

## RESUME COURS RDM

[2eme année]

Socle Commun Sciences et Technologie –Université Batna2

Dr. YAHIA L

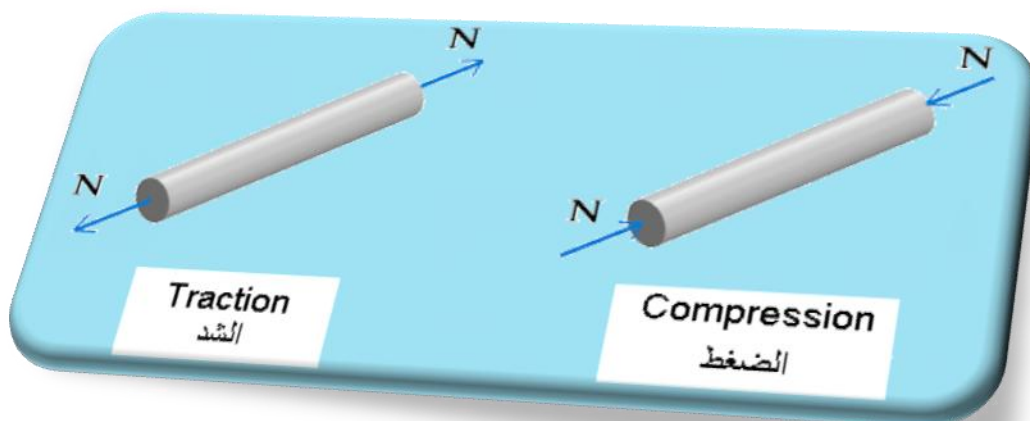
### Introduction, objectifs de la RDM

La résistance des matériaux (RDM) a trois objectifs principaux :

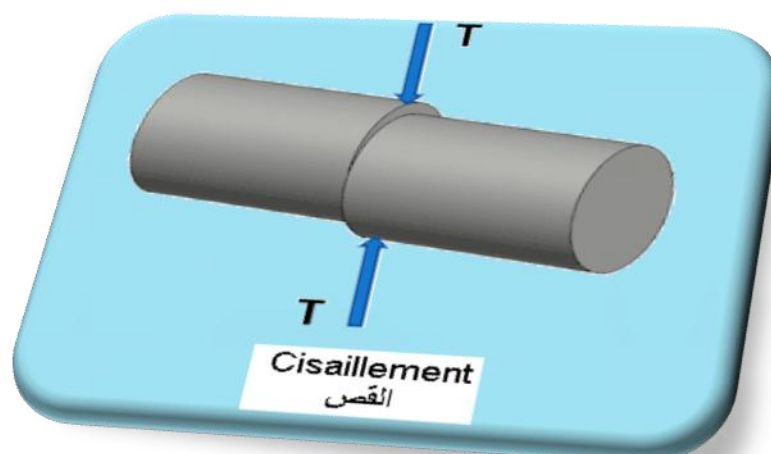
- la connaissance des caractéristiques mécaniques des matériaux. (Comportement sous l'effet d'une action mécanique)
- l'étude de la résistance des pièces mécaniques.(résistance ou rupture)
- l'étude de la déformation des pièces mécaniques. Ces études permettent de choisir le matériau et les dimensions d'une pièce mécanique en fonction des conditions de déformation et de résistance requise

### Sollicitations simples

#### LA TRACTION – COMPRESSION



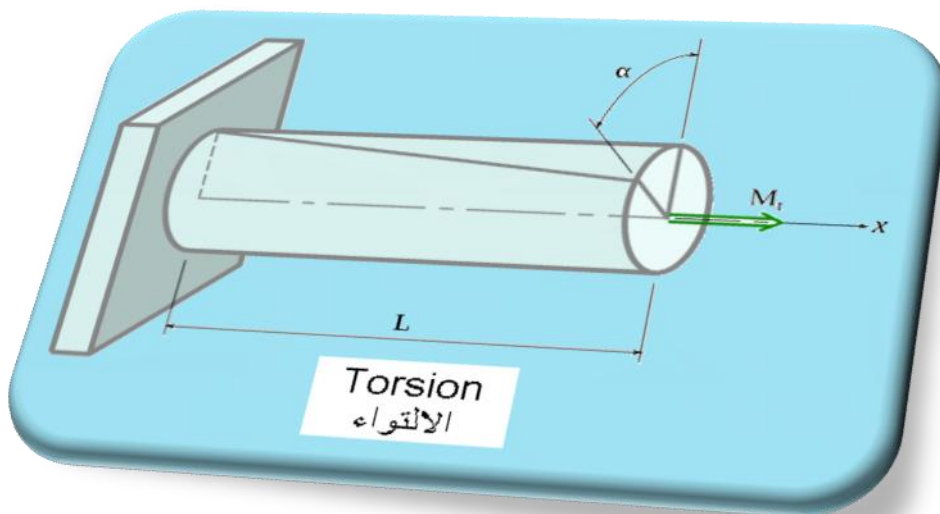
#### LE CISAILLEMENT



LA FLEXION



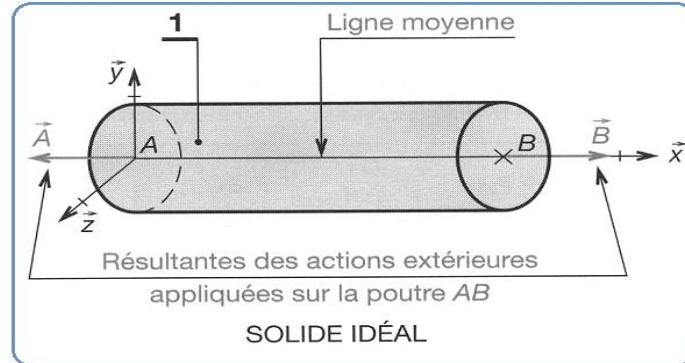
LA TORSION



## Chapitre I- LA TRACTION

### 1-Définition

Une poutre est sollicitée à l'extension simple si elle est soumise à deux forces directement opposées qui tendent à l'allonger ou si le torseur de cohésion peut se réduire en  $G$ , barycentre de la section droite  $S$ , à une résultante portée par la normale à cette section.



Le torseur de chesions des forces est donné par :

$$\{\tau_{coh}\}_G = \begin{Bmatrix} \rho \\ N \\ 0 \end{Bmatrix}_G = \begin{Bmatrix} N0 \\ 00 \\ 00 \end{Bmatrix}_G$$

### 2- Essai de traction

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction et cela généralement jusqu'à rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques.

