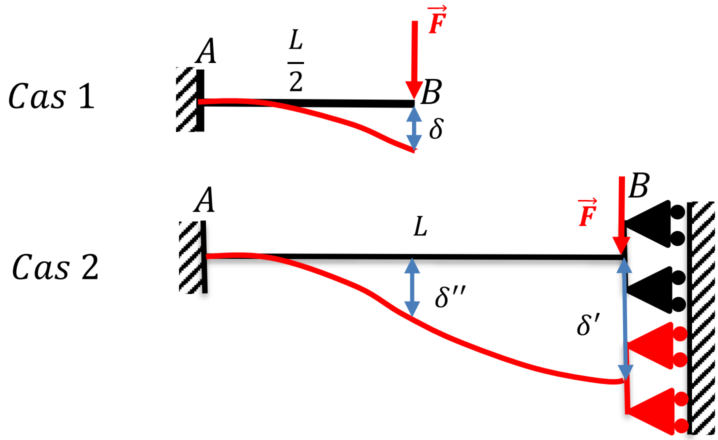
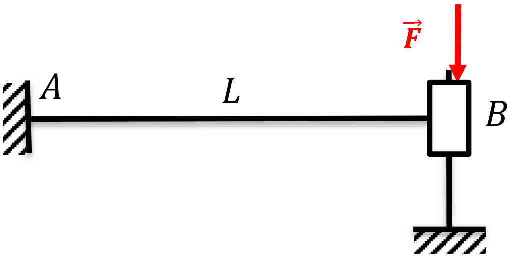
Structures hyperstatiques

Exercice 1: Equilibreuse Deltalab

Etude intuitive



Question 1: Proposer un modèle cinématique plan du cas n° 2.



Question 2: Déterminer le torseur de cohésion du cas n° 2 en fonction de x.

$$\{\mathcal{T}_c\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ -F & 0 \\ 0 & -F(L-x) \end{Bmatrix}_x^B + \begin{Bmatrix} X_{01}' & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & M_{01}' \end{Bmatrix}_x^B = \begin{Bmatrix} X_{01}' & 0 \\ -F & 0 \\ 0 & M_{01}' - F(L-x) \end{Bmatrix}_x^B$$

Question 3: En remarquant que la déformée présente un point d'inflexion, déterminer le torseur de cohésion en $x = \frac{L}{2}$

$$y'' = \frac{M_{f_z}}{EI_{g_z}}$$

$$x = \frac{L}{2} \quad ; \quad y'' = 0 \Rightarrow M_{f_z} = 0$$

On peut toutefois se rendre compte que le fait que le moment soit nul en $x = \frac{L}{2}$ fait que les problèmes 1 et 2 sont similaires. En effet, le torseur de cohésion, torseur de l'action de II sur I dans le problème 2, a l'expression suivante :

$$\{\mathcal{T}_c\} = \begin{Bmatrix} X_{01}' & 0 \\ -F & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{x=\frac{L}{2}}^{B}$$

Comme on ne s'intéresse qu'à la flexion, on prend :

$$\{\mathcal{T}_c\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ -F & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{x=\frac{L}{2}}^{B}$$

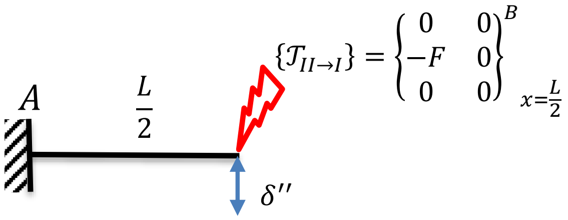
Remarque : cette astuce lève l'hyperstatisme. Il est alors possible d'en déduire le moment inconnu :

$$M_{01}' = F\left(L - \frac{L}{2}\right) = F\frac{L}{2}$$

On peut alors traiter le problème usuellement et calculer la déformée de la poutre avec le moment fléchissant connu.

Question 4: En déduire la relation $\delta'' = \delta$

La partie entre 0 et $\frac{L}{2}$ se comporte exactement (à la traction compression près, même si comme il n'y a pas d'effort axial, on trouvera 0) comme le cas simple d'un effort F appliqué en $\frac{L}{2}$.



