



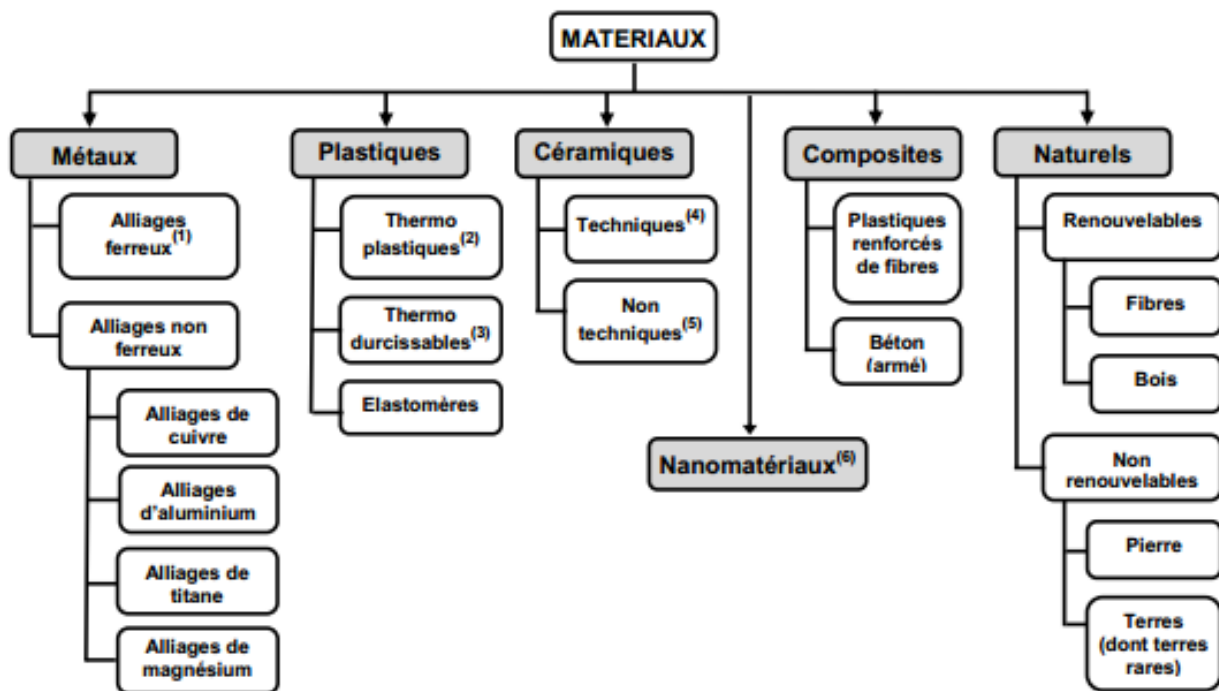
Terminale Sciences de l'Ingénieur

Synthèse : Matériaux

Un matériau est une substance ou une matière d'origine naturelle ou synthétique, utilisée pour la fabrication de produits (objets, machines) ou d'œuvres architecturales en mettant en œuvre un procédé d'obtention.

I – LA CLASSIFICATION DES MATERIAUX

Les matériaux sont directement issus d'un milieu naturel, ou élaborés dans des filières industrielles. On peut les décliner en 6 familles.



(1) **Alliages ferreux :**

Alliages fer-carbone (aciers et fontes). Les aciers peuvent être alliés à d'autres métaux (nickel, chrome, molybdène, ...) pour améliorer leurs caractéristiques (dureté, ...).

(2) **Thermoplastiques :**

Matières plastiques dont la transformation est réversible lorsqu'on les chauffe. Ils sont réutilisables, donc potentiellement recyclables.

(3) **Thermodurcissables :**

Matières plastiques dont la transformation est irréversible (polymérisation).

(4) **Techniques :**

Céramiques industrielles obtenues par frittage d'oxydes métalliques.

