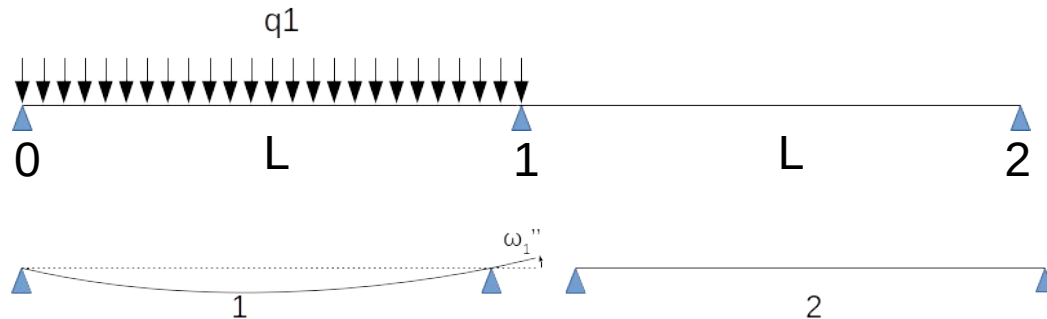


# Exercice Pont 2 travées

## 1 : Calcul des sollicitations

1-1 : charge d'exploitation, superstructures et poids propre

\* Effet d'un chargement sur la 1ère travée, utilisons le théorème des 3 moments



$$\omega''_1 = \frac{1}{EI} \int_{x=0}^L M_1 \frac{x}{L} dx = \frac{L}{EI} \frac{q_1 L^2}{8} * \frac{1}{1} = \frac{q_1 L^3}{24 EI}$$

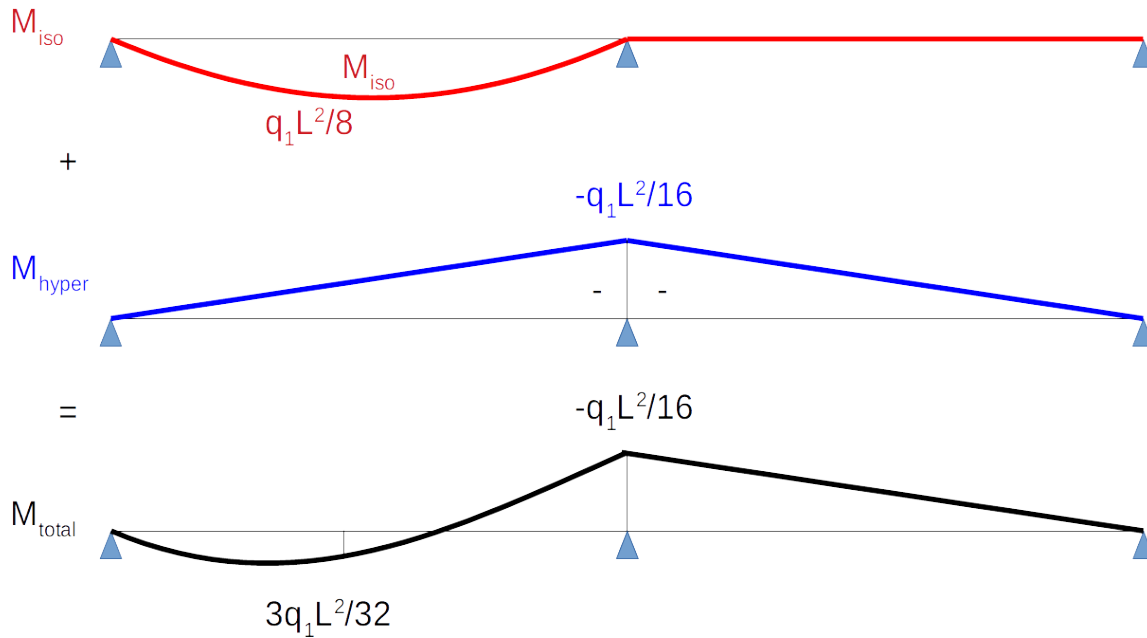
Puis utilisation de la formule des 3 moments :

$$b_1 \cancel{M_0} + (c_1 + a_2) M_1 + b_2 \cancel{M_2} = \cancel{\omega_2'} - \omega_1'' = \frac{-q_1 L^3}{24 EI}$$

$\begin{matrix} \nearrow & \nearrow & \nearrow & \nearrow \\ 0 & \frac{2L}{3EI} & 0 & 0 \end{matrix}$

➔  $M_1 = \frac{-q_1 L^2}{16}$

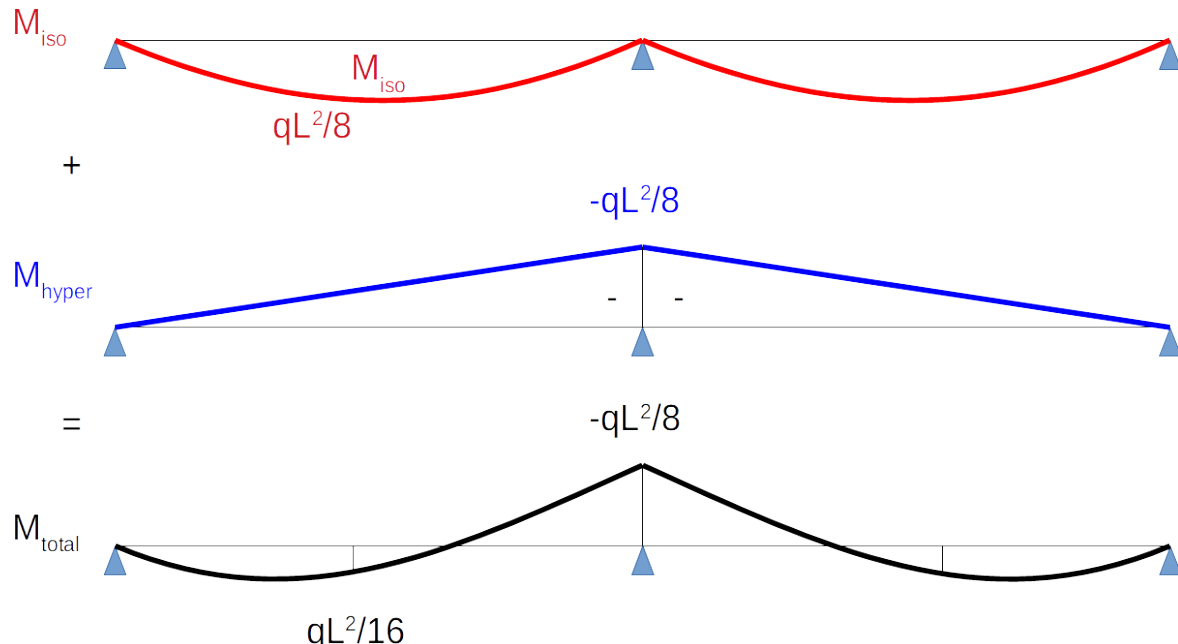
# Bilan des moments :



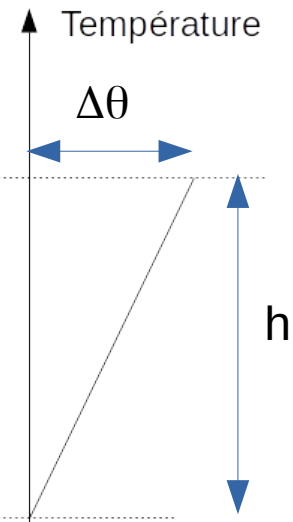
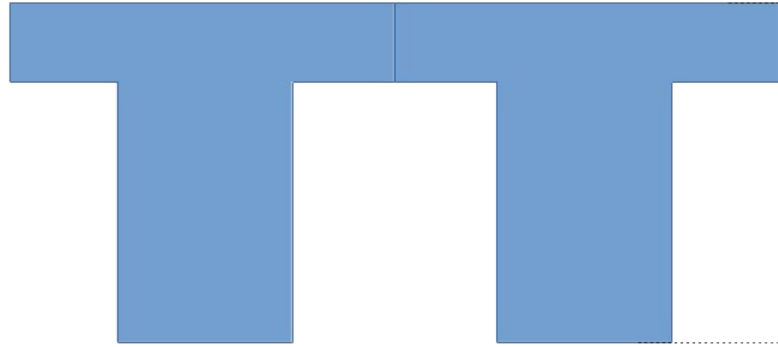
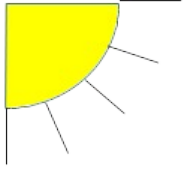
\* Effet d'un chargement sur la 2ème travée → moment symétrique

\* Effet d'un chargement sur les 2 travées

→ somme des 2 cas précédents (travée 1 chargée + travée 2 chargée)

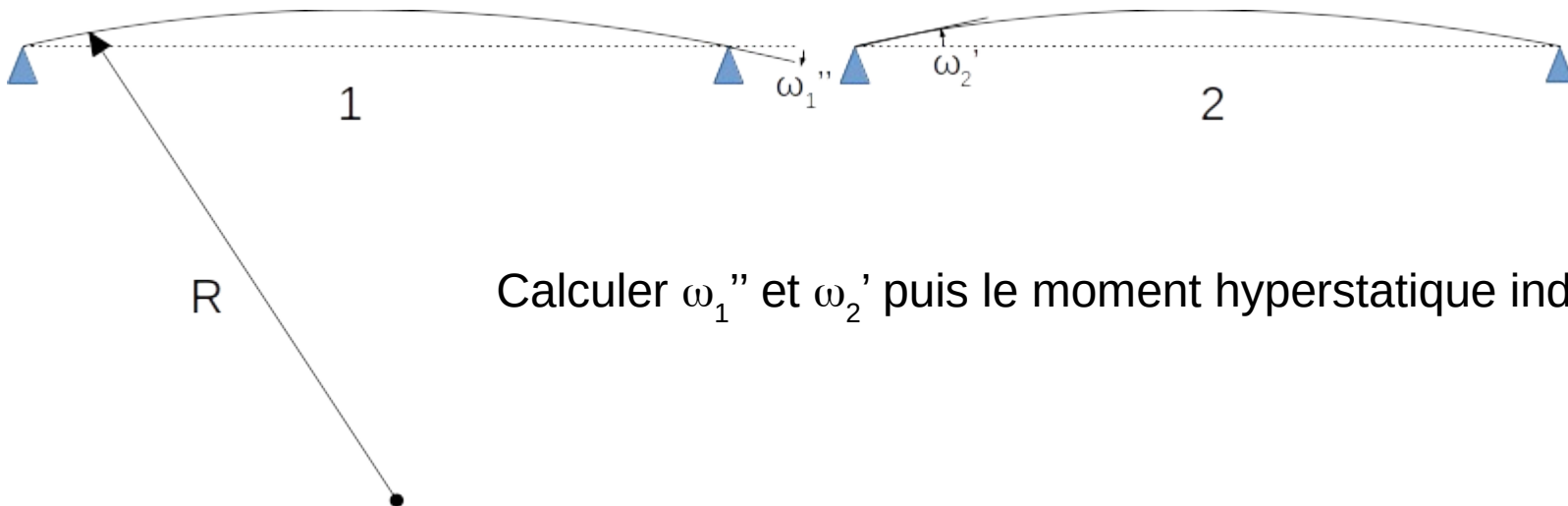


## 1-2 : gradient thermique



\* Le gradient thermique provoque une différence de température entre la fibre inf et sup  
→ génération d'une courbure sur la structure isostatique

