



UNIVERSITE ABOUBAKR BELKAÏD- TLEMEN  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

2017/2018

## TRAVAUX PRATIQUES RESISTANCE DES MATERIAUX



**Dr. NESRINE EL HOUARI.**  
Maitre de conférences  
Université de Tlemcen.

Avec la collaboration de :  
**Mr. MUSTAPHA EL HENAOUI.**  
Ingénieur Principal.  
Laboratoire Résistance des Matériaux.  
Université de Tlemcen.



**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen**



**Faculté de technologie  
Département de GENIE CIVIL**

**Polycopié Présenté par :**

**Dr. EL HOUARI Nesrine (Ep. BOUCIF)**

Maitre de Conférences

THEME :

***TRAVAUX PRATIQUES***

***RESISTANCE DES MATERIAUX***



**En collaboration avec :**

Mr. EL HENAOUI M. Ingénieur responsable du laboratoire RDM (Université de Tlemcen).

# APPLICATION DE LA RESISTANCE DES MATERIAUX DANS L'INGENIERIE

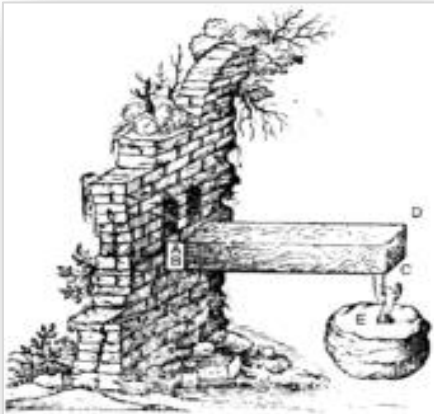


Illustration extraite du livre de Galilée [28].



Pont du Golden Gate (San Francisco) [29].



(...) «Il reste à aborder la question de la condition et du statut des étudiants. Et d'abord quels sont les clés ou règles principales que l'on doit respecter pour se forger une image de la vérité, principalement en science. On en compte généralement six ou sept : un esprit humble, le désir d'apprendre, une vie tranquille, une recherche silencieuse, la pauvreté, un pays étranger.» (...) « A ces six clés, s'en ajoute une autre : l'amour de ceux qui enseignent. En effet, il faut aimer et respecter ses récepteurs comme ses parents. De même que ceci sont les géniteurs du corps, cela sont les géniteurs de l'esprit, non pas parce qu'ils propagent la substance de leur esprit, mais parce qu'ils engendrent la sagesse dans l'esprit de leur auditoire, en améliorant leur nature.» (...)

*Simone da Borsano, humaniste italien du XIV<sup>ème</sup>, prologue à la lecturaClementinarum*

## Avant-propos

Après plus d'une décennie de travail dans le domaine des essais de RESISTANCE DES MATERIAUX, ce présent polycopié dédié particulièrement aux étudiants de 2ème année licence (LMD) de la filière Génie Civil et éventuellement à d'autres spécialités a vu le jour. Son élaboration est venue suite à une réflexion d'actualisation des anciens polycopiés élaborés par Mr ACHOUR A. ancien enseignant du département de Génie mécanique précurseur du polycopie RDM à la faculté de Technologie.

La réalisation de ce modeste document s'est faite dans le but de faciliter à l'étudiant l'assimilation et la compréhension des différents essais « Résistance des matériaux ». Il a été réalisé d'une manière simple et abordable dans le but de permettre aux étudiants de la deuxième année licence une meilleure acquisition des différentes informations liées à cette discipline.

Par ailleurs, le présent ouvrage s'articule autour de six parties :

La première partie concerne une introduction générale à la Résistance des matériaux où sont exposés : des généralités sur cette discipline, les hypothèses qui régissent la Résistance des Matériaux, ainsi que l'exposition des différentes sollicitations et définitions liées à cette thématique.

La deuxième partie est dédiée à l'exposition des différents essais (Traction, Flexion, Torsion, Cisaillement ainsi que les portiques) ;

Dans cette partie, et pour une meilleure assimilation de la part des étudiants, nous avons pensé à garder la même structure de rédaction, il s'agit:

1. D'une introduction à l'essai,
2. D'une présentation du but,
3. D'une partie dédiée à la théorie qui a pris la plus grande part de cette structuration, afin que l'étudiant puisse acquérir et assimiler le plus d'informations possibles sur cette discipline vu que les différents essais débutent avant les cours RDM. Ayant la théorie, les étudiants pourront répondre aux différentes questions leur permettant ainsi d'élaborer les différents comptes rendus d'une manière simple et détaillée.
4. Et en dernier, d'une partie expérimentale où il s'agit de présenter le mode opératoire ainsi que le travail demandé de la part de l'étudiant pour une présentation d'un compte rendu homogène.

Ce polycopié sera en perpétuelle correction. C'est pourquoi, je serai reconnaissante aux utilisateurs de m'exposer toute suggestion susceptible d'en améliorer le contenu.

## Remerciements

Je tiens à remercier vivement tous ceux qui m'ont permis de réaliser ce travail. Mes profonds remerciements s'adressent tout particulièrement aux deux experts Mr. Boumechra Nadir, Professeur à l'Université de Tlemcen et Mr. Maatallah Mohammed, Professeur à l'Université de Tlemcen pour leurs expertises et leur temps consacré à la correction du document ainsi qu'à l'appui qu'ils m'ont témoigné durant l'élaboration de ce travail, je tiens à les remercier profondément pour leurs aides précieuses, leur souci du détail, ainsi que leur disponibilité.

Ces remerciements ne sauraient être complets si je n'inclus pas les enseignants, les collègues du département du Génie Civil.

Merci à tous.

## Table de matière

<b>Avant-propos</b>	<b>I</b>
<b>Remerciements</b>	<b>IV</b>
<b>Table de matière</b>	<b>V</b>
 <b>GENERALITES SUR LA RESISTANCE DES MATERIAUX</b>	
<b>1. Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2. Généralités sur la résistance des matériaux</b>	<b>2</b>
2.1 Définition de la résistance des matériaux	2
2.2 But de la R.D.M	3
2.3 Concepts généraux	4
2.3.1 Notions de poutres	4
2.3.2 Notions de Forces et Déplacement	4
2.3.3 Notions de Contraintes	5
2.3.4 Notions de Déformation	5
2.4 Hypothèses	6
2.5 Torseur statique de cohésion	6
2.5.1 Définitions	6
2.5.2 Efforts appliqués à une section de poutre droite	7
2.6 Les différents types de sollicitations simples	8
2.7 Réactions d'appuis	8
 <b>ETUDE DE SOLLICITATIONS SIMPLES</b>	
<b>3. Essai de Traction</b>	
3.1 Introduction	10
3.2 But de l'essai de traction	10
3.3 Partie théorique	10
3.3.1 Principe de l'essai de traction	10
3.3.2 Diagramme de traction ( $\sigma, \varepsilon$ )	12
3.3.3 Contrainte admissible	14
3.4 Partie expérimentale	15
3.4.1 Mode opératoire	15
3.4.2 Travail demandé	16
3.4.2 Questions à débattre	16
<b>4. Essai de Flexion</b>	
4.1 Introduction	18
4.2 But de l'essai de flexion	18
4.3 Partie théorique	19
4.3.1 Principe de l'essai	20
4.3.2 Calcul de la flèche	20
4.4 Partie expérimentale	21
4.4.1 Mode opératoire	22
4.4.2 Travail demandé	23
<b>5. Essai de Torsion</b>	
5.1 Introduction	27
5.2 But de l'essai de torsion	28
5.3 Partie théorique de torsion	28
5.3.1 Définition	28
5.3.2 Calcul de l'angle de torsion	28
5.3.3 Relation entre moment de torsion- Angle de torsion unitaire	29
5.3.4 Contrainte de torsion maximale	30
5.3.5 Courbe de torsion	30



5.4	Partie expérimentale	31
5.4.1	Mode opératoire	32
5.4.2	Travail demandé	32
<b>6.</b>	<b>Essai de Cisaillement</b>	
6.1	Introduction	36
6.2	Partie théorique	36
6.2.1	Principe de l'essai de cisaillement	36
6.2.2	Contrainte de cisaillement	37
6.2.3	Relation contraintes- déformations	38
6.2.4	Diagramme de contraintes- déformations	38
6.3	Partie expérimentale	39
<b>7.</b>	<b>Portiques</b>	
7.1	Introduction	41
7.2	Partie théorique	41
7.2.1	les différents types d'appuis	41
7.2.2	définition des systèmes isostatique et hyperstatique	44
7.3	Partie expérimentale	44
7.3.1	Etude du portique isostatique	44
7.3.2	Etude du portique hyperstatique	45
7.3.3	Questions de compréhension	46
<b>8.</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>47</b>

## 1 INTRODUCTION

Un projet en GENIE CIVIL consiste à projeter des plans et des notes d'explication présentant les dimensions des différents éléments de la construction. Ces dimensions ainsi que les détails de ces différents éléments dépendent des caractéristiques des matériaux utilisés et des forces extérieures agissant sur les structures c'est pourquoi elles doivent être déterminées soigneusement pendant le procédé de conception, ainsi les structures peuvent être fiables et même économiques au cours de l'exploitation.

Cette fiabilité est garantie quand la *résistance, la rigidité, la stabilité et même la durabilité* définies sont prises en compte dans la structure<sup>1</sup>. En raison de ce, la science de la Résistance des Matériaux englobant ainsi ces différentes notions rentre en jeu se fondant de ce fait sur les essais aussi bien que sur la théorie.

Par ailleurs, ces différentes variétés d'essais (Essais mécaniques) existant fournissent les principales caractéristiques des matériaux directement utilisés dans les calculs et la théorie.

Parmi les variétés d'essais qui existent ; on cite l'essai de TRACTION, de FLEXION, de TORSION, de CISAILLEMENT et celui de FLAMBEMENT sans oublier les essais effectués sur les PORTIQUES.

Ces essais portent sur des éprouvettes dont la dimension et la forme peuvent varier selon les machines d'essai dont on dispose au niveau de nos laboratoires et évidemment selon les conditions d'essai.

---

<sup>1</sup> Toutes ces notions seront définies ultérieurement.

## 2 GENERALITES SUR LA RESISTANCE DES MATERIAUX

### 2.1 Définition de la R.D.M

La résistance des matériaux (R.D.M) est une branche de la mécanique appelée mécanique des corps solides déformables, elle fait appel aux notions d'équilibre de la mécanique statique, aux notions de déplacements étudiées en cinématique et aux propriétés des matériaux, auxquelles on a recours pour évaluer les dimensions de pièces structurales ou d'éléments de machines [5]. C'est l'étude de la résistance et de la déformation des éléments de construction (bâtiments, Pont, Tunnel, fusées, charpentes, structures métalliques, avion... ). Elle constitue l'outil indispensable à l'ingénieur pour réaliser des ouvrages économiques qui ne risquent ni de se rompre ni de se déformer excessivement sous les actions qui leur sont appliquées.

La R.D.M est une science qui réunit plusieurs méthodes qui servent à la détermination des dimensions requises des différentes pièces des constructions.



Fig. 2.1 Pont du Golden Gate (San Francisco) [29].

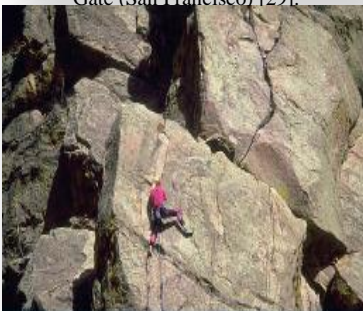


Fig. 2.2 Escalade [30]

- ▶ Ce pont a été vérifié en Résistance des matériaux pour :
  - Assurer sa résistance sous son propre poids et celui des véhicules
  - Assurer sa résistance en cas de forte tempête

- ▶ Idem pour le matériel d'escalade et de sécurité en général. Les matériaux sont testés et vérifiés dans toutes les configurations d'utilisation (Poids, chocs, températures...etc.).

C'est un outil indispensable à toute modélisation en calcul des structures. Même si d'autres méthodes (par exemple les éléments finis) sont en général utilisées, un calcul rapide de RDM permet de vérifier les ordres de grandeur et de juger de l'opportunité d'utiliser d'autres méthodes plus complexes. [9]

## 2.2 But de la R.D.M

L'objet principal de la Résistance des matériaux est l'étude de la stabilité et de la résistance des systèmes en vue de les utiliser pour de différentes fonctions.

Elle constitue une partie de la mécanique qui a pour objectif le développement de modèles permettant de dimensionner les structures. Ces modèles sont élaborés dans le cadre d'hypothèses simplificatrices. Ils constituent le premier niveau des méthodes de calcul des structures. Ils se rapportent en général à des corps géométriquement simples qui constituent les éléments de base de la construction mécanique et du Génie Civil :

- Les corps élancés pour lesquels une dimension est beaucoup plus grande que les deux autres et qui sont appelés *Poutres* ;
- Les corps minces, *Plaques et Coques*, pour lesquels une dimension, l'épaisseur, est beaucoup plus petite que les deux autres.

En outre, la résistance des matériaux a pour but d'assurer qu'on utilise dans une pièce donnée, une quantité minimale du matériau, tout en satisfaisant les exigences suivantes : [5]

1. Résistance : La pièce doit pouvoir supporter et transmettre les charges externes qui lui sont imposées ;
2. Rigidité : La pièce ne doit pas subir de déformation excessive lorsqu'elle est sollicitée.
3. Stabilité : La pièce doit conserver son intégrité géométrique afin que soient évitées des conditions d'instabilité (flambement, déversement).
4. Endurance : La pièce, si elle est soumise à un chargement cyclique (répété), doit pouvoir, sans rupture, supporter un certain nombre de cycles (fatigue).

La résistance des matériaux permet de choisir le matériau et les dimensions d'une pièce mécanique en fonction des conditions de déformation et de résistance requises. Elle consiste par ailleurs à :

1. Choisir le matériau constituant la pièce.
2. Déterminer les dimensions fonctionnelles de la pièce.
3. Vérifier la résistance à la rupture de la pièce.
4. Optimiser le coût de la pièce par changement des formes, des dimensions, des matériaux, ...

## 2.3 Concepts généraux

Comme il a été évoqué plus haut, la réalisation de différents types de machines, d'ouvrages de Génie civil (Ponts, ligne de transport et antennes, hangars, navires, avions, turbines, groupes des centrales nucléaires, engins, fusées etc...) est impensable sans une connaissance fondamentale de la R.D.M. Néanmoins, malgré la diversité de ces ouvrages, ils peuvent être ramenés à un nombre relativement restreint de formes principales tels que les poutres, les plaques et les corps massifs [13].