On impose en général une déformation croissante à une éprouvette sur la quelle on trace deux repères initialement distincts de  $L_0$ , et on mesure simultanément l'effort  $F$  et l'allongement :

$$\Delta L = L - L_0.$$

#### 2.1- Diagramme conventionnel de traction

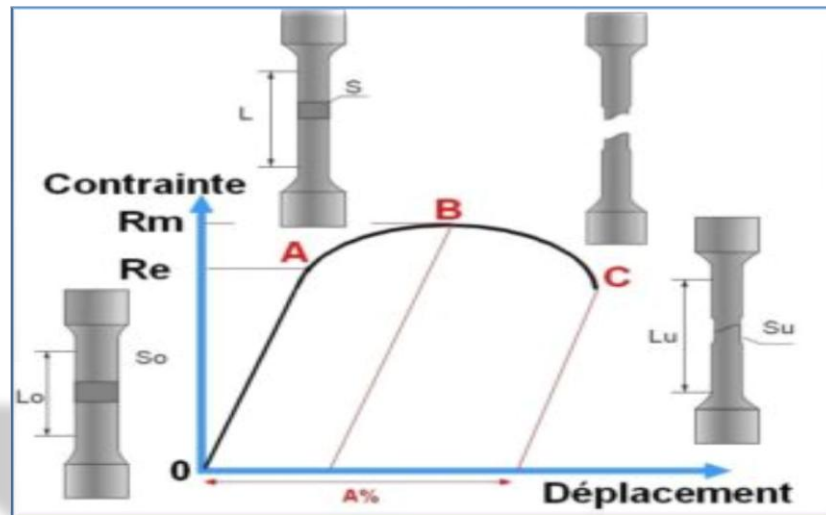
Le diagramme de traction représente l'évolution de la charge unitaire

$$R = \frac{F}{S}$$

en fonction du taux d'allongement relatif  $e$  :

$$e = \frac{L - L_0}{L_0}$$

La courbe conventionnelle a l'allure donnée par la figure suivante :



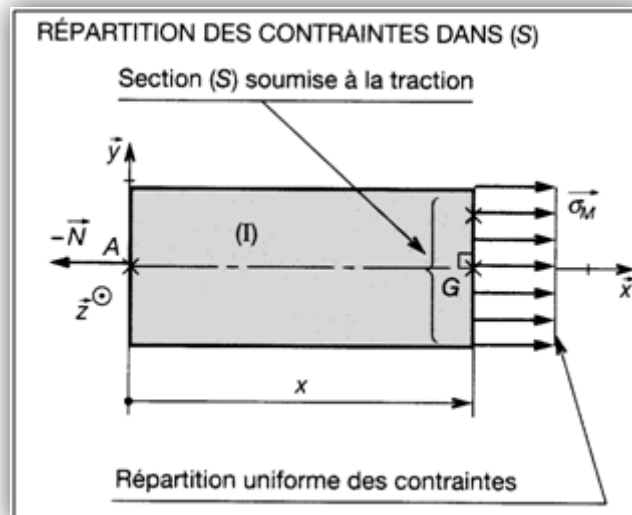
Cette courbe contient diverses régions :

- **OA** : domaine élastique à déformation réversible  $R=E.e$  (le coefficient de proportionnalité est le module d'Young  $E$ ); le point **A** marque la limite du domaine élastique;
- **AB** : domaine de déformation permanente homogène ou de déformation plastique répartie; le point **B** se situe à charge maximale et au début de la striction ;
- **BC** : domaine de striction ou de déformation plastique localisée ; **C** : point de rupture de l'éprouvette

## 2.2- Etudes des contraintes

La contrainte nominale de traction (ou de compression), notée  $\sigma$ , est donné par :

$$\sigma = \frac{N}{S}$$



Avec :

$\sigma$  : contrainte normale de traction [ $N/mm^2$ ] ou [MPa]

$N$  : effort normal [N]

$S$  : section initiale de l'éprouvette [ $mm^2$ ]

## 2.3- Loi de Hooke

La pente de la droite (AB) du diagramme de traction définit le module de Young  $E$ . Pour un matériau donné le module de Young se définit donc par :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Avec :

$E$  [MPa] ou  $[N/mm^2]$  : module de Young ou module d'élasticité

#### 2.4- allongement

L'allongement  $\Delta L$  est donné par :

$$\Delta L = \frac{NL}{ES}$$

$\Delta L$  : allongement [mm]

$N$  : effort normal [N]

$E$  : module d'Young  $[N/mm^2]$

$S$  : section droite  $[mm^2]$

#### 2.5-Condition de résistance

La contrainte appliquée sur le matériau doit impérativement rester inférieure à la limite pratique à l'extension du matériau,  $R_{pe}$ .

$$\sigma \leq R_{pe}$$

$\sigma$  : contrainte appliquée  $[N/mm^2]$

$R_{pe}$  : limite pratique à l'extension du matériau  $[N/mm^2]$

Avec :

$$R_{pe} = \frac{R_e}{s}$$

$R_e$  : limite élastique du matériau  $[N/mm^2]$

$s$  : coefficient de sécurité

#### 5.4- Condition de rigidité

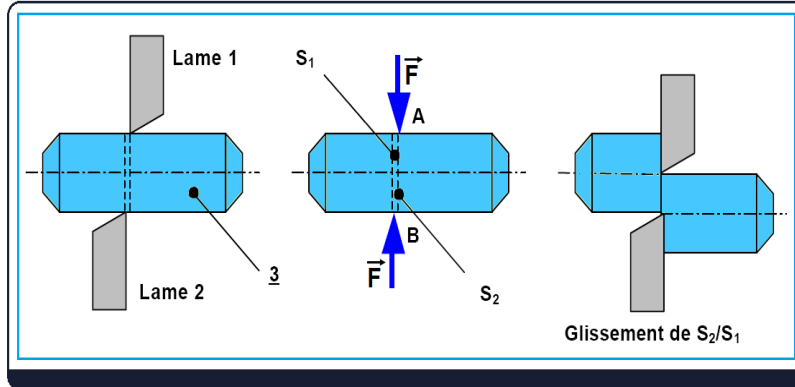
Pour des raisons fonctionnelles, il est parfois important de limiter l'allongement :

$$\Delta L \leq \Delta L_m$$

## Chapitre II- LE CISAILLEMENT

### 1-Définition

Une poutre est sollicitée au cisaillement simple lorsqu'elle est soumise à deux forces directement opposées, perpendiculaire à la ligne moyenne, et qui tendent la cisailer.

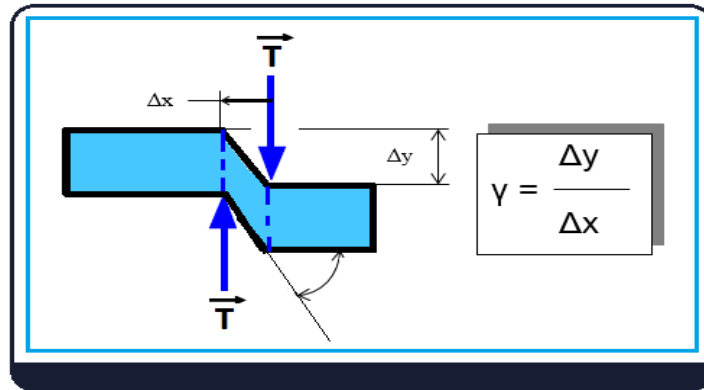


Dans le cas de la sollicitation en traction, le tenseur des efforts de cohésion s'explique selon :

$$[\tau]_G = \begin{bmatrix} T \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ T_Y & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

