

Section 4 : Méthodes énergétiques

• Objectifs

- Comprendre la définition de l'énergie de déformation
- Savoir calculer l'énergie de déformation d'une structure soumise à différents chargements
- Savoir utiliser le théorème de Maxwell-Betti
- Comprendre la démonstration du théorème de Castigliano



Source : www.moneypit.com



Phénomène physique

Schéma de l'étude

Préparé par Henri Yelle, ing, Marie Bernard, ing et Daniel Therriault, ing.



Énergie de déformation

4.1 Énergie de déformation

4.1.1 Expression de l'énergie pour un chargement uniaxial

4.1.2 Expression de l'énergie pour une force de cisaillement

4.1.3 Énergie de déformation élastique pour un chargement général

Méthodes énergétiques

4.2 Cas particuliers

4.2.1 Tension

4.2.2 Flexion

4.2.3 Torsion

4.3 Théorème de la réciprocité, de *Maxwell-Betti*

4.4 Théorème de *Castigliano*

4.4.1 Application aux systèmes isostatiques

4.4.2 Application aux systèmes hyperstatiques

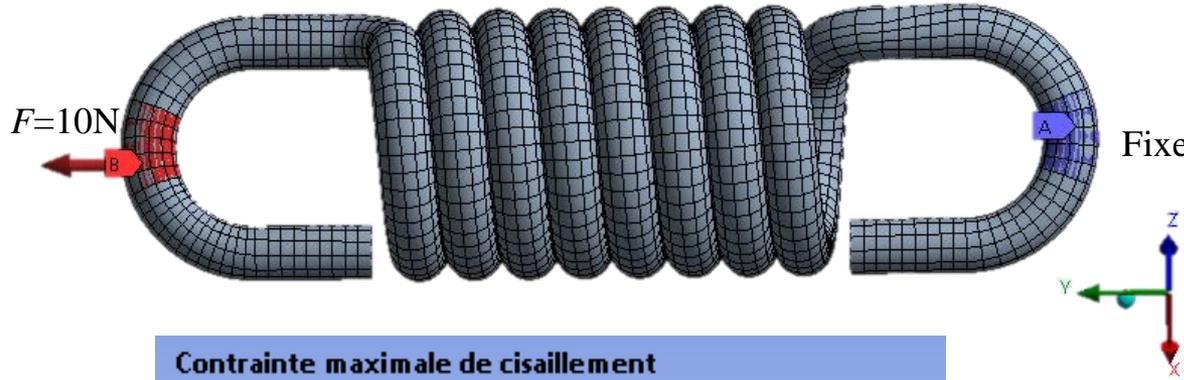
4.5 Effets de l'effort tranchant

Méthodes énergétiques

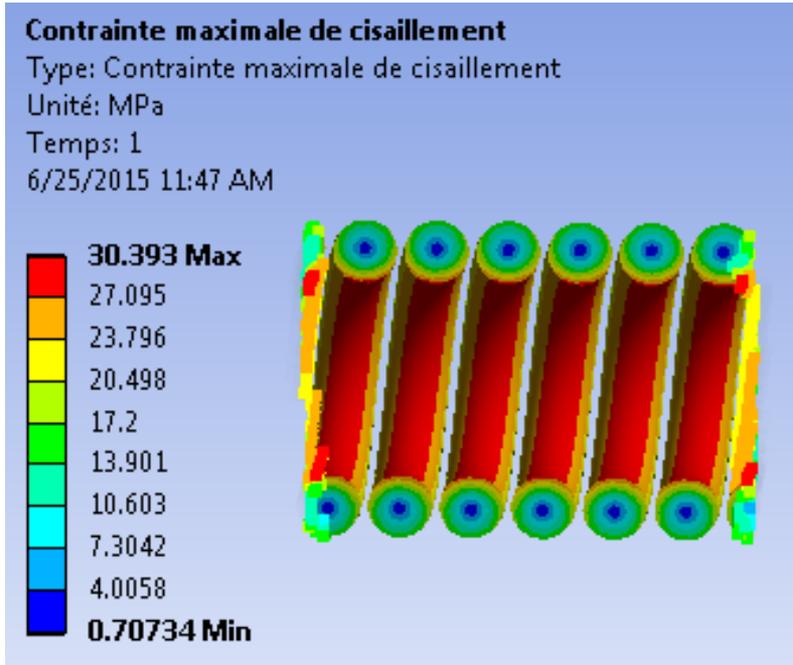
- Théorème de Castigliano est basé sur **l'énergie de déformation** pour calculer
 1. Déplacements (ou rotations) en traction, en flexion et en torsion d'une structure isostatique ou hyperstatique
 2. Réactions d'un système hyperstatique
- L'énergie de déformation se calcule par

$$U = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_x \cdot \varepsilon_x + \sigma_y \cdot \varepsilon_y + \sigma_z \cdot \varepsilon_z + \tau_{xy} \cdot \gamma_{xy} + \tau_{yz} \cdot \gamma_{yz} + \tau_{zx} \cdot \gamma_{zx}) \cdot dV \quad (14.2)$$

Contraintes dans un ressort de traction



Diamètre fil $d = 2.2\text{mm}$
 Diamètre d'enroulement $D = 8.8\text{mm}$
 Matériau: acier ($G = 81500\text{ MPa}$)



Calcul du cisaillement maximal
 (Wikipédia: Formule donnée par Roever)

$$\tau_m = K \tau = K \frac{8 P D}{\pi d^3}$$

$$\text{soit } \frac{\tau_m}{K} = \frac{8 P D}{\pi d^3}$$

$$\text{avec } K = \frac{4m - 1}{4m - 4} + \frac{0,615}{m} \text{ en posant } m = D/d$$

$$\Rightarrow \tau_m = 29.54\text{ MPa}$$

4.1 Énergie de déformation

4.1.1 Expression de l'énergie pour un chargement uniaxial

Démonstration :

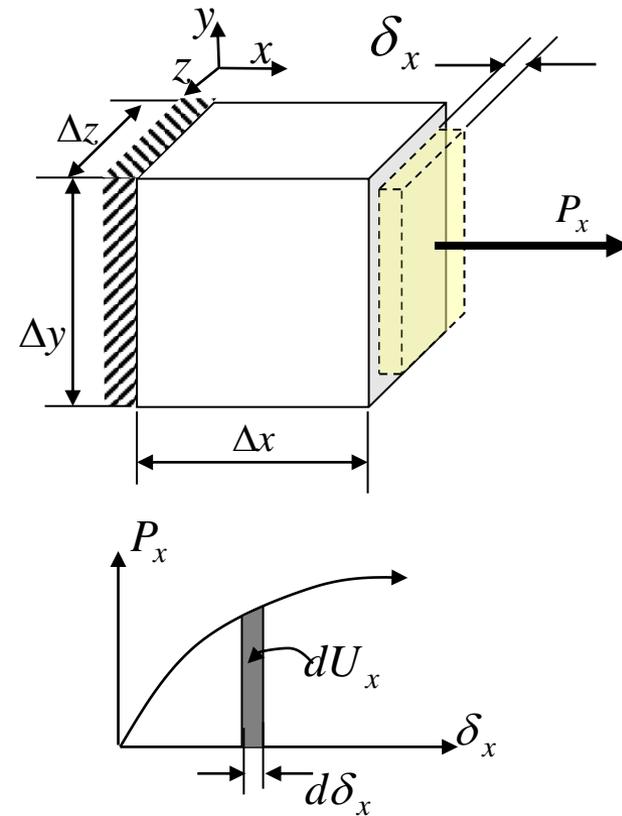
Force normale P_x sur un élément de dimensions Δx , Δy et Δz produit un allongement δ_x .

L'énergie de déformation dU_x développée par la force P_x sur cet élément est :

$$dU_x = P_x \cdot d\delta_x$$

Exprimée par unité de volume, la densité d'énergie de déformation, U_{x0} , développée par la force P_x devient :

$$U_{x0} = \frac{1}{V} \int_0^{\delta_x} P_x d\delta_x = \int_0^{\delta_x} \frac{P_x}{\Delta y \Delta z} d \frac{\delta_x}{\Delta x} = \int_0^{\varepsilon_x} \sigma_x d\varepsilon_x$$



La notation adoptée ici est différente de celle utilisée dans le volume R des M.

4.1 Énergie de déformation

4.1.1 Expression de l'énergie pour un chargement uniaxial

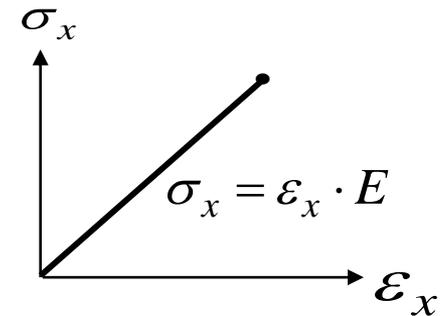
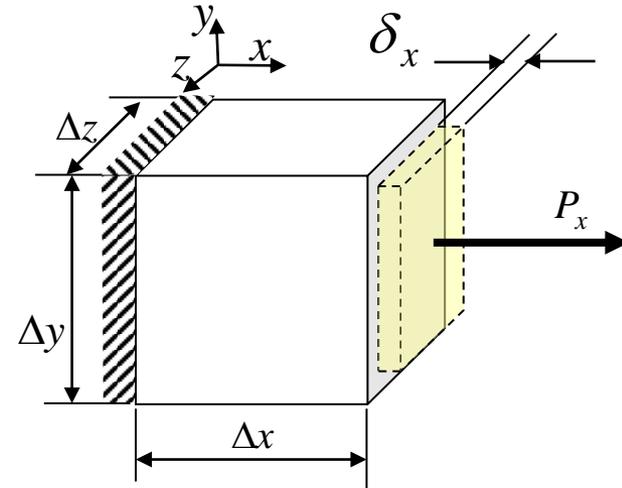
Démonstration (suite) :

En supposant un comportement élastique linéaire

$$U_{x0} = \frac{1}{V} \int_0^{\delta_x} P_x d\delta_x = \int_0^{\delta_x} \frac{P_x}{\Delta y \Delta z} d\delta_x = \int_0^{\delta_x} \frac{P_x}{\Delta x} d\delta_x = \int_0^{\varepsilon_x} \sigma_x d\varepsilon_x$$

$$U_{x0} = \int_0^{\varepsilon_x} E \cdot \varepsilon_x \cdot d\varepsilon_x$$

$$U_{x0} = \frac{E \cdot \varepsilon_x^2}{2} = \frac{E \cdot \varepsilon_x}{2} \varepsilon_x = \frac{\sigma_x \cdot \varepsilon_x}{2}$$

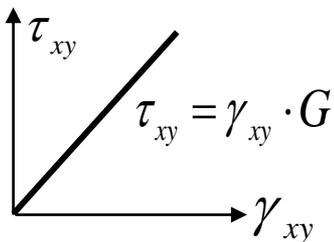
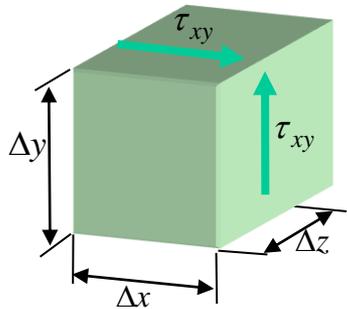
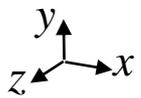


4.1 Énergie de déformation

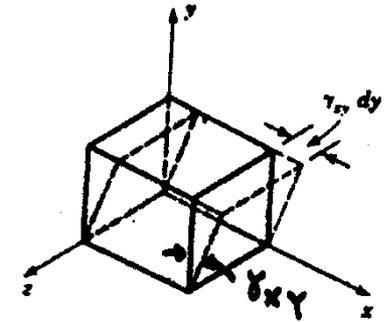
4.1.2 Expression de l'énergie pour une force de cisaillement

- Démonstration :**

- Force de cisaillement appliquée parallèlement à l'axe x sur la face $\Delta x - \Delta z$ (cause du cisaillement) développe une énergie



Par analogie avec la contrainte normale



$$U_{xy0} = \frac{1}{V} \int_0^{\gamma_{xy}} \tau_{xy} \cdot dx \cdot dz \cdot d(\gamma_{xy} dy)$$

$$U_{xy0} = \int_0^{\gamma_{xy}} \tau_{xy} \frac{dx}{dx} \frac{dz}{dz} d(\gamma_{xy}) \frac{dy}{dy}$$

$$U_{xy0} = \int_0^{\gamma_{xy}} \tau_{xy} d\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy} \cdot \gamma_{xy}}{2}$$

4.1 Énergie de déformation

4.1.3 Énergie de déformation élastique pour un chargement général

- **Démonstration :**

- Forces normales et de cisaillement, appliquées successivement sur les faces x , y et z , développent des énergies U_{x0} , U_{xy0} , U_{y0} , U_{yz0} , U_{z0} , et U_{zx0} .
- En appliquant le **principe de superposition** et la loi de Hooke (hypothèses de petites déformations et domaine linéaire)

$$U_{totale0} = \sum U_0$$

$$U_0 = \frac{1}{2} (\sigma_x \cdot \varepsilon_x + \sigma_y \cdot \varepsilon_y + \sigma_z \cdot \varepsilon_z + \tau_{xy} \cdot \gamma_{xy} + \tau_{yz} \cdot \gamma_{yz} + \tau_{zx} \cdot \gamma_{zx})$$

$$U = \int_V U_0 \cdot dV$$

$$U = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_x \cdot \varepsilon_x + \sigma_y \cdot \varepsilon_y + \sigma_z \cdot \varepsilon_z + \tau_{xy} \cdot \gamma_{xy} + \tau_{yz} \cdot \gamma_{yz} + \tau_{zx} \cdot \gamma_{zx}) \cdot dV$$

4.2 Énergie de déformation

4.2.1 Cas particulier: chargement uniaxial

$$U = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_x \cdot \varepsilon_x + \sigma_y \cdot \varepsilon_y + \sigma_z \cdot \varepsilon_z + \tau_{xy} \cdot \gamma_{xy} + \tau_{yz} \cdot \gamma_{yz} + \tau_{zx} \cdot \gamma_{zx}) \cdot dV$$

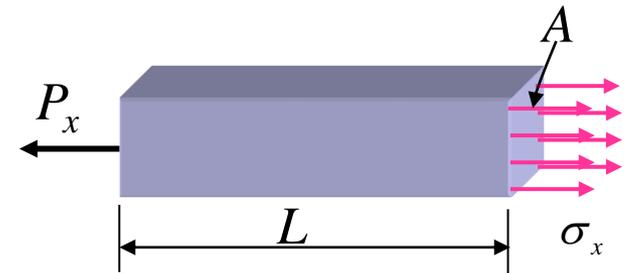
$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$U = \int_V \frac{\sigma_x \cdot \varepsilon_x}{2} dV$$

$$U = \int_V \frac{\sigma_x}{2} \cdot \frac{\sigma_x}{E} dV = \frac{1}{2 \cdot E} \int_V \sigma_x^2 dV$$

$$U = \frac{1}{2 \cdot E} \int_0^L \left(\frac{P_x}{A} \right)^2 A \cdot dx = \frac{1}{2 \cdot E} \left(\frac{P_x}{A} \right)^2 \cdot A \cdot L$$

$$U = \frac{P_x^2 \cdot L}{2 \cdot A \cdot E}$$



4.2 Énergie de déformation

4.2.2 Cas particulier: poutre en flexion ordinaire

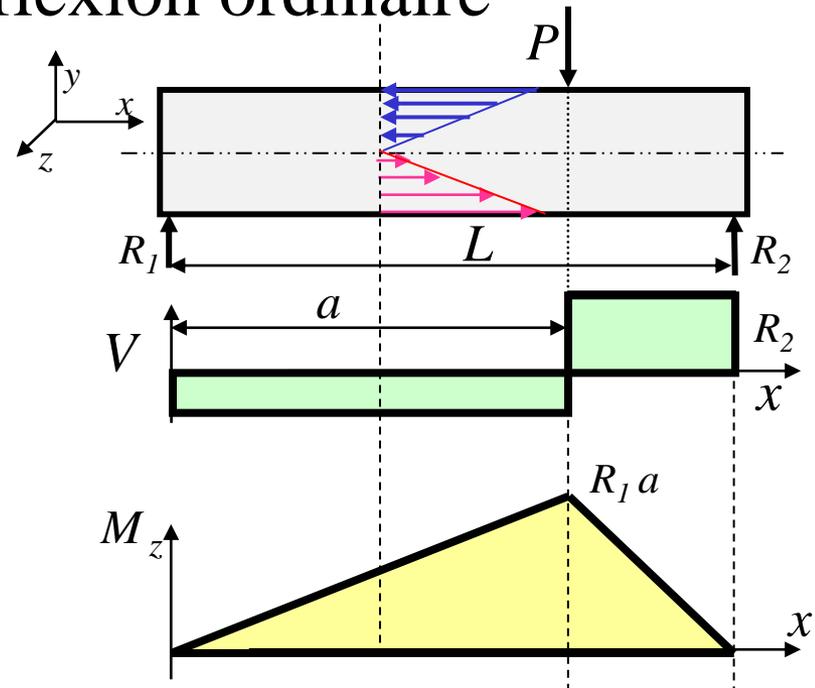
$$U = \int_V \frac{1}{2} \sigma_x \cdot \varepsilon_x \cdot dV \quad ; \sigma_x = \frac{-M_z \cdot y}{I}$$

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$$

$$U = \int_0^L \int_A \frac{1}{2} \cdot \frac{M_z^2 \cdot y^2}{E \cdot I^2} dA \cdot dx$$

$$U = \int_0^L \frac{M_z^2}{2 \cdot E \cdot I^2} dx \int_A y^2 dA$$

où, par définition $\int_A y^2 dA = I \Rightarrow U = \int_0^L \frac{M_z^2}{2 \cdot E \cdot I} dx$



Pour le moment, on néglige l'énergie associée à la contrainte de cisaillement due à l'effort tranchant

4.2 Énergie de déformation

4.2.3 Cas particulier: barreau en torsion

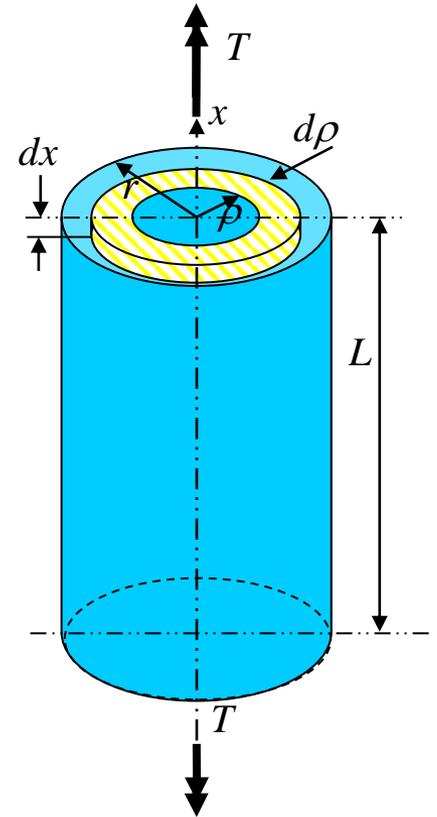
$$U = \frac{1}{2} \int_V \tau_{x\theta} \cdot \gamma_{x\theta} dV$$

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L \int_0^r \frac{T \cdot \rho}{J} \cdot \frac{T \cdot \rho}{G J} 2\pi \rho d\rho dx$$

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L \int_0^r \frac{T^2}{G J^2} 2\pi \rho^3 d\rho dx$$

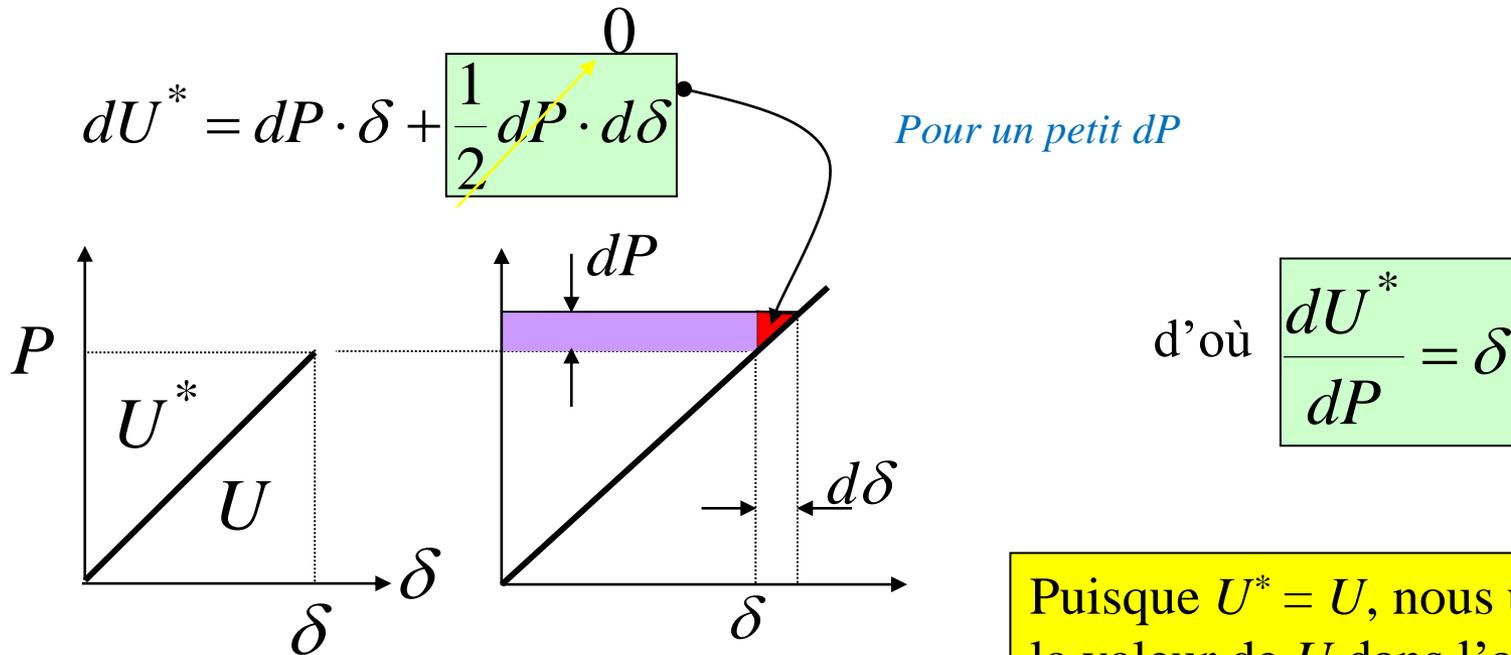
$$U = \int_0^L \frac{T^2}{G J^2} \frac{\pi r^4}{4} dx = \int_0^L \frac{T^2}{G J^2} \frac{J}{2} dx$$

$$U = \frac{1}{2} \frac{T^2 L}{G J}$$



Théorème de Castigliano

- Basé sur l'énergie de déformation complémentaire U^*
 - Pour un matériau élastique linéaire, l'énergie de déformation complémentaire U^* est égale à l'énergie de déformation U



Puisque $U^* = U$, nous utiliserons la valeur de U dans l'application du théorème de *Castigliano*

