

**TRAVAUX PRATIQUES DE
DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES**

TP n° 5 :

Flambement des poutres droites



Etude du flambement d'une poutre droite

Le but de cette étude est de comparer les résultats théoriques d'Euler sur le flambement des poutres droites à des résultats expérimentaux.

I. Introduction

Jusqu'à présent, nous avons étudié les poutres et les systèmes de poutres en supposant toutes les hypothèses de la résistance des matériaux vérifiées, en particulier en négligeant les déplacements pour calculer les éléments de réduction du tenseur de cohésion. Dans le cas du flambement, ces déplacements ne sont plus négligeables puisqu'ils peuvent devenir très grands sous l'effet de forces extérieures. En effet, les forces extérieures ne sont plus proportionnelles aux déformations et dans certains cas de grandes déformations peuvent être causées par des accroissements de charges infimes. Tous ces phénomènes sont connus sous le nom d'instabilité élastique ; le plus courant est celui du flambement d'une poutre droite élancée sous l'action d'un effort de compression.

II. Théorie d'Euler

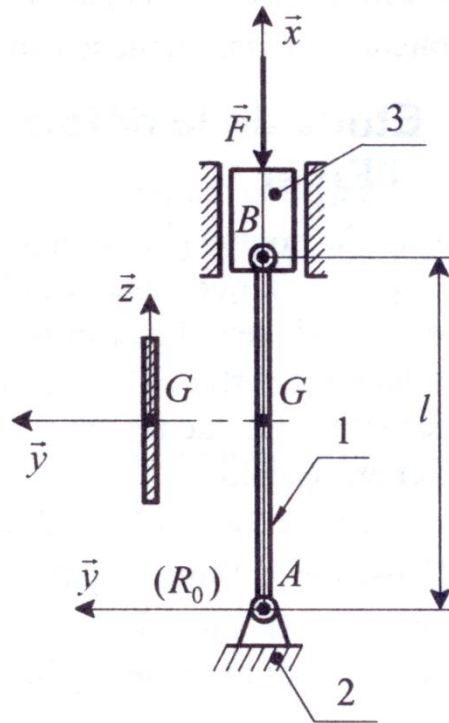
Le flambement est un phénomène mécanique équivalent à une sollicitation composée de compression et de flexion.

1. Mise en évidence du flambement

Lorsqu'une pièce en forme de poutre rectiligne suffisamment longue subit un effort axial croissant tendant à la raccourcir, on observe successivement deux types de sollicitations :

- pour une charge axiale F inférieure à une limite notée F_C (charge critique), la poutre est comprimée, elle reste rectiligne et se raccourcit.
- Lorsque la charge axiale F atteint F_C , la poutre fléchit brusquement et une instabilité apparaît, entraînant très vite la rupture de celle-ci. On observe que la flexion se produit dans le plan

perpendiculaire à la direction principale de plus faible moment quadratique de la section droite de la poutre. Sur la figure ci-dessous, la flexion se produit dans le plan (A, \vec{x}, \vec{y}) perpendiculaire à (G, \vec{z}) .



2. Hypothèses de l'étude

On considère les hypothèses suivantes :

- la poutre a une section constante et une ligne moyenne droite avant déformation
- les liaisons de la poutre avec le milieu extérieur sont des liaisons pivots d'axe parallèle à \vec{z} .
- dans un plan (G, \vec{y}, \vec{z}) de section droite, (G, \vec{y}) et (G, \vec{z}) sont les axes principaux et $I_{Gz} < I_{Gy}$, alors la déformation a lieu dans le plan (A, \vec{x}, \vec{y}) .
- les actions de liaison se réduisent respectivement en A et B à :

$$- \quad \{\tau_{2 \rightarrow 1}\}_A = \begin{Bmatrix} F\vec{x} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_A$$

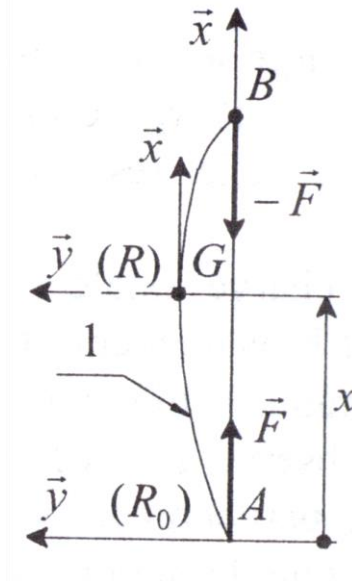
$$- \quad \{\tau_{3 \rightarrow 1}\}_B = \begin{Bmatrix} -F\vec{x} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_B$$

- le poids de la poutre peut être négligé.

