune information n'apparaît en sortie tant qu'il n'y a pas application d'un effort puis ensuite des variations de cet effort, ce

qui fait dire que ce type de capteur ne passe pas le continu. Cette particularité n'empêche pas, moyennant des précautions, de mesurer un effort statique au moment de son application car à cet instant l'effort varie pour passer de zéro à la valeur à mesurer, [7].

#### IV.4.2.2. Capteurs d'efforts à magnétostriction

La magnétostriction est un phénomène suivant lequel une substance magnétique (en particulier, le nickel et ses alliages), soumise à un champ magnétique, subit une légère variation de volume.

La propriété est réciproque : si l'on exerce des contraintes à l'intérieur d'un barreau de substance magnétique, c'est-à-dire si l'on provoque sa déformation, on modifie sa perméabilité magnétique.

Plusieurs modes de détection ont été développés, correspondant :

- aux capteurs à variation d'inductance ;
- aux capteurs à variation de couplage ;
- aux capteurs à variation d'induction rémanente.

Ces derniers utilisables seulement pour les mesures dynamiques.

Ces capteurs ont la particularité d'être robustes, mais ils sont relativement limités en bande passante, et leurs autres caractéristiques métrologiques restent médiocres (linéarité, précision, dérive...).

L'usage de ces capteurs n'est pas très répandu.

#### IV.4.3. Autres capteurs d'efforts

##### IV.4.3.1. Dynamomètre à ruban ou corde vibrante

La fréquence de vibration transversale d'un ruban ou d'une corde tendue est fonction de sa tension et de sa raideur.

Si l'on admet que la raideur est négligeable et que l'amplitude des vibrations transversales est suffisamment faible pour que la tension reste constante, le calcul montre que la fréquence  $f$  ne dépend que de la tension  $t$ , de la masse volumique  $\gamma$  et de la longueur  $L$  de la corde suivant la relation : avec  $F$  force,  $S$  section de la corde,  $L$  longueur vibrante,

$$t = F/S \text{ tension} = \text{force par unité de section.}$$

Le calcul montre, et l'expérience confirme, que la raideur de la corde ou du ruban vibrant peut être rendue négligeable. Les aberrations des propriétés élastiques deviennent alors du second ordre et l'on dispose ainsi d'une méthode de mesure très

précise en entretenant les vibrations et en mesurant la fréquence, ce qui peut également être fait avec grande précision. Il faut signaler toutefois que le dispositif d'entretien des oscillations doit être étudié et réglé avec soin pour qu'il n'introduise pas de fluctuations intempestives de fréquence par variation de la phase du signal d'entretien.

Ce type d'appareil (Fig. 18) est susceptible d'une bonne précision relative (meilleure que 1 %) en fonction du soin apporté à sa mise en place. Il conserve ses caractéristiques dans le temps.

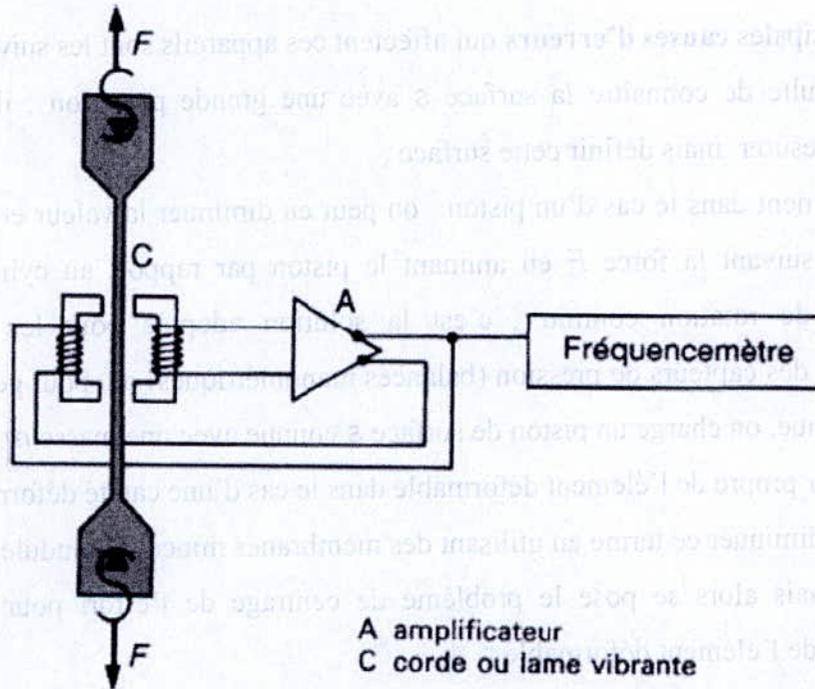


Fig. 18 Dynamomètre à ruban ou corde vibrante

Son exploitation est relativement simple. Comme il s'agit d'une mesure de fréquence, sa transmission n'est pas affectée par la distance. Cet appareil se prête aux mesures des efforts dans le domaine des travaux publics où il est très employé pour la surveillance à long terme des ouvrages (tunnels, barrages, soutènements, etc.).

#### IV.4.3.2. Capteur d'efforts utilisant la mesure d'une pression de fluide

La force à mesurer est appliquée sur un piston de section  $s$  connue, ce qui crée dans un fluide, généralement un liquide, une pression  $P = F/s$  que l'on mesure ensuite au moyen d'un capteur de pression.

L'ensemble piston-plongeur et cylindre (vérin) peut être remplacé par une cavité déformable agissant sur un fluide incompressible (Fig. 19).

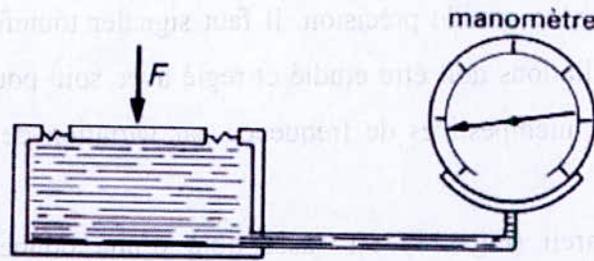


Fig. 19 Dynamomètre utilisant la mesure d'une pression de fluide

Les principales **causes d'erreurs** qui affectent ces appareils sont les suivantes :

— difficulté de connaître la surface  $S$  avec une grande précision ; il faut non seulement mesurer, mais définir cette surface ;

— frottement dans le cas d'un piston ; on peut en diminuer la valeur et surtout la composante suivant la force  $F$  en animant le piston par rapport au cylindre d'un mouvement de rotation continu ; c'est la solution adoptée pour les appareils d'étalonnage des capteurs de pression (balances manométriques) où, pour générer une pression connue, on charge un piston de surface  $S$  connue avec une masse  $m$  connue ;

— raideur propre de l'élément déformable dans le cas d'une cavité déformable ; on s'efforce de diminuer ce terme en utilisant des membranes minces ou ondulées, ou des soufflets ; mais alors se pose le problème de centrage de l'effort pour éviter le basculement de l'élément déformable ;

— dilatation du fluide avec la température, dont l'influence est d'autant plus faible que la cavité déformable est plus souple ;

— erreurs dues au capteur de pression.

Ces appareils, robustes par conception, sont généralement destinés aux mesures d'efforts importants (plusieurs milliers de kN). Ils permettent la transmission à distance et sont utilisables pour la mesure d'efforts constants ou lentement variables ; la fréquence maximale, qui reste basse, dépend des caractéristiques du capteur de pression et du montage. Ces capteurs servent surtout pour des applications industrielles de pesage peu exigeant ou de générateurs d'effort, par exemple, sur chantier où leur grande robustesse devient la principale qualité, [7].



# Montage du capteur de force sur la machine à essai de traction

---

## V.1. Description de la Machine de traction a utiliser

Cette machine est composée d'un bâti, d'un dispositif de mesure des efforts, dont la commande peut être faite manuellement ou par un moteur électrique.

La mesure de la charge se fait à l'aide d'un dynamomètre à pendule, le déplacement de ce pendule est transmis par une crémaillère à l'aiguille du cadran des mesures des charges. Cette crémaillère est prolongée par une tige qui porte un stylet enregistreur permettent de tracer le graphe.