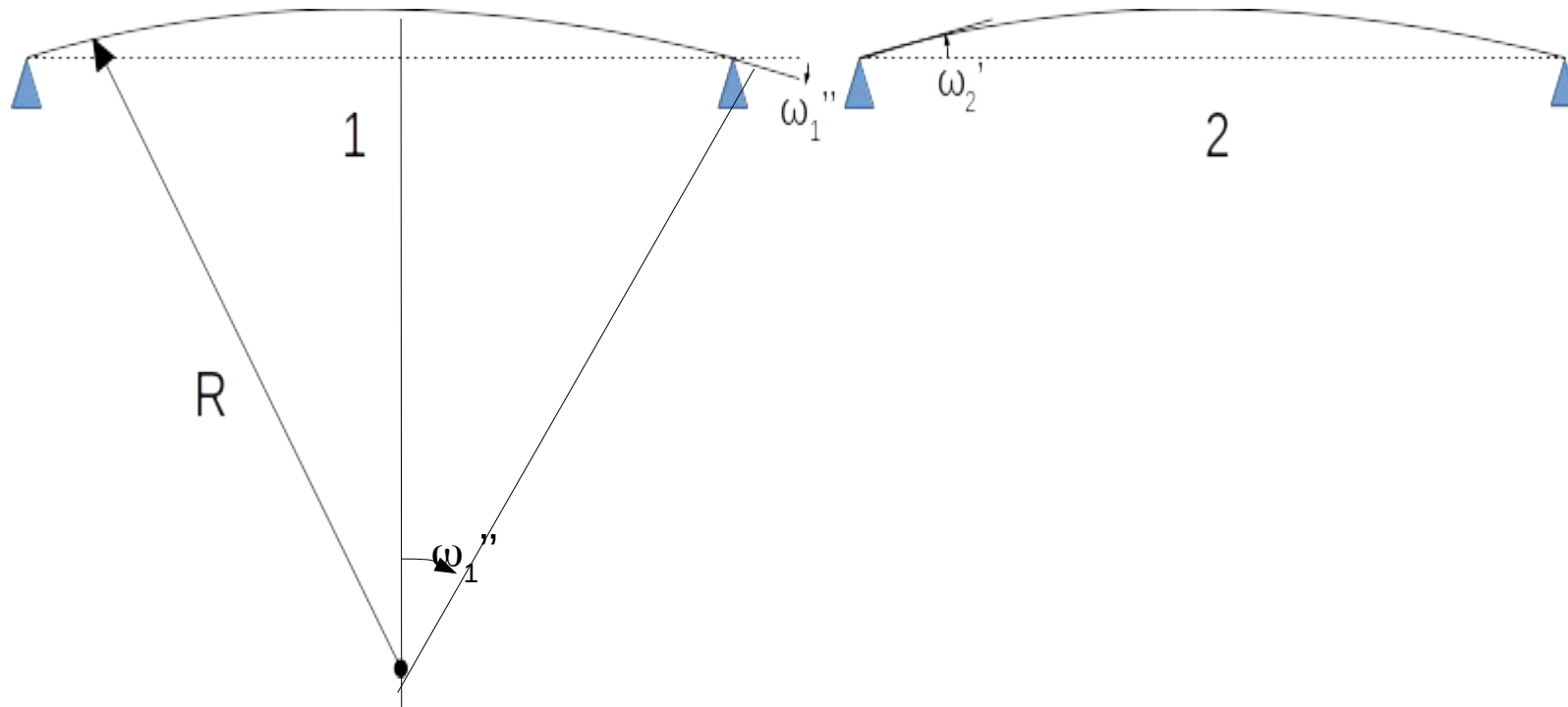
$$\chi = -k \frac{\Delta\theta}{h} = \frac{1}{R}$$



Calculer  $\omega_1''$  et  $\omega_2'$  puis le moment hyperstatique induit

$$\omega_1'' = \frac{1}{R} \times \frac{L}{2} = \chi \times \frac{L}{2} = \frac{-k \Delta \theta L}{h} \frac{L}{2}$$

$$\omega_2' = \frac{k \Delta \theta L}{h} \frac{L}{2}$$



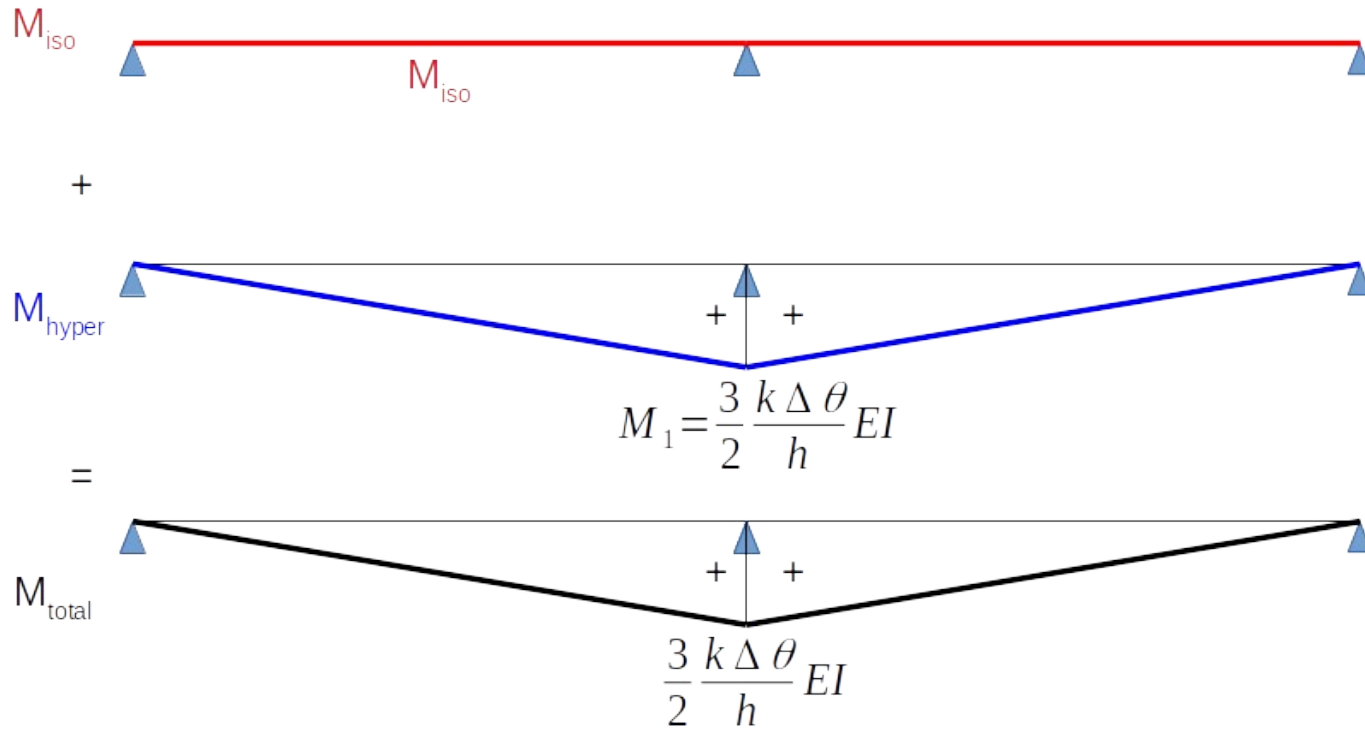
Puis utilisation de la formule des 3 moments :

$$b_1 \cancel{M_0} + (c_1 + a_2) M_1 + b_2 \cancel{M_2} = \omega_2' - \omega_1''$$

$0 \quad \frac{2L}{3EI} \quad 0 \quad 0 \quad \frac{k \Delta \theta L}{h} L$

$M_1 = \frac{3}{2} \frac{k \Delta \theta}{h} EI$

# Bilan des moments :



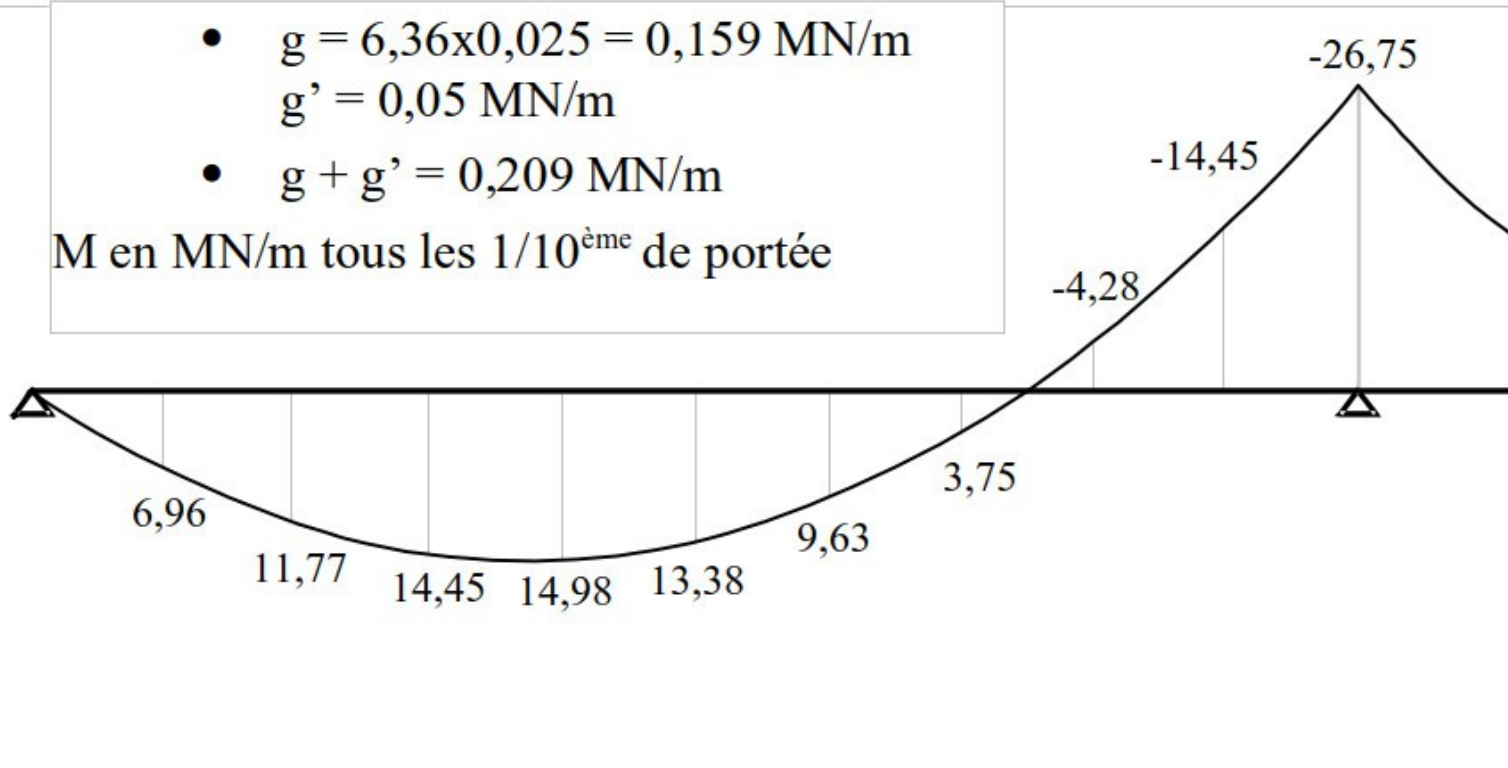
Moment iso nul  
(on impose une déformation)