D'où

$$\boldsymbol{\delta'' = \delta}$$

Question 5: En remarquant une symétrie sur la déformée, établir la relation entre δ' et δ''

On remarque que la déformée de la poutre de longueur L est symétrique par rapport à son centre.

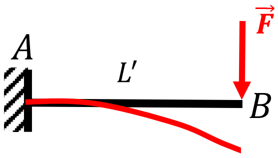
$$\delta' = 2\delta''$$

Question 6: En déduire la relation entre δ et δ'

$$\delta' = 2\delta$$

Etude théorique

Question 1: Rappeler la flèche f de l'extrémité d'une poutre de longueur L encastrée à l'une de ses extrémités sous l'action $\vec{F}$.



$$f = -\frac{FL^3}{3EI_{G_z}}$$

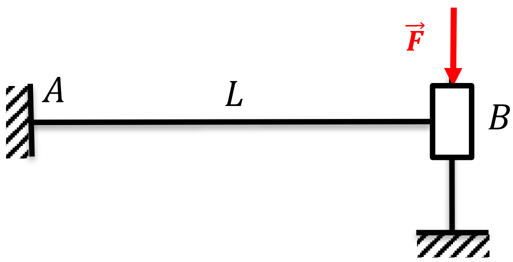
Question 2: En déduire la flèche δ en bout de poutre pour une longueur $\frac{L}{2}$.

$$\delta = -\frac{FL^3}{24EI_{G_z}}$$

Question 3: En déduire la déformation théorique δ' de la lame en flexion en fonction de F, L, E et I_{G_z}.

$$\delta' = 2\delta = -\frac{FL^3}{12EI_{G_z}}$$

Question 4: A l'aide de la méthode développée en cours pour traiter les problèmes hyperstatiques, déterminer l'expression de δ', flèche de la poutre en B.



- Hyperstatisme

h=2

En plan on a un encastrement et une glissière : $h = m + I_S - E_S = 0 + 5 - 3 = 2$. Hyperstatisme en rotation autour de $\vec{z}$ et en translation suivant $\vec{x}$.

- Isoler le système et déterminer le plus d'inconnues statiques de liaisons en fonction des autres

$$\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ -F & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_B^B + \begin{Bmatrix} X_A & 0 \\ Y_A & 0 \\ 0 & N_A \end{Bmatrix}_A^B + \begin{Bmatrix} X_B & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & N_B \end{Bmatrix}_B^B = \{0\}$$

$$\begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ -F & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_B^B + \begin{Bmatrix} X_A & 0 \\ Y_A & 0 \\ 0 & N_A - LY_A \end{Bmatrix}_B^B + \begin{Bmatrix} X_B & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & N_B \end{Bmatrix}_B^B = \{0\}$$

$$\begin{cases} X_A + X_B = 0 \\ -F + Y_A = 0 \\ N_A - LY_A + N_B = 0 \end{cases}$$

$$N_A - LY_A + N_B = 0$$

$$N_A = LY_A - N_B$$

- Choisir l'inconnue statique en fonction de laquelle les autres seront exprimées et les exprimer en fonction de celle-ci.

$$N_B$$

$$N_A = LY_A - N_B$$

- Exprimer le torseur de cohésion dans les différents tronçons en fonction de l'inconnue statique indéterminée et des données du problème (charges extérieures et géométrie)

$$\{\mathcal{T}_C\} = \{\mathcal{T}_{ext\to 2}\}$$

$$\{\mathcal{T}_C\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ -F & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_B^B + \begin{Bmatrix} X_B & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & N_B \end{Bmatrix}_B^B$$

$$\{\mathcal{T}_C\} = \begin{Bmatrix} X_B & 0 \\ -F & 0 \\ 0 & N_B - F(L-x) \end{Bmatrix}_M^B = \begin{Bmatrix} X_B & 0 \\ -F & 0 \\ 0 & Fx + N_B - FL \end{Bmatrix}_M^B$$

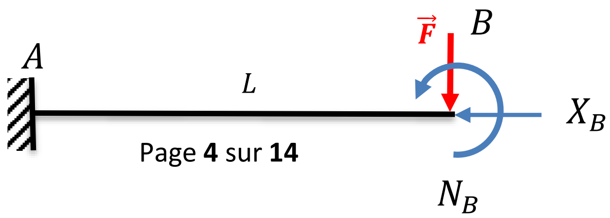
Dans un second temps, on va mettre en place une équation supplémentaire permettant de traduire la contrainte liée à l'hyperstatisme de la poutre :

- Identifier la déformation liée à l'hyperstatisme :

Rotation suivant $\vec{z}$

- Supprimer une des liaisons associées au degré d'hyperstatisme mis en évidence tout en gardant comme effort extérieur la composante statique associée.