Le déplacement de la traverse commande la rotation de l'enregistreur à l'aide d'un fil tendu par un contre poids

Le déplacement de la traverse est commandé par vis. La transmission du mouvement de rotation du moteur vers l'arbre de la machine se fait par chaîne métallique et l'arbre transmet le mouvement a la vis par un système roue vis sans fin.

Un dispositif permet l'arrêt de l'application de la charge lorsque celle-ci dépasse **20 KN**.

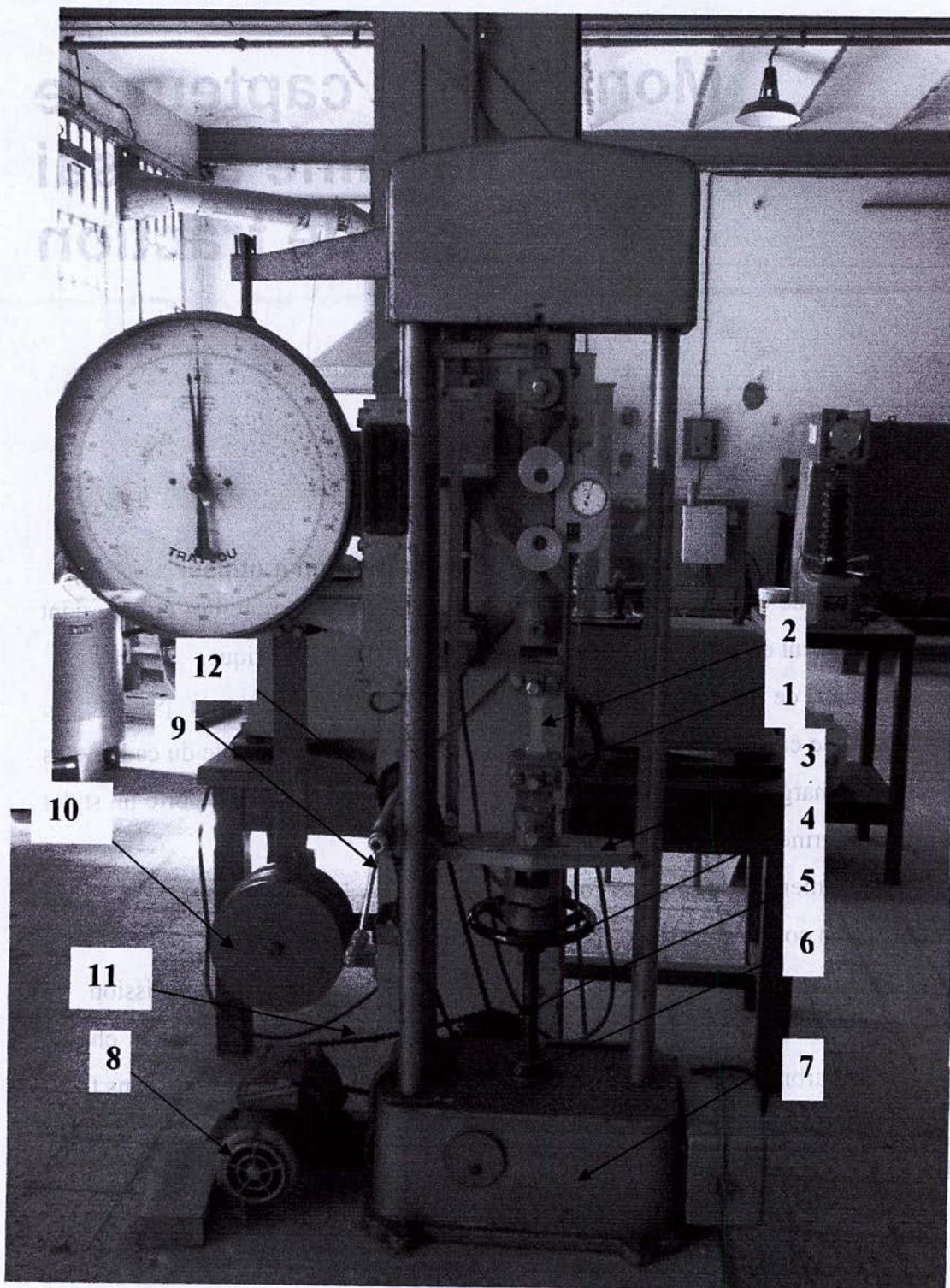


Fig.20 machine proposée pour le montage

Désignation:

1. mors d'attache
2. éprouvette
3. traverse
4. volant
5. vis de machine
6. écrou
7. bâti
8. moteur électrique
9. manivelle
10. pendule
11. chaîne de transmission moteur électrique arbre machine
12. chaîne de transmission manivelle arbre machine

### V.2. Le capteur de force proposé pour le montage

La détermination de l'effort appliqué lors d'un essai de traction est essentielle pour déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau.

La machine proposée pour le montage est équipée d'un système de pendule qui donne la valeur du chargement appliqué sur l'éprouvette. Le moment de la force appliquée sur l'éprouvette est équilibré par le moment du pendule, et à l'aide d'une crémaillère qui fait tourner l'aiguille donnant la valeur de la force. Cette crémaillère est liée à un porte stylet qui trace directement le graphe force-déplacement avec un stylet sur du papier enrouler sur le tambour d'enregistrement qui tourne avec la même valeur dont la traverse se déplace (Fig. 21).

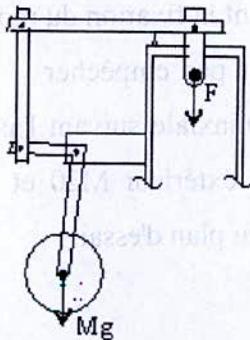


Fig. 21 Dispositif de mesure de la force

Comme ce système ne fonctionne pas, on propose d'adapter un autre capteur de force à la machine.

Le capteur de force proposé pour le montage est un anneau dynamométrique. L'anneau dynamométrique, d'une capacité de 20 KN, est équipé d'un comparateur qui donne directement l'effort appliqué à partir de la déformation de l'anneau (Fig. 16).

Le capteur se fixe à l'aide de filetage M20.

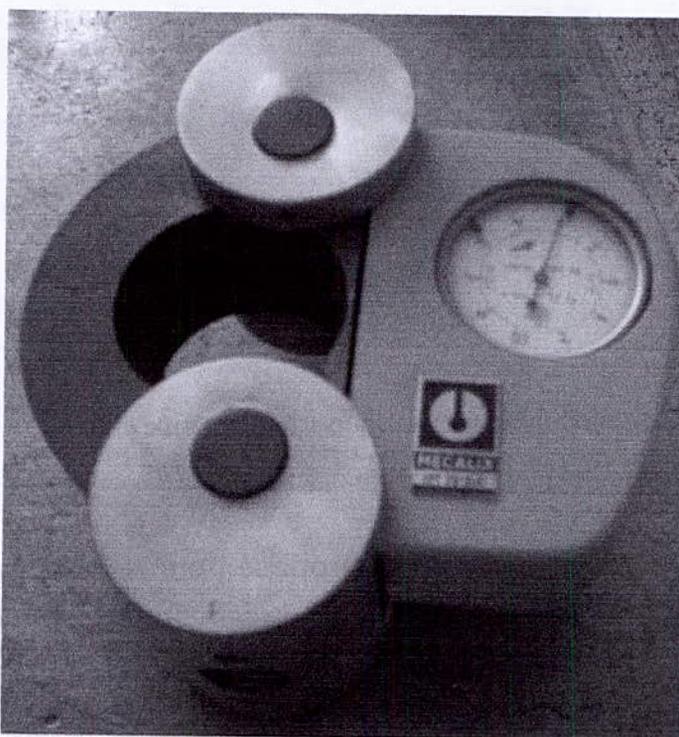


Fig. 22 Capteur de force proposé pour le montage

### V.3. Conception et réalisation du montage du capteur de force sur la machine

Le capteur de force se monte sur la partie supérieure de la machine, entre le mors d'attache et le point de fixation du mors d'attache de la machine. On ne fait aucune modification sur la machine. Pour cela, nous avons usiné des pièces qui fixeront le capteur de force sur le bâti et permettent la fixation du mors d'attache dessus.