### 1-3 : Combinaisons et enveloppes

#### Moments sous charges permanentes

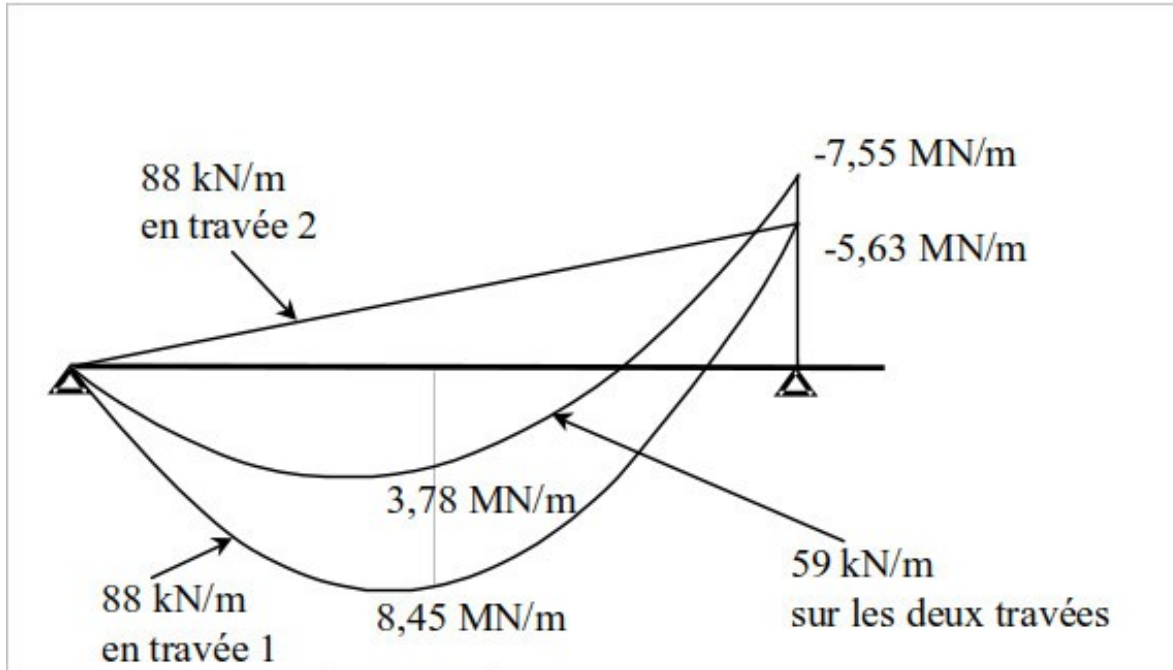
- $g = 6,36 \times 0,025 = 0,159 \text{ MN/m}$   
 $g' = 0,05 \text{ MN/m}$
- $g + g' = 0,209 \text{ MN/m}$

M en MN/m tous les  $1/10^{\text{ème}}$  de portée

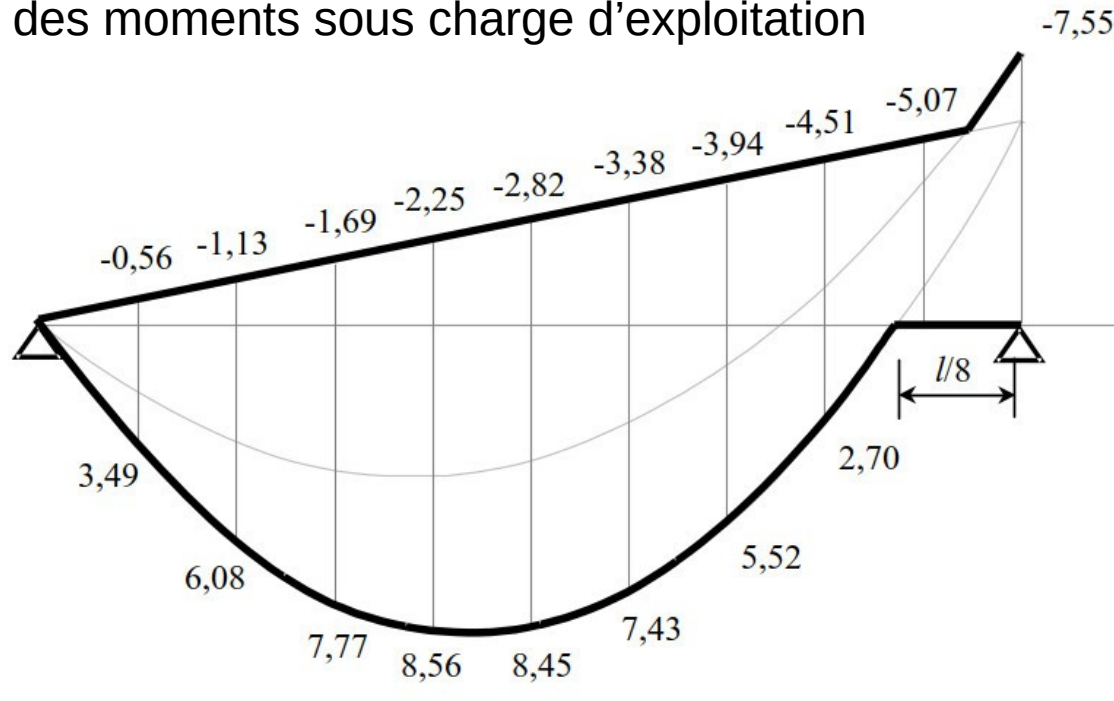


# 1-3 : Combinaisons et enveloppes

## Moments sous charges d'exploitation

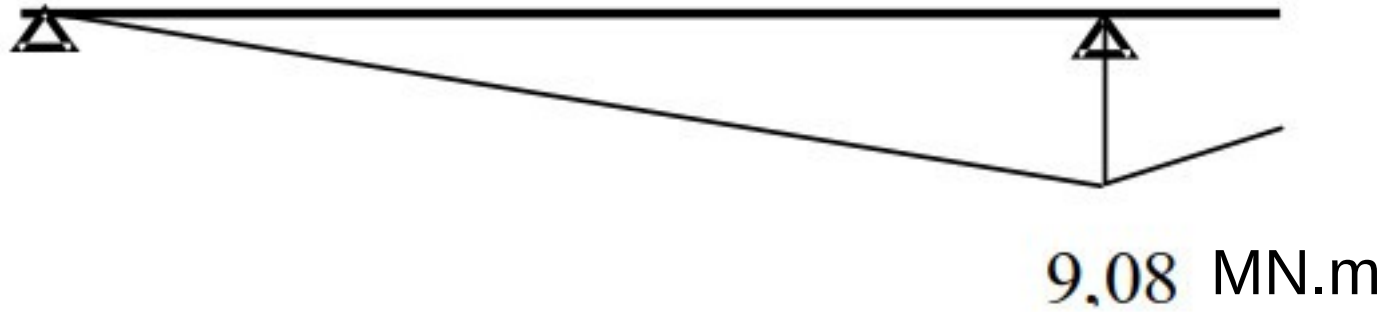


Enveloppe des moments sous charge d'exploitation



### 1-3 : Combinaisons et enveloppes

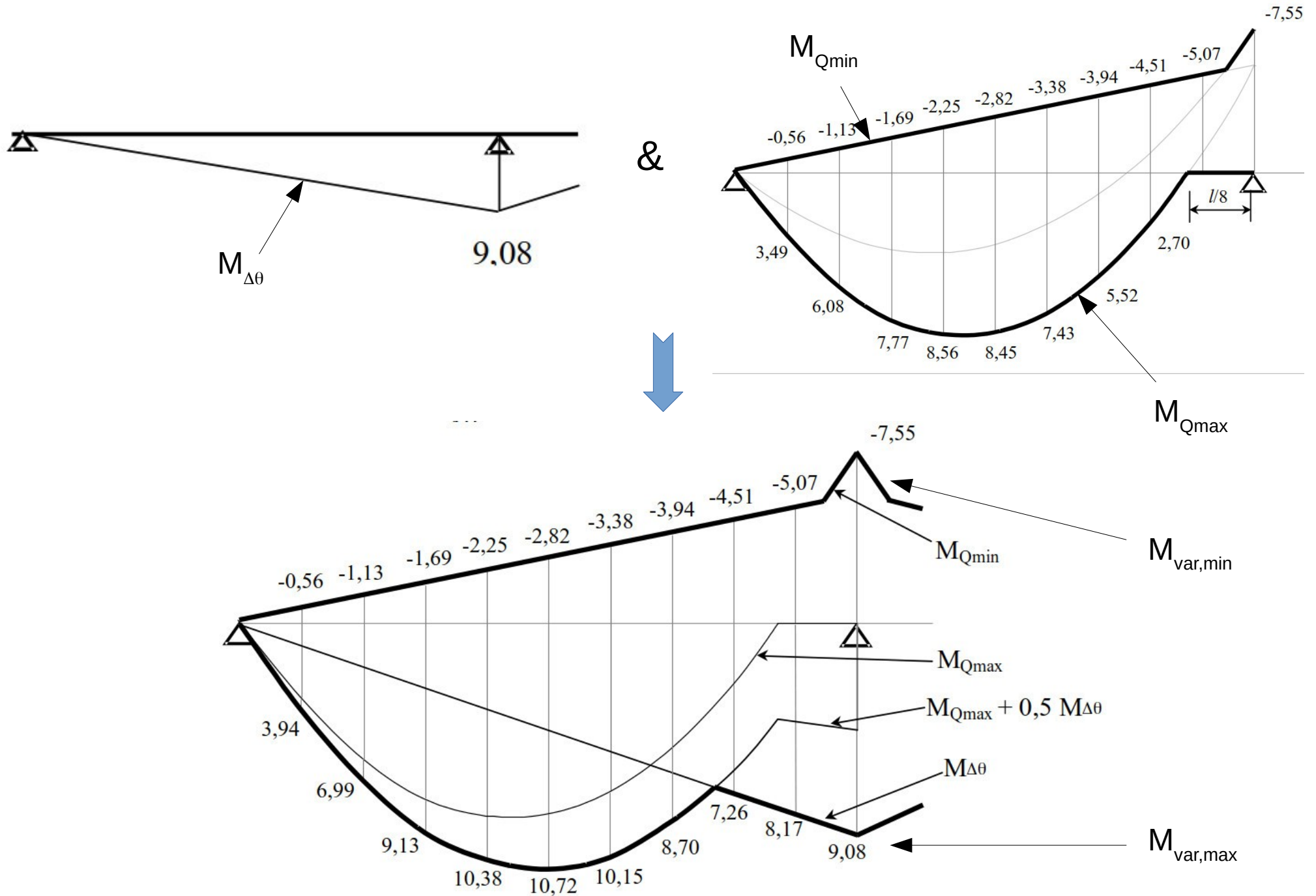
Moments sous gradient thermique avec  $\Delta\theta = 12^\circ\text{C}$  et  $E_{cm} = 34 \text{ GPa}$





