

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES



Département de Génie Civil

*Polycopié :*

# Travaux Pratiques de la Résistance Des Matériaux

**Pour les étudiants de :**

*Deuxième Année (LMD) des filières de Génie Civil  
et de Travaux Publics*

**Élaboré par l'enseignant :**

*BENYAMINA Abdelrahmane Bekaddour*

*Docteur en Génie Civil - Maître de Conférences A*

Novembre 2024

## Avant-propos

Le présent ouvrage est une polycopie des Travaux Pratiques (T.P.) de la résistance des matériaux (R.D.M.) adressé essentiellement aux étudiants de 2<sup>ème</sup> année licence (L.M.D.) des deux filières Génie Civil et travaux publics. Ce polycopié est élaboré dans le but de faciliter à l'étudiant l'assimilation et la compréhension des travaux pratiques réalisés au niveau du laboratoire de structures (R D M).

Le programme de formation moderne prévoit la réalisation d'un cycle de travaux pratiques au cours des quels sont à résoudre deux problèmes essentiellement différents. D'une part, on procède à la vérification expérimentale des hypothèses admises, afin d'établir les différentes relations de calcul fondées sur ces dernières. D'autre part, le calcul d'une structure ou de ses différents éléments ne peut être effectué sans que les caractéristiques mécaniques du matériau ne soient connues : contrainte admissible, constants élastiques du matériau (modules d'élasticité  $E$  et  $G$ , coefficient de Poisson  $\nu$ ) qui sont déterminées expérimentalement. Ainsi, les principales tâches incombant au TP RDM sont :

- L'étude des propriétés des matériaux et détermination de leurs caractéristiques mécaniques ;
  - Vérification expérimentale des hypothèses (restrictions simplificatrices),
  - Validation des relations, de calcul, principales en comparant les résultats théoriques avec les données empiriques.
-

Le présent document s'articule autour de cinq chapitres ou essais :

- Chapitre I : Essai de la traction et de la compression
- Chapitre II : Essai de la torsion
- Chapitre III : Essai de la flexion simple
- Chapitre IV : Essai de dureté
- Chapitre V : Essai de résilience

En premier, l'objectif de chaque essai est présenté, puis une introduction théorique est donnée pour permettre à l'étudiant d'acquérir et assimiler le plus d'informations possibles sur cette discipline.

En suite une partie expérimentale où il s'agit de présenter le mode opératoire ainsi que le travail demandé de la part de l'étudiant afin de présenter un compte rendu cohérent.

Et en dernier, des annexes donnant des exemples (les résultats) des expériences afin d'avoir une idée sur les grandeurs manipulées et de limiter les erreurs éventuelles.

---

---

**Table des matières**

<b>I. Essai de traction</b> .....	<b>I-1</b>
I.1. Objectif du TP.....	I-1
I.2. Eprouvettes de l'essai .....	I-1
I.3. Description de la machine d'essai: .....	I-3
I.4. Execution de l'essai .....	I-6
I.4.1 Diagramme Force-Allongement brut.....	I-8
I.4.2 Diagramme de traction conventionnel .....	I-9
I.4.3 Principales caractéristiques mécaniques d'un matériau.....	I-10
I.4.4 Propriétés mécaniques de quelques matériaux.....	I-14
<b>II. Essai de torsion</b> .....	<b>II-1</b>
II.1 Objectif du TP.....	II-1
II.2. Bref rappel théorique.....	II-1
II.3 Equipement.....	II-2
II.3.1 Description du banc d'essai .....	II-2
II.3.2 Matériel accessoire.....	II-2
II.4. Expérimentation .....	II-3
II.4.1 Mode opératoire général .....	II-3
II.4.2 Expérience A.....	II-3
a) Travail demandé .....	II-4
II.4.3 Expérience B .....	II-4
a) Travail demandé.....	II-5
II.4.4 Expérience C .....	II-5
a) Manipulation.....	II-5
b) Travail demandé.....	II-5

<b>III. Essai de flexion simple</b> .....	<b>III-1</b>
III.1 Objectif du TP .....	III-1
III.2. Bref rappel théorique .....	III-1
III.3. Description du banc d'essai.....	III-2
III.4 Procédure expérimentale .....	III-3
III.4.1 Expérience A :.....	III-3
a) Manipulation.....	III-3
b) Travail demandé.....	III-4
III.4.2 Expérience B :.....	III-4
a) Manipulation.....	III-4
b) Travail demandé.....	III-5
<b>IV. Essai de dureté</b> .....	<b>IV-1</b>
IV.1. Objectif et principe de dureté .....	IV-1
IV.2. Eprouvettes .....	IV-1
IV.3. Exécution de l'essai .....	IV-1
IV.3.1. Essai Brinell .....	IV-2
IV.3.2. Essai Vickers.....	IV-2
IV.3.3. Essai Rockwell.....	IV-3
IV.3.4. Microdureté et nanodureté .....	IV-3
a) Microdureté Vickers.....	IV-3
b) Dureté Knoop.....	IV-4
IV.3.5. Nanoindentation.....	IV-4
IV.3.6. Correspondance entre échelles de dureté .....	IV-5

<b>IV. Essai de résilience</b> .....	<b>V-1</b>
V.1. Objectif et principe de l'essai.....	V-1
V.2. Eprouvette.....	V-1
V.3. Principe de l'essai .....	V-2
V.4. Machine de l'essai.....	V-3
V.5. Mode opératoire et consignes de sécurité .....	V-3
V.6. Conduite de l'essai et exploitation des résultats .....	V-4
Travail demandé .....	V-5

**T P N° 01 :**  
**Essai de traction et de compression**



## I. Essai de traction

### I.1 Objectif du TP

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette normalisée (pièce de dimensions normalisées fabriquée dans le matériau à tester), de section cylindrique ou prismatique à un effort normal progressif et croissant (de deux actions mécaniques opposées) jusqu'à la rupture de la pièce d'essai, l'essai est effectué à la température ambiante dans les limites comprises entre 10°C et 35°C. Cet essai est réalisé sur une machine spéciale qui enregistre les efforts et les allongements grâce à des capteurs d'extensomètre.

On détermine à partir d'une courbe d'essai de traction les caractéristiques mécaniques suivantes, parfois on trouve plus d'un symbole pour leur désignation :

- Module de Young  $E$  ou module d'élasticité longitudinale.
- Limite élastique  $\sigma_e$  qui caractérise le domaine de réversibilité ;
- Limite maximale à la rupture  $\sigma_u$  (contrainte ultime) ;
- Allongement à la rupture  $A\%$ , qui caractérise la ductilité et mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge avant sa rupture.
- Coefficient de Poisson  $\nu$ , qui caractérise la variation de volume induite par la déformation des matériaux dans le domaine élastique.
- Limite de proportionnalité  $\sigma_{pr}$ ;
- Limite conventionnelle d'élasticité  $\sigma_{0.2}$  ;
- Coefficient de striction à la rupture  $Z$ .

### I.2 Éprouvettes de l'essai

Les éprouvettes de l'essai de traction uni-axiale ordinaires sont de forme généralement cylindrique ou plate, elles sont soigneusement polies et calibrées, figure **I.1a-1b**.

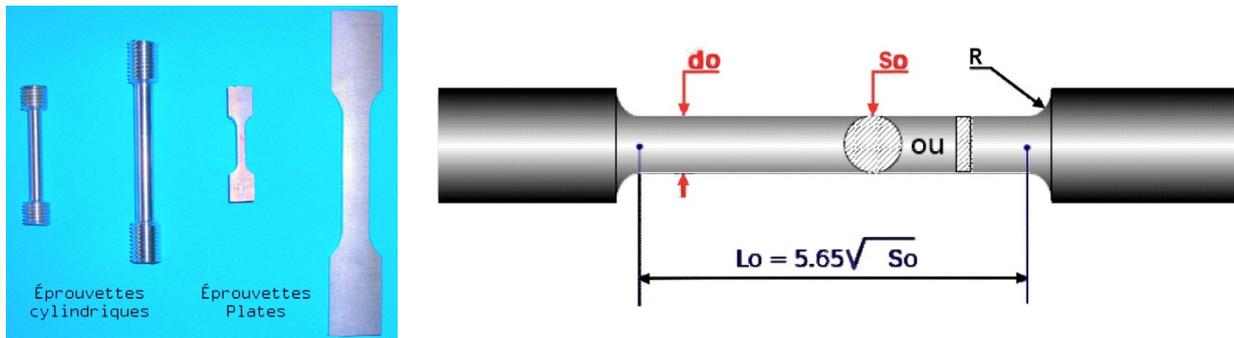


Figure I.1a. Type et géométrie d'éprouvette normalisée pour essai de traction.

La longueur initiale  $L_0$  doit être proportionnelle à la section  $S_0$  (les mesures effectuées à partir d'éprouvettes proportionnelles ayant même coefficient «  $k$  » ou «  $n$  » sont comparables entre-elles), norme ISO 6892-1:

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0} \text{ avec } k = 5.65 \Rightarrow L_0 = 5.65 \sqrt{S_0},$$

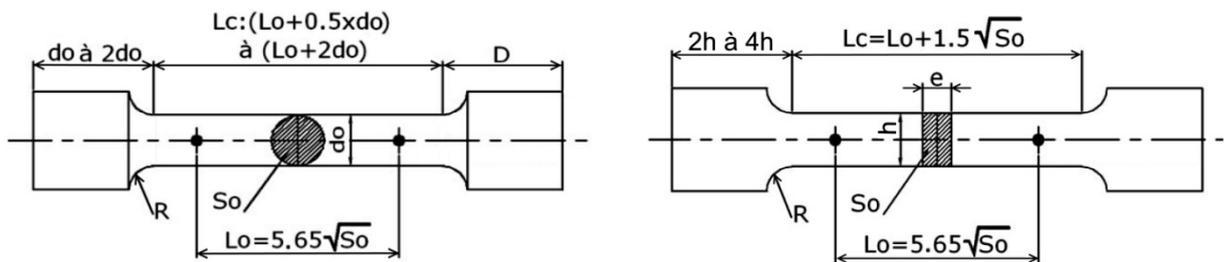
ce qui correspond à  $n = 5$  pour une éprouvette cylindrique :

$$L_0 = n \cdot d_0 \text{ avec } n \approx 5 \Rightarrow L_0 \approx 5d_0$$

d'où:

$L_0$  : Longueur initiale de l'éprouvette (mm).

$S_0$  : Section constante de l'éprouvette (mm<sup>2</sup>).



$$S_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \text{ avec } d_0 > 4$$

pour l'éprouvette cylindrique.

$$S_0 = h \cdot e \text{ avec } \frac{h}{e} < 8$$

pour l'éprouvette prismatique

Figure I.1b. Dimensions nominales de l'éprouvette normalisée.

La longueur de la partie calibrée  $L_c$  d'une éprouvette cylindrique doit être suffisante par rapport à la distance entre repère  $L_0$ :

$$L_0 + \frac{d_0}{2} < L_c < L_0 + 2d_0$$

On peut exprimer la longueur de référence  $L_0$  (initiale) comme suite :

$$L_0 = 10 d_0 = 11.3 \sqrt{S_0} \Rightarrow \text{(Eprouvettes longues)}$$

$$L_0 = 5 \cdot d_0 = 5.65\sqrt{S_0} \Rightarrow \text{(Eprouvettes courtes)}$$

Dans les cas des éprouvettes prismatiques, on adoptera de préférence le même rapport des dimensions (longueur, aire) que pour les éprouvettes circulaires.

Les éprouvettes à section circulaire ont de préférence les dimensions figurant dans le tableau suivant :

Longueur $L_0$ (initiale) en mm	Diamètre $d_0$ en mm	Section $S_0$ en mm <sup>2</sup>	Longueur calibrée $L_c$ en mm	Longueur Totale $L_t$ en mm
$100 \pm 1.0$	$20 \pm 0.105$	314	110 à 140	$L_t \geq L_c + 2 \text{ à } 4 d_0$
$50 \pm 0.5$	$10 \pm 0.075$	78.5	55 à 70	

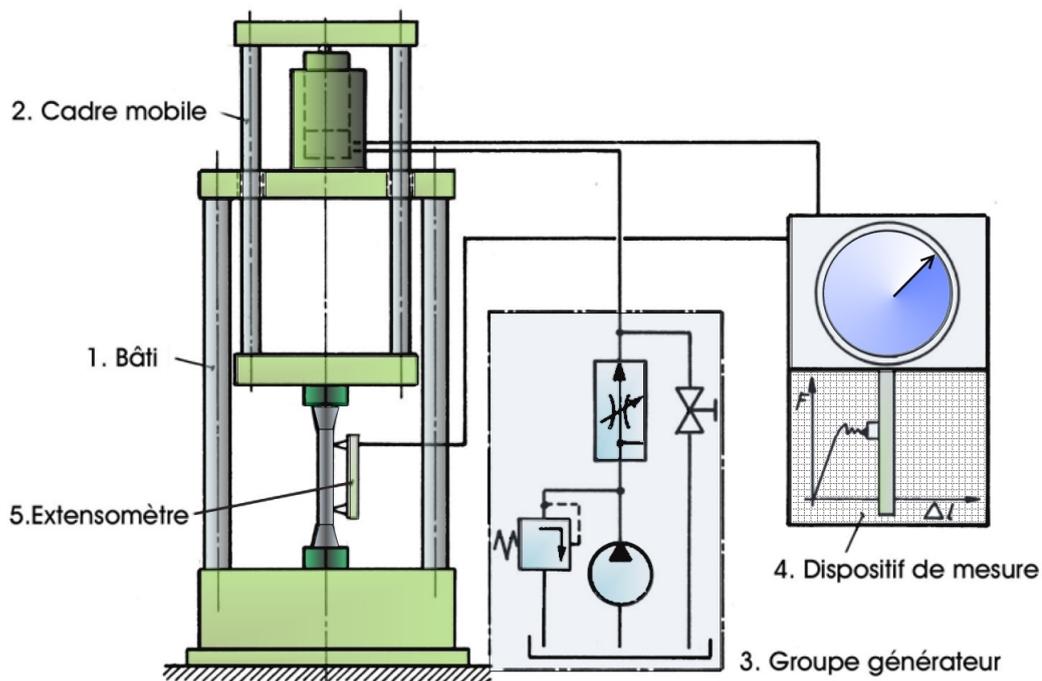
### I.3 Description de la machine d'essai :

L'essai est réalisé sur une machine de traction, en appliquant lentement et progressivement un effort de traction croissant, dont l'intensité varie de  $0$  jusqu'à  $F$ , sur une éprouvette maintenue solidement entre les mors de la machine oléo-hydraulique. La machine d'essai oléo-hydraulique verticale est constituée par les composants suivants, (**Figure I.2a**) :

1. Un bâti comprenant un socle sur lequel est fixé un cadre composé de deux ou quatre colonnes et d'une traverse supérieure supportant un vérin hydraulique à frottement des plus réduits.
2. Un cadre mobile, guidé sans frottement à l'intérieur du cadre fixe, déplacé par l'action du piston du vérin hydraulique. Cette disposition particulière des deux cadres permet d'opérer dans diverses conditions et d'effectuer des essais de traction, de compression, de cisaillement, de flexion et de dureté superficielle. Le déplacement du cadre vers le haut réalise la traction.
3. Un groupe générateur de pression comportant une pompe volumétrique produisant une pression comprise habituellement entre 200 et 500 bars, un régulateur de débit, un limiteur de pression maximale et un robinet de décharge.
4. Un dispositif de mesure de la force produite par le vérin. Cet équipement est généralement composé d'une conduite de mesure, séparée de la conduite

d'alimentation afin de tenir compte de la perte de charge due à l'écoulement du fluide, d'un mécanisme manométrique.

5. Un dispositif de mesure de la **déformation axiale** de l'éprouvette de traction constitué par un extensomètre (**Figure I.2b**), il sert à mesurer le déplacement directement sur la partie utile de l'éprouvette, cela permet d'obtenir une mesure plus précise que par la mesure du déplacement de la traverse mobile. Il est possible également de mesurer la **variation de section** d'une éprouvette pour évaluer le **coefficient de Poisson**. La déformation est généralement transmise au pupitre de mesure, soit amplifiée mécaniquement, soit le plus souvent sous forme d'un signal électrique. Les extensomètres à contacts comportent deux couteaux formant la base de mesure. Ils sont appliqués directement sur le corps de l'éprouvette, pour déterminer soit ses variations de longueur soit ses variations de diamètre, **Figure I.2b**.



**Figure I.2a.** Schéma d'une machine d'essai oléo-hydraulique.

Le mouvement de la traverse mobile est assuré par une commande hydraulique. La charge imposée à l'éprouvette est mesurée par un dynamomètre, et l'allongement par un extensomètre. Ceci, permettra d'aboutir à des résultats d'enregistrement de la courbe brute de traction,  $F = f(\Delta L)$ , caractéristique de l'échantillon et de sa géométrie.

La vitesse peut être exprimée en (mm/min) ou en (% /sec), pourcentage de longueur utile par seconde. La vitesse est un paramètre d'essai important puisque les grandeurs classiquement recherchées ( $\sigma_e$ ,  $\sigma_m$ , etc.) nécessitent une vitesse lente pour limiter l'effet de l'échauffement local d'une part, et assurer une cinétique de changement de structure du matériau suffisamment lente pour être représentative et reproductible.

