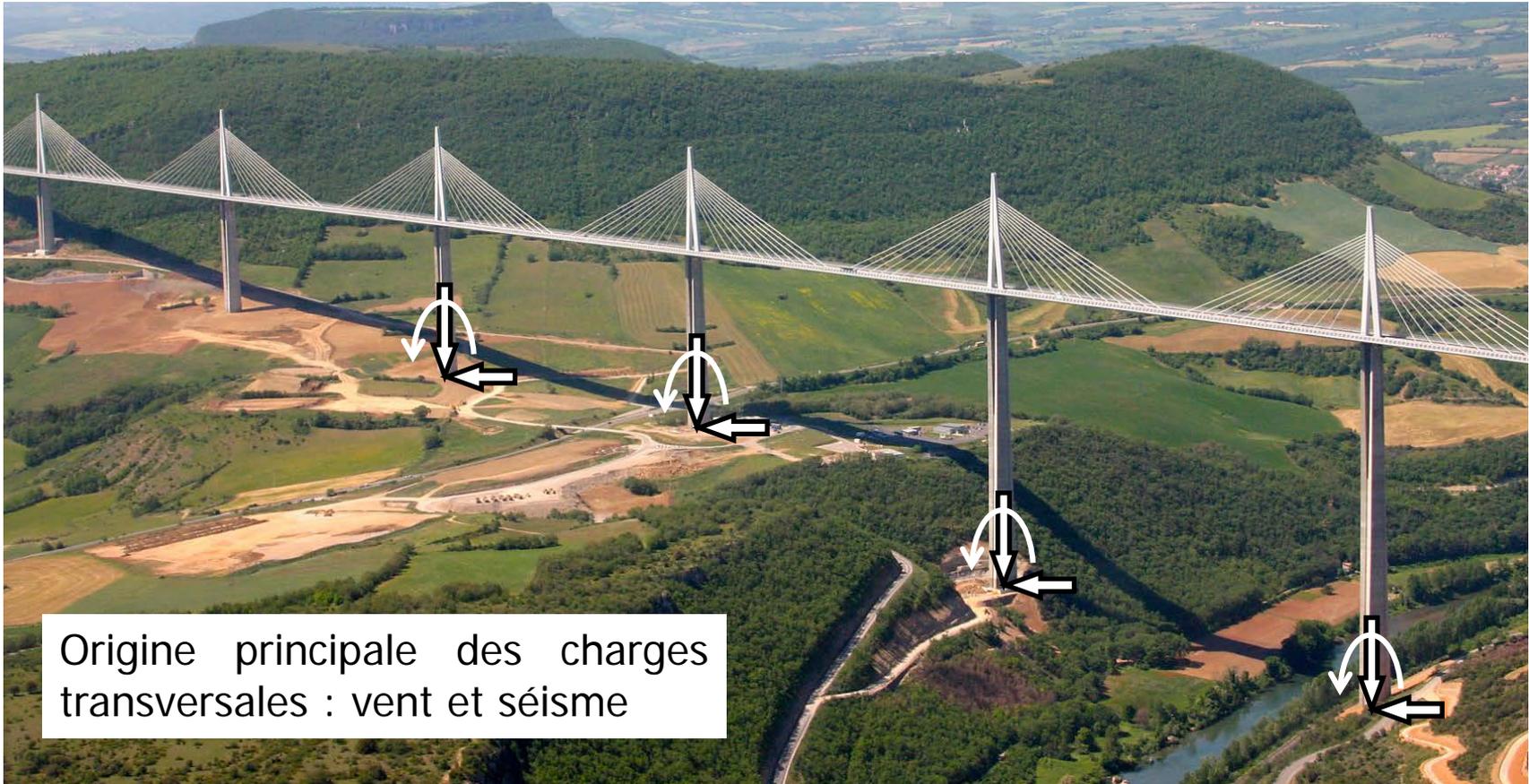


PIECOEF+ : Calcul d'une fondation profonde sous charge transversale en tête ou en profondeur

# Position du problème

⇒ Fondation d'un ouvrage d'art



# Position du problème

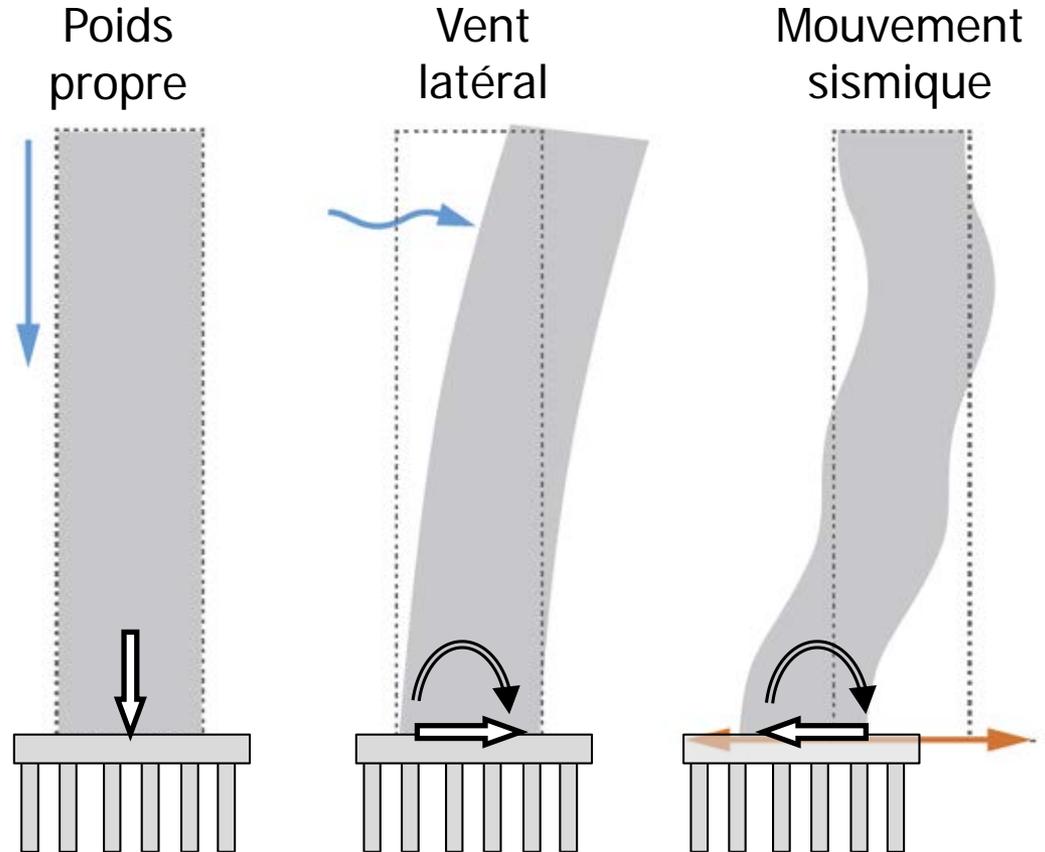
⇒ Fondation d'un ouvrage d'art



Origine principale des charges transversales : freinage et température

# Position du problème