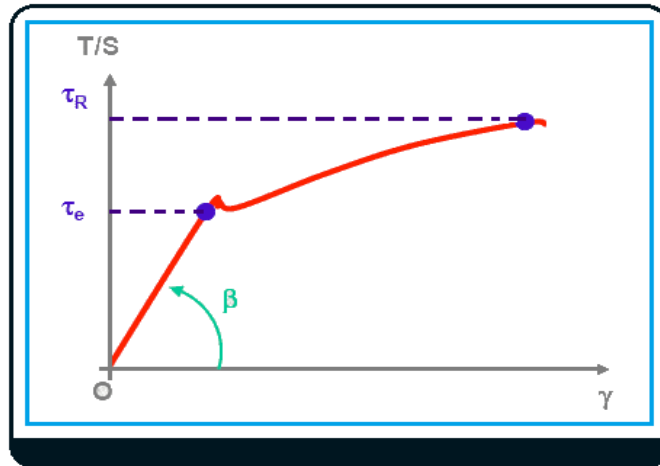
### 2- Essai de cisaillement

L'essai de cisaillement consiste à soumettre une éprouvette à deux charges  $F$  et  $-F$  distante de  $\Delta x$ . L'éprouvette se déforme comme l'indique la figure (Figure 3.4). On augmente  $F$  et on relève la valeur du déplacement  $\Delta y$ .



$\gamma$  s'appelle "distorsion" ou "déformation de cisaillement"

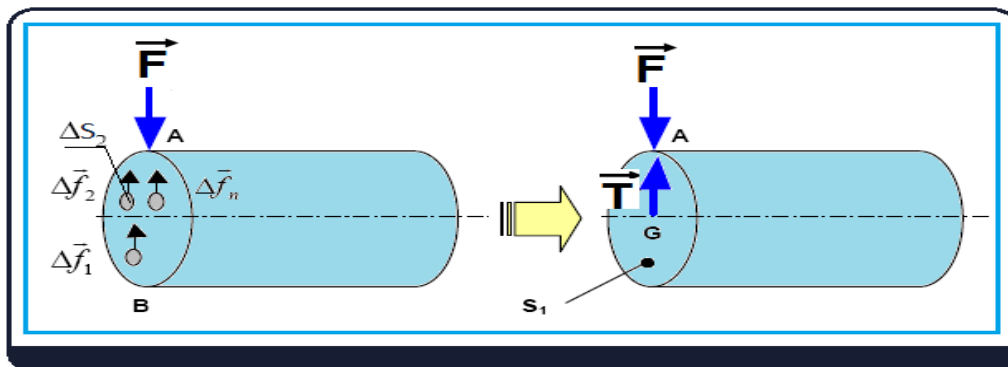
Si on relève la courbe représentant  $T/S$  en fonction de l'angle  $\gamma$ , on obtient un diagramme d'allure semblable à celle de la traction pure (figure).



On constate la présence de deux zones différentes :

- zone élastique (OA) : la contrainte  $T/S$  est proportionnelle à la déformation  $\gamma$  la relation contrainte-déformation est plus linéaire et réversible
- zone plastique (AB) : Au delà de  $\tau_e$  (limite élastique en cisaillement du matériau), la relation contrainte-déformation n'est plus linéaire ni réversible

### 3- Effort tranchant



La résultante  $T$  des forces élémentaires au point G (barycentre de la section  $S_1$ ) s'écrit :

$$\vec{T} = \Delta f_1 + \Delta f_2 + \dots + \Delta f_n = \vec{F}$$

$\vec{T}$  : effort tranchant en [N]

### 3- Contrainte de cisaillement

Cette contrainte tangentielle de cisaillement  $\tau$  est donnée par :

$$\tau = \frac{T}{S}$$

### 4-. Loi de Hooke - Relation entre la contrainte tangentielle et la déformation

D'après le diagramme d'essai de cisaillement on constate que la déformation de cisaillement est linéairement proportionnelle à la contrainte de cisaillement.

On a :

$$\tau = G \cdot \gamma$$

C'est la loi de HOOKE pour le cisaillement.

Avec :

$\tau$  : contrainte tangentielle [ $N \cdot mm^{-2}$ ]

$G$  : module d'élasticité transversale (ou module de Coulomb) de cisaillement [ $N.mm^{-2}$ ]  
(semblable au module de Young  $E$ , pour la traction).

$\gamma$  : déformation de cisaillement

Remarque

$G \approx 0,4E$  (Pour les métaux)

### 5-Déformation de cisaillement

$S_1$  glisse transversalement de  $\Delta y$  par rapport à  $S$ . La déformation des sections, appelé distorsion de l'angle, en radians, s'explique selon :

$$\gamma = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

### 6-Condition de résistance

Pour vérifier que la pièce résiste face aux sollicitations de cisaillement il faut vérifier la condition de résistance suivante

$$\tau \leq \tau_p$$

et:

$$\tau_p = \frac{\tau_e}{s}$$

Avec :

$\tau$  [ $N.mm^{-2}$ ]: contrainte moyenne qui dépend des forces, des dimensions de la pièce et de sa forme

$\tau_p$  [ $N.mm^{-2}$ ]: contrainte pratique ou admissible

$\tau_e$  [ $N.mm^{-2}$ ]: résistance élastique au cisaillement

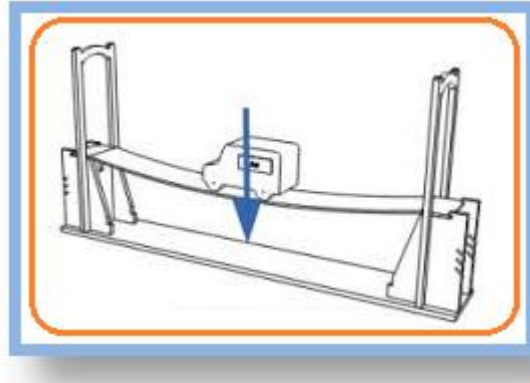
$s$  : coefficient de sécurité



## Chapitre III- LA FLEXION

### 1-Définition

La flexion est la déformation d'un objet (poutre) sous l'action d'une charge. Elle se traduit par une courbure.



### 5.2- Efforts intérieurs

Dans le cas de la flexion, les efforts intérieurs dans n'importe quelle section droite se réduisent à un effort tranchant  $T$  (perpendiculaire à la ligne moyenne) et à un moment fléchissant  $M_f$  (perpendiculaire à la ligne moyenne et à  $T$ ).

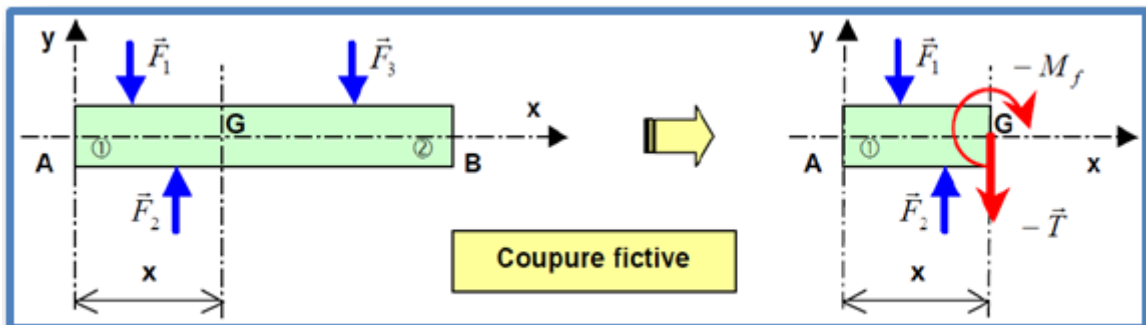


Figure 4.21

En isolant le tronçon 1, on obtient l'effort tranchant  $T$  et le moment fléchissant  $M_f$  (on obtient en fait respectivement  $T$  et  $M_f$ ).