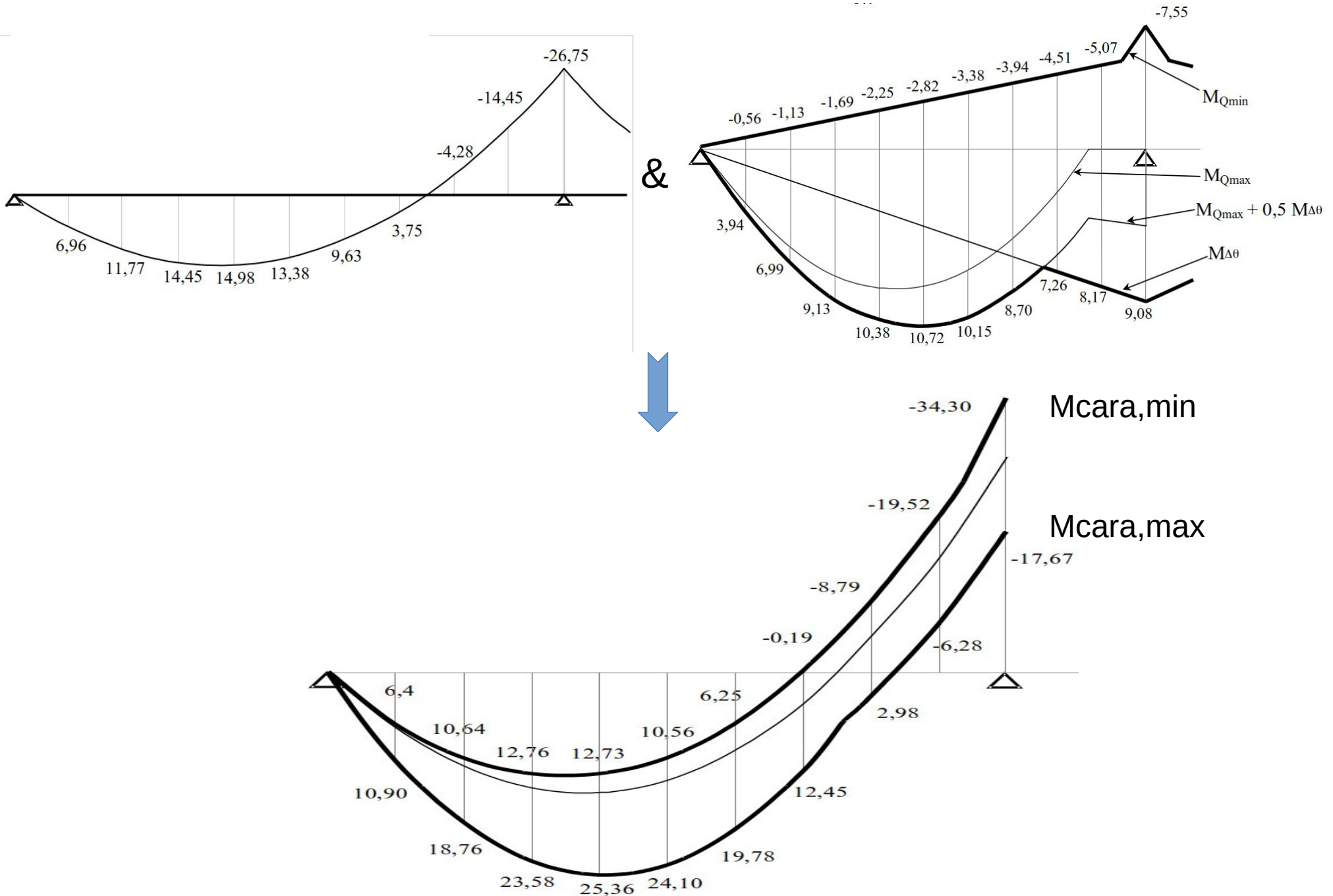
# 1-3 : Combinaisons et enveloppes

## Moments sous charges variables (charges d'exploitation et gradient thermique)



# 1-3 : Combinaisons et enveloppes

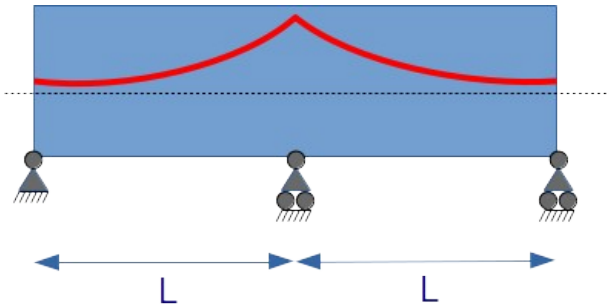
Moments sous ELS cara (charges permanentes + charges variables)



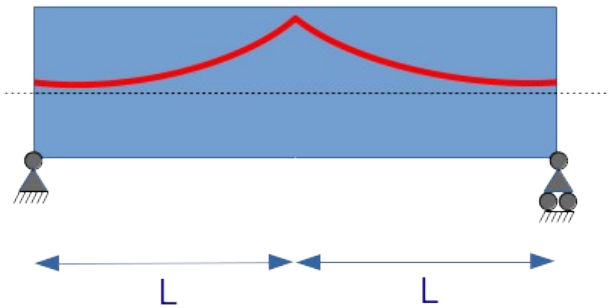
## 2 : Théorie

Une ligne de précontrainte constitue un tracé concordant, c'est à dire qui ne développe pas d'effets hyperstatiques

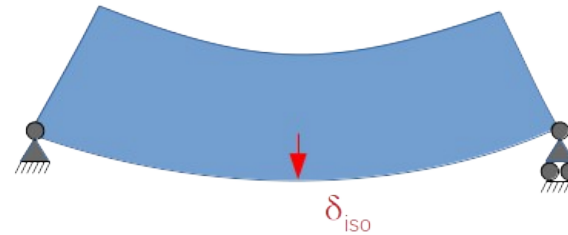
Démo :



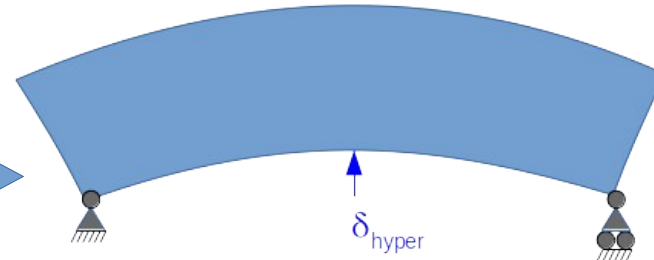
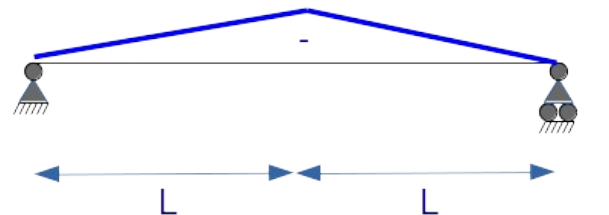
Structure iso



Miso = P e0



Mhyper

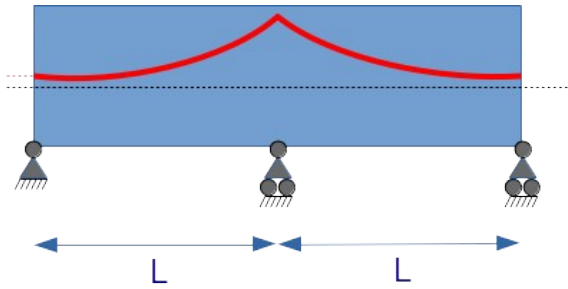


Sous  $P.e_{00} = P.e_0 + M_{hyper}$ , on obtient  $\delta_{iso} + \delta_{hyper} = 0 \rightarrow$  pas d'effet hyperstatique

## 2 : Théorie

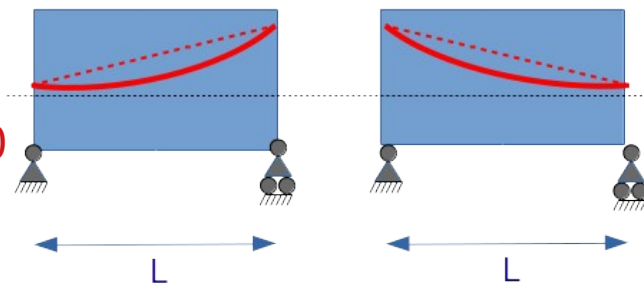
Une ligne de précontrainte constitue un tracé concordant, c'est à dire qui ne développe pas d'effets hyperstatiques

Démo (th des 3 moments):



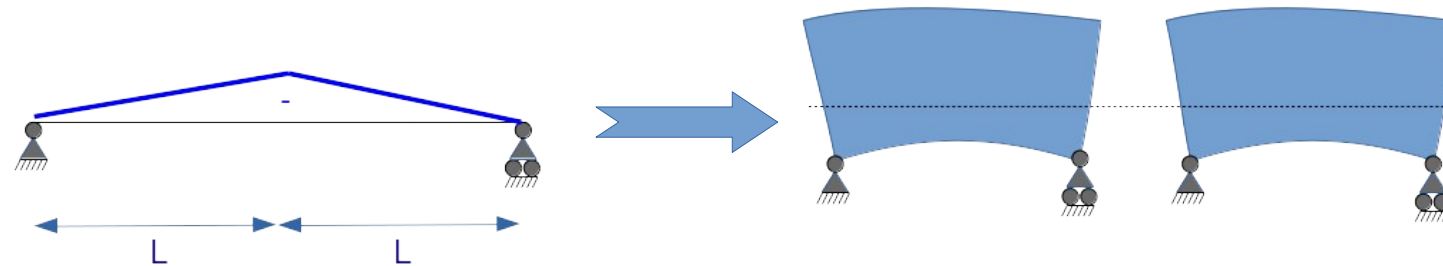
$$\Delta\omega = \omega'' - \omega' \quad (\text{ouverture angulaire})$$