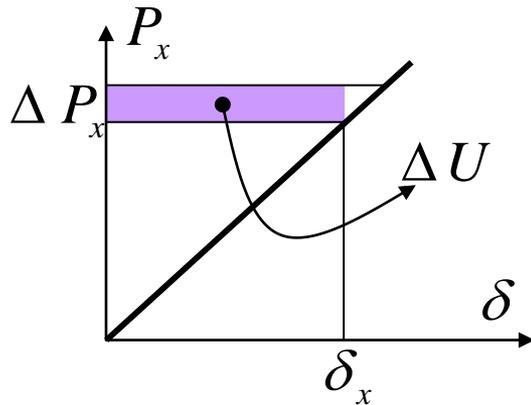
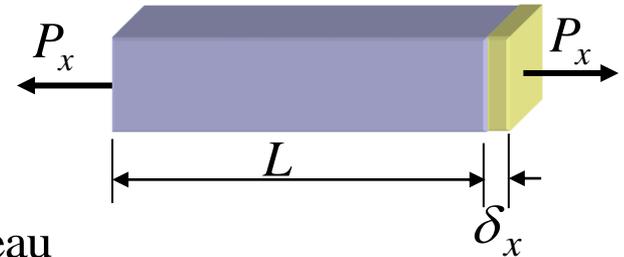
Théorème de Castigliano

Cas particulier: chargement uniaxial

$$U = \frac{P_x^2 \cdot L}{2 \cdot A \cdot E} = \frac{1}{2} P_x \left[\frac{P_x L}{A E} \right]$$

$$U = \frac{1}{2} P_x \delta_x$$

δ_x , l'allongement du barreau



$$\Delta U = \delta_x \Delta P_x \Rightarrow \frac{\Delta U}{\Delta P_x} = \delta_x \quad \text{Si } \Delta P_x \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{\partial U}{\partial P_x} = \delta_x$$

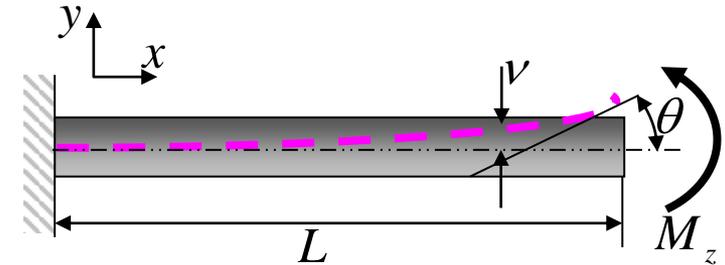
Théorème de Castigliano

Cas particulier: poutre en flexion pure

$$U = \int_0^L \frac{M_z^2}{2 \cdot E \cdot I} dx$$

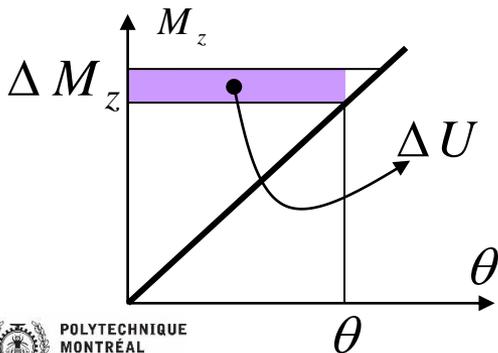
$$U = \frac{M_z}{2} \int_0^L \frac{M_z}{E \cdot I} dx = \frac{M_z}{2} \int_0^L \frac{d^2 v}{dx^2} dx$$

$$U = \frac{M_z}{2} \left[\frac{dv}{dx} \Big|_{x=L} - \frac{dv}{dx} \Big|_{x=0} \right] = \frac{M_z}{2} \theta$$



$$\frac{dv}{dx} \Big|_{x=0} = 0 \text{ et } \frac{dv}{dx} \Big|_{x=L} = \theta$$

Conditions limites



$$\Delta U = \theta \Delta M_z \Rightarrow \frac{\Delta U}{\Delta M_z} = \theta \quad \text{Si } \Delta M_z \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{\partial U}{\partial M_z} = \theta$$

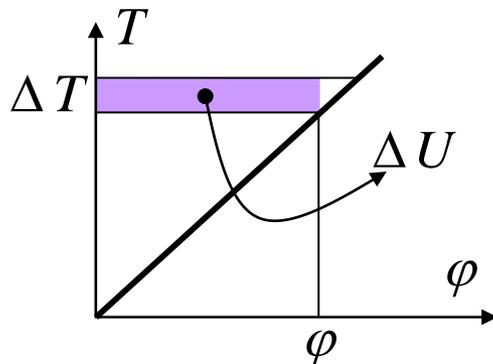
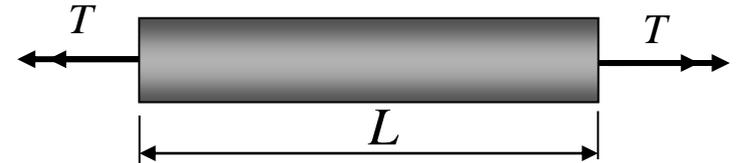
Théorème de Castigliano

Cas particulier: barre en torsion

$$U = \frac{1}{2} \frac{T^2 \cdot L}{J \cdot G}$$

$$U = \frac{1}{2} T \frac{T \cdot L}{J \cdot G}$$

$$U = \frac{1}{2} T \varphi$$



$$\Delta U = \varphi \Delta T \Rightarrow \frac{\Delta U}{\Delta T} = \varphi$$

$$\text{Si } \Delta T \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{\partial U}{\partial T} = \varphi$$

4.3 Théorème de Maxwell-Betti

Le **travail** fait par un système de n charges P_i (système **I**) à la suite des déplacements $(\delta_i)_Q$ causés par un second système de m charges Q_j (système **II**) est égal au travail fait par un système de m charges Q_j à la suite des déplacements $(\delta_j)_P$ causés par le premier système de n charges P_i :

$$\sum_{i=1}^n P_i \cdot (\delta_i)_{\sum_{j=1}^m Q_j} = \sum_{j=1}^m Q_j \cdot (\delta_j)_{\sum_{i=1}^n P_i}$$

Formule générale

Lorsque $n = m = 1$, la formule devient

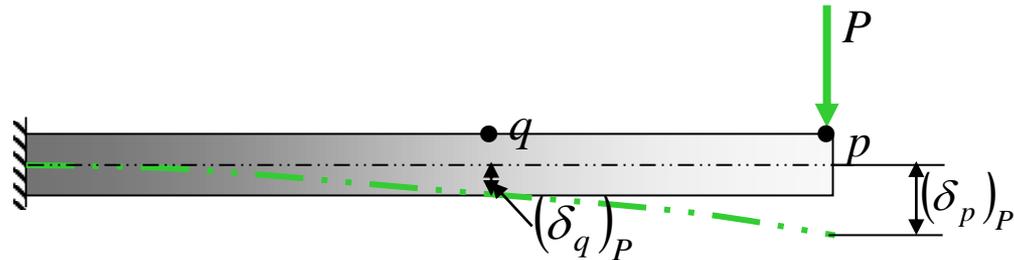
$$P \cdot (\delta_P)_Q = Q \cdot (\delta_Q)_P$$

Position
Force

4.3 Théorème de Maxwell-Betti

Démonstration

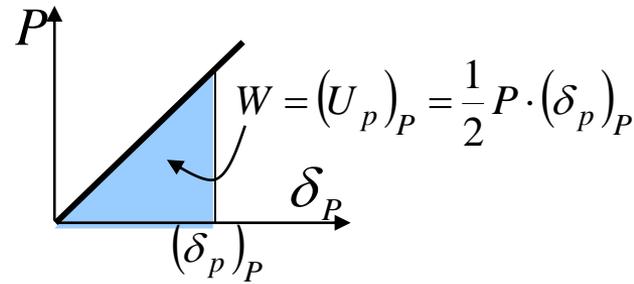
Séquence 1 :



Considérons la poutre encastree ci dessus. Une force P (système I) appliquée en p causera une flèche $(\delta_p)_P$ au point p et une flèche $(\delta_q)_P$ au point q .

Si le matériau de la poutre demeure dans le domaine élastique, le travail W fait par la force P en p est égal à l'énergie de déformation U mise dans la poutre et vaut :

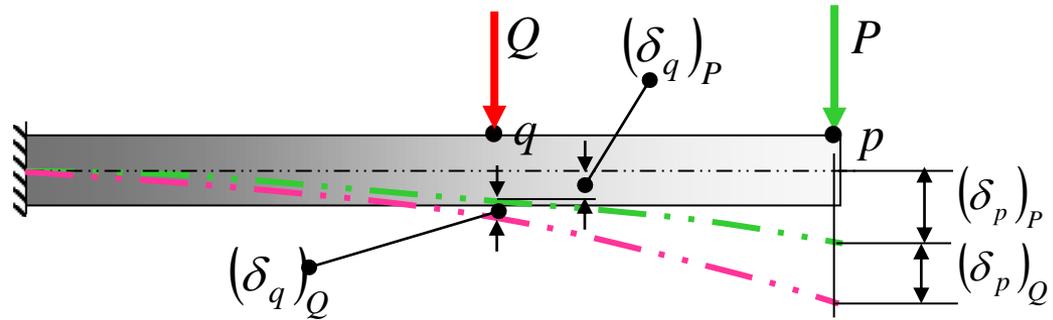
$$W = (U_p)_P = \frac{1}{2} P \cdot (\delta_p)_P$$



4.3 Théorème de Maxwell-Betti

Démonstration

Séquence 1 (suite):

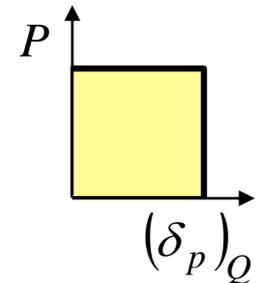
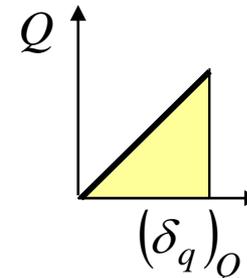
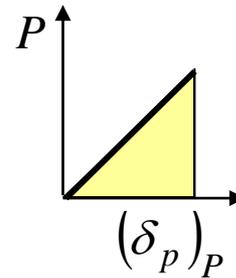


Si on ajoute une force Q (système II) en q , cette force causera un déplacement supplémentaire de la poutre de $(\delta_p)_Q$ en p et de $(\delta_q)_Q$ en q .

L'énergie maintenant emmagasinée dans la poutre est la somme du travail de la force Q en q et de celui de la force P en p , soit :

$$U = (U_p)_P + (U_q)_Q + (U_p)_Q$$

$$U_1 = \frac{1}{2} P (\delta_p)_P + \frac{1}{2} Q (\delta_q)_Q + P (\delta_p)_Q$$



4.3 Théorème de Maxwell-Betti

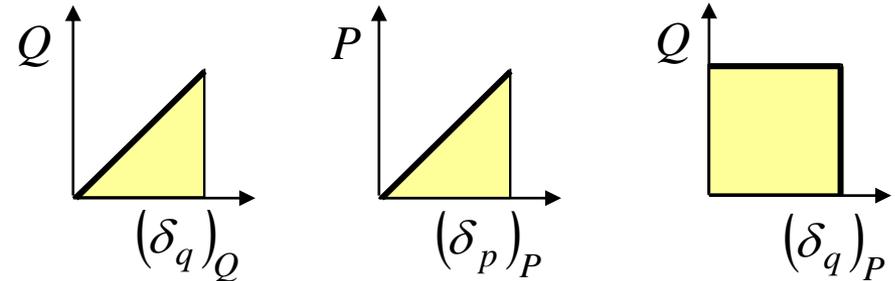
Démonstration

Séquence 2 :

Reprenons la même poutre que précédemment, mais en appliquant d'abord la force Q en q et ensuite le force P en p .

Par une démarche similaire à la précédente, on obtient que l'énergie élastique U_2 emmagasinée dans la poutre est :

$$U_2 = \frac{1}{2} Q (\delta_q)_Q + \frac{1}{2} P (\delta_p)_P + Q (\delta_q)_P$$



Il faut que $U_1 = U_2$, ce qui implique

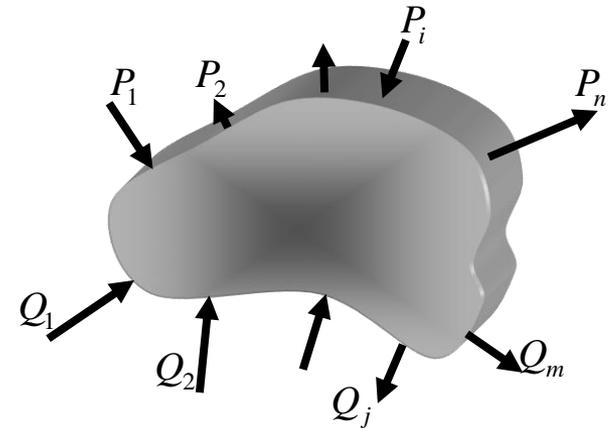
$$P (\delta_p)_Q = Q (\delta_q)_P$$

Rappel de U_1
$$U_1 = \frac{1}{2} P (\delta_p)_P + \frac{1}{2} Q (\delta_q)_Q + P (\delta_p)_Q$$

4.3 Théorème de Maxwell-Betti

Généralisation du théorème à un ensemble de n forces P_i et de m forces Q_j sur un corps de forme générale (patatoïde)

Le travail fait par un système de n charges P_i (système **I**) à la suite des déplacements $(\delta_i)_Q$ causés par un second système de m charges Q_j (système **II**) est égal au travail fait par un système de m charges Q_j à la suite des déplacements $(\delta_j)_P$ causés par le premier système de n charges P_i



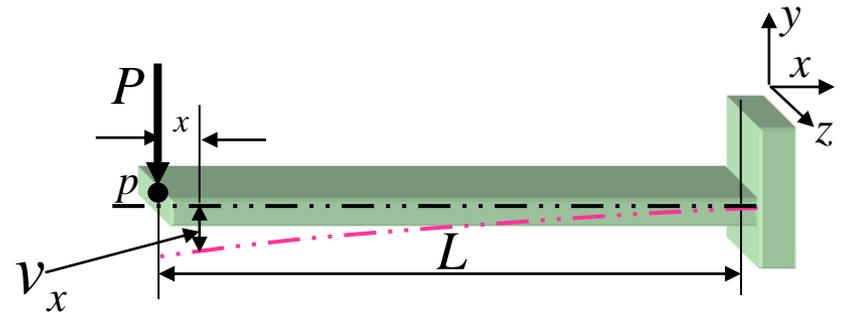
$$\sum_{i=1}^n P_i \cdot (\delta_i)_{\sum_{j=1}^m Q_j} = \sum_{j=1}^m Q_j \cdot (\delta_j)_{\sum_{i=1}^n P_i}$$

4.3 Théorème de Maxwell-Betti

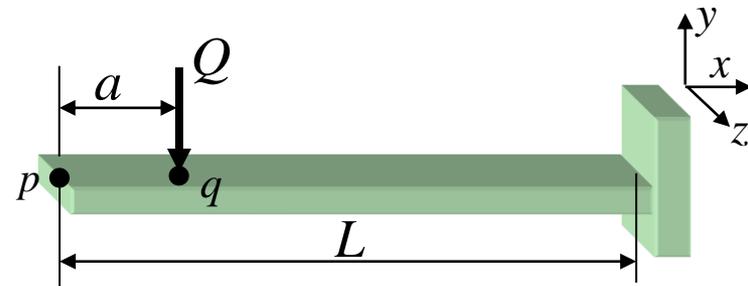
Exemple 1

L'expression v_x de la déformée de cette poutre lorsqu'une force P agit à une distance L de l'encastrement est :

$$v_x = \frac{-P}{6 \cdot E \cdot I} (2 \cdot L^3 - 3 \cdot L^2 \cdot x + x^3)$$



On demande de trouver l'expression du déplacement du point p lorsqu'une force Q agit en q .



4.3 Théorème de Maxwell-Betti

Exemple 1 (suite)

On connaît $(\delta_p)_p$ et $(\delta_q)_p$; on cherche $(\delta_p)_q$

Du théorème de *Maxwell-Betti*,

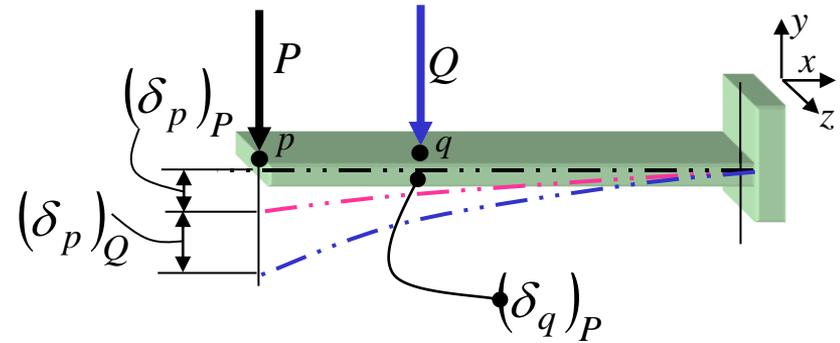
on peut écrire : $P(\delta_p)_q = Q(\delta_q)_p$

D'où : $(\delta_p)_q = \frac{Q}{P}(\delta_q)_p$

à $x = a$ $v_x = (\delta_q)_p$

$$(\delta_p)_q = \frac{Q}{P} \left[\frac{-P}{6 \cdot E \cdot I} (2 \cdot L^3 - 3 \cdot L^2 \cdot a + a^3) \right]$$

$$(\delta_p)_q = \frac{-Q}{6 \cdot E \cdot I} (2 \cdot L^3 - 3 \cdot L^2 \cdot a + a^3)$$



4.3 Théorème de Maxwell-Betti

Exemple 2

Un camion stationné en un point c d'un pont cause une flèche de $\delta_c = 52$ mm au point c et $\delta_v = 38$ mm au point v . Par la suite, une voiture de 1000 kg s'amène au point v du pont. On mesure les flèches à nouveau et on trouve $\delta_c = 53$ mm et $\delta_v = 40$ mm.

On demande quelle est la masse du camion?

Solution

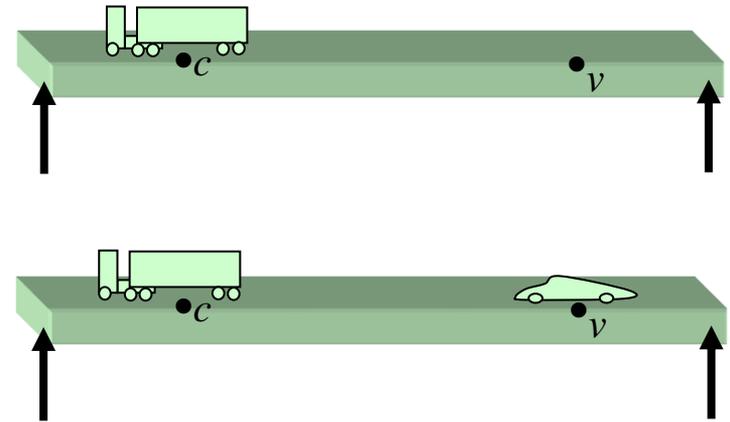
C est la masse du camion et

V est celle de la voiture

$$(\delta_c)_C = 52\text{mm} \quad ; \quad (\delta_v)_C = 38\text{mm}$$

$$(\delta_c)_C + (\delta_c)_V = 53\text{mm} \quad ; \quad (\delta_v)_C + (\delta_v)_V = 40\text{mm}$$

$$C(\delta_c)_V = V(\delta_v)_C \quad ; \quad C = V \frac{(\delta_v)_C}{(\delta_c)_V} = 1000 \cdot \frac{38}{53 - 52} = 38000\text{kg}$$



4.3 Théorème de Maxwell-Betti

Exemple 3

Sur la poutre suivante, lorsque $P = 10 \text{ kN}$ on mesure le déplacement au point p , $(\delta_p)_P = 12 \text{ mm}$ et le déplacement au point q , $(\delta_q)_P = 9 \text{ mm}$.

Si, par la suite, on ajoute une force $Q = 5 \text{ kN}$ en q , sans rien mesurer à nouveau. On demande de trouver $(\delta_p)_{\text{total}}$

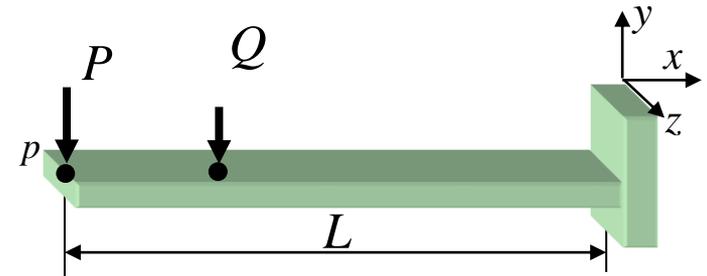
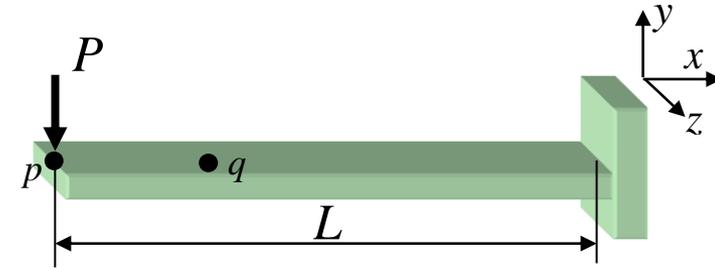
Solution

$$(\delta_p)_Q = ?$$

$$P(\delta_p)_Q = Q(\delta_q)_P \text{ où } (\delta_q)_P = 9 \text{ mm}$$

$$P = 10 \text{ kN et } Q = 5 \text{ kN}$$

$$(\delta_p)_Q = \frac{Q}{P}(\delta_q)_P = \frac{5}{10} \cdot 9 = 4,5 \text{ mm}$$



$$(\delta_p)_{\text{total}} = (\delta_p)_P + (\delta_p)_Q$$

$$(\delta_p)_{\text{total}} = 12 + 4,5 = 16,5 \text{ mm}$$

4.4 Théorème de Castigliano

- Au delà de ces quelques petites utilités, le théorème de *Maxwell-Betti* intervient dans la démonstration du théorème de *Castigliano*.
 - Du théorème de *Castigliano* on déduit une **technique puissante** basée sur l'énergie de déformation pour faire le calcul du déplacement (ou rotation, ou déplacement angulaire) en divers points d'une structure supportant plus d'un chargement (ex. tension, torsion et flexion superposées).
- Th. de *Castigliano* n'est valide que pour des **structures en équilibre**
 - Taux de variation de l'énergie de déformation d'un corps, par rapport à toute force indépendante P , est égal à la flèche au point d'application de cette force, suivant la direction de la force

$$\frac{\partial U}{\partial P} = \delta_P$$

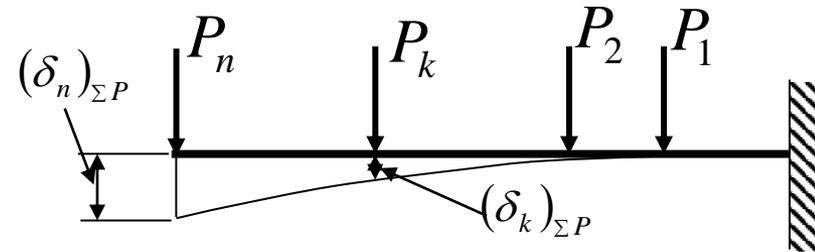
$$\frac{\partial U}{\partial M} = \theta$$

$$\frac{\partial U}{\partial T} = \varphi$$

4.4 Théorème de Castigliano

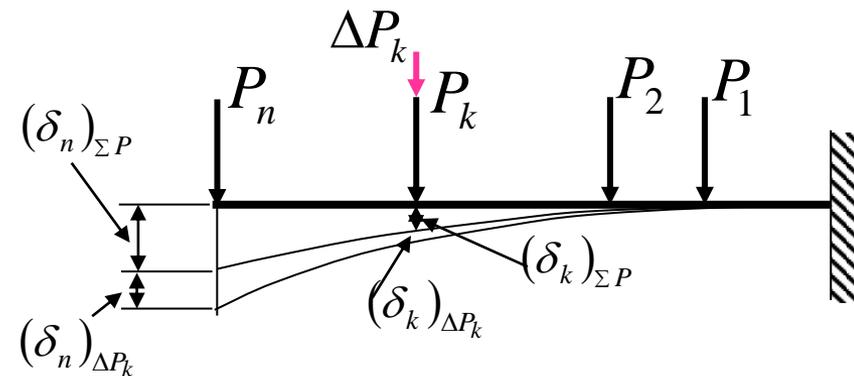
Démonstration du Th. de Castigliano

Une poutre encadrée est en *équilibre* sous l'effet de n forces. Sous la force P_n , la flèche est $(\delta_n)_{\Sigma P}$ due à toutes les forces P_i ; **les forces P_i constituent le système I**. En particulier, sous la force P_k , la flèche est $(\delta_k)_{\Sigma P}$.