(5) **Non techniques :**

Egalement appelées « traditionnelles », ces céramiques (faïences, porcelaines, ...) sont produites à base d'éléments naturels (argile, kaolin, ...).

(6) **Nanomatériaux :**

Particules de dimensions $\leq 10^{-9}m$. Elles ont la particularité de franchir les barrières biologiques conventionnelles (parois organiques ou végétales) et imposent de ce fait des conditions d'utilisation très rigoureuses (toxicité humaine et éco toxicité).

Un classement des matériaux est également possible à partir de leur **structure**. On distingue :

- Les **matériaux cristallins** dont les atomes sont régulièrement répartis suivant un réseau ordonné. Un cristal est formé d'une juxtaposition de mailles (structures élémentaires).

Cette catégorie comprend les **métaux** et leurs alliages, une **grande partie des polymères** (matières plastiques) et la plupart des **minéraux**.



*Exemple d'une maille de fer alpha :
structure cubique centrée.*

- Les **matériaux amorphes** (ou vitreux), souvent transparents, dont l'assemblage des molécules est peu ordonné.

Il s'agit essentiellement des **verres** et de **quelques polymères**.

II – LES PROPRIETES

Il n'y a pas à priori de bons ou de mauvais matériaux, mais simplement des matériaux adaptés à un produit donné en fonction des propriétés qui les caractérisent.

On peut retenir **quatre catégories de propriétés** :

- **mécaniques** : Elles traduisent le comportement des matériaux soumis à l'action de contraintes (traction, compression, flexion, cisaillement,...).
- **physico-chimiques** : Elles mesurent le comportement des matériaux soumis à l'action de phénomènes thermiques, électriques, magnétiques, ou placés dans un milieu réactif (solvants, rayonnement ultra-violet, ...).
- **de mise en œuvre** : Elles indiquent les possibilités de mise en forme, de traitement et de liaison du matériau (usinabilité, soudabilité, aptitude à la coloration dans la masse, ...).
- **de développement durable** : Elles traduisent l'impact **économique, écologique et social** de la production du matériau, du procédé d'obtention du produit, de l'utilisation du produit, et de sa fin de vie.

Les **critères de choix** d'un matériau sont **établis à partir de ces caractéristiques**.

III. Caractéristiques mécaniques

ORIGINE DES CARACTERISTIQUES MECANQUES

Les propriétés mécaniques des matériaux conditionnent tous les problèmes de mise en forme des matériaux ainsi que leur comportement dans leurs différentes applications.

- **Les essais sur les matériaux** permettent d'établir les lois physiques et les caractéristiques qui régissent le comportement de ces matériaux.
- **Les essais sur des prototypes** permettent de valider la réponse aux exigences du cahier des charges dans des conditions réelles d'utilisation.

DEFINITIONS PRELIMINAIRES

Isotropie : Qui présente les mêmes caractéristiques mécaniques dans toutes les directions de la matière. Les métaux, les céramiques sont généralement isotropes. Les plastiques, les composites, le bois ne le sont pas (on dit qu'ils sont **anisotropes**).

Elasticité : Aptitude d'un matériau à reprendre sa forme et ses dimensions initiales après déformation.

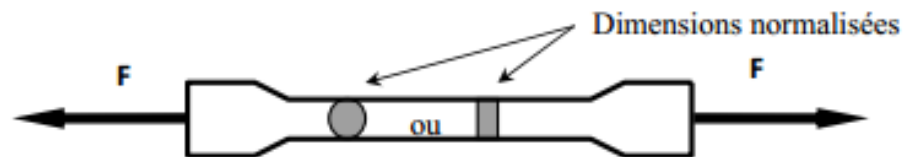
Plasticité : Un matériau est dit plastique s'il ne reprend pas sa forme et ses dimensions initiales après déformation.

Fragilité : Caractéristique d'un matériau qui se déforme jusqu'à la rupture sans déformation plastique.

Rigidité : Capacité d'un matériau à résister à une déformation dans la zone plastique.