### 2.3.1. Notion de poutre

Pour la majorité des calculs RDM, on utilise le modèle Poutre (solides dont une dimension est très supérieure aux deux autres).

On appelle « Poutre » le solide engendré par une surface plane (S) dont le centre de gravité (G) décrit une courbe (C) appelée *ligne moyenne* [22].

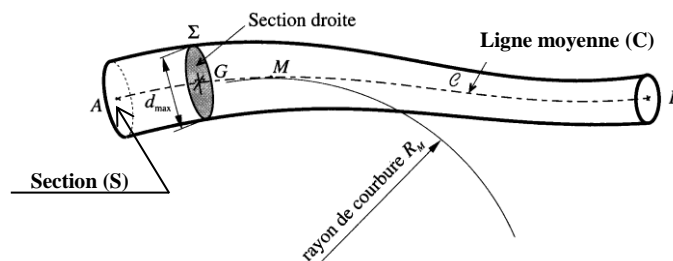


Figure 2.3. Schéma de poutre

### 2.3.2. Notions de Forces et déplacements

Les efforts extérieurs (ou chargement) regroupent les forces (en multiples du Newton (N)) et les moments (en multiples du Newton-mètre (N.m)).

Les déplacements sont l'ensemble des translations (en unités de longueur) et des rotations (en radians).

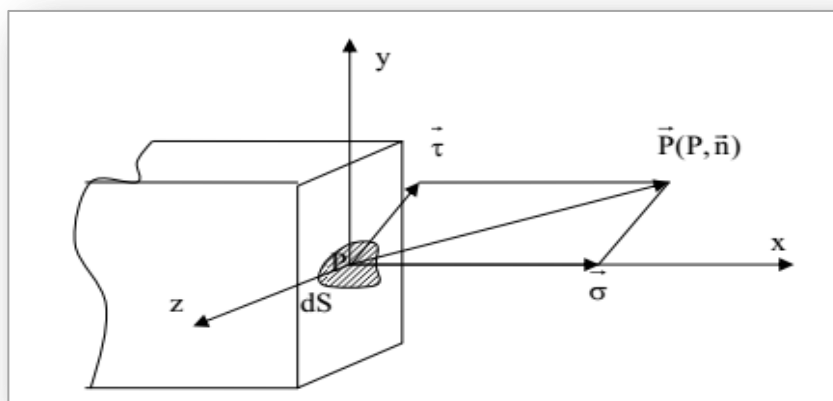
On rappelle que les forces intérieures aux solides sont des forces élastiques, qu'elles s'opposent au déplacement interne et s'annihilent deux à deux. Elles n'interviennent donc pas dans l'équilibre externe statique. La valeur des forces intérieures sera donc nécessairement limitée pour éviter l'endommagement du matériau, et ceci nécessite: [22]

1. Un calcul de ces forces intérieures.
2. De connaître les résistances admissibles des matériaux.

### 2.3.3. Notions de contraintes

La contrainte en un point P de normale  $\vec{n}$  est la résultante des forces  $d\vec{f}$  sur un élément de surface  $dS$  de la section droite autour de P. on définit la quantité  $\vec{P}(P, \vec{n})$  telle que (Figure 2.4): [6]

$$\vec{P}(P, \vec{n}) = \lim_{dS \rightarrow 0} \frac{d\vec{f}}{dS} \quad (1.1)$$



**Figure 2.4.** Contraintes appliquées en P d'un élément de surface  $dS$  [6]

Le vecteur contrainte résultant  $[\sigma]$  possède deux composantes :

Contrainte normale et contrainte tangentielle :

1. **Contrainte normale ( $\sigma$ )** : elle est normale à la section droite (S). La contrainte normale de traction  $\sigma = \sigma \cdot \vec{n}$  (ou de compression).
2. **Contrainte tangentielle ( $\tau$ )** : elle est tangente à la section droite (S).

### 2.3.4. Notions de déformations

Lorsqu'un corps est soumis à des forces extérieures, il y a un changement de sa forme géométrique ou de ses dimensions. Ce changement s'appelle déformation. Tous les corps se déforment sous l'effet des forces qui s'exercent sur eux.

Les déformations sont généralement petites devant les dimensions de la poutre. Les actions s'exerçant sur cette dernière seront calculées suivant le principe fondamentale de la statique.

En plus, sous l'effet d'une force extérieure, les matériaux se déforment, et deux régimes de déformation particuliers sont rencontrés : Lorsqu'après une sollicitation le matériau revient à son état initial, le régime de déformation est élastique. En revanche, pour des sollicitations plus élevées, la déformation subsiste au moins partiellement après relâchement de la force, et on parle alors de déformation irréversible (Plastique, fissuration, ...etc.). [23]

## 2.4 Hypothèses

Pour appliquer la théorie de la résistance des matériaux, on considère les hypothèses suivantes :

1. **La continuité** : Cette hypothèse de continuité du matériau permet d'isoler une partie infinitésimale de celui-ci et d'exprimer son comportement selon un système de coordonnées, à l'aide de fonctions mathématiques continues;
2. **L'homogénéité** : On admet que les matériaux ont les mêmes caractéristiques (composition) en tout point. La plupart des matériaux d'ingénierie satisfont à ce critère, du moins à l'échelle macroscopique. Même des matériaux qui sont peu homogènes (béton, bois, matériaux composites) peuvent être considérés comme homogènes pour des calculs simplifiés.
3. **L'isotropie** : on admet que les matériaux ont, en un même point, les mêmes propriétés mécaniques dans toutes les directions. Les matériaux qui ont des orientations préférentielles (bois, matériaux laminés...) ne sont pas isotropes et ils font l'objet de méthodes de calcul spécialisées.

## 2.5 Torseur statique de cohésion

### 2.5.1 Définitions

Soit une poutre (E) en équilibre sous l'action de  $n$  actions extérieures. On associe à cette poutre un repère  $R(x,y,z)$  dont l'axe  $x$  coïncide avec la ligne moyenne de la poutre.

En coupant la poutre (E) par un plan (P) orthogonal à sa ligne moyenne, situé à l'abscisse  $x$ . On définit ainsi deux portions de poutre (E1) et (E2). [23]

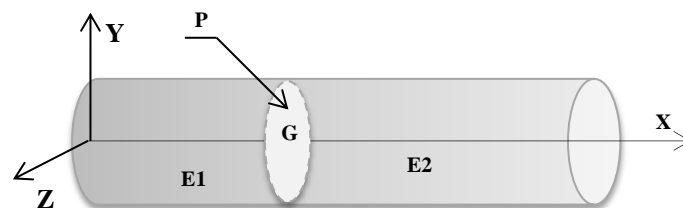


Figure 2.5 Torseur de contrainte

$\{E2 \rightarrow E1\}$  est le torseur qui traduit l'action de contact de (E2) sur (E1).

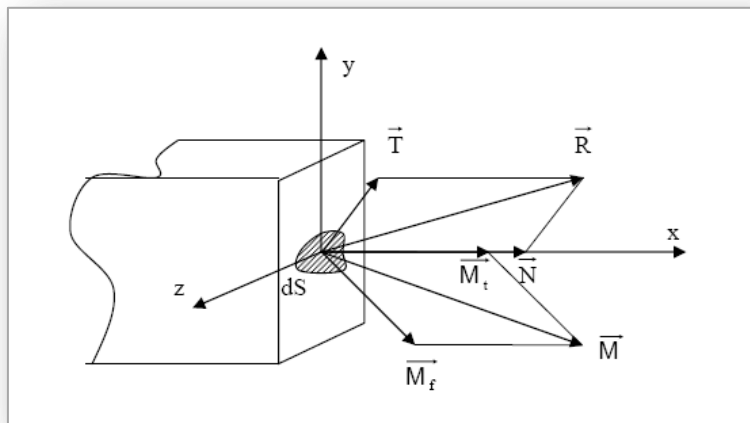
Cette action est due aux efforts de cohésion qui permettent à la poutre de ne pas se "disloquer" sous l'effet d'actions extérieures.

La RDM vise en particulier à vérifier qu'en aucun point de la poutre les efforts de cohésion à "transmettre" ne soient supérieurs aux capacités du matériau.

Dans le torseur de cohésion, on peut faire apparaître la résultante (R) et le moment qui dépendent de la position de la section (x).

### 2.5.2 Efforts appliqués à une section droite de poutre

Soit une poutre soumise à un torseur de cohésion statique dû aux forces extérieures F (figure 1.4),



**Figure 2.6** Résultantes des forces extérieures appliquées en  $dS$  du plan  $\pi$  autour du centre de gravité  $G$ . [6]

Le torseur  $\{T_{F_{ext}} \rightarrow (d)\}$  se décompose en  $R$ , résultante des forces extérieures appliquées à droite de la section  $\pi$  (Figure 3b), et  $M$ , résultante des moments extérieurs appliqués à droite de  $\pi$ . Les efforts totaux appliqués à la section peuvent être projetés en:

- Un effort normal  $\vec{N}$  selon  $Ox$ , de composante  $N_x$ .
- Un effort de cisaillement  $\vec{T}$  dans le plan  $\pi$ , de composantes  $T_y$  et  $T_z$ .
- Un moment de torsion  $\vec{M}_t$  projection de  $\vec{M}$  sur  $Ox$ , de composante  $M_t$ .
- M Un moment de flexion  $\vec{M}_f$  projection de  $\vec{M}$  sur  $\pi$ , de composantes  $M_y$  et  $M_z$ .



## 2.6 Les différentes types de sollicitations simples

Une poutre peut être soumise à plusieurs sollicitations qui dépendent de la nature et de la direction des actions mécaniques.

Les sollicitations simples sont obtenues lorsque le tenseur de cohésion possède une seule composante non nulle.

**Tableau 1.1** : Différentes sollicitations simples [24]

Sollicitation	Effort de cohésion	Schéma
<b>Traction</b>	$\{T\} : \begin{Bmatrix} N & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$ $N > 0$	
<b>Compression</b>	$\{T\} : \begin{Bmatrix} N & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$ $N < 0$	
<b>Cisaillement simple</b>	$\{T\} : \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ T_y & 0 \\ T_z & 0 \end{Bmatrix}$	
<b>Torsion</b>	$\{T\} : \begin{Bmatrix} 0 & Mt \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$	
<b>Flexion simple</b>	$\{T\} : \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ T_y & 0 \\ 0 & Mfz \end{Bmatrix}$	

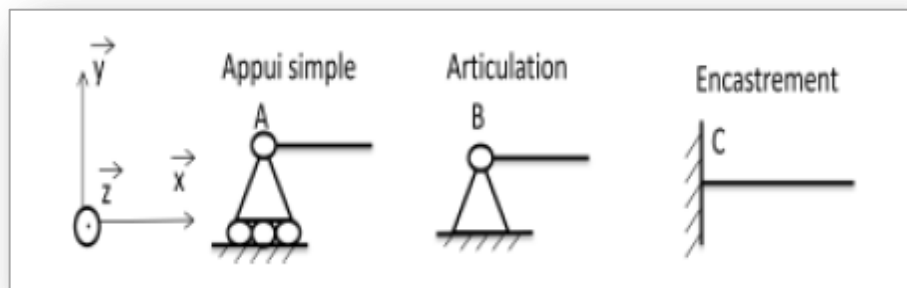
NB : Lorsque l'on a une seule de ces sollicitations on parle de *sollicitation simple*, sinon on a un problème de *sollicitations composées*.

## 2.7 Réactions d'appui

Avant toute étude de résistance des matériaux, il est nécessaire de déterminer les réactions d'appuis, c'est-à-dire leurs points d'applications, leurs directions et leurs intensités. [6]

Tous les organes d'appui pour poutre qu'on rencontre peuvent être schématisés sous forme de trois types principaux d'appui suivants :

- L'appui simple, constitué, par exemple, par un rouleau cylindrique, donne lieu à une réaction de direction imposée passant par le point d'appui. Cette réaction est définie par une seule composante en résultante perpendiculaire au contact. [14]
- L'articulation, constituée, pour les poutres métalliques, par une rotule comprise entre deux balanciers en acier moulé et, pour les poutres en béton, par une section fortement rétrécie, donne lieu à une réaction dont on ne connaît pas la direction, mais qui passe par le centre de la rotule ou par le centre de la section rétrécie ; cette réaction est définie par ses deux composantes suivant deux directions non parallèles du plan moyen.
- L'encastrement a pour objet d'assurer l'invariabilité de la section d'extrémité d'une poutre ; la réaction d'appui comprend une force passant par le centre de gravité G de la section d'encastrement et contenue dans le plan moyen, et un moment normal au plan moyen ; la réaction d'appui est donc définie par trois composantes : les deux projections sur deux axes situés dans le plan moyen et la projection du moment sur l'axe normal au plan moyen.



*Figure 2.7 Les trois liaisons usuelles*

**NB :** Pour plus d'information sur les appuis, le lecteur pourrait se référer à l'essai de portique en fin du document.

## 3 ESSAI DE TRACTION

### 3.1 Introduction

Parmi tous les essais mécaniques, on peut aisément percevoir que l'essai de traction est l'essai le plus fondamental, c'est un essai simple et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes de pièces.

La seule connaissance des paramètres de l'essai de traction permet de prévoir le comportement d'une pièce sollicitée en différentes sollicitations.

Cet essai à lui seul permet de définir les caractéristiques mécaniques courantes utilisées en Résistance des Matériaux telles que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et même le coefficient de striction. Il reste tout de même, l'essai le plus utilisé comme base pour la compréhension des différentes lois de comportement. Pour ces différentes raisons, cet essai prendra la plus grande part de ce document.

### 3.2 But pédagogique de l'essai de traction

Afin de permettre à l'étudiant de se familiariser avec cet essai, on a fixé les objectifs suivants :

1. Faire connaître le fonctionnement d'une machine de traction;
2. Déterminer les caractéristiques de résistance du matériau testé.
3. Mettre en évidence la relation de comportement contrainte-déformation.
4. Mettre en évidence les domaines élastique et plastique de la loi de comportement d'un acier.
5. Exploiter la courbe de traction et interpréter les résultats.

### 3.3 Partie théorique

#### 3.3.1 Principe de l'expérience

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette prélevée du matériau à étudier à un effort de traction  $\vec{F}$  (exprimé en Newton) dans une machine d'essai de traction et à mesurer l'allongement correspondant  $\Delta l$  (exprimé en mm).