a) Équilibre sous système I

Si on ajoute une force ΔP_k (**système II**) à la force P_k , la nouvelle position d'*équilibre* de la poutre est comme à la figure (b)



b) Équilibre sous systèmes I et II

Entre les positions a) et b), l'énergie emmagasinée dans la poutre change d'une quantité ΔU

4.4 Théorème de Castigliano

Démonstration du Th. de Castigliano

L'énergie emmagasinée dans la poutre change d'une quantité ΔU

$$\Delta U = \frac{1}{2} \cdot \Delta P_k \cdot (\delta_k)_{\Delta P_k} + \sum_{i=1}^n P_i \cdot (\delta_i)_{\Delta P_k}$$

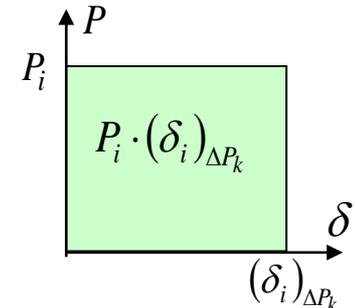
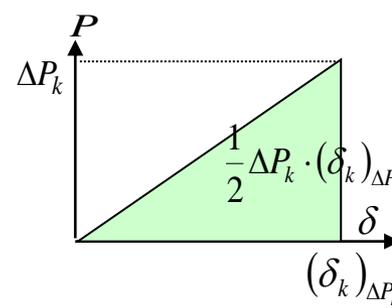
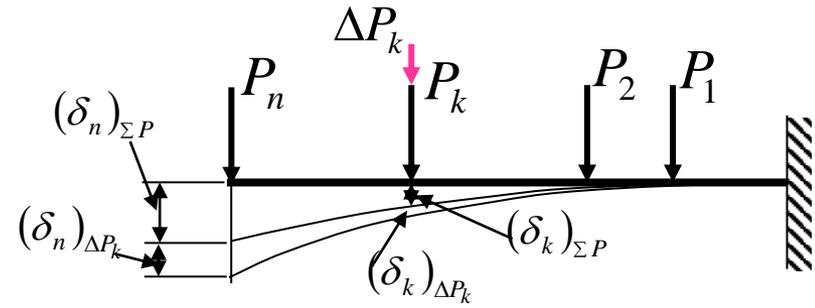
Selon le Th. de Maxwell-Betti

$$\sum_{i=1}^n P_i \cdot (\delta_i)_{\Delta P_k} = \Delta P_k \cdot (\delta_k)_{\sum P_i}$$

$$\Delta U = \frac{1}{2} \cdot \Delta P_k \cdot (\delta_k)_{\Delta P_k} + \Delta P_k \cdot (\delta_k)_{\sum P_i}$$

En divisant des deux côtés par ΔP_k

$$\frac{\Delta U}{\Delta P_k} = \frac{1}{2} \cdot (\delta_k)_{\Delta P_k} + (\delta_k)_{\sum P_i}$$

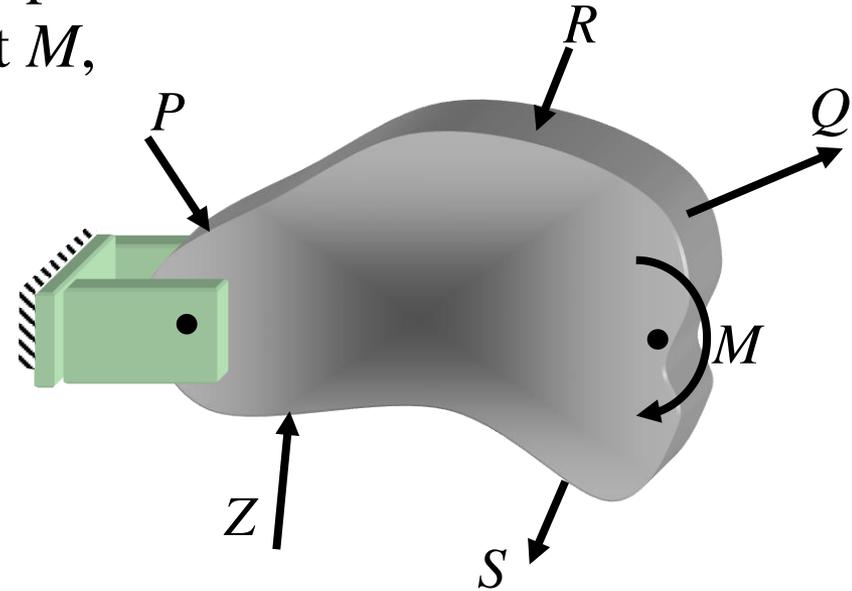


À la limite, $\Delta P_k \rightarrow 0$, $(\delta_k)_{\Delta P_k} \rightarrow 0$ et

$$\frac{\partial U}{\partial P_k} = (\delta_k)_{\sum P_i}$$

4.4 Théorème de Castigliano

Pour un **systeme en équilibre**, sollicité par des forces P , Q , R , S , Z et un moment M , le théorème de *Castigliano* devient :



$$\frac{\partial U}{\partial P} = \delta_p$$

$$\frac{\partial U}{\partial M} = \theta \quad \text{où } U = U(P, R, Q, M, S \text{ et } Z)$$

4.4 Théorème de Castigliano

- **Objectifs**
 - Utiliser le théorème de Castigliano pour calculer des déplacements, rotations ou rotations angulaires de structures isostatiques
 - Faire l'équilibre de structures isostatiques
 - Trouver les efforts internes dans une structures
 - Appliquer le théorème de Castigliano



Énergie de déformation

4.1 Énergie de déformation

4.4.1 Expression de l'énergie pour un chargement uniaxial

4.4.2 Expression de l'énergie pour une force de cisaillement

4.4.3 Énergie de déformation élastique pour un chargement général

Méthodes énergétiques

4.2 Cas particuliers

4.2.1 Tension

4.2.2 Flexion

4.2.3 Torsion

4.3 Théorème de la réciprocité, de *Maxwell-Betti*

4.4 Théorème de *Castigliano*

4.4.1 Application aux systèmes isostatiques

4.4.2 Application aux systèmes hyperstatiques

4.5 Effets de l'effort tranchant

4.4.1 Système isostatique

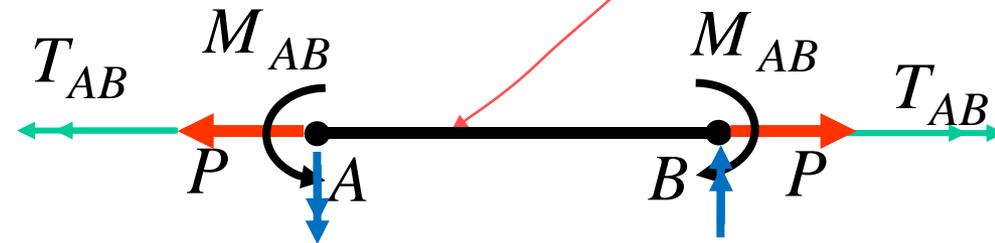
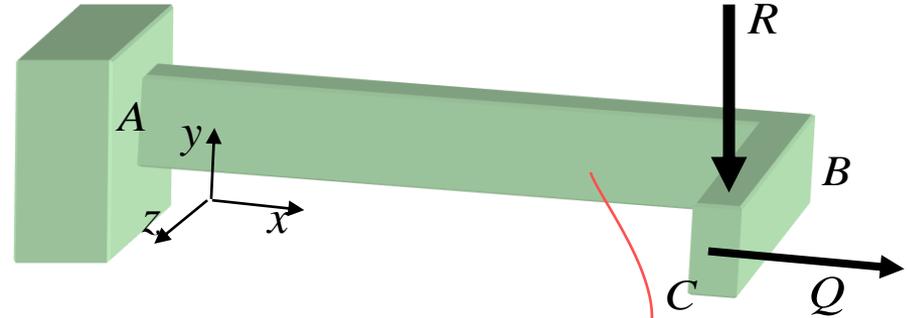
Méthode de calcul

Soit une structure sollicitée par un ensemble de forces R et Q .

Les efforts internes sur la membrure AB seront

un moment M_{zAB} (autour de z)
 et M_{yAB} (autour de y),
 un moment de torsion T_{AB}

et une force axiale,
 montrée en tension
 ici, P où.



$$M_{zAB} = M_{zAB}(R) \quad ; \quad M_{yAB} = M_{yAB}(Q)$$

$$P = P(Q)$$

$$T_{AB} = T_{AB}(R)$$

4.4.1 Système isostatique

Selon Castigliano, le déplacement du point c sous la force R s'exprime :

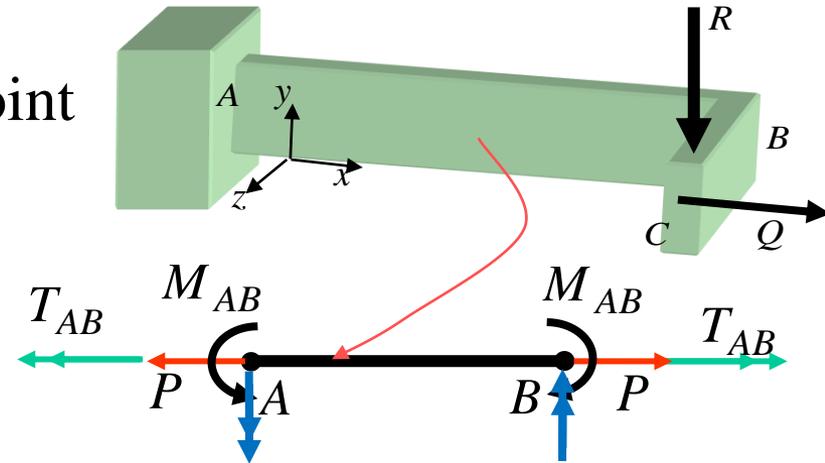
$$\delta_c = \frac{\partial U}{\partial R}$$

Or,

$$U = \sum \frac{P_i^2 \cdot L_i}{2 \cdot A_i \cdot E_i} + \sum \frac{T_i^2 \cdot L_i}{2 \cdot G_i \cdot J_i} + \sum \int_0^{L_i} \frac{M_i^2 \cdot dx}{2 \cdot E_i \cdot I_i}$$

En exécutant la dérivée de U par rapport à R , on obtient :

$$\delta_c = \sum \frac{\frac{\partial}{\partial R} (P_i^2) \cdot L_i}{2 \cdot A_i \cdot E_i} + \sum \frac{\frac{\partial}{\partial R} (T_i^2) \cdot L_i}{2 \cdot G_i \cdot J_i} + \sum \int_0^{L_i} \frac{\frac{\partial}{\partial R} (M_i^2) \cdot dx}{2 \cdot E_i \cdot I_i}$$



4.4.1 Système isostatique

$$\delta_c = \sum \frac{\frac{\partial P_i^2}{\partial R} \cdot L_i}{2 \cdot A_i \cdot E_i} + \sum \frac{\frac{\partial T_i^2}{\partial R} \cdot L_i}{2 \cdot G_i \cdot J_i} + \sum \int_0^{L_i} \frac{\frac{\partial M_i^2}{\partial R} \cdot dx}{2 \cdot E_i \cdot I_i}$$

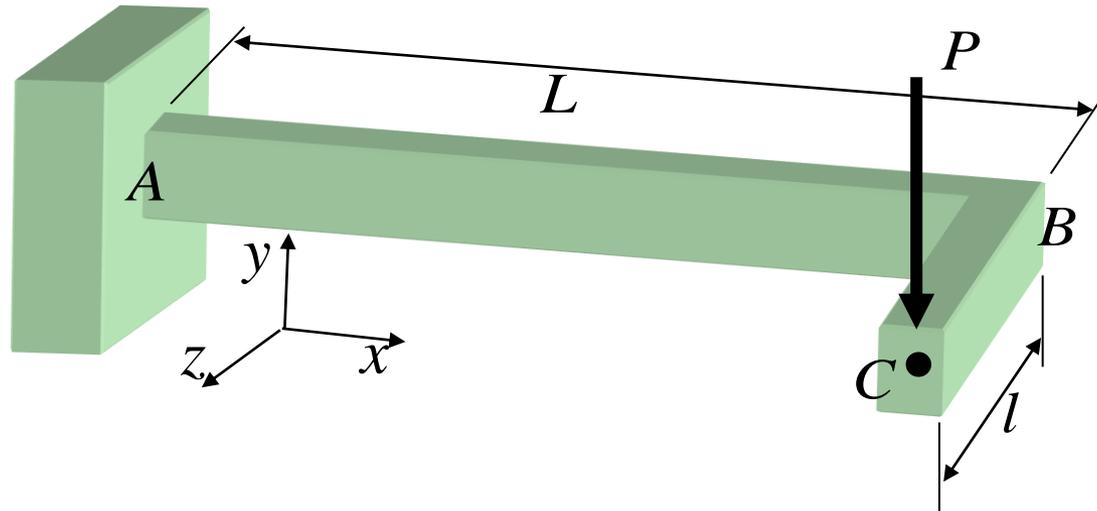
$$\delta_c = \sum \frac{2 \cdot P_i \cdot \frac{\partial P_i}{\partial R} \cdot L_i}{2 \cdot A_i \cdot E_i} + \sum \frac{2 \cdot T_i \cdot \frac{\partial T_i}{\partial R} \cdot L_i}{2 \cdot G_i \cdot J_i} + \sum \int_0^{L_i} \frac{2 \cdot M \cdot \frac{\partial M_i}{\partial R} \cdot dx}{2 \cdot E_i \cdot I_i}$$

$$\delta_c = \sum \frac{P_i \cdot \frac{\partial P_i}{\partial R} \cdot L_i}{A_i \cdot E_i} + \sum \frac{T_i \cdot \frac{\partial T_i}{\partial R} \cdot L_i}{G_i \cdot J_i} + \sum \int_0^{L_i} \frac{M \cdot \frac{\partial M_i}{\partial R} \cdot dx}{E_i \cdot I_i}$$

4.4.1 Système isostatique

Problème:

On demande de calculer le déplacement vertical du point C sous la force P à l'aide du théorème de *Castigliano*.



Dans la solution de ce problème, on ne tiendra pas compte de l'énergie de déformation associée à l'effort tranchant

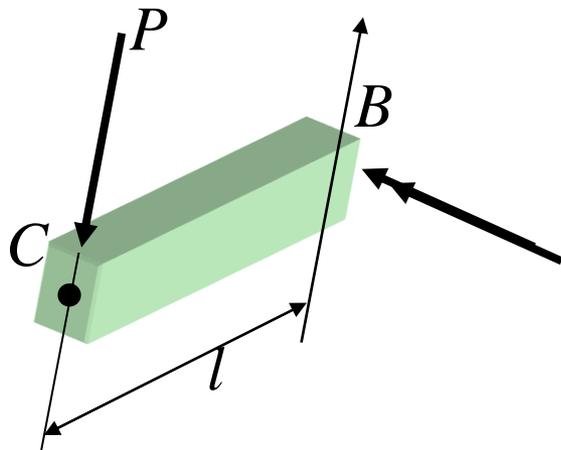
Solution selon la méthode de *Castigliano* :

$$\delta_c = \sum \frac{P_i \cdot \frac{\partial P_i}{\partial R} \cdot L_i}{A_i \cdot E_i} + \sum \frac{T_i \cdot \frac{\partial T_i}{\partial R} \cdot L_i}{G_i \cdot J_i} + \sum \int_0^{L_i} \frac{M \cdot \frac{\partial M}{\partial R} \cdot dx}{E_i \cdot I_i}$$

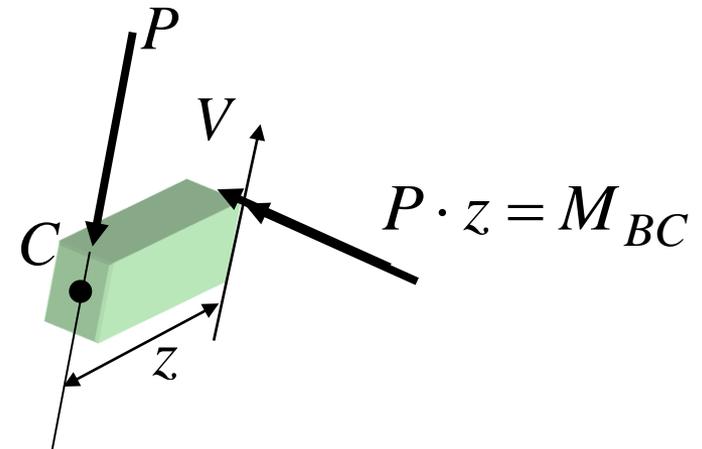
Membrure BC

où $P_i = 0$, il n'y a pas de force interne axiale

$T_{BC} = 0$, il n'y a pas de moment de torsion interne



$$M_{BC} = P \cdot z$$

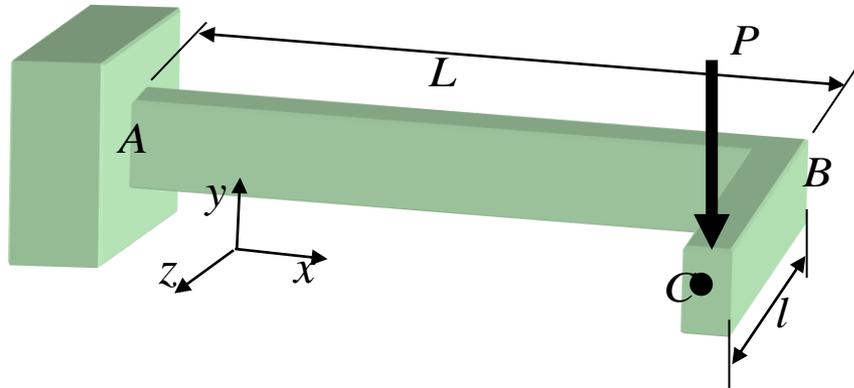


Solution selon la méthode de *Castigliano* :

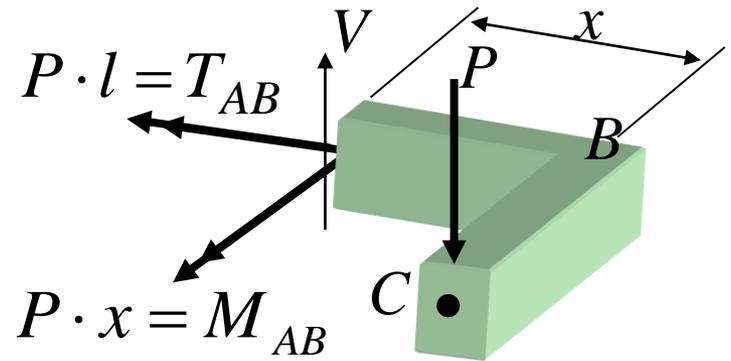
$$\delta_c = \sum \frac{P_i \cdot \frac{\partial P_i}{\partial R} \cdot L_i}{A_i \cdot E_i} + \sum \frac{T_i \cdot \frac{\partial T_i}{\partial R} \cdot L_i}{G_i \cdot J_i} + \sum \int_0^{L_i} \frac{M \cdot \frac{\partial M_i}{\partial R} \cdot dx}{E_i \cdot I_i}$$

Membrure AB

où $P_i = 0$, il n'y a pas de force interne axiale



$$M_{AB} = P \cdot x \quad T_{AB} = P \cdot l$$



$$\delta_c = \sum \frac{P_i \cdot \frac{\partial P_i}{\partial P} \cdot L_i}{A_i \cdot E_i} + \sum \frac{T_i \cdot \frac{\partial T_i}{\partial P} \cdot L_i}{G_i \cdot J_i} + \sum \int_0^{L_i} \frac{M \cdot \frac{\partial M_i}{\partial P} \cdot dx}{E_i \cdot I_i}$$

$$M_{BC} = P \cdot z$$

$$M_{AB} = P \cdot x$$

$$T_{AB} = P \cdot l$$

AB
BC

$$\delta_c = \frac{P \cdot l \frac{\partial(P \cdot l)}{\partial P} \cdot L}{G \cdot J} + \int_0^L \frac{P \cdot x \frac{\partial(P \cdot x)}{\partial P} \cdot dx}{E \cdot I} + \int_0^l \frac{P \cdot z \frac{\partial(P \cdot z)}{\partial P} \cdot dz}{E \cdot I}$$

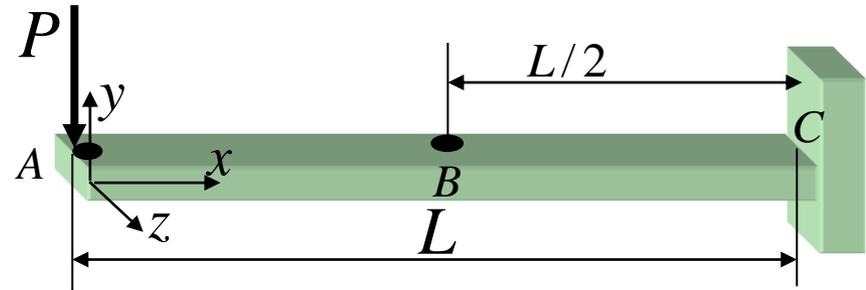
$$\delta_c = \frac{P \cdot l \cdot l \cdot L}{G \cdot J} + \int_0^L \frac{P \cdot x \cdot x \cdot dx}{E \cdot I} + \int_0^l \frac{P \cdot z \cdot z \cdot dz}{E \cdot I}$$

$$\delta_c = \frac{P \cdot l^2 \cdot L}{G \cdot J} + \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} + \frac{P \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} = \frac{P}{3 \cdot E \cdot I} (l^3 + L^3) + \frac{P \cdot l^2 \cdot L}{G \cdot J}$$

Application aux systèmes isostatiques

Exemple :

- Trouver la flèche en A
- Trouver la flèche en B
- Trouver la rotation en A

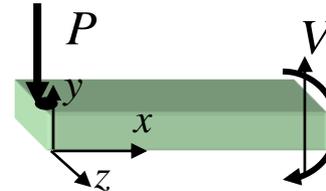


Solution :

a) Calcul de flèche en A

À l'aide de Castigliano $\frac{\partial U}{\partial P} = \delta_A$

$$\delta_A = \int_0^L \frac{M_{AC}}{E \cdot I} \frac{\partial M_{AC}}{\partial P} \cdot dx = \int_0^L \frac{Px}{EI} x dx$$



$$M_{AB} = P \cdot x$$

*Efforts internes
entre A et C*

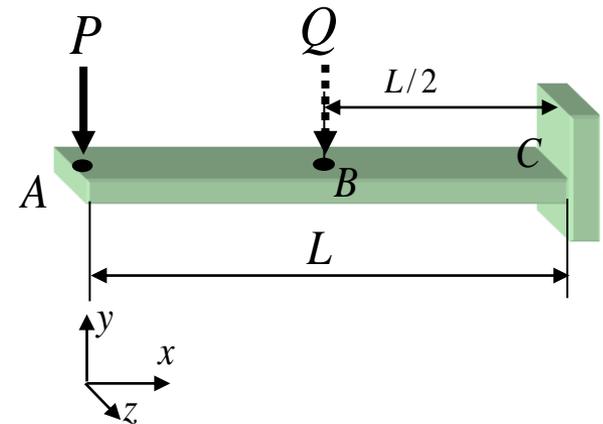
$$\delta_p = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

Application aux systèmes isostatiques

b) Flèche en B

Si on veut appliquer le théorème de Castigliano pour évaluer δ_B il faut qu'il y ait une force en B. Puisqu'il n'y en a pas sur la poutre étudiée, nous appliquerons une **force fictive** égale à Q, et nous poserons sa **valeur égale à zéro** une fois que la dérivée de U par rapport à Q aura été obtenue.