Les pièces de fixation ne doivent pas empêcher la rotation dans le plan de l'éprouvette pour avoir une traction uniaxiale suivant l'axe de l'éprouvette. Les deux pièces doivent comporter un filetage extérieur M20 et un pivot pour permettre la rotation suivant l'axe perpendiculaire au plan d'essai.

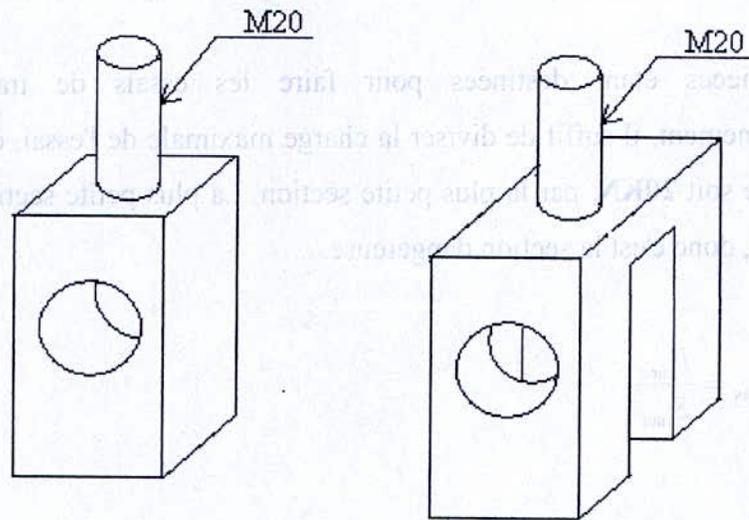


Fig. 23 schéma des pièces à réaliser

Pour faciliter la réalisation, on doit réaliser les pièces en forme cylindrique.

Pour atténuer les problèmes liés aux concentrations de contraintes, on doit réaliser un raccordement entre la partie filetée et la partie cylindrique par une partie conique.

Comme on est limité par l'encombrement sur la machine, donc la longueur totale des pièces doit être de 130mm et répartie comme suit:

- 25mm sur le filetage
- 33mm sur la partie conique
- 57mm sur la rainure ou le méplat.

On va opter pour les deux pièces suivantes et faire les calculs de dimensionnement pour déterminer la nuance du métal à utiliser.

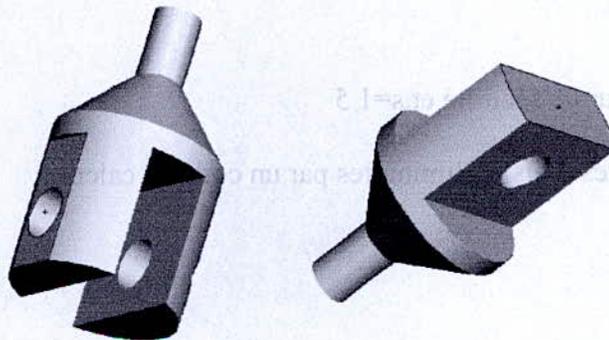


Fig. 24 Représentation 3D des deux pièces à usiner

Les dimensions des deux pièces sont imposées soit par la machine ou le capteur de force.

Les pièces étant destinées pour faire les essais de traction. Pour le dimensionnement, il suffit de diviser la charge maximale de l'essai, qui est limité par la machine soit **20KN**, par la plus petite section. La plus petite section est la section du filetage, donc c'est la section dangereuse.

Donc

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{S_{\min}} \quad (14)$$

Or

$$S_{\min} = \frac{\pi}{4} d_{\min}^2 \quad (15)$$

$$d_{\min} = d_{\text{eq}} = d - 0.9382 \cdot p$$

$$F_{\max} = 20 \text{KN}$$

Or on a un filetage M20 donc

$$d = 20$$

$$p = 2.5$$

On trouve

$$\sigma_{\max} = 81.7 \text{MPa}$$

on doit chercher un aciers qui a

$$\sigma_p \geq s \cdot \sigma_{\max} \quad (16)$$

Où s est un facteur de sécurité et s=1.5

On a vérifié ces résultats préliminaires par un code de calcul :

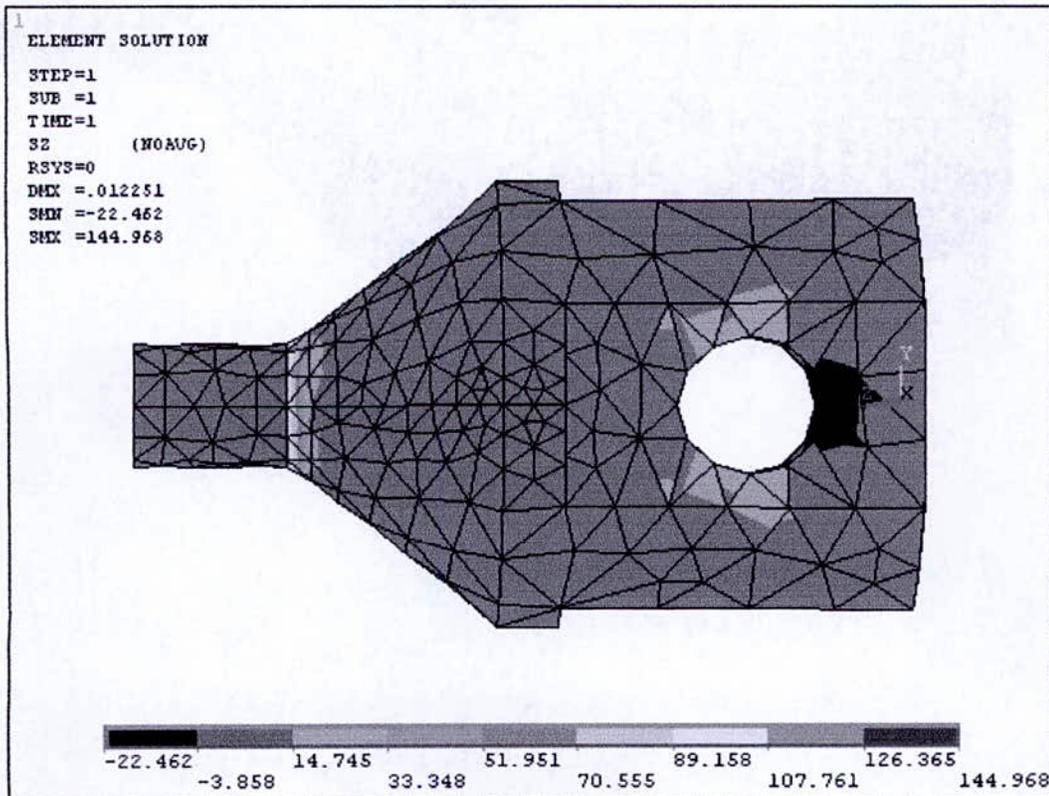
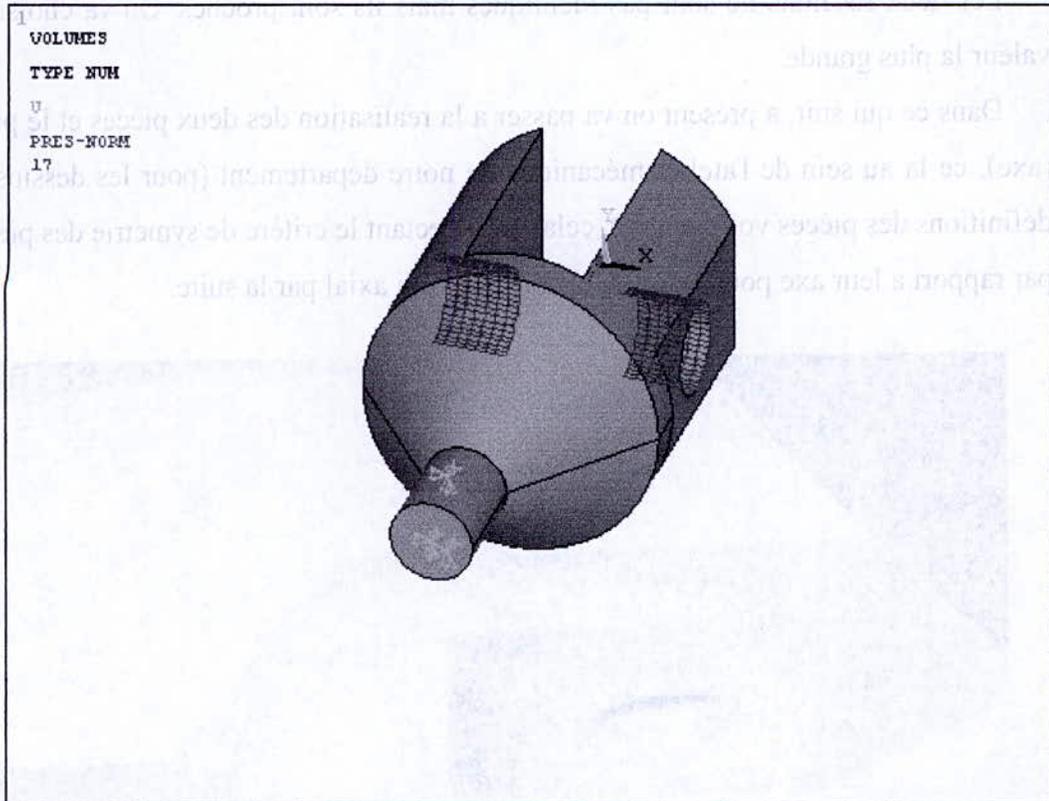