L'éprouvette peut être cylindrique ou rectangulaire (Figure 3.1).

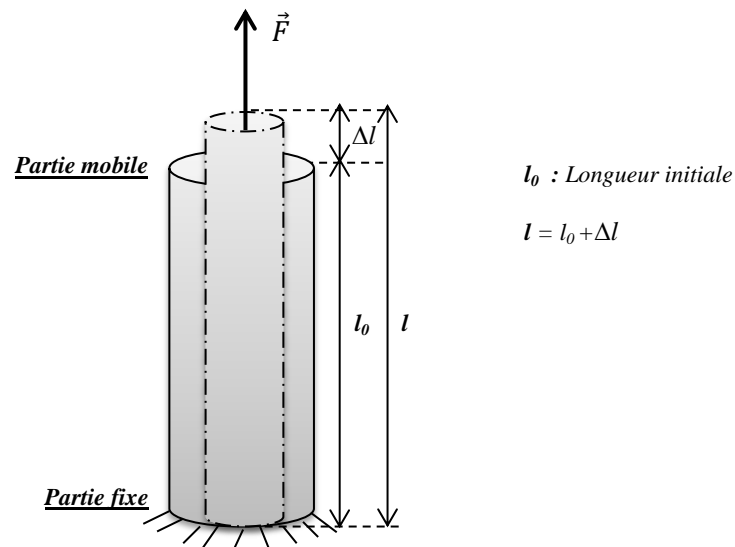


Figure 3.1 Principe de la traction simple

La variation de l'allongement de l'éprouvette est enregistrée en fonction de l'effort  $\vec{F}$  correspondant (Voir la figure 3.2).

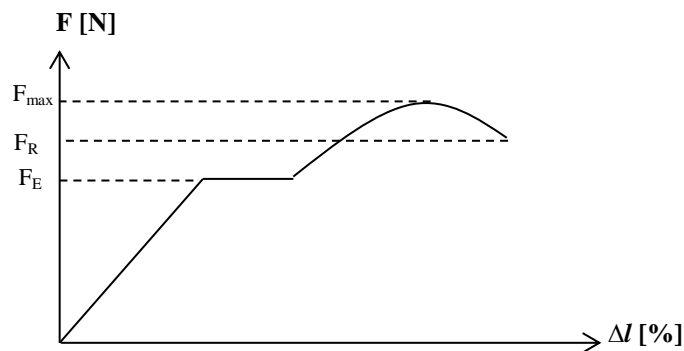


Figure 3.2 Diagramme de traction ( $F$ ,  $\Delta l$ )

Dans le paragraphe suivant, et afin de donner une évaluation *quantitative* des propriétés du matériau dont il est question d'étudier, la courbe de traction tracée (Voir figure 3.3) sera exprimée en coordonnées contraintes et déformations ( $\sigma$ ,  $\epsilon$ ), les deux courbes ont la même allure, excepté que la courbe ( $F$ ,  $\Delta l$ ) caractérise les propriétés de l'éprouvette tandis que le diagramme ( $\sigma$ ,  $\epsilon$ ) caractérise en plus des propriétés de l'éprouvette, les propriétés du matériau également. Le passage entre les deux diagrammes se passe par la division par, respectivement,  $S_0$  (surface de l'éprouvette) et  $l_0$  (longueur initiale de l'éprouvette).

### 3.3.2 Diagramme de traction ( $\sigma$ , $\epsilon$ )

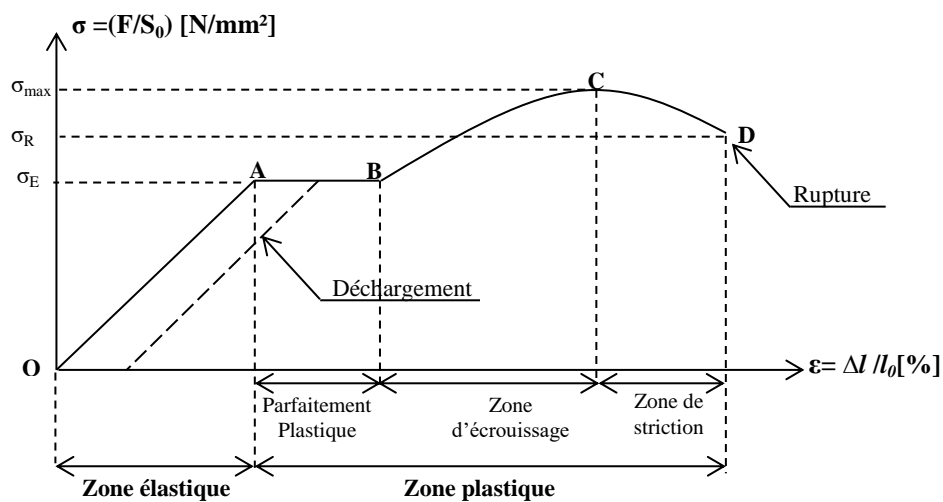
En traçant l'évolution des contraintes normales  $\sigma$  en fonction de la déformation  $\epsilon$ , on observe deux zones principales : la zone de déformations élastiques et la zone de déformations plastiques (Cf. figure 3.3).

Avec :

$\sigma_{\max}$  : C'est la charge maximale atteinte durant l'essai de traction.

$\sigma_E$  : Est appelée limite d'élasticité ; c'est la contrainte maximale qui n'entraîne pas de déformations résiduelles.

$\sigma_R$  : Contrainte de rupture.



**Figure 3.3.** Diagramme de traction pour un acier doux ( $\sigma$ ,  $\epsilon$ ) [5]

#### 1. La zone d'élasticité linéaire (Tronçon OA) (Figure 3.3) :

Cette partie rectiligne désigne le domaine élastique linéaire ; c'est une zone où les déformations subies par l'éprouvette ne sont pas définitives, l'éprouvette revient à sa longueur initiale dès que la charge est ôtée. Le point A, auquel correspond la limite élastique  $\sigma_E$  marque la fin de cette zone.

Cette zone est régit par une loi qui relie contraintes aux déformations Appelée « Loi de Hooke » :

$$\sigma = E * \epsilon \quad (3.1)$$

Avec :

$\sigma$  : Contrainte normale dans la section ( $\sigma > 0$ ).

$$\sigma = \frac{N}{S} \quad (3.2)$$

N : effort normal d'extension en Newton.

S : Aire de la Section droite (S) en mm<sup>2</sup>.

E : module de Young ou appelé module d'élasticité longitudinal.

On peut définir alors un module d'élasticité transversal G, lui aussi dépendant du matériau :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.3)$$

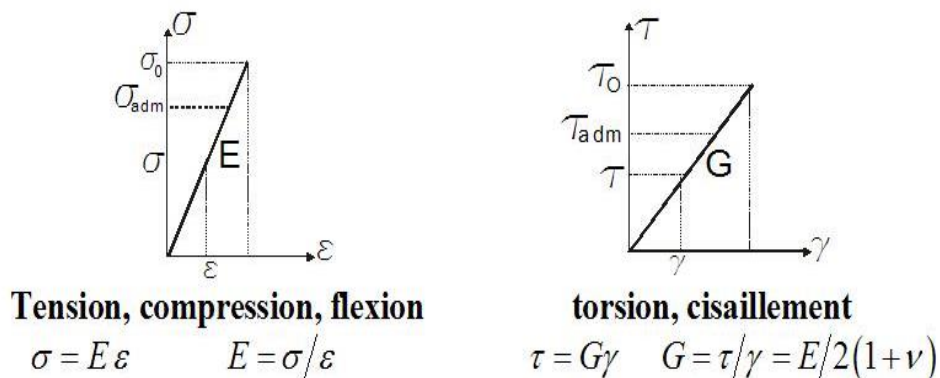
$\nu$ : étant le coefficient de poisson.

Nous donnons ci-dessous la valeur de ce module d'élasticité relative à différents matériaux :

**Tableau 3.1** valeurs usuelles de E, G et  $\nu$  [16], [32]

Matériaux	Module d'élasticité longitudinal (E) [MPa]	Module d'élasticité transversal ou module de Cisaillement (G) [MPa]	Coefficient de poisson $\nu$
Acier de construction	210 000	80 000	0,3
Aluminium	70 000	28 000	0,25
Cuivre	125 000	40 000	0,56
Bronze	80 000	38500	0,32
Béton	20 000	8333	0,2

Loi de Hooke généralisée :



**Figure 3.4.** Loi de Hooke généralisée

## 2. La zone plastique (Tronçon ABCD) :

Dans cette zone, des déformations irréversibles apparaissent et on différencie trois zones :

- La zone AB (appelée zone parfaitement plastique) :

C'est une zone d'écoulement plastique suivant un quasi-palier. L'allongement de la pièce augmente malgré que la charge reste constante.

- La zone BC :

Le matériau subit un changement de structure qui accroît sa limite élastique (écrouissage). Le point C correspond à la résistance maximale (notée  $\sigma_{\max}$ ) du matériau.

- La zone CD :

On constate que l'allongement augmente, pour des charges inférieures à la valeur maximale  $\sigma_R$ . C'est le phénomène de striction amenant une diminution de la section. La rupture se produit en D.

### 3.3.3 Contraintes admissible

En pratique, il importe de fixer la contrainte maximale qu'une pièce pourra supporter sans risque de rupture ni de déformations inacceptables. Cette contrainte maximale est appelée : contrainte admissible ( $\sigma_{\text{adm}}$ ). [13]

Comme on l'avait déjà précisé, afin de dimensionner les structures, nous avons besoin de connaître les capacités de résistance du matériau utilisé et ceci pour pouvoir appliquer *la condition de résistance des contraintes normales* :

$$\sigma \text{ (théorique)} \leq \sigma \text{ (admissible)}$$

La contrainte admissible est déterminée soit sur la base de la contrainte élastique ( $\sigma_E$ ) (Cas des matériaux plastiques) ou par rapport à la contrainte de rupture ( $\sigma_R$ ) (Cas des matériaux fragiles ou peu plastiques):

- Cas des matériaux plastiques :  $\sigma_{\text{adm}} = \frac{\sigma_E}{F_S}$

La contrainte admissible est déterminée en fonction de la contrainte élastique ( $\sigma_E$ ) pour éviter la zone d'écoulement et aussi pour éviter l'existence de déformation plastique, elle sera calculée à partir de la contrainte élastique. [1]

- Cas des matériaux fragiles :  $\sigma_{\text{adm}} = \frac{\sigma_R}{F_S}$

La contrainte admissible est déterminée en fonction de la contrainte de rupture ( $\sigma_R$ ) ; la zone d'écoulement n'existe pas et les déformations plastiques sont assez faibles.

$F_s$  étant le coefficient de sécurité ( $F_s > 1$ ), il est déterminé en fonction des méthodes de calcul et de l'importance du danger.

$F_s = 1,5$  à 3 pour des structures courantes.

$F_s = 8$  à 10 pour des structures présentant un danger pour l'homme et son environnement. [33]

### 3.4 Partie expérimentale

Comme il a été précisé plus haut, l'essai de traction d'un acier s'effectue par l'enregistrement graphique de l'allongement ( $\Delta L$ ) d'une éprouvette en fonction de la charge  $F$  sur une machine appelée machine de traction (Voir figure 3.5). Elle constitue l'outillage essentiel pour la réalisation pratique sur des éprouvettes de sollicitations simples pour la détermination des caractéristiques mécaniques des différents matériaux. [1]

Elle comprend essentiellement : un mor rigide et un autre mobile, un manomètre servant à fixer les différentes forces et un comparateur de mesure d'allongements.

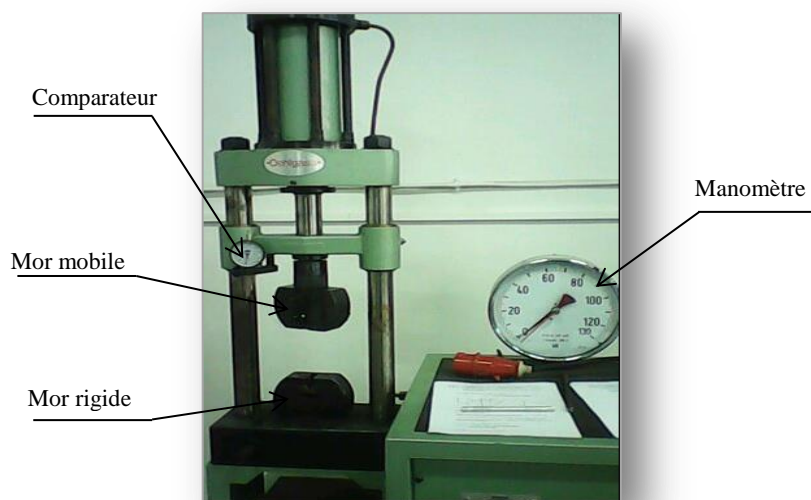


Figure 3.5 Machine de traction manuelle

#### 3.4.1 Mode opératoire

Dans cette partie, nous allons expliquer les différentes étapes du mode opératoire à respecter pendant un essai de traction correcte.

Les essais sont effectués sur une éprouvette en Acier Rond Lisse (RL) ou acier de type Haute adhérence (HA), les étapes suivantes sont à respecter :



1. Choisir une éprouvette normalisée (Voir figure 3.6).

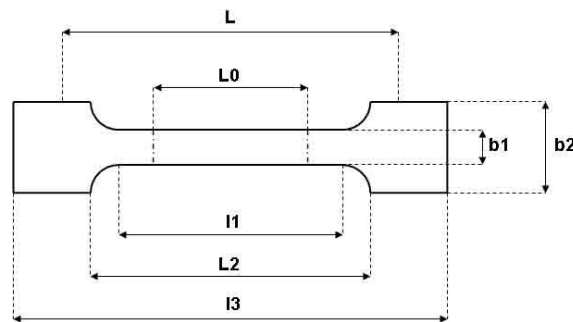


Figure 3.6 Éprouvette normalisée [31]

Avec :  $L_0$  = Longueur de référence,  $L$  = Écartement entre outillages,  $l_1$  = Longueur de la partie calibrée étroite,  $L_2$  = Écartement entre les parties parallèles larges,  $l_3$  = Longueur totale,  $b_2$  = Largeur dans la zone d'épaulement,  $b_1$  = Largeur dans la zone de la longueur de référence,  $h$  = épaisseur de l'éprouvette.