Il faut établir l'équation du moment fléchissant entre A et B et entre B et C

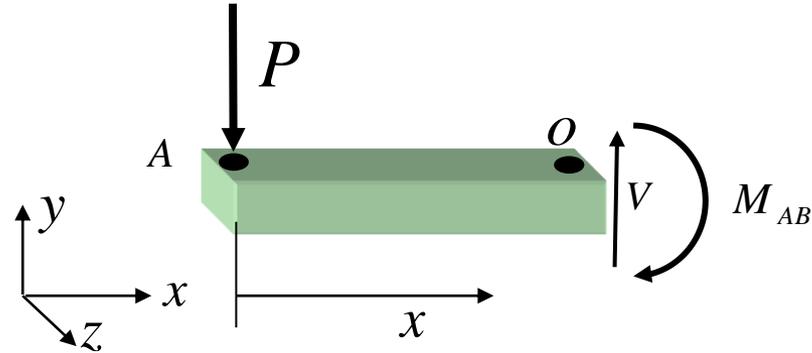


$$\delta_B = \left. \frac{\partial U}{\partial Q} \right|_{Q=0} = \int_{x_A}^{x_B} \frac{M_{AB}}{EI} \frac{\partial M_{AB}}{\partial Q} dx + \int_{x_B}^{x_C} \frac{M_{BC}}{EI} \frac{\partial M_{BC}}{\partial Q} dx$$

de A à B ($0 \leq x \leq L/2$)

$$\sum M_o = M_{AB} - P \cdot x = 0$$

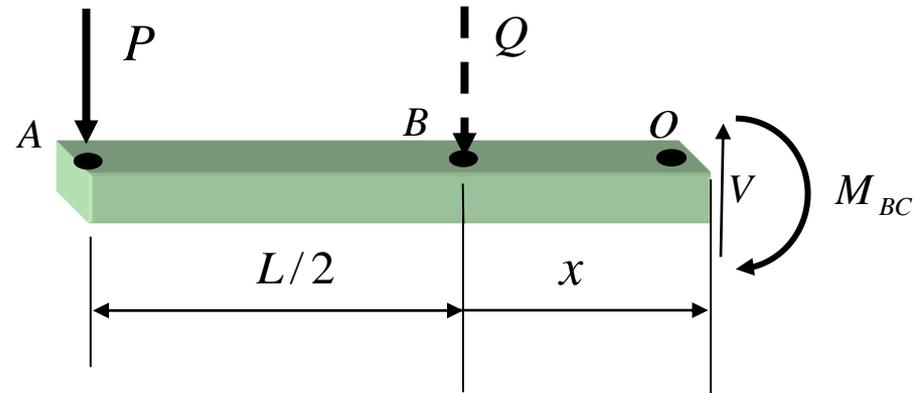
$$M_{AB} = P \cdot x$$



de B à C ($0 \leq x \leq L/2$)

$$\sum M_o = M_{BC} - P \cdot \left(\frac{L}{2} + x\right) - Q \cdot x = 0$$

$$M_{BC} = P \cdot \left(\frac{L}{2} + x\right) + Q \cdot x$$



Note: on change de repère pour x

$$\delta_B = \frac{\partial U}{\partial Q} \Big|_{Q=0} = \int_0^{L/2} \frac{M_{AB}}{EI} \frac{\partial M_{AB}}{\partial Q} dx + \int_0^{L/2} \frac{M_{BC}}{EI} \frac{\partial M_{BC}}{\partial Q} dx$$

$$\begin{aligned} M_{AB} &= P \cdot x \\ M_{BC} &= P \cdot \left(\frac{L}{2} + x\right) + Q \cdot x \end{aligned}$$

$$\delta_B = \int_0^{L/2} \frac{(P \cdot x)}{EI} \frac{\partial(P \cdot x)}{\partial Q} \cdot dx + \int_0^{L/2} \frac{[P \cdot (\frac{L}{2} + x) + Q \cdot x]}{EI} \frac{\partial[P \cdot (\frac{L}{2} + x) + Q \cdot x]}{\partial Q} \cdot dx$$

$$\delta_B = \int_0^{L/2} \frac{(P \cdot x) \cdot 0}{EI} \cdot dx + \int_0^{L/2} \frac{[P \cdot (\frac{L}{2} + x) + Q \cdot x]}{EI} \cdot x \cdot dx$$

Avec $Q = 0$

$$\delta_B = 0 + \int_0^{L/2} \frac{[P \cdot (\frac{L}{2} + x)]}{EI} x \cdot dx = \left[\int_0^{L/2} P \cdot \frac{L}{2} \cdot x \cdot dx + \int_0^{L/2} P \cdot x^2 \cdot dx \right] \frac{1}{EI}$$

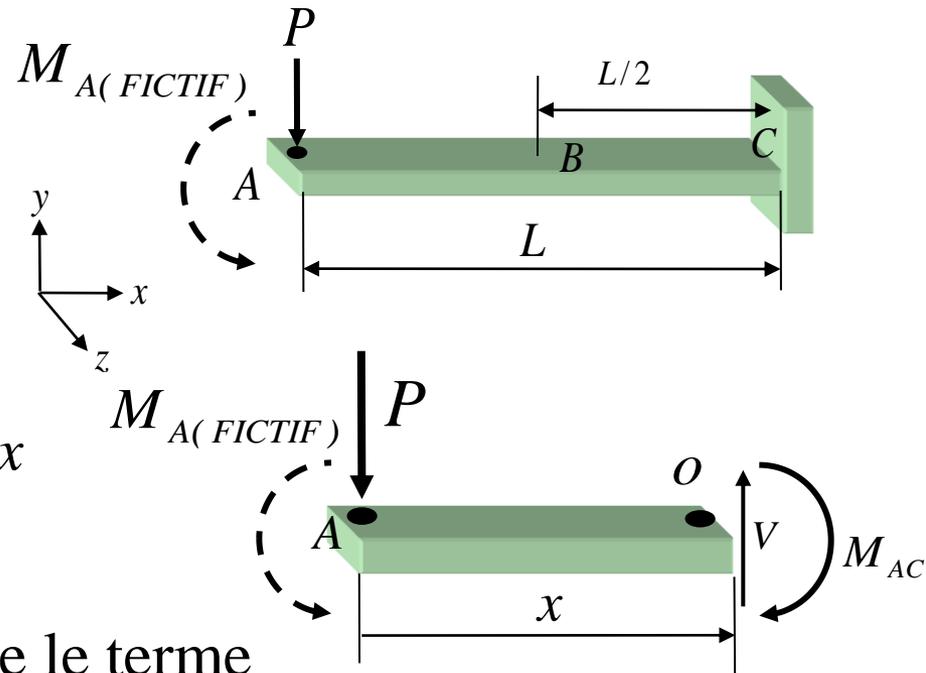
$$\delta_B = \frac{P}{EI} \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^2 + \frac{P}{EI} \cdot \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^3$$

$$\delta_B = \frac{5 \cdot P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

c) Rotation en $A = \theta_A$

Pour calculer la rotation de la poutre en A, il faut qu'il y ait un **moment concentré** appliqué à ce point. Nous appliquerons un moment M_A fictif au point A.

Une seule équation est nécessaire pour évaluer le moment fléchissant entre A et C.



$$\theta_A = \left. \frac{\partial U}{\partial M_A} \right|_{M_A=0} = \int_0^L \frac{M_{AC}}{E \cdot I} \left(\frac{\partial M_{AC}}{\partial M_A} \right) dx$$

Nous poserons $M_A = 0$ une fois que le terme de droite de l'équation aura été complètement développé.

de A à C ($0 \leq x \leq L$)

$$\sum M_o = -M_{AC} + P \cdot x + M_A = 0$$

$$M_{AC} = P \cdot x + M_A$$

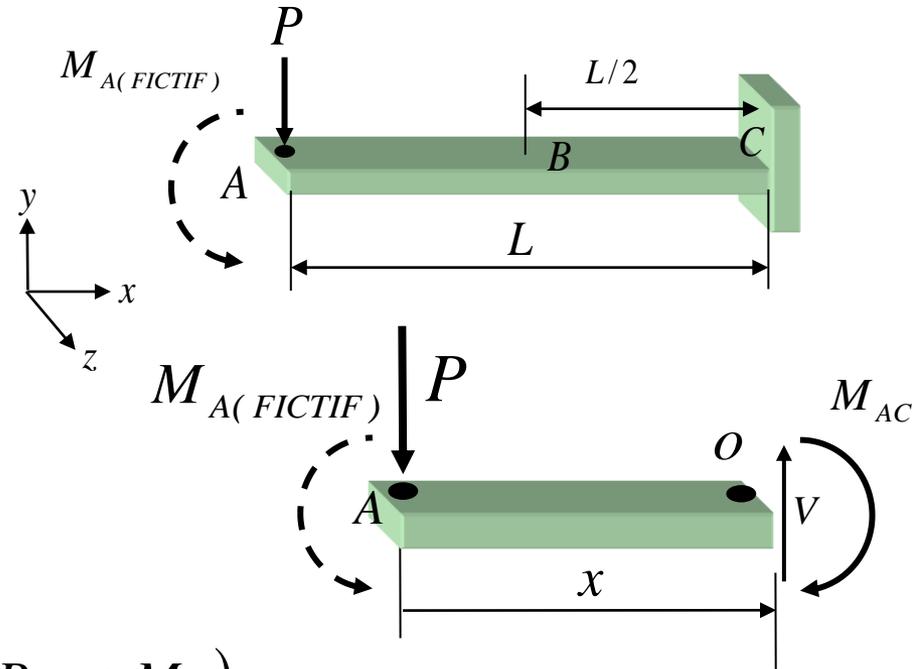
$$\theta_A = \left. \frac{\partial U}{\partial M_A} \right|_{M_A=0} = \int_0^L \frac{M_{AC}}{E \cdot I} \left(\frac{\partial M_{AC}}{\partial M_A} \right) dx$$

$$\theta_A = \int_0^L \frac{(P \cdot x + M_A)}{E \cdot I} \left(\frac{\partial (P \cdot x + M_A)}{\partial M_A} \right) dx = \int_0^L \frac{(P \cdot x + M_A)}{E \cdot I} \cdot (1) \cdot dx$$

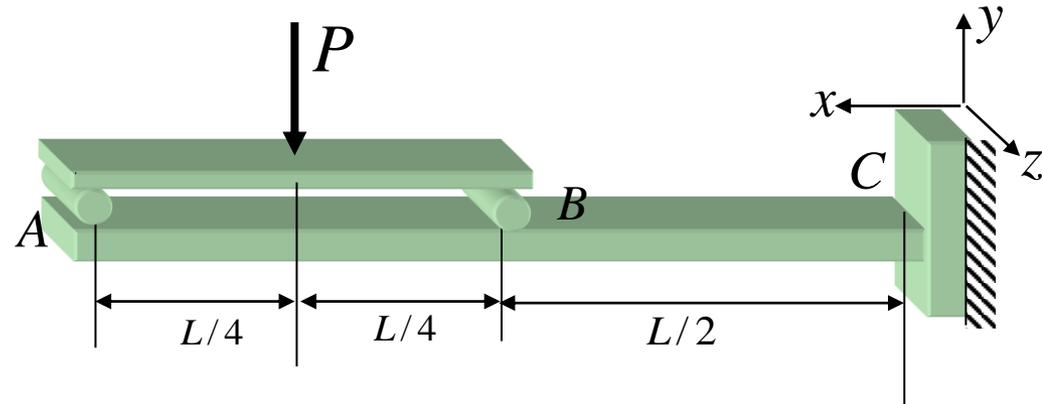
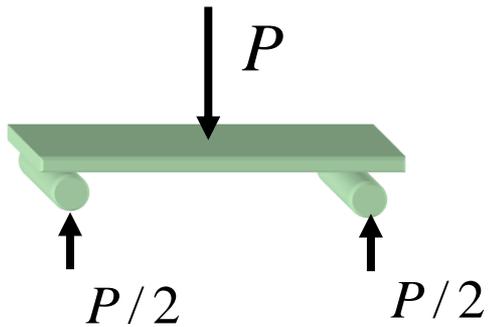
Avec $M_A = 0$

$$\theta_A = \int_0^L \frac{P \cdot x \cdot dx}{E \cdot I}$$

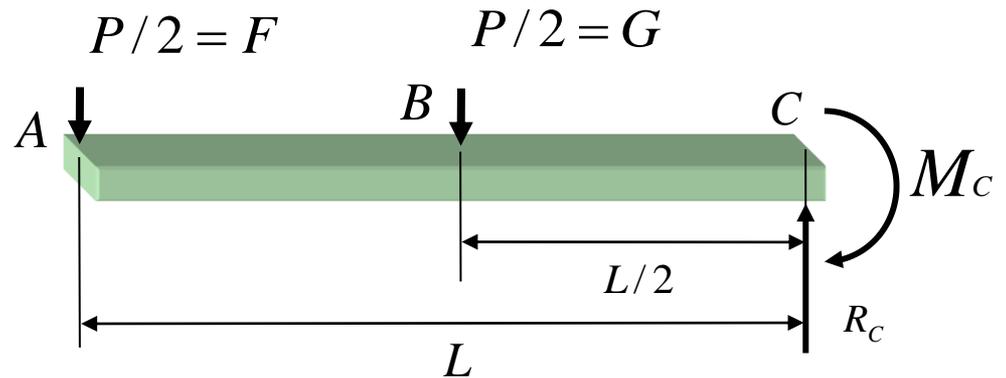
$$\theta_A = \frac{P \cdot L^2}{2 \cdot E \cdot I}$$



Exemple: $\delta_A = \frac{\partial U}{\partial F}$ $\delta_B = \frac{\partial U}{\partial G}$



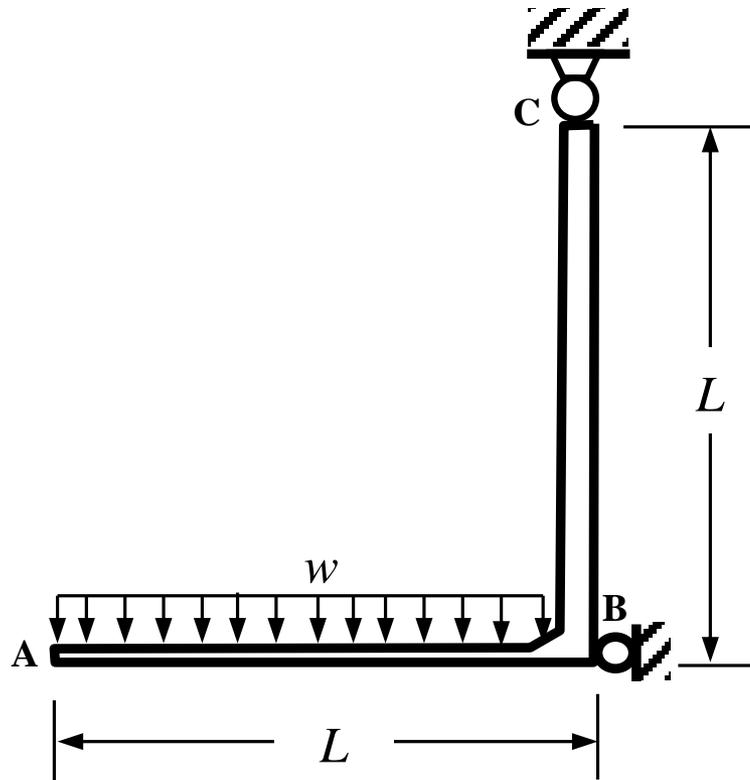
F étant une variable qui remplace $P/2$ pour enlever la confusion



Application aux systèmes isostatiques (exercice 1)

La structure ABC, simplement supportée au point B et articulée au point C, est soumise à une charge uniformément distribuée w entre les points A et B. Le joint en B est rigide. Les deux membrures AB et BC ont des aires identiques (A) et une rigidité en flexion égale à EI .

Déterminez la rotation au point C; dans vos calculs, négligez l'énergie de déformation associée à l'effort tranchant.



Méthodes énergétiques

- **Objectifs**

- Utiliser le théorème de Castigliano pour calculer les réactions aux appuis de structures hyperstatiques
- Utiliser le théorème de Castigliano pour calculer des déplacements, rotations ou rotations angulaires de structures hyperstatiques
- Savoir la définition de l'aire effective en cisaillement
- Calculer l'énergie de déformation en tenant compte de l'effort tranchant



Énergie de déformation

4.1 Énergie de déformation

4.4.1 Expression de l'énergie pour un chargement uniaxial

4.4.2 Expression de l'énergie pour une force de cisaillement

4.4.3 Énergie de déformation élastique pour un chargement général

Méthodes énergétiques

4.2 Cas particuliers

4.2.1 Tension

4.2.2 Flexion

4.2.3 Torsion

4.3 Théorème de la réciprocité, de *Maxwell-Betti*

4.4 Théorème de *Castigliano*

4.4.1 Application aux systèmes isostatiques

4.4.2 Application aux systèmes hyperstatiques

4.5 Effets de l'effort tranchant

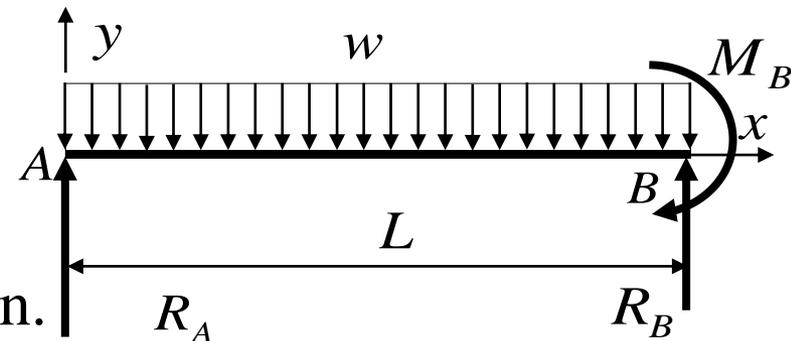
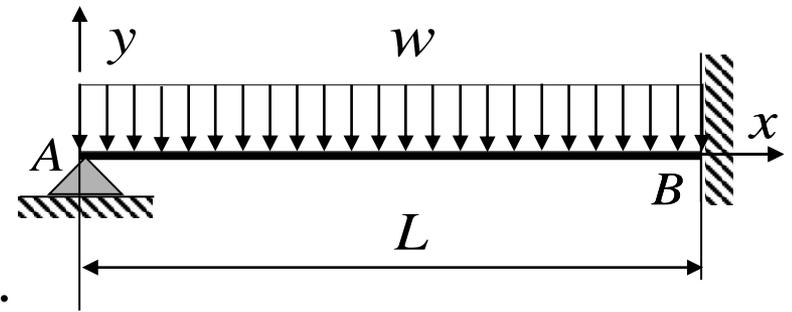
4.4.2 Applications aux systèmes hyperstatiques

Cette poutre est *hyperstatique*:
il n'y a pas suffisamment d'équations
d'équilibre pour calculer les réactions.

Il y a trois inconnues: R_a , R_b et M_b .

Deux équations d'équilibre sont
disponibles: $\sum F_y = 0$; $\sum M_z = 0$

Par conséquent, il manque une équation.



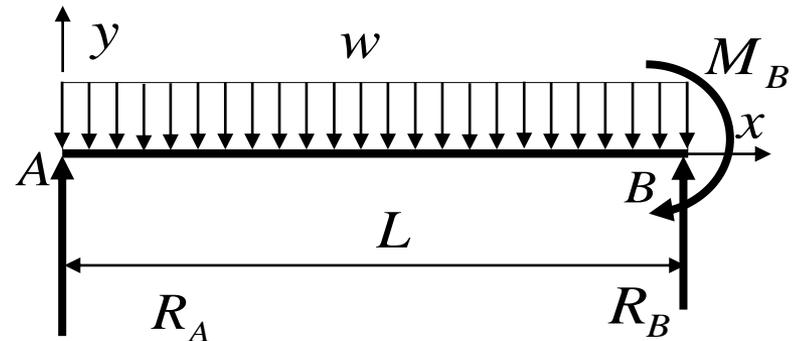
On peut lever l'indétermination en posant une **équation de compatibilité** et en transformant cette équation en équation de forces ou de moments à l'aide du **théorème de Castigliano**.