- $\vec{R}$  : somme vectorielle de toutes les forces extérieures transversales situées à gauche de la section fictive:  $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$
- $M_f \vec{M}$  : moment résultant en G de toutes les actions extérieures situées à gauche de la section fictive :  $\vec{M} = \vec{M}(F_1) + \vec{M}(F_2)$

### 5.3- Tenseur des efforts de cohésion

On peut donc modéliser l'action mécanique de la partie (E2) sur la partie (E1) par un torseur appelé torseur de cohésion noté :

$$[T_{coh}] = \begin{bmatrix} \vec{R} \\ M_G \end{bmatrix}$$

#### -Flexion simple

$$[\tau] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ T_y T_y & 0 \\ 0 & M_{fz} M_{fz} \end{bmatrix}$$

#### -Flexion pure

$$[\tau] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & M_{fz} \end{bmatrix}$$

#### -Flexion plane

$$[\tau] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ T_y & 0 \\ 0 & M_{fz} \end{bmatrix}$$

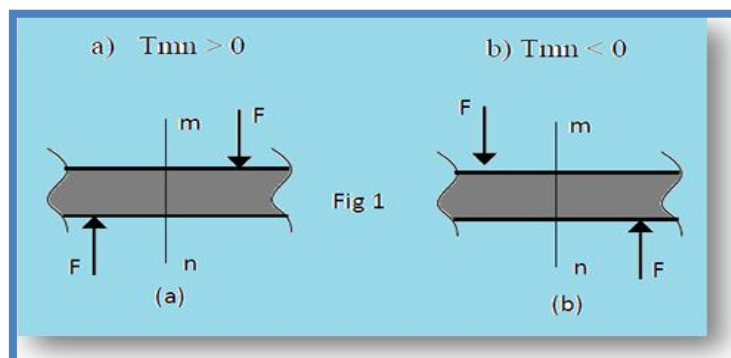
### Diagrammes de l'effort tranchant T et le moment fléchissant M<sub>f</sub>

Les diagrammes des éléments de réduction permettent de localiser les sections les plus sollicitées (sièges des contraintes les plus élevées) et servent au dimensionnement des différents éléments des structures.

Dans la construction des diagrammes, les valeurs positives et négatives sont portées de part et d'autre d'un axe-origine. Par ailleurs, pour le diagramme du moment fléchissant, on a pour habitude de porter les ordonnées toujours du côté des fibres tendues. Considérant une poutre en appui simple soumise à des efforts verticaux P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>. On suppose que la poutre possède un plan de symétrie axial tel que les poutres circulaire, rectangulaire et des profilé en T, I et U...

#### Remarques

♣ L'effort tranchant dans la section m-n d'une poutre (a) est considéré comme positif, si la résultante des forces extérieures à gauche de la section est dirigée de bas en haut, et à droite de la section, de haut en bas, et négative dans le cas contraire (b).



♣ On admet que dans la section d'une poutre, par exemple dans m-n, le moment fléchissant est positif si la résultante de tous les moments des forces extérieures à gauche de la section est dirigée dans le sens horaire, et négative si elle est dirigée dans le sens antihoraire

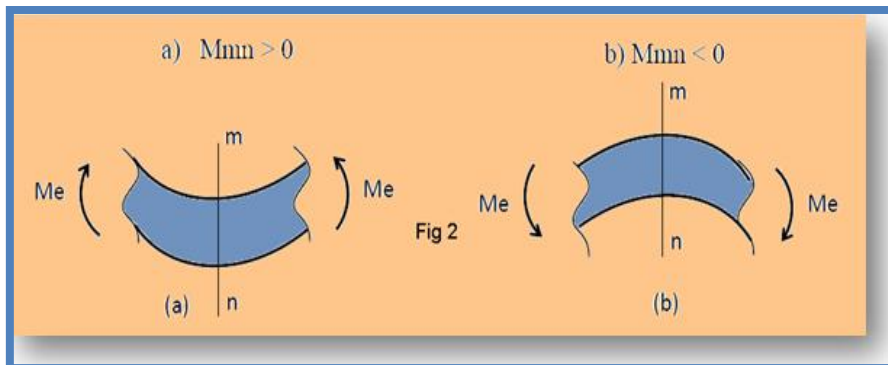


Figure 4. 23

♣ On en tire une autre règle des signes du moment fléchissant, plus commode à retenir. Le moment fléchissant est considéré comme positif si dans la section envisagée, la courbure de la poutre est orientée en bas. On trace toujours le diagramme du moment fléchissant de côté des fibres tendues.

♣ Pour tracer le diagramme de M et T on détermine les valeurs numériques des efforts intérieurs aux extrémités de chaque tronçon. Ces points sont joints par des lignes ou des courbes.

♣ Sur les tronçons où il n'y a pas de charge répartie (uniquement des charges concentrées), le diagramme des T est délimité par des droites parallèles à la base tandis que le diagramme des M est délimité par des droites obliques.

♣ Sur les tronçons où la poutre supporte une charge répartie, le diagramme des T est délimité par des droites obliques tandis que celui des M est délimité par des paraboles, et on doit connaître la valeur du moment fléchissant en un point entre les deux extrémités du tronçon considérée.

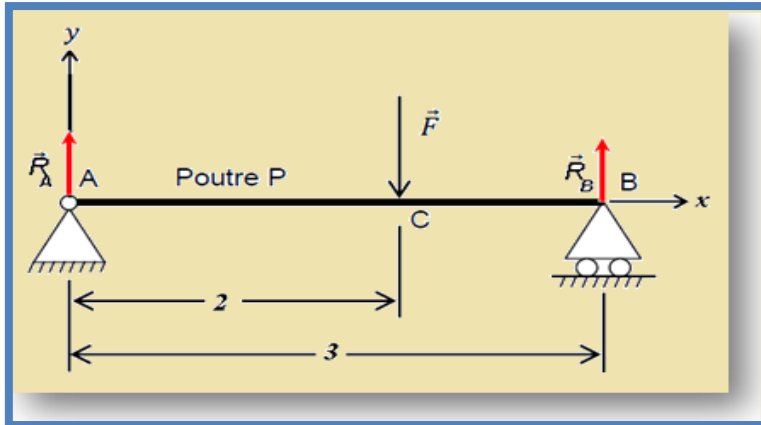
♣ Les maximums et minimums des M coïncident avec les sections où  $T=0$ .