La vitesse de l'essai est limitée et dépend du matériau :

- Aciers	$V_{MAX} \leq 0.150 L_0 \left( \frac{mm}{min} \right)$	ou $\leq \frac{30N}{mm^2/sec}$
- Aluminium	$V_{MAX} \leq 0.009 L_0 \left( \frac{mm}{min} \right)$	ou $\leq \frac{10N}{mm^2/sec}$
- Cuivre	$V_{MAX} \leq 0.006 L_0 \left( \frac{mm}{min} \right)$	

Dans la machine d'essai oléo-hydraulique, le régulateur de débit assure une alimentation à débit constant quelle que soit la pression à l'intérieur du cylindre.

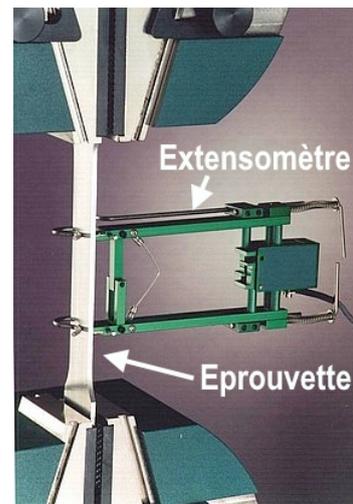


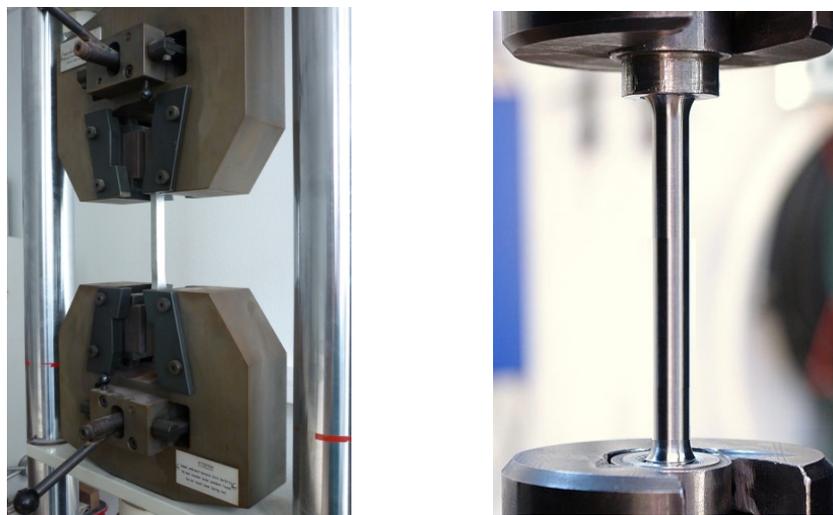
Figure I.2b. Extensomètre à contact sur une éprouvette en traction.

L'essai s'arrête à la rupture de l'éprouvette, le relevé graphique de la force axiale dans l'éprouvette en fonction de la déformation mesurée sur une distance déterminée porte le nom de « **diagramme de traction** ». Pour pouvoir comparer les diverses matières et des éprouvettes de formes différentes, ce diagramme est modifié en portant en abscisses l'allongement spécifique «  $\epsilon$  » et en ordonnées la contrainte normale «  $\sigma$  ».

## I.4 Exécution de l'essai

Dans l'essai de traction vous allez mettre en évidence les domaines élastiques puis plastique, jusqu'à la rupture. Vous caractériserez le matériau par sa *limite élastique*  $\sigma_e$ , ainsi que sa *contrainte*  $\sigma_u$  et son *allongement à la rupture*  $A\%$  :

- Une éprouvette métallique de **300 mm** de long, **25 mm** de large et **6 mm** d'épaisseur, mesurer la section **S** de l'éprouvette avec un pied à coulisse et évaluer les erreurs faites.
- Fixer l'éprouvette dans la machine de traction entre les deux mores (**Figure I.3a**). La more supérieure est mobile tandis que le mors inférieur est fixe.



**Figure I.3a.** mise en place de l'éprouvette entre mores de la machine.

- Sur l'une des faces on fixe l'extensomètre (**Figure I.2b**), ce qui permet de mesurer la déformation longitudinale de l'échantillon (son allongement relatif dans le sens de la contrainte).
- L'éprouvette au repos  $F=0$ , allongement  $A=0$ , une fois l'éprouvette en place, on applique une légère précharge afin d'être sûr que l'on n'a pas de jeu. Puis, on effectue un déplacement de la travée à vitesse constante qui a pour effet d'étirer l'éprouvette, et on mesure l'effort généré par ce déplacement,

On tire sur l'éprouvette avec une force **F1** qui entraîne un allongement **A1**,

On supprime l'effort, l'allongement disparaît (cas on nous sommes encore dans le domaine élastique du matériau)

On tire avec une Force plus importante **F2** qui entraîne un allongement **A3**,

On supprime la force **F2**, mais l'éprouvette ne retrouve pas son état initial. (nous avons dépassé le seuil d'élasticité et nous sommes entré dans le domaine plastique). Il reste un allongement **A2**.

On exerce à nouveau un effort de traction supplémentaire plus important que l'effort **F2**. Après avoir atteint un maximum, la force décroît et l'éprouvette s'amincit en un endroit (zone de striction), puis il y a rupture (**Figure I.3b-3c**), toute après on mesure **A4 = Lu-Lo**.

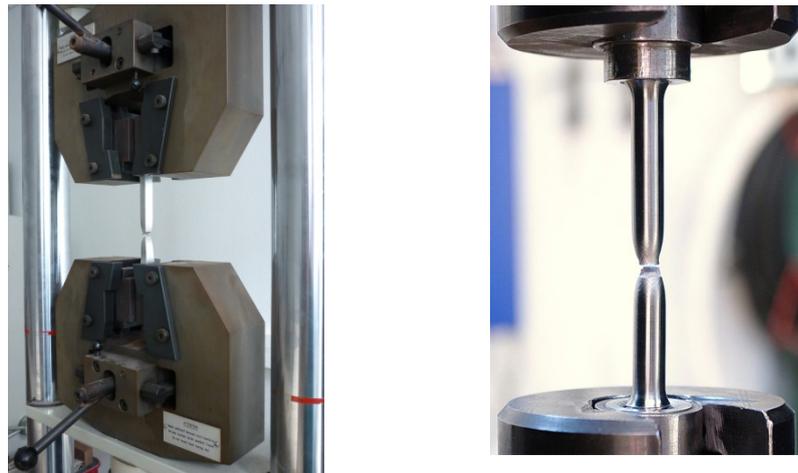


Figure I.3b. Éprouvettes rompues après essai de traction.

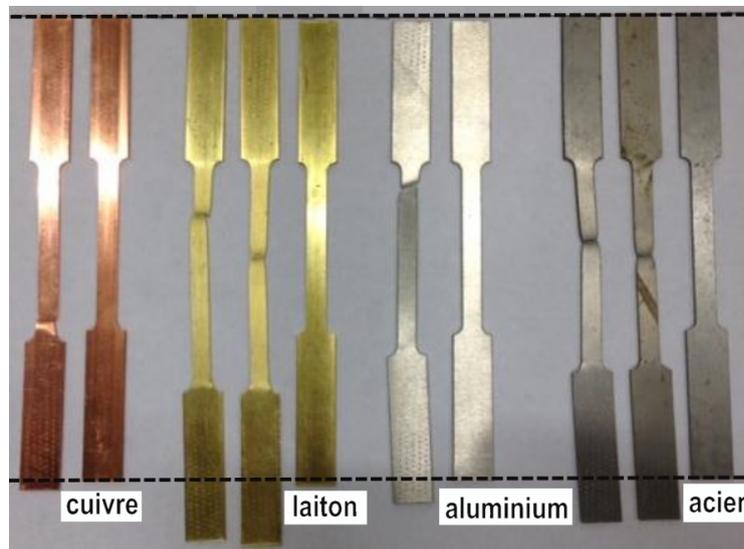


Figure I.3c. Des éprouvettes de cuivre, de laiton, d'aluminium et d'acier pour des essais de traction, des éprouvettes avant (à droite) et après (à gauche). Après la rupture de l'éprouvette et reconstitution de celle-ci, on mesure  $L_u$  et  $S_u$  respectivement longueur entre repères et section minimale ultimes et on note :

$S_0$  : section initiale en  $\text{mm}^2$ ,

$S_u$  : section minimale après rupture,

$L_0$  : longueur initiale entre repères,

$L_c$  : longueur de la partie calibrée,

Lu : Longueur ultime après rupture.

\* les résultats de l'essai sont fournis séparément en vue de rédaction du rapport.

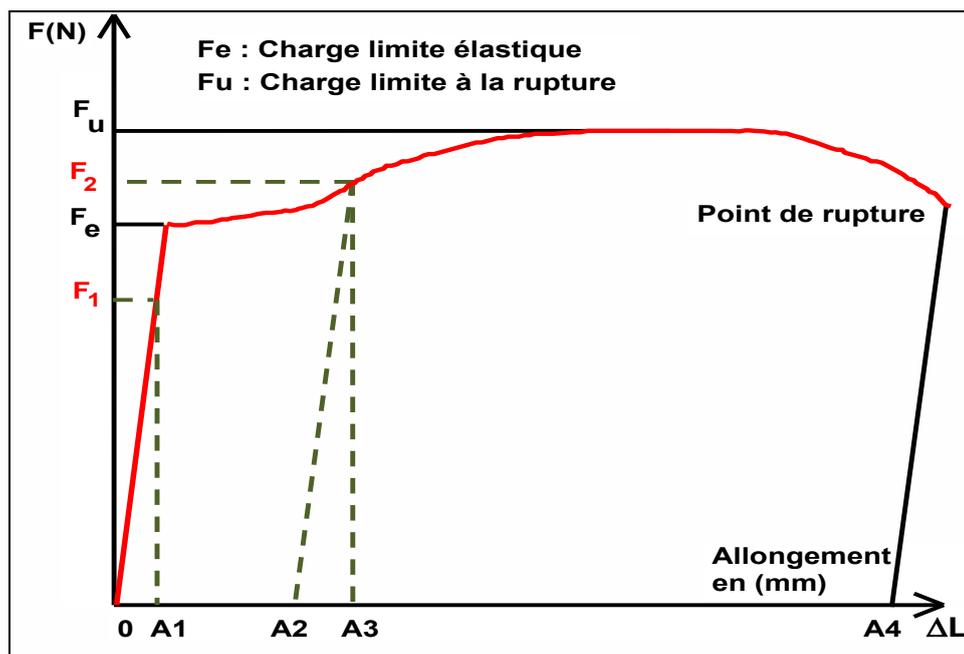
### I.4.1 Diagramme Force-Allongement brut

Les valeurs mesurées directement lors d'un essai de traction sont la force  $F$  et l'allongement  $\Delta L$ . Si l'on représente en ordonnée la force appliquée  $F$  et en abscisse l'allongement de l'éprouvette  $\Delta L = L - L_0$ , on obtient le diagramme force-allongement, **Figure I.4a**.

En rapportant la force à la section initiale  $S_0$ , et l'allongement à la longueur initiale, on obtient le diagramme contrainte-déformation.

La contrainte  $\sigma$ , rapportée dans un diagramme de traction est la force divisée par la section initiale  $S_0$  de l'éprouvette (contrainte nominale) :

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$



**Figure I.4a.** Diagramme Force-Allongement résultats directs de l'essai. De même la déformation  $\varepsilon$ , se réfère à la longueur initiale  $L_0$  de la partie délimitée par l'extensomètre (déformation nominale) :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

On parle de **diagrammes rationnels** quand on détermine les contraintes et les déformations vraies. Ils sont obtenus en divisant la force ou l'allongement par la section, respectivement la **longueur instantanée**  $L$ .

### I.4.2 Diagramme de traction conventionnel

Sur un diagramme de traction conventionnel (contraintes-allongements), on observe les phases successives suivantes, **Figure I.5** :

1. **Zone OA** : domaine des **déformations élastiques ou réversibles** (zone parfois linéaire), si l'on cesse la charge, l'éprouvette retrouve ses dimensions initiales.
2. **Zone AB** : la déformation n'est plus complètement réversible. La **déformation est plastique (ou permanente)** homogène ; appelée aussi déformation plastique répartie. Les allongements croissent plus vite que les charges. L'allongement a lieu avec une diminution régulière de la section tout au long de l'éprouvette.
3. **Zone BC** : la **déformation plastique se localise** dans une petite portion de l'éprouvette et n'est plus homogène, c'est la **striction** on aboutit à la rupture en C. Les allongements croissent avec une diminution de la charge. Le point C correspondant, lui, à la **charge ultime**.
4. Le domaine élastique du diagramme conventionnel de traction est lié à la loi de HOOKE et la constante E du matériau :

**Module d'élasticité longitudinale E ( $N/mm^2$ ) ou MPa :**

Il caractérise la pente de la droite de proportionnalité précédente et l'élasticité du matériau testé. Plus **E** est grand, plus le matériau est rigide et inversement.

**Loi de Hooke  $\sigma = E \cdot \varepsilon$  :**

Il traduit la relation de proportionnalité entre la contrainte et la déformation dans le premier segment de courbe **OA**, d'où  $\sigma$  en MPa, E en MPa et  $\varepsilon$  sans unité.

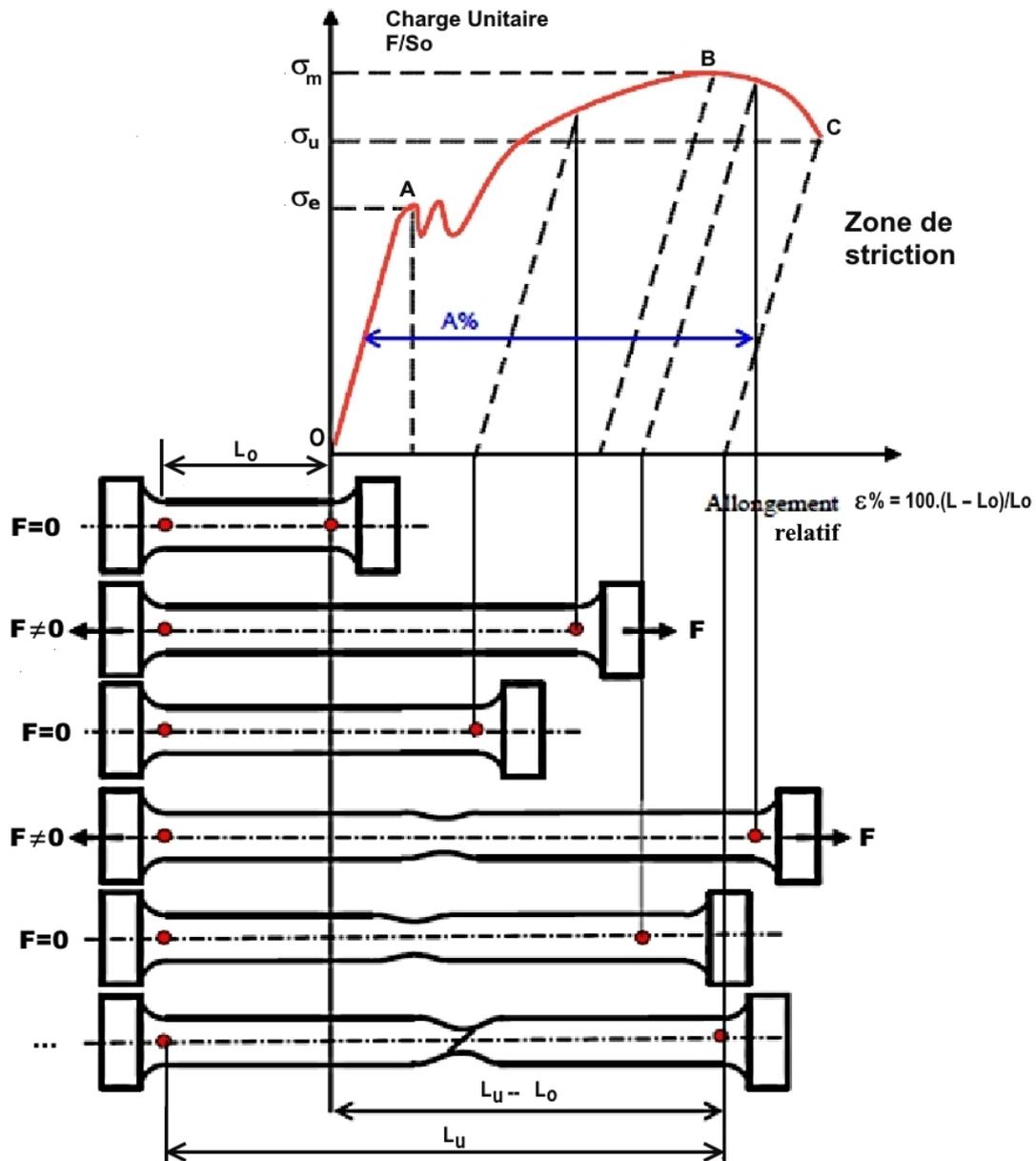


Figure I.5. Éléments du diagramme conventionnel de traction avec deux cycles statiques de chargement-déchargement avant et après charge ultime.

### I.4.3 Principales caractéristiques mécaniques d'un matériau

À partir du diagramme caractéristique de traction en détermine :

- La limite apparente élastique  $\sigma_e$  (MPa)

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0}$$

$F_e$  en N,  $S_0$  en  $\text{mm}^2$ .

La limite élastique  $\sigma_e$  représente la contrainte à partir de laquelle les allongements deviennent permanents et qui correspond sensiblement au seuil à

partir duquel il n'y a plus de proportionnalité entre contrainte et allongement (point A).