On supprime la liaison en B:



- Déterminer alors la fonction traduisant la déformation de la poutre associée à l'hyperstatisme.

$$y''(x) = \frac{M_{f_z}}{EI_{g_z}}$$

$$EI_{g_z} y''(x) = M_{f_z}$$

$$EI_{g_z} y''(x) = Fx + N_B - FL$$

I_{g_z} étant constant :

$$EI_{g_z} y'(x) = \frac{F}{2}x^2 + (N_B - FL)x + k_1$$

$$EI_{g_z} y(x) = \frac{F}{6}x^3 + \frac{(N_B - FL)}{2}x^2 + k_1 x + k_2$$

Liaison prise en compte :

$$y(0) = k_2 = 0$$

$$y'(0) = k_1 = 0$$

$$EI_{g_z} y(x) = \frac{F}{6}x^3 + \frac{(N_B - FL)}{2}x^2$$

$$y(x) = \frac{F}{6EI_{g_z}}x^3 + \frac{(N_B - FL)}{2EI_{g_z}}x^2$$

- Ecrire une équation traduisant la condition de déformation imposée par la liaison supprimée.

$$\theta_z(L) = 0$$

$$y'(L) = 0$$

$$\frac{F}{2}L^2 + (N_B - FL)L = 0$$

$$FL^2 + 2(N_B - FL)L = 0$$

$$FL^2 + 2N_B L - 2FL^2 = 0$$

$$N_B = \frac{FL}{2}$$

Finalement, on a :

$$y(x) = \frac{F}{6EI_{g_z}}x^3 + \frac{(N_B - FL)}{2EI_{g_z}}x^2$$

$$y(x) = \frac{F}{6EI_{g_z}}x^3 + \frac{\left(\frac{FL}{2} - FL\right)}{2EI_{g_z}}x^2$$

$$y(x) = \frac{F}{6EI_{g_z}}x^3 - \frac{FL}{4EI_{g_z}}x^2$$

$$y(L) = \delta' = \frac{FL^3}{6EI_{g_z}} - \frac{FLL^3}{4EI_{g_z}}$$

$$\delta' = \frac{4FL^3}{24EI_{g_z}} - \frac{6FLL^3}{24EI_{g_z}}$$

$$\delta' = \frac{-2FL^3}{24EI_{g_z}}$$

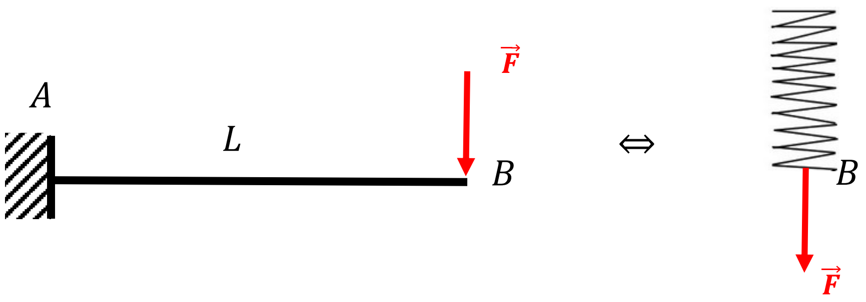
$$\delta' = -\frac{FL^3}{12EI_{g_z}}$$

Question 5: En déduire la relation entre δ et δ'.

$$\frac{\delta'}{\delta} = \frac{-\frac{FL^3}{12EI_{g_z}}}{-\frac{FL^3}{24EI_{G_z}}} = 2$$

Raideur d'une lame

On propose le modèle suivant :