♣ Dans les sections où les charges concentrées sont appliquées à la poutre, le diagramme des T est caractérisé par des passages brusques aux niveaux de ces charges, celui des M, il y aura des brisures dont la pointe sera dirigée dans le sens de la ligne d'action de la force.

♣ Dans les sections où des moments concentrés sont appliqués à la poutre, le diagramme des moments sera marqué par des passages brusques d'une valeur proportionnelle à ces moments tandis que sur le diagramme des T, il n'y aura aucune modification

### Exemple

Soit (AB) une poutre, de longueur 3 m, est sur deux appuis, soumise à une charge de 900daN.



1- On doit tout d'abord trouver les valeurs des deux réactions  $R_A$  et  $R_B$

$$\sum F = 0 \rightarrow R_A + R_B - F = 0 \dots \dots (1)$$

$$\sum M_A(\vec{F}) = 0 \rightarrow 3R_B - 2F = 0 \dots \dots (2)$$

$$(2) \rightarrow R_B = \frac{2}{3}F$$

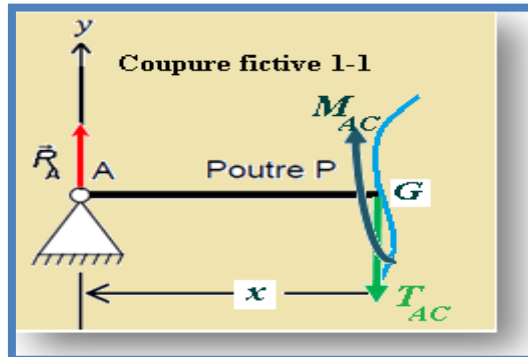
$$R_B = 600 \text{ daN}$$

$$(1) \rightarrow R_A = 300 \text{ daN}$$

2- Faisons des coupures fictives

-Tronçon AC (section fictive d'abscisse :  $0 \leq x \leq 2\text{m}$ )

Calcul de l'effort tranchant  $T_{AC}$  :



$$\sum F = 0 \rightarrow R_A - T_{AC} = 0 \rightarrow T_{AC} = 300 \text{ daN}$$

Calcul du moment fléchissant  $M_{fAC}$  :

$$\sum M_G(\vec{F}) = 0 \rightarrow -300x - M_{fAC} = 0$$

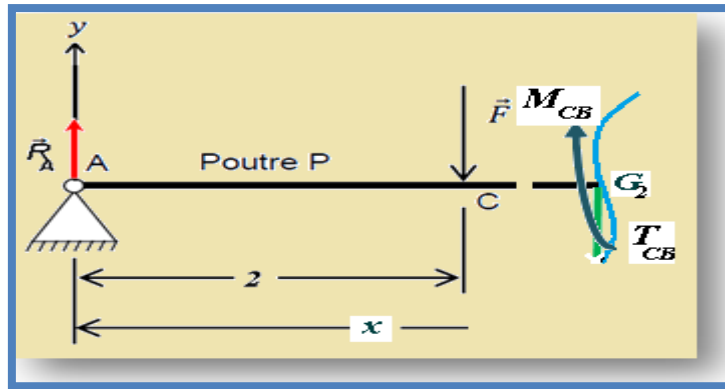
$$M_{fAC} = -300x \text{ daNm}$$

pour  $x = 0 \rightarrow M_{fAC} = 0 \text{ daNm}$

pour  $x = 2 \rightarrow M_{fAC} = -600 \text{ daNm}$

-Tronçon CB (section fictive d'abscisse :  $2 \leq x \leq 3\text{m}$ )

Calcul de l'effort tranchant  $T_{CB}$  :



$$\sum F = 0 \rightarrow R_A - F - T_{CB} = 0 \rightarrow T_{CB} = -600 \text{ daN}$$

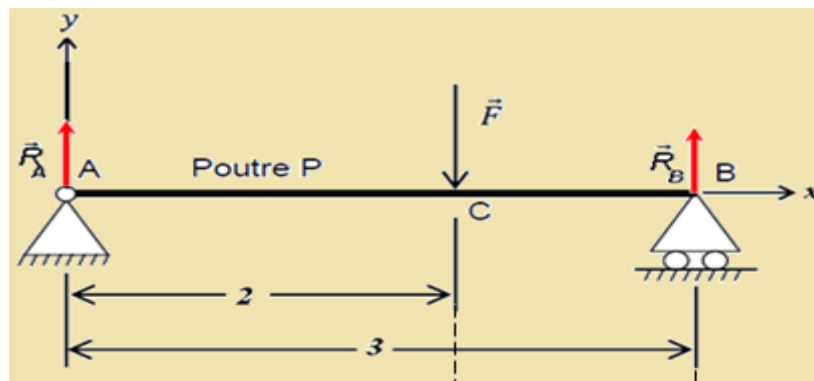
Calcul du moment fléchissant  $M_{fAC}$  :

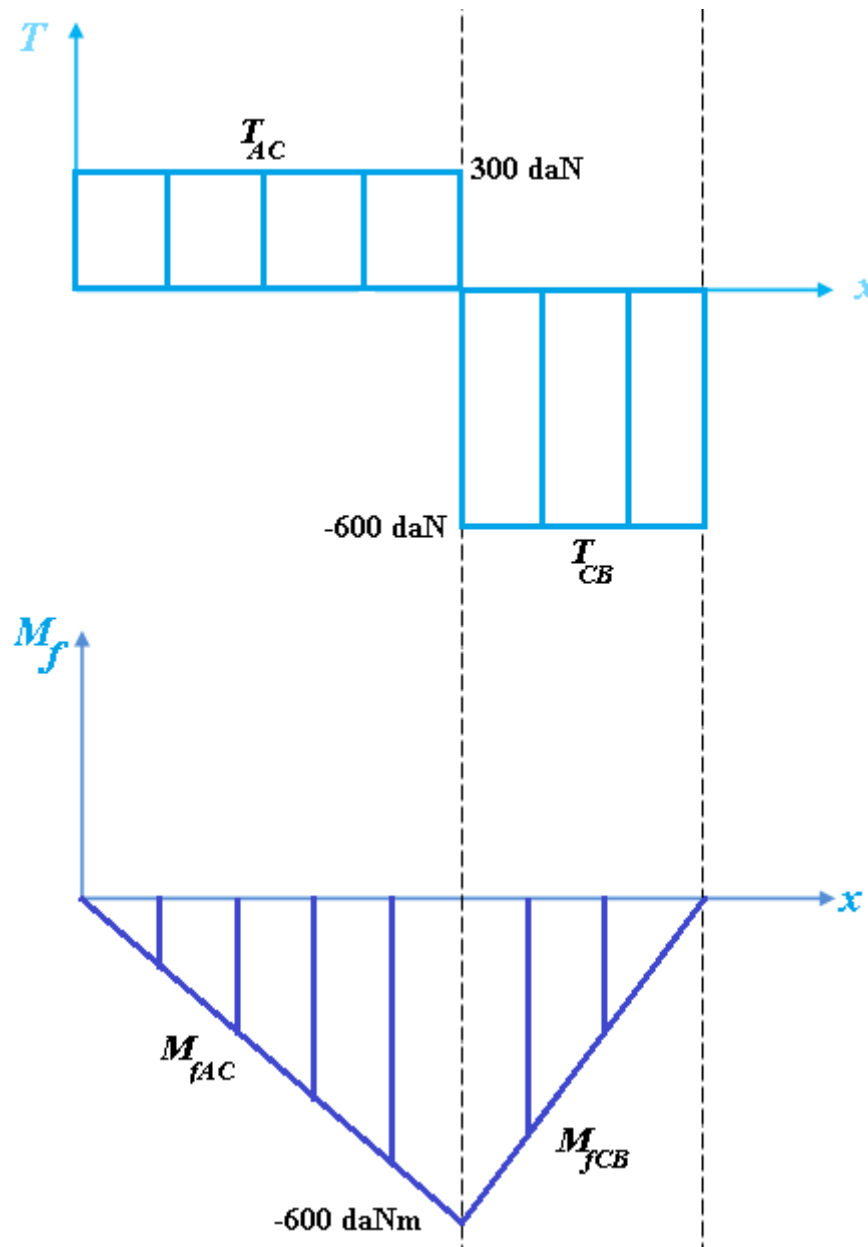
$$\sum M_G(\vec{F}) = 0 \rightarrow -300x + F(x - 2) - M_{fCB} = 0$$