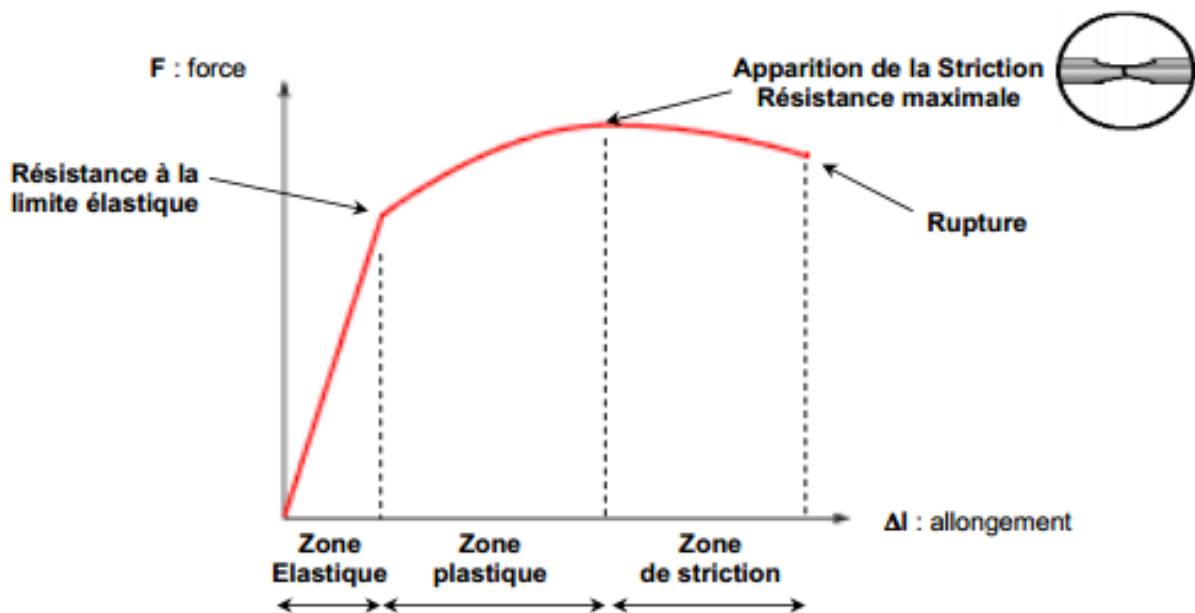
Ductilité : Un matériau ductile se déforme fortement avant de rompre.

RESISTANCE A LA TRACTION



Principe :

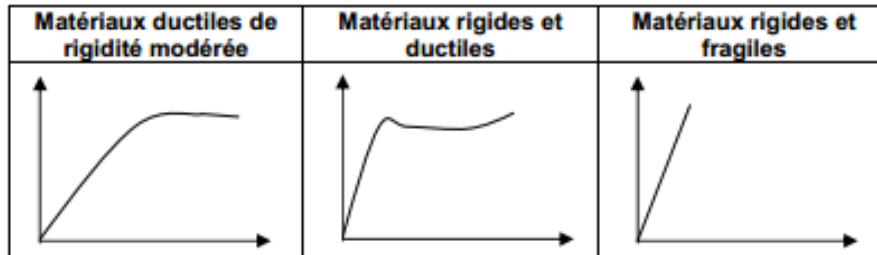
L'essai de traction consiste à appliquer à un échantillon cylindrique ou prismatique, de forme et de dimensions standardisées, un effort de traction F et à mesurer l'allongement correspondant Δl . En portant ces deux valeurs sur un diagramme, on obtient la courbe expérimentale de traction du matériau étudié.



Module de Young : Le module de Young (noté E) est une caractéristique mécanique qui correspond à la pente initiale de la courbe (de la zone élastique) d'un essai de traction. Il est donc propre à chaque matériau.