2. Mesurer les dimensions initiales de l'éprouvette et placer l'éprouvette dans le dispositif expérimental, l'une des extrémités de l'éprouvette est fixe ainsi l'effort de traction est exercé sur l'autre extrémité.
3. Procéder à l'essai en construisant le tableau récapitulatif :
4. La lecture de la force exercée se fait directement sur le manomètre associé à la machine.
5. La lecture des allongements se fait directement sur le comparateur associé à la machine.
6. Commencer l'essai de traction en notant les allongements à chaque augmentation de la force (voir tableau 3.2).

Tableau 3.2 Enregistrement des allongements en fonction des charges appliquées

<b>F[N]</b>							
<b><math>\Delta l_0</math> [mm]</b>							
<b><math>\sigma = F/S_0</math> [N/ mm<sup>2</sup>]</b>							
<b><math>\varepsilon = (\Delta l_0 / l_0) * 100</math> [%]</b>							
<b>E[N/ mm<sup>2</sup>]</b>							

### 3.4.2 Travail demandé

Concernant le travail demandé de la part de l'étudiant et afin d'assurer une bonne assimilation, les points suivants devront être précisés dans le compte rendu.

1. Construire la courbe caractéristique de traction dans le repère  $(F, \Delta l_0)$ .
2. Construire la courbe caractéristique de traction dans le repère  $(\sigma, \varepsilon)$ .
3. Déterminer les caractéristiques du matériau :
  - Le Module d'élasticité (E),
  - La Limite élastique ( $\sigma_E$ ),
  - La Contrainte maximale  $\sigma_{\max}$
  - La Contrainte de rupture ( $\sigma_R$ ).
4. Comparer les résultats trouvés avec les caractéristiques théoriques. Commenter les écarts.
5. A la fin on demande de formuler tous les résultats et réponses dans un rapport avec les remarques et les conclusions adaptées.

### 3.4.3 Questions à débattre

En finalisant cette dernière partie de l'essai, nous avons jugé bien de poser quelques questions pour pouvoir juger du taux d'assimilation de l'étudiant. Ces différentes questions se résument en ce qui suit :

1. Quel est le phénomène visible qui se passe avant la rupture de l'éprouvette?
2. Quel sera le comportement d'une barre d'acier soumise à de la compression ?
3. Quel est le rôle des aciers en béton armé, donner une conclusion.
4. Quel rôle joue le béton dans béton armé ?
5. À quoi servent les armatures transversales dans une poutre ?
6. Pourquoi y a-t-il des armatures longitudinales dans un poteau qui ne travaille qu'en compression ?
7. À quoi servent les armatures transversales dans un poteau ?

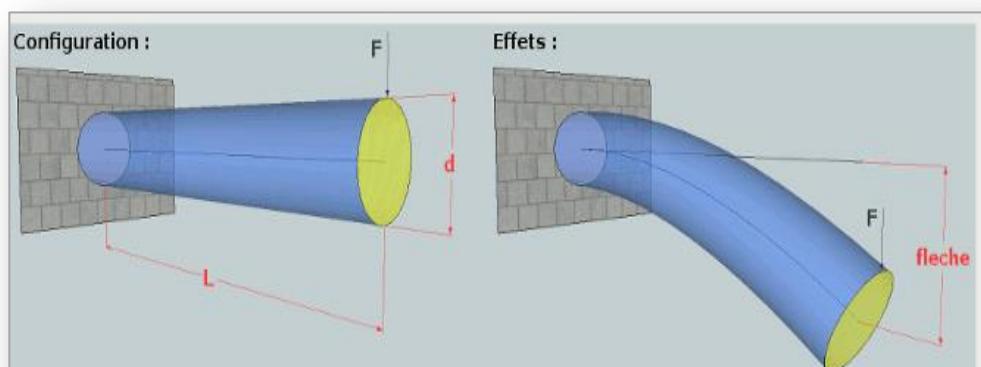
## 4 ESSAI DE FLEXION

### 4.1 Introduction

Il existe plusieurs types de flexions selon la nature du torseur de cohésion. Ceux-ci dépendent entre autres de la nature de la poutre, des configurations des actions mécaniques extérieures appliquées, ... On cite la flexion pure, la flexion simple, la flexion composée et enfin la flexion déviée.

Dans ce document, il est question uniquement d'exposer le cas de la flexion simple, car il correspond au cas le plus fréquemment rencontré et aussi pour l'exigence des essais au laboratoire, néanmoins, un bref aperçu sur ces différents types sera exposé.

Il est à noter qu'une poutre est sollicitée en flexion simple lorsque le système des forces extérieures se réduit à un système en configuration plane et que toutes les forces sont perpendiculaires à la fibre moyenne (Figure 4.1).



**Figure 4.1** Flexion de poutre [25]

### 4.2 But pédagogique de l'essai de flexion

L'essai de flexion simple a pour but de déterminer la variation de la flèche ( $f_m$ ) causée par l'application d'une charge sur une poutre développant ainsi une flexion simple.

En variant les nuances de la poutre et ses dimensions, la flèche maximale ( $f_m$ ) est mesurée expérimentalement ainsi nous pourrons la comparer à la valeur théoriquement calculée.

Par ailleurs, l'essai de flexion permet aux étudiants d'assimiler les buts suivants :

- Comprendre le phénomène de Flexion;
- Déterminer expérimentalement la flèche maximale pour différents types de poutres.
- Dédire le module d'élasticité E.
- Comparer les résultats expérimentaux à ceux théoriques.
- Étudier l'influence de la longueur, la largeur, l'épaisseur des barres et leurs matériaux sur la flèche.

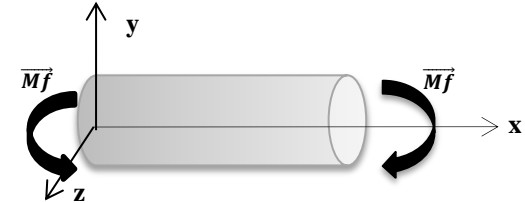
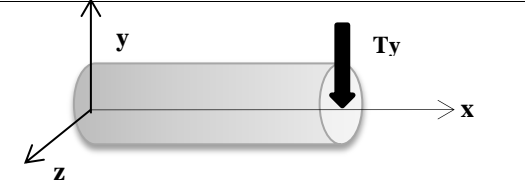
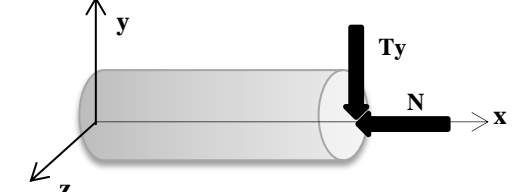
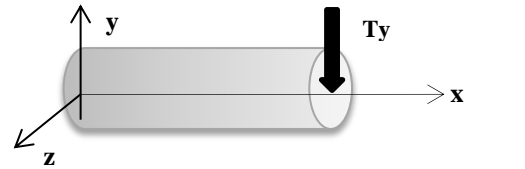
A la fin de cet essai l'étudiant sera en mesure de comprendre le phénomène de flexion simple et son importance dans les différentes constructions.

### 4.3 Partie théorique

Nous dressons ci-dessous le Tableau (4. 1) visant à définir brièvement les différents types de flexion.

Par la suite, la flexion simple sera détaillée plus amplement à cause de son utilisation au niveau du laboratoire:

**Tableau 4.1.** Différents types de flexion

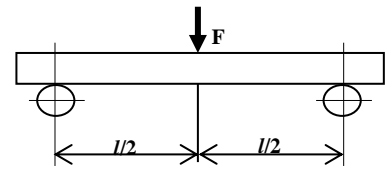
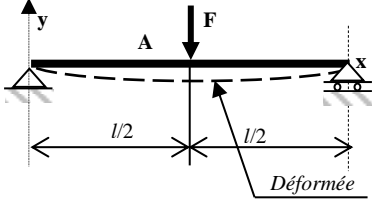
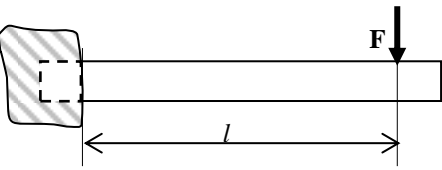
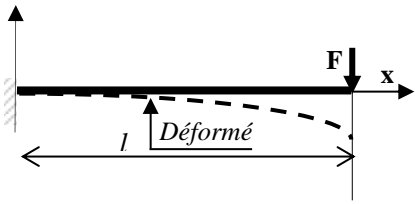
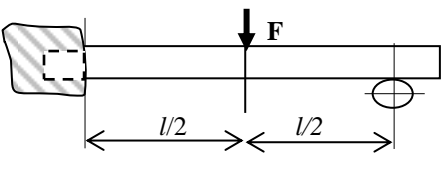
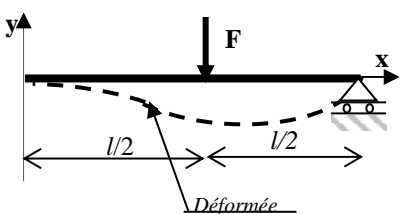
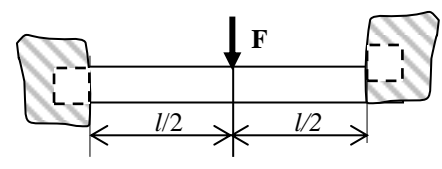
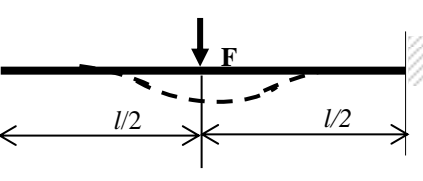
Types de flexion	Schéma d'étude	Effort de cohésion
Flexion pure		$\{T\}: \left\{ \begin{array}{c c} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & Mf \end{array} \right\}$
Flexion simple		$\{T\}: \left\{ \begin{array}{c c} 0 & 0 \\ Ty & 0 \\ 0 & Mfz \end{array} \right\}$
Flexion composée		$\{T\}: \left\{ \begin{array}{c c} N & 0 \\ Ty & 0 \\ 0 & Mfz \end{array} \right\}$
Flexion déviée		$\{T\}: \left\{ \begin{array}{c c} 0 & 0 \\ Ty & Mfy \\ Tz & Mfz \end{array} \right\}$

### 4.3.1 Définition du principe de flexion simple

En appliquant une charge à une poutre, celle-ci se déforme de différentes manières selon le type de chargement.

Nous présentons ci-dessous (Tableau 4.2) certains modèles de chargement de poutres les plus fréquents.

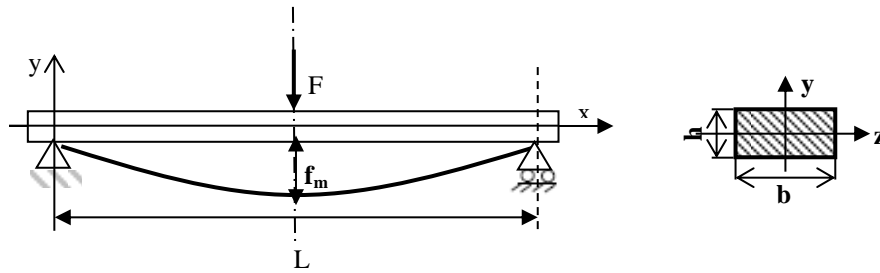
**Tableau 4.2** Présentation de quelques types de déformées [1]

Modèles de poutres	Schéma de montage	Schéma de calcul
Poutre reposant sur deux appuis		
Poutre encastrée à une extrémité et libre à l'autre extrémité		
Poutre encastrée à une extrémité et reposant à l'autre extrémité sur un appui simple		
Poutre hyperstatique encastrée à ses deux extrémités		

### 4.3.2 Calcul de la flèche maximale

Nous prenons dans ce paragraphe un exemple de poutre afin de calculer la flèche maximale. Théoriquement la déformée est le résultat d'une application de chargement sur la poutre.

Le cas étudié est celui d'une poutre dont la charge est appliquée au centre de celle-ci (Voir figure 4.2).



**Figure 4.2** Schéma de calcul

Ainsi la flèche maximum se calcule en utilisant les lois statiques de la RDM. L'étudiant sera en mesure de démontrer ces différentes relations (Cas de figure 4.2).

$$f_m = \frac{F.l^3}{48.E.I_z} \quad (4.1)$$

Avec :

$$I_z = \frac{b.h^3}{12}$$

$I_z$  : moment d'inertie de la section (s) par rapport à l'axe z.

$l$  : distance mesurée entre les appuis

$F$  : force appliquée au centre la poutre

$f_m$ : flèche maximale

$b$  : largeur de la poutre

$h$  : épaisseur de la poutre

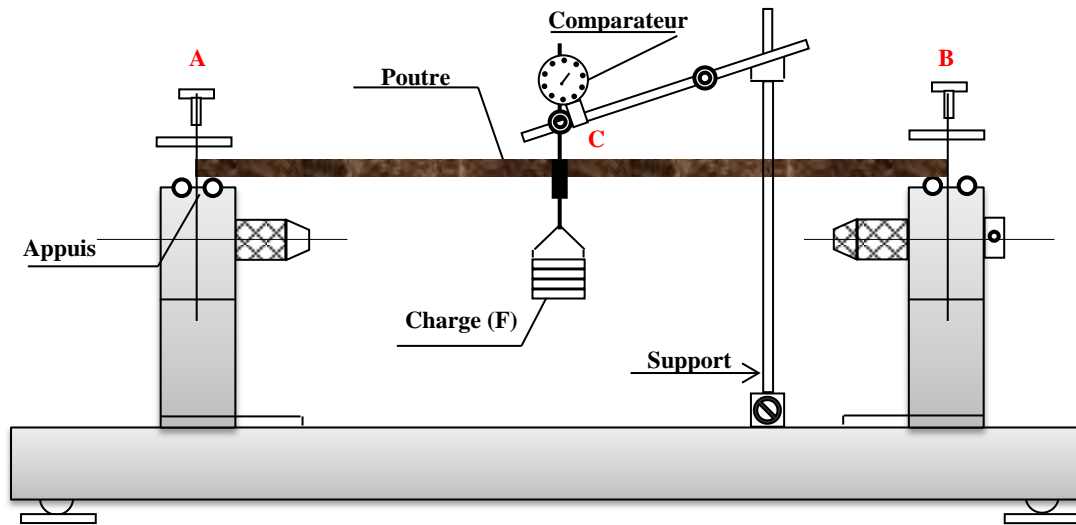
$E$  : Module d'élasticité.