3. Charge critique d'Euler

Poutre articulée à ses extrémités

Modélisons la poutre par sa ligne moyenne AB et supposons que sous l'influence des efforts en A et B, cette ligne moyenne prend une légère courbure. Sur la figure ci-dessous, cette courbure est évidemment très accentuée pour la rendre visible.



Soit G le centre de surface d'une section droite d'abscisse x . Dans le plan (A, \bar{x}, \bar{y}) les coordonnées de G sont (x, y) . Considérons le repère de définition des sollicitations en G : $\mathfrak{R} = (G, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$.

Déterminons le torseur des forces de cohésion en G :

$$\{\tau_{coh}\}_G = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R} \\ \vec{M}_G \end{array} \right\}_G \quad \text{avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} \vec{R} = -\vec{F} \\ \vec{M}_G = G\vec{B} \wedge (-\vec{F}) \end{array} \right.$$

Dans le repère $\mathfrak{R} = (G, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{R} = -F\bar{x} \\ \vec{M}_G = -Fy\bar{z} \end{array} \right.$$

Etudions la déformation de la poutre sous l'effet du moment de flexion $M_{f_z} = -Fy$

$$EI_{G_z} y'' = M_{f_z} = -Fy$$

soit $EI_{G_z} y'' + Fy = 0$

Cette relation est une équation différentielle du second ordre, linéaire, à coefficients constants, sans second membre, dont la solution générale est :

$$y = A\cos(wx) + B\sin(wx) \quad \text{avec} \quad w^2 = \frac{F}{EI_{Gz}}$$

Les constantes A et B peuvent se calculer par les conditions aux limites.

- en A : $x=0$ et $y=0 \Rightarrow A=0$

- en B : $x=l$ et $y=0 \Rightarrow B \sin wl = 0 \Rightarrow \sin wl = 0 \quad (B \neq 0)$

$\Rightarrow wl = k\pi \quad (k=1,2,3,\dots)$

Soit $\sqrt{\frac{F}{EI_{Gz}}} = \frac{k\pi}{l} \quad \boxed{F = \frac{k^2 \pi^2 EI_{Gz}}{l^2}}$

Ces valeurs de la charge de compression, où k est un entier, sont les charges critiques d'Euler. En pratique, seule la première de ces charges critiques ($k=1$) peut être supportée par une poutre, sauf à imposer des conditions aux limites supplémentaires, comme, par exemple, empêcher le déplacement transverse de la section médiane de la poutre. Cet artifice permet d'atteindre la seconde charge critique. La plus faible valeur de F est obtenue pour $k=1$; on désigne cette valeur de F par F_C , ou **charge critique d'Euler d'ordre 1** :

$$\boxed{F_C = \frac{\pi^2 EI_{Gz}}{l^2}}$$

Que représente B ?

Reprenons l'équation générale de la déformée pour $A=0$: $y = B\sin(wx)$

Le maximum de la flèche y est obtenu pour $\sin(wx)=1$, c'est-à-dire pour $wx = \frac{\pi}{2}$

Or, $wl = k\pi \Rightarrow w = \frac{\pi}{l} (k=1) \Rightarrow x = \frac{l}{2}$

B est donc en fait la flèche maximale au milieu de la poutre.

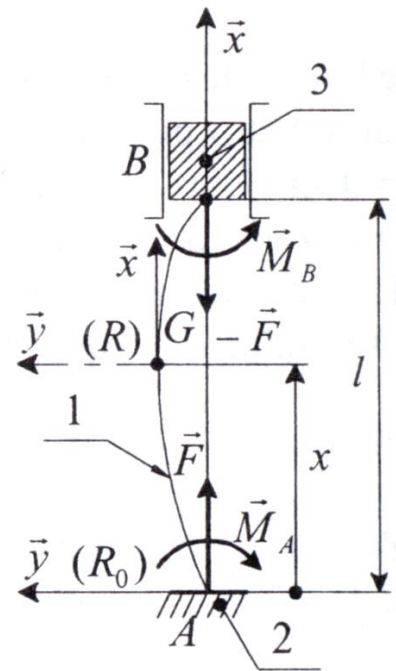
L'équation de la déformée est alors : $y = B\sin\left(\frac{\pi x}{l}\right)$

Poutre encastree à ses extremités

Nous étudions ce cas qui est vu en TP et proche des cas réels. Il permettra également de définir la notion de « longueur libre de flambement ».

Modélisons les actions des deux liaisons encastrement aux extremités A et B (voir figure).

La réalisation expérimentale introduit un plan de symétrie des charges (A, \vec{x}, \vec{y}) . La liaison 3-1 est telle que la résultante du torseur de liaison est parallèle à (B, \vec{x}) .