Structure iso



$$\Delta\omega_{iso} > 0$$

Miso = P e<sub>0</sub>

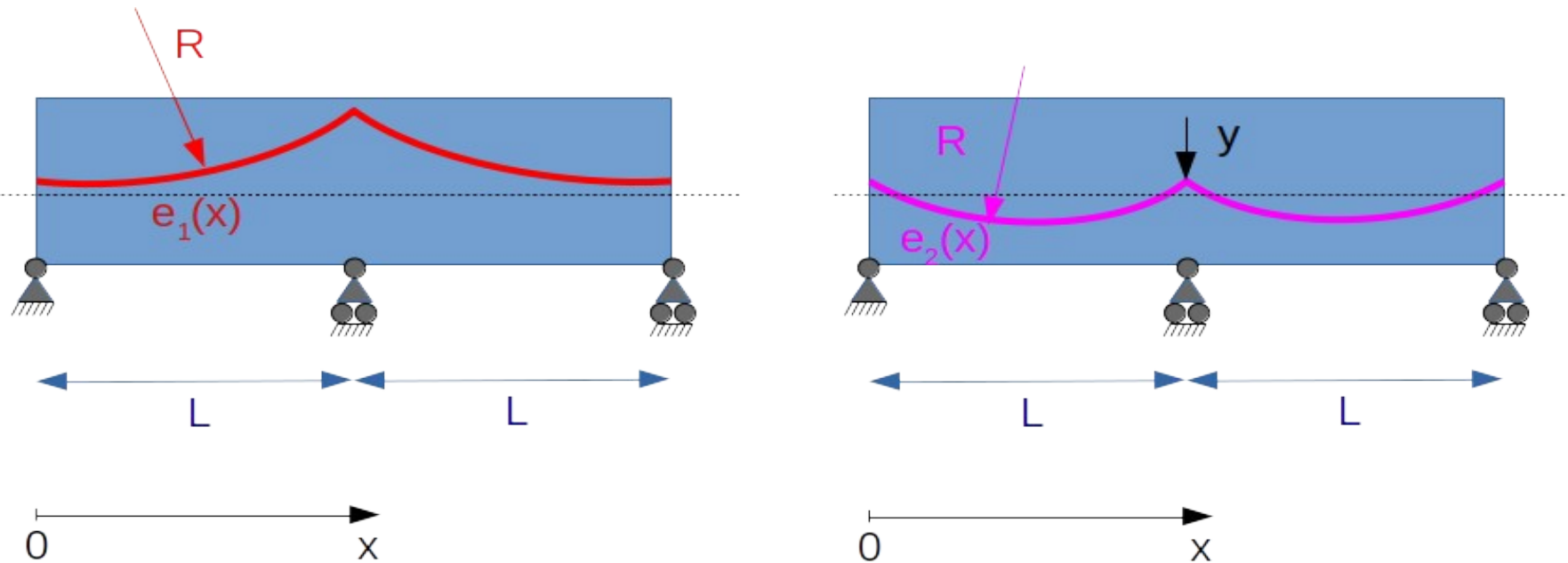


$$\Delta\omega_{hyper} < 0$$

Sous  $P.e_{00} = P.e_0 + M_{hyper}$ , on obtient  $\Delta\omega_{iso} + \Delta\omega_{hyper} = 0 \rightarrow$  pas d'effet hyperstatique

## 2 : Théorie

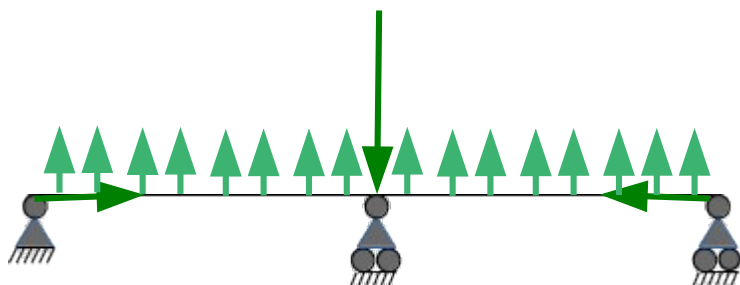
Un tracé peut être défini à une transformée linéaire près



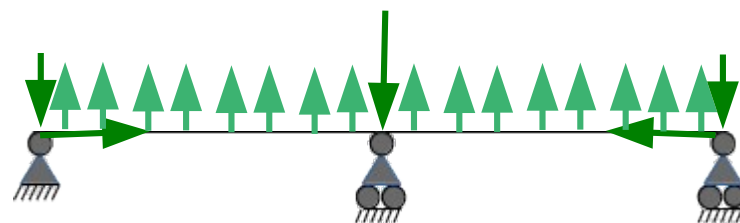
$$e_2(x) = e_1(x) + y \frac{x}{L} \quad (\text{équation sur la première travée})$$

Les deux tracés ont le même effet, c'est à dire conduisent au même moment total ou à la même ligne de précontrainte.

Démo (voir exercice 3 séance 1, ou démo immédiate avec méthode externe) :



Efforts externes avec tracé  $e_1$



Efforts externes avec tracé  $e_2$

### 3 : Etude en précontrainte totale

#### **Hypothèses :**

- on impose partout  $\sigma \geq 0$  en ELS caractéristique
- on travaille avec  $P_m$  (précontrainte moyenne à l'infini, toutes pertes effectuées)
- on ne s'occupe pas des phases de construction

#### **Cas de la précontrainte centrée :**

dans le cas d'une précontrainte centrée, on a une excentricité de la précontrainte nulle ( $e_0 = 0$ ), donc il n'y a pas de moment isostatique ni de moment hyperstatique généré par la précontrainte.

Calculer  $P$  minimal pour respecter les conditions de traction

Équation en fibre sup :

$$\sigma_{\text{sup}} = \frac{P}{A_C} + M_{\text{min}} \frac{v}{I} \geq 0$$

Qui s'écrit aussi :

$$P \geq -M_{\text{min}} \frac{A_C v}{I} = -\frac{M_{\text{min}}}{\rho v'} \quad \text{avec} \quad \rho = \frac{I}{A_C v v'}$$

Prenant  $M_{\text{min}} = -34,3 \text{ MN.m}$ , on obtient  **$P \geq 48 \text{ MN}$**

Avec le même raisonnement en fibre inférieure et en prenant  $M_{\text{max}} = 25,36 \text{ MN.m}$ , on obtient  **$P \geq 74 \text{ MN}$**

### 3 : Etude en précontrainte totale

#### **Détermination de P avec câble ondulé**

On a 3 valeurs de précontrainte minimale à trouver :

\* P1 : condition d'ouverture du fuseau de traction (// P sous-critique en isostatique)

\* Max (P2, P2') : condition d'existence d'une ligne de précontrainte (tracé concordant) à l'intérieur du fuseau

\* P3 : condition d'existence d'une ligne de précontrainte à l'intérieur du fuseau qui donne après transformation linéaire un tracé de câble respectant les contraintes d'enrobage

#### **3-1 : calcul de P1**

Écrivons les équations de respect des contraintes de traction en fibre supérieure et en fibre inférieure :

en fibre sup : sous  $M_{\min,car}$  que l'on notera  $M_{\min}$

$$\sigma_{\text{sup}} = \frac{P}{A_C} + (P \cdot e_{00} + M_{\min}) \frac{v}{I} \geq 0 \Leftrightarrow -\rho v' - \frac{M_{\min}}{P} \leq e_{00}$$

en fibre inf : sous  $M_{\max,car}$  que l'on notera  $M_{\max}$

$$\sigma_{\text{inf}} = \frac{P}{A_C} - (P \cdot e_{00} + M_{\max}) \frac{v'}{I} \geq 0 \Leftrightarrow e_{00} \leq \rho v - \frac{M_{\max}}{P}$$

$$e_{\min} = -\rho v' - \frac{M_{\min}}{P} \leq e_{00} \leq \rho v - \frac{M_{\max}}{P} = e_{\max}$$

### **3-1 : calcul de P1**

Cette relation doit être valable à chaque abscisse (respect des contraintes de traction partout). On peut donc l'écrire :

$$e_{min}(x) = -\rho v' - \frac{M_{min}(x)}{P} \leq e_{00}(x) \leq \rho v - \frac{M_{max}(x)}{P} = e_{max}(x)$$

Pour avoir une solution, il faut que :

$$e_{min}(x) \leq e_{max}(x) \text{ pour tout } x$$

$$\Leftrightarrow P \geq \frac{M_{max}(x) - M_{min}(x)}{\rho v' + \rho v} = \frac{M_{max}(x) - M_{min}(x)}{\rho h} = P_I$$

Application numérique :

Sur l'appui central, où la différence de moment est maximal, on trouve

$$P_I = \frac{-17,67 + 34,30}{0,439 \times 2,4} = 15,8 \text{ MN}$$



### 3-2 : calcul de P2 et P2'

$e_{00}$  étant une ligne de précontrainte, son tracé doit être concordant, c'est à dire qu'il ne doit pas générer d'effets hyperstatiques

Dans notre cas, on ne doit pas avoir de cassure angulaire  $\Delta\omega$  due à l'effet de  $P.e_{00}$  si l'on sépare les deux travées 1 et 2, soit :

$$\omega_2' = \omega_1'' \quad \Leftrightarrow \omega_1'' - \omega_2' = 0$$

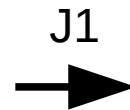
$$\Leftrightarrow \int_0^{L_1} \frac{P \cdot e_{00}(x)}{EI} \frac{x}{L_1} dx + \int_0^{L_2} \frac{P \cdot e_{00}(x)}{EI} \left(1 - \frac{x}{L_2}\right) dx = 0$$

P étant supposé non nulle, on peut réécrire l'équation précédente sous la forme :

$$J_1(e_{00}) = \frac{\omega_1'' - \omega_2'}{P} = \int_0^{L_1} \frac{e_{00}(x)}{EI} \frac{x}{L_1} dx + \int_0^{L_2} \frac{e_{00}(x)}{EI} \left(1 - \frac{x}{L_2}\right) dx = 0$$

où  $J_1$  est une fonction :

Tracé de précontrainte  
 $e(x)$



$J_1$

Réel  
(proportionnel à ouv angulaire  $\Delta\omega$ )

$J_1$  a deux propriétés sympathiques :

\* c'est une fonction croissante : si  $e_A(x) \leq e_B(x)$  pour tout  $x$ , alors  $J_1(e_A) \leq J_1(e_B)$

\* c'est une fonction linéaire  $J_1(\lambda e_A + e_B) = \lambda J_1(e_A) + J_1(e_B)$

### 3-2 : calcul de P2 et P2'

Sachant que  $e_{00}$  est compris entre  $e_{min}$  et  $e_{max}$  (pour les respect des conditions en traction) et que  $J_1(e_{00})=0$  on peut déduire :

$$\begin{array}{l} e_{min} \leq e_{00} \leq e_{max} \\ J_1(e_{00})=0 \end{array} \Rightarrow J_1(e_{min}) \leq J_1(e_{00})=0 \quad \text{et} \quad 0=J_1(e_{00}) \leq J_1(e_{max})$$