Fig. 25 Résultats de dimensionnements donnés par simulation numérique

Les deux résultats ne sont pas identiques mais ils sont proches. On va choisir la valeur la plus grande.

Dans ce qui suit, à présent on va passer à la réalisation des deux pièces et le pivot (axe), ce la au sein de l'atelier mécanique de notre département (pour les dessins de définitions des pièces voir annexe), cela en respectant le critère de symétrie des pièces par rapport à leur axe pour avoir un chargement uni axial par la suite.

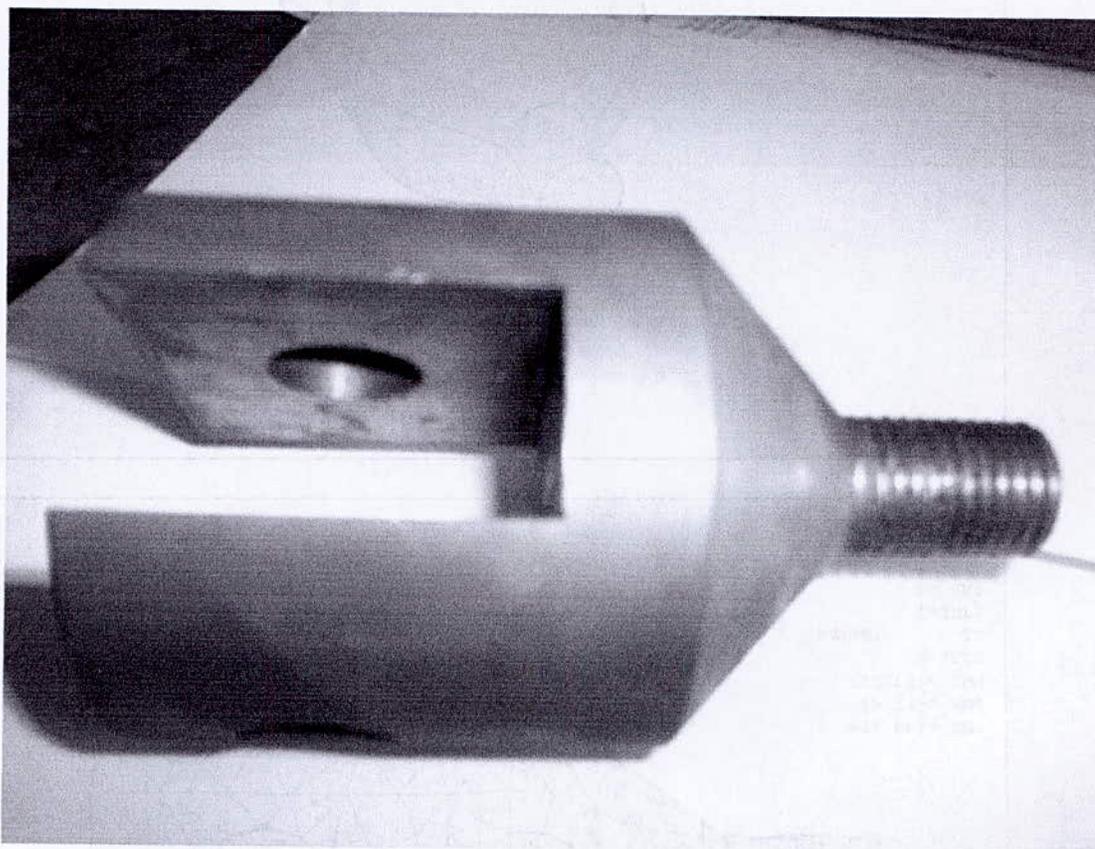


Fig. 26 La pièce femelle

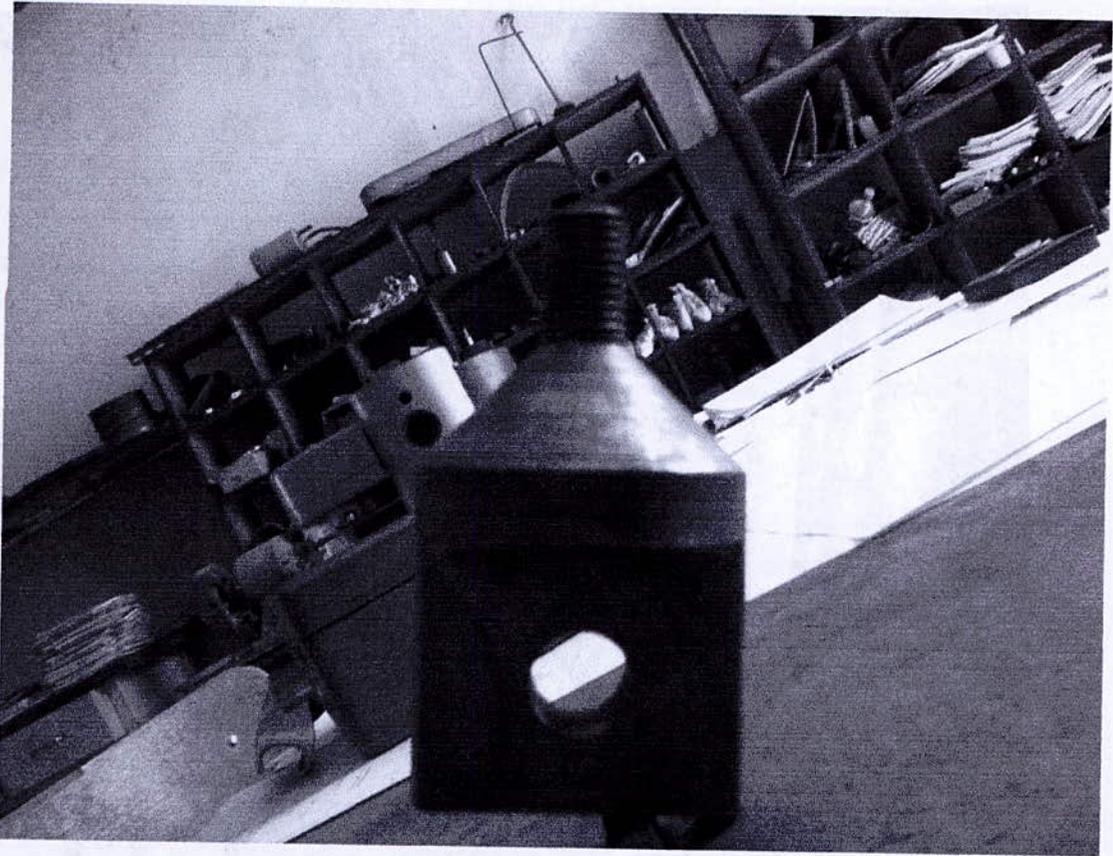


Fig. 27 La pièce mâle

Les pièces étant réalisées, nous entamons la partie de montage. La pièce mâle se monte sur le mors supérieur et porte le capteur de force. La pièce femelle se visse sur la partie inférieure du capteur et montée sur le mors inférieure par l'intermédiaire de l'axe (fig. 29)