- Liaison encastrement 3-1 $\{\tau_{(3 \rightarrow 1)}\}_B = \left\{ \begin{array}{l} \vec{B}_{(3 \rightarrow 1)} \\ \vec{M}_{B(3 \rightarrow 1)} \end{array} \right\}_B$ avec $\begin{cases} \vec{B}_{(3 \rightarrow 1)} = -F\vec{x} \\ \vec{M}_{B(3 \rightarrow 1)} = \vec{M}_B = M_B\vec{z} \end{cases}$

L'équilibre de la poutre 1 et la symétrie des liaisons implique que :

- Liaison encastrement 2-1 $\{\tau_{(2 \rightarrow 1)}\}_A = \left\{ \begin{array}{l} \vec{A}_{(2 \rightarrow 1)} \\ \vec{M}_{A(2 \rightarrow 1)} \end{array} \right\}_A$ avec $\begin{cases} \vec{A}_{(2 \rightarrow 1)} = -F\vec{x} \\ \vec{M}_{A(2 \rightarrow 1)} = \vec{M}_A = -M_A\vec{z} \end{cases}$

L'étude de l'équilibre de la poutre 1 conduit à écrire que : $M_A = M_B = \mu$. Exprimons en G centre de surface d'une section droite telle que $G(x, y)$ le torseur des forces de cohésion en G:

$$\{\tau_{coh}\}_G = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R} \\ \vec{M}_G \end{array} \right\}_G \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \vec{R} = \vec{B}_{(3 \rightarrow 1)} = -F\vec{x} \\ \vec{M}_G = \vec{M}_{B(3 \rightarrow 1)} + \vec{GB} \wedge \vec{B}_{(3 \rightarrow 1)} \end{cases}$$

$$\text{soit } \vec{M}_G = (-Fy + \mu)\vec{z}$$

\vec{M}_G est donc un moment de flexion suivant \vec{z} . On connaît l'expression de la « déformée » dans une sollicitation de flexion : $EI_{G_z} y'' = M_{f_z}$

donc ici : $EI_{G_z} y'' = -Fy + \mu$ que l'on peut écrire : $\frac{EI_{G_z}}{F} y'' + y = \frac{\mu}{F}$.

Cette équation est une équation différentielle du second ordre, linéaire, à coefficients constants, avec second membre, dont la solution générale est :

$$y = A \cos \varpi x + B \sin \varpi x + \frac{\mu}{F} \text{ avec } \varpi^2 = \frac{F}{EI_{G_z}}$$

Les constantes A, B et μ peuvent se calculer par les conditions aux limites :

- en A : pour $x=0$, on a $y=0$ et $y'=0$
- en B : pour $x=l$, on a $y=0$ et $y'=0$

Notons que compte tenu de la symétrie de la figure, ces quatre conditions ne sont pas indépendantes. Ecrivons que :

$$y = A \cos \varpi x + B \sin \varpi x + \frac{\mu}{F} \text{ et } y' = -A \varpi \sin \varpi x + B \varpi \cos \varpi x$$

Introduisons les conditions:

- pour $(x=0 ; y=0)$ $\Rightarrow 0 = A + \frac{\mu}{F}$
- pour $(x=0 ; y'=0)$ $\Rightarrow 0 = B$
- pour $(x=l ; y=0)$ et avec $B=0$ $\Rightarrow 0 = A \cos \varpi l + \frac{\mu}{F}$
- pour $(x=l ; y'=0)$ et avec $B=0$ $\Rightarrow 0 = A \varpi \sin \varpi l$

On en déduit que : $\cos \varpi l = 1$ et donc que: $\varpi l = 2k\pi$.

$\varpi l = 2k\pi \Rightarrow \varpi = \frac{k\pi}{l/2}$ et comme $\varpi^2 = \frac{F}{EI_{G_z}}$, on obtient :

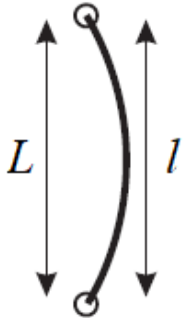
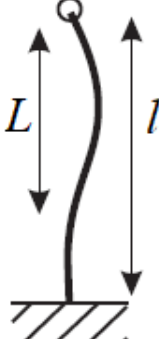
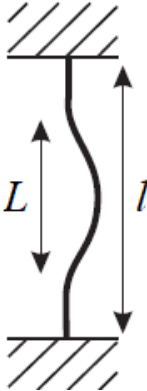
$$F_C = \frac{k^2 \pi^2 EI_{G_z}}{\left(\frac{l}{2}\right)^2}$$