- **La Limite de proportionnalité  $\sigma_{pr}$  (MPa)**

Est la contrainte maximale au-delà de laquelle le matériau n'obéit à la loi de HOOKE :

$$\sigma_{pr} = \frac{F_{pr}}{S_0}$$

Il faut remarquer que la limite d'élasticité et la limite de proportionnalité se prêtent difficilement aux mesures et que leurs grandeurs dépendent, notamment, de la norme conventionnelle adoptée pour l'angle d'inclinaison de la tangente et pour la déformation résiduelle. Ceci étant, les quantités ( $\sigma_{pr}$  et  $\sigma_e$ ) ne sont pas, habituellement, incluses dans les formulaires des propriétés des matériaux.

- **La limite maximale  $\sigma_m$  (MPa)**

C'est la contrainte maximale atteinte durant l'essai de traction. À partir de ce point, la déformation commence à se localiser sous forme de striction, ce qui explique la décroissance de l'effort nécessaire aux déformations au-delà du point B.

$$\sigma_m = \frac{F_m}{S_0}$$

avec  $\sigma_m$  en MPa,  $F_e$  en N,  $S_0$  en mm<sup>2</sup>.

- **La limite à la rupture  $\sigma_u$  (MPa)**

C'est la contrainte maximale que peut supporter le matériau avant d'atteindre la zone de striction. Souvent appelée résistance à la rupture.

- **Coefficient de Poisson  $\nu$**

Pour les matériaux élastiques, la diminution des sections droites est proportionnelle à l'allongement relatif, ce coefficient est noté  $\nu$  et appelé coefficient de Poisson :

$$\nu \frac{\Delta L}{L_0} = - \frac{\Delta d}{d_0} \text{ en notant } \frac{\Delta d}{d_0} = \varepsilon_y \text{ on obtient } \varepsilon_y = -\nu \cdot \varepsilon_x.$$

Ce coefficient caractérise la déformation transversale.

- **L'allongement relatif total ou A%**

Est l'allongement à la rupture :  $A\% = \frac{Lu - L_0}{L_0} \times 100$

Où **Lu** est la longueur de l'éprouvette après rupture.

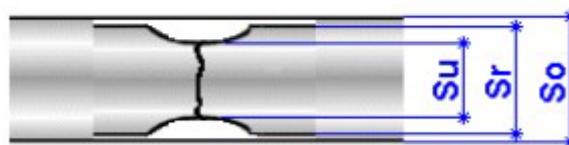
Il caractérise la ductilité du matériau. C'est la déformation nominale (allongement divisé par la longueur initiale) après rupture exprimée en %. En raison de la localisation de la déformation, la majeure partie de l'allongement ne provient que d'une fraction de la longueur  $L_0$ . La valeur de **A%** est donc d'autant plus petite que l'éprouvette est longue. C'est pour cette raison que l'on doit mentionner le rapport  $L_0/d_0$  avec la valeur de l'allongement. On désigne par **A<sub>5</sub>** et **A<sub>10</sub>** l'allongement obtenu sur des éprouvettes ayant un rapport  $L_0/d_0$  de 5 et 10.

- **Coefficient de striction Z**

Est la réduction de section maximale de l'éprouvette rompue c'est-à-dire dans la section de rupture, **Figure I.6**. Le coefficient de striction traduit l'aptitude à la déformation à froid et s'exprime, habituellement on pourcentage de l'aire de la section initiale  $S_0$  :

$$Z = 100 \frac{(S_0 - S_r)}{S_0} [\%] = 100 \frac{\Delta S_0}{S_0}$$

avec  $S_0$  : section initiale et  $S_r$  : section après rupture.



**S<sub>0</sub>** : Dimension éprouvette initiale  
**S<sub>r</sub>** : Dimension éprouvette après rupture  
**S<sub>u</sub>** : Dimension de la striction après rupture

**Figure I.6.** Différentes sections de l'éprouvette avant et après rupture.

• **Limites élastiques conventionnelles**

Pour les aciers, on est conduit à distinguer deux types principaux de courbes de traction suivant la présence ou non d'un crochet à la limite d'élasticité, **Figure I.7**.

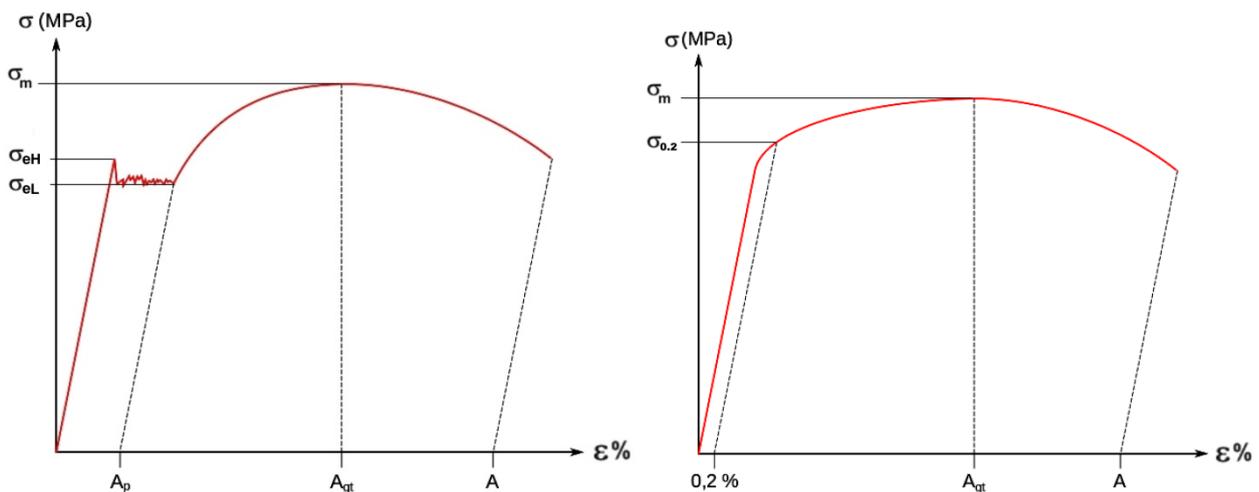
Le premier type de diagramme est d'ailleurs un diagramme d'usage commun. La **Figure I.7** illustre l'allure que peuvent avoir les courbes de traction de différents matériaux.

La courbe de gauche de (**Figure I.7**) correspond à des aciers ferritiques en général, mais peut se présenter avec moins de netteté pour des aciers plus durs traités, parfois même alliés. Ce type de courbes amène à la définition des grandeurs :

La limite d'élasticité supérieure  $\sigma_{eH}$  en MPa,

La limite d'élasticité inférieure  $\sigma_{eL}$  en MPa,

et La longueur du palier  $A_p$  en %.



**Figure I.7.** Diagrammes deux types différents de courbes de traction.

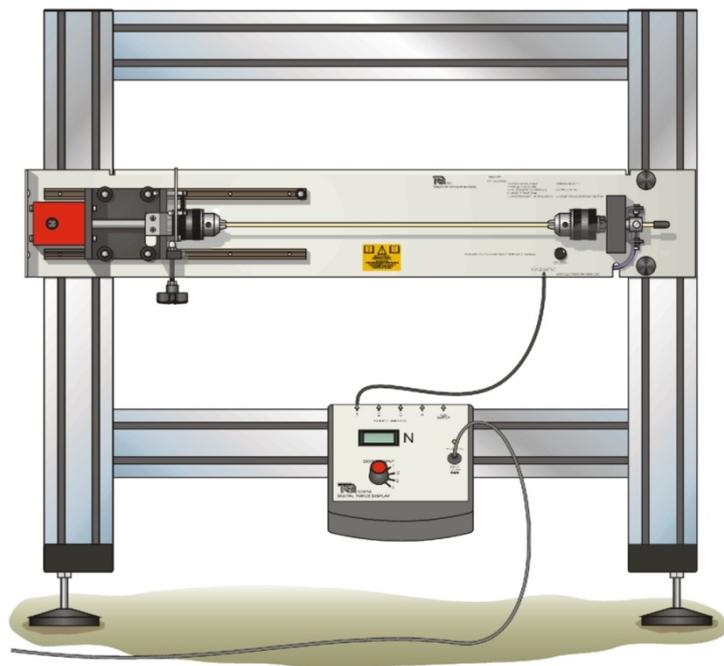
La courbe de droite de (**Figure I.7**), avec un passage progressif, correspond aux aciers durs ou aux aciers austénitiques, dans ce cas en parle de la **Limite conventionnelle d'élasticité  $\sigma_{0.2}$  en MPa**. Dans les courbes de traction où le palier de fin de limite élastique n'apparaît pas nettement et pour la mesure de  $\sigma_{0.2}$  on tolère une légère déformation permanente de 0.2% ( $A\% = 0.2$ ).

#### I.4.4 Propriétés mécaniques de quelques matériaux.

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques mécaniques de quelques matériaux :

Matières	Modules		Coefficient de Poisson $\nu$
	d'élasticité E en kN/mm <sup>2</sup>	de glissement G en kN/mm <sup>2</sup>	
Aciers profilés	210	81	10/3
Aciers moulés	210	83	3,3 à 4
Fonte malléable	170	68	4
Fonte grise	90 à 120	36 à 48	4
Cuivre	130	50	10/3
Bronze	115	44	10/3
Laiton	98	38	10/3
Verre de Jena	74	30	4
Marbre	42	–	–
Béton	30	13	6,5
Briques	3	–	–

**TP N° 02 :**  
**Essai de torsion des Poutres Cylindrique**  
**– Pleines et Tubulaires –**  
**(Portique QT-STR6)**



## II. Essai de torsion

### II.1 Objectif du TP

Le but de ce travail pratique est l'étude de l'influence des caractéristiques géométriques et du matériau sur le comportement des poutres sollicitées à la torsion simple.

#### II.1.1 Bref rappel théorique

Une poutre cylindrique soumise à la torsion simple est régie par la formule générale suivante, (Figure. II.1) :

$$\frac{M_t}{J} = \frac{G\theta}{l} = \frac{\tau_{max}}{R} \quad \text{Dans laquelle : (voir cours sur la torsion simple) :}$$

$M_t$  : représente le moment de torsion exprimé en [Nm].

$J$  : Moment d'inertie polaire de la section de la poutre exprimée en [m<sup>4</sup>].

$$\left\{ \begin{array}{l} J = \frac{\pi D^4}{32} \quad \text{Pour une poutre pleine de diamètre } D \text{ [m].} \\ J = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32} \quad \text{Pour une poutre creuse de } \left( \frac{\text{diamètre intérieur } d[\text{m}]}{\text{diamètre extérieur } D[\text{m}]} \right). \end{array} \right.$$

Avec :

$G$  : Module d'élasticité transversale [N/m<sup>2</sup>].

$\theta$  : Angle de déformation [radian].

$l$  : Longueur de la poutre [m].

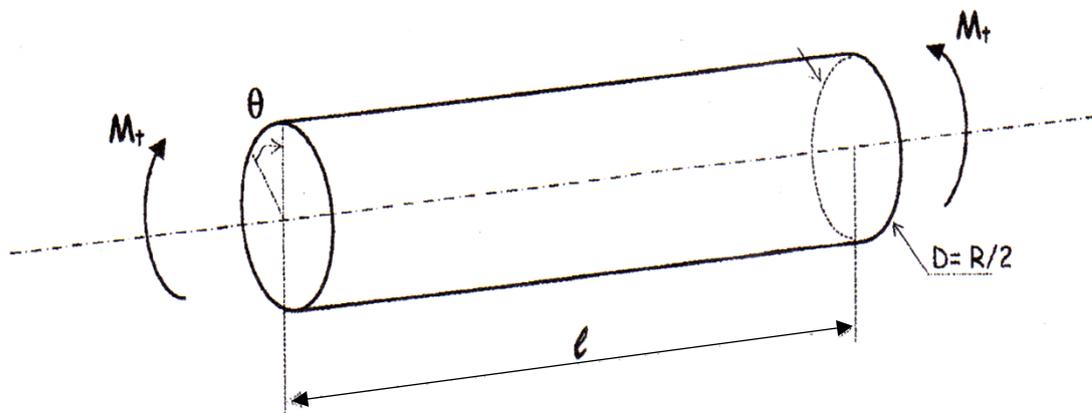
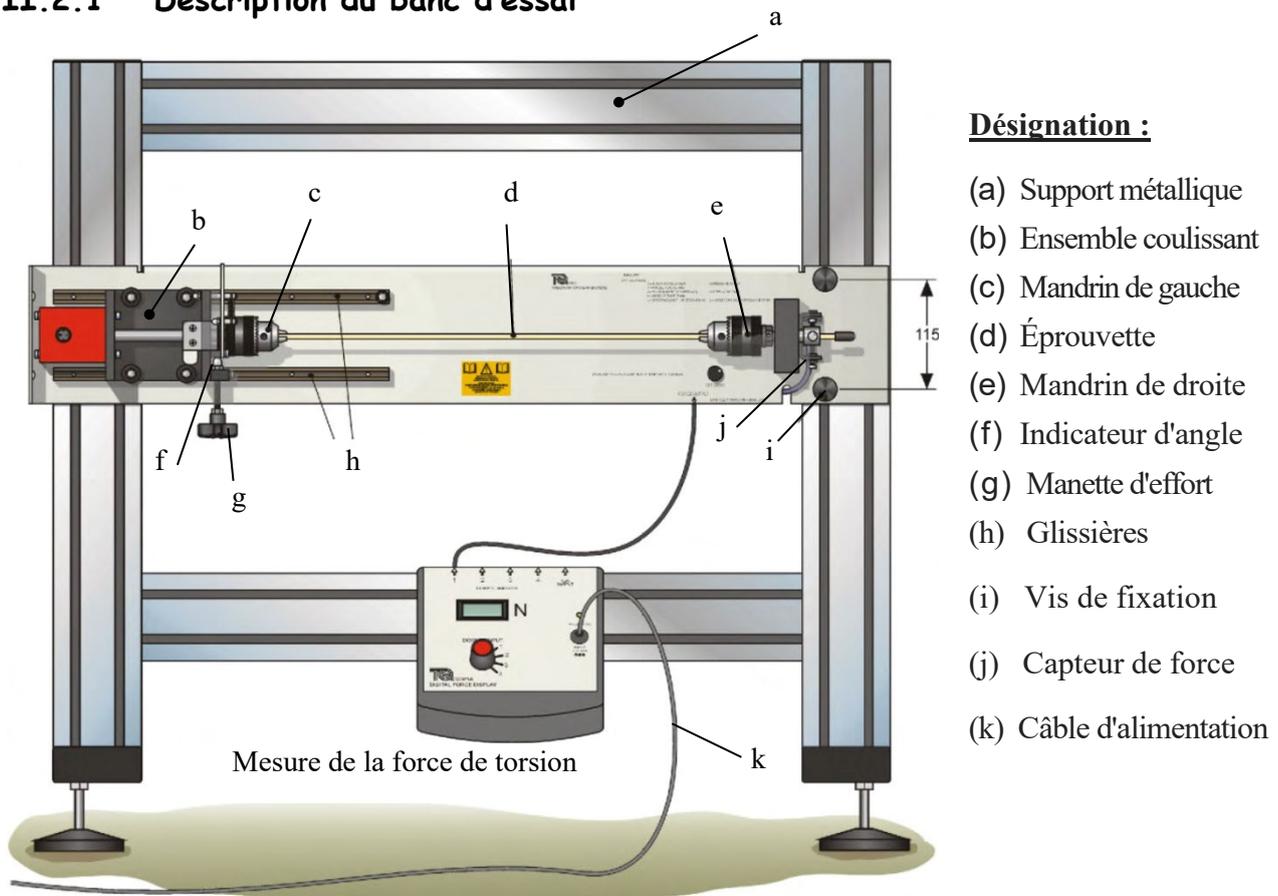


Figure II.1. Poutre cylindrique soumise à la torsion.

## II.2 Équipement

### II.2.1 Description du banc d'essai



**Figure II.2. Banc d'essai de torsion.**

Figure II.2 représente le banc d'essai destiné à la torsion des poutres. Il comprend un support métallique (a) comprenant deux mandrins (c) et (e) sur lesquels on peut fixer une éprouvette (d). Un capteur de force (j) lié au mandrin de droite à travers un bras de levier permet de mesurer l'effort et par conséquent le moment de torsion appliquée à l'éprouvette en question. Un rapporteur d'angle (f) monté sur le mandrin de gauche permet la mesure de la déformation angulaire  $\theta$  en degrés.

Une manette (g) liée au mandrin de gauche par l'intermédiaire d'un système de levier permet d'appliquer l'effort de torsion désiré sur l'éprouvette à travers un système vis-écrou.

Un système de coulissement (b) du mandrin gauche permet de modifier la longueur de l'éprouvette à mettre sous torsion.

## II.2.2 Matériel accessoires

- Éprouvettes de différentes **formes** (pleine et tubulaire) et différents matériaux (acier et laiton)
- Règle graduée, pied à coulisse, clé de mandrin, marqueur
- Source d'alimentation, câbles de connexion

## II.3 Expérimentation

### II.3.1 Mode opératoire général

- 1) À l'aide d'un marqueur et d'une règle graduée tracer sur l'éprouvette les distances suivantes :

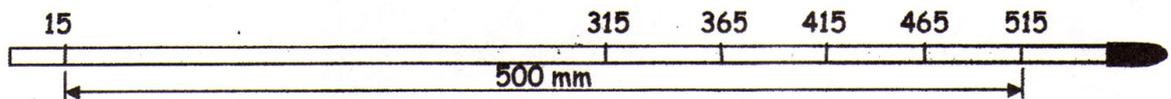


Figure II.3. Éprouvette après marquage

- 1) Placer l'éprouvette entre les mandrins en alignant le premier trait (15) avec l'extrémité des mors de gauche puis serrer le mandrin à l'aide de la clé appropriée.
- 2) Desserrer les 4 vis de maintien de l'ensemble coulissant, aligner le trait (515) avec les mors de droite.
- 3) Resserrer les 4 vis et puis le mandrin - Comme ça on a une longueur effective de 500 mm.
- 4) Faire tourner la manette d'effort jusqu'à l'affichage d'une Force de 0.3 N à 0.5 N (pré-chargement).
- 5) Remettre à zéro les indicateurs de Force et d'angle.
- 6) Faire tourner la manette de Force jusqu'à une valeur de 5 N puis revenir à zéro.
- 7) Si le rapporteur d'angle n'indique pas zéro, vérifier le serrage des mandrins.