Loi de Hooke : La loi de Hooke met en évidence que dans la zone élastique, pour de petites déformations, la variation de longueur Δl est proportionnelle à la force de traction F, soit $F = k \times \Delta l$. Pour une pièce soumise à de la traction, la loi de Hooke s'écrit : $F \div S = E \times \Delta l$ avec F : force de traction en Newton (N), S : section sollicitée en mm^2 , E : module de Young du matériau en méga Pascal (MPa) et Δl allongement en mm.

Différentes courbes pour différents comportement de matériaux :



L'inclinaison initiale de la courbe (pente) est proportionnelle à la rigidité du matériau. Plus cette pente est raide (proche de l'ordonnée), plus la rigidité du matériau est importante. Plus la courbe monte en ordonnée, plus le matériau est résistant. Enfin plus la surface sous la courbe est importante, plus le matériau est ductile.

RESISTANCE A LA PENETRATION : DURETE

Principe :

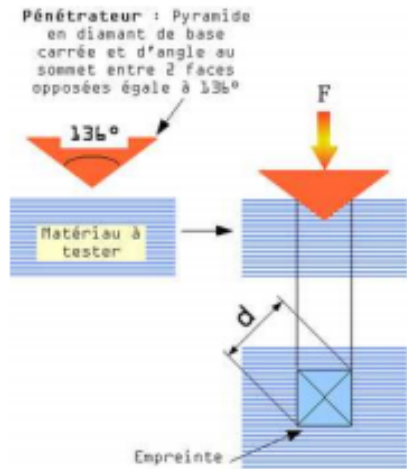
L'essai de dureté a pour but de mesurer la résistance à la pénétration d'un matériau par un pénétrateur normalisé.

Exemple de l'essai Vickers :

Deux méthodes sont possibles pour déterminer la valeur de la dureté repérée par la lettre H (Hardener) suivie de la majuscule de l'essai pratiqué (Vickers : V) :

- Appliquer la formule suivante $HV = (0,0189 \times F) \div d^2$
- Utiliser des tableaux qui donnent directement la valeur de HV sans passer par le calcul, en prenant en compte, la Moyenne de $d1 + d2$ et la charge appliquée (kg) sur le pénétrateur.

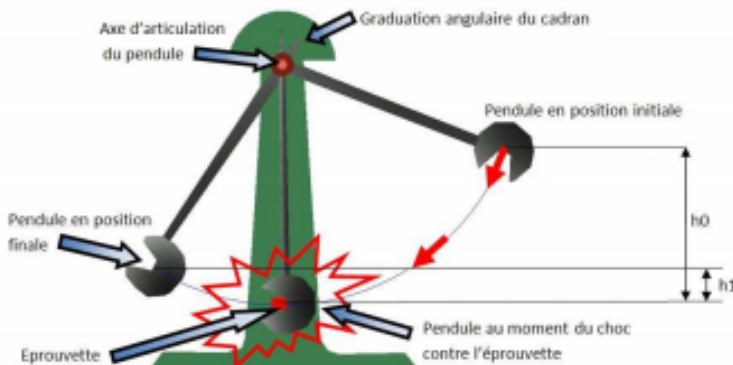
Remarque : L'indice de dureté est sans unités



RESISTANCE AU CHOC : RESILIENCE

Principe :

L'essai de résilience consiste à mesurer l'énergie absorbée par un matériau (W en Joules) lors de sa rupture par un choc. La résilience est définie par la lettre K (en Joules/cm²).



Calcul de la résilience

$$K = m \times g \times (h_0 - h_1) \div S$$

Avec :

m, masse du pendule en kg

g, accélération de la pesanteur (9,81 m/s²)

h_0 et h_1 , hauteurs respectives du pendule en m

S, section de l'éprouvette rompue lors du choc en cm^2

L'objectif de l'essai, en particulier sur les métaux, est de les classer suivant leur comportement ductile ou fragile.

IV. Caractéristiques primordiales

- Résistivité électrique (résistance électrique, protection des systèmes et des personnes, ...)
- Résistance thermique (isolement, etc...)
- Masse volumique
- Module de Young
- Prix
- Et bien d'autres...