Autres conditions aux limites

On introduit la notion de **longueur libre de flambement**, c'est-à-dire la plus grande des distances séparant deux points d'articulation ou d'inflexion réels ou fictifs de la fibre moyenne. Cette longueur dépend de la nature des liaisons aux extrémités. La charge critique d'ordre k de

flambement devient :
$$F_C = \frac{k^2 \pi^2 EI_{G_z}}{L^2}$$
 avec $L = \frac{l}{2}$ dans le cas d'une poutre bi-encastree

Le scientifique Euler introduit un « facteur de longueur efficace » K . Celui-ci est déterminé par la manière dont sont fixées les extrémités de la colonne. C'est le rapport de la « longueur efficace » entre deux points (ou de la longueur libre de flambement) par la longueur totale de la colonne. Les figures ci-dessous montrent que la manière avec laquelle vous fixez une colonne détermine sa longueur efficace L . Une colonne avec une extrémité fixée et l'autre articulée a une longueur efficace de 0.7 fois sa longueur totale. Une colonne avec deux extrémités fixées a une longueur efficace de 0.5 fois sa longueur totale. Cela suppose que vous fixiez les extrémités fermement - n'importe quel mouvement aux extrémités affectera vos calculs.

Poutre articulée à ses deux extrémités	Poutre articulée et encastree	Poutre encastree à ses deux extrémités
		
$L = l$ et $K = 1$ $F_C = \frac{\pi^2 EI_{G_z}}{l^2}$	$L = 0,7 l$ et $K = 0,7$ $F_C = \frac{\pi^2 EI_{G_z}}{(0,7l)^2} = \frac{2\pi^2 EI_{G_z}}{l^2}$	$L = 0,5 l$ et $K = 0,5$ $F_C = \frac{\pi^2 EI_{G_z}}{(0,5l)^2} = \frac{4\pi^2 EI_{G_z}}{l^2}$

Domaine d'emploi du flambement

Nous venons de voir que la détermination de la charge critique d'Euler F_C était liée à la longueur libre de flambement L . D'autre part, la sollicitation de flambement suit et se combine à une sollicitation de compression. Une question se pose : quand la poutre doit-elle être calculée en compression ? En flambement ?

En effet, il est évident qu'une poutre courte et trapue a peu de chances de flamber par rapport à une poutre longue et élancée.

Elancement

On définit donc pour une poutre l'élancement λ :

$$\lambda = \frac{L}{\rho}$$

L : longueur libre de flambement

ρ : rayon de giration déduit de $\rho = \sqrt{\frac{I_{G_z}}{S}}$

Contrainte critique

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_c = \frac{F_c}{S} \\ F_c = \frac{\pi^2 EI_{G_z}}{L^2} \end{array} \right\}$$

$$\Rightarrow \sigma_c = \frac{\pi^2 EI_{G_z}}{L^2 S}$$

En fonction de λ : $\lambda = \frac{L}{\rho} \Rightarrow$

$$\begin{array}{l} L = \lambda \rho \\ L^2 = \lambda^2 \rho^2 \\ L^2 = \lambda^2 \frac{I_{G_z}}{S} \end{array} \Rightarrow \sigma_c = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

Sécurité vis à vis du flambement

Si la poutre est constituée d'un matériau de limite élastique σ_e , elle devrait :

- Se rompre par flambement si $\sigma_c < \sigma_e$
- Périr par écrasement si $\sigma_c > \sigma_e$

La formule d'Euler n'est donc pas valable pour les petits élancements.

La valeur limite pour laquelle la formule d'Euler conduit au même résultat que l'étude de compression simple est donnée par :

$$\sigma_c = \sigma_e \quad \Rightarrow \quad \boxed{\lambda_c = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_e}}} \text{ appelée élancement critique}$$

Cette valeur de l'élancement critique ne dépend que des caractéristiques mécaniques du matériau. En réalité, le phénomène n'est pas aussi simple car la charge n'est jamais rigoureusement centrée, le matériau n'est jamais absolument homogène et la poutre n'est jamais parfaitement rectiligne.

Exemples :

- pour l'acier S185 (A33) : $E=2.10^5$ Mpa, $\sigma_e=185$ Mpa $\Rightarrow \lambda_c=104$
- pour l'acier 60SiCr7 (60SC7) : $E=2,2.10^5$ Mpa, $\sigma_e=930$ Mpa $\Rightarrow \lambda_c=49$