$$M_{fCB} = -1800 + 600x \text{ daNm}$$

$$\text{Pour } x = 2 \rightarrow M_{fCB} = -600 \text{ daNm}$$

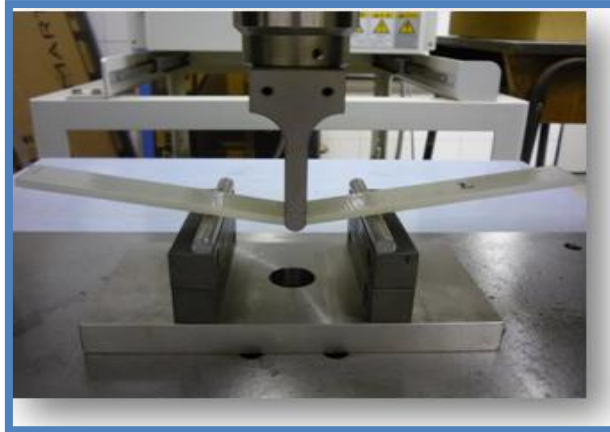
$$\text{Pour } x = 3 \rightarrow M_{fCB} = 0 \text{ daNm}$$





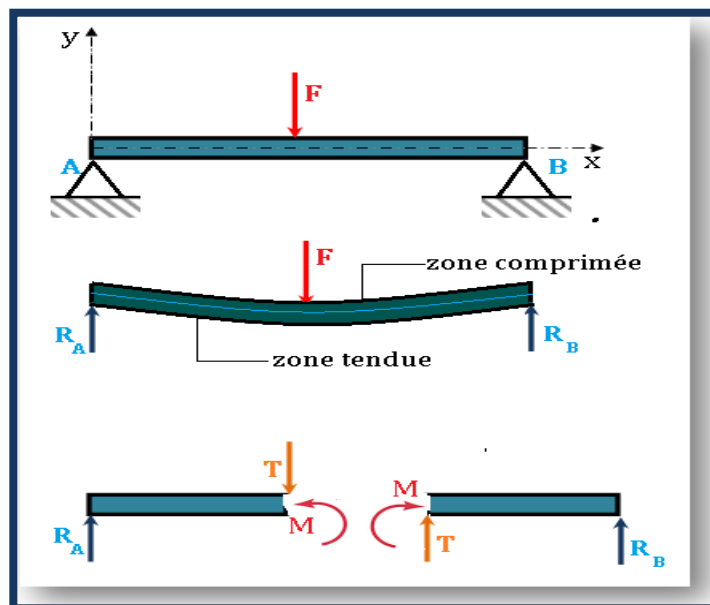
#### 4.4- Essai de flexion

L'essai de flexion d'une poutre est un essai mécanique utilisé dans un but de contraindre les conditions nécessaires pour ne pas dépasser la limite élastique, afin de préserver l'intégrité de la pièce.

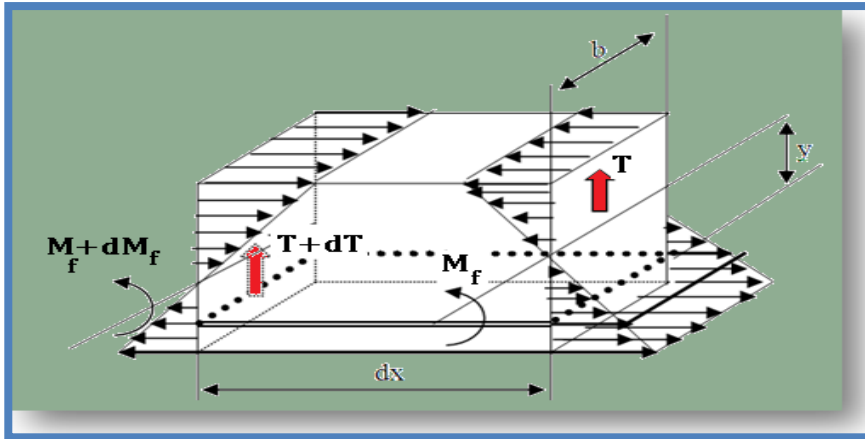


L'essai de flexion consiste à soumettre une poutre, reposant sur deux appuis, à une charge concentrée verticale afin de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau.

Après déformation, cette poutre accuse une flèche et on constate que des contraintes normales se développent dans les sections transversales d'une poutre soumise à un moment fléchissant.



La Figure ci-dessous montre les fibres tendues et comprimées externes d'un tronçon de poutre fléchi. Dans la zone comprimée les fibres se raccourcissent tandis que dans la zone de traction elles s'allongent. Ces deux zones sont séparées par un plan neutre ayant un rayon de courbure  $R$  et dont la longueur ne varie pas lors de la flexion.



## 5-Relation entre l'effort tranchant et moment fléchissant

Les contraintes normales sont généralement prépondérantes devant les contraintes de cisaillement

### 5.1 Contraintes normales en flexion pure

La contrainte normale en tout point de la section de la poutre distante de  $y$  de l'axe  $x$  a pour valeur:

$$\sigma = \frac{M}{I_z} y$$

C'est la formule de Navier

Avec :

- $\sigma$  [MPa] : norme du vecteur contrainte normale en un point M d'une section droite
- $M$  [Nmm] : moment de flexion
- $I_z$  [mm<sup>4</sup>] : moment quadratique.
- $y$  [mm] : distance entre la fibre neutre et le point M

### 5.2- Condition de résistance en flexion

Pour les poutres en flexion, on doit limiter les déformations afin d'assurer une rigidité convenable de la structure, on impose une limite à la contrainte normale à partir de la condition de résistance

On a :

$$\sigma_{max} \leq R_{pe}$$

Avec :