V. Choix d'un matériau à l'aide d'un indice de choix

Un indice de choix permet de sélectionner le matériau idéal pour certaines caractéristiques. Il est très facile à mettre en place : il s'agit d'un rapport.

Prenons un exemple simplifié : un avion. La structure doit être la moins lourde possible et doit être le plus solide possible. L'indice de performance est tout trouvé :

$$I_{\text{performance}} = \text{Résistance} / \text{Masse volumique}$$

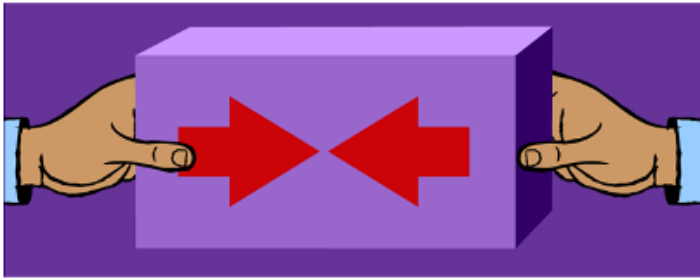
Si la résistance augmente, le rapport est meilleur. Si la masse volumique diminue, le rapport sera là aussi meilleur. Nous chercherons donc le matériau ayant le meilleur indice de performance.

VI. Résistance des matériaux

Il existe 4 types de sollicitation basique :

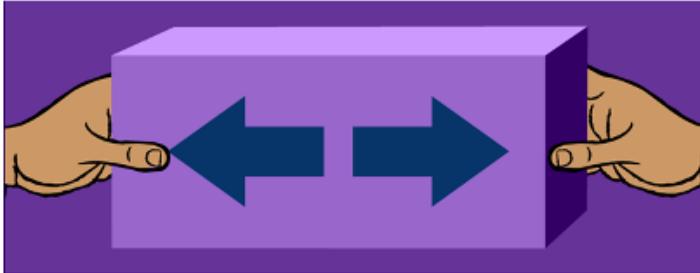
- La traction/compression
- Le cisaillement
- La flexion
- La torsion

A. La compression / traction simple



COMPRESSION

La compression a tendance à raccourcir l'élément sur lequel elle s'exerce



TRACTION

La traction a tendance à allonger l'élément sur lequel elle s'exerce.

Nous allons reprendre un élément vu plus haut : La loi de Hooke.

Cette loi ne s'applique que dans le domaine élastique (ni plastique, ni striction). Elle permet de relier la déformation à la contrainte du matériau.

La loi de Hooke s'écrit : $\sigma = E \varepsilon$

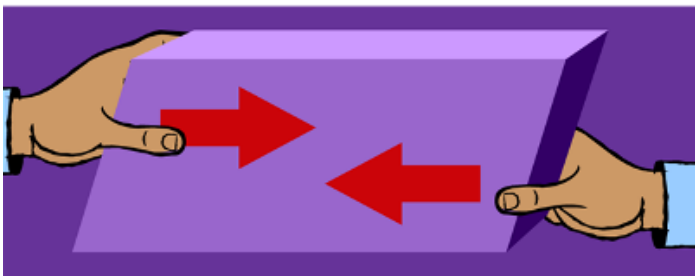
- σ étant la contrainte de traction / compression
- E le module de Young du matériau
- ε la déformation de la poutre (en m ou mm)

σ est la contrainte de traction/compression : $\sigma = \frac{N}{S}$

- σ est la contrainte (en Pa ou MPa)
- N étant la force s'appliquant à l'objet (N)
- S étant la section (surface) sur laquelle repose la force (m^2 ou mm^2)

Le module de Young « E » est une constante du matériau. Il ne change jamais dans les conditions d'utilisation donnée (température, pression, etc...).