Puis en utilisant le fait que  $J_1$  est une fonction linéaire:

$$J_1(e_{min}) \leq 0$$

$$\Leftrightarrow J_1\left(-\rho v' - \frac{M_{min}}{P}\right) \leq 0$$

$$\Leftrightarrow -J_1(\rho v') - \frac{J_1(M_{min})}{P} \leq 0$$

$$\Leftrightarrow P \geq \frac{-J_1(M_{min})}{J_1(\rho v')} = P_{II}'$$

$$J_1(e_{max}) \geq 0$$

$$\Leftrightarrow J_1\left(\rho v - \frac{M_{max}}{P}\right) \geq 0$$

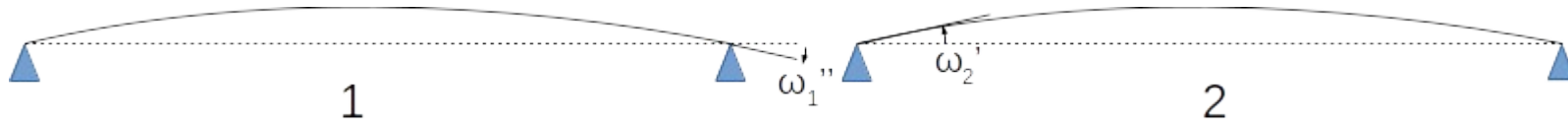
$$\Leftrightarrow J_1(\rho v) \geq \frac{J_1(M_{max})}{P}$$

$$\Leftrightarrow P \geq \frac{J_1(M_{max})}{J_1(\rho v)} = P_{II}$$

### 3-2 : calcul de P2 et P2'

Utilisant que la structure et le câble sont symétriques, on peut simplifier l'expression de J1:

On a effet  $\omega_2' = -\omega_1''$



d'où

$$J_1(e) = \frac{\omega_1'' - \omega_2'}{P} = 2 \frac{\omega_1''}{P} = 2 \int_0^L \frac{e(x)}{EI} \frac{x}{L} dx$$

Dans notre cas, EI est constant, donc on peut mettre ce terme en facteur :

$$J_1(e) = \frac{2}{EI} \int_0^L e(x) \frac{x}{L} dx$$

Le facteur 2/EI peut être omis car au final, J1 doit être nul. On peut donc travailler avec la fonction J1 « simplifiée » :

$$J_1(e) = \int_0^L e(x) \frac{x}{L} dx$$

J1 sera noté J par la suite...

### 3-2 : calcul de P2 et P2'

$$J(e) = \int_0^L e(x) \frac{x}{l} dx$$

Revenons au calcul de P2 et P2' :

$$P_{II}' = \frac{-J(M_{min})}{J(\rho v')}$$

$$P_{II} = \frac{J(M_{max})}{J(\rho v)}$$

Les termes  $J_1(\rho v')$  et  $J_1(\rho v)$  sont de la forme  $J_1(cte)$  calculable facilement :

$$J_1(cte) = \int_0^L cte \frac{x}{l} dx = cte \times \frac{L}{2}$$

C'est un peu plus compliqué pour  $J(M_{min})$  et  $J(M_{max})$

Décomposons  $M_{min}$  et  $M_{max}$  en une partie provenant des charges permanentes et une partie provenant des charges variables :

$$M_{min} = M_{g+g'} + M_{var,min}$$

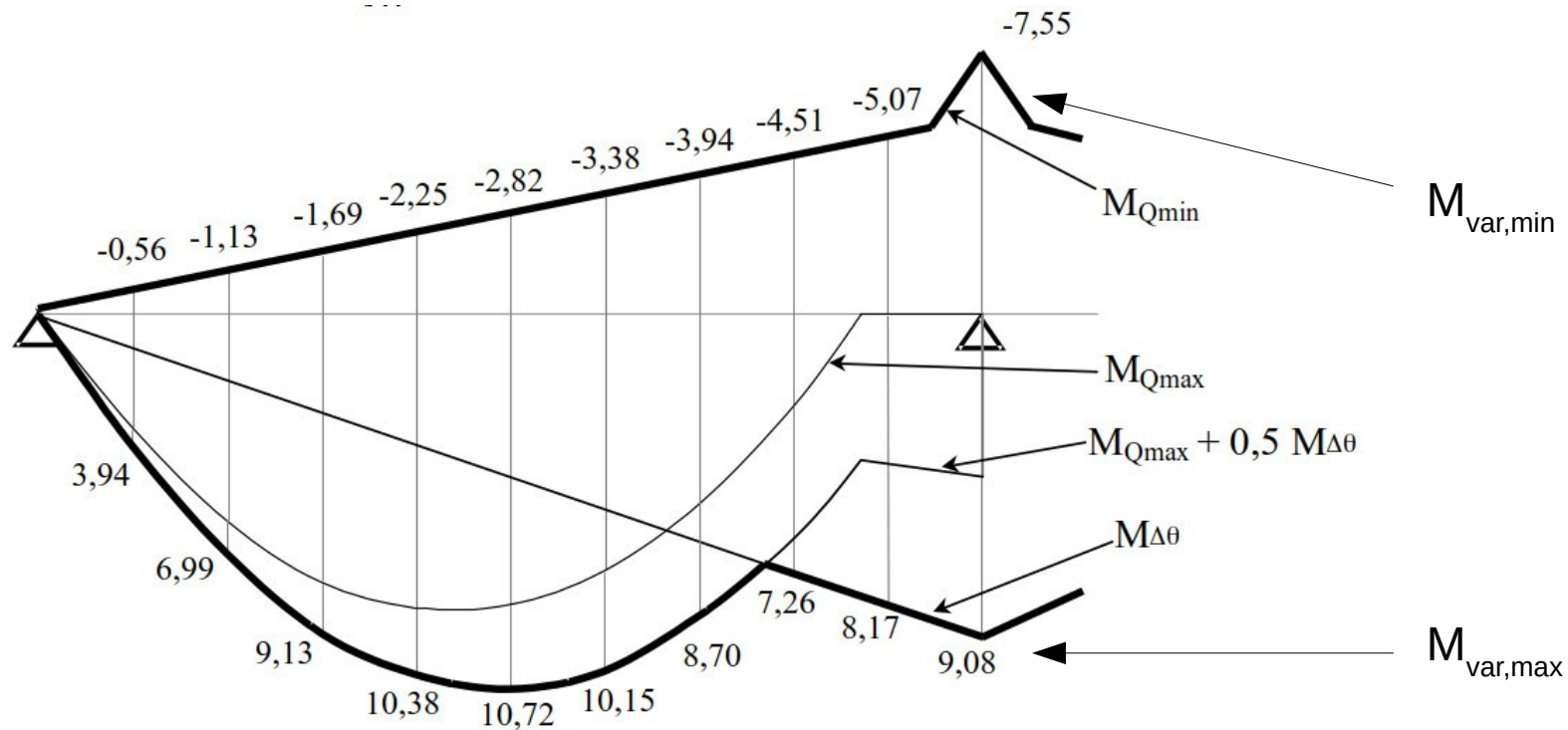
$$M_{max} = M_{g+g'} + M_{var,max}$$

On remarque que  $J(M_{g+g'})$  est nul car  $M_{g+g'}$  contient une partie de moment iso et le moment hyperstatique qui annule le déplacement ou l'ouverture angulaire !

### 3-2 : calcul de P2 et P2'

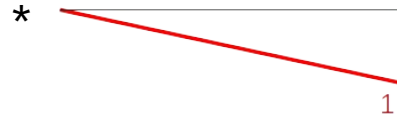
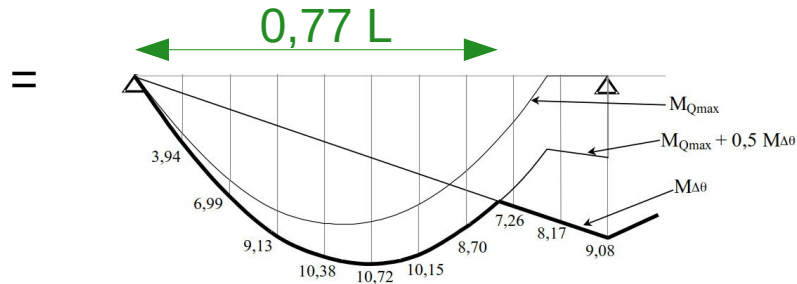
A retenir : tout cas de charge réel développe un moment  $M$  total qui assure la continuité de la poutre ( $J(M) = 0$ , pas de cassure angulaire sur appui), sauf si le cas de charge comporte des déformations imposées (ex : gradient thermique)

Calcul de  $J(M_{var,min})$  et  $J(M_{var,max})$  fastidieux de façon exacte → calcul approché en discrétisant ou bien calcul avec intégrales de Mohr.



### 3-2 : calcul de P2 et P2'

$$J(M_{var,max}) = \int_0^L M_{var,max}(x) \frac{x}{L} dx$$



=

$$= \frac{1}{3} \times L \times 9,08 = \frac{1}{3} \times 32 \times 9,08 = 96,8 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$$

+

$$= \frac{1}{3} \times q_1 \times (0,77 L)^2 \times \frac{1}{8} \times 0,77 \times 0,77 L$$

$$= \frac{1}{24} \times 88 \cdot 10^{-3} \times 0,77^4 \times 32^3 = 42,2 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$$

Parabole d'équation  $-q_1 \frac{x^2}{2} + bx + c$

Vient de travée 1 chargée avec moment de la forme  $q_1 \frac{x(L-x)}{2}$

### 3-2 : calcul de P2 et P2'

Applications numériques :

$$J(M_{var,max}) = 139 \text{ MN.m}^2$$

$$J(M_{var,min}) = -61,5 \text{ MN.m}^2$$

$$J(\rho v) = 5,5 \text{ m}^2$$

$$J(\rho v') = 11,3 \text{ m}^2$$



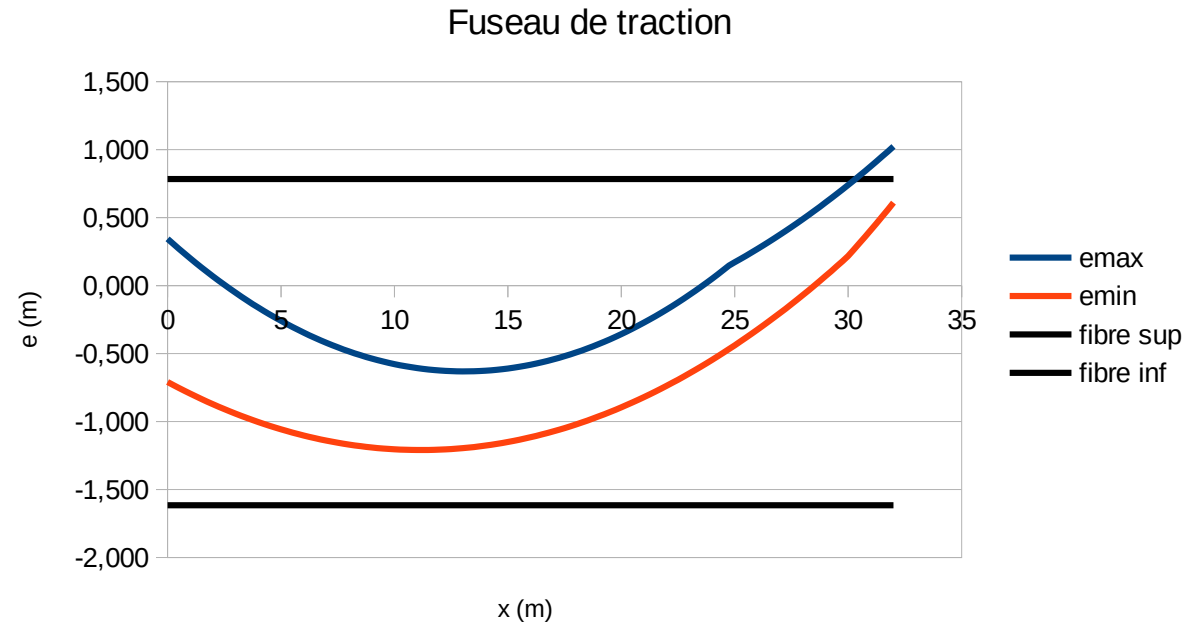
$$P_{II} = \frac{J(M_{max})}{J(\rho v)} = 25,3 \text{ MN}$$

$$P_{II}' = \frac{-J(M_{min})}{J(\rho v')} = 5,4 \text{ MN}$$

### 3-3 : calcul de P3

Si  $P > \max(P1, P2 \text{ et } P2')$ , alors on sait que le fuseau de traction est ouvert et qu'on peut trouver une ligne de précontrainte à l'intérieur. Mais rien ne dit que l'on peut trouver un tracé réel de précontrainte qui respecte les enrobages minimaux.