Question 6: Déterminer la raideur de ce ressort en fonction de E, l, e et L

$$\delta' = -\frac{FL^3}{12EI_{g_z}}$$

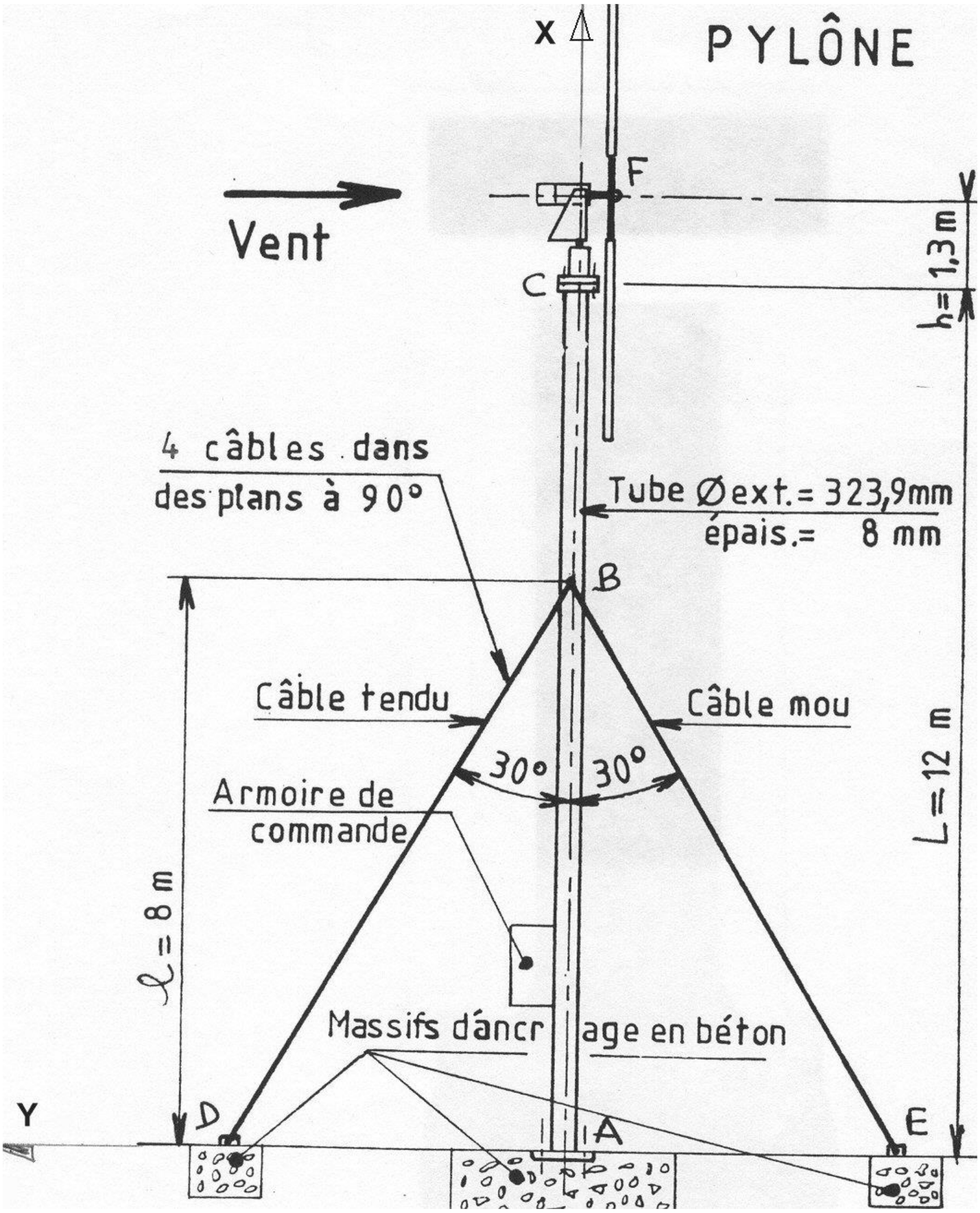
$$F = k\delta'$$

$$k = \left|\frac{F}{\delta'}\right| = \frac{12EI_{g_z}}{L^3}$$

$$I_{g_z} = \frac{le^3}{12}$$

$$k = \frac{12Ele^3}{12L^3} = \frac{Ele^3}{L^3}$$

Exercice 2: Pylône d'aérogénérateur



Question 1: Calculer le moment quadratique I_{G_z} du pylône en mm^4.