### II.3.2 Expérience A

À travers cette expérience on essaie de vérifier la relation entre le moment de torsion en fonction de l'angle de déformation ( $M_f = f(\theta)$ ). Ensuite on essaie de voir l'influence des propriétés du matériau sur cette relation. Pour cela on doit :

\* Réaliser les étapes (1 à 7) du mode opératoire général pour une éprouvette pleine en acier.

\* Noter l'angle de déformation  $\theta$  pour chaque incrément de Force de 1 N et remplir le Tab. II.1

Tab. II.1. Résultats pour **Acier**

Tab. II.2. Résultats pour **Laiton**

Force F [N]	Moment de Torsion $M_t$ [Nm]	Angle de Déformation $\theta$ [Degré]	Force F [N]	Moment de Torsion $M_t$ [Nm]	Angle de déformation $\theta$ [Degré]
0					
1					
2					
3					
4					
5					

- Déduire le moment de torsion  $M_t$  en multipliant la force  $F$  par la valeur du bras de levier (0.05m)
- Reprendre la même manipulation en utilisant une éprouvette pleine en laiton : Tableau II.2.
- A l'aide du pied à coulisse mesurer le diamètre  $D$  des éprouvettes pleines en acier et en laiton.

Remplir soigneusement les Tableaux II.3 et II.4 ci-dessous.

Tab. II.3. Résultats pour la poutre en **Acier**      Tab. II.4. Résultats pour la poutre en **Laiton**

Diamètre de la poutre en Acier $D$	.....
Moment d'inertie polaire $J$	..... $\times 10$
Longueur mise sous torsion $l$	0.5m

Diamètre de la poutre en Laiton $D$	..... mm
Moment d'inertie polaire $J$	..... $\times 10^{-12} m^4$
Longueur mise sous torsion $l$	0.5m

Moment de Torsion $M_t$ [Nm]	Angle de Déformation $\theta$ [Radian]	$M_t \times l$	$J \times \theta \times 10^{-13}$

Moment de Torsion $M_t$ [Nm]	Angle de Déformation $\theta$ [Radian]	$M_t \times l$	$J \times \theta \times 10^{-13}$

**a) Travail demandé**

- \* Tracer puis commenter les graphes 1 et 2 de  $(M_t = f(\theta))$  correspondant au tableau 1 et 2.
- \* Tracer les graphes 3 et 4 de  $(M_t l = f(J\theta))$  correspondant au Tableau 3 et 4.
- \* En déduire le module d'élasticité transversale pour l'acier et pour le laiton.
- \* Expliquer l'influence d'une petite variation de diamètre d'une poutre sur sa rigidité transversale.

**II.3.3 Expérience B**

A travers cette expérience on essaie d'analyser la relation entre l'angle de déformation  $\theta$  et la longueur d'une poutre soumise à un moment de torsion  $M_t$  donné, c.à.d.  $(\theta = f(l))$ . Pour cela on doit :

- Reprendre les étapes (1 à 7) du mode opératoire général en utilisant une éprouvette en Laiton.
- Exercer une force de 3 N correspondant à un moment de torsion  $M_t = 0.15 \text{ Nm}$ .
- Noter dans le **Tab. II.5** l'angle de déformation correspondant lorsque  $l=500 \text{ mm}$ .
- Refaire la même procédure pour les différentes longueurs marquées sur l'éprouvette en complétant le tableau.

**Tab. II.5. Déformation angulaire pour une poutre en Laiton**

Longueur soumise à la torsion [m]	0.500	0.450	0.400	0.350	0.300
Déformation Angulaire [Degré]					

**b) Travail demandé**

- Tracer puis commenter le graphe de  $(\theta = f(l))$  correspondant aux résultats du **Tab. II.5**.

### II.3.4 Expérience C

Maintenant on veut comparer le comportement en torsion (déformation) d'une éprouvette pleine à celui d'une éprouvette tubulaire de même diamètre nominal.

#### a) Manipulation

- Compléter le **Tableau II.6** (colonne 4) en exploitant les résultats de l'expérience A (**Tableau II.2**)
  - Refaire l'expérience (1) en utilisant une éprouvette tubulaire en laiton et noter les résultats dans le **Tableau II.6**.

**Tableau II.6. Déformation angulaire pour la poutre pleine et creuse en Laiton**

Force F [N]	Moment de Torsion M <sub>t</sub> [Nm]	poutre creuse laiton	Poutre pleine laiton			
		Angle de Déformation θ -[Degré]				
0				poutre pleine: Diamètre .....mm J .....m <sup>4</sup>		
1				poutre creuse	Diamètre intérieur .....mm	J .....m <sup>4</sup>
2					Diamètre extérieur .....mm	
3						
4						
5						

#### b) Travail demandé

- Tirer des conclusions des résultats obtenus dans le **Tab. II.6** pour une poutre pleine en comparaison à une poutre tubulaire (tout en évoquant l'impact sur des applications pratiques).

**TP N° 03 :**  
**ESSAI DE FLEXION SIMPLE**  
(Portique QT-STR2)



### III. Essai de flexion simple

#### III.1 Objectif du TP

Le but de ce travail pratique est de mettre en évidence et de comprendre le moment fléchissant dans une poutre soumise à la flexion sous différentes conditions de chargement.

#### III.2 Bref rappel théorique

Dans le cas d'une poutre soumise à la flexion simple, les éléments de réduction dans n'importe quelle section droite se réduisent à un effort tranchant  $T_y$  (perpendiculaire à la ligne moyenne  $Ax$ ) et à un moment fléchissant  $M_{GZ}$  (perpendiculaire à la ligne moyenne et à  $T_y$ ).

Pour faire apparaître Les efforts intérieurs, on effectue une coupure fictive à la distance  $x$  de L'origine A. En isolant le tronçon  $w_1$  (Fig. III.1) et en lui appliquant le principe fondamental de la statique on obtient L'expression des efforts tranchants  $T_y$  et le moment fléchissant  $M_{GZ}$  le long de la poutre (Fig. III.2).

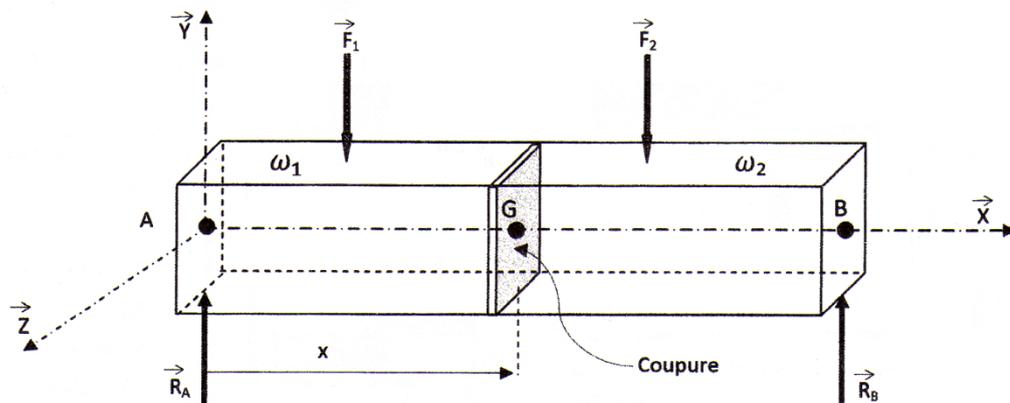


Figure III.1. Poutre sur deux appuis simples et sollicitée a la flexion.

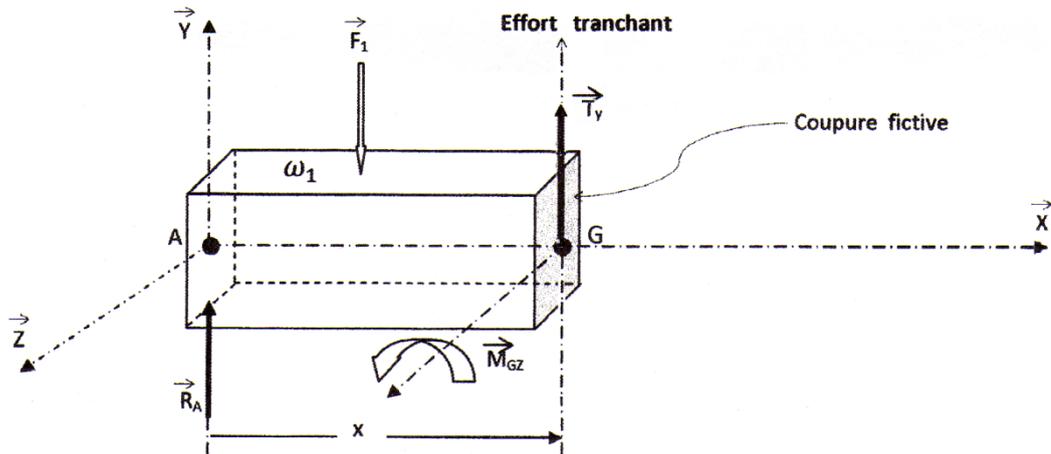


Figure III.2. Efforts intérieurs dans une section.

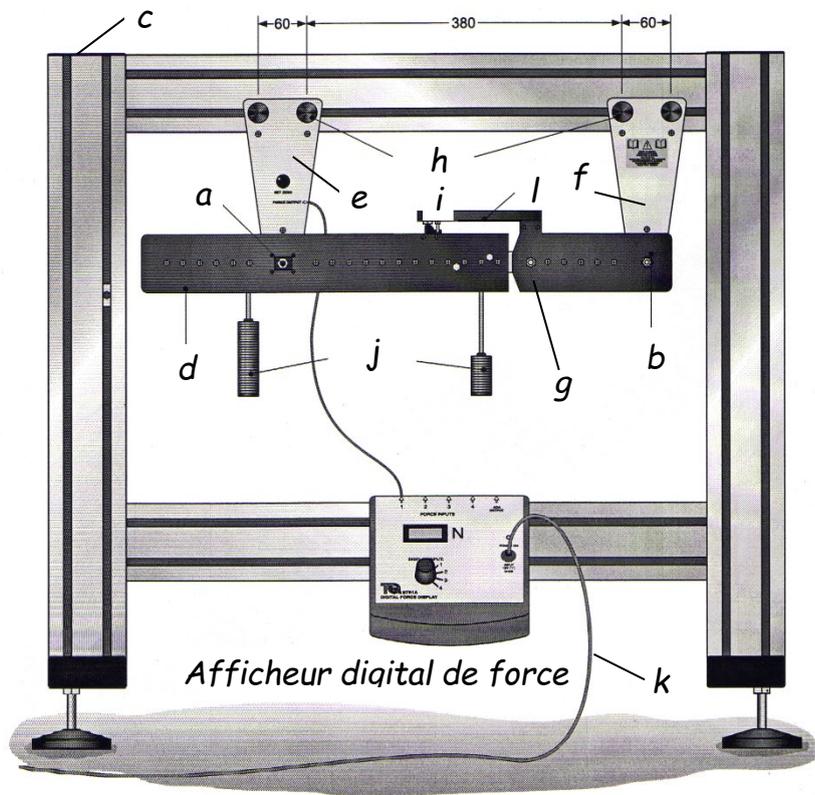
On peut adopter la convention suivante : Le moment fléchissant  $M_{GZ}$  dans une section donnée est égal à la somme algébrique des moments de toutes les forces situées à gauche ou à droite de cette section - c.à.d. si en isolant le tronçon  $w_1$  on a :  $M_{GZ} = M_{RA/GZ} + M_{F1/GZ}$  (Alternativement si en isolant le tronçon  $w_2$  on a :  $M_{GZ} = M_{RB/GZ} + M_{F2/GZ}$ ).

### III.3 Description du banc d'essai

Figure III.3 représente le banc d'essai de flexion. Il fournit un moyen simple et direct pour mesurer indirectement le moment fléchissant dans une section d'une poutre soumise à différentes conditions de charge.

Il est constitué d'un châssis métallique (c) comprenant deux supports (e) et (f) sur lesquels repose une poutre (d) en appuis simples à travers les axes articulés (a) et (b) distants de  $l = 440$  mm. L'appui gauche permet un mouvement rotationnel et horizontal tandis que l'appui droit permet uniquement un mouvement rotationnel. La poutre est décomposée en deux parties  $w_1$  et  $w_2$  par une coupure (g) effectuée à une distance  $x = 300$  mm de l'appui gauche (e). Pour empêcher la poutre de se déformer, un mécanisme (autorisant le seul mouvement dans le sens de cisaillement) et formant un pont (à travers un bras de levier  $b=125$ mm) par l'intermédiaire d'un capteur piézoélectrique permet ainsi de mesurer l'effort équivalente au niveau du capteur et par conséquent le moment fléchissant  $M_f$  dans la section ( $M_f = F \cdot b$ ).

Des étriers de chargement peuvent être accrochés tout au long de la poutre à chaque 20 mm d'intervalle et en utilisant des incréments de masses marquées de 100 g.



**Désignation :**

- (a) Axe articulé gauche
- (b) Axe articulé droit
- (c) Châssis
- (d) Poutre
- (e) Support gauche
- (f) Support droit
- (g) Coupure
- (h) Vis de fixation
- (i) Capteur de force
- (j) Masses marquées
- (k) Câble d'alimentation
- (l) Bras de levier

**Figure III.3. Banc d'essai de flexion.**

**Avant de commencer à manipuler il faut bien inspecter toutes les pièces**

- 1) Vérifier Les raccordements électriques et les Vis de fixation.
  - 2) Position de Châssis (s'assurer qu'il est monté sur une surface plane et facilement accessible)
  - 3) Relier le mini fil DIN de la force de (entré 1) sur l'afficheur digital de force de à la douille sur l'appui gauche de la poutre
  - 4) Assurer que le fil ne touche pas la poutre.
  - 5) Mettre soigneusement l'afficheur digital de force à zéro à l'aide du Vis de réglage.
- Appliquer doucement la charge au centre de tige d'accroche poids et assurer toujours le retour de l'afficheur digital de force à zéro avant d'appliquer chaque chargement.

### III.4 Procédure expérimentale

#### III.4.1 Expérience A :

Mise en évidence par la mesure que :

- *Le moment fléchissant est égal à la somme algébrique des moments fléchissant de toutes les forces situées sur l'un des côtés de la poutre.*
- *La variation du moment fléchissant est en fonction d'une charge concentrée croissante  $W$ .*

#### a) Manipulation

- Vérifier que la distance entre les appuis est bien  $l = 440$  mm et que la coupure se situe à la distance  $x = 300$  mm de l'appui A situé à gauche selon la Figure III.4 ci-dessous.
- Vérifier que l'indicateur de force affiche zéro lorsque la charge est nulle.
- Placer un chargement de  $M = 100$  g c.à.d.  $W = 0.98$  N à la distance  $x = 300$  mm de l'appui gauche (e) (juste à gauche de la coupure). et reporter la force affichée dans le Tab. III.1.
- Compléter le Tab. III.1 en notant la force correspondante aux charges 200, 300, 400 et 500g.
- En déduire le moment fléchissant  $M_{f_{ex}}$  en multipliant la force lue par le bras de levier  $b = 0.125$  m
- Calculer le moment fléchissant théorique à l'aide de la formule  $M_{f_{th}} = \frac{w \cdot a(l-a)}{l}$  et reporter les résultats dans le Tableau III.1.

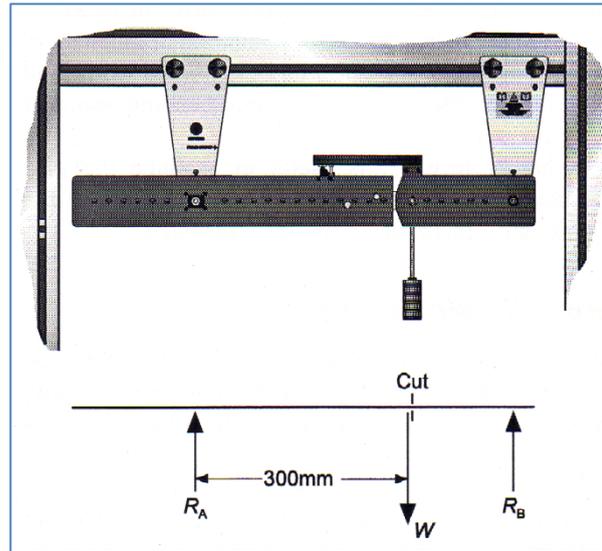


Figure III.4. Poutre soumise à une charge concentrée croissante  $W$ .

Tableau III.1. Résultats de (l'expérience A)

Masse $M$ [g]	Moment fléchissant Expérimental		Moment fléchissant Théorique	
	Force $F$ [N]	$M_{f_{ex}}$ [N.m]	Charge $W$ [N]	$M_{f_{th}}$ [N.m]
0				
100				
200				
300				
400				
500				

#### b) Travail demandé

- Tracer les graphes du moment fléchissant théorique  $M_{f_{th}}$  et expérimental  $M_{f_{ex}}$  en fonction de la charge  $W$ .
- Commenter en tirant des conclusions des résultats de l'expérience A.