4.4.2 Applications aux systèmes hyperstatiques

Méthode de solution d'un système hyperstatique

- poser les équations d'équilibre disponibles
- déterminer le nombre d'équation(s) d'équilibre manquante(s), N

$N =$ degré d'hyperstaticité ($N = 1$ pour notre cours)



Pour la poutre montrée, il manque une équation;
le système est hyperstatique du premier degré

4.4.2 Applications aux systèmes hyperstatiques

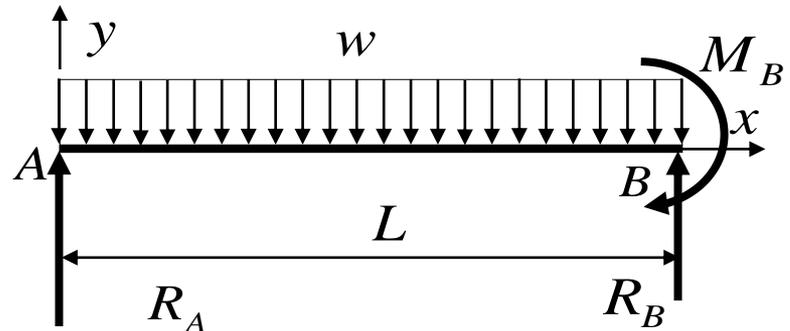
Méthode de solution (suite)

- établir N équations de compatibilité
 - Pour la poutre montrée, on connaît trois conditions de compatibilité:

$$\delta_A = 0$$

$$\delta_B = 0$$

$$\theta_B = 0$$



- Le système étant hyperstatique du premier degré, on choisit une seule condition de compatibilité et la réaction correspondante est appelée **surabondante (R)**

4.4.2 Applications aux systèmes hyperstatiques

Méthode de solution (suite)

a) si on choisit $\delta_A = 0$, R_A est la réaction *surabondante*

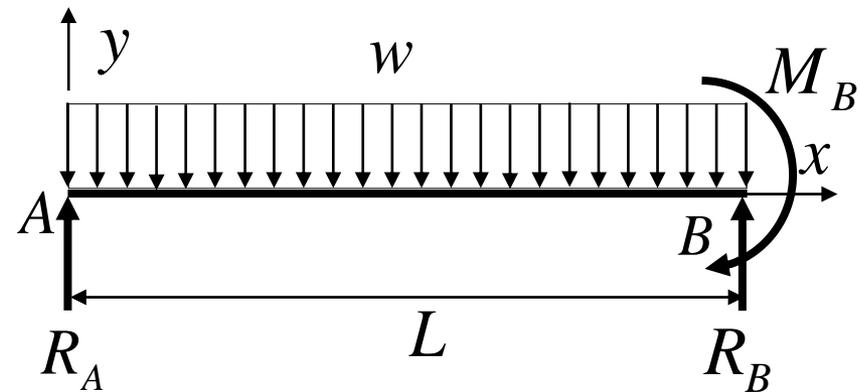
$$\frac{\partial U}{\partial R_A} = \frac{\partial U}{\partial R} = \delta_A$$

b) si on choisit $\delta_B = 0$, R_B est la réaction *surabondante*

$$\frac{\partial U}{\partial R_B} = \frac{\partial U}{\partial R} = \delta_B$$

c) si on choisit $\theta_B = 0$, M_B est la réaction *surabondante*

$$\frac{\partial U}{\partial M_B} = \theta_B$$



4.4.2 Applications aux systèmes hyperstatiques

Méthode de solution (suite)

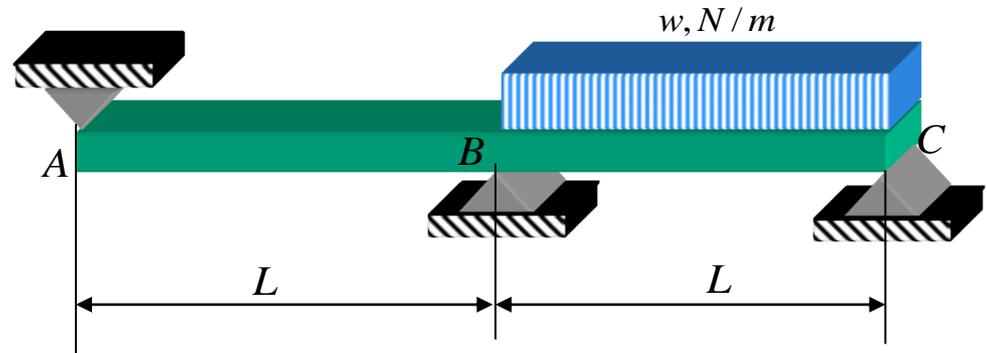
- Exprimer toutes les réactions en fonction de la *réaction surabondante* et du chargement.
- Appliquer Castigliano:
Les efforts internes et l'énergie de déformation doivent être exprimés en fonction de la *réaction surabondante* et du chargement seulement.

4.4.2 Applications aux systèmes hyperstatiques

Exemple :

On demande de calculer

- les réactions aux appuis
- l'angle de rotation θ_A au point A de cette poutre.



Cette poutre est **hyperstatique** car elle est appuyée sur trois appuis simples A, B et C:

- 3 réactions inconnues, soit R_A , R_B et R_C
- 2 équations d'équilibre disponibles, soit $\sum F_y = 0$; $\sum M_z = 0$

La solution est d'utiliser le théorème de *Castigliano*.

Résumé

Procédure pour trouver les réactions aux appuis d'un problème hyperstatique est :

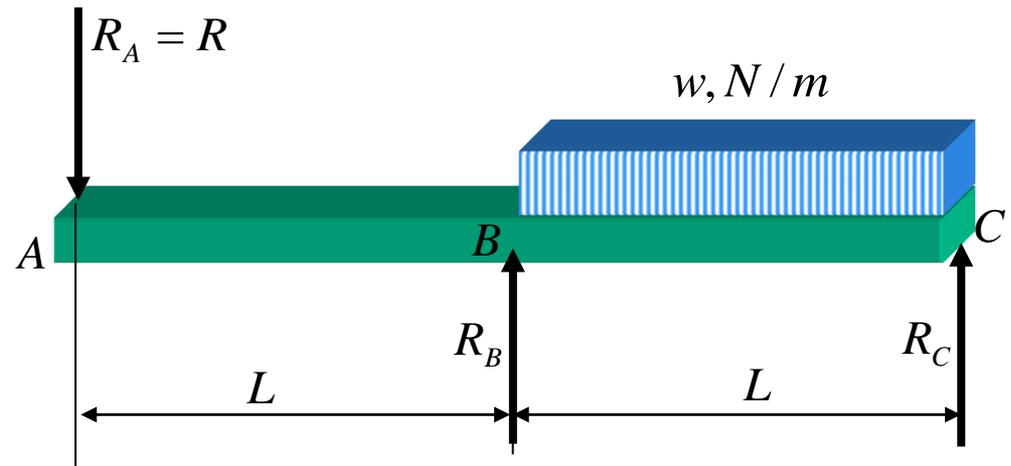
1. Choisir une condition de compatibilité et déclarer la réaction correspondante *surabondante* (R)
2. Établir les équations d'équilibre. Les réactions sont exprimées en **fonction du chargement et de la force surabondante**
3. Établir les équations des efforts internes et les exprimer en **fonction du chargement et de la surabondante**
4. Appliquer le théorème de *Castigliano* à la condition de compatibilité choisie
 - Permet de déterminer la surabondante (R)
 - Déterminer les autres réactions aux appuis à l'aide des équations d'équilibre

4.4.2 Applications aux systèmes hyperstatiques

1. Réactions aux appuis

On choisit δ_A comme condition de compatibilité

$$\frac{\partial U}{\partial R_A} = \delta_A = 0$$



La force R_A est déclarée *surabondante*

4.4.2 Applications aux systèmes hyperstatiques

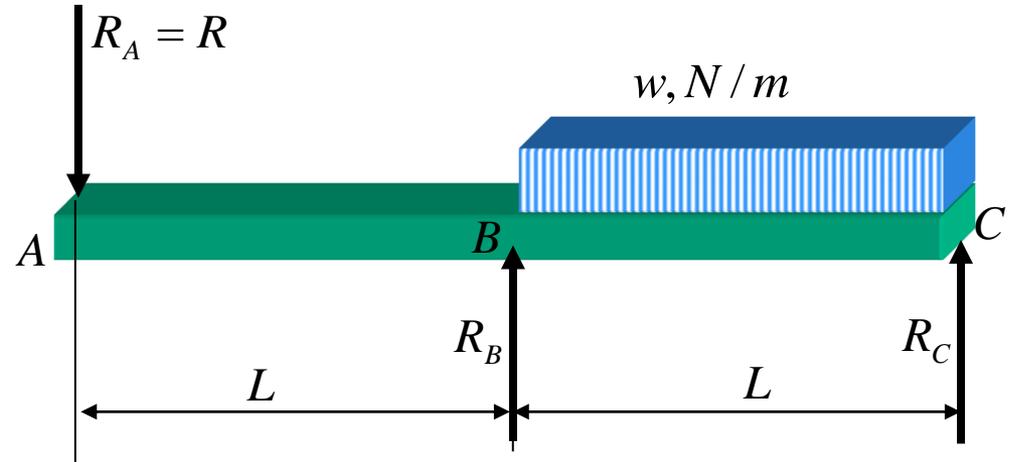
2. Équilibre

$$R_A = R$$

$$\sum M_C = 0$$

$$R_B \cdot L = \frac{w \cdot L^2}{2} + 2 \cdot R \cdot L$$

$$R_B = \frac{w \cdot L}{2} + 2 \cdot R$$



$$\sum F_y = 0$$

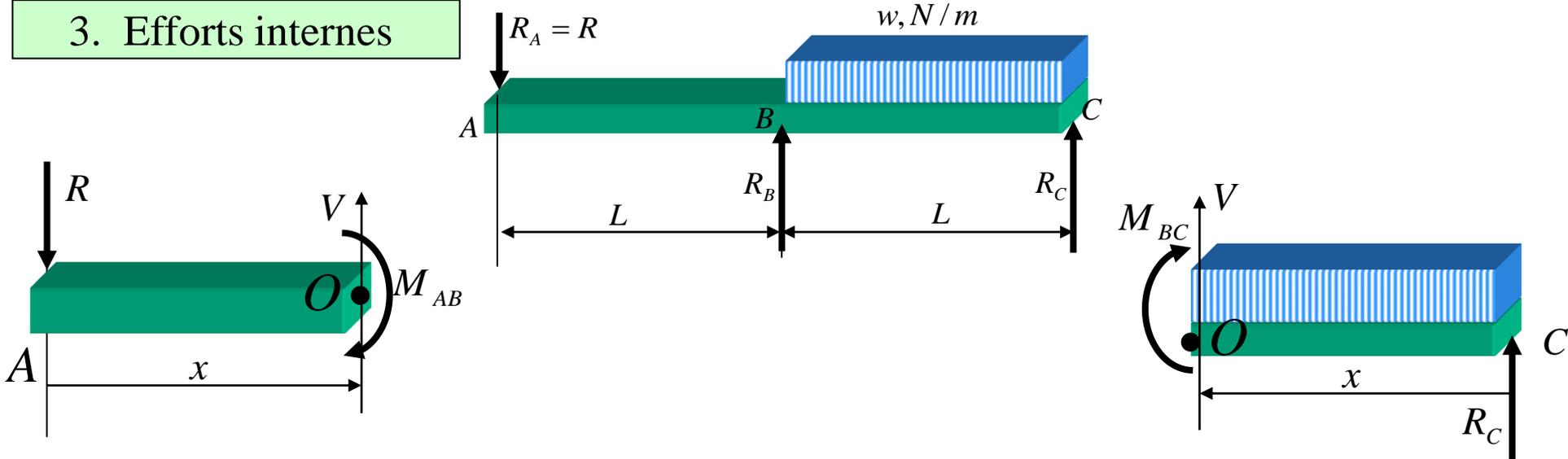
$$R_C = w \cdot L + R - R_B$$

$$R_C = \frac{w \cdot L}{2} - R$$

Les réactions sont exprimées en fonction de R et du **chargement** seulement

4.4.2 Applications aux systèmes hyperstatiques

3. Efforts internes



De A à B : $0 < x < L$

$$\sum M_O = 0 \Rightarrow M_{AB} = R \cdot x$$

Les efforts internes sont exprimées en fonction de R et du **chargement** seulement

De B à C : $0 < x < L$

$$\sum M_O = M_{BC} - R_C \cdot x + \frac{w \cdot x^2}{2} = 0$$

$$M_{BC} = \left(\frac{w \cdot L}{2} - R \right) \cdot x - \frac{w \cdot x^2}{2}$$

4.4.2 Applications aux systèmes hyperstatiques

4. Appliquer la condition de compatibilité

$$M_{AB} = R \cdot x$$

$$M_{BC} = \left(\frac{w \cdot L}{2} - R \right) \cdot x - \frac{w \cdot x^2}{2}$$

$$\frac{\partial U}{\partial R} = \delta_A = \int_0^L \frac{M_{AB} \left(\frac{\partial M_{AB}}{\partial R} \right)}{E \cdot I} \cdot dx + \int_0^L \frac{M_{BC} \left(\frac{\partial M_{BC}}{\partial R} \right)}{E \cdot I} \cdot dx = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial R} = \int_0^L (R \cdot x) \cdot (x) \cdot dx + \int_0^L \left[\left(\frac{w \cdot L}{2} - R \right) \cdot x - \frac{w \cdot x^2}{2} \right] \cdot (-x) \cdot dx = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial R} = \frac{R \cdot L^3}{3} - \frac{w \cdot L \cdot L^3}{2 \cdot 3} + \frac{R \cdot L^3}{3} + \frac{w \cdot L^4}{2 \cdot 4} = 0$$

$$R = \frac{w \cdot L}{16}$$

Avec les équations d'équilibre

$$R_C = \frac{7 \cdot w \cdot L}{16}$$

$$R_B = \frac{5 \cdot w \cdot L}{8}$$

4.4.2 Applications aux systèmes hyperstatiques

b) Rotation θ_A de la poutre en A

La tâche est facile avec *Castigliano*, sachant que

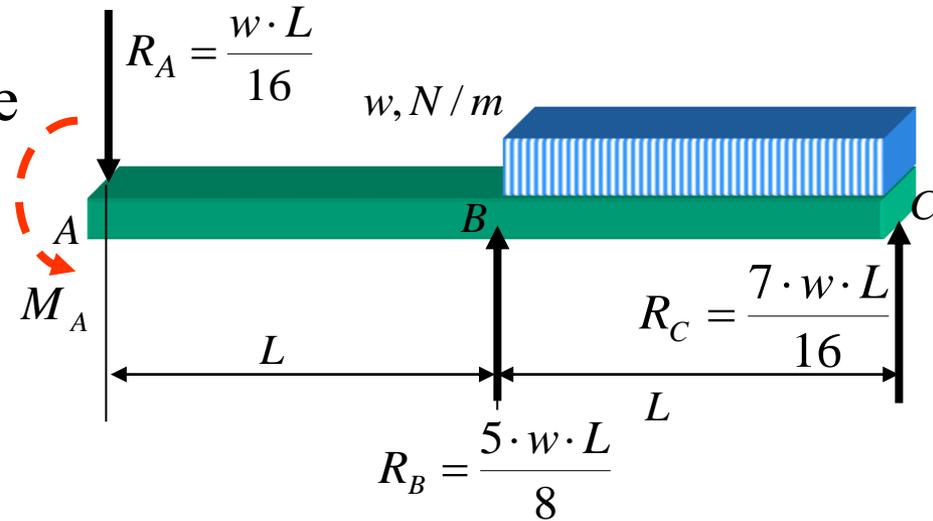
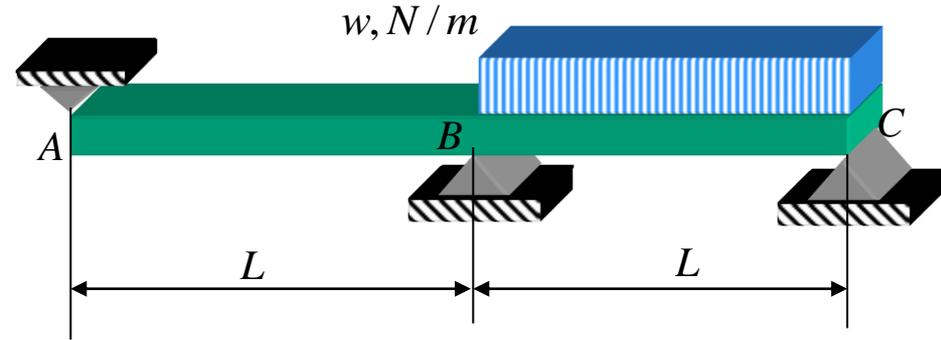
$$\theta_A = \frac{\partial U}{\partial M_A}$$

Le problème est qu'il n'y a pas de moment concentré M_A au point A!

Que fait-on?

On ajoute un moment fictif.

Mais, par le fait même, on perturbe l'équilibre de la poutre



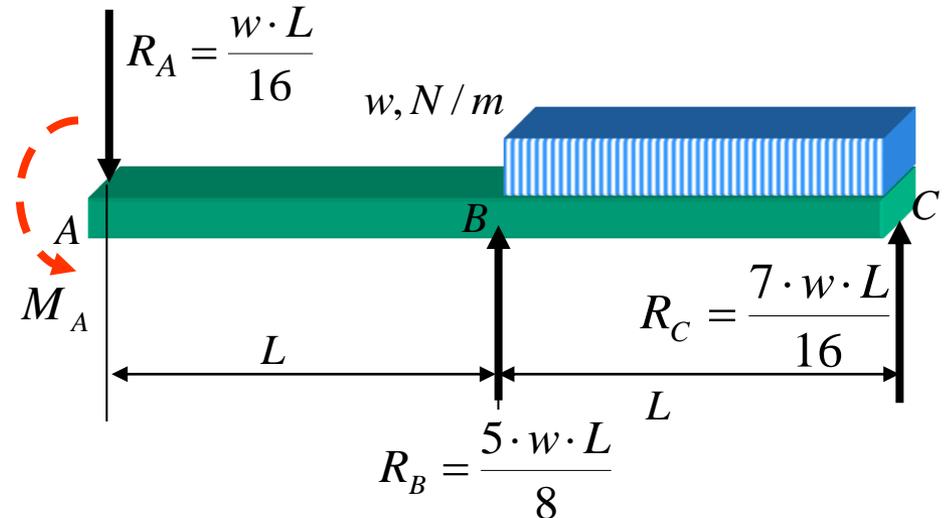
4.4.2 Applications aux systèmes hyperstatiques

Truc pour restaurer l'équilibre

Comment ?

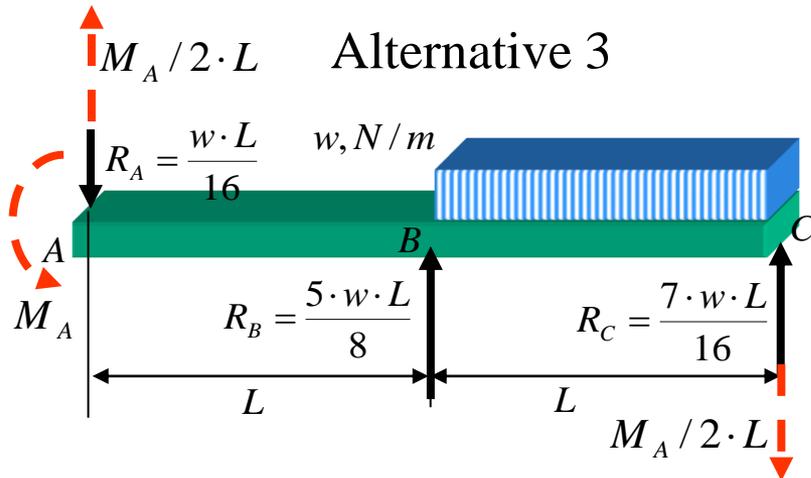
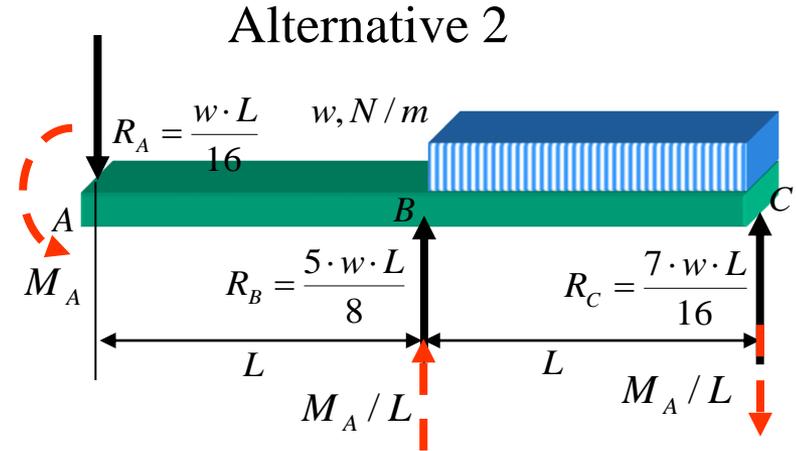
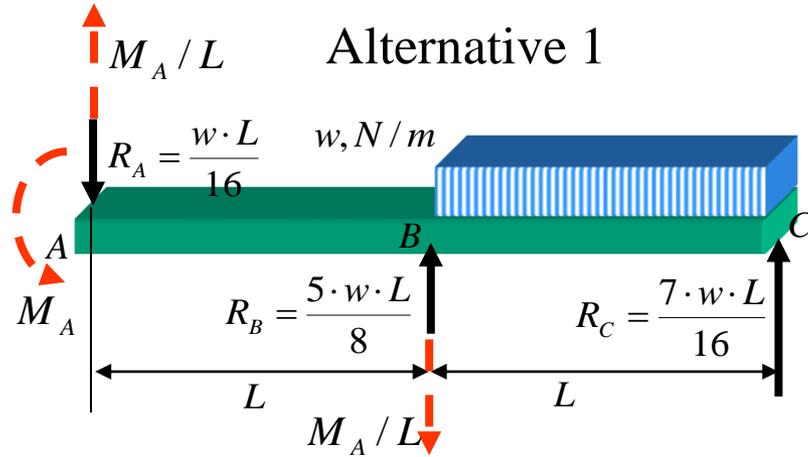
On garde les réactions calculées précédemment

On équilibre seulement le moment fictif M_A en ajoutant des forces :



- qui ont un moment égal et opposé à celui du moment ajouté
- qui sont d'intensité égale et opposée pour ne pas perturber l'équilibre de la poutre dans la direction y
- qui s'appliquent aux **points d'appui** de la poutre pour ne pas perturber la déformée de la poutre et pour ne pas ajouter de l'énergie de déformation dans la poutre

4.4.2 Applications aux systèmes hyperstatiques

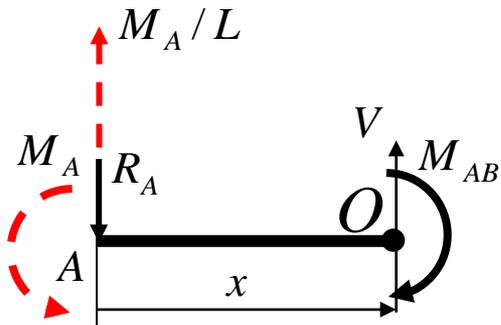


- Les trois alternatives permettent d'annuler M_A et de garder la poutre en équilibre en y.
- Le choix d'une alternative plutôt qu'une autre est basé sur une question d'expérience.
- Ici, c'est l'alternative 1 qui semble et s'avérera la plus avantageuse.