$$D = 323{,}9$$
$$d = 307{,}9$$

$$I_{G_z} = \pi \frac{D^4 - d^4}{64} = \pi \frac{323{,}9^4 - 307{,}9^4}{64} = 99100806\, mm^4 = 99{,}1 * 10^6\, mm^4$$

$$I_{G_z} = 99{,}1 * 10^{-6}\, m^4$$

Question 2: Calculez dans le plan de la figure, la flèche à l'extrémité C du pylône si l'on supprime les câbles.

$$y''(x) = \frac{M_{f_z}}{EI_{g_z}}$$
$$EI_{g_z} y''(x) = M_{f_z}$$
$$EI_{g_z} y''(x) = -F(L+h-x) = Fx - F(L+h)$$

I_{g_z} étant constant :

$$EI_{g_z} y'(x) = \frac{F}{2}x^2 - F(L+h)x + k_1$$
$$EI_{g_z} y(x) = \frac{F}{6}x^3 - \frac{F(L+h)}{2}x^2 + k_1 x + k_2$$
$$y(x) = y'(x) = 0$$
$$EI_{g_z} y(x) = \frac{F}{6}x^3 - \frac{F(L+h)}{2}x^2$$
$$y(x) = \frac{F}{6EI_{g_z}}x^3 - \frac{F(L+h)}{2EI_{g_z}}x^2$$
$$f = y(L) = \frac{F}{6EI_{g_z}}L^3 - \frac{F(L+h)}{2EI_{g_z}}L^2$$
$$f = \frac{FL^3}{6EI_{g_z}} - \frac{FL^3}{2EI_{g_z}} - \frac{FhL^2}{2EI_{g_z}}$$
$$f = -\frac{FL^3}{3EI_{g_z}} - \frac{FhL^2}{2EI_{g_z}}$$
$$f = -\frac{FL^2}{EI_{g_z}}\left(\frac{L}{3} + \frac{h}{2}\right)$$

$$f = -\frac{1120 * 12^2}{210 * 10^9 * 99{,}1 * 10^{-6}}\left(\frac{12}{3} + \frac{1{,}3}{2}\right) = -36.036\, mm$$

Question 3: Que vaut la contrainte maximale de flexion dans le pylône ?

$$\sigma = -y\frac{M_{f_z}}{I_{g_z}}$$
$$\sigma_{max} = \frac{D}{2}\frac{F(L+h)}{I_{g_z}} = 24.34\, MPa < Rpe = \frac{Re}{2} = 110\, MPa$$

Question 4: Isoler le pylône complet dans la situation réelle afin d'en déduire les équations mettant en relation X_A, Y_A, M_A, F et T, la tension du câble.

On se place en A :

$$\begin{cases} X_A - T\cos\alpha = 0 \\ Y_A - F + T\sin\alpha + 0 \\ N_A - F(L+h) + T\sin\alpha\, l = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} X_A - T\frac{\sqrt{3}}{2} = 0 \\ Y_A - F + \frac{T}{2} = 0 \\ N_A - F(L+h) + \frac{Tl}{2} = 0 \end{cases}$$

Question 5: Quel est le degré d'hyperstatisme du système ?

On a 4 inconnues et 3 équations :

$$h = 1$$

Question 6: Déterminez la tension T du câble tendu situé dans le plan de la figure.

Nous devons ajouter une équation traduisant la compatibilité des déplacements du point B du fait de la déformation en flexion du pylône et de la déformation en traction-compression du câble.