#### III.5.2 Expérience B :

Mise en évidence par la mesure que :

- Le moment fléchissant est égal à la somme algébrique des moments fléchissant de toutes les forces situées sur l'un des côtés de la poutre.
- La variation du moment fléchissant est en fonction des conditions de chargements.

**a) Manipulation**

- Vérifier que L'indicateur de force affiche zéro lorsque la charge est nulle.
- Charger la poutre selon la Fig. III.5 en accrochant la masse indiquée dans le Tab. III.2.
- reporter la force affichée (force équivalente) dans le Tab. III.2.
- Calculer les réactions aux appuis ( $R_A$  et  $R_B$ ) puis en
- Déduire le moment fléchissant théorique  $M_{f_{th}}$ .
- Procéder de façon identique avec la poutre chargée
- Selon la (Fig. 6) puis selon la (Fig. 7) ci-dessous,

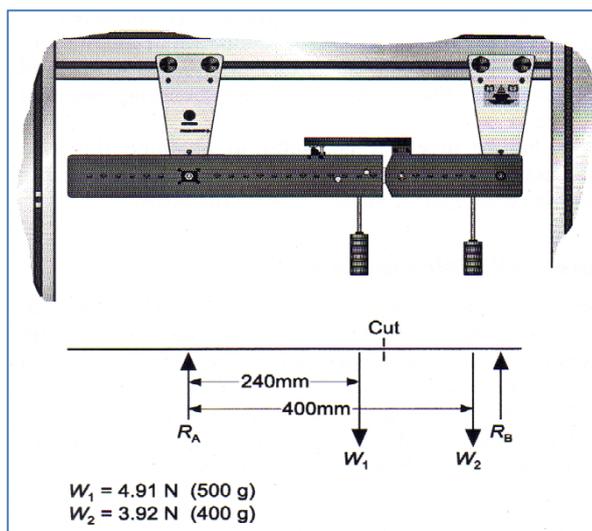
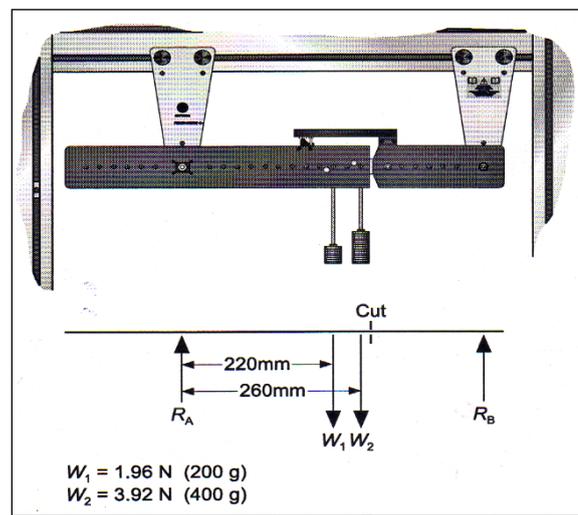
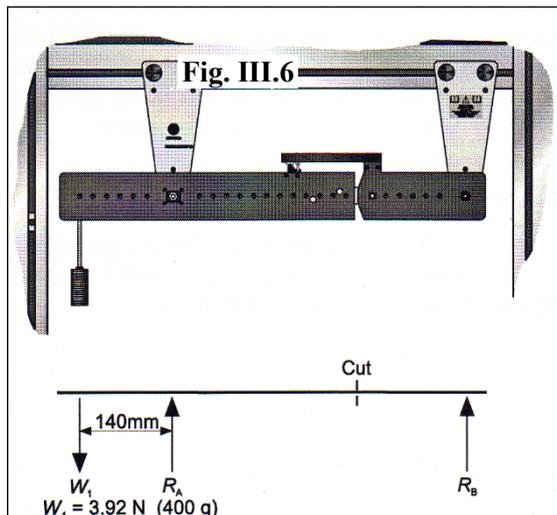


Figure. III.5,6 et 7.

**Tableau III.2. Résultats de l'expérience B**

Fig.	Moment fléchissant Expérimental		Moment fléchissant Théorique				
	Force F [N]	Mf <sub>ex</sub> [N.m]	W <sub>1</sub> [N]	W <sub>2</sub> [N]	R <sub>A</sub> [N]	R <sub>B</sub> [N]	Mf <sub>th</sub> [N.m]
5			3.92	-			
6			1.96	3.92			
7			4.91	3.92			

**b) Travail demandé**

- Comparer et commenter les résultats obtenus expérimentalement et théoriquement au Tableau III.2.
- Expliquer pourquoi les dispositifs utilisés permettent de mesurer indirectement le moment fléchissant.

**TP N° 04 :**  
**Essai de dureté**



## IV. Essai de dureté

### IV.1 Objectif et principe de dureté

La dureté est la mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration. Cette dernière est fonction de plusieurs facteurs dont les principaux sont : la déformation élastique et plastique, le frottement pénétrateur-surface indentée, la géométrie de pénétrateur, ses propriétés mécaniques et le chargement. La Figure IV-6, résume les caractéristiques des principales méthodes de mesure de la dureté utilisée (ISO 6506, ASTM E10) : la dureté Brinell (HB), la dureté Vickers (HV), les duretés Rockwell C et B (HRC et HRB). Bien que les valeurs de dureté soient données sans dimensions, les duretés Brinell et Vickers, de par leur définition, sont homogènes à des contraintes.

### IV.2 Eprouvettes

La surface de l'éprouvette doit être propre, plane et lisse soigneusement préparée. Plus des dimensions du pénétrateur sont petites, plus l'état de la surface doit être lisse. Une application du polissage en mode automatique est parfois obligatoire. La préparation de l'éprouvette doit être faite sans provoquer des altérations des propriétés du matériau dues, par exemple, au chauffage ou à, l'écrouissage.

L'épaisseur de l'éprouvette doit être suffisante pour qu'aucune trace d'une déformation ne soit visible sur la surface opposée à celle de l'application de la charge. D'après une règle générale, l'épaisseur minimale est au moins dix fois supérieure à la profondeur de l'empreinte.



#### Mode Opérateur (Cas de l'essai Rockwell) :

- Préparer de la surface à tester
- Monter l'indenteur adéquat
- Régler la charge et les paramètres d'essai
- Monter l'éprouvette sur son support (de révolution ou plate)
- Appliquer la pré-charge de 10N (Indication lumineuse)
- Appliquer la charge de l'essai en appuyant sur la manette
- Retirer la charge
- Lire la valeur de dureté correspondante
- Pour la précision de la mesure : effectuer au moins 3 reprises pour chaque essai.

### IV.3 Exécution de l'essai

On emploie pour l'exécution de l'essai un dispositif qui est suffisamment rigide et stable. L'essai doit être fait sans choc et sans vibrations, autrement les résultats sont erronés. L'éprouvette doit être installée sur un support rigide du dispositif pendant l'action de la charge. Les essais les plus courants se font par pénétration, les essais les

plus classiques sont les essais Brinell, Vickers et Rockwell.

### IV.3.1 Essai Brinell

Il consiste à imprimer dans la pièce à essayer une bille en acier ou en carbures de tungstène de diamètre  $D(\text{mm})$  sous une charge  $F(\text{N})$ , et à mesurer le diamètre  $d$  de l'empreinte résiduelle après retrait de la charge. La charge d'essai  $F(\text{N})$  est choisie dans une gamme normalisée adaptée au diamètre de l'indenteur et au matériau testé.

$$BHW = \frac{0.102 \times 2F}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$$

Pour éviter la déformation de la bille et la détérioration de la bille, l'usage de l'essai Brinell est limité aux matériaux tels que  $HBS < 350$  ou  $HBW < 650$ .

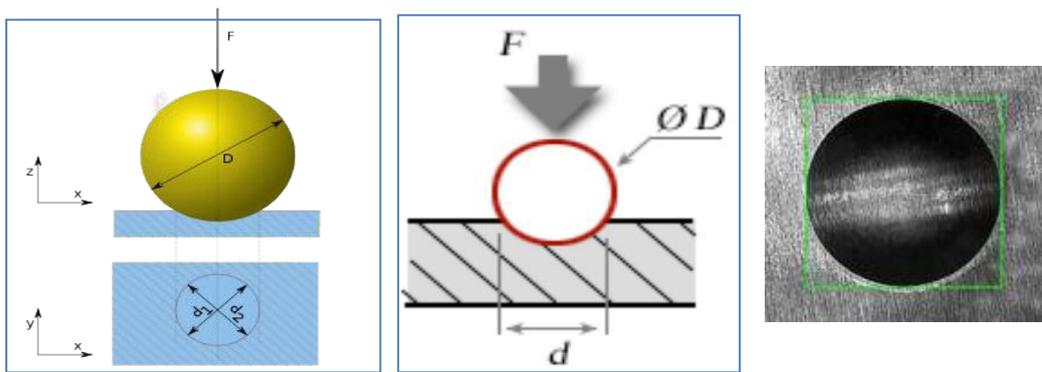


Fig.IV.1. Principe de l'essai Brinell et empreinte typique de l'essai

### IV.3.2 Essai Vickers

Le pénétrateur est une pyramide en diamant, à base carrée et d'un angle au sommet entre faces opposées égales à  $136^\circ$ . L'empreinte est une pyramide en creux de diagonales du carré de base. Les mesures s'effectuent à l'aide d'un appareil optique approprié ou à afficheur directe dans les nouvelles générations des bancs d'essais.

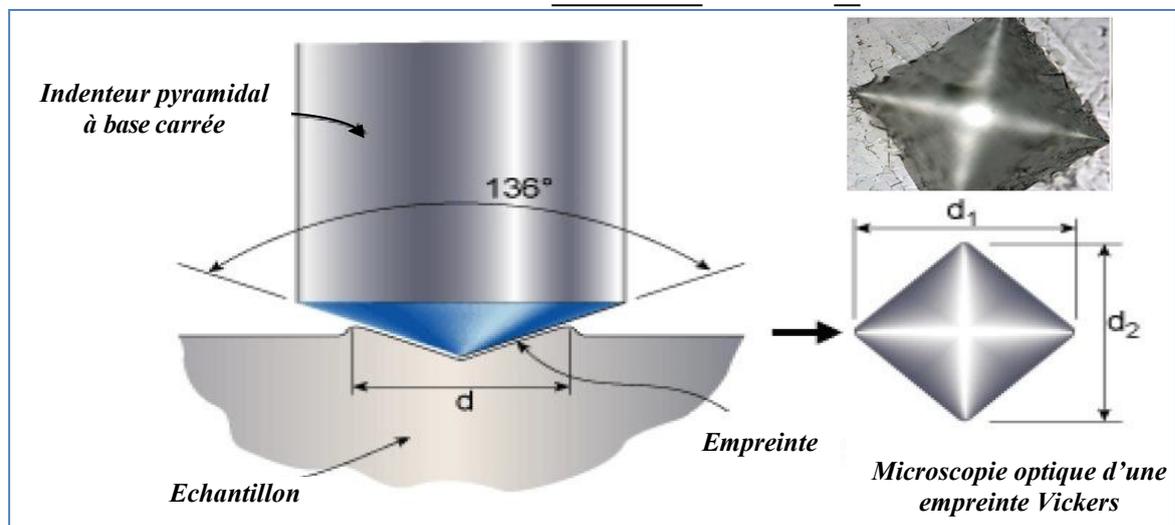
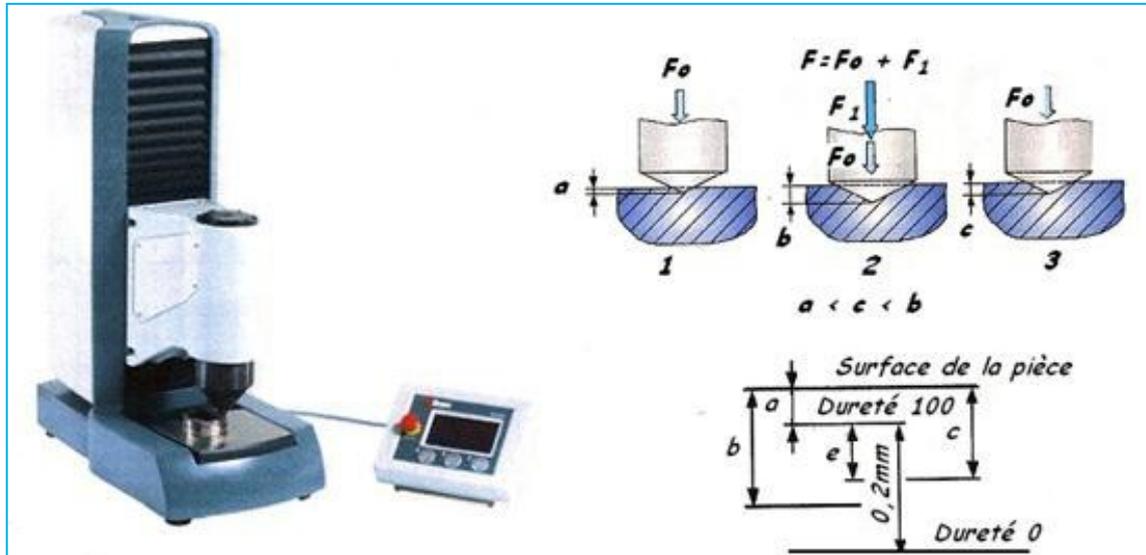


Fig. IV.2. Principe de l'essai Vickers

### IV.3.3 Essai Rockwell

**Principe de l'essai :** Le pénétrateur est soit une bielle en acier trempé, soit un cône en diamant, et la charge d'essai peut prendre plusieurs valeurs. La dureté définie à partir de la différence de profondeur de pénétration après application de la charge.



**Fig IV.3. Schéma de principe d'un essai de dureté Rockwell : Cas d'un Rockwell C**

Le pénétrateur est appliqué sur la surface de la pièce avec une précharge  $F_0$ . Il descend alors à un niveau qui sert d'origine aux mesures de profondeur ultérieures :

- Une surcharge  $F_1$  est appliquée, pour atteindre la valeur de la charge totale  $F$
- La surcharge est retirée, entraînant une remontée du pénétrateur (retour élastique)
- On mesure alors à l'aide d'un comparateur l'accroissement  $h$  de la profondeur de pénétration, entre le début et la fin de l'essai sous précharge  $F_0$ .

La dureté Rockwell, noter HRC dans la figure IV.3, est un nombre sans dimension compris entre 0 et 100 (ou 130), défini comme le complément de  $h$  à une profondeur de référence de 0.2mm (respectivement 0.26mm) partagée en cent (respectivement 130) graduations identiques.

### IV.3.4 Microdureté et nanodureté

Du point de vue scientifique, on peut séparer les essais de dureté précédemment décrits des essais de microdureté par le fait que les premiers intéressent un nombre quelquefois très important de grains de métal, alors que les seconds sont destinés en principe à définir les propriétés à l'intérieur des grains soit de la matrice, soit de ses divers constituants. Alors que les essais de dureté procurent une valeur moyenne des propriétés d'une zone de métal assez importante, les essais de microdureté permettent de déterminer des caractéristiques locales.

**a. Microdureté Vickers.**

Par Analogie à un essai Vickers, l'échelle microscopique de l'essai s'effectue sous une charge de quelques grammes à quelques centaines de grammes. L'appareil utilisé comporte une colonne de microscope optique en réflexion, qui permet de viser la zone souhaitée sur un échantillon poli. Le pénétrateur Vickers est ensuite placé dans l'axe optique pour effectuer l'essai, puis le microscope permet de mesurer les diagonales de l'empreinte : de quelques  $\mu\text{m}$  à quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ . On peut ainsi mesurer par exemple la dureté des différentes phases d'un matériau ou le profil de dureté obtenu sur une surface traitée ou usinée.

**b. Dureté Knoop**

De mêmes principes d'utilisation et d'exécution que l'essai précédent, l'essai Knoop s'effectue avec un diamant pyramidal à base losange effilé qui permet des empreintes résiduelles de longueur  $l$  (mm) plus lisibles et plus rapprochées. La dureté Knoop (HK) est donnée par le rapport de la charge d'essai  $F$  (N) sur la surface de l'empreinte, exprimé sans dimension :

$$HK = 1,448 F/l^2$$

**IV.3.5 Nanoindentation.**

L'utilisation de couches de revêtement de plus en plus minces (PVD par exemple) nécessite, pour l'étude de leurs propriétés mécaniques, le développement d'essais de dureté à une échelle de nm. Ce type d'essais est nommé essai de nanoindentation, où la profondeur de l'empreinte peut se limiter à quelques dizaines de nanomètres. Le pénétrateur utilisé est généralement de type Berkovich, diamant pyramidal à base triangulaire. La dureté  $H$  est mesurée par le rapport à la charge maximale appliquée  $P_{max}$ . La mesure en mode continu de l'aire  $A$  de contact pénétrateur- échantillon permettra également de mesurer la dureté et le module de rigidité de la surface indentée. L'instrumentation asservie permet de traçage de la courbe  $P=P(h)$  (fig. IV.4).