4.4.2 Applications aux systèmes hyperstatiques

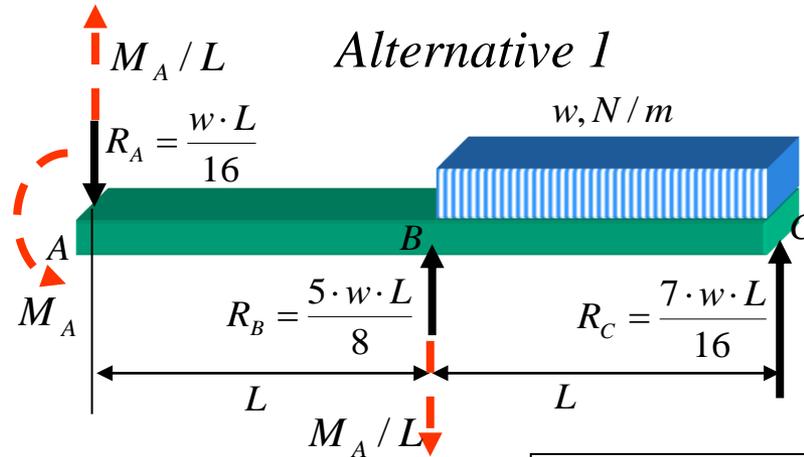
Les efforts internes

De A à B : $0 < x < L$

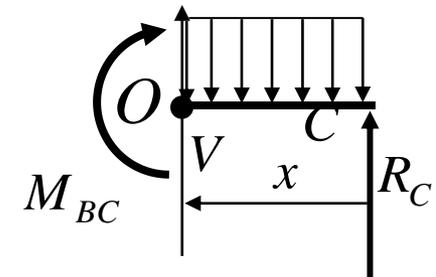


$$\sum M_O = 0 \Rightarrow$$

$$M_{AB} = M_A + R_A \cdot x - \frac{M_A}{L} \cdot x$$



De B à C : $0 < x < L$



$$\sum M_O = 0 \Rightarrow$$

$$M_{BC} = R_C \cdot x - \frac{w \cdot x^2}{2}$$

4.4.2 Applications aux systèmes hyperstatiques

Selon *Castigliano*

$$M_{AB} = M_A + R_A \cdot x - \frac{M_A}{L} \cdot x$$

$$M_{BC} = R_C \cdot x - \frac{w \cdot x^2}{2}$$

$$\theta_A = \frac{\partial U}{\partial M_A} \Big|_{M_A=0} = \int_0^L \frac{M_{AB} \left(\frac{\partial M_{AB}}{\partial M_A} \right)}{E \cdot I} \cdot dx + \int_0^L \frac{M_{BC} \left(\frac{\partial M_{BC}}{\partial M_A} \right)}{E \cdot I} \cdot dx$$

$$\theta_A = \frac{1}{E \cdot I} \left[\int_0^L \left(M_A + R_A \cdot x - \frac{M_A}{L} \cdot x \right) \cdot \left(1 - \frac{x}{L} \right) \cdot dx + \int_0^L \left(R_C \cdot x - \frac{w \cdot x^2}{2} \right) \cdot (0) \cdot dx \right]$$

$$R_A = \frac{w \cdot L}{16}$$

$$R_C = \frac{7 \cdot w \cdot L}{16}$$

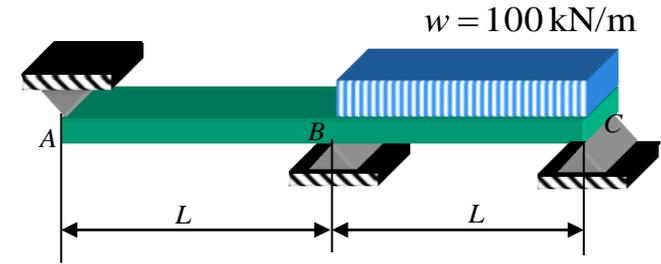
En posant $M_A = 0$

\Rightarrow

$$\theta_A = \frac{1}{E \cdot I} \cdot \left(\frac{R_A \cdot L^2}{6} \right) = \frac{1}{E \cdot I} \cdot \frac{w L^3}{96}$$

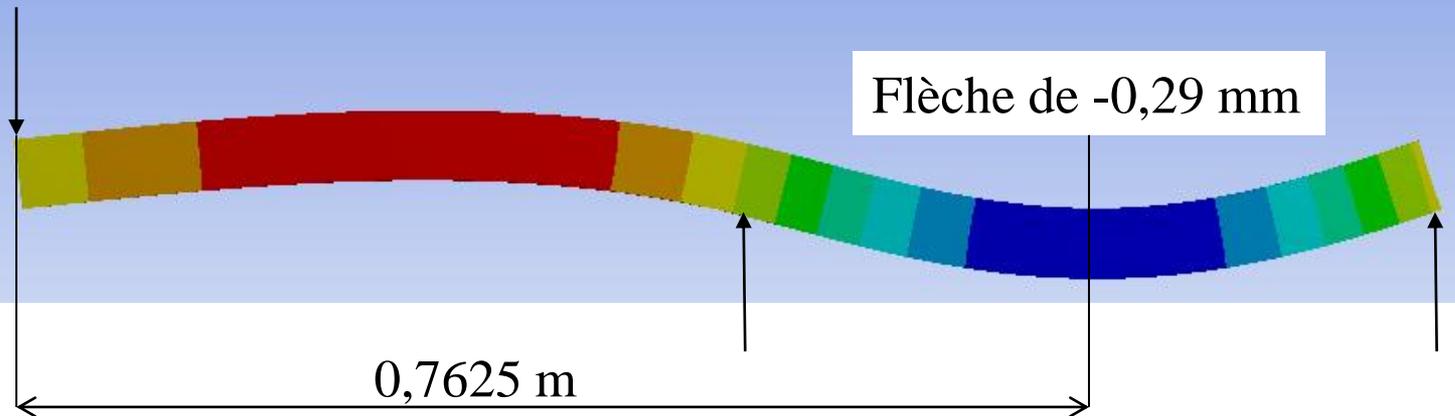
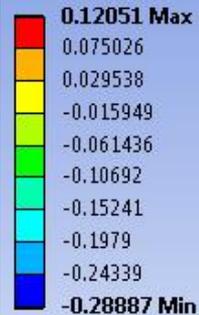
Simulation ÉF de l'exemple précédent

- Dimensions: $50 \times 100 \times 1000$ mm
 - $I_y = 1.042 \times 10^{-6} \text{ m}^4$
- Force résultante de 50 kN sur le tronçon [BC]



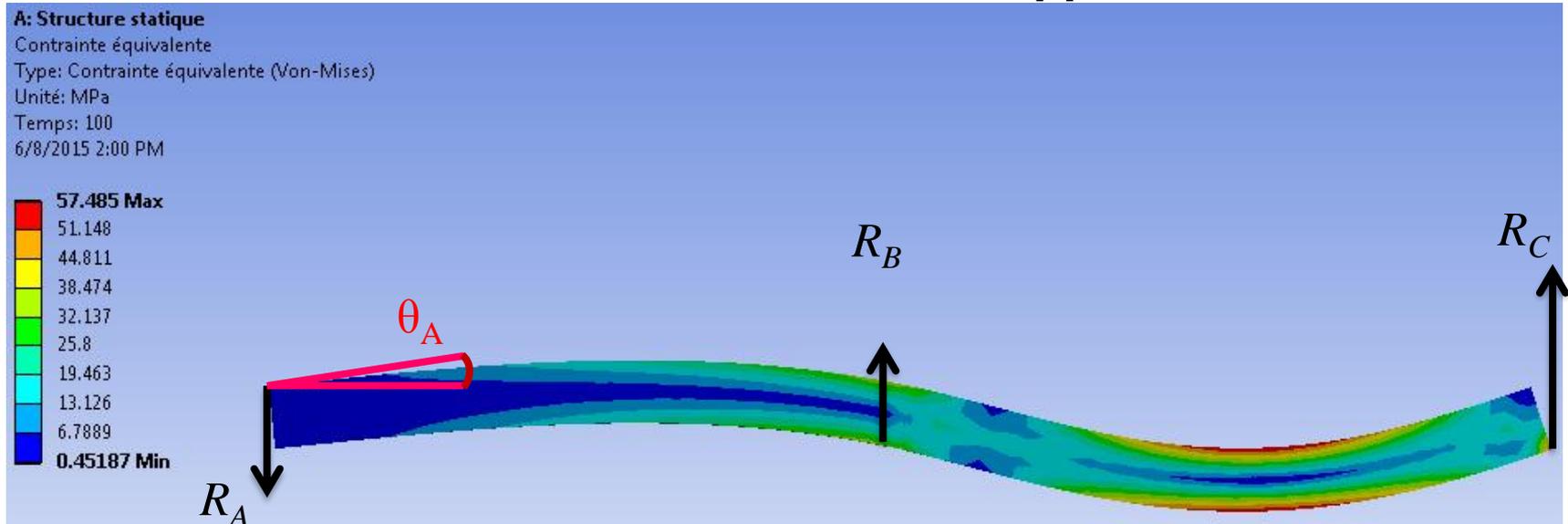
A: Structure statique

Déplacement directionnel
 Type: Déplacement directionnel(Axe Z)
 Unité: mm
 Système de coordonnées global
 Temps: 100
 6/8/2015 1:59 PM



Simulation ÉF de l'exemple précédent

Contraintes de Von Mises et réactions aux appuis

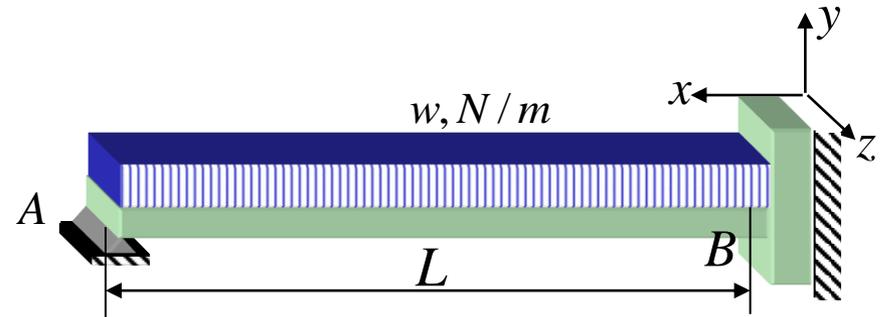


	Valeurs théoriques	Résultats ÉF
R_A	-3.125 kN	-3.114 kN
R_B	3.125 kN	3.123 kN
R_C	21.875 kN	21.886 kN
θ_A	0.03581°	0.03594°

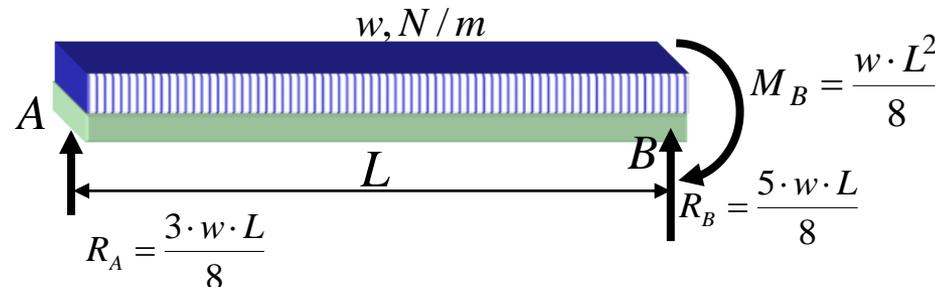
4.4.2 Applications aux systèmes hyperstatiques

Exemple:

On demande de calculer θ_A pour la poutre illustrée ci-contre



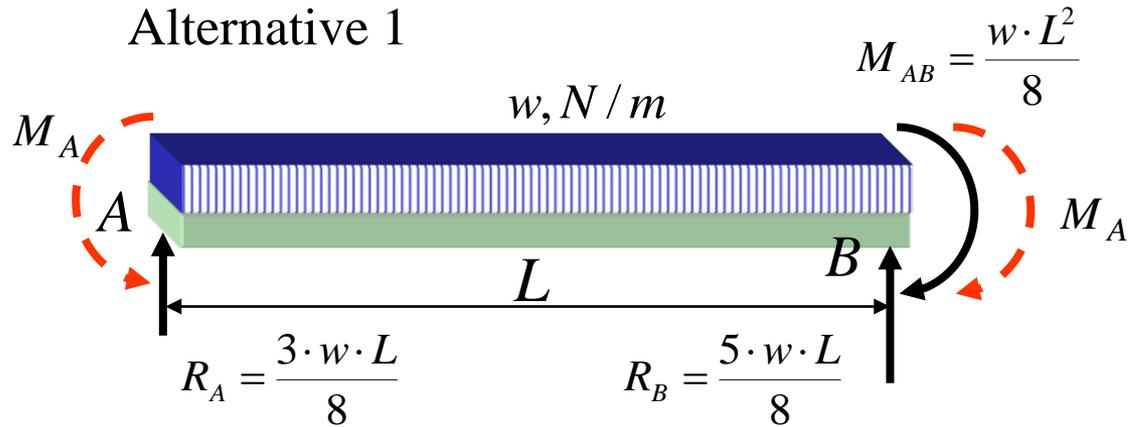
Les réactions R_A , R_B et le moment M_B sont déjà connus.



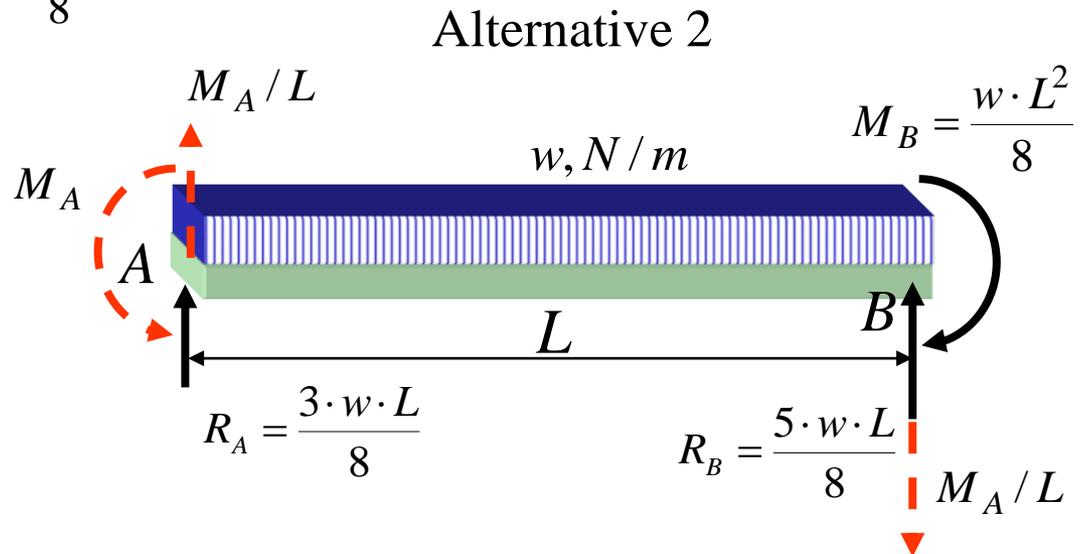
Pour pouvoir calculer θ_A , il faut **ajouter un moment fictif** concentré en A et ensuite **restaurer l'équilibre**.

4.4.2 Applications aux systèmes hyperstatiques

Deux alternatives sont possibles



L'alternative 1 est possible parce que l'encastrement B peut reprendre un moment sans que de l'énergie de déformation soit ajoutée au système.

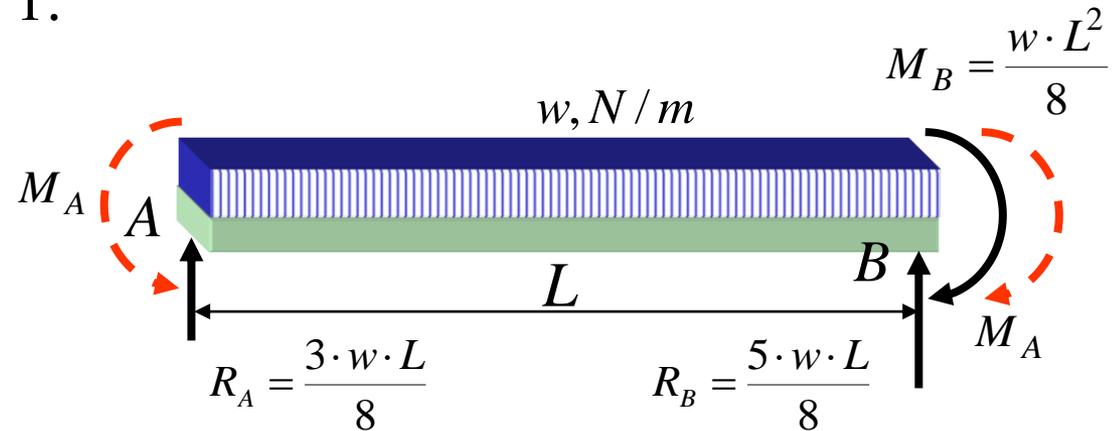


4.4.2 Applications aux systèmes hyperstatiques

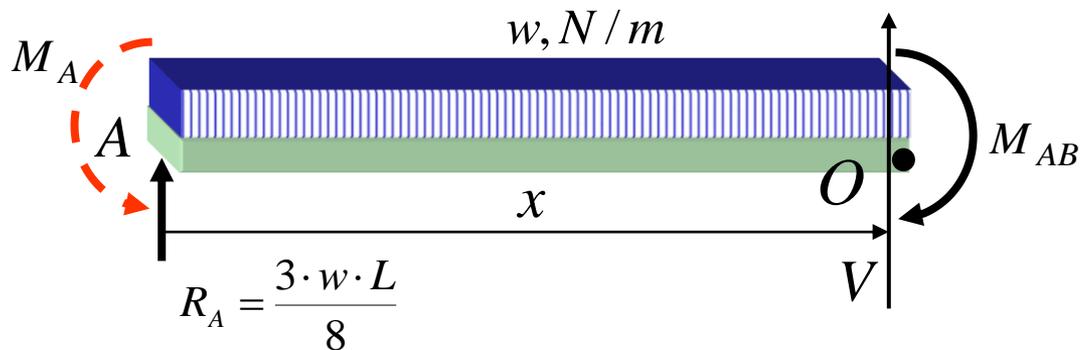
On choisit l'alternative 1.

Efforts internes

De A à B :

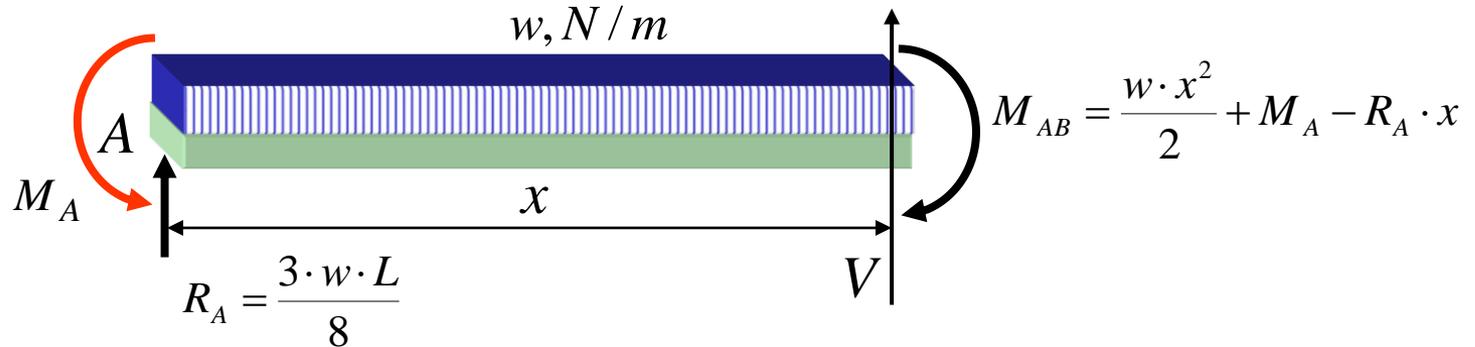


$$\sum M_O = 0 \Rightarrow M_{AB} = \frac{w \cdot x^2}{2} + M_A - R_A \cdot x$$



4.4.2 Applications aux systèmes hyperstatiques

Appliquant *Castigliano* :



$$\theta_A = \left. \frac{\partial U}{\partial M_A} \right|_{M_A=0} = \int_0^L \frac{M_{AB}}{E \cdot I} \frac{\partial M_{AB}}{\partial M_A} dx = \int_0^L \frac{M_A + \frac{w \cdot x^2}{2} - R_A \cdot x}{E \cdot I} \cdot (1) \cdot dx$$

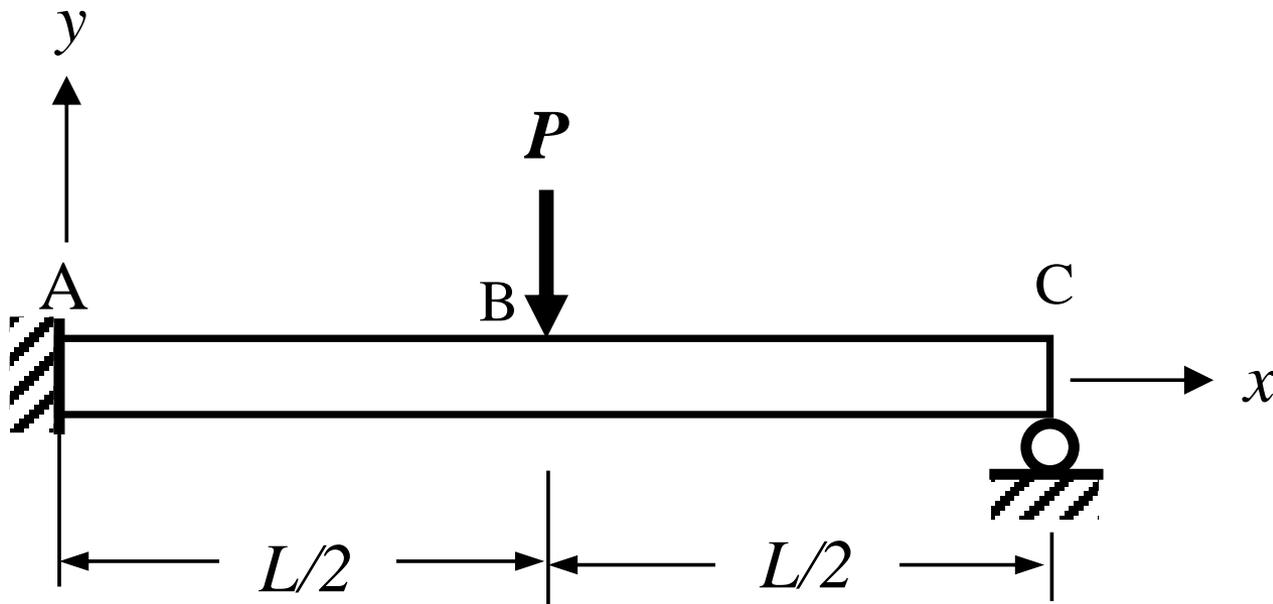
En posant $M_A = 0$, \Rightarrow $\theta_A = -\frac{w \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$

dans le sens inverse de M_A fictif

Applications aux systèmes hyperstatiques (exercice 2)

Une poutre encastrée à l'une de ses extrémités et simplement supportée à l'autre et chargée tel qu'illustré. Calculer :

- les réactions aux appuis de cette poutre ;
- la pente de cette poutre au point B.





Énergie de déformation

4.1 Énergie de déformation

4.4.1 Expression de l'énergie pour un chargement uniaxial

4.4.2 Expression de l'énergie pour une force de cisaillement

4.4.3 Énergie de déformation élastique pour un chargement général

Méthodes énergétiques

4.2 Cas particuliers

4.2.1 Tension

4.2.2 Flexion

4.2.3 Torsion

4.3 Théorème de la réciprocité, de *Maxwell-Betti*

4.4 Théorème de *Castigliano*

4.4.1 Application aux systèmes isostatiques

4.4.2 Application aux systèmes hyperstatiques

4.5 Effets de l'effort tranchant

4.5 Effets de l'effort tranchant

Jusqu'ici, on a négligé l'apport de l'énergie de déformation associée à l'*effort tranchant* dans le calcul de la flèche ou de l'angle de rotation.

La notion de *l'aire effective en cisaillement* A_c simplifie considérablement le calcul de l'énergie de déformation due à l'effort tranchant et permet ainsi de tenir compte de l'effort tranchant dans le calcul de la flèche et de l'angle de rotation.