#### **4.4 Partie expérimentale**

Un dispositif représenté sur la figure (4.3) et disponible au niveau du laboratoire RDM permet de réaliser l'essai de flexion simple sur une poutre reposant sur deux appuis A et B et soumise en C à une force  $\vec{F}$  (exprimé en Newton).

L'essai consiste à mesurer les déplacements d'une poutre causés par l'effort de flexion. Le comparateur (dispositif permettant la mesure les déplacements) est positionné sur le banc d'essai permettant ainsi la mesure des variations suivant y (appelée flèches) de la fibre moyenne.

Cet essai de flexion s'effectue par l'enregistrement de la flèche maximale en fonction de la charge appliquée (F).



*Figure 4.3 Présentation schématique du banc d'essai de la flexion et de la torsion*

#### 4.4.1 Mode opératoire

Pour réaliser l'essai de flexion et pour une bonne étude expérimentale du phénomène, un matériel se trouvant au sein du laboratoire RDM est préparé pour les besoins de l'essai.

Les essais de flexion vont être effectués sur des éprouvettes de quatre matériaux (acier, Aluminium, Bronze et cuivre) avec des configurations multiples, ainsi l'étudiant aura à sa portée :

1. Le Banc d'essai de Flexion
2. 04 Éprouvettes rectangulaire (acier, Bronze, Cuivre, Aluminium) de même sections et longueurs.
3. 05 Éprouvettes rectangulaire en Aluminium de différentes largeurs.
4. 04 Éprouvettes rectangulaire en Aluminium de différentes épaisseurs.
5. 04 Éprouvettes rectangulaire en Aluminium de différentes longueurs.
6. 01 Comparateur pour mesurer le déplacement.
7. 01 Règle pour la mesure des différentes longueurs.

En plaçant l'éprouvette dans le banc d'essai, et la masse dans la position indiquée (Voir figure 4.4), l'opérateur pourra lire la valeur de la flèche directement sur le comparateur accroché au banc d'essai.



**Figure 4.4** Banc d'essai de flexion et de torsion

**NB :** Les appuis offrent différentes possibilités de liaisons permettant d'étudier les montages isostatiques ou hyperstatiques.

#### 4.4.2 Travail demandé

Les manipulations qui seront adoptées dans cet essai :

##### 1 *Influence de la matière*

La première manipulation concerne l'étude de *l'influence de la matière* sur le comportement de la pièce : il s'agit de l'application d'une charge de 10N au centre de l'éprouvette et la mesure de la flèche maximale ( $f_m$ ) sur le comparateur, l'étudiant par la suite devra remplir le tableau (4..3).

L'analyse de l'influence de la charge sur le comportement de la barre se fera par la mesure de la flèche ( $f_m$ ) au point (C) et ceci pour quatre barres géométriquement identiques et de matériaux différents (Acier, Aluminium, Cuivre, Bronze) et à partir de la relation théorique (4.1) donnant la flèche maximale causée par l'application de la charge au centre de la pièce, l'opérateur pourra déduire la valeur du module d'élasticité pratique ( $E_p$ ).

Nous mettons à la disposition de l'étudiant les valeurs du module d'élasticité pratique ( $E_{thé}$ ) (Voir Tableau 4.3), ainsi il pourra comparer ces différentes valeurs avec les valeurs usuelles données.



**Tableau 4.3 Influence de la variation de la matière**

<i>Matériaux</i>	$(f_m)_{th}$ [mm]	$(f_m)_p$ [mm]	$E_p$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{th}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Al				70 000
Cu				125 000
Acier				210 000
Bronze				80 000

## 2 Influence des paramètres géométriques

De même, la deuxième manipulation se fonde sur l'étude de l'influence des paramètres géométriques sur la flèche, on parle ici de la largeur (b), la longueur (l) et épaisseur (h) de la poutre. L'analyse se fait sur des barres en aluminium.

- a. En premier lieu, *l'influence de la largeur* sera étudiée et ceci en reportant les différents résultats liés à la flèche maximum sur le tableau (4.4).

Nous ferons les mesures pour les largeurs suivantes : 10mm, 15mm, 20mm, 25mm, 30mm. Chacun des résultats sera comparé avec la valeur théorique déduite de la formule 4.1.

**Tableau 4.4 Influence de la variation de la largeur (b)**

<b>Section (b x h) (mm<sup>2</sup>)</b>	10x5	15x5	20x5	25x5	30x5
<b>1/b (mm)</b>					
<b>f<sub>m</sub> (exp) (mm)</b>					
<b>f<sub>m</sub> ( thé) (mm)</b>					

- b. La troisième étude portera sur *l'influence de l'épaisseur* sur les résultats du comportement de l'éprouvette (Les éprouvettes utilisées pour cet essai sont en aluminium). Les différents résultats liés à la flèche maximum seront reportés sur le tableau (4.5).

Nous ferons les mesures pour les épaisseurs suivantes : 4mm, 5mm, 6mm, 8mm. Chacun des résultats sera comparé avec la valeur théorique déduite de la formule 4.1.

**Tableau 4.5 Influence de la variation de l'épaisseur ( $h$ )**

Section (bxh) (mm <sup>2</sup> )	20x4	20x5	20x6	20x8
$1/h^3$				
$f_m$ (exp)				
$f_{(m)thé}$				

- c. La 4ème étude portera sur l'analyse de l'influence de la longueur entre appuis de la poutre sur les résultats du comportement de cette dernière.

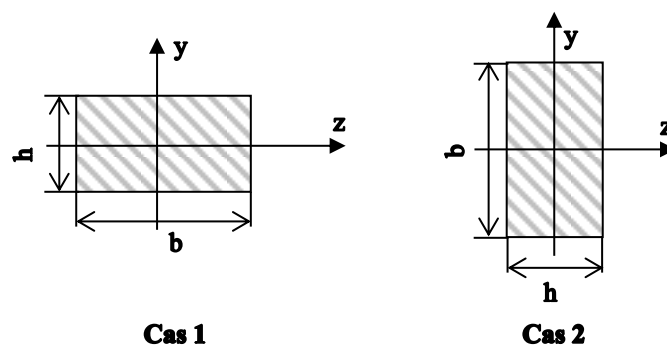
De même, les différents résultats liés à la flèche maximale seront réunis dans le tableau (4.6). Les mesures seront faites pour les longueurs suivantes : 200mm, 300mm, 400mm, 500mm et seront comparés avec les résultats théoriques déduite de la formule 4.1.

**Tableau 4.6 Influence de la variation de la longueur ( $l$ )**

Longueur $l$ [mm]	200	300	400	500
$f_m$ (exp)				
$f_{(m)thé}$				

### 3 Influence du moment d'inertie ( $I_z$ ):

Le but de cette dernière manipulation est l'étude de l'impact de l'inertie sur la valeur de la flèche. Pour cela deux configurations vont être adoptées : Cas 1 et Cas 2 (Cf. Figure 4.5). Ainsi l'étudiant pourra remplir le tableau 4.7 et déduire la flèche maximale théorique pour une éventuelle comparaison.

**Figure 4.5 Influence du moment d'inertie**

**Tableau 4.7 Influence de la variation du moment d'inertie**

	Cas 1	Cas 2
$I_z [mm^4]$		
$f_m (exp) [mm]$		
$f_m (thé) [mm]$		

A la fin de cet essai, et afin de comprendre correctement le phénomène de flexion ainsi que les différents facteurs influençant cette sollicitation, l'ensemble des points suivants sera exploité par l'étudiant :

1. Le traçage des courbes  $f_m = f(E_{th})$ ,  $f_m = f(1/b)$ ,  $f_m = f(1/h^3)$ ,  $f_m = f(l)$ .
2. Interprétations des résultats.
3. Comparaison des résultats trouvés expérimentalement avec ceux théoriques.

## 5 ESSAI DE TORSION

### 5.1 Introduction

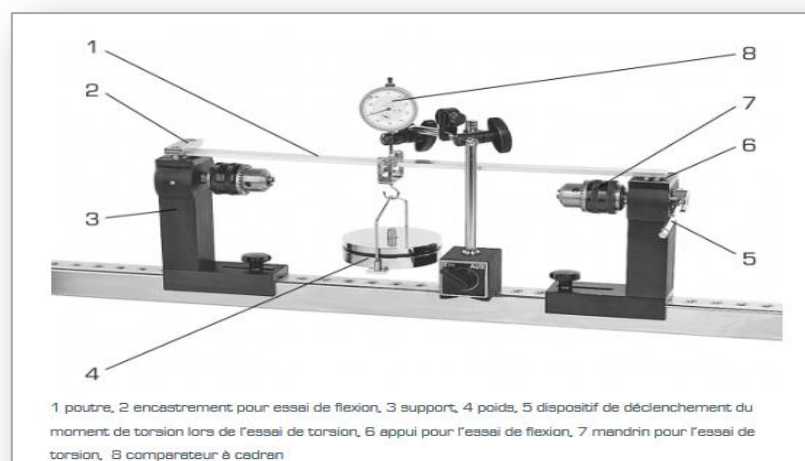
La flexion et la torsion constituent des sollicitations typiques pour les composants des structures. Les contraintes et déformations qui en résultent peuvent entraîner une défaillance. Le choix de différents facteurs tel que : le matériau, la section, la longueur et le type d'appui peut avoir une influence capitale sur la stabilité des structures.

Le présent document étudie l'influence de ces facteurs sur la déformation d'une barre soumise à une sollicitation de torsion.

Si de tous les efforts internes seul le moment  $M_x$  ( $M_t$ ) est présent, il provoque une torsion.

Ce type de sollicitation est très répandu dans les structures de mécanique. L'analyse des éléments des structures de génie civil soumis à la torsion est moins fréquente car l'existence du moment de torsion entraîne que les forces extérieures doivent obligatoirement appartenir à un plan perpendiculaire à celui de l'élément, et cela n'est pris en compte que lors de l'analyse des structures en 3-dimensions, comme par exemple l'installation de tuyauterie d'un système de refroidissement d'une centrale nucléaire.

Lors de l'application de sollicitation par un moment de torsion, les barres se tordent autour de leur axe. La déformation de torsion est aussi décrite par son angle de torsion. Selon la loi de Hooke, l'angle de torsion est proportionnel au moment de torsion extérieur (Voir fig. 3.4).



**Figure 5.1.** Banc d'essai de torsion et flexion [26]

## 5.2 But pédagogique de l'essai de Torsion

L'essai de torsion simple a pour but de déterminer la variation de l'angle de rotation d'une barre causée par l'application d'une charge en extrémité de cette barre développant ainsi un moment appelé moment de torsion.

En variant les paramètres de la barre, l'angle de torsion sera mesuré expérimentalement et comparé à la valeur théoriquement calculée.

Cet essai de torsion permet aux étudiants d'assimiler les notions suivantes :

- Comprendre le phénomène de Torsion;
- Déterminer expérimentalement l'angle de torsion.
- Comparer les résultats expérimentaux à ceux théoriques.
- Étudier l'impact de la variation de la longueur, la section des barres et leurs matériaux sur l'angle de Torsion.

## 5.3 Partie théorique

### 5.3.1 Définition

Une poutre est sollicitée en torsion simple lorsque celle-ci est soumise à ses extrémités à des sollicitations dont les torseurs associés se réduisent à deux torseurs couplés opposés dont les moments sont parallèles à l'axe du cylindre.

Le torseur s'exprime ainsi par :  $\{T\} : \left\{ \begin{array}{c|c} 0 & Mt \\ \hline 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 \end{array} \right\}$

### 5.3.2 Calcul de l'angle de torsion

Les déplacements des sections d'une poutre en torsion sont caractérisés par la relation des sections droites autour de l'axe neutre (x).

Soit une poutre à section circulaire encastree à une extrémité (Voir figure 5.1), chargée à l'autre extrémité par une force (P) développant un moment de torsion.

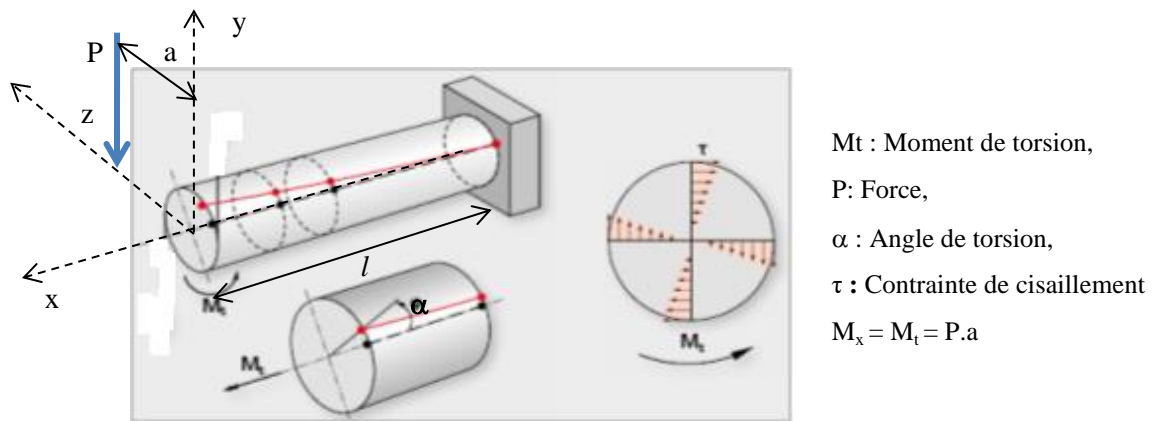


Figure 5.2. Torsion de poutre [27]

On se propose de mesurer expérimentalement l'angle de torsion, ainsi nous pourrions le comparer avec le calcul théorique.

L'angle de torsion est calculé par la formule qui suit :

$$\hat{\alpha} = \frac{M_t l}{G \cdot I_0} \quad (5.1)$$

**Avec :**

$\hat{\alpha}$ : Angle de torsion (en radian).

$M_t$  : moment de torsion  $\Rightarrow M_t = P.a$  ( $P$  étant la charge appliquée à l'extrémité de la poutre et  $a$  : le bras de levier) (figure 5.2).

$l$  : Longueur de la poutre

$G$  : Module d'élasticité transversal (module de cisaillement)s.