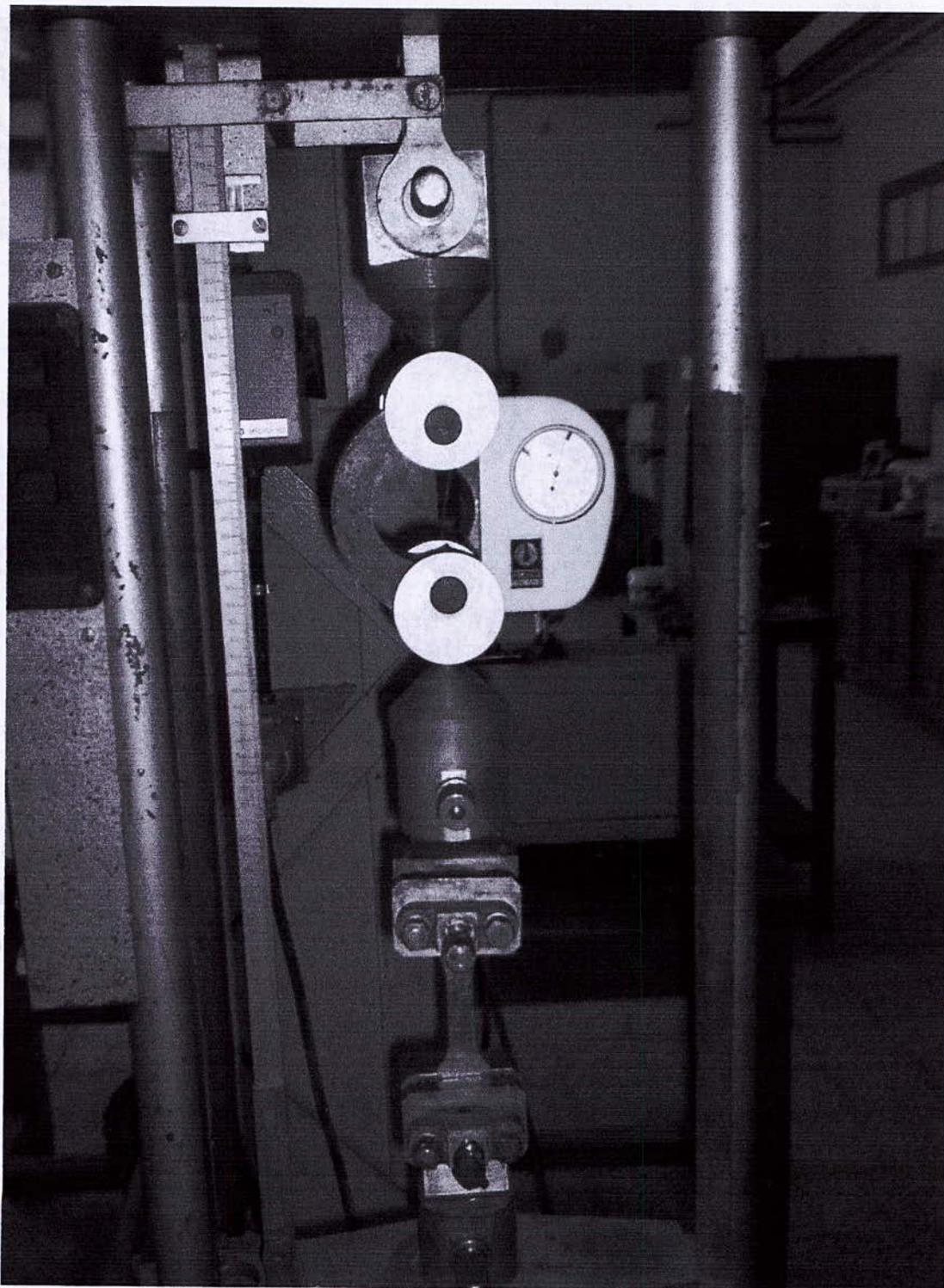


Fig. 28 Le montage du capteur de force sur la machine d'essai de traction

## Résultats des essais et interprétations

Pour exploiter le montage, on a réalisé des essais de traction sur des éprouvettes lisses, entaillées et percées.

Les éprouvettes lisses en aluminium ont été réalisées sur fraiseuse (fig. 30). Ensuite, on exécute un perçage sur trois éprouvettes à des positions différentes, et des entailles sur quatre autres à des positions différentes. Le reste, soit trois éprouvettes lisses ont été gardées pour les essais à la rupture.

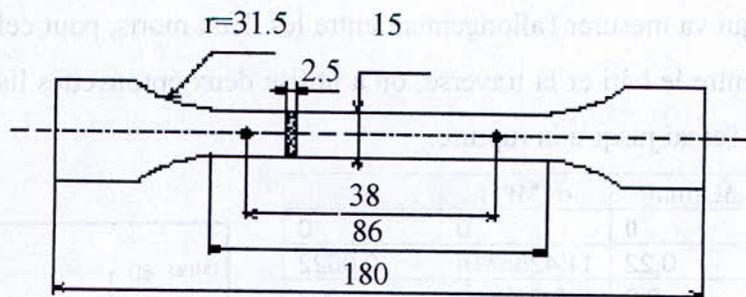


Fig. 29 Eprouvette d'essai lisse

Pour avoir des résultats comparables on a équipé chaque éprouvette par une jauge électrique d'extensométrie à la même position. On trace pour chaque essai le graphe contrainte-déformation.

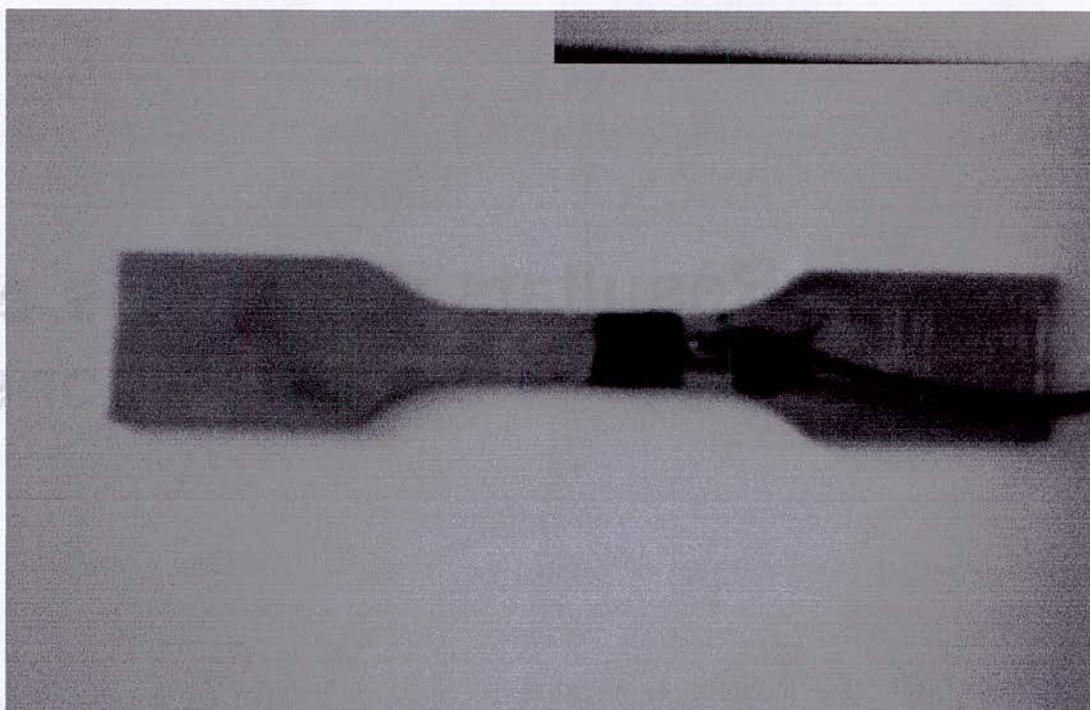
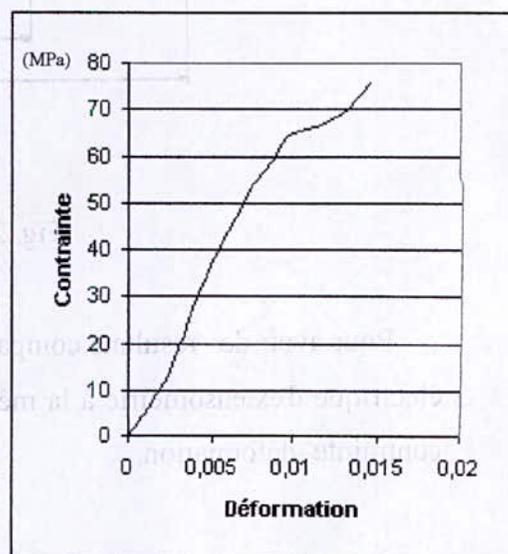