Fuseau avec  
 $P = 30,4 \text{ MN}$



Un tracé réel peut être obtenu en procédant à une transformation linéaire (ajout d'une fonction linéaire à notre ligne de précontrainte). Ainsi, sur la première travée, le tracé  $e_0$  peut s'écrire :

$$e_0(x) = e_{00}(x) + y \frac{x}{l}$$

Avec  $y$  le décalage entre la ligne de précontrainte et le tracé sur l'appui central.



### 3-3 : calcul de P3

Les points les plus critiques pour le respect de l'enrobage sont :

\* la mi-travée (  $tl=0,4l$  dans notre cas) pour le respect de l'enrobage en fibre inf

$$e_0(0,4l) \geq -v' + d'$$

\* l'appui central pour le respect de l'enrobage en fibre sup.

$$e_0(l) \leq v - d$$

On sait par ailleurs que  $e_{00}(x)$  doit rester dans le fuseau de traction :

$$e_{min}(x) = -\rho v' - \frac{M_{min}(x)}{P} \leq e_{00}(x) \leq \rho v - \frac{M_{max}(x)}{P} = e_{max}(x)$$

En se mettant dans le cas le plus favorable avec :

\* en travée à :  $x = tl = 0,4l$   $e_{00}(tl) = e_{max}(tl) = \rho v - \frac{M_{max}(tl)}{P}$

\* sur appui central  $x = l$   $e_{00}(l) = e_{min}(l) = -\rho v' - \frac{M_{min}(l)}{P}$

### 3-3 : calcul de P3

Les conditions de respect d'enrobage deviennent :

\* en travée :

$$e_{00}(tl) + ty = e_{max}(tl) + ty = \rho v - \frac{M_{max}(tl)}{P} + ty \geq -v' + d'$$
$$\Leftrightarrow ty \geq -(\rho v + v' - d') + \frac{M_{max}(tl)}{P}$$

\* sur appui central

$$e_{00}(l) + y = -\rho v' - \frac{M_{min}(l)}{P} + y \leq v - d$$
$$\Leftrightarrow y \leq \rho v' + v - d + \frac{M_{min}(l)}{P}$$

En utilisant ces deux équations de respect des enrobages, on obtient :

$$-(\rho v + v' - d') + \frac{M_{max}(tl)}{P} \leq ty \leq t(\rho v' + v - d) + \frac{t M_{min}(l)}{P}$$
$$\Leftrightarrow \frac{M_{max}(tl) - t M_{min}(l)}{P} \leq t(\rho v' + v - d) + (\rho v + v' - d') = tK + K'$$

$$\Leftrightarrow P \geq \frac{M_{max}(tl) - t M_{min}(l)}{tK + K'} = P_{III}$$

### 3-3 : calcul de P3

*Application numérique :*

$$M_{max}(t l) = M_{max}(0,4 l) = 25,36 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

$$M_{min}(l) = M_{min}(l) = -34,30 \text{ MN} \cdot \text{m}$$

En prenant  $d = d' = 0,2 \text{ m}$ , on obtient :

$$e_{00}(l) + y = -\rho v' - \frac{M_{min}(l)}{P} + y \leq v - d$$
$$\Leftrightarrow y \leq \rho v' + v - d + \frac{M_{min}(l)}{P}$$

En utilisant ces deux équations de respect des enrobages, on obtient :

$$K = 1,293 \text{ m}$$

$$K' = 1,760 \text{ m}$$

d'où :

$$P_{III} = 17,2 \text{ MN}$$

### 3-4 : choix d'un tracé

P2 est déterminant. La difficulté principale est donc de trouver une ligne de précontrainte à l'intérieur du fuseau de traction.

Nous disposons de câbles 12T15 développant un effort de 1,9 MN au temps infini.

En théorie 14 câbles suffisent (7 câbles dans chaque nervure), mais nous prendrons un peu de marge avec 16 câbles (8 câbles dans chaque nervure) → **P = 30,4 MN**

#### 3-4-1 Ligne de précontrainte théorique

Avec la valeur de P choisie, nous pouvons calculer :

$$J(e_{max}) = J(\rho v) - \frac{J(M_{max})}{P} = 0,93 \text{ m}^2$$
$$J(e_{min}) = -J(\rho v') - \frac{J(M_{min})}{P} = -9,28 \text{ m}^2$$

Une ligne de précontrainte possible est le barycentre de  $e_{min}$  et  $e_{max}$  défini par :

$$e_{00} = \frac{J(e_{max})}{J(e_{max}) - J(e_{min})} e_{min} + \frac{-J(e_{min})}{J(e_{max}) - J(e_{min})} e_{max}$$

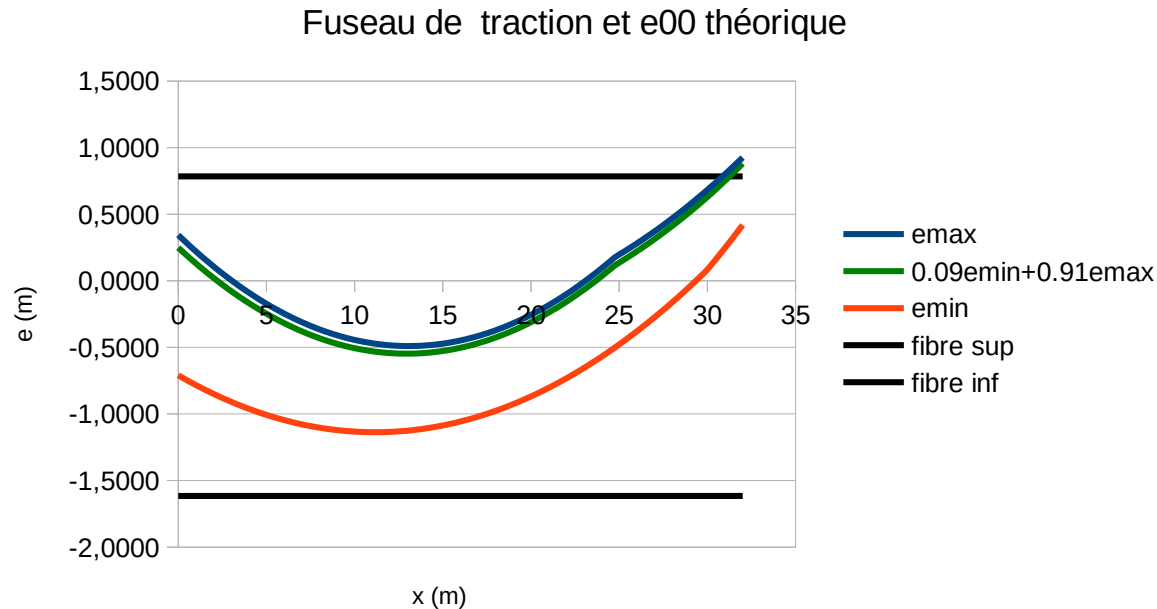
Vérifiant  $e_{min} \leq e_{00} \leq e_{max}$  et  $J(e_{00}) = 0$

Numériquement, on trouve :

$$e_{00} = 0,09 e_{min} + 0,91 e_{max}$$

### 3-4-1 Ligne de précontrainte théorique

Le graphique ci-dessous donne un aperçu de cette ligne de précontrainte théorique :



### 3-4-2 Ligne de précontrainte réelle

\* Respect d'enrobage sur appui central ( $v = 0,784$  m et  $d = 0,16$  m)

→ Transformation linéaire avec  $y = -1$  m par exemple.

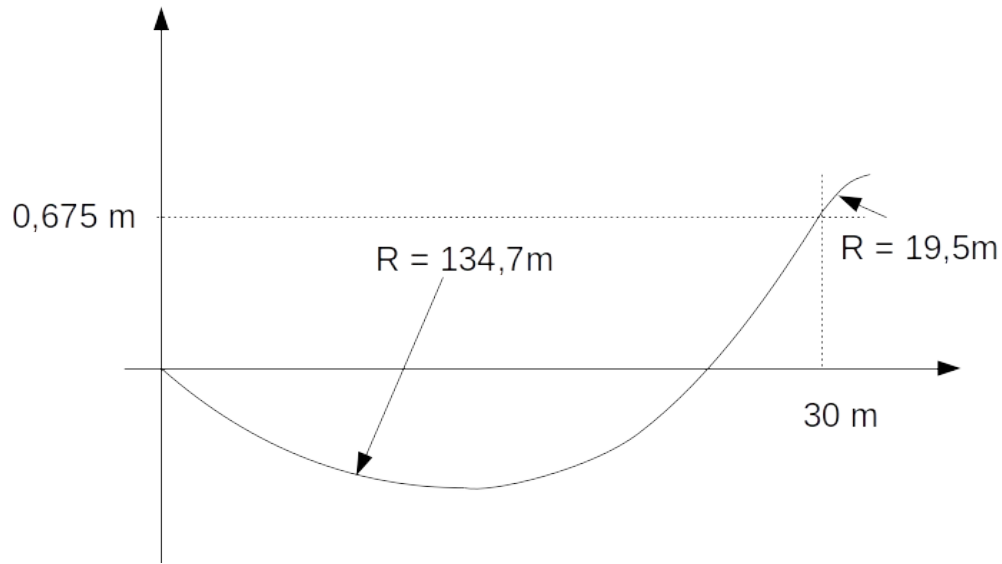
\* Après transformation linéaire, le tracé de précontrainte obtenu ne doit pas présenter de rupture angulaire, y compris sur appui central.

\* Le respect des distances entre axes des ancrages nous impose d'avoir un tracé qui ne passe pas plus haut que le cdg sur l'appui de rive.