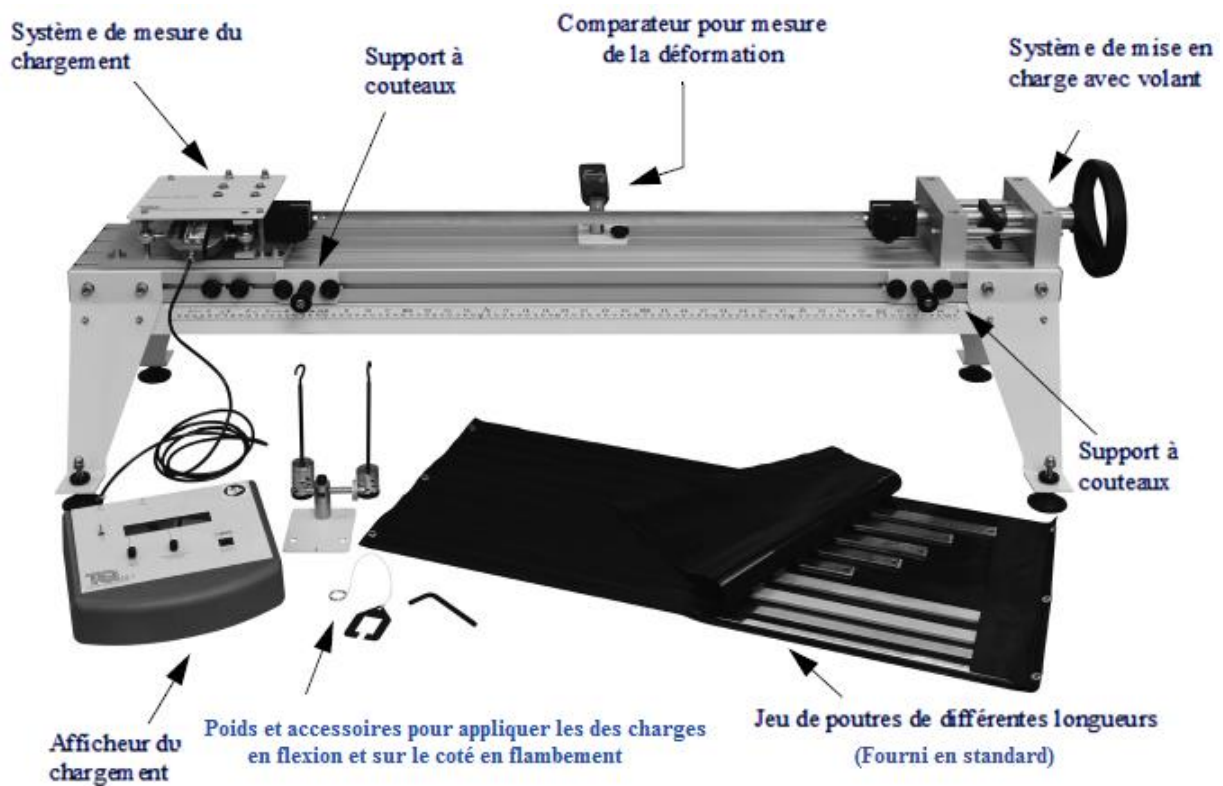
Les valeurs moyennes (ordre de grandeur) adoptées sont en général :

- $\lambda_c \approx 100$ pour les profilés acier
- $\lambda_c \approx 70$ pour les poteaux en bois ou en aluminium
- $\lambda_c \approx 60$ pour les poteaux en fonte

III. Montage et objectifs du TP

1. Matériel utilisé

Les techniciens et les ingénieurs qui étudient la résistance des matériaux ont besoin de savoir comment prédire les effets des forces de compression sur les poutres en compression. Ils peuvent utiliser ces informations pour décider du bon choix de matériau, de son épaisseur et de la forme de la poutre. Le banc TecQuipment SM1005 permet de montrer aux étudiants comment des poutres de différentes tailles, matériaux et section se déforment et flambent sous charge. Il permet de reproduire des cas de flambement de structures réelles telles que les soutènements de toiture dans des bâtiments ou des charpentes.



L'équipement comprend dix poutres de différents matériaux, de différentes longueurs et de sections différentes. Cet appareil permet aux étudiants d'apprendre les paramètres les plus importants qui influencent le flambement des poutres, entre autres :

- les conditions aux limites (selon si les extrémités sont encastées ou articulées)
- le matériau et les dimensions de la poutre

Destiné à solliciter des poutres droites à la compression, il permet :

- La mise en évidence du phénomène de flambement d'une poutre dont les extrémités peuvent, indépendamment, se trouver articulées ou encastées.
- La mesure de la variation de la flèche axiale ou transversale de la poutre, celle de l'effort de compression, et d'en déduire la charge critique d'Euler.
- La réalisation du flambement à l'ordre 1.