A_c devient une propriété de la section au même titre que les moments d'aire et que la constante de torsion

4.5 Effets de l'effort tranchant

Aire effective de cisaillement

A_c est déterminée de façon à ce que l'énergie de déformation,

- calculée en utilisant la distribution *moyenne* de la contrainte de cisaillement agissant sur l'aire A_c par :

$$\tau_m = \frac{V}{A_c}$$

au lieu de la distribution réelle: $V = \int \tau dA$

- soit équivalente à l'énergie de déformation calculée en utilisant la distribution réelle de la contrainte de cisaillement sur la section

4.5 Effets de l'effort tranchant

Ainsi, pour une contrainte de cisaillement τ , l'énergie de déformation U est donnée par :

$$U = \frac{1}{2} \int_V \tau \cdot \gamma \cdot dV$$

Puisque :

$$\gamma = \tau / G$$

on peut écrire :

$$U = \frac{1}{2 \cdot G} \int_L \int_A \tau^2 \cdot dA \cdot dx \quad (a)$$

4.5 Effets de l'effort tranchant

En considérant la contrainte de cisaillement moyenne agissant sur l'aire *effective de cisaillement*, l'énergie de déformation est donnée par :

$$U = \frac{1}{2 \cdot G} \int_L \int_A \tau_m^2 \cdot dA \cdot dx = \frac{1}{2 \cdot G} \int_L \tau_m^2 \cdot A_c \cdot dx$$

Puisque $\tau_m = V / A_c$

$$U = \frac{1}{2 \cdot G} \int_L \frac{V^2}{A_c} \cdot dx \quad (b)$$

4.5 Effets de l'effort tranchant

$$U = \frac{1}{2 \cdot G} \int_L \int_A \tau^2 \cdot dA \cdot dx \quad (a)$$

$$U = \frac{1}{2 \cdot G} \int_L \frac{V^2}{A_c} \cdot dx \quad (b)$$

En comparant (a) et (b), on tire :

$$\frac{V^2}{A_c} = \int_A \tau^2 \cdot dA$$

$$A_c = \frac{V^2}{\int_A \tau^2 \cdot dA} \quad (c)$$

4.5 Effets de l'effort tranchant

L'aire *effective de cisaillement* A_c d'une section est déterminée en utilisant (c). Lorsque sa valeur est connue, l'énergie de déformation due à l'effort tranchant peut alors être calculée facilement en utilisant (b).

$$U = \frac{1}{2 \cdot G} \int_L \frac{V^2}{A_c} \cdot dx \quad (b)$$

$$A_c = \frac{V^2}{\int_A \tau^2 \cdot dA} \quad (c)$$

4.5 Effets de l'effort tranchant

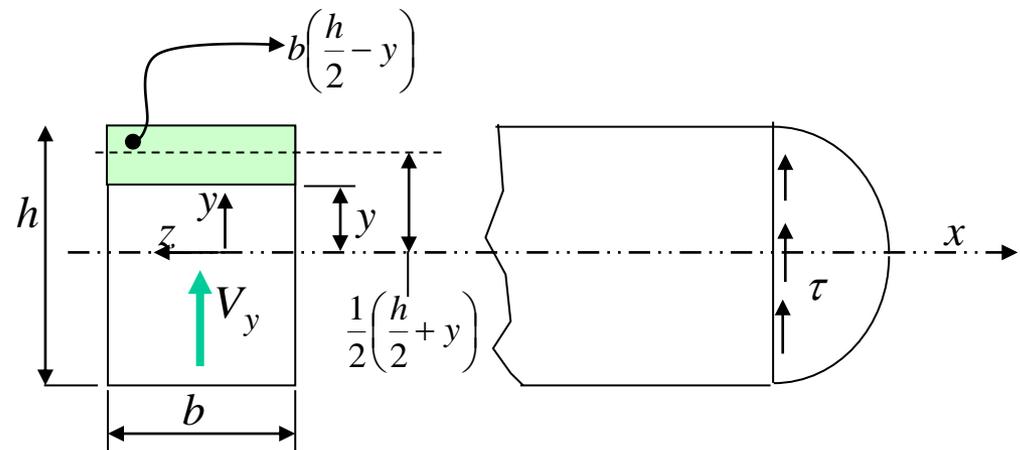
Aire effective de cisaillement

Exemple : Déterminer l'aire effective de cisaillement A_C d'une poutre de section rectangulaire.

$$\tau = \frac{V_y \cdot Q_z}{I_z \cdot b}$$

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

$$Q_z = \overline{A \cdot y} = \left[b \cdot \left(\frac{h}{2} - y \right) \right] \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{2} + y \right) \right]$$



$$\tau = \frac{6 \cdot V_y}{b \cdot h^3} \cdot \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 - y^2 \right]$$

4.5 Effets de l'effort tranchant

Aire effective de cisaillement

Exemple (suite) : Section rectangulaire

$$\int_A \tau^2 \cdot dA = 2 \cdot b \int_0^{h/2} \frac{36 \cdot V_y^2}{b^2 \cdot h^6} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 - y^2 \right]^2 \cdot dy$$

$$A_c = \frac{V^2}{\int_A \tau^2 \cdot dA}$$

$$\int_A \tau^2 \cdot dA = \frac{72 \cdot V_y^2}{b \cdot h^6} \int_0^{h/2} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^4 - 2 \cdot \left(\frac{h}{2} \right)^2 \cdot y^2 + y^4 \right] \cdot dy$$

$$\int_A \tau^2 \cdot dA = \frac{72 \cdot V_y^2}{b \cdot h^6} \cdot \left[\left(\frac{h}{2} \right)^5 - \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{h}{2} \right)^5 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{h}{2} \right)^5 \right] = \frac{6 \cdot V^2}{5 \cdot b \cdot h}$$

$$A_c = \frac{5 \cdot b \cdot h}{6} = \frac{5 \cdot A}{6}$$

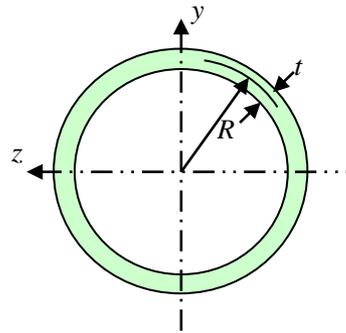
4.5 Effets de l'effort tranchant

Aire effective de cisaillement (A_c)

Exemples de section

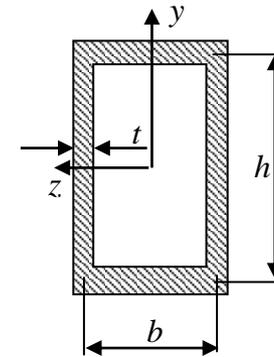
Tube rond à paroi mince

$$A_c = \pi \cdot R \cdot t = \frac{A}{2}$$



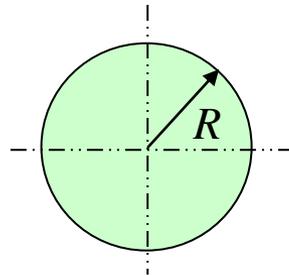
Tube rectangulaire à paroi mince

$$A_c \approx 2 \cdot h \cdot t$$



Tube rond plein

$$A_c = \frac{9}{10} \cdot \pi \cdot R^2$$



Poutre en I

$$A_c \approx w \cdot h$$

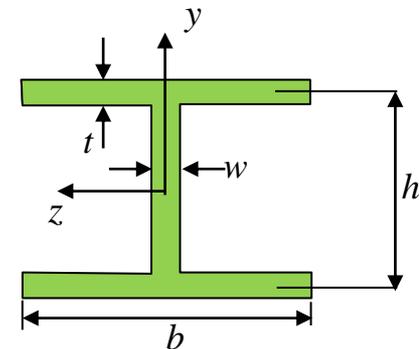
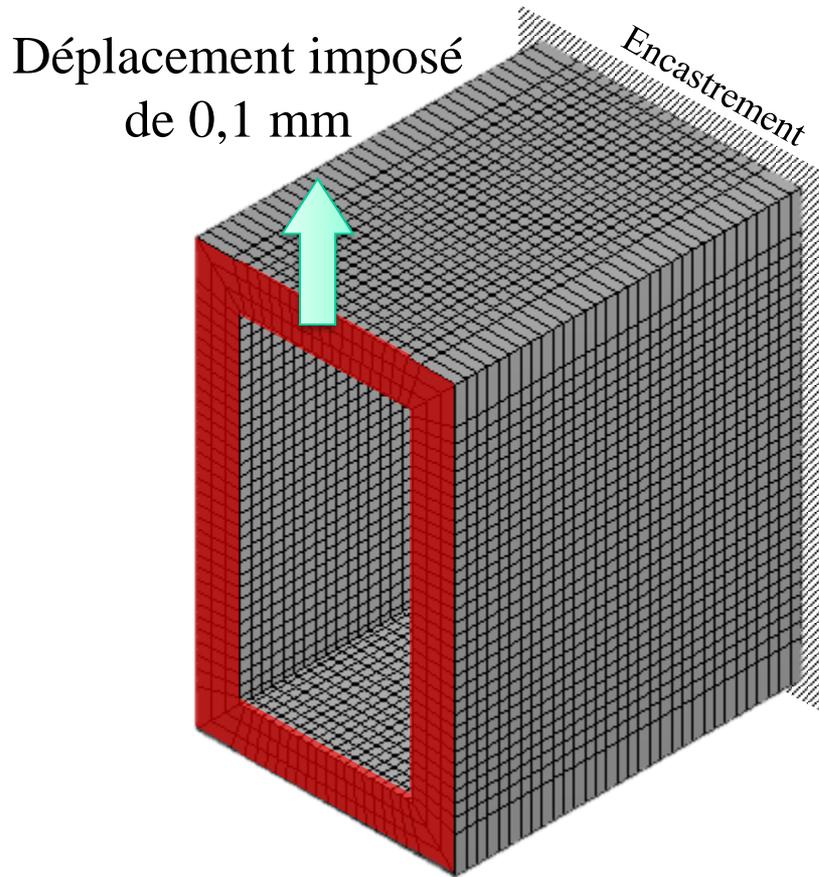
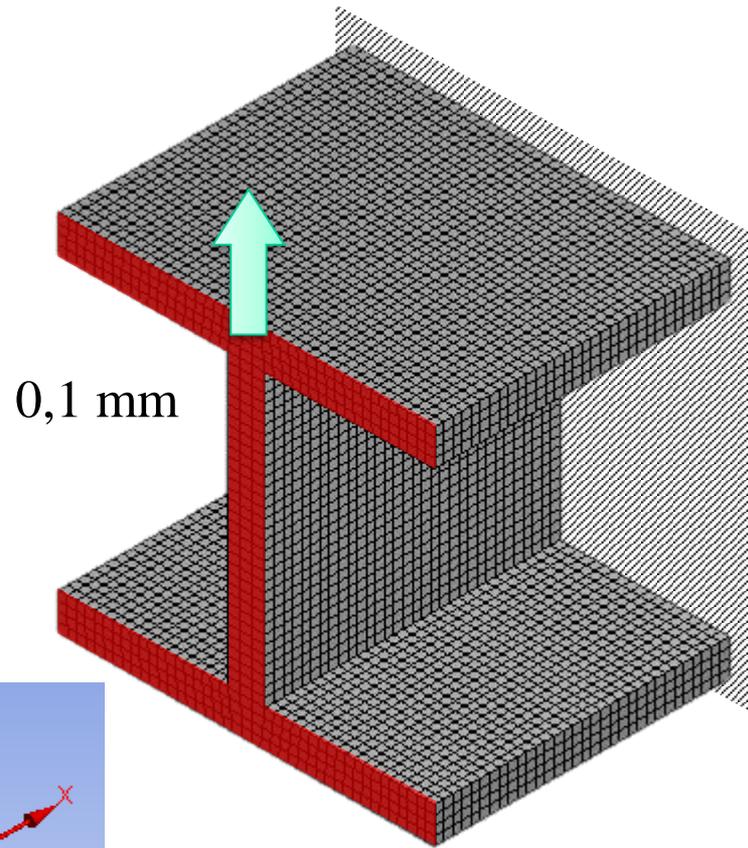


Illustration par ÉF de l'aire effective de cisaillement τ_{xy}



Poutre courte – section rectangulaire mince



Poutre courte – section en I

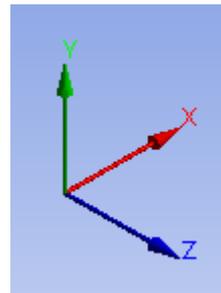
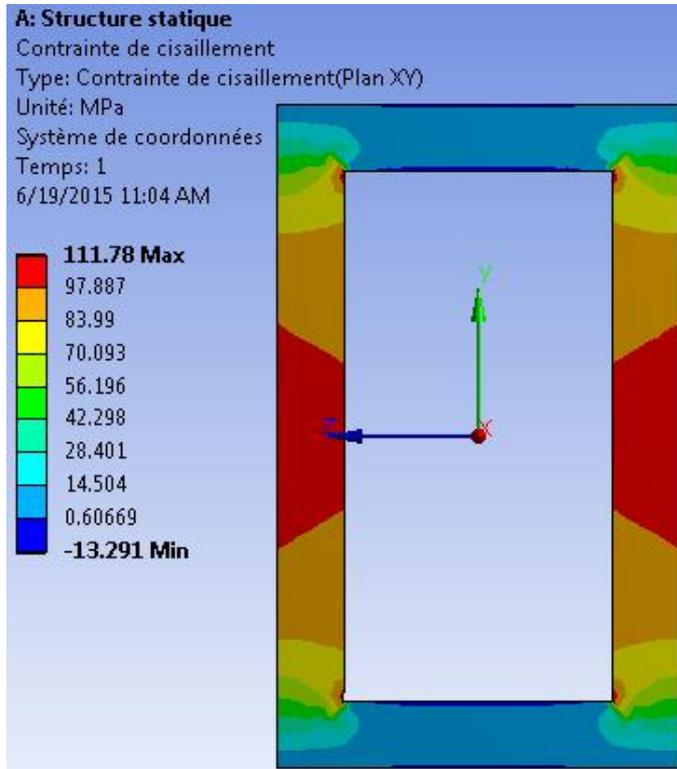
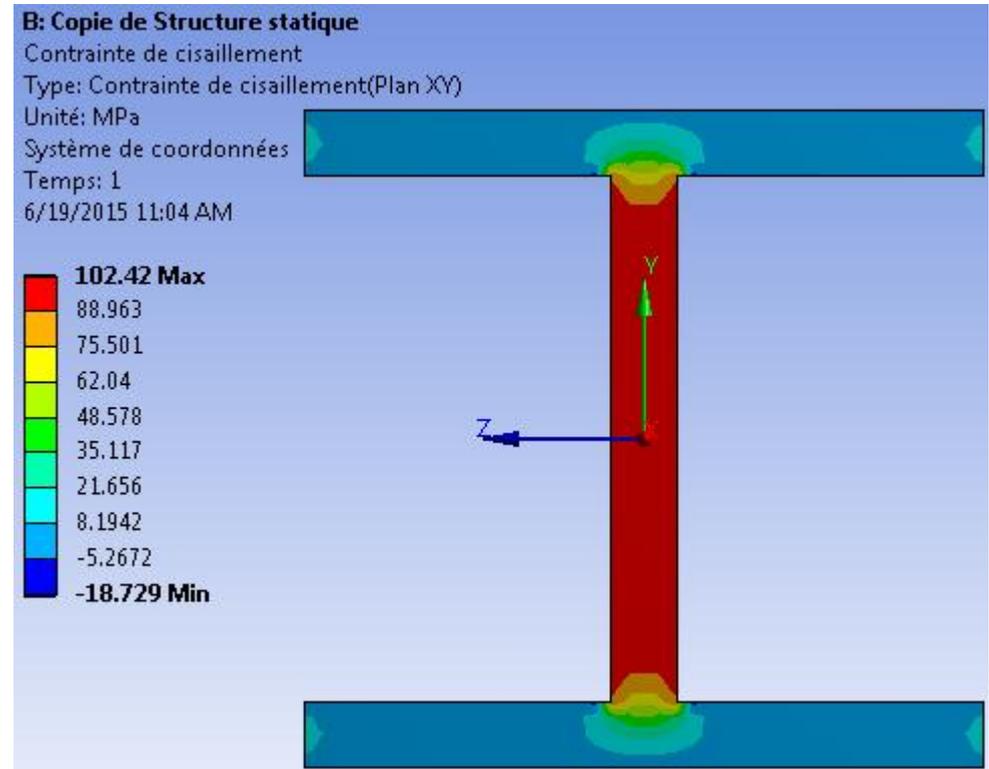


Illustration par ÉF de l'aire effective de cisaillement τ_{xy}



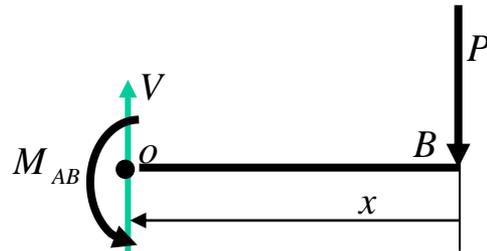
Poutre courte – section rectangulaire mince



Poutre courte – section en I

4.5 Effets de l'effort tranchant

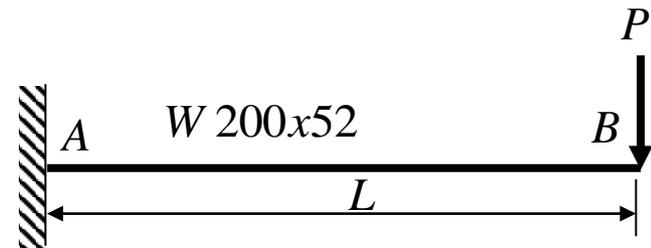
Exemple : Déterminer la contribution de l'effort tranchant à la flèche au point d'application de la force P



De A à B : $0 < x < L$

$$\sum M_o = 0 \Rightarrow M_{AB} = P \cdot x$$

$$V = P$$



$$E = 200 \times 10^3 \text{ MPa} \quad ; \quad G = 77 \times 10^3 \text{ MPa}$$

$$I = 52,7 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$A_c = w \times h = 7,9 \text{ mm} \times 206 \text{ mm} = 1627 \text{ mm}^2$$

Selon *Castigliano* :
$$\delta_B = \frac{\partial U}{\partial P}$$

4.5 Effets de l'effort tranchant

$$U = \int_0^L \frac{M_{AB}^2}{2 \cdot E \cdot I} dx + \int_0^L \frac{V^2}{2 \cdot G \cdot A_c} dx$$

$$\delta_B = \frac{\partial U}{\partial P} = \int_0^L \frac{M_{AB} (\partial M_{AB} / \partial P)}{E \cdot I} dx + \int_0^L \frac{V (\partial V / \partial P)}{G \cdot A_c} dx$$

$$\delta_B = \int_0^L \frac{P \cdot x(x)}{E \cdot I} dx + \int_0^L \frac{P(1)}{G \cdot A_c} dx = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} + \frac{P \cdot L}{G \cdot A_c}$$

$$M_{AB} = P \cdot x$$

$$V = P$$

$$\delta_B = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \cdot \left[1 + \frac{3 \cdot E \cdot I}{G \cdot A_c \cdot L^2} \right]$$

Plus la poutre est courte, plus la contribution de l'effort tranchant à la flèche est importante.

$$\delta_B = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \cdot [1 + \alpha]$$

$$\alpha = \frac{253 \times 10^3}{L^2}$$

L en mm

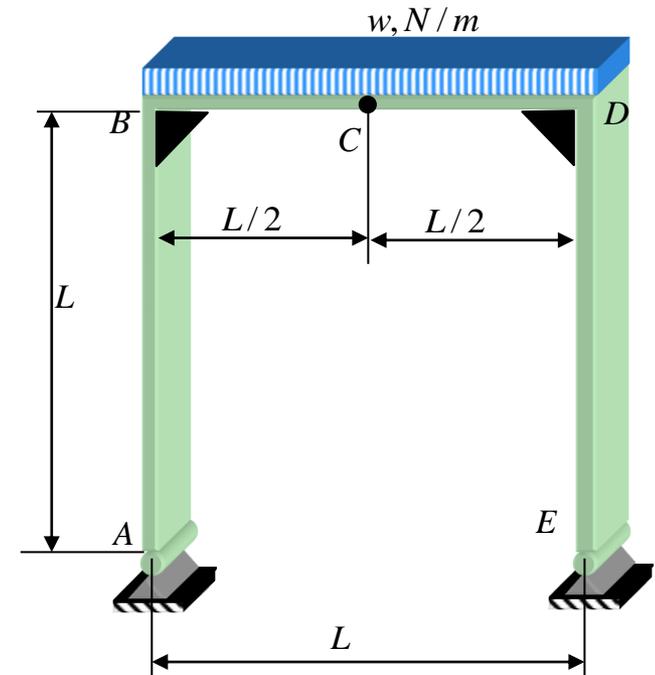
<i>L</i> , mm	α	$\frac{\alpha}{1 + \alpha}$
500	1,012	0,503
1000	0,253	0,202
2000	0,063	0,059
4000	0,016	0,016

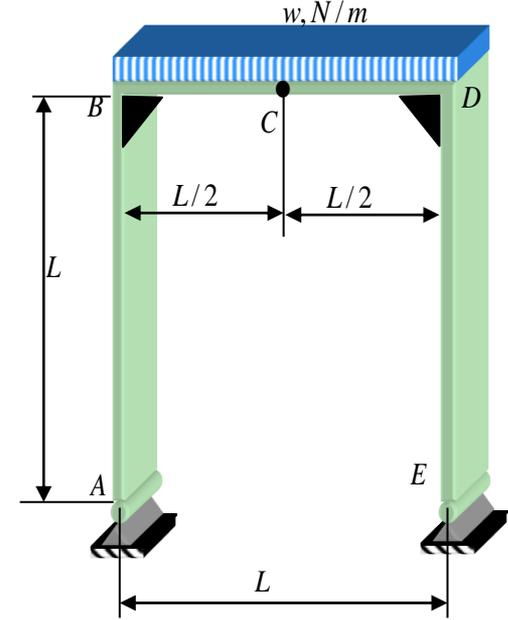
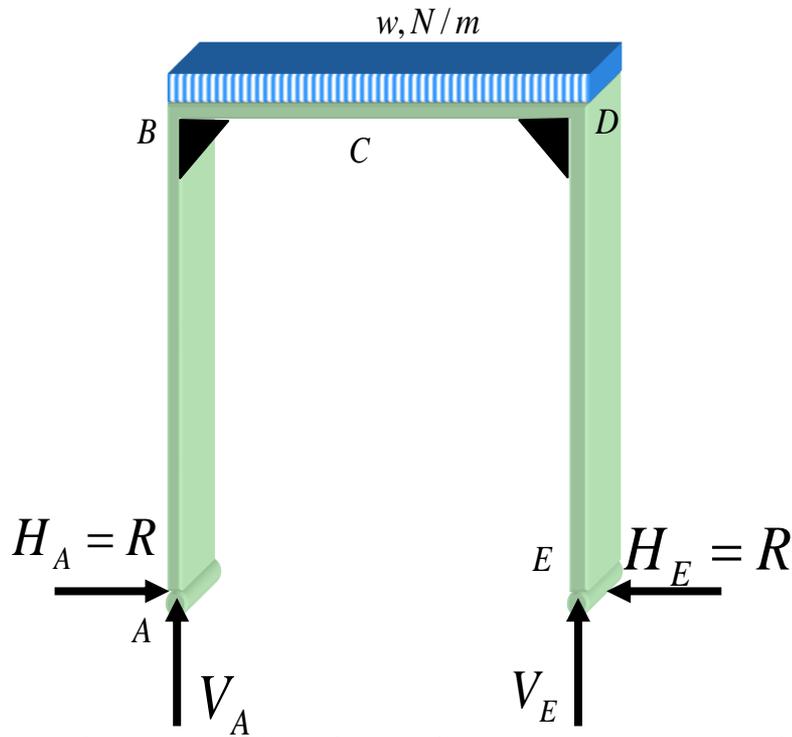
Théorème de Castigliano