B. Le cisaillement



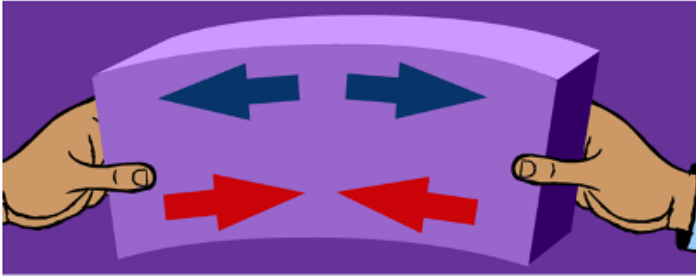
CISAILLEMENT

Le cisaillement a tendance à couper en deux l'élément sur lequel il s'exerce.

Le cisaillement apparaît lorsque 2 forces de sens opposées et de point d'application « proche » sont présentes.

Ce cas-ci est rarement étudié au lycée. Vous devez juste savoir de quoi il s'agit.

C. La flexion simple



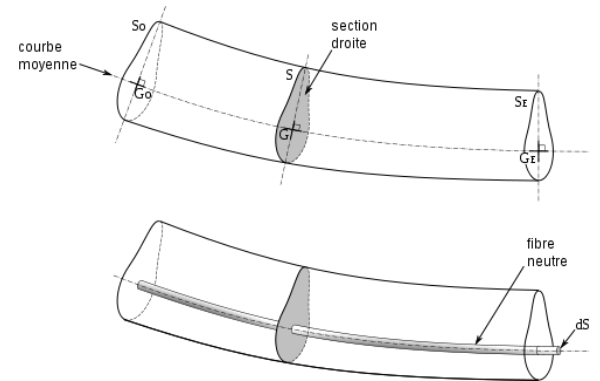
FLEXION

La flexion a tendance à courber l'élément sur lequel elle s'exerce.

Ce cas est incontournable, un grand classique. Ce type de problème se résout à l'aide du « torseur de cohésion ». Vous allez voir, c'est bien plus simple qu'il n'y paraît.

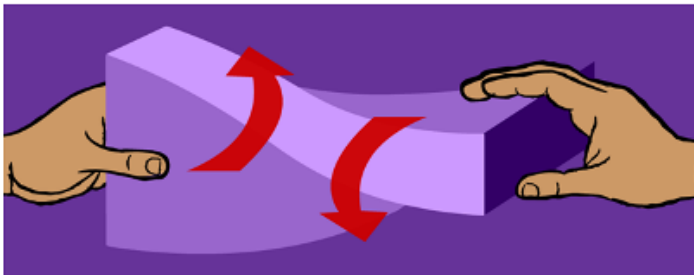
Il existe une fibre neutre dans le matériau. Il s'agit de l'âme. Cette courbe ne subit aucune déformation.

Sur le schéma à droite, vous pouvez voir représenté « la section droite ». Notre but sera de calculer le moment de flexion pour chaque section droite, car il varie selon la position.



Dans la suite, il vous sera expliqué comment résoudre ce type de problème.

D. La torsion



TORSION

La torsion a tendance à vriller l'élément sur lequel elle s'exerce.

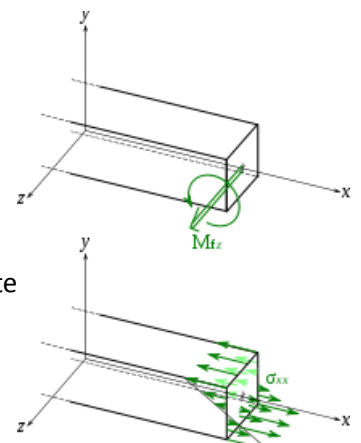
La torsion est un cas complexe impliquant beaucoup de choses. Il ne sera pas traité ici.

La torsion trouve son application sur les tournevis par exemple. La capacité du tournevis à se déformer et à subir les contraintes (avant de sortir de la zone élastique) sera étudiée. Si la marque Facom garantit ses tournevis à vie, c'est que l'étude a été faite. Très bien faite !