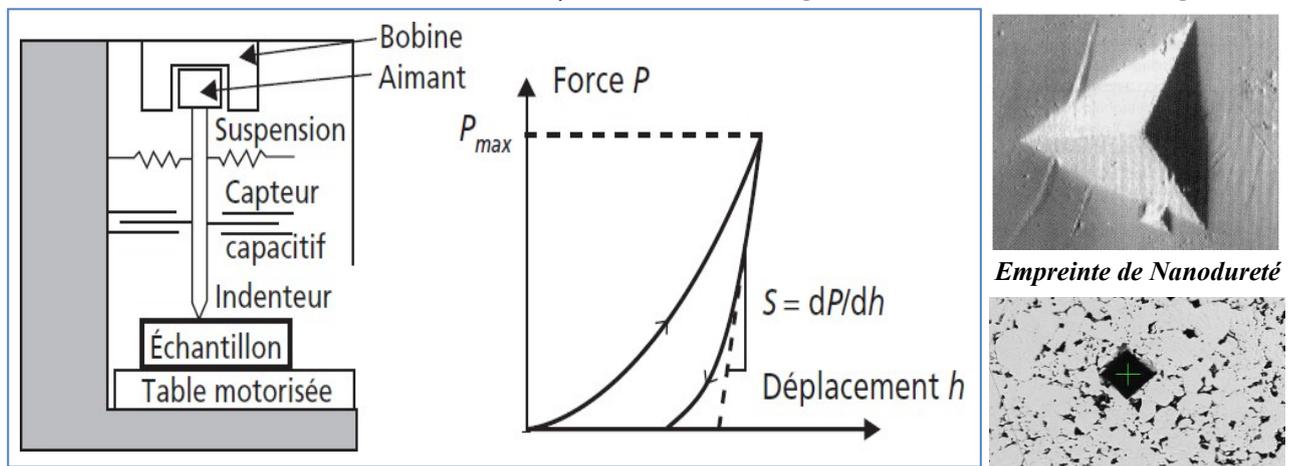


Figure IV.4. Schéma de principe d'un nano-indenteur et d'une courbe de nanoindentation.

La pente  $dP/dh$  du retour élastique de l'indenteur est proportionnelle au module de Young du matériau testé, qui peut être calculé moyennant un étalonnage de rigidité de l'appareil.



Tableau.IV.1. Dureté sous charge réduite et microdureté Vickers

Dureté sous charge réduite		Microdureté	
Désignation	Charge (N)	Désignation	Charge (N)
HV <sub>0,2</sub>	1,961	HV <sub>0,01</sub>	0,09807
HV <sub>0,3</sub>	2,942	HV <sub>0,015</sub>	0,1471
HV <sub>0,5</sub>	4,903	HV <sub>0,02</sub>	0,1961
HV <sub>1</sub>	9,807	HV <sub>0,025</sub>	0,2452
HV <sub>2</sub>	19,61	HV <sub>0,05</sub>	0,4903
HV <sub>3</sub>	29,42	HV <sub>0,1</sub>	0,9807

Fig.IV.5. Dispositif de microdureté Vickers et correspondance en charge des différentes échelles de l'essai

#### IV.3.6 Correspondance entre échelles de dureté

La dureté est une caractéristique complexe, qui dépend à la fois de la limite d'élasticité et du comportement plastique du matériau testé. Les techniques pour la mesurer reposent sur des bases tribologiques très différentes. Il ne peut donc exister que des correspondances empiriques entre les différentes échelles. La figure ci-dessous en est un exemple. On y trouve également une autre correspondance très approximative :  $HV = 0.3R_m$  [MPa].

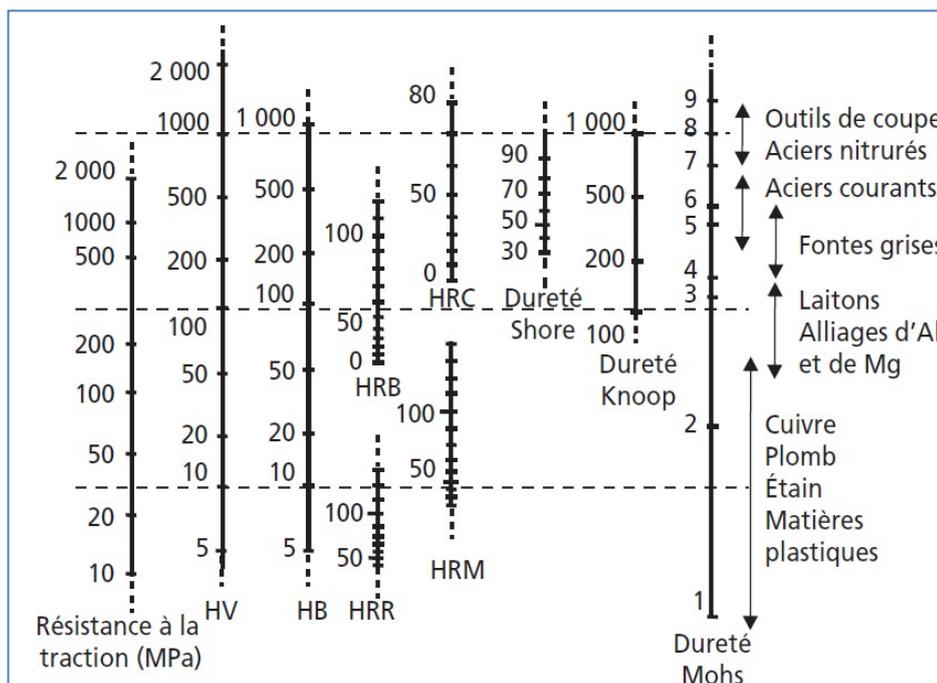


Fig. IV.6. Correspondances entre les échelles de dureté

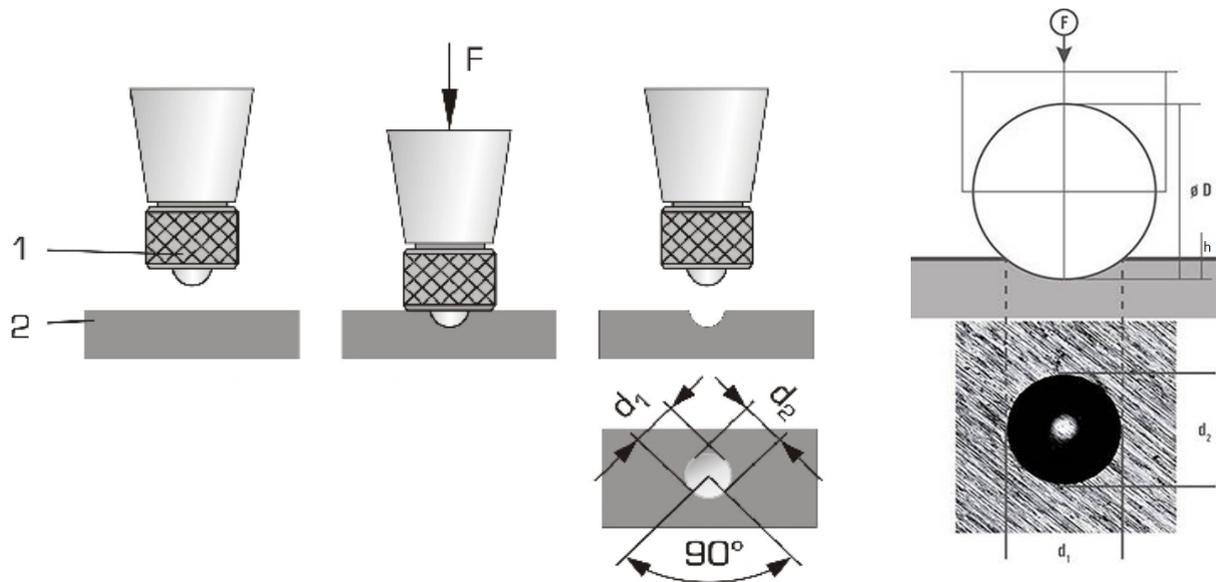
Les formes et dimensions des pénétrateurs, les charges et les durées d'application sont standardisées. Les différents types d'essais sont résumés dans le tableau ci-après, Tab.IV.2.

**Tableau.IV.2. Comparaison des trois méthodes principales utilisées pour la détermination de la dureté**

Type d'essai	Brinell	Vickers	Rockwell
Symbole	HB	HV	HR
Pénétrateur	Bille de diamètre $D$ en acier trempé. Dureté min 6 HB	Pyramide régulière, à base carré. Angle entre 2 faces opposées: $136^\circ$	1-HR <sub>C</sub> : cône en diamant. angle au sommet $=120^\circ$ HR <sub>B</sub> : bille d'acier
Mode d'application de la charge	Chargement progressif pendant 15s, maintien 15 s puis décharge	Comme HB	Précharge $F_0$ . puis charge supplémentaire. et retour à $F_0$
Valeur mesurée	Moyenne de 2 diamètres perpendiculaires $d$ de l'empreinte	Moyenne des 2 diagonales $d$	Profondeur de pénétration
Adaptation	Choix de la charge $F$ telle que $0.3 D < d < 0.6 D$	Choix de la charge $F$ telle que $d > 0.4 \text{ mm}$	-
Mesure pour $H$ (voir formules)	$P$ /surface de la calotte sphérique	$P$ /surface de l'empreinte pyramidale	Complément à la profondeur de pénétration
Application principale	Aciers non trempés, fontes, soudures, métaux non-ferreux	Aciers trempés. aciers à outils	Aciers trempés
Avantages	$D$ étant relativement large HB convient pour les matériaux hétérogènes	Pratiquement indépendant de la charge. Convient bien pour les pièces minces	Mesure la plus simple. la lecture directe permet une acquisition des données automatiques
Inconvénients	HB est fonction de la charge. Formation de bourrelets au bord de l'empreinte	Ne convient pas pour les matériaux hétérogènes (petite empreinte)	Dispersion importante des mesures

#### IV.4 Essai de Brinell :

Dans ce TP, nous allons utiliser l'essai de Brinell pour caractériser la dureté statique d'un matériau. Cet essai fait partie des méthodes normalisées (ISO 6506, ASTM E10). Le principe de l'essai consiste à utiliser un pénétrateur de forme sphérique pour presser, avec une charge d'essai définie (entre 10 N à  $30 \times 10^3$  N), une surface plane d'un échantillon (éprouvette).



Généralement, le pénétrateur est une bille en carbure de tungstène qui possède, selon la norme, les diamètres de 1, 2,5, 5 ou 10 mm. Après sollicitation de l'échantillon, la surface de l'empreinte, laissée par le pénétrateur, est mesuré par une méthode optique.

La dureté Brinell HB est le quotient de la force d'essai appliquée  $F$  (en Newton N) et de la surface de l'empreinte sur l'échantillon (voir formule ci-dessous). La force d'essai doit être sélectionnée de sorte que le diamètre moyen de l'empreinte  $d$  soit situé entre  $0,24D$  et  $0,6D$ . Pour calculer la surface de l'empreinte, on utilise la valeur moyenne  $d$  des deux diagonales perpendiculaires  $d_1$  et  $d_2$  (en mm), puisque les empreintes ne sont pas souvent exactement rondes.

$$BH = \frac{F}{\pi D h} = \frac{2F}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$$

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

Selon la norme (ISO 6506), le temps de maintien de la charge d'essai est en règle générale de 10 à 15 secondes (s). En cas de temps de maintien plus long, la durée doit être mentionnée en secondes dans la valeur de dureté, par exemple : 210 HBW 5/250/30 (temps de maintien de 30 s).

#### IV.4.1 Echantillon :

*L'essai de dureté selon Brinell exige une préparation de la surface de l'échantillon à mesurer, car la qualité de la surface doit être suffisamment bonne pour pouvoir procéder à une évaluation optique correcte de l'empreinte. L'échantillon à mesurer doit satisfaire dans le détail les exigences suivantes :*

- L'échantillon à tester doit présenter une surface métallique plane, brillante et lisse (meulage et polissage de la surface requis uniquement pour les essais avec de petits diamètres de bille).
- L'échantillon doit être serré sur un dispositif de montage.

#### IV.4.2 Représentation de la valeur de dureté Brinell :

1. La valeur de dureté numérique ;
2. Les trois lettres majuscules HBW, qui signifient « dureté selon Brinell » (avec bille en carbure de tungstène) ;
3. Le diamètre de la bille ;
4. La charge et le temps d'essai utilisés ;

**Données :**

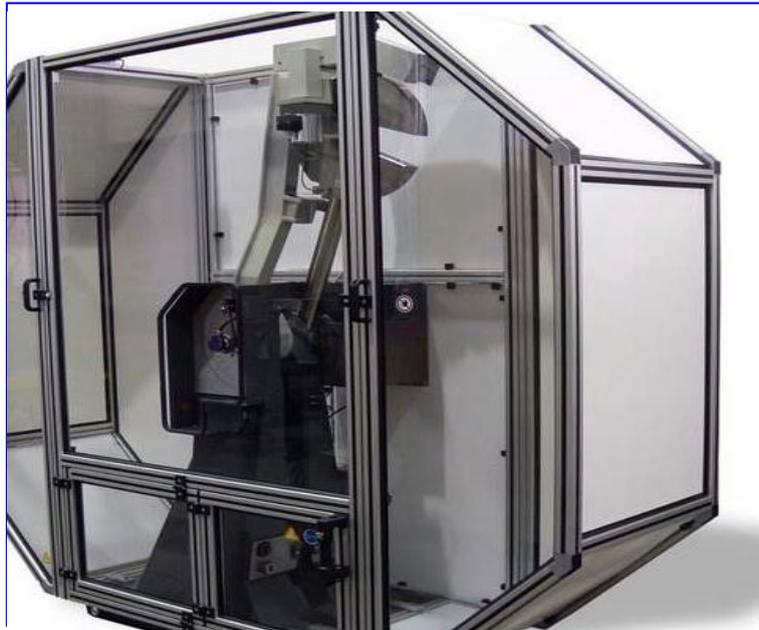
#### **210 HBW 5/250/30**

- 210 : valeur de dureté  
HBW : selon Brinell avec bille en carbure de tungstène  
5 : diamètre de bille 5 mm  
250 : avec charge d'essai de 250 kgf (ou force d'essai de 2,452 kN)  
30 : temps de maintien de la force d'essai hors de la durée recommandée

#### **Travail demandé**

- 1- Définir le but de l'essai de la dureté
- 2- Décrire :
  - L'élaboration de l'échantillon (éprouvette) pour l'essai de dureté,
  - L'essai de dureté à partir de l'expérience sur la machine de traction jusqu'à la visualisation par microscope.
- 3- Déterminer le type du matériau à partir d'une analyse bibliographique ou sur internet.

**TP N° 05 :**  
**Essai de Résilience**



## V. Essai de résilience

### V.1 Objectif et principe de l'essai

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite d'élasticité dans des conditions particulières qui rendent le matériau fragile. Les facteurs fragilisant sont :

- Le triaxialité des contraintes ;
- L'abaissement de la température ;
- L'augmentation de la vitesse de déformation.

Le principe de l'essai consiste à rompre par choc du mouton pendule une éprouvette entaillée reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie absorbée caractérisant la résistance aux chocs du matériau métallique essayé. La résistance aux chocs, donc l'énergie nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette, exprimée en joule par centimètre carré.

### V.2 Éprouvette

On utilise les éprouvettes dont les dimensions sont normalisées (figure V.1.a-b) et dont la façon de prélèvement est définie dans la norme du produit appropriée. En ce qui concerne la forme d'entaille, les deux types des éprouvettes peuvent être utilisées : soit avec l'entaille en U, soit avec l'entaille en V à 45°