Description du matériel :

- L'appareil SM1005 est composé d'un châssis de précision avec pieds réglables. Le châssis possède des rainures permettant la mise en place du système de chargement et du système de mesure du chargement. Les rainures permettent de régler facilement la distance entre ces deux systèmes de manière à monter des poutres de différentes longueurs. Sous ces rainures latérales se trouve une échelle graduée en millimètre pour la mesure de la position des accessoires.
- Le système de chargement est composé d'un volant qui entraîne une vis sans fin afin d'exercer une compression sur une des extrémités de la poutre. Le système de mesure de la charge, placé à l'autre extrémité de la poutre, possède un capteur de charge relié à un mécanisme spécial. Ce mécanisme permet au capteur de mesurer uniquement la charge axiale (charge de flambement).
- Le capteur de charge est relié à un boîtier séparé qui permet l'affichage de la force axiale appliquée sur l'éprouvette. Ce boîtier possède une sortie pour la connexion à l'interface d'acquisition VDAS® proposée en option. Cette interface permet l'acquisition des données en provenance du banc à l'aide d'un ordinateur adapté (non fourni).

Le boîtier de mesure de la charge possède deux boutons : le premier permet la remise à zéro de la mesure avant d'effectuer une mesure. Le second bouton permet l'affichage de la charge maximale appliquée. Ceci est très utile pour déterminer la charge critique de flambement. Pour obtenir l'affichage de cette valeur, il faut appuyer quelques secondes sur ce bouton. Un petit symbole apparaît sur l'afficheur indiquant que cette fonction est active. L'afficheur du boîtier indique alors deux valeurs, une pour la charge appliquée et la seconde pour le maximum de la charge mesurée pendant l'expérience. Pour revenir à l'affichage uniquement de la charge appliquée sans avoir le maximum, appuyer de nouveau quelques secondes sur le bouton, le symbole sur l'afficheur disparaît alors.

- Un comparateur numérique permet la mesure du fléchissement de la poutre (en flexion). Il se monte sur un support en L pour les expériences de flambement.



Les poutres :

Avec l'appareil, il est fourni en standard dix poutres de sections rectangulaires pleines. Chaque poutre possède un numéro gravé à une de ses extrémités. Certaines poutres possèdent en plus des perçages pour réaliser les expériences avec des fixations spéciales excentrées. Six poutres sont constituées du même matériau, de la même épaisseur et de la même largeur, mais possèdent des longueurs différentes, afin de comparer l'influence de la longueur de la poutre sur le flambement. Les poutres les plus longues permettent également une "perte" de longueur à leurs extrémités, de manière à ce que vous puissiez les comparer avec les poutres plus courtes. Quatre autres poutres sont fournies en différent matériaux, épaisseur et longueur.

- Poutre n°1 - acier, 20 mm x 3 mm x 750 mm
- Poutre n°2 - acier, 20 mm x 3 mm x 700 mm
- Poutre n°3 - acier, 20 mm x 3 mm x 650 mm
- Poutre n°4 - acier, 20 mm x 3 mm x 625 mm
- Poutre n°5 - acier, 20 mm x 3 mm x 600 mm
- Poutre n°6 - acier, 20 mm x 3 mm x 550 mm
- Poutre n°7 - laiton, 19 mm x 4.8 mm x 750 mm
- Poutre n°8 - Aluminium, 19 mm x 4.8 mm x 750 mm
- Poutre n°9 - acier, 15 mm x 4 mm x 750 mm
- Poutre n°10 - acier, 10 mm x 5 mm x 750 mm

2. But du TP

Les objectifs de ce TP sont pour les éprouvettes testées :

- de déterminer toutes les caractéristiques liées au flambement ($I, L, b, h, I_{Gz}, \rho, \lambda$),
- de calculer la charge critique d'Euler théorique F_C^{Euler} ,
- d'en déduire la charge critique expérimentale F_C^{Exp} ,
- et de comparer les valeurs expérimentales aux valeurs théoriques.

Propriétés :