$I_0$  : Moment d'inertie polaire. ( $I_0 = \frac{\pi a^4}{32}$ )

### 5.3.3 Relation entre le moment de torsion $M_t$ et l'angle de torsion unitaire

Il existe un angle unitaire de torsion appelée ( $\theta$ ) tel que :  $\theta = \alpha / l$  (exprimé en radian/mm)

Ainsi la relation (5.1) devient :

$$M_t = G \cdot \theta \cdot I_0 \quad (5.2)$$

### 5.3.4 Contrainte de torsion maximale $\tau_M$

La contrainte de torsion maximale est la contrainte de cisaillement (Voir figure 5.2), celle-ci peut être exprimée en fonction de l'angle unitaire de torsion ( $\theta$ ) et du rayon de la section droite ( $r$ ) (Figure 5.3) :

$$\tau_M = G \cdot \theta \cdot r \quad (5.3)$$

Cette relation peut s'écrire sous une autre forme :

$$\tau_M = G \cdot \gamma_t$$

Avec :  $\gamma_t = \theta \cdot r$  est le glissement relatif

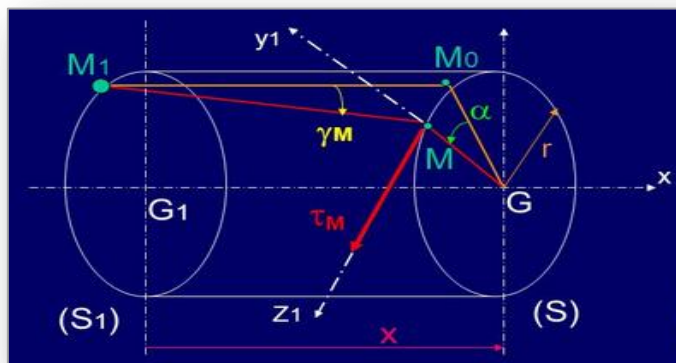


Figure 5.3. Phénomène de torsion [27]

### 5.3.5 Courbe de torsion

En rapportant les valeurs du moment de torsion en fonction de l'angle de torsion unitaire  $\theta$  sur un graphe, le résultat suivant sera obtenu (Voir figure 5.4).

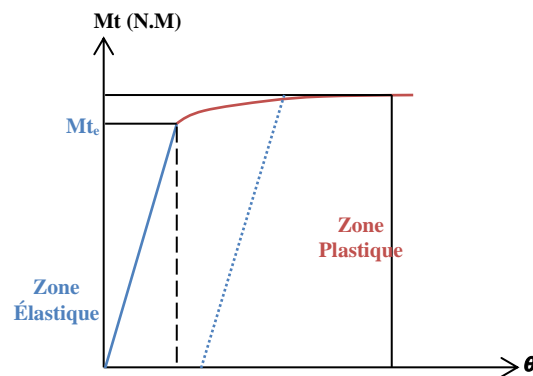


Figure 5.4. Courbe de Torsion [27]

Comme pour le cas de l'essai de traction, en analysant la courbe de torsion, les résultats suivants seront déduites (RDM bureau) :

- Zone OA : c'est la zone des déformations élastiques. Si l'on réduit la valeur du moment jusqu'à une valeur nulle, l'éprouvette retrouve sa forme initiale.

Dans cette zone, *l'angle  $\alpha$  de torsion est proportionnel au couple appliqué*. Les sections droites et planes de l'éprouvette restent droites et planes pendant l'essai.

- Zone AB : appelée zone plastique, les déformations augmentent rapidement et deviennent permanentes. L'éprouvette ne retrouve plus son état initial.

#### 5.4 Partie expérimentale

Un dispositif mis à la disposition des étudiants permet d'effectuer un essai de torsion sur une barre encastrée à son extrémité et soumise à un torseur couple à son extrémité. Avec les différents résultats obtenus l'opérateur sera en mesure de tracer le graphe du moment appliqué en fonction de l'angle de torsion unitaire d'une section droite.

L'essai de torsion a pour but de déterminer la variation du moment de torsion en fonction de l'angle de torsion trouvée expérimentalement.

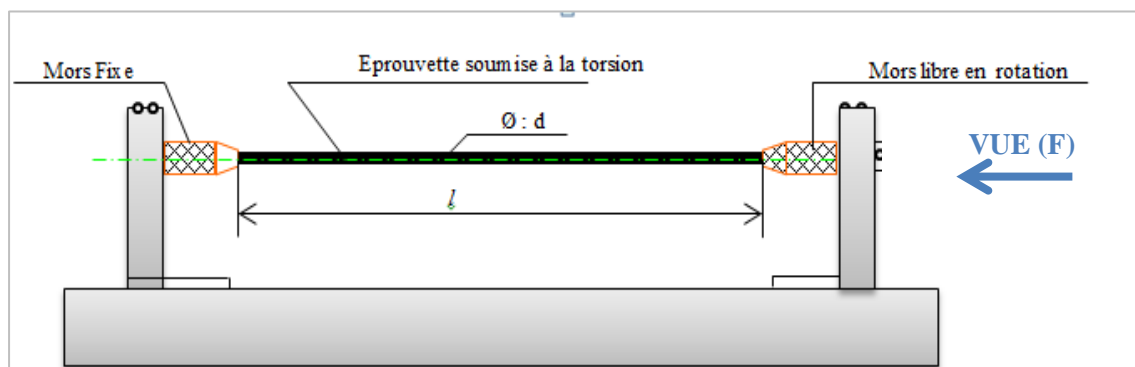


Figure 5.5. Schéma du Banc d'Essai



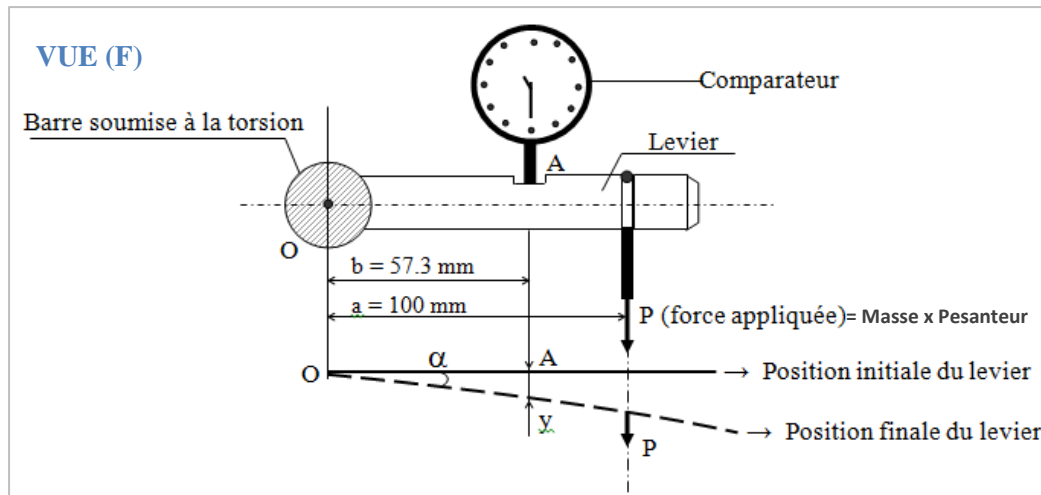


Figure 5.6. Vue (F) du banc d'essai de torsion

Sous l'effet de la force (P) le levier tourne autour du point (O) et imprime en (A) un déplacement *curviligne* assimilé au déplacement *rectiligne vertical* (y) mesuré grâce au comparateur. (Figure 5.6)

L'angle de torsion :

$$\alpha \cong \operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{b} \quad (5.4)$$

#### 5.4.1 Mode opératoire

Les essais seront réalisés sur un banc de torsion, avec le matériel spécifique à cet essai se trouvant au sein du laboratoire, il s'agit de :

- 1 Quatre éprouvettes (Acier, Cuivre, Bronze, Aluminium) de longueur totale  $L = 340\text{mm}$ , de longueur soumise à la torsion  $l = 300\text{mm}$  (longueur entre encastrement) et de diamètres ( $d = 10\text{mm}$ ) utilisées pour l'analyse de l'influence de la matière sur la résistance de ces barres,
- 2 Quatre éprouvettes de diamètres différents pour analyser l'influence du diamètre de la poutre sur la déformation de celle-ci et en dernier,
- 3 Quatre éprouvettes de longueurs différentes afin d'étudier l'influence de la longueur vis-à-vis le comportement de la poutre.

Pour cela l'opérateur pourra suivre les étapes suivantes :

- 1 Placer l'éprouvette dans le banc
- 2 Placer la masse dans la position indiquée.
- 3 La lecture du déplacement (y) se fera directement sur le comparateur associé au banc.

### 3.1.1 Travail demandé

Comme pour les essais cités plus haut, un travail sera demandé de la part de l'étudiant pour une assimilation correcte et une rédaction uniforme des différents comptes rendus:

Les manipulations qui seront adoptées dans cet essai :

#### 1. Étude de l'influence de la matière de la barre sur l'angle de torsion

De même que pour l'essai de flexion, la première manipulation dans l'essai de torsion portera sur l'étude de *l'influence de la matière* sur le comportement de la pièce : il s'agit de l'application d'une charge à l'extrémité de poutre, ainsi l'opérateur peut lire la valeur du déplacement causé par le moment de torsion sur le cadran du comparateur et comme la mesure de l'angle de torsion ne se fera pas directement sur le banc d'essai, la valeur de cet angle sera déduite grâce à la relation (5.4).

L'essai dans cette manipulation consistera à étudier le cas de quatre poutres de quatre matériaux différents : L'Aluminium, le Cuivre, l'Acier et le Bronze de longueur total  $L=340\text{mm}$  et de longueur soumise à la torsion de  $l = 300\text{mm}$  (longueur entre encastrement). L'étudiant par la suite devra remplir le tableau (5.1) pour trouver  $G$  en fonction de l'équation (5.2).

Nous mettons à la disposition de l'étudiant les valeurs du module d'élasticité transversal ( $G_{\text{thé}}$ ) (Voir Tableau 5.1), ainsi il pourra comparer ces différentes valeurs avec les valeurs usuelles données.

**Tableau 5.1 Influence de la variation de la matière**

	Y [mm]	$\alpha$ [°]	$\theta$ [°]	$G_{\text{pratique}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{\text{théorique}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Aluminium					28 000
Cuivre					40 000
Acier					80 000
Bronze					38 500

#### 2. Étude de l'influence des paramètres géométriques de la barre

De la même manière, la deuxième manipulation se fonde sur l'étude de l'influence des paramètres géométriques sur l'angle de torsion, on parle ici du diamètre et de la longueur de la poutre.

### a. Influence du diamètre

On prend des poutres de même matériau (Acier), et de même longueur et nous ferons les mesures pour les diamètres suivants : 5mm, 6mm, 7mm, 8mm et 10mm. Les résultats trouvés expérimentalement du module seront comparés avec ceux théoriques déduits de la formule (5.1).

**Tableau 5.2 Influence de la variation du diamètre**

Diamètres (mm)	Y [mm]	$\theta$ [°]	$G_{\text{pratique}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{\text{théorique}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
5				
6				
7				
8				
10				

b. La 2<sup>ème</sup> étude portera sur l'analyse de l'influence de la longueur entre appuis de la poutre sur les résultats du comportement de celle-ci.

Les différents résultats liés à l'angle de torsion seront regroupés dans le tableau (5.3). Les mesures seront prises pour les longueurs suivantes : 200mm, 300mm, 400mm, 500mm et seront comparés avec les résultats théoriques déduite de la formule (5.2).

**Tableau 5.3 Influence de la variation de la longueur**

Longueurs (mm)	$\theta$ [°]	Y [mm]	$G_{\text{pratique}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{\text{théorique}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
200				
300				
400				
500				

De même, que pour les autres essais et afin d'étudier correctement l'essai de torsion ainsi que les différents facteurs influençant cette sollicitations, l'ensemble des points suivants sera exploité par l'étudiant :

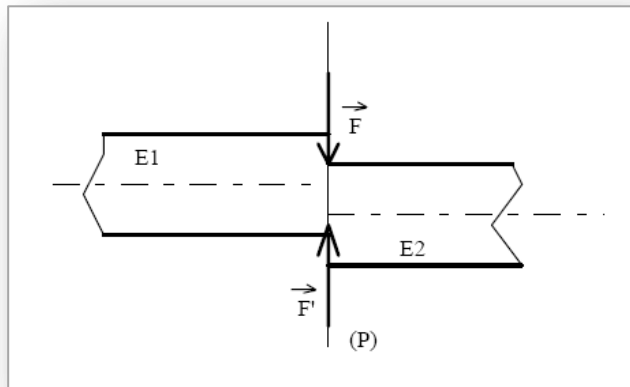
1. Traçage de la courbe de torsion  $M_t=f(\theta)$ .
2. Traçage des courbes :  $\theta=f(G)$ ,  $\theta=f(D)$  et  $\theta=f(l)$
3. Comparaison des résultats expérimentaux avec les calculs théoriques.
4. commenter les écarts.
5. Vérification de la condition de résistance du matériau.
6. Conclusion sur la résistance des différents matériaux.

## 6 CISAILLEMENT

### 6.1 Introduction

Le concept de cisaillement est utilisé dans plusieurs domaines.

On dit qu'une poutre subit une sollicitation de cisaillement simple lorsqu'elle est soumise à deux forces de liaison égales et directement opposées dont le support est contenu dans un plan (P) perpendiculaire à la ligne moyenne. Sous l'action de ces deux forces la poutre tend à se séparer en deux tronçons E1 et E2 glissant l'un par rapport à l'autre dans le plan de section droite (P). (Voir Figure 6.1).



**Figure 6.1** Concept du cisaillement [23]

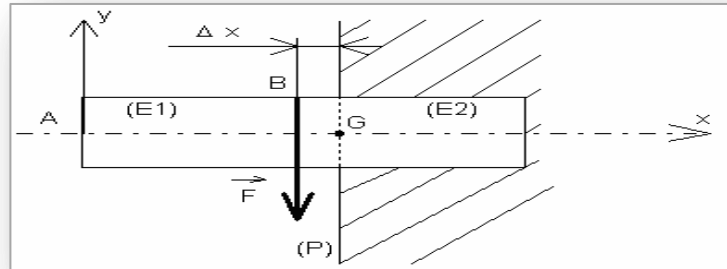
### 6.2 Partie théorique

#### 6.2.1 Définition

Considérons une poutre (E) parfaitement encastree dans un « mur » et appliquons-lui un effort de cisaillement F le plus près possible du plan (P).

Cet effort F sera malgré tout situé à une distance  $\Delta x$  du plan (P) d'encastrement (voir figure 6.2). On se rapproche des conditions du cisaillement réel, avec  $\Delta x$  très petit.