Fig. 30 Montage d'une jauge sur une éprouvette entaillée

### VI.1. Caractérisation du matériau

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques de l'aluminium, on a utilisé un comparateur qui va mesurer l'allongement entre les deux morts, pour cela on a fixé le comparateur entre le bâti et la traverse, on a utilisé deux éprouvettes lisse sans jauge et on a poussé l'essai jusqu'à la rupture.

| F/10 (N) | $\Delta L$ (mm) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ |
|----------|-----------------|----------------|------------|
| 0        | 0               | 0              | 0          |
| 60       | 0,22            | 11,4285714     | 0,0022     |
| 100      | 0,3             | 19,047619      | 0,003      |
| 130      | 0,36            | 24,7619048     | 0,0036     |
| 160      | 0,42            | 30,4761905     | 0,0042     |
| 200      | 0,51            | 38,0952381     | 0,0051     |
| 230      | 0,59            | 43,8095238     | 0,0059     |
| 260      | 0,68            | 49,5238095     | 0,0068     |
| 270      | 0,71            | 51,4285714     | 0,0071     |
| 280      | 0,74            | 53,3333333     | 0,0074     |
| 290      | 0,77            | 55,2380952     | 0,0077     |
| 310      | 0,86            | 59,047619      | 0,0086     |
| 330      | 0,92            | 62,8571429     | 0,0092     |
| 340      | 0,99            | 64,7619048     | 0,0099     |
| 350      | 1,15            | 66,6666667     | 0,0115     |
| 360      | 1,25            | 68,5714286     | 0,0125     |
| 370      | 1,33            | 70,4761905     | 0,0133     |
| 400      | 1,46            | 76,1904762     | 0,0146     |



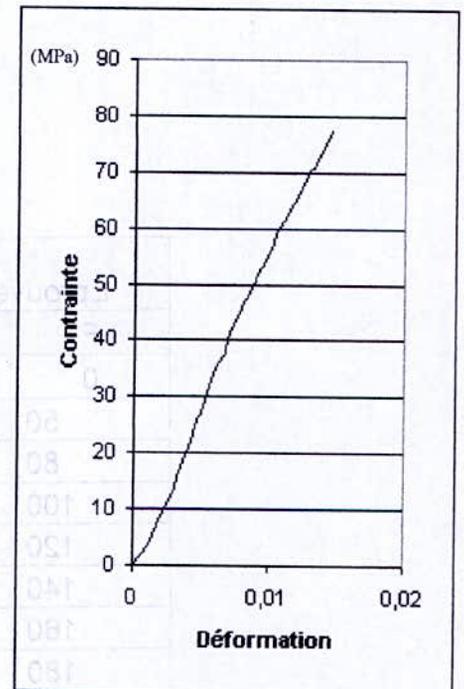
On a

$$S_a=52.5$$

$$L_0=101$$

On aura  $E=68,3 \text{ GPa}$

| F/10 (N) | $\Delta L$ (mm) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ |
|----------|-----------------|----------------|------------|
| 20       | 0               | 0              | 0          |
| 50       | 0,12            | 3,52941176     | 0,0012     |
| 80       | 0,18            | 7,05882353     | 0,0018     |
| 110      | 0,25            | 10,5882353     | 0,0025     |
| 140      | 0,31            | 14,1176471     | 0,0031     |
| 170      | 0,36            | 17,6470588     | 0,0036     |
| 210      | 0,42            | 22,3529412     | 0,0042     |
| 220      | 0,44            | 23,5294118     | 0,0044     |
| 240      | 0,47            | 25,8823529     | 0,0047     |
| 250      | 0,5             | 27,0588235     | 0,005      |
| 260      | 0,51            | 28,2352941     | 0,0051     |
| 280      | 0,54            | 30,5882353     | 0,0054     |
| 300      | 0,58            | 32,9411765     | 0,0058     |
| 320      | 0,61            | 35,2941176     | 0,0061     |
| 340      | 0,67            | 37,6470588     | 0,0067     |
| 350      | 0,68            | 38,8235294     | 0,0068     |
| 370      | 0,71            | 41,1764706     | 0,0071     |
| 390      | 0,75            | 43,5294118     | 0,0075     |
| 410      | 0,79            | 45,8823529     | 0,0079     |
| 430      | 0,85            | 48,2352941     | 0,0085     |
| 450      | 0,89            | 50,5882353     | 0,0089     |
| 470      | 0,94            | 52,9411765     | 0,0094     |
| 490      | 0,98            | 55,2941176     | 0,0098     |
| 500      | 1,02            | 56,4705882     | 0,0102     |
| 520      | 1,05            | 58,8235294     | 0,0105     |
| 540      | 1,1             | 61,1764706     | 0,011      |
| 560      | 1,15            | 63,5294118     | 0,0115     |
| 570      | 1,18            | 64,7058824     | 0,0118     |
| 590      | 1,235           | 67,0588235     | 0,01235    |
| 610      | 1,28            | 69,4117647     | 0,0128     |
| 620      | 1,33            | 70,5882353     | 0,0133     |
| 640      | 1,37            | 72,9411765     | 0,0137     |
| 660      | 1,41            | 75,2941176     | 0,0141     |
| 680      | 1,47            | 77,6470588     | 0,0147     |



On a

$$S_a=85$$

$$L_0=101$$

On aura  $E=66.8 \text{ GPa}$

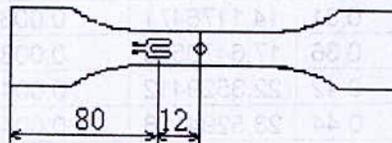
Pour la rupture on les résultats suivants.

|                  | 1         | 2          |
|------------------|-----------|------------|
| Fu (N)           | 5500      | 5600       |
| Lu (mm)          | 46,5      | 46,7       |
| $\sigma_u$ (MPa) | 132,53012 | 134,939759 |