Flèche en B du pylône : On étudie le tronçon AB !

$$y''(x) = \frac{M_{f_z}}{EI_{g_z}}$$

$$EI_{g_z} y''(x) = M_{f_z}$$

$$EI_{g_z} y''(x) = -F(L+h-x) + T\sin\alpha\,(l-x) = (F - T\sin\alpha)x - F(L+h) + Tl\sin\alpha$$

$$\sin\alpha = \frac{1}{2}$$

$$EI_{g_z} y''(x) = \frac{1}{2}(2F-T)x + \frac{Tl - 2F(L+h)}{2}$$

I_{g_z} étant constant :

$$EI_{g_z} y'(x) = \frac{1}{4}(2F-T)x^2 + \frac{Tl - 2F(L+h)}{2} + k_1$$

$$EI_{g_z} y(x) = \frac{1}{12}(2F-T)x^3 + \frac{Tl - 2F(L+h)}{4}x^2 + k_1 x + k_2$$

$$y(x) = y'(x) = 0$$

$$EI_{g_z} y(x) = \frac{1}{12}(2F-T)x^3 + \frac{Tl - 2F(L+h)}{4}x^2$$

$$y(x) = \frac{(2F-T)x^3 + [3Tl - 6F(L+h)]x^2}{12EI_{g_z}}$$

$$y(l) = \frac{(2F-T)l^3 + [3Tl - 6F(L+h)]l^2}{12EI_{g_z}}$$

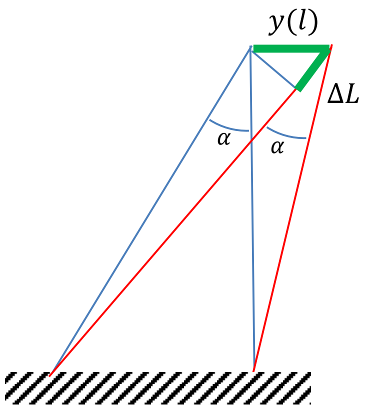
$$y(l) = \frac{2Fl^3 - Tl^3 + 3Tl^3 - 6F(L+h)l^2}{12EI_{g_z}}$$

$$y(l) = \frac{2Fl^3 + 2Tl^3 - 6Fl^2(L+h)}{12EI_{g_z}}$$

$$y(l) = \frac{Fl^3 + Tl^3 - 3Fl^2(L+h)}{6EI_{g_z}}$$

$$y(l) = \frac{F[l^3 - 3l^2(L+h)] + Tl^3}{6EI_{g_z}}$$

Déformation du câble :



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

$$L_C = \frac{l}{\cos\alpha} = \frac{2}{\sqrt{3}} l = \frac{2\sqrt{3}}{3} l$$

$$\cos\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\Delta L = \frac{2\sqrt{3}}{3}\frac{Tl}{ES}$$

$$\sin\alpha = \frac{\Delta L}{|y(l)|}$$

α est considéré ne pas changer

$$\sin\alpha = \frac{1}{2}$$

$$\frac{1}{2} = \frac{\frac{2\sqrt{3}}{3}\frac{Tl}{ES}}{-\frac{F[l^3 - 3l^2(L+h)] + Tl^3}{6EI_{g_z}}}$$

$$\frac{1}{2} = -\frac{2\sqrt{3}}{3}\frac{Tl}{ES}\frac{6EI_{g_z}}{F[l^3 - 3l^2(L+h)] + Tl^3}$$

$$1 = -8\sqrt{3}\frac{Tl}{ES}\frac{EI_{g_z}}{F[l^3 - 3l^2(L+h)] + Tl^3}$$

$$\frac{S}{8\sqrt{3}I_{g_z}} = -\frac{T}{Fl[l - 3(L+h)] + Tl^2}$$

$$\frac{Sl}{8\sqrt{3}I_{g_z}} = -\frac{T}{F[l - 3(L+h)] + Tl}$$

$$T\frac{8\sqrt{3}I_{g_z}}{Sl} = -F[l - 3(L+h)] - Tl$$

$$T\frac{8\sqrt{3}I_{g_z} + Sl^2}{Sl} = -F[l - 3(L+h)]$$

$$\frac{T}{F} = -\frac{\sqrt{3}Sl[l - 3(L+h)]}{24I_{g_z} + \sqrt{3}Sl^2}$$

$$\frac{T}{F} = \frac{\sqrt{3}Sl[3(L+h) - l]}{24I_{g_z} + \sqrt{3}Sl^2}$$

Question 7: En déduire la contrainte maximale dans le câble et vérifier qu'elle est acceptable.