En réalité, la poutre subit une sollicitation composée cisaillement et flexion. Cette sollicitation est appelé *cisaillement Simple*. Néanmoins,  $\Delta x$  étant très petit, on considère la poutre sollicitée à du cisaillement pur.



**Figure 6.2.** Schématisation du phénomène de cisaillement [1]

### 6.2.2 Contrainte de cisaillement

Une force agissant dans le plan de la section droite d'une barre est appelée *effort tranchant* (T). Cet effort se distribue sur la section pour générer des contraintes tangentielles de cisaillement ( $\tau$ ).

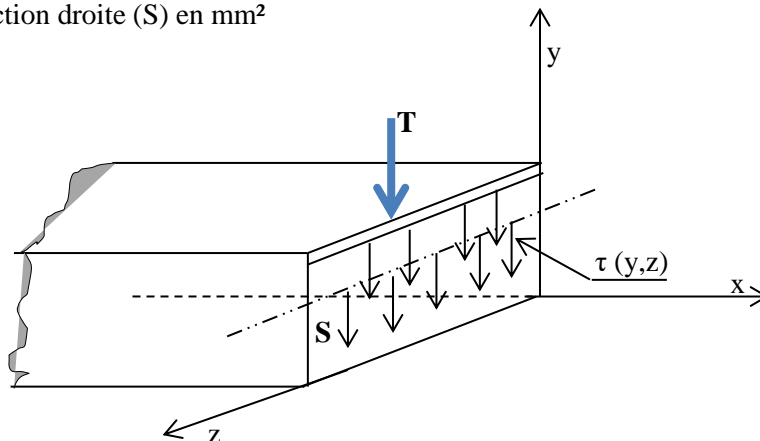
En général, cette distribution se fait suivant une loi générale  $\tau(y,z)$  mais en considérant une distribution uniforme ( $\tau = \text{constante}$ ) (Voir figure 6.3), on pourra définir la contrainte  $\tau$  dans une section droite (s) par la relation suivante :

$$T = \int \tau(y,z) ds \rightarrow \tau = \frac{T}{S} \quad (6.1)$$

$\tau$ : contrainte tangentielle de cisaillement en MPa

T: effort tranchant en Newton.

S : aire de la section droite (S) en mm<sup>2</sup>



**Figure 6.3** Contrainte de cisaillement [1]

### 6.2.3 Relation entre contrainte et déformation

Le glissement est relié au module d'élasticité transversal  $G$  et à l'angle de glissement unitaire  $\gamma$  (Figure 6.4) par:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (6.2)$$

Avec :

$\gamma$  : Distorsion angulaire :  $\gamma = \Delta y / \Delta x$  ou appelé glissement relatif.

$G$  : Module d'élasticité transversal ou module de Coulomb en  $N/mm^2$  ou MPa.

On a :

$$G = \frac{E}{2(1 - \nu)}$$

L'expérience montre que pour l'acier de construction, la résistance limite de cisaillement vaut, environ, 0,5 à 0,6 de la résistance limite de traction.

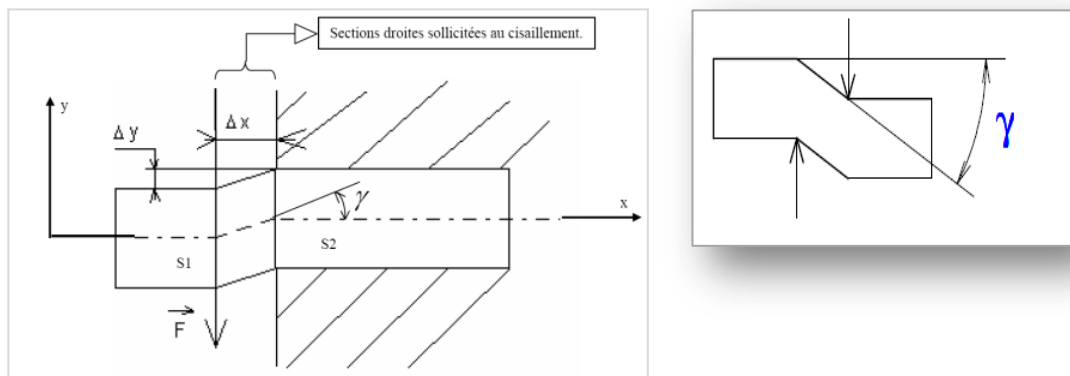
$$\gamma = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (6.3)$$

Avec :

$\Delta x$ : Différence entre diamètre interne de la pièce et le diamètre de l'éprouvette voir Figure 6.4.

$\Delta y$  : déplacement vertical mesuré par le comparateur.

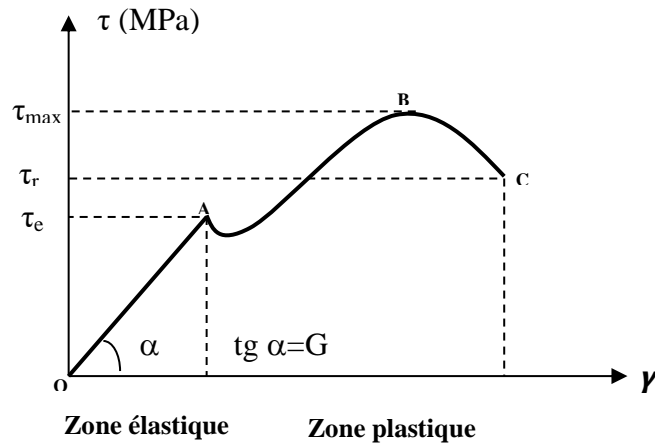
$\gamma$  : angle de glissement en radian ou appelé glissement relatif (Voir figure 6.5)



**Figure 6.4** Définition de l'Angle de glissement

### 6.2.4 Diagramme contrainte déformation

On peut établir expérimentalement la relation entre la contrainte tangentielle de cisaillement ( $\tau$ ) et la déformation angulaire ( $\gamma$ ). Le diagramme est alors analogue à celui trouvé dans l'essai de traction.



**Figure 6.5.** Diagramme contrainte- déformation

$\tau_e$  : La résistance limite élastique au cisaillement.

$\tau_r$  : La résistance à la rupture au cisaillement.

Grace à cette courbe, on définit deux zones :

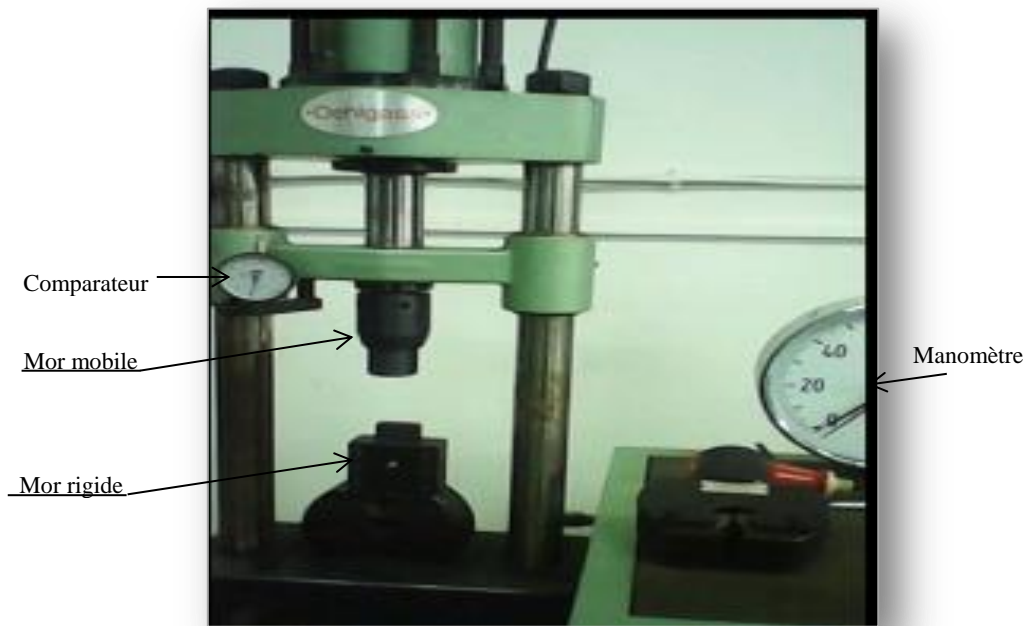
- **Zone OA** : c'est la zone des déformations élastiques. Si l'on réduit la valeur de F jusqu'à une valeur nulle, l'éprouvette retrouve sa forme initiale.
- **Zone ABC** : c'est la zone des déformations permanentes. Si l'on réduit la valeur de F jusqu'à une valeur nulle, l'éprouvette ne retrouve plus sa forme initiale. Les déformations sont dites plastiques.

### 6.3 Partie expérimentale

L'essai de cisaillement fourni une courbe similaire à celle de l'essai de traction, avec une zone de déformation de cisaillement élastique et une zone de déformation plastique.

Sur la même machine de traction, l'essai de cisaillement se réalise en changeant les mors de la machine (Voir figure 6.6).

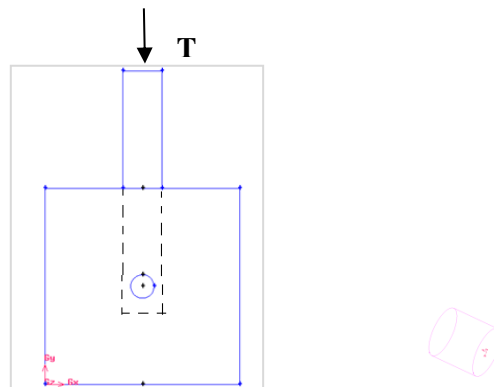
La procédure est la même que celle de l'essai de traction, la force est augmentée jusqu'à la rupture de l'éprouvette, ainsi nous pourrions dresser la courbe contraintes-déformation comme il a été décrit plus haut.



**Figure 6.6** Machine de cisaillement manuelle

### 6.3.1 Mode opératoire

Le mode opératoire est le même que celui effectué pour l'essai de traction, sauf que les mors dans la manipulation seront modifiés par ceux spécifiques à l'essai de cisaillement. L'éprouvette choisie est modélisée sur la figure 6.7.



**Figure 6.7** Éprouvette pour essai de cisaillement

L'essai est réalisé en notant les allongements à l'aide d'un comparateur à chaque augmentation de la force (voir tableau 7.1).



**Tableau 7.1** Enregistrement des allongements en fonction des charges appliquées

<b>T</b>						
$\tau = \frac{T}{2S}$						
$\gamma = \frac{\Delta y}{\Delta x}$						
<b>G</b>						

Les essais de cisaillement permettent de déterminer les propriétés suivantes :

- La résistance limite élastique au cisaillement notée :  $\tau_e$
- La résistance à la rupture au cisaillement notée :  $\tau_r$

Ces deux propriétés sont obtenues en traçant la courbe contrainte- déformations.

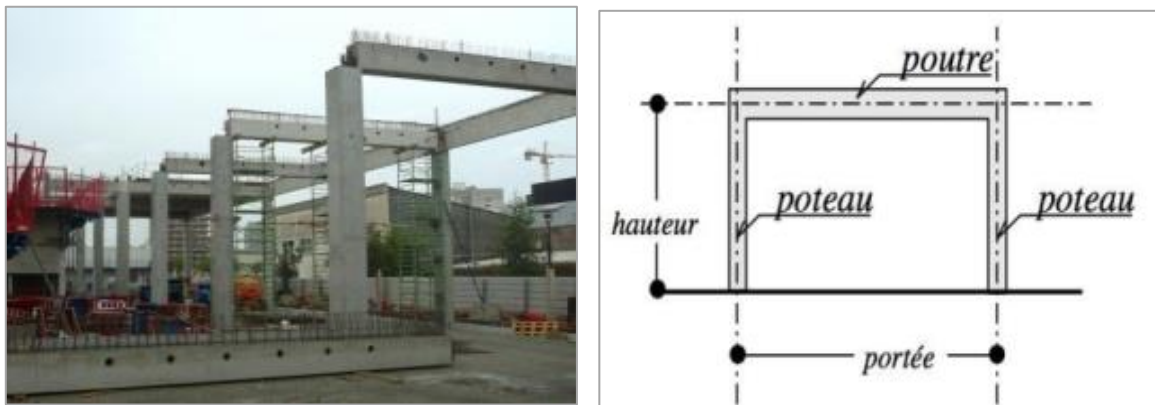
### 6.3.2 Travail demandé

1. Construire la courbe caractéristique de traction dans le repère  $(\tau, \gamma)$ .
2. Déterminer les caractéristiques du matériau :
  - Le Module d'élasticité transversale (G),
  - La Limite élastique  $\tau_E$ ,
  - La Contrainte maximale  $\tau_{max}$
  - La Contrainte de rupture ( $\tau_R$ ).
3. Comparer les résultats trouvés avec les caractéristiques théoriques. Commenter les écarts.
4. À la fin on demande de formuler tous les résultats et réponses dans un rapport avec les remarques et les conclusions adaptées.

## 7 ESSAI DE PORTIQUES

### 7.1. Introduction

La présente partie s'intéresse à l'étude de portiques. De nombreux exemples de portiques en béton armé ou précontraint de construction témoignent des larges possibilités du béton pour répondre à ce principe structurel. Un Portique est un élément de construction rigide, composé de deux poteaux et d'une poutre en bois, en acier ou en béton armé. Sa fonction structurelle est de porter les charges qui s'appliquent sur lui en les déviant vers ses fondations.



*Figure 7.1. Exemple de Portiques*

### 7.2. Partie théorique

Nous citons ci-après quelques notions et définitions liées aux portiques ;

#### 7.2.1 Les différentes types d'appuis (ou liaisons)

Les appuis sont des obstacles, empêchant ou limitant la liberté de mouvement du système matériel en ces endroits.

Tout mouvement entravé par la liaison entraîne l'apparition d'une réaction d'appui (ou action de liaison) dans la direction du mouvement bloqué. Deux cas se présentent :

- A tout mouvement de translation entravé dans une direction donnée correspond une force de liaison ou action d'appui ayant cette direction ;
- A tout mouvement de rotation autour d'un axe donné entravé correspond un torseur de forces de liaison équivalent à un couple.