Problème synthèse: Portique

Déterminer les réactions aux appuis de ce portique

Les joints en B et D sont rigides; les attaches en A et E sont des rotules



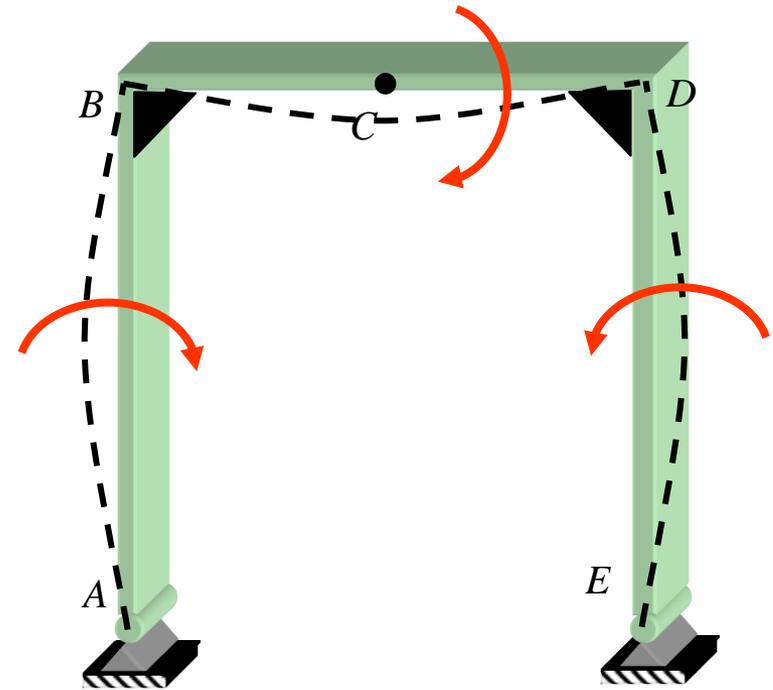
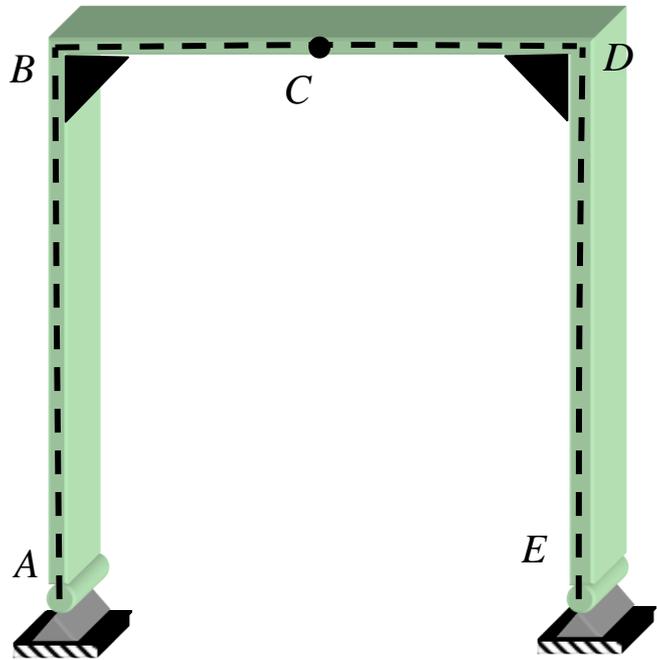


- Quatre réactions inconnues et trois équations d'équilibre disponibles

$$\sum F_x = 0; \sum F_y = 0; \sum M_z = 0$$

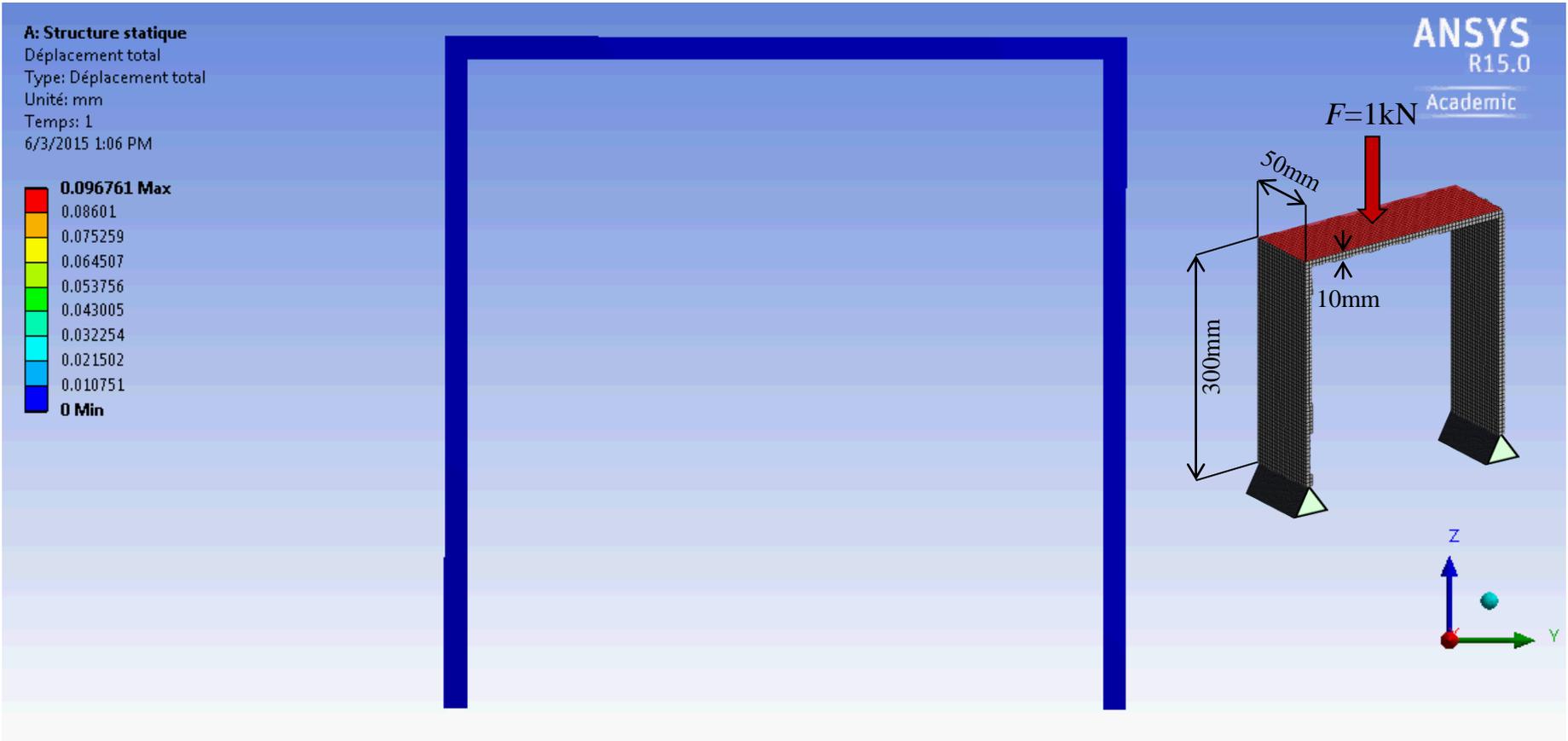
- Problème hyperstatique du premier degré; on choisit une équation de compatibilité : $\delta_{AH} = \delta_A = 0$

- H_A est la réaction surabondante



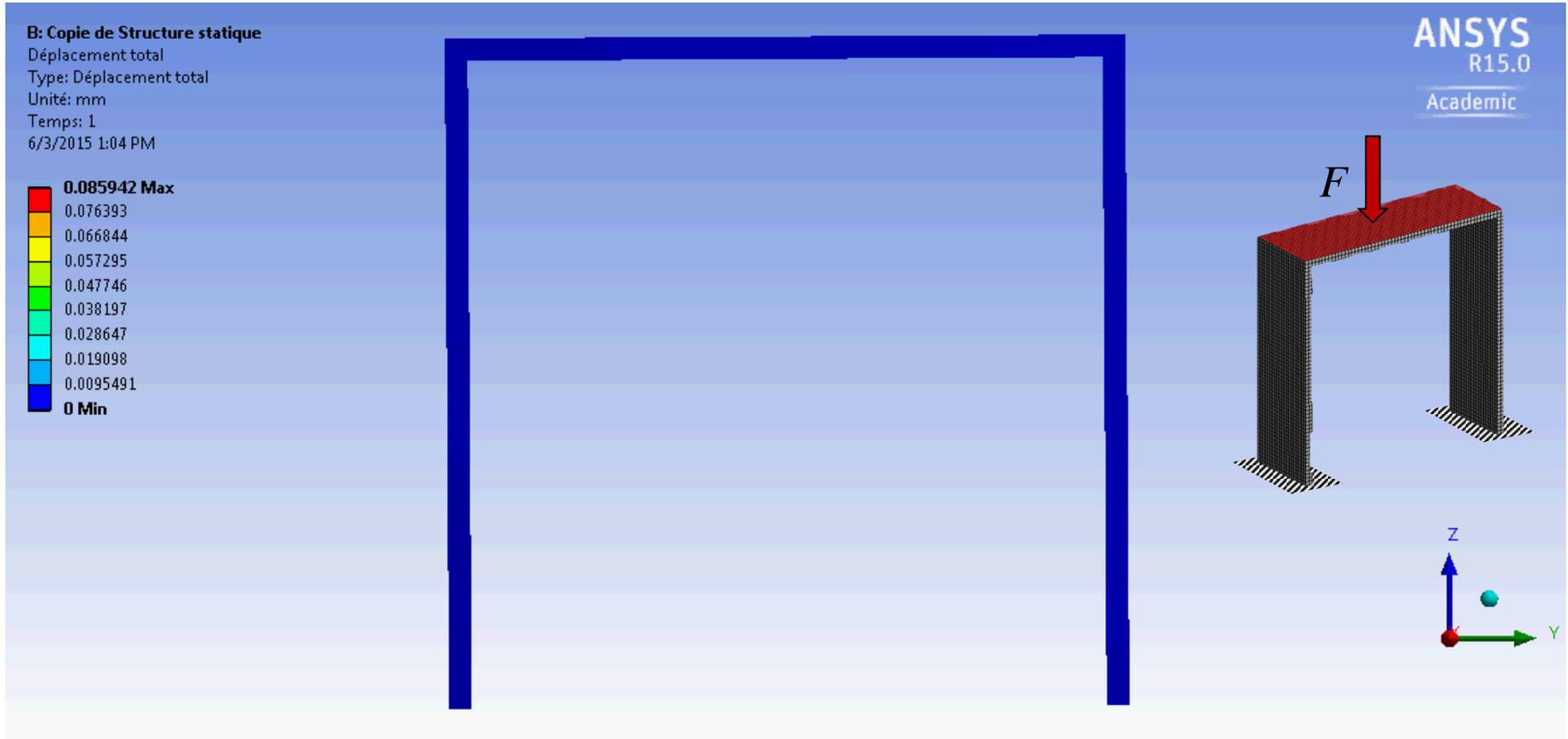
Flexion d'un portique

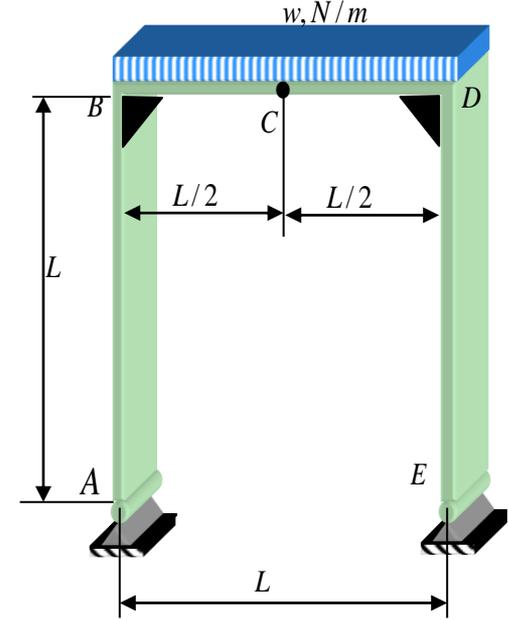
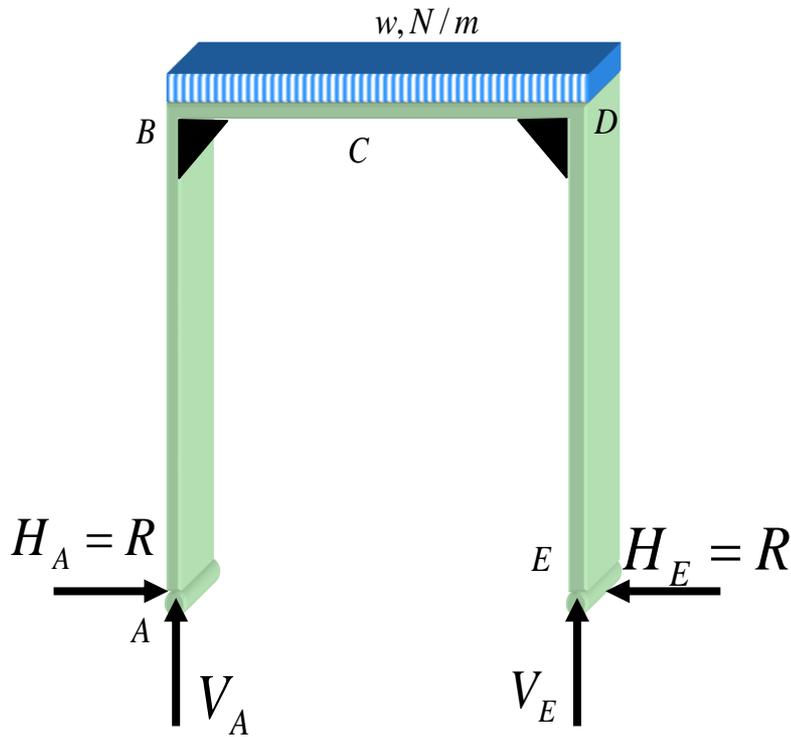
Simplement supportée en A et E



Flexion d'un portique

Encastré en A et E





Par symétrie, on peut poser $V_A = V_E = (wL)/2$.

La valeur de H_A et H_E sera obtenue à l'aide de :

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow H_A = H_E$$

$$\delta_A = \frac{\partial U}{\partial H_A} = 0$$

Efforts internes

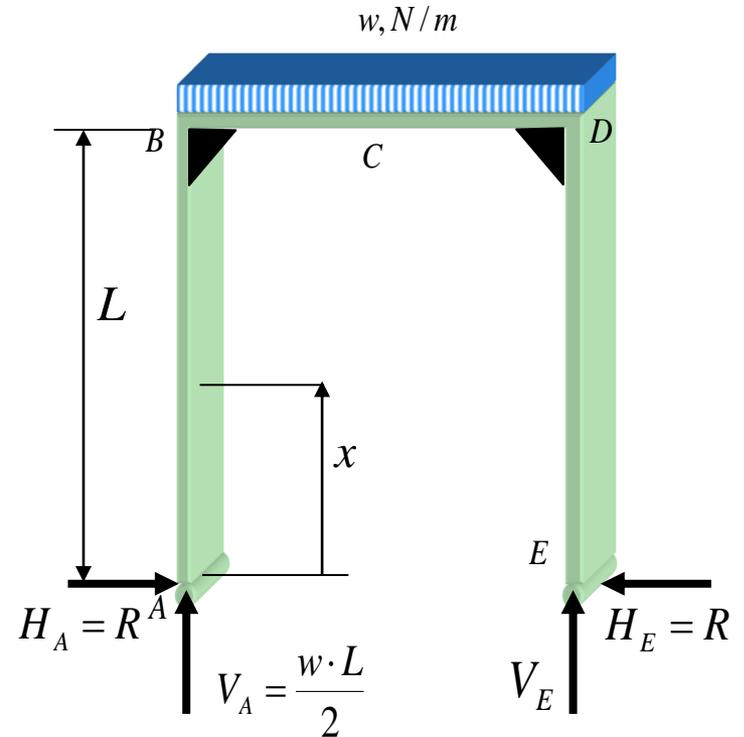
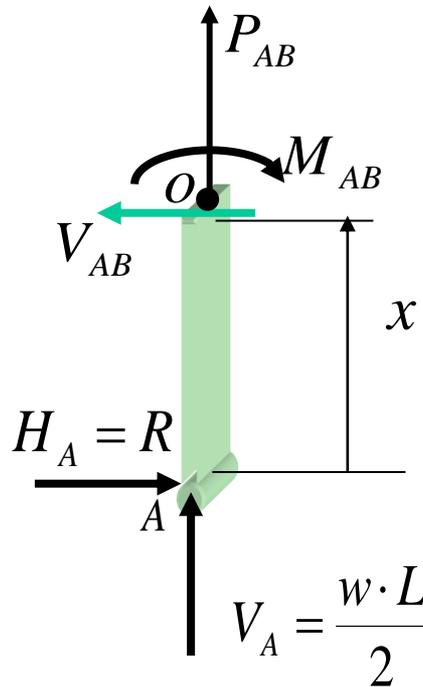
De A à B : $0 < x < L$

De D à E : $0 < x < L$

$$M_{AB} = R \cdot x$$

$$P_{AB} = -\frac{w \cdot L}{2}$$

$$V_{AB} = R$$



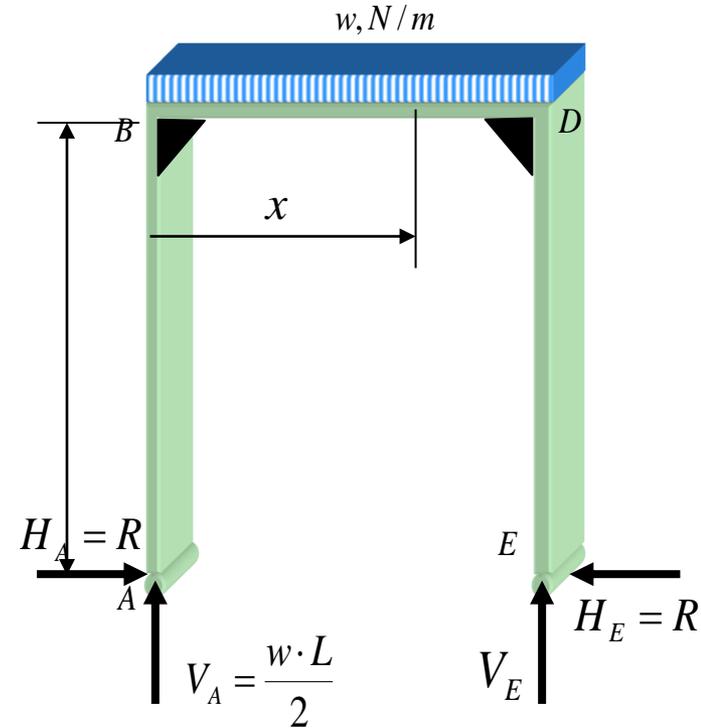
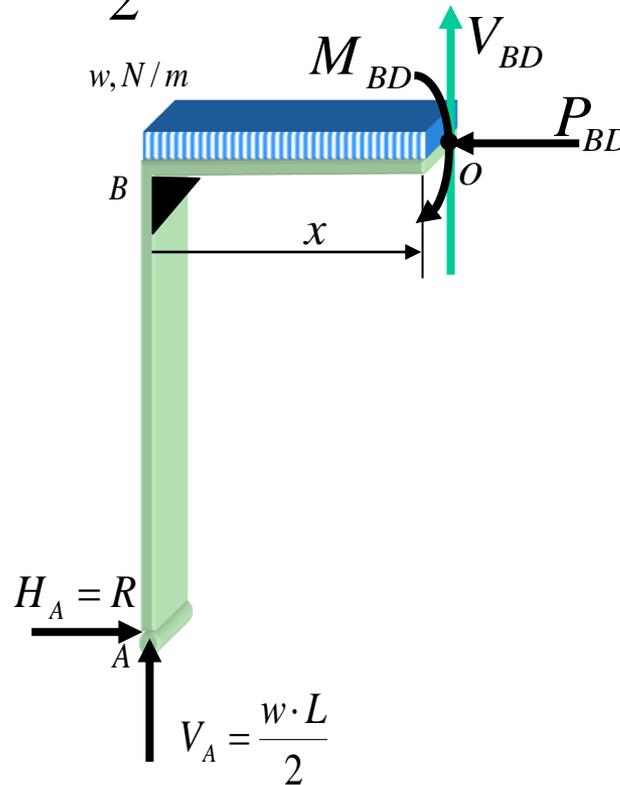
Efforts internes

De B à D : $0 < x < L$

$$M_{BD} = \frac{w \cdot x^2}{2} + R \cdot L - \frac{w \cdot L}{2} \cdot x$$

$$P_{BD} = R$$

$$V_{BD} = w \cdot x - \frac{w \cdot L}{2}$$



$M_{AB} = R \cdot x$	$M_{BD} = \frac{w \cdot x^2}{2} + R \cdot L - \frac{w \cdot L}{2} \cdot x$
$P_{AB} = -\frac{w \cdot L}{2}$	$P_{BD} = R$
$V_{AB} = R$	$V_{BD} = w \cdot x - \frac{w \cdot L}{2}$

Selon Castigliano:

$$\delta_A = \frac{\partial U}{\partial R} = 0 = \sum \int_0^L \frac{M_i (\partial M_i / \partial R) dx}{E \cdot I} + \sum \int_0^L \frac{V_i (\partial V_i / \partial R) dx}{G \cdot A_c} + \sum \frac{P_i (\partial P_i / \partial R) L}{E \cdot A}$$

$$\frac{\partial U}{\partial R} = 2 \int_0^L \frac{Rx(x) dx}{E \cdot I} + 2 \int_0^L \frac{R(1) dx}{G \cdot A_c} + 2 \frac{-\frac{1}{2} wL(0)L}{E \cdot A} +$$

$$\int_0^L \frac{\left(RL + \frac{1}{2} wx^2 - \frac{1}{2} wLx \right) (L) dx}{E \cdot I} + \int_0^L \frac{\left(wx - \frac{wL}{2} \right) (0) dx}{G \cdot A_c} + \frac{R(+1)L}{E \cdot A} = 0$$

BD

$$\frac{\partial U}{\partial R} = \frac{2RL^3}{3E \cdot I} + \frac{2RL}{G \cdot A_c} + \frac{RL^3}{E \cdot I} + \frac{wL^4}{2 \cdot 3} - \frac{wL^4}{2 \cdot 2} + \frac{RL}{E \cdot A} = 0$$

$$R = \frac{w \cdot L}{4} \frac{1}{5 + 6 \left(\frac{EI}{A_c GL^2} \right) + 3 \left(\frac{I}{AL^2} \right)}$$

Si $\left(\frac{EI}{A_c GL^2} \right) \lll 1$ et $\left(\frac{I}{AL^2} \right) \lll 1$

alors $R \approx \frac{wL}{20} = R'$

Conclusion :
L'effet de l'effort tranchant et de la force axiale sur l'énergie de déformation est négligeable

Pour un portique fabriqué d'un profilé W200x52 :

$$I = 52,7 \times 10^6 \text{ mm}^4, \quad A = 6660 \text{ mm}^2 \quad \text{et} \quad A_c = 1350 \text{ mm}^2$$

$$R' = \frac{wL}{20}$$

$$R = \frac{w \cdot L}{4} \frac{1}{5 + 6 \left(\frac{EI}{A_c GL^2} \right) + 3 \left(\frac{I}{AL^2} \right)}$$

$L, \text{ mm}$	R/w $\times 10^{-3}$	$R'/w=L/20$ $\times 10^{-3}$	R'/R
500	16,596	25	1,506
1000	44,405	50	1,127
2000	96,974	100	1,032
4000	198,57	200	1,007

Dans un portique de faible dimension, $L = 500$ mm, l'effort tranchant contribue pour 50% de la réaction horizontale aux points A et E. Pour un portique aux dimensions plus normales, $L = 4$ m, cette contribution est de 0,7 %.

$L, \text{ mm}$	R/w $\times 10^{-3}$	$R'/w=L/20$ $\times 10^{-3}$	R'/R
500	16,596	25	1,506
1000	44,405	50	1,127
2000	96,974	100	1,032
4000	198,57	200	1,007