$$F = 1120\ N$$
$$S = \pi * 0.005^2 = 7.85 * 10^{-5}$$
$$T = \frac{\sqrt{3}Sl[3(L+h)-l]}{24I_{g_z} + \sqrt{3}Sl^2}F = \frac{\sqrt{3} * \pi * 0.005^2 * 8[3(12+1{,}3)-8]}{24 * 99{,}1 * 10^{-6} + 8^2\sqrt{3} * \pi * 0.005^2}1120 = 3507.74\ N$$

$$\sigma = \frac{T}{S} = \frac{3507.74}{7.85 * 10^{-5}} = 44.66\ MPa < Rpe = \frac{Re}{2} = 110\ MPa$$

Question 8: Calculez, dans le plan de la figure, la flèche à l'extrémité du pylône stabilisé par les câbles dans les conditions de la question précédente.

On a déjà l'équation de la déformée dans le tronçon AB. :

$$y_{AB}(x) = \frac{(2F-T)x^3 + [3Tl - 6F(L+h)]x^2}{12EI_{g_z}}$$

Ensuite, il faut la déterminer dans le tronçon BC - On reprend ce que l'on a fait précédemment :

$$y_{BC}''(x) = \frac{M_{f_z}}{EI_{g_z}}$$
$$EI_{g_z}y_{BC}''(x) = M_{f_z}$$
$$EI_{g_z}y_{BC}''(x) = -F(L+h-x) = Fx - F(L+h)$$

I_{g_z} étant constant :

$$EI_{g_z}y_{BC}'(x) = \frac{F}{2}x^2 - F(L+h)x + k_1$$
$$EI_{g_z}y_{BC}(x) = \frac{F}{6}x^3 - \frac{F(L+h)}{2}x^2 + k_1x + k_2$$

Les conditions aux limites sont différentes :

$$y_{AB}'(l) = y_{BC}'(l)$$
$$y_{AB}(l) = y_{BC}(l)$$

$$\frac{F}{2}l^2 - F(L+h)l + k_1 = \frac{3(2F-T)l^2 + 2[3Tl - 6F(L+h)]l}{12}$$
$$\frac{F}{6}l^3 - \frac{F(L+h)}{2}l^2 + k_1l + k_2 = \frac{(2F-T)l^3 + [3Tl - 6F(L+h)]l^2}{12}$$

$$k_1 = \frac{3(2F-T)l^2 + 2[3Tl - 6F(L+h)]l}{12} - \frac{F}{2}l^2 + F(L+h)l$$
$$k_1 = (2F-T)\frac{l^2}{4} + \frac{2Tl^2}{4} - Fl(L+h) - \frac{2F}{4}l^2 + Fl(L+h)$$
$$k_1 = (2F - T + 2T)\frac{l^2}{4} - \frac{2F}{4}l^2$$
$$k_1 = \frac{(2F + T - 2F)l^2}{4}$$

$$k_1 = \frac{Tl^2}{4}$$

$$\frac{(2F-T)l^3 + [3Tl - 6F(L+h)]l^2}{12} = \frac{F}{6}l^3 - \frac{F(L+h)}{2}l^2 + k_1 l + k_2$$

$$k_2 = \frac{(2F-T)l^3 + [3Tl - 6F(L+h)]l^2}{12} - \frac{F}{6}l^3 + \frac{F(L+h)}{2}l^2 - k_1 l$$

$$k_2 = \frac{(2F-T)}{12}l^3 + \frac{3Tl - 6F(L+h)}{12}l^2 - \frac{2F}{12}l^3 + \frac{F(L+h)}{2}l^2 - \frac{3T}{12}l^3$$

$$k_2 = \left[\frac{2F-T}{12} - \frac{2F}{12} - \frac{3T}{12}\right]l^3 + \left[\frac{3Tl - 6F(L+h)}{12} + \frac{F(L+h)}{2}\right]l^2$$

$$k_2 = \frac{-4T}{12}l^3 + \frac{3T}{12}l^3$$

$$k_2 = \frac{-T}{12}l^3$$

$$EI_{g_z} y_{BC}(x) = \frac{F}{6}x^3 - \frac{F(L+h)}{2}x^2 + k_1 x + k_2$$

$$y_{BC}(x) = \frac{1}{EI_{g_z}}\left[\frac{F}{6}x^3 - \frac{F(L+h)}{2}x^2 + k_1 x + k_2\right]$$