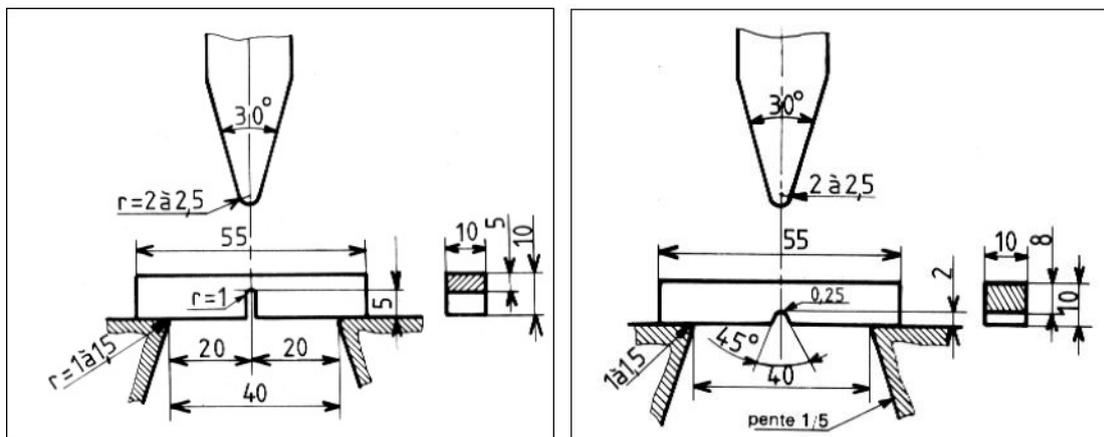
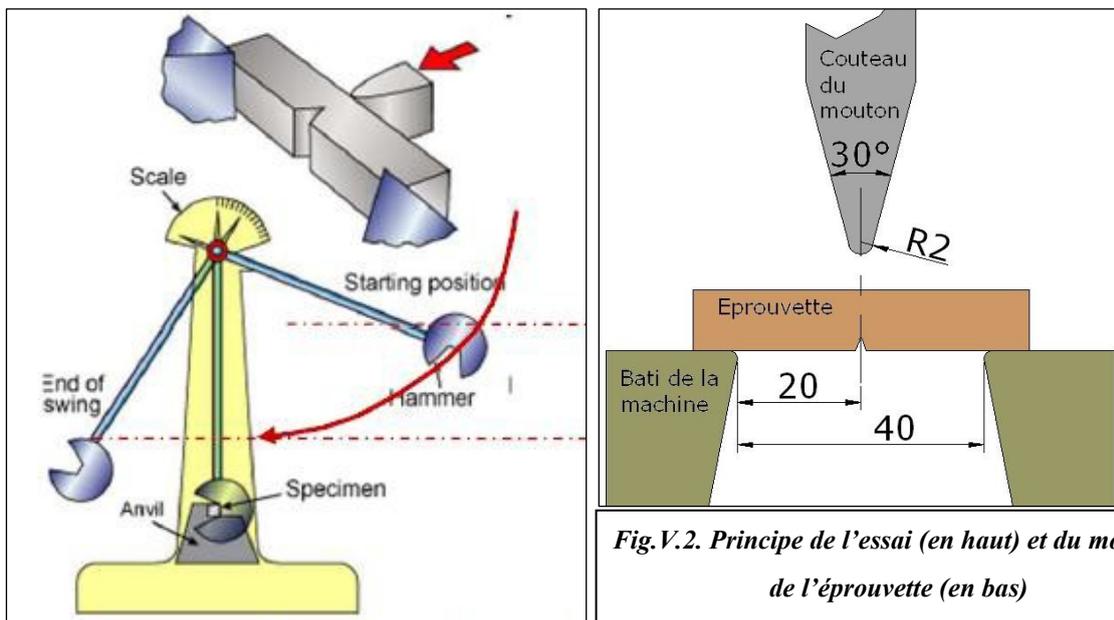
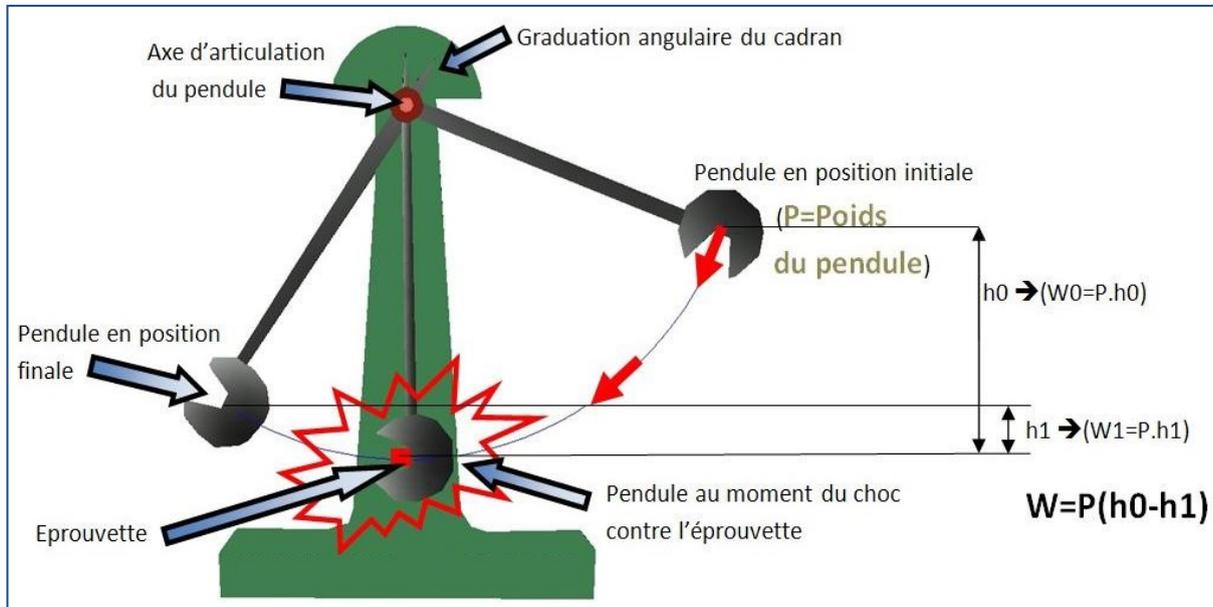


Fig.V.1. Éprouvette Charpy normalisée (A gauche : entaille en V ; A droite : en U)

D'ailleurs, la norme prescrit leur usinage minimisant toutes les altérations concernant la structure métallique provenant, par exemple, de l'effet d'érouissage ou d'échauffement. Cependant, l'usinage ne concerne pas les éprouvettes étant préparées comme les pièces de fonderie dans une précision exigée et ainsi peuvent-elles être brutes. Les caractéristiques dimensionnelles des éprouvettes sont les suivantes : longueur, hauteur, largeur, hauteur restant au fond de l'entaille, rayon d'entaille et, au cas de l'entaille en V, angle d'entaille.

### V.3 Principe de l'essai

Un marteau de masse  $m$  est fixé à l'extrémité d'un pendule (fig.V.2). Ce pendule peut tourner dans le plan vertical autour d'un axe horizontal. L'éprouvette repose sur un support et se trouve au point le plus bas sur la trajectoire du marteau. Pour effectuer un essai, on écarte le bras jusqu'à ce que le marteau atteigne sa position initiale  $P$  et on le lâche.

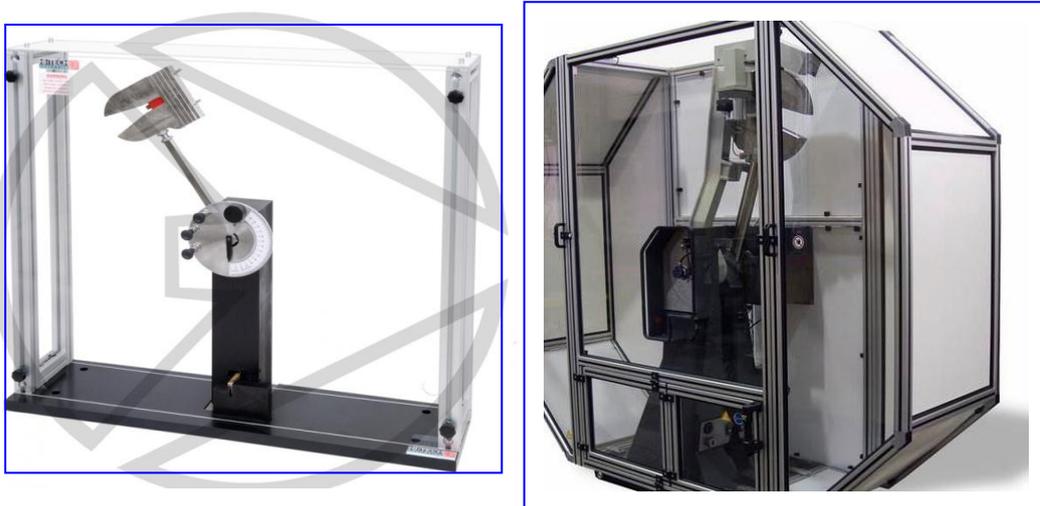


Quand le pendule vient frapper l'éprouvette, il a une énergie cinétique qui est égale à l'énergie potentielle qu'il avait à sa position de départ  $mgh_0$ ,  $h$  étant la hauteur du marteau par rapport à sa position d'équilibre. Après la rupture, le marteau remonte. Dans son point culminant (hauteur  $h_1$ ), l'énergie cinétique résiduelle s'est de nouveau transformée en énergie potentielle  $mgh_1$ . L'énergie  $K$  dépensée pour rompre l'éprouvette vaut alors :  $KV = mg \cdot (h_0 - h_1)$  ( $m \cdot g$  : le poids du pendule)

## V.4 Machine de l'essai

Le mouton Pendule Charpy permettant de réaliser des essais de résilience avec une capacité disponible qui peut atteindre **750 J** selon les versions. L'essai permet de déterminer l'énergie absorbée lors de la rupture d'une éprouvette entaillée. Le pendule est constitué d'une base en fonte et de deux colonnes d'appui pour le support des éprouvettes **CHARPY**, un mouton-pendule avec son bras, un système de levage du mouton motorisé et un mécanisme de déclenchement.

Un afficheur numérique permet la lecture de l'énergie absorbée par l'éprouvette testée et un frein motorisé assure la réaction sur le mouton en ralentissement rapide des oscillations. L'équipement est disponible en différentes versions ; 150, 300, 450 et 750 Joules et avec différents couteaux d'impact pour répondre aux normes en rigueurs. La sécurité est assurée par un carter de protection transparent avec micro contacteur de sécurité conforme aux normes CE.



*Fig. V.3. Exemples-typiques du Mouton-Charpy*

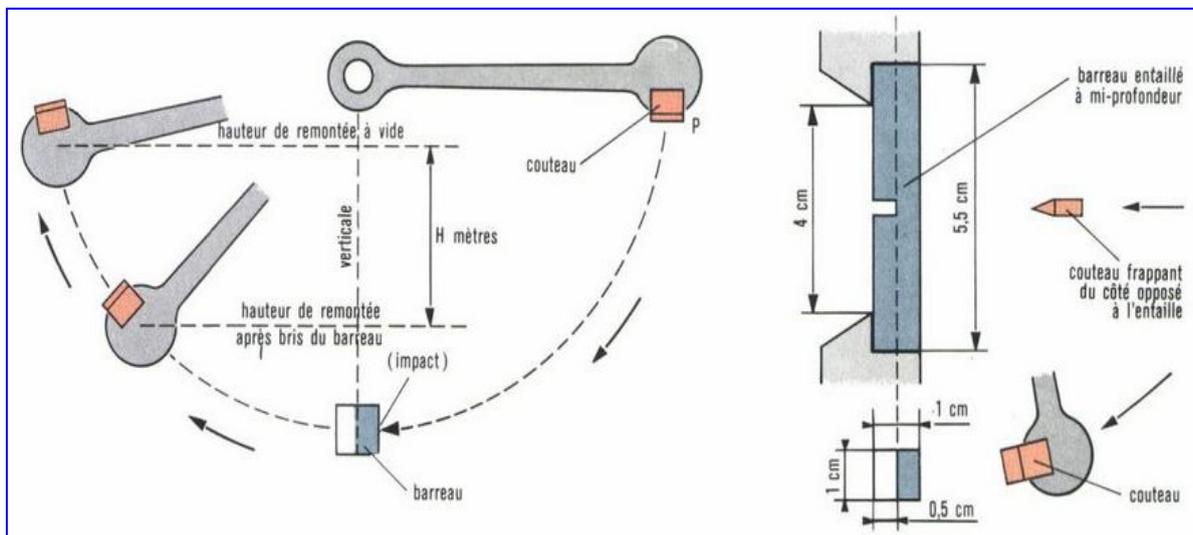
### V.4.1 Mode opératoire et consignes de sécurité

1. Ne jamais essayer d'arrêter le pendule manuellement ; Utiliser le frein avec le pied, le faire doucement et de façon progressive
2. Régler le zéro,
3. Faire osciller le pendule à vide, et relever la valeur de l'angle de remontée à vide.
4. Mesurer les dimensions de l'éprouvette, la peser.
5. Centrer l'éprouvette entre les deux supports. Pendant cette opération, veillez à ce que le pendule ne soit pas en position haute.
6. Monter le pendule, le verrouiller.
7. Lâcher le pendule, le freiner puis lire l'angle de remontée.
8. Examiner le grain de la pièce cassée, relever l'angle de rupture en rapprochant les deux fragments de l'éprouvette de façon à les faire coïncider.

### V.4.2 Conduite de l'essai et exploitation des résultats

Le plan d'oscillation du mouton doit passer sensiblement par le centre de gravité de la cabote. Le point d'impact coïncide avec le centre de percussion du mouton. Pour l'essai normal, l'énergie disponible du mouton doit être égale **294 Nm**. La résilience obtenue avec un tel mouton est désignée par le symbole **K**

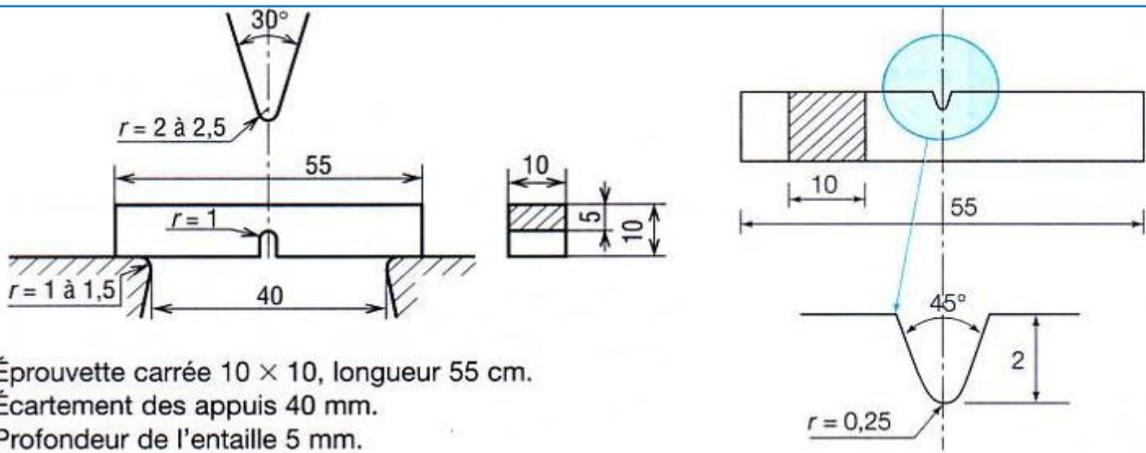
L'éprouvette est placée sur le porte-éprouvette de telle sorte que l'arête du couteau vienne la frapper dans le plan de symétrie de l'entaille et sur la face opposée à celle-ci. La valeur qu'en donne la quantité **K** est alors généralement approchée par excès en raison du frottement des extrémités de l'éprouvette sur les portes-éprouvettes ; mention de cette particularité doit donc, le cas échéant, accompagner les résultats d'essai.



**Fig.V.4. Disposition avant et après l'essai Charpy**

En principe, il serait bien utile de connaître les contraintes critiques qui provoquent la rupture sous l'effet d'un choc. Néanmoins dans la pratique et dans la théorie, le phénomène de la rupture dynamique est très complexe. Même au niveau expérimental, la détermination d'une contrainte critique s'avère déjà extrêmement difficile. Comme la fissuration sous l'effet du choc avance à très grande vitesse et que de ce fait les contraintes montent et descendent presque instantanément, leur mesure exacte n'est pratiquement pas possible. On doit reconnaître que les contraintes du choc se transmettent par une onde acoustique.

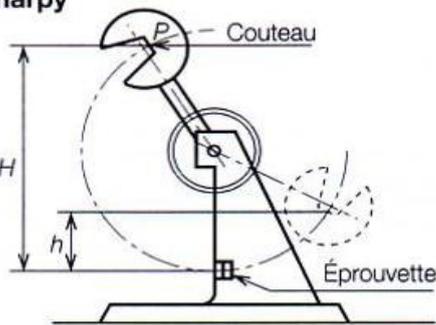
L'essai s'effectue à la machine d'essai (figure V.2) dont la construction et l'installation doivent être rigides et convenir à la norme en vigueur. La machine est équipée par l'échelle prévue pour le mesurage de l'énergie de choc. Dans les conditions standard l'essai s'exécute à une température de **23°C**, et avec une énergie initiale nominale de la machine :  **$W_0 = 300$  Joules**. Tout d'abord, le Mouton pendule est mis en position initiale à une hauteur **h<sub>0</sub>** qui correspond ainsi à une énergie de départ  **$W_0$** .



- Éprouvette carrée 10 × 10, longueur 55 cm.
- Écartement des appuis 40 mm.
- Profondeur de l'entaille 5 mm.
- Section rompue 0,5 cm<sup>2</sup>.

Les modifications des conditions d'essai donnent des résultats différents qui ne peuvent en aucun cas être comparés.

**Mouton Charpy**



- Énergie initiale  
 $W_i = Mg \times H = 294$  joules (normalisée)
- Énergie résiduelle  
 $W_r = Mg \times h$
- Énergie absorbée  
 $W = W_i - W_r$   
 $= (Mg \times H) - (Mg \times h)$   
 $= Mg (H - h)$

$$KCU \text{ J/cm}^2 = \frac{Mg (H - h)}{S}$$

← Énergie absorbée  
← Section rompue (cm<sup>2</sup>)

W en J  
M en kg  
g = 9,81 m/s<sup>2</sup>  
h en m

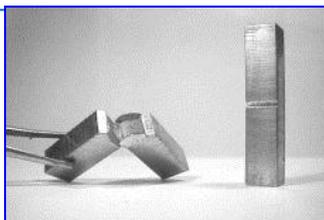


Fig.V.5. Exemple de la démarche de mesure de la résilience des éprouvettes testées

**Travail demandé**

- 1- Définir le but de l'essai de résilience
- 2- Décrire :
  - L'élaboration des éprouvettes pour l'essai de résilience
  - L'essai de résilience réalisé dans le TP.
- 3- Comparer les/le résultat obtenu expérimentalement avec ceux déterminés théoriquement en utilisant les équations suscitées.

## Conclusion générale

Tous les matériaux entamés dans la fabrication ou la construction doivent avoir un minimum de solidité pour pouvoir supporter les charges, le poids et bien d'autres efforts. Il est par conséquent nécessaire de caractériser ces matériaux avant son emploi. Pour un emploi déterminé, le choix d'un matériau dépendra de propriétés mécaniques telles que résistance, dureté ou ductilité, et il est donc nécessaire de les mesurer avec un certain nombre d'expériences que l'on appelle les essais mécaniques.

Ces essais permettent d'avoir et de toucher des lois de comportement reliant différents paramètres du matériau, estimer et présenter les incertitudes sur les mesures puis analyser les résultats obtenus.