$R_{pe}$  : résistance pratique ( $R_{pe} = \frac{R_e}{s}$ :  $R_e$  la limite élastique et  $s$  le coefficient de sécurité adopté)

$$\sigma_{max} = \frac{M}{I_z} y_{max}$$

Et :

$$R_{pe} = ([\sigma^-] \text{ ou } [\sigma^+])$$



Donc :

$$|\sigma_{max}| = \left| \frac{M}{I_z} y_{max} \right| \leq ([\sigma^-] \text{ ou } [\sigma^+])$$

$\frac{M}{I_z}$  [mm<sup>3</sup>] : module de flexion

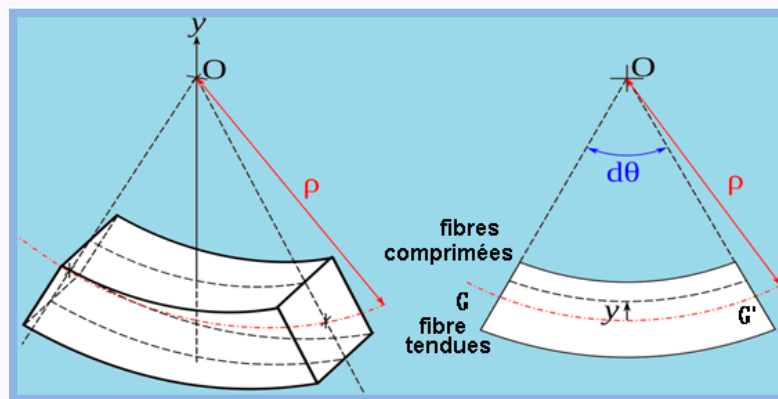
$y_{max}$  [mm] : distance maximale entre le plan moyen et la fibre la plus éloignée

### 6-contrainte tangentielle en flexion

Dans le cas d'une flexion simple ou plane, en plus des contraintes normales, des contraintes tangentielles apparaissent aussi au niveau des sections droites

la contrainte tangentielle moyenne s'explique selon :

$$\sigma_{moy} = \frac{M}{I_z} y$$



Dans une poutre sollicitée en flexion plane simple la contrainte tangentielle moyenne s'exprime sous la forme suivante :

$$\tau_{moy} = \frac{T_y}{S}$$

Avec :

$\tau_{moy}$  [MPa] ou [daN/mm<sup>2</sup>] : contrainte tangentielle moyenne

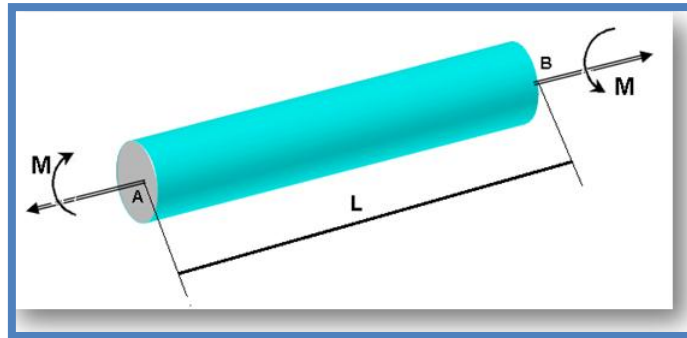
$T_y$  [N] : effort tranchant

$S$  [mm<sup>2</sup>] : section droite

## Chapitre IV- LA TORSION

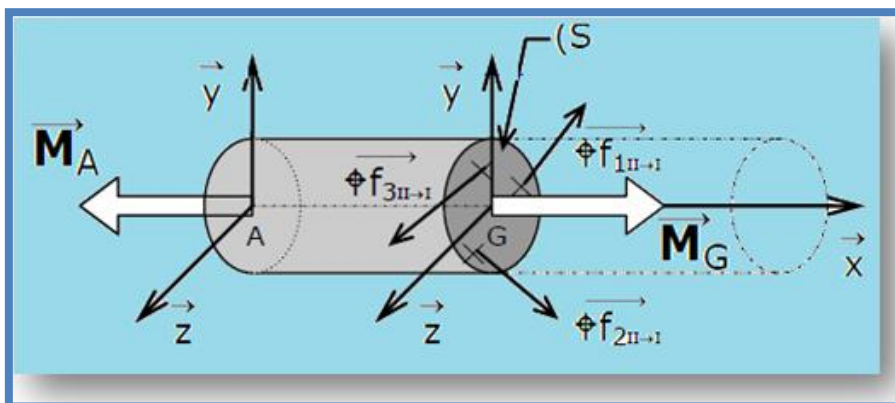
### 1-Definition

Une poutre est sollicitée en torsion simple lorsqu'elle est soumise à ses deux extrémités à des liaisons dont les torseurs associés se réduisent à deux torseurs couples opposés dont les moments sont parallèles à l'axe de la poutre.



### 2- Torseur associé aux forces de cohésion

Le torseur associé aux forces de cohésion est donné par :



Dans un système d axes Gxyz, on a :

$$[\tau] = \begin{bmatrix} 0 & M_{tx} \\ T_y & 0 \\ 0 & 0M_{fz} \end{bmatrix}$$

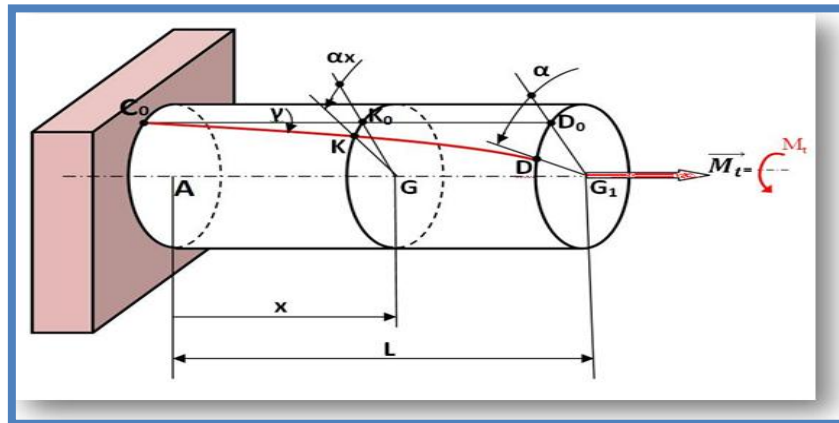
Remarque

- $N = 0, T_y = 0, T_z = 0$
- $M_{tx} \neq 0, M_{ty} = 0, M_{tz} = 0$

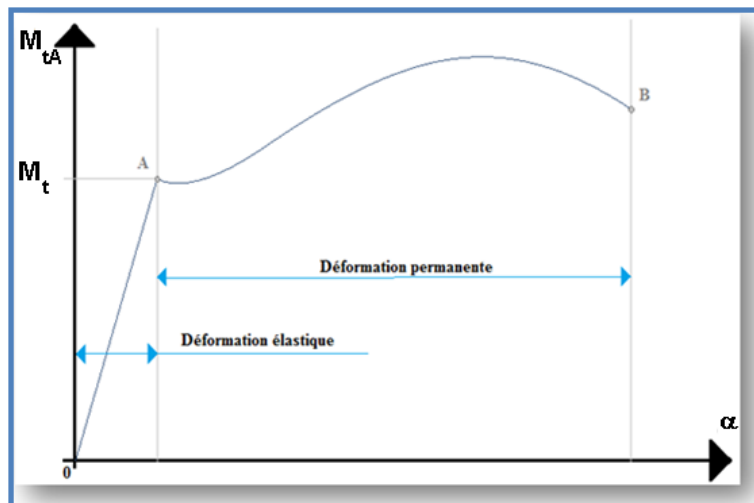
### 3-Essais de torsion

L'essai de torsion consiste à encastre une poutre (cylindre de révolution) à son extrémité gauche. On trace avant l'essai une génératrice  $C_0D_0$  du cylindre puis, on applique à l'extrémité droite, de section (S) de centre de gravité  $G_1$ , un système de forces extérieures pouvant se

réduire à un seul vecteur moment  $M_t$  porté par l'axe (Gx). En faisant croître l'intensité de ce moment, on mesure les déformations de la poutre.