$$y_{BC}(x) = \frac{1}{EI_{g_z}}\left[\frac{F}{6}x^3 - \frac{F(L+h)}{2}x^2 + \frac{Tl^2}{4}x - \frac{T}{12}l^3\right]$$

$$y(l) = \frac{1}{EI_{g_z}}\left[\frac{F}{6}L^3 - \frac{F(L+h)}{2}L^2 + \frac{Tl^2}{4}L - \frac{T}{12}l^3\right]$$

$$y(l) = \frac{1}{EI_{g_z}}\left[\frac{F}{6}L^3 - \frac{F(L+h)}{2}L^2 + \frac{Tl^2}{4}L - \frac{T}{12}l^3\right]$$

$$y(L) = -10{,}87\ mm$$

Question 9: Que vaut la contrainte maximale de flexion dans le pylône en présence des câbles ?

$$\sigma = -y\frac{M_{f_z}}{I_{g_z}}$$

$$M_{f_z} = \begin{cases} -F\big((L+h)-x\big) + T\sin\alpha\,(l-x)\ \forall x \in [0,l] \\ -F\big((L+h)-x\big)\ \forall x \in [l, L+h] \end{cases}$$

$$\sin\alpha = \frac{1}{2}$$

$$M_{f_z} = \begin{cases} -F(L+h) + Fx + Tl\sin\alpha - Tx\sin\alpha\ \ \forall x \in [0,l] \\ -F(L+h) + Fx\ \forall x \in [l, L+h] \end{cases}$$

$$M_{f_z} = \begin{cases} (F - T\sin\alpha)x - F(L+h) + Tl\sin\alpha \ \forall x \in [0,l] \\ -F(L+h) + Fx \ \forall x \in [l, L+h] \end{cases}$$

$$M_{f_z} = \begin{cases} \left(F - \frac{T}{2}\right)x + \left(\frac{Tl}{2} - F(L+h)\right) \ \forall x \in [0,l] \\ Fx - F(L+h) \ \forall x \in [l, L+h] \end{cases}$$

$$M_{f_z} = \begin{cases} -633{,}87x + 0{,}59 \ \forall x \in [0,l] \ va \ de \ 0 \text{ à} -5{,}93 \\ 1120x - 13{,}44 \ \forall x \in [l, L+h] \ va \ de -5{,}93 \text{ à } 0 \end{cases}$$

Le moment maximum est obtenu en $x = l$:

$$M_{f_{z_{max}}} = \left|F\big(l - (L+h)\big)\right| = 5{,}93\ Nm$$

$$\sigma^f{}_{max} = \left|\frac{D}{2}\frac{F\big(l-(L+h)\big)}{I_{g_z}}\right|$$

$$\sigma^f{}_{max} = \left|\frac{D}{2}\frac{F(l-L)}{I_{g_z}}\right| = \left|\frac{0{,}3239}{2}\frac{1120\big(0{,}008 - (0{,}0012 + 0{,}00013)\big)}{99{,}1 * 10^{-6}}\right| = 9{,}7\ MPa$$

Question 10: Que vaut la contrainte maximale de traction compression dans le pylône en présence des câbles ?

$$\sigma^n{}_{max} = \frac{T\cos\alpha}{S} = \frac{4T\cos\alpha}{\pi(D^2 - d^2)} = \frac{2T\sqrt{3}}{\pi(D^2-d^2)} = \frac{2 * 3507 * \sqrt{3}}{\pi(0{,}3239^2 - 0{,}3079^2)} = 0{,}38\ MPa$$

Question 11: En déduire la contrainte normale maximale dans le pylône en présence des câbles.

$$\sigma_{max} = \sigma^n{}_{max} + \sigma^f{}_{max} = 7{,}32 + 0{,}38 = 10{,}08\ Mpa$$

Question 12: Conclure

L'ajout des câbles permet de réduire la flèche en bout de pylône de 38 mm à 11 mm et la contrainte normale de 24 à 10,08 MPa mais cette dernière n'est plus située au pied du pylône mais au niveau de l'attache du câble.