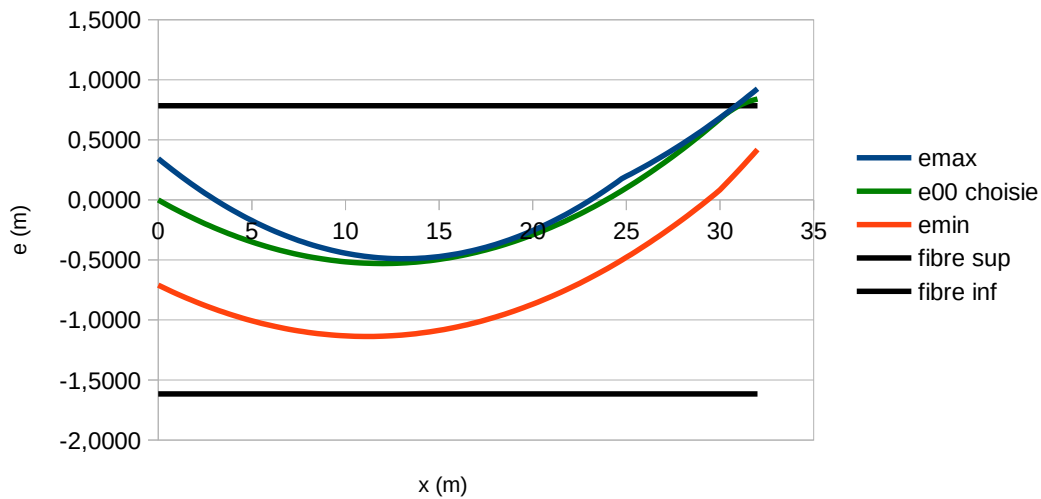
Avec ces contraintes, il nous faut retravailler la forme de  $e_{00}$ , en veillant à rester entre  $e_{min}$  et  $e_{max}$  et à garder  $J(e_{00})=0$ . Ce travail peut être effectué sous Excel.

### 3-4-2 Ligne de précontrainte réelle

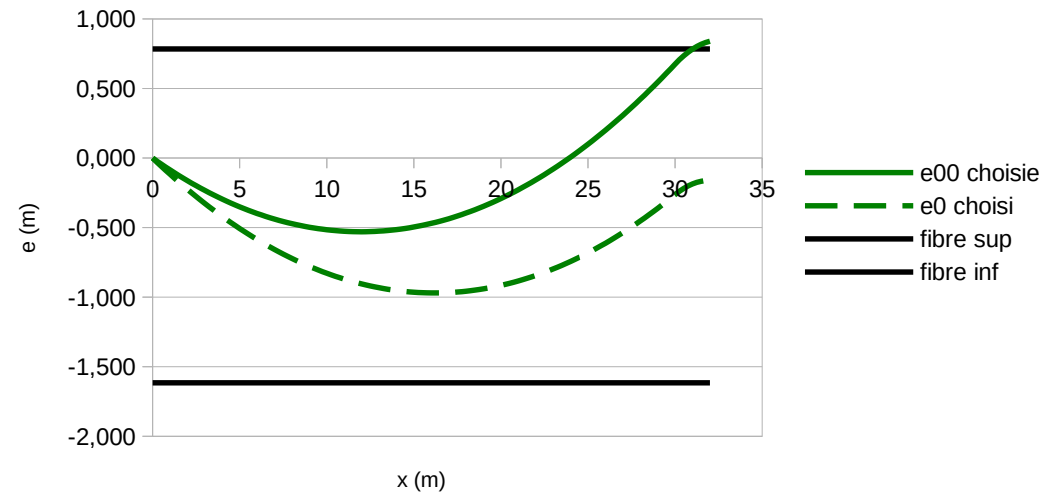
Une ligne de précontrainte possible est la suivante :



Fuseau de traction et e00 choisie



e00 et e0 choisis



#### 4 : Étude en autorisant la traction

La limite de traction à respecter est maintenant :  $\sigma \geq -f_{ctm}$

Les équations de respect des contraintes de traction en fibre sup et fibre inf deviennent :

$$\sigma_{\text{sup}} = \frac{P}{A_C} + (P \cdot e_{00} + M_{\text{min}}) \frac{v}{I} \geq -f_{ctm} = \bar{\sigma}_1$$

$$\sigma_{\text{inf}} = \frac{P}{A_C} - (P \cdot e_{00} + M_{\text{max}}) \frac{v'}{I} \geq -f_{ctm} = \bar{\sigma}_2'$$

L'encadrement de  $e_{00}$  peut maintenant s'écrire :

$$e_{\text{min}} = -\rho v' - \frac{M_{\text{min}}^*}{P} \leq e_{00} \leq \rho v - \frac{M_{\text{max}}^*}{P} = e_{\text{max}}$$

Avec :

$$M_{\text{min}}^* = M_{\text{min}} - \bar{\sigma}_1 \frac{I}{v}$$

$$M_{\text{max}}^* = M_{\text{max}} + \bar{\sigma}_2' \frac{I}{v}$$

### 3 : Étude en autorisant la traction

Le calcul de P1, P2, P2' et P3 est simple et peut se ramener aux expressions obtenues en précontrainte totale

$$P_I = \frac{M_{max}^* - M_{min}^*}{\rho h} = \frac{M_{max} - M_{min}}{\rho h} + \frac{\bar{\sigma}_2^- \frac{I}{v'} + \bar{\sigma}_1 \frac{I}{v}}{\rho h} = 0,5 \text{ MN}$$

$$P_{II} = \frac{J(M_{max}^*)}{J(\rho v)} = \frac{J(M_{max} + \bar{\sigma}_2^- \frac{I}{v'})}{J(\rho v)} = \frac{J(M_{max})}{J(\rho v)} + \bar{\sigma}_2^- A_C = 9,93 \text{ MN}$$

$$P_{II}' = \frac{-J(M_{min}^*)}{J(\rho v')} = \frac{-J(M_{min} - \bar{\sigma}_1 \frac{I}{v})}{J(\rho v')} = \frac{-J(M_{min})}{J(\rho v')} + \bar{\sigma}_1 A_C = -9,71 \text{ MN}$$

$$P_{III} = \frac{M_{max}^*(tl) - t M_{min}^*(l)}{tK + K'} = \frac{M_{max}(tl) - t M_{min}(l)}{tK + K'} + \frac{\bar{\sigma}_2^- \frac{I}{v'} + \bar{\sigma}_1 \frac{I}{v}}{tK + K'} = 12,99 \text{ MN}$$

Le nombre de câbles étant inférieur, nous prenons pour valeur de limite d'enrobage  $d=d'=0,12\text{m}$  pour le calcul de K et K'.

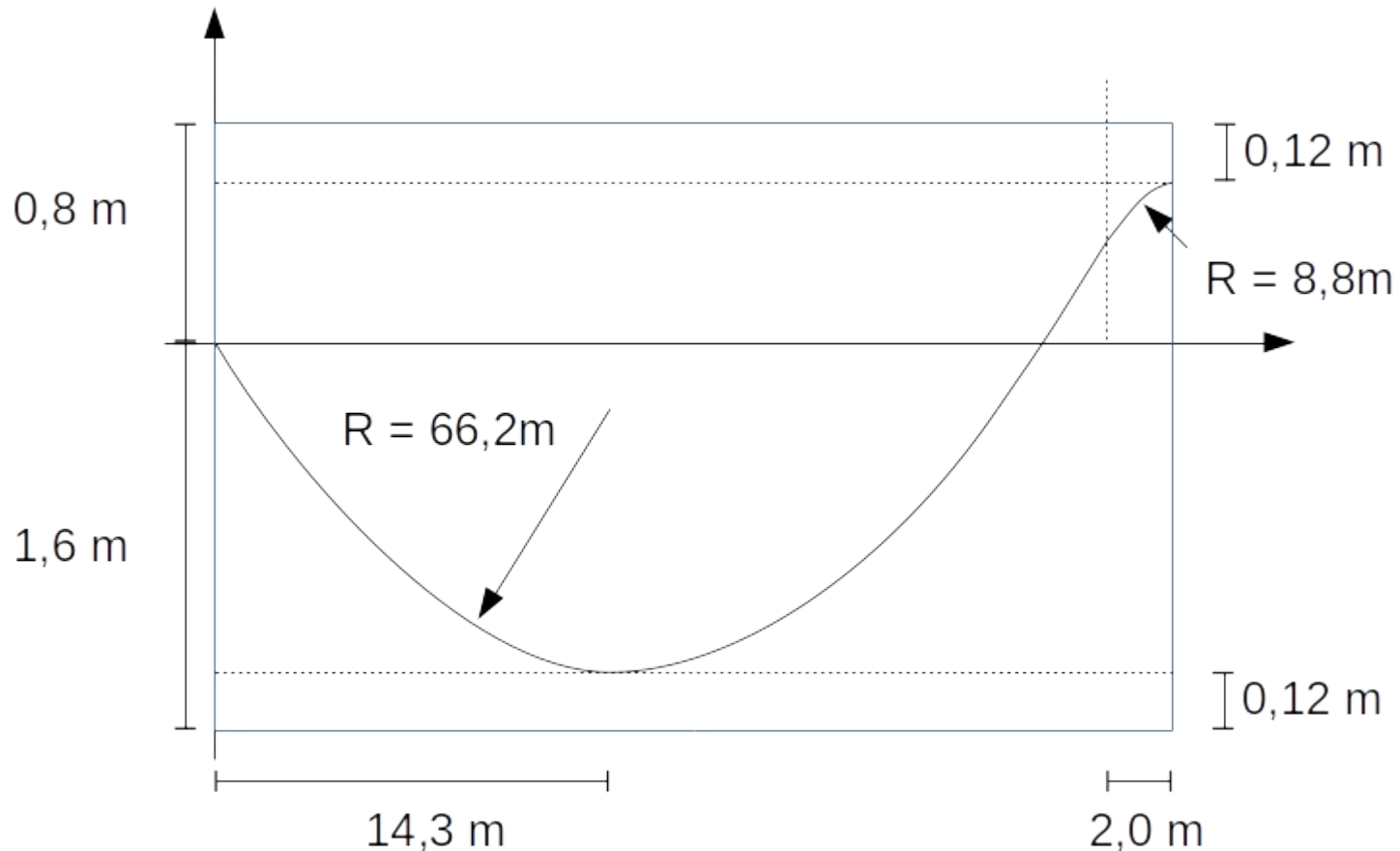


### 3 : Étude en autorisant la traction

Nous choisissons de prendre 8 câbles (4 par nervure) :  $P = 15,2 \text{ MN}$

Dans ce cas,  $P_3$  est déterminant. La principale difficulté consiste à trouver un tracé qui respecte l'enrobage. Nous optons pour un tracé qui passe à la limite de l'enrobage en travée et sur appui central.

Le profil du tracé est le suivant:



### 3 : Étude en autorisant la traction

Lorsqu'on recalcule la ligne de précontrainte  $e_{00}$  et que l'on replace  $e_{\min}$  et  $e_{\max}$ , on trouve le diagramme suivant :