E. Les efforts composés

Les sollicitations vues plus haut peuvent engendrer des contraintes supplémentaires. Prenons par exemple la flexion :

Le fait de fléchir va créer également une compression/traction dans le matériau. Que se passe-t-il si 2 contraintes différentes sont appliquées au matériau ? Nous allons les ajouter et vérifier qu'ils ne dépassent pas la contrainte maximale autorisée.



VII. Résolution de cas simples

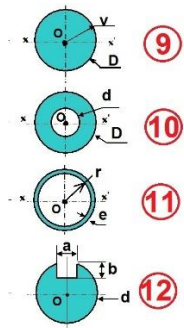
A. Compression/traction



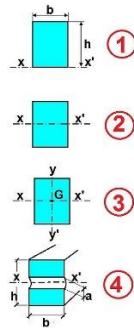
N est la force normale.

Dans un premier temps, il nous faut calculer la surface d'appui de la force. La force s'appuie sur l'ensemble de la poutre (quand ce n'est pas précisé). Il faut donc calculer l'aire. Plusieurs profils de poutre sont possibles :

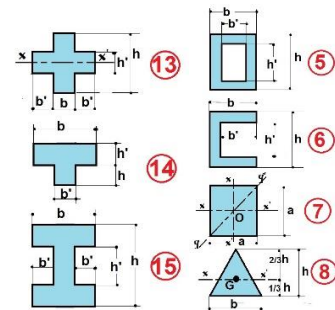
Poutre cylindrique :



Poutre parallélépipédique :



Autres :



Une fois que vous connaissez l'aire et la force, vous pouvez calculer la contrainte :

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

Il ne vous reste plus qu'à calculer la déformation du matériau, s'il se trouve dans le domaine plastique. Pour cela, vous avez la loi de Hooke à disposition :

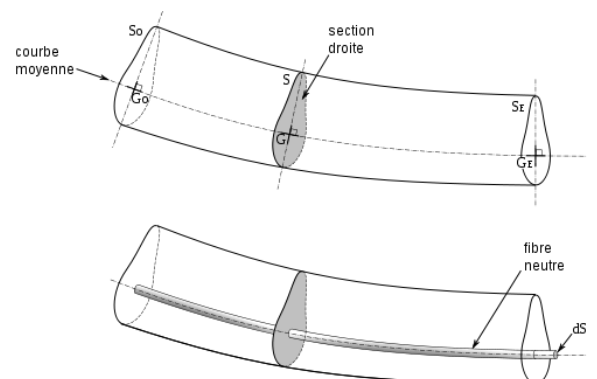
$$\sigma = E \varepsilon$$

Le cas de compression/traction est le plus simple. Souvent, vous devrez ajouter à cette contrainte de compression la contrainte résultant de la flexion.

Si la contrainte de votre matériau dépasse la limite élastique de celui-ci, vous n'êtes plus dans le domaine élastique !

B. La flexion

La flexion est la déformation d'un objet qui se traduit par une courbure. Dans le cas d'une poutre, elle tend à rapprocher les deux extrémités de la poutre.





La déformation maximale, la flèche, se trouve ici en bout de poutre. Lors d'une étude, il peut y avoir 3 buts :

- Calculer le moment fléchissant
- Calculer la compression/traction résultant de la flexion
- Calculer la flèche
- Représenter les contraintes

1. Calculer le moment fléchissant

Il existe un lien direct entre la force tranchante \vec{T} et le moment fléchissant :

$$T = - \frac{dM_{fz}}{dx}$$

M_{fz} est le moment fléchissant autour de l'axe z.

Remarque : Le moment fléchissant peut-être calculer autour de tous les axes, du moment qu'une force tranchante provoquant le moment est présent.