Matériau	E en GPa
Acier	207
Aluminium	69
Laiton	105

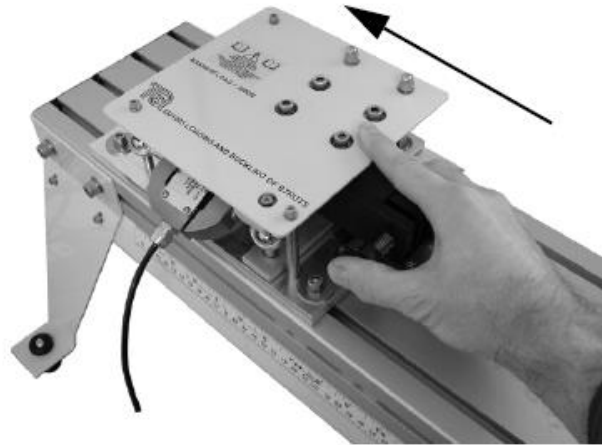
IV. Etude expérimentale

1. Procédure pour la mise en place de la poutre dans le montage de flambement

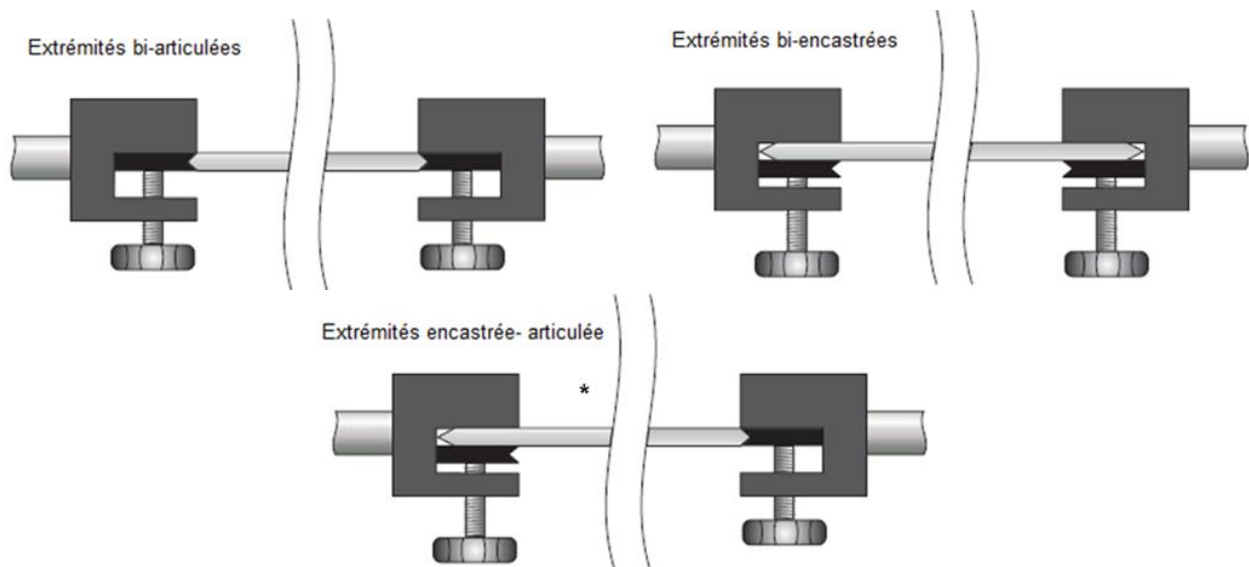


Cette procédure fonctionne pour tous les colonnes et toutes les conditions aux extrémités. Elle est décrite en détails dans le manuel d'utilisation, dans l'Expérience 3 - Forme de flambement d'une colonne, en retirant le comparateur numérique s'il est en place.

1. Trouvez la poutre dont vous avez besoin pour votre essai. Pour référence, mesurez l'épaisseur et la largeur de la poutre avec les outils de mesure appropriés.
2. Tournez le bouton moleté situé du côté du système de mis en charge afin de constituer un espace de 5 à 10 mm derrière son mandrin.
3. Utilisez la clé hexagonale fournie pour desserrer les quatre vis servant à fixer le mandrin situé du côté de l'extrémité de chargement et faites-le glisser le long de la base jusqu'à ce que votre poutre se positionne dans chaque mandrin pour respecter la condition aux extrémités que vous aurez choisi d'appliquer, comme indiqué ci-dessous. Resserrez les quatre vis.



Desserrage des fixations et déplacement du système de mesure vers l'extrémité du châssis



Les différentes conditions de fixation aux extrémités

2. Charge de flambement d'Euler pour des poutres bi-articulée aux extrémités

L'objectif de la 1^{ère} partie du TP est de déterminer, en condition où les extrémités sont bi-articulées, les charges de flambement de poutres réelles obtenues expérimentalement. Celles-ci seront ensuite comparées aux charges de flambement théorique (théorie d'Euler) afin de valider la théorie.

Essais à réaliser :

Les essais sont réalisés sur les 6 poutres en acier d'épaisseur 3 mm.

1. Créez un tableau de résultats vierge, semblable au tableau ci-dessous.

Caractéristiques de la poutre				Pic (Flambement) Charge 1	Pic (Flambement) Charge 2	Moyenne Pic (Flambement) Charge	Charge de flambement théorique
Réf.	Longueur/Largeur /Epaisseur		Moment d'Inertie				
n°1	750						
n°2	700						
n°3	650						
n°4	625						
n°5	600						
n°6	550						