On obtient une courbe de torsion similaire à celle de l'essai de traction



Elle comprend une zone de déformations élastiques où l'angle de torsion est proportionnel au moment de torsion. A partir du point **A** les déformations croissent rapidement jusqu'à avoir rupture de l'éprouvette.

### 3.1- Etude des déformations -Angle unitaire de torsion

L'essai montre que les sections droites tournent toutes entre elles de la même façon comme une hélice sauf pour la ligne moyenne (**Lm**) qui est au milieu reste droite. L'angle de torsion entre les deux sections droites quelconques est alors proportionnel à la distance entre celle-ci. Soit  $\alpha$  l'angle de rotation de la section droite d'abscisse  $x$ , par rapport à la section fixe. L'angle  $\alpha$  varie avec  $x$ .

La rotation varie avec la section : elle est maximale en  $x=L$ , et nulle en  $x=0$ .

Puisque le solide reste dans le domaine élastique et que les déformations restent petites (cf. Chapitre Hypothèses de la RdM), on peut écrire:

$$\theta = \frac{\alpha_x}{x} = \frac{\alpha}{L}$$

$\theta$  [rd/mm]: Angle de torsion

$\alpha_x$  [rd] : Angle de torsion entre la section encastree et une section à une distance  $x$  sur la poutre

$\alpha$  : Angle de torsion entre l'extrémité gauche (encastree) et l'extrémité droite (la section S)

$x$  [mm] : distance entre l'extrémité gauche et une section au choix dans la poutre

$L$  [mm] : longueur de la poutre

**NB** : l'angle de torsion par unité de longueur  $\theta = \alpha/x$  déplacement angulaire relatif de deux sections droites distantes de  $dx$  est appelé l'angle de torsion par unité de longueur

### Déformation élastique

La propriété constatée ci-dessus a permis d'établir la relation :

$$\alpha = \frac{M_t x}{G I_o}$$

Avec :

-  $M_t$  [Nmm] : moment de torsion

-  $G$  [MPa] : module d'élasticité transversale

-  $\alpha$  [rd] : angle de torsion

-  $I_o$  [mm<sup>4</sup>] moment quadratique polaire de la section (S)

En sait que :

$$\theta = \frac{\alpha}{x}$$

Alors :

$$M_t = G \cdot \theta \cdot I_o$$

### 3.2- Etude des contraintes – contrainte tangentielle $\tau$

Soit M un point de la section droite (S) de la poutre situé à une distance  $y$  du centre G de la section. On définit la contrainte de torsion  $\tau$  en M par la relation :

$$\tau = \frac{M_t}{I_o} y$$

avec :

$\tau$  [MPa]: contrainte tangentielle

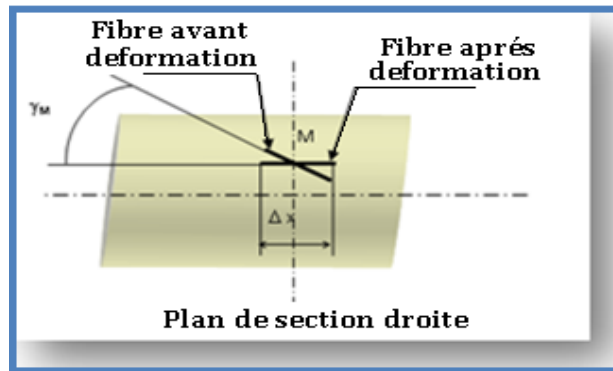
$M_t$ [Nmm]: moment de torsion

$I_o$ [mm<sup>4</sup>]: moment quadratique polaire de la section (S)

$y$  : [mm]distance du point M du plan neutre

#### 3.2.2- Loi de Hooke

Si nous considérons un petit élément  $\Delta x$  d'une fibre avant et après déformation, on constate que celui-ci a subi une *dévi*ation  $\gamma$



La loi de Hooke s'exprime par :

$$\tau = G \cdot \gamma$$

Avec :

- $\tau$ [MPa] : norme du vecteur contrainte tangentielle en un point M d'une section droite
- $G$ [MPa] : module d'élasticité transversale ou module de Coulomb.
- $\gamma$ [sans unité] : valeur absolue de la déviation de la fibre au point M (deformation).

#### 4-Dimensionnement des arbres circulaires soumis à la torsion

La sécurité d'exploitation impose deux conditions:

##### 4.1-condition de résistance

La contrainte maximale de cisaillement doit rester inférieure à la résistance pratique au glissement de la poutre :

$$\tau_{max} \leq R_{pg}$$

Avec :

$\tau_{max}$ [MPa] : contrainte maximale de cisaillement

$R_{pg}$ [MPa] : résistance pratique au glissement

$$R_{pg} = [\tau] = \frac{R_e}{s}$$

$R_e$ [MPa] : limite élastique en cisaillement du matériau

$s$  [sans unité] : coefficient de sécurité (supérieur à 1).

##### 4.2-condition de rigidité

L'angle de torsion unitaire ne doit pas dépasser une valeur limite  $\theta_{max}$  imposée par l'expérience

$$\theta \leq \theta_{max}$$

$\theta$ [rd/mm] : angle de torsion unitaire

$\theta_{max}$  [rd/mm] : valeur limite maximale

### Remarque

Pour des sections variables (arbres étagés), les contraintes ne sont plus réparties uniformément dans toutes les sections droites. Dans les zones discontinuités géométriques on doit tenir compte d'un phénomène de concentration de contraintes

En désignant par  $v$  la valeur maximale de  $y$  (le plus souvent  $v = R$ , rayon de la poutre cylindrique), nous pouvons écrire :

$$\tau_{max} = k \cdot \frac{M_{tmax}}{\frac{I_0}{v}}$$

Avec :

- $\tau_{max}$  [MPa] : norme du vecteur contrainte tangentielle en un point M d'une section droite
- $M_{tmax}$  [N mm] : module d'élasticité transversale ou module de Coulomb.
- $I_0$  [mm<sup>4</sup>] : moment quadratique.
- $k$  [sans unité] : coefficient de concentration de contrainte (poutre  $k=1$ ).
- $v$  [mm]: valeur maximale de  $y$

Les figures ci-dessous représentent les abaques pour détermination du coefficient de concentration de contrainte  $k$