Le calcul du moment fléchissant se fait donc à chaque point, selon la position sur x de la section S_M dans notre exemple. Le moment fléchissant vaudra donc :

$$M_{fz} = - \int_x^L T dx$$

2. Calculer la compression/traction

Là encore, un lien direct existe entre la compression/traction et le moment fléchissant :

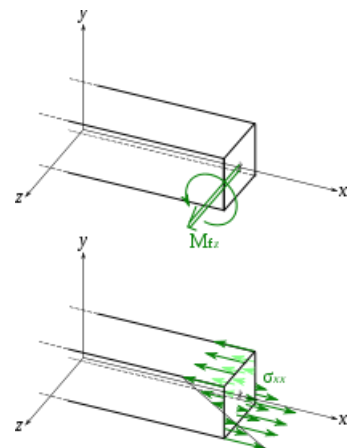
$$\sigma = - \frac{M_{Gz}}{I_{Gz}} y$$

I_{Gz} est le moment quadratique de la poutre. Pour le trouver, vous devez réaliser une intégrale double. Ce n'est pas de votre niveau. Cette valeur vous sera donnée, ou un tableau de formule (document technique) vous sera donné pour retrouver cette valeur.

En fonction de la « hauteur » y, la compression/traction sera plus forte. Dans les cas d'école, la contrainte maximale se trouve souvent sur la peau de la poutre.

La contrainte maximale de compression/traction vaut donc :

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\text{compression/traction}} + \sigma_{\text{flexion}}$$

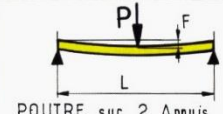
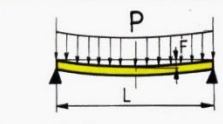
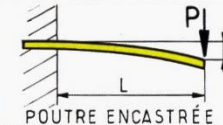
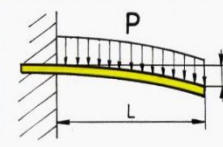


Si σ_{\max} est plus grand que la limite élastique R_e du matériau, vous êtes en dehors de la zone élastique. C'est bien souvent cette vérification qui signe la fin de l'exercice type bac.

3. Déterminer la flèche

La détermination de la flèche est très simple. Tout se fait par tableau dans les documents techniques. Vous devrez choisir la bonne poutre (cylindrique pleine ou creuse, carré pleine ou creuse, ...) et la bonne répartition des charges (les forces au bon endroit). Par lecture du tableau, une formule mathématique vous sera donnée et vous n'aurez plus qu'à réaliser le calcul à l'aide de votre calculatrice.

4. Représenter les contraintes

Disposition des charges	MOMENT FLÉCHISSANT EN N/m	FLÈCHE MAXI EN mm	Taux TRAVAIL MAXI EN %
 POUTRE sur 2 Appuis	$\frac{P \times L}{4}$	$\frac{P \times L^3}{48 \times E \times I}$	$\frac{Mf}{I}$
 	$\frac{P \times L}{8}$	$\frac{5 \times P \times L^3}{384 \times E \times I}$ <small>$\frac{P \times L}{8} \times \frac{5 \times L^2}{48 \times E \times I}$</small>	$\frac{Mf}{I}$ AU MILIEU
 POUTRE ENCASTRÉE	$P \times L$	$\frac{P \times L^3}{3 \times E \times I}$	$\frac{Mf}{I}$ A L'ENCASTREMENT
 	$\frac{P \times L}{2}$	$\frac{P \times L^3}{8 \times E \times I}$	$\frac{Mf}{I}$

E - MODULE D'ELASTICITÉ
 I - INERTIE SECTION
 Mf - MOMENT FLÉCHISSANT

Les contraintes sont représentées le long de la poutre, généralement à droite (si la poutre est verticale) ou en bas (si la poutre est horizontale).

Les contraintes de compression/ traction ne varient pas selon la section.

Les contraintes de cisaillement ne varient pas selon la section mais en cas de nombreuses forces, elles s'additionnent.

Le moment fléchissant varie selon la section. Il est courant de trouver des formes hyperboliques ou des droites linéaires.

Des exemples de représentation vous seront donnés dans els exercices.