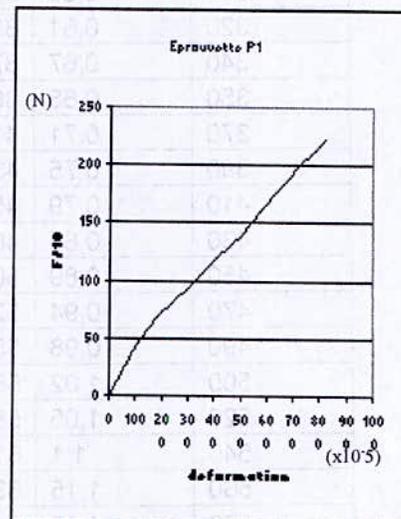
## VI.2. Résultats des essais

### VI.2.1. Eprouvettes percées

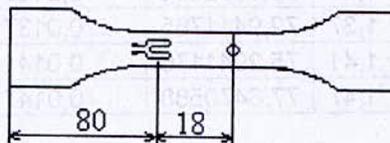
#### VI.2.1.1. Eprouvette P1



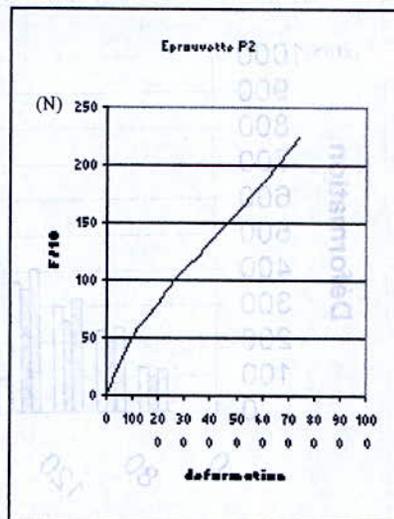
| Eprouvette P1 |                                    |
|---------------|------------------------------------|
| F             | $\varepsilon$ ( $\times 10^{-5}$ ) |
| 0             | 0                                  |
| 50            | 120                                |
| 80            | 240                                |
| 100           | 320                                |
| 120           | 405                                |
| 140           | 500                                |
| 160           | 570                                |
| 180           | 650                                |
| 200           | 725                                |
| 225           | 830                                |



#### VI.2.1.2. Eprouvette P2

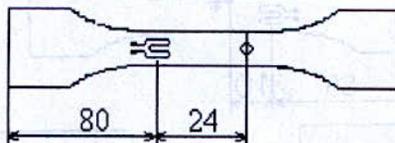


| Epreuve P2 |                           |
|------------|---------------------------|
| F          | $\varepsilon (x 10^{-5})$ |
| 0          | 0                         |
| 50         | 100                       |
| 80         | 200                       |
| 100        | 260                       |
| 120        | 350                       |
| 140        | 430                       |
| 160        | 500                       |
| 180        | 580                       |
| 200        | 660                       |
| 225        | 750                       |

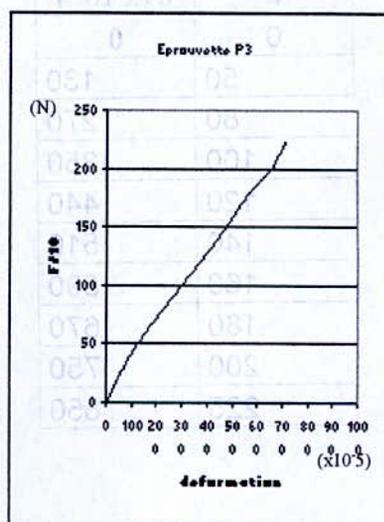


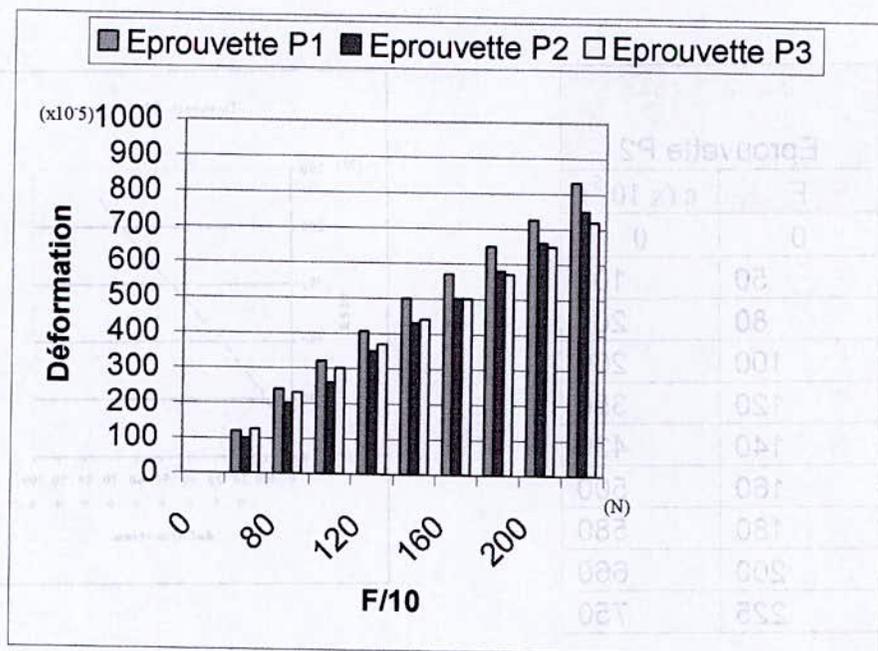
VI.2.1.3.

VI.2.1.4. Epreuve P3



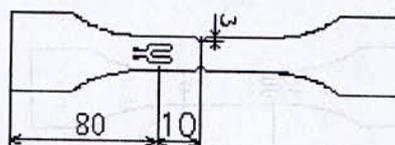
| Epreuve P3 |                           |
|------------|---------------------------|
| F          | $\varepsilon (x 10^{-5})$ |
| 0          | 0                         |
| 50         | 125                       |
| 80         | 230                       |
| 100        | 300                       |
| 120        | 370                       |
| 140        | 440                       |
| 160        | 500                       |
| 180        | 570                       |
| 200        | 650                       |
| 225        | 720                       |



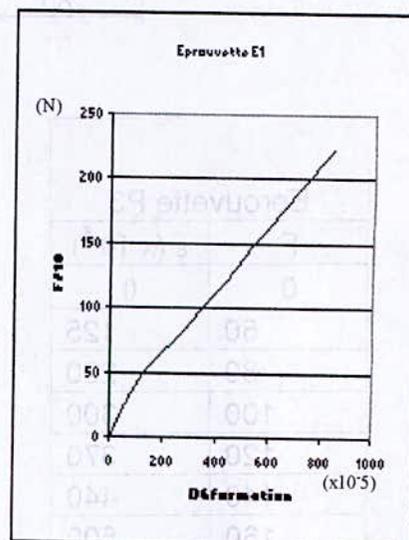


## VI.2.2. Eprouvettes entaillées

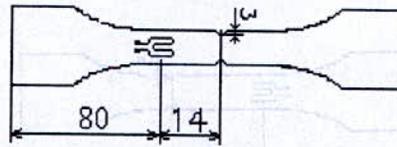
### VI.2.2.1. Eprouvette E1



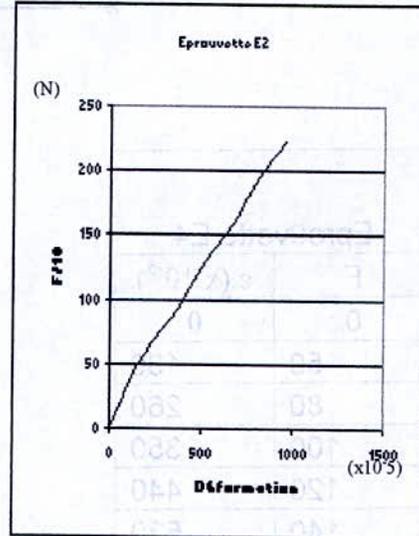
| Eprouvette E1 |                                     |
|---------------|-------------------------------------|
| F             | $\varepsilon$ (x 10 <sup>-5</sup> ) |
| 0             | 0                                   |
| 50            | 130                                 |
| 80            | 270                                 |
| 100           | 350                                 |
| 120           | 440                                 |
| 140           | 510                                 |
| 160           | 590                                 |
| 180           | 670                                 |
| 200           | 750                                 |
| 225           | 850                                 |