### 1. Appui simple glissant

Un solide  $S_1$  est en appui simple sur un solide  $S_2$  (Figure 7.2) , si le contact entre  $S_1$  et  $S_2$  est ponctuel et permet deux degrés de liberté de  $S_1$  par rapport à  $S_2$  dans le plan :

- une translation d'axe  $A_x$  :  $U_x$
- une rotation d'axe  $A_z$  :  $M_z$

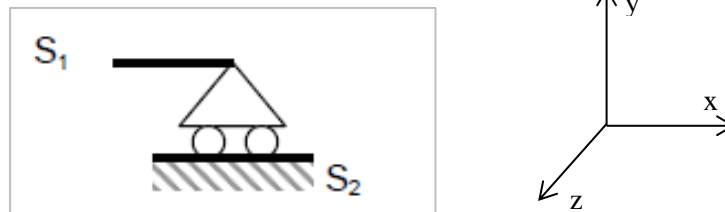


Figure 7.2. Appui simple glissant

La pointe du triangle symbolise le fait que l'appui est ponctuel, permettant ainsi la rotation autour de la pointe du triangle, tandis que les deux rouleaux signifient que ce dernier est glissant.

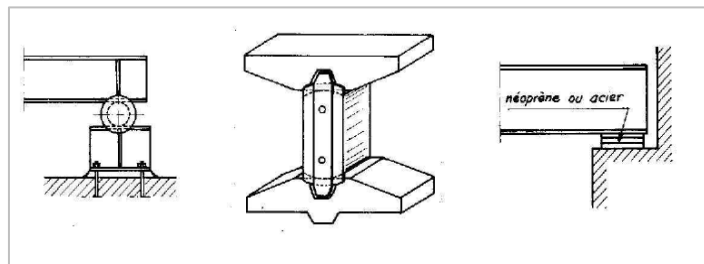
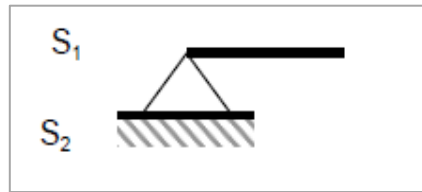


Figure 7.3. Exemples d'appuis simples glissants

### 2. Appui double (ou rotule (3D) ou articulation (2D))

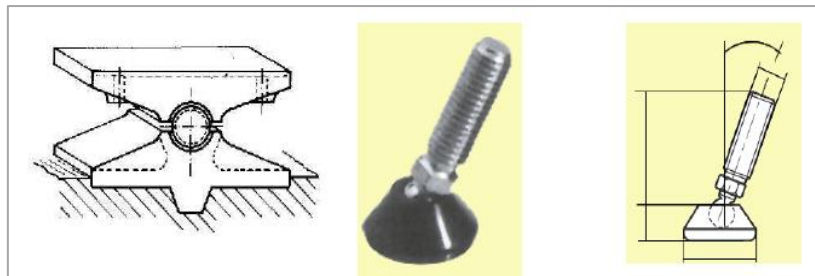
Cet appui offre un degré de liberté en moins : l'appui est toujours ponctuel, mais il ne permet plus que la rotation, autour de l'axe  $A_z$ , du solide  $S_1$  par rapport au solide  $S_2$ .

La réaction d'appui de  $S_2$  sur  $S_1$  a donc deux composantes, une horizontale et une verticale : L'appui double est appelé également rotule ou articulation,



**Figure 7.4.** Appui double (Vue 2D)

Dans la figure ci-dessous (Figure 7.5), nous présentons quelques exemples d'appuis doubles et rotules.



**Figure 7.5.** Exemple d'appuis doubles (Vue 3D)

### 3. Encastrement

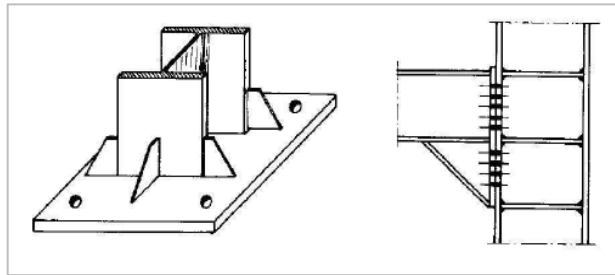
L'encastrement ne permet plus aucun degré de liberté de  $S_1$  par rapport à  $S_2$ . La réaction d'appui de  $S_2$  sur  $S_1$  a alors trois facteurs :

Une force horizontale - une force verticale - un Moment.



**Figure 7.6.** Encastrement

Dans la figure ci-dessous (Figure 7.7), nous présentons quelques exemples d'encastrement.



**Figure 7.7.** Exemples d'Encastrement

### 7.2.2 Définitions des systèmes Isostatique et Hyperstatique

Considérons une structure plane, soumise à un chargement extérieur. Cette structure a des appuis qui ont au total ( $r$ ) composantes de réactions à déterminer.

La structure étant plane, on dispose de trois équations pour écrire l'équilibre (Equations d'équilibre) global de la structure et pour déterminer les réactions d'appuis.

Trois cas se présentent alors : (On pose ( $n$ ) tel que :  $n = r - 3$ )

- 1 Si  $n = 0$  alors la structure est dite isostatique, l'écriture des équations de la statique suffit seule à déterminer les réactions d'appuis.
- 2 Si  $n > 0$ , la structure est dite hyperstatique d'ordre  $n$  ; l'écriture des équations d'équilibre ne suffit pas seule à déterminer les réactions d'appuis. Il faudra écrire d'autres équations.
- 3 Si  $n < 0$ , la structure est un mécanisme, elle n'est pas stable.

### 7.3. Partie expérimentale

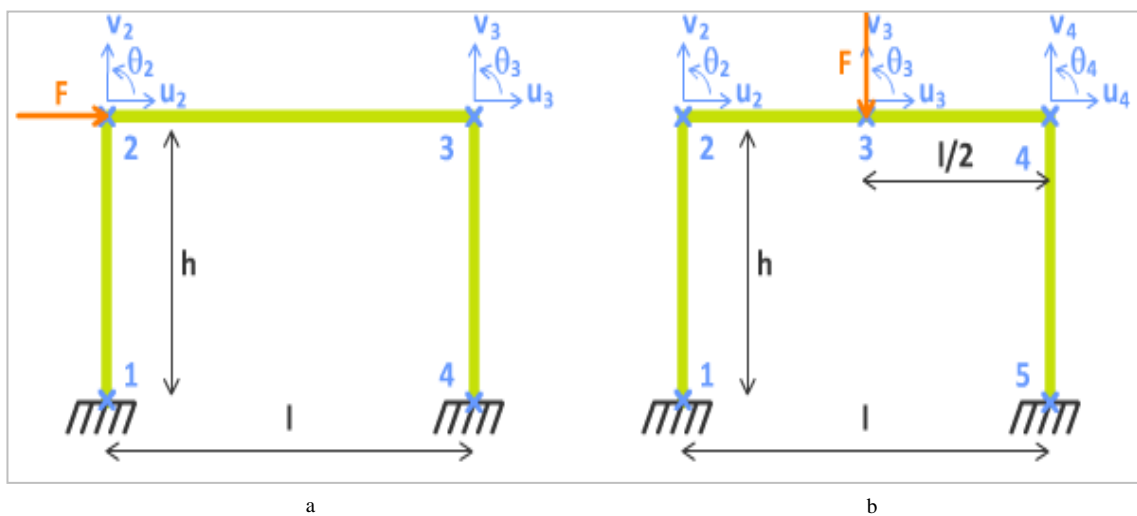
Le principe de cet essai est de familiariser l'étudiant au protocole et dispositif expérimental des différents portiques qui existent, pour cela deux études se présentent :

#### 7.3.1 Étude du portique Isostatique :

Le principe de cette première manipulation est énuméré comme suit :

1. Mettre en place un portique isostatique.
2. Mesurer les dimensions du portique et sa section.
3. Effectuer la mise à zéro du comparateur.
4. Appliquer deux types de chargements différents :
  - Une charge horizontale de 20 N appliquée à l'extrémité gauche du poteau (schématisé sur la Figure 7.8.a),

- Une charge Verticale de **20 N** appliquée au centre de la poutre (charge de vent). (schématisé sur la Figure 7.8.b).
2. Mesurez le déplacement horizontal au niveau de l'appui simple à l'aide du comparateur.
  3. Déterminez expérimentalement la charge du vent qui provoque le basculement du portique : Pour cela appliquer une charge horizontale de **20N** au sommet du poteau puis augmenter progressivement cette charge jusqu'à obtenir *le basculement* du portique.
  4. Proposer une solution pour éviter le basculement du portique sous l'effet du vent. En déduire le sens et l'intensité de la réaction de liaison au droit de l'appui simple. Quel est alors le rôle de la fondation en pied du poteau ?



**Figure 7.8.** Cas de chargement de Portique :

*a. Chargement horizontal. b. Chargement vertical*

### 7.3.2 Étude du portique Hyperstatique

En suivant le même raisonnement que pour le cas isostatique, le cas hyperstatique va être étudié dans cette partie il s'agit de :

1. Mettre en place le système hyperstatique.
2. définir le degré d'hyperstaticité.
3. Mesurer les dimensions du portique et sa section.
4. Effectuez la mise à zéro du comparateur.
5. Deux types de chargements différents sont appliqués :

5.1 Une charge horizontale de **20 N** appliquée à l'extrémité gauche du poteau (schématisé sur la Figure 7.8.a),

5.2 Une charge Verticale de **20 N** appliquée au centre de la poutre (charge de vent). (schématisé sur la Figure 7.8.b).

6. Mesurez le déplacement horizontal au niveau de l'appui simple à l'aide du comparateur.
7. Déterminez expérimentalement la charge du vent (si elle existe) qui provoque le basculement du portique : Pour cela appliquer une charge horizontale de **15 N** au sommet du poteau lié à l'articulation puis augmenter progressivement cette charge jusqu'à obtenir *le basculement* du portique).

### 7.3.3 Questions de compréhension

Quelques questions sont posées dans ce paragraphe dans le but de juger de la compréhension de l'étudiant, il s'agit de :

- 1 Quels sont les avantages et les inconvénients d'une structure hyperstatique ?
- 2 Quelle est la différence entre les deux types de portiques ?
- 3 Quels sont les valeurs des déplacements aux points 2 et 3 (Figure 7.8)?
- 4 Commenter les résultats.
- 5 Expliquer à quoi servent les appuis ?

## 8 BIBLIOGRAPHIE

- [1] Achour A., Résistance Des Matériaux, Travaux Pratiques, Université De Tlemcen. Département de Génie Civil, 1994.
- [2] Aulnoye L. P., Mécanique appliquée, Résistance des matériaux, Cisaillement, cours construction mécanique, IUT Génie Civil 1ère année, 2012.
- [3] Aulnoye L. P., Mécanique appliquée, Résistance des matériaux, Torsion simple, cours construction mécanique, IUT Génie Civil 1ère année, 2012.
- [4] Badel P., Cours de résistance des matériaux, Cycle Préparatoire Médecin-Ingénieur, Ecole des Mines Saint Etienne, 2012.
- [5] Basset J. P., Cartraud P., Jacquot C., LeroyA. , Peseux B., Vaussy P., Introduction à la résistance des matériaux, École Centrale de Nantes, 2007.
- [6] Chateigner D, IUT Mesures Physiques, Université de Caen Basse-Normandie, Laboratoire CRISMAT-ENSICAEN, 2012.
- [7] Corminboeuf I., Résistance Des Matériaux, Ecole technique de la construction FRIBOURG, 2007.
- [8] Dupen B., Applied Strength of Materials for Engineering Technology, Indiana University - Purdue University Fort Wayne, Department of Manufacturing and Construction Engineering Technology, 2014.
- [9] Golay F., Résistance Des Matériaux, Cours, Institut des Sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var, 2010.
- [10] Harichane Z., Polycopié de Résistance des Matériaux, RDM-II, Université Hassiba Benbouali de Chlef, Faculté de Génie Civil et, d'Architecture, Département de Génie Civil, 2013.
- [11] Jenevau J. M., Mécanique : théorie des poutres (Résistance des matériaux), ENSIM 2A, 2012.
- [12] Lilkova-Markova s., Mladenski A., Kindova-Petrova D., Selected topics on strength of material, University of architecture, civil engineering and geodesy department of technical mechanics, 2014.
- [13] Malab S. Polycopié : Cours de Résistance des Matériaux, Systèmes Isostatiques - Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf USTO - MB - Faculté d'Architecture et de Génie civil, Département de Génie Civil, 2016.
- [14] Souissi M., Brue F., Résistance des Matériaux, Ecole des hautes études d'ingénieur, 2012.



## WEBOGRAPHIE

- [15] <http://membres.lycos.fr/rdmestp>.
- [16] [www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci210](http://www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci210)
- [17] [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistance\\_des\\_mat%C3%A9riaux](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistance_des_mat%C3%A9riaux).
- [18] [http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/TP\\_Flexionfleche\\_laboratoire\\_materiaux.pdf](http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/TP_Flexionfleche_laboratoire_materiaux.pdf)
- [19] [http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/TP\\_Traction\\_laboratoire\\_materiaux.pdf](http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/TP_Traction_laboratoire_materiaux.pdf)
- [20] <http://membres.lycos.fr/rdmestp>.
- [21] [www.cours-ofppt.com](http://www.cours-ofppt.com).
- [22] <http://www.cours-genie-civil.com/>
- [23] <https://fr.scribd.com/doc/19743921/Cours-Mecanique-RDM-BTS>
- [24] <http://fr.calameo.com/books/000419771539de9ae898c>
- [25] <http://www.guillaumeriviere.name/estia/DRI/tp3.php>
- [26] <http://www.gunt.de/fr/produits/deformation-de-barres-soumises-a-une-flexion-ou-a-une-torsion/020.10000/wp100/glct-1:pa-149:pr-1527>
- [27] <http://www.gunt.de/fr/produits/deformation-de-barres-soumises-a-une-flexion-ou-a-une-torsion/020.10000/wp100/glct-1:pa-149:pr-1527>.
- [28] [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistance\\_des\\_mat%C3%A9riaux](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistance_des_mat%C3%A9riaux).
- [29] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pont>.
- [30] [fr.wikipedia.org](http://fr.wikipedia.org)
- [31] [http://www.atomer.fr/1/1\\_dimensions-eprouvettes-essais-de-traction.html](http://www.atomer.fr/1/1_dimensions-eprouvettes-essais-de-traction.html)
- [32] <http://www.utc.fr/~mecagom4/MECAWEB/EXEMPLE/FICHES/POIAF1.htm>.
- [33] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient\\_de\\_s%C3%A9curit%C3%A9](https://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient_de_s%C3%A9curit%C3%A9)