Plus précisément, ces essais ont plusieurs objectifs : Ils permettent, tout d'abord, d'étudier les lois physiques qui régissent le comportement mécanique des matériaux. Ils conduisent à des expériences où l'on reproduit le mieux possible les conditions d'emploi prévues d'un matériau particulier, sous une forme simplifiée et normalisée, ce qui permet de déterminer ainsi la plupart des propriétés mécaniques ; les résultats obtenus aidant par ailleurs à la mise au point de matériaux nouveaux et d'applications plus vastes. Ils servent, à dresser des tables de valeurs des différentes caractéristiques mécaniques destinées à la fois à l'ingénieur qui réalise un projet et au chercheur penché sur une étude particulière.

Tous ces essais, sont en relation étroite avec la structure des matériaux et permettent de prévoir leur comportement dans des conditions réelles d'utilisation.

---

---

## ANNEXES : Résultats des essais

<b>I. Essai de traction</b> .....	<b>I-1</b>
I.1 Expérience A .....	I-1
a) Les données de l'éprouvette .....	I-2
b) Travail demandé .....	I-2
I.2 Expérience B .....	I-3
a) Les données de l'éprouvette .....	I-3
b) Travail demandé .....	I-3
I.3 Expérience C .....	I-4
a) Les données de l'éprouvette .....	I-4
b) Travail demandé .....	I-4
I.4 Expérience D.....	I-5
a) Les données de l'éprouvette .....	I-5
b) Travail demandé .....	I-5
<b>II. Essai de torsion</b> .....	<b>II-1</b>
*Expérience A (II.4.2).....	II-1
- Tableau II.1 : éprouvette pleine en Acier .....	II-1
- Tableau II.2 : éprouvette pleine en Laiton.....	II-1
- Tableau II.3 : éprouvette pleine en Acier .....	II-1
- Tableau II.4 : éprouvette pleine en Laiton.....	II-1
*Expérience B (II.4.3) .....	II-2
- Tableau II.5 : éprouvette pleine en Laiton.....	II-2
*Expérience C (II.4.4).....	II-2
- Tableau II.6 : éprouvette creuse vs pleine en Laiton .....	II-2

---

---

<b>III. Essai de flexion simple .....</b>	<b>III-1</b>
*Expérience A (III.5.1).....	III-1
- Tableau III.1 : Charge concentrée croissante $W$ .....	III-1
*Expérience B (III.5.2).....	III-1
- Tableau III.2 : Configurations de charges $W_1$ et $W_2$ .....	III-1

---

**TP N° 01 :**  
**Résultats de l'essai de traction**



## I. Essai de traction

(Voir la polycopie de TP du même titre)

### I.1 Expérience A

Sur la machine d'essais oléo-hydraulique une éprouvette à section cylindrique est sollicitée à la traction ; on applique une force normale de traction, croissante sur l'éprouvette et on enregistre à chaque fois la valeur de la force (N) et l'allongement ( $\Delta L=L-L_0$ ) correspondant et aussi on construit point par point le diagramme de traction. L'éprouvette est en **Acier étiré à froid** de 13mm de diamètre nominal et de longueur de référence  $L_0 = 50\text{mm}$ . Les résultats sont reportés dans le Tableau I.1.

Tableau I.1. Résultats de l'expérience A :

Point	$\Delta L$ [mm]	Force N [kN]	$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$	$\sigma = \frac{N}{S_0}$ [MPa]
1	0.000	0.0		
2	0.010	5.7		
3	0.015	8.3		
4	0.020	10.9		
5	0.025	13.8		
6	0.030	16.5		
7	0.035	19.2		
8	0.040	22.0		
9	0.045	24.6		
10	0.050	27.5		
11	0.055	30.4		
12	0.060	33.0		
13	0.100	31.1		
14	0.200	31.4		
15	0.300	31.4		
16	0.400	31.4		
17	0.500	31.2		
18	0.600	31.4		
19	1.250	31.6		
20	2.500	35.0		
21	5.000	42.3		
22	7.500	44.6		
23	10.000	45.6		
24	12.500	45.6		
25	15.000	44.6		
26	17.500	43.0		
27	18.750	40.2		
* Après rupture, la longueur mesurée est 68.690 mm.				

**a) Les données de l'éprouvette**

- Diamètre de l'éprouvette :  $d_0 = 13\text{mm}$
- Longueur de référence :  $L_0 = 50\text{mm}$

**b) Travail demandé**

- Compléter le Tableau I.1 et tracer les courbes représentant la contrainte «  $\sigma$  » en fonction de la déformation «  $\varepsilon$  » pour l'éprouvette de l'expérience A.
  - Déterminer à partir d'une courbe d'essai de traction les caractéristiques mécaniques suivantes :
    1. Le module d'élasticité ou module de Young E;
    2. La limite de proportionnalité;
    3. La limite d'élasticité;
    4. La limite conventionnelle d'élasticité;
    5. La résistance à la traction (contrainte ultime);
    6. L'allongement à la rupture;
    7. Commenter en tirant des conclusions des résultats de L'expérience A.
-

## I.2 Expérience B

Le tableau ci-dessous (Tab. I.2) récapitule les résultats d'un essai de traction effectué sur une éprouvette en **Acier à haute teneur en carbone traité**.

Le diamètre initial est de 17.68mm et la longueur de référence est 25mm.

a) Les données de l'éprouvette

- Diamètre de l'éprouvette : **do = 17.68mm**
- Longueur de référence : **Lo = 25mm**

Tableau I.2. Résultats de l'expérience B :

Point	$\Delta L$ [mm]	Force N [kN]	$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$	$\sigma = \frac{N}{S_0}$ [MPa]
1	0.0000	0.0		
2	0.0255	51.8		
3	0.0350	72.0		
4	0.0460	93.2		
5	0.0535	109.0		
6	0.0760	141.6		
7	0.1010	149.6		
8	0.1520	161.0		
9	0.2030	170.0		
10	0.254	177.2		
11	0.355	186.8		
12	0.508	197.6		
13	0.762	214.4		
14	1.016	227.0		
15	1.270	235.0		
16	1.524	242.0		
17	1.780	246.6		
* Après rupture, le diamètre final est 16.41mm				

b) Travail demandé

- Compléter le Tableau I.2 et tracer les courbes représentant la contrainte «  $\sigma$  » en fonction de la déformation «  $\varepsilon$  » pour l'éprouvette de l'expérience B.
- Déterminer à partir d'une courbe d'essai de traction les caractéristiques mécaniques suivantes :
  1. Le module d'élasticité ou module de Young E;
  2. La limite de proportionnalité;
  3. La limite d'élasticité;
  4. La limite conventionnelle d'élasticité;
  5. La résistance à la traction (contrainte ultime);
  6. L'allongement à la rupture;
  7. Commenter en tirant des conclusions des résultats de L'expérience B.

### I.3 Expérience C

Le tableau ci-dessous (Tab. I.3) récapitule les résultats d'un essai de traction effectué sur une éprouvette en **alliage d'aluminium**. Le diamètre initial de l'éprouvette est de 17.82mm et la longueur de référence est de 250mm.

a) Les données de l'éprouvette :

- Diamètre de l'éprouvette : **do = 17.82mm**
- Longueur de référence : **Lo = 250mm**

Tableau I.3. Résultats de l'expérience C :

Point	$\Delta L$ [mm]	Force N [kN]	$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$	$\sigma = \frac{N}{S_0}$ [MPa]
1	0.00	0.00		
2	0.20	14.94		
3	0.25	18.06		
4	0.50	23.40		
5	1.00	28.46		
6	1.50	31.68		
7	2.05	34.16		
8	2.55	35.06		
9	3.80	37.36		
10	3.80	38.44		
11	7.60	42.08		
12	10.15	45.28		
13	15.25	49.90		
14	30.50	56.04		
15	40.65	58.72		
16	50.80	60.86		
17	60.95	63.08		
18	69.60	65.12		

\* Après rupture, le diamètre final est 15.93mm et la longueur mesurée est 316.5mm.

b) Travail demandé

- Compléter le Tableau I.3 et tracer les courbes représentant la contrainte «  $\sigma$  » en fonction de la déformation «  $\varepsilon$  » pour le éprouvette de l'expérience C.
- Déterminer à partir d'une courbe d'essai de traction les caractéristiques mécaniques suivantes :
  1. Le module d'élasticité ou module de Young E;
  2. La limite de proportionnalité;
  3. La limite d'élasticité;
  4. La limite conventionnelle d'élasticité;
  5. La résistance à la traction (contrainte ultime);
  6. L'allongement à la rupture;
  7. Commenter en tirant des conclusions des résultats de L'expérience C.

## I.4 Expérience D

Les données du tableau ci-dessous (Tab. I.4) représentent les résultats d'un essai de traction effectué sur une éprouvette **Acier doux à 0.38% de Carbone**.

Le diamètre initial de l'éprouvette est de 12mm, l'écartement initial «  $L_0$  » des couteaux de l'extensomètre est égal à 10 mm.

a) Les données de l'éprouvette :

- Diamètre de l'éprouvette :  **$d_0 = 12\text{mm}$**
- Longueur de référence :  **$L_0 = 10\text{mm}$**

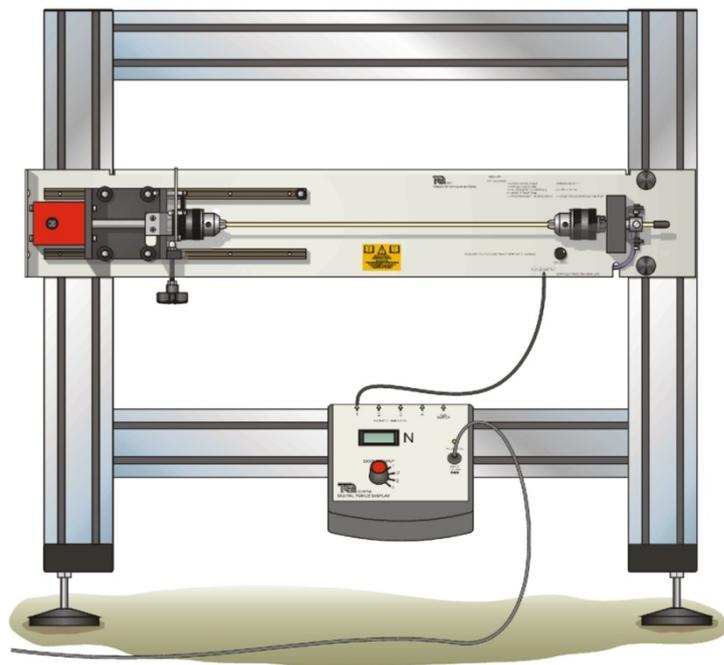
Tableau I.4. Résultats de l'expérience D :

Point	$\Delta L$ [mm]	Force N [kN]	$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$	$\sigma = \frac{N}{S_0}$ [MPa]
1	0.00	0.00		
2	0.014	30.3		
3	0.034	62.5		
4	0.051	59.2		
5	0.129	59.5		
6	0.208	68.4		
7	0.481	84.3		
8	0.825	91.2		
9	1.25	91.7		
10	1.44	90.3		
11	1.57	87.1		
12	1.75	78.1		
* Après rupture, la longueur mesurée est 13.773 mm.				

b) Travail demandé

- Compléter le Tableau I.4 et tracer les courbes représentant la contrainte «  $\sigma$  » en fonction de la déformation «  $\varepsilon$  » pour le éprouvette de l'expérience D.
- Déterminer à partir d'une courbe d'essai de traction les caractéristiques mécaniques suivantes :
  1. Le module d'élasticité ou module de Young E;
  2. La limite de proportionnalité;
  3. La limite d'élasticité;
  4. La limite conventionnelle d'élasticité;
  5. La résistance à la traction (contrainte ultime);
  6. L'allongement à la rupture;
  7. Commenter en tirant des conclusions des résultats de L'expérience D.

**TP N° 02 :**  
**Résultats de l'essai de torsion des Poutres**  
**Cylindrique – Pleines et Tubulaires –**  
**(Portique QT-STR6)**





## II.2 Expérience B (II.4.3)

-Tableau II.5 : éprouvette pleine en Laiton

Tab. II.5. Déformation angulaire pour une poutre en Laiton

Longueur soumise à la torsion [m]	0.500	0.450	0.400	0.350	0.300
Déformation Angulaire [Degré]	14	13	12	10.5	9.5

## II.3 Expérience C (II.4.4)

-Tableau II.6 : éprouvette creuse vs pleine en Laiton

Voir colonne 4 de l'expérience A (Tableau II.2)

Tableau II.6. Déformation angulaire pour la poutre pleine et creuse en Laiton

Force F [N]	Moment de Torsion $M_T$ [Nm]	Poutre creuse laiton	Poutre pleine laiton				
		Angle de Déformation $\theta$ -[Degré]					
0	0.00	0	0	poutre pleine: Diamètre 3.2 mm J .....m <sup>4</sup>			
1	0.05	5	5	poutre creuse	Diamètre intérieur	1.85 mm	J .....m <sup>4</sup>
2	0.10	9	10		Diamètre extérieur	3.2 mm	
3	0.15	13	14				
4	0.20	18	19				
5	0.25	22	23				

**TP N° 03 :**  
**Résultats de l'essai de la flexion simple**  
**(Portique QT-STR2)**



### III. Essai de flexion simple

(Voir la polycopie de TP du même titre)

#### III.1 Expérience A (III.5.1)

- Tableau III.1 : Charge concentrée croissante  $W$ .

Tableau III.1. Résultats de l'expérience A

Masse $M$ [g]	Moment fléchissant Expérimental		Moment fléchissant Théorique	
	Force $F$ [N]	$M_{f_{ex}}$ [N.m]	Charge $W$ [N]	$M_{f_{th}}$ [N.m]
0	0.0	0.000	0.00	
100	0.9	0.112	0.98	
200	1.6	0.200	1.96	
300	2.4	0.300	2.94	
400	3.2	0.400	3.92	
500	3.9	0.487	4.90	

#### III.2 Expérience B (III.5.2)

- Tableau III.2 : Configurations de charges  $W_1$  et  $W_2$ .

Tableau III.2. Résultats de l'expérience B

Fig.	Moment fléchissant Expérimental		Moment fléchissant Théorique				
	Force $F$ [N]	$M_{f_{ex}}$ [N.m]	$W_1$ [N]	$W_2$ [N]	$R_A$ [N]	$R_B$ [N]	$M_{f_{th}}$ [N.m]
5	-1.45	-0.188	3.92	-			
6	3.7	0.465	1.96	3.92			
7	4.0	0.500	4.91	3.92			

---

## Références

1. FORTUNIER R., **Comportement Mécanique des Matériaux**, École Nationale Supérieure des Mines, Saint-Etienne. 2003.
2. Alberto P., **L'indentation Vickers et Knoop des matériaux massifs ou revêtus, Dureté, ténacité et adhérence**. Thèse de doctorat. Université des sciences et technologies de Lille, 2003.
3. AUMER U., **Traction et comprissions, résistons des matériaux**, I.S.E.T. NABEUL 2012-2013.
4. DELONGNIE J.F., **Conception et calcul des éléments de machine**, Jean- François, 2011.
5. PIERRE Y. M. **Lois de comportement et mise en forme des matériaux métalliques**, Hal open science, 2008.
6. BOUSMAHA M., **Résistance des matériaux**, USTOMB, 2019.
7. Sylvie Pommier, **Mécanique des matériaux**, Sciences appliquées en physique et ingénierie pour la recherche et l'enseignement, université PARIS-SAVLAY.
8. GIET A. et Geminard L., **Résistance des matériaux**, Tome 1 et 2, 4<sup>ième</sup> éd. Dunod, 1968.
9. GIET A., **Problèmes de résistance des matériaux**, Tome 1 et 2, Dunod, Paris.
10. MASSONET CH, **Résistance des matériaux**, Volume 1. Dunod, Paris 1968.
11. Frey F., **Analyse des structures et milieux continus. Statique appliquée**. Traité de Génie Civil de l'EPFL, vol. 1. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR). Lausanne 2005.
12. Frey F., **Analyse des structures et milieux continus. Mécanique des structures**. Traité de Génie Civil de l'EPFL, vol. 2. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR). Lausanne 2000.
13. A. ANISSIMOV, **CALCUL DES BARRES**, Dans le cas de sollicitation composée (Partie I de RDM II), USTHB, ENP, OPU, Alger 1993.
14. FEODOSSIEV V., **Résistance des matériaux**, MIR, Moscou 1966.
15. SHANLEY F. R., **Strength of Materials**, McGraw-Hill Book Co. New York 1957
16. Oden J. T., **Mecanics of Elastic Structures**, McGraw-Hill Book Co. New York 1967
17. KERGUIGNAS M., CAIGNAERT G., **Résistance des Matériaux**. Dunod, Paris 1977
18. Timoshenko S. P., **Résistance des matériaux - Tome 1 et Tome 2**, Dunod, Paris, 1968.

### **NORMES ET STANDARDS ACTUELLES :**

1. ASTM E8/E8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials
2. ASTM E21: Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials.
3. ASTM E23 : Essai de choc entaillé Matériaux métalliques, Charpy & Izod.
4. ASTM E370: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.
5. ISO 148-1 : Essai de flexion par choc sur éprouvettes métalliques avec entaille selon Charpy
6. ISO 148-2 : 2016(F) : Matériaux métalliques — Essai de flexion par choc sur éprouvette Charpy — Partie 1 : Méthode d'essai, Troisième édition 2016-10-15, ISO.
7. ISO 6892-1 : 2019 Matériaux métalliques — Essai de traction Partie 1 : Méthode d'essai à température ambiante, ISO.
8. ISO 6892-2 : Matériaux métalliques - Essai de traction - Partie 2 : Méthode d'essai à température élevée, ISO.