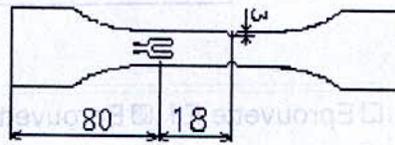
### VI.2.2.2. Eprouvette E2



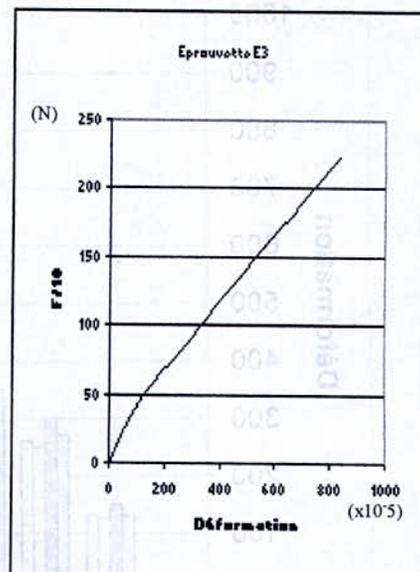
| Eprouvette E2 |                           |
|---------------|---------------------------|
| F             | $\varepsilon (x 10^{-5})$ |
| 0             | 0                         |
| 50            | 150                       |
| 80            | 300                       |
| 100           | 400                       |
| 120           | 480                       |
| 140           | 580                       |
| 160           | 670                       |
| 180           | 750                       |
| 200           | 840                       |
| 225           | 970                       |



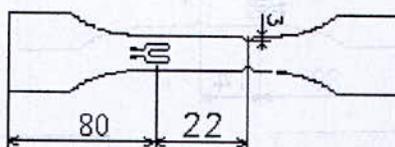
### VI.2.2.3. Eprouvette E3



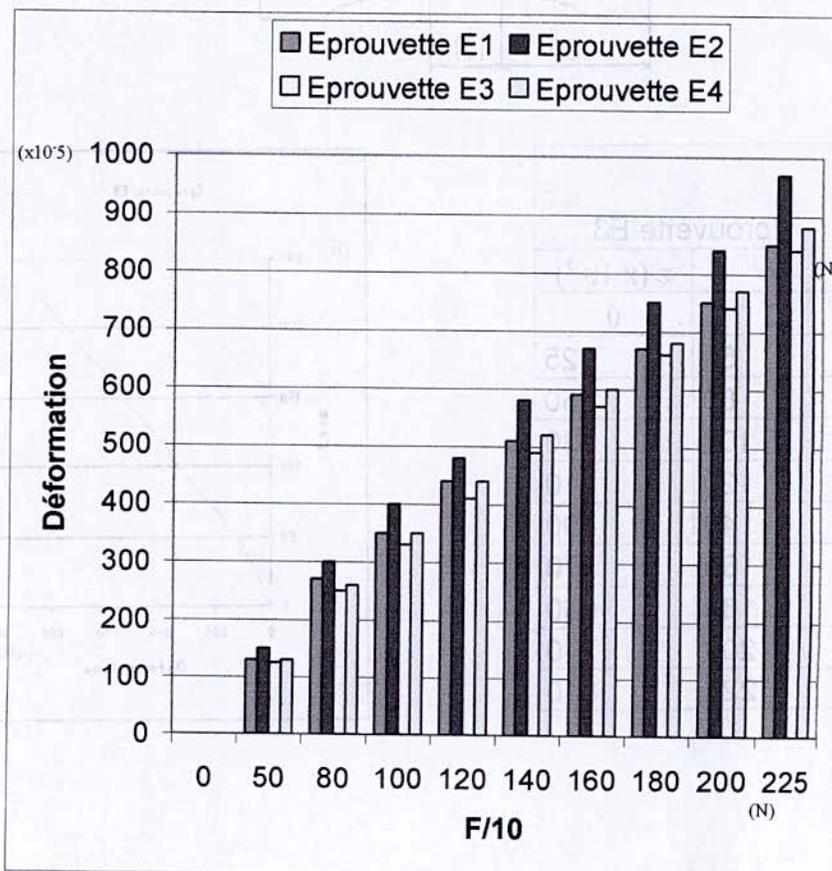
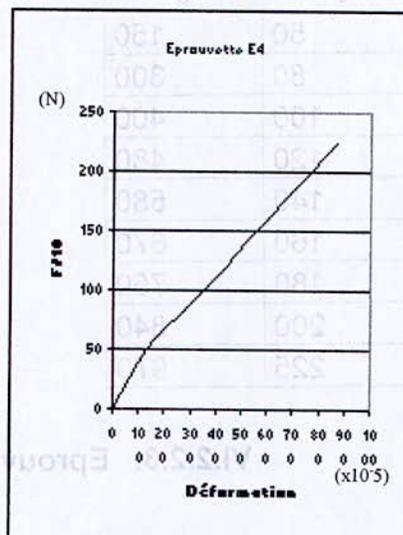
| Eprouvette E3 |                           |
|---------------|---------------------------|
| F             | $\varepsilon (x 10^{-5})$ |
| 0             | 0                         |
| 50            | 125                       |
| 80            | 250                       |
| 100           | 330                       |
| 120           | 410                       |
| 140           | 490                       |
| 160           | 570                       |
| 180           | 660                       |
| 200           | 740                       |
| 225           | 840                       |



VI.2.2.4. Eprouvette E4



| Eprouvette E4 |                           |
|---------------|---------------------------|
| F             | $\varepsilon (x 10^{-5})$ |
| 0             | 0                         |
| 50            | 130                       |
| 80            | 260                       |
| 100           | 350                       |
| 120           | 440                       |
| 140           | 520                       |
| 160           | 600                       |
| 180           | 680                       |
| 200           | 770                       |
| 225           | 880                       |



### **VI.3. Interprétations des résultats**

On a deux types de défauts, perçage et entaille. On va comparer les deux défauts chacun a part, cela pour voir le comportement des jauges a des différentes position du défaut.

Pour le perçage, on remarque que plus on s'éloigne du perçage on a moins de *déformation* car les efforts sont concentrer près du trou donc les déformations sont importantes.

Par contre pour l'entaille on a moins de réponse car la profondeur de l'entaille est petite par rapport a la largeur des jauges, d'où on aura la déformation de la partie uniforme de la distribution des efforts et pas la concentration des efforts. Donc on aura les mêmes réponses des jauges.

# VII

## Conclusion

---

Les essais de traction sont d'une grande importance dans la détermination des caractéristiques mécaniques des métaux. Le capteur de force est un moyen dans la chaîne de mesure pour accéder aux caractéristiques du matériaux.

Un dispositif a été conçu et réalisé pour réaliser des essais de traction. La force peut être mesuré directement avec le capteur de force et avec une bonne précision.

Après avoir réaliser le montage, on a fait des essais de traction des éprouvette en aluminium. Notre choix à porter sur un alliage aluminium qui est un matériau très utilisé en industries. En premier, des essais préliminaires sur des éprouvettes lisses ont permis de caractériser notre matériau. Ensuite on a utilisé des éprouvette avec défauts, soit entaillés ou percés, à des positions des jauges différentes, cela pour voir et déterminer le comportement du matériaux lors de présence de défauts. Mais on n'a pas pu apprécier les résultats pour les éprouvette entaillés car il fallait utilisé un autre type de jauge plus petite.

Les moyens dont dispose l'atelier du département de génie mécanique de l'Ecole Nationale Polytechnique reste très en dessous de ce que demande ce sujet. Malgré cela, on a pu réaliser ce projet avec les moyens qu'on a abord

## **Bibliographie**

---

- [1] A. CAMPA, Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens, Tome II, FOUCHER PARIS, 1971
- [2] AFNOR, Recueil de normes françaises, Tome 5, Méthode d'essais, AFNOR, 1978.
- [3] M.F. ASHBY D.R.H JONES, Matériaux II, propriétés et application, Dunod, 1991.
- [4] D. FRANCOIS, Essais mécaniques des matériaux, Technique de l'ingénieur M120, M123, M126 et M127, Février 1996.
- [5] R. DAVIS, Testing of engineering materials, Internat. stud. ed. 1982.
- [6] P. Riebensahm & P. W. Schmidt, L'essai des métaux, DUNOD, 1961.
- [7] J.P. Henry, Cours d'élasticité, DUNOD, 1982.
- [8] M.R MOREAU, traité Mesures et Contrôle, Technique de l'ingénieur, R1820, Février 1996.
- [9] J.AVRIL, Encyclopédie d'analyse des contraintes, Micromesures, 1984.
- [10] A. Chevalier, Guide du Dessinateur, HACHETTE Technique, 1984.