- Connectez et allumez l'afficheur de charge. Attendez quelques minutes que l'afficheur ainsi que la cellule de charge situé à l'extrémité de la poutre chauffe. Tapotez sur l'extrémité de la cellule de charge pour retirer les effets du frottement, puis remettez l'afficheur à zéro.
- Placez la poutre à tester afin de réaliser les conditions aux extrémités articulées comme décrit en IV.1. Pour référence, mesurez la longueur, la largeur et l'épaisseur de la colonne avec les outils de mesure appropriés.
- Utilisez le volant manuel pour charger lentement la colonne. Lorsque vous tournez le volant manuel, visualisez l'affichage de la charge et la flèche de la colonne. Lorsque vous constatez que la charge n'augmente plus, mais que la colonne continue encore de fléchir, la colonne a flambé. Relevez la « charge maximale » (Charge 1), affichée sur l'Afficheur de charge. Puis déchargez.
- Appliquez une légère charge et poussez légèrement la colonne pour la faire flamber vers le côté opposé à votre dernier essai. Augmentez la charge jusqu'à ce que la colonne flambe et relevez la charge maximale (Charge 2).
- Déchargez et retirez la colonne.
- Répétez l'essai pour d'autres colonnes de **même section transversale et moment d'inertie**, mais pour des longueurs différentes.

Analyse des résultats :

1. Pour chaque colonne, calculez le pic de chargement moyen (de flambement) maximum.
2. Pour chaque colonne, calculez la charge de flambement théorique, après avoir déterminé le moment d'inertie.
3. Comparez les valeurs expérimentales aux valeurs théoriques. La théorie d'Euler prédit-elle la charge de flambement correctement ?
4. Pour ces poutres de même section transversale et moment d'inertie, que peut-on dire de leur charge de flambement en fonction de leur longueur ?

3. - Comparaison des charges de Flambement en fonction des conditions aux extrémités

L'objectif de la 2^{nde} partie du TP est de tester une colonne fixée avec toutes les trois conditions aux extrémités, de démontrer la relation entre la charge de flambement et les conditions aux extrémités et de comprendre le principe de la « longueur efficace » ou « longueur libre de flambement ».

Essais à réaliser :

Les essais sont réalisés sur 3 poutres en acier d'épaisseur 3 mm.

1. Créez un tableau de résultats vierge, semblable au tableau ci-dessous.

Condition de fixation	N° de Colonne	Pic (Flambement) Charge 1	Pic (Flambement) Charge 2	Moyenne Pic (Flambement) Charge	Charge de flambement théorique
Articulée - Articulée	5				
Articulée - Encastrée	4				
Encastrée - Encastrée	3				

2. Connectez et allumez l'afficheur de charge. Attendez quelques minutes que l'afficheur ainsi que la cellule de charge situé à l'extrémité de la poutre chauffe. Tapotez sur

l'extrémité de la cellule de charge pour retirer les effets du frottement, puis remettez l'afficheur à zéro.

3. Trouvez la colonne en acier de longueur 600 mm (numéro 5). Mesurez soigneusement ses dimensions et calculez son moment d'inertie. Montez la colonne afin de réaliser les conditions aux extrémités articulées comme décrit précédemment.
4. Utilisez le volant manuel pour charger lentement la colonne. Lorsque vous tournez le volant manuel, visualisez l'affichage de la charge et la flèche de la colonne. Lorsque vous constatez que la charge n'augmente plus, mais que la colonne continue encore de fléchir, la colonne a flambé. Relevez la « charge maximale » (Charge 1), affichée sur l'Afficheur de charge. Puis déchargez.
5. Appliquez une légère charge et poussez légèrement la colonne pour la faire flamber vers le côté opposé à votre dernier essai. Augmentez la charge jusqu'à ce que la colonne flambe et relevez la charge maximale (Charge 2).
6. Déchargez et retirez la colonne.
7. Montez la colonne n°4 en réalisant les conditions aux extrémités encastree-articulée. Utilisez l'extrémité encastree sur le côté du système de chargement. Cette colonne est plus longue de 25 mm que la colonne n°3, pour tenir compte de la perte de longueur du fait du système de fixation. Cela permet d'avoir une longueur d'essai constante afin d'effectuer des comparaisons correctes.
8. Répétez l'essai et relevez les charges.
9. Répétez l'essai pour la colonne n°3 dans les conditions extrémités encastree-encastree. De nouveau, la longueur de cette colonne prend en compte la perte de longueur du fait du système de fixation afin d'effectuer des comparaisons correctes.

Analyse des résultats :

1. *Pour chaque colonne, calculez le pic de chargement moyen (de flambement) maximum.*
2. *Les charges de flambement pour chaque condition de fixation aux extrémités sont-elles en accord avec la théorie ?*
Rappel : Les charges de flambement en conditions bi-encastree et encastree-articulée sont respectivement quatre fois et deux fois supérieures à celle en condition bi-articulées.
3. *Vos résultats pour la condition bi-encastree peuvent être inférieurs à ceux attendus. Pouvez-vous expliquer pourquoi ?*
4. *Pour chaque colonne, calculez la charge de flambement théorique, et comparez les aux valeurs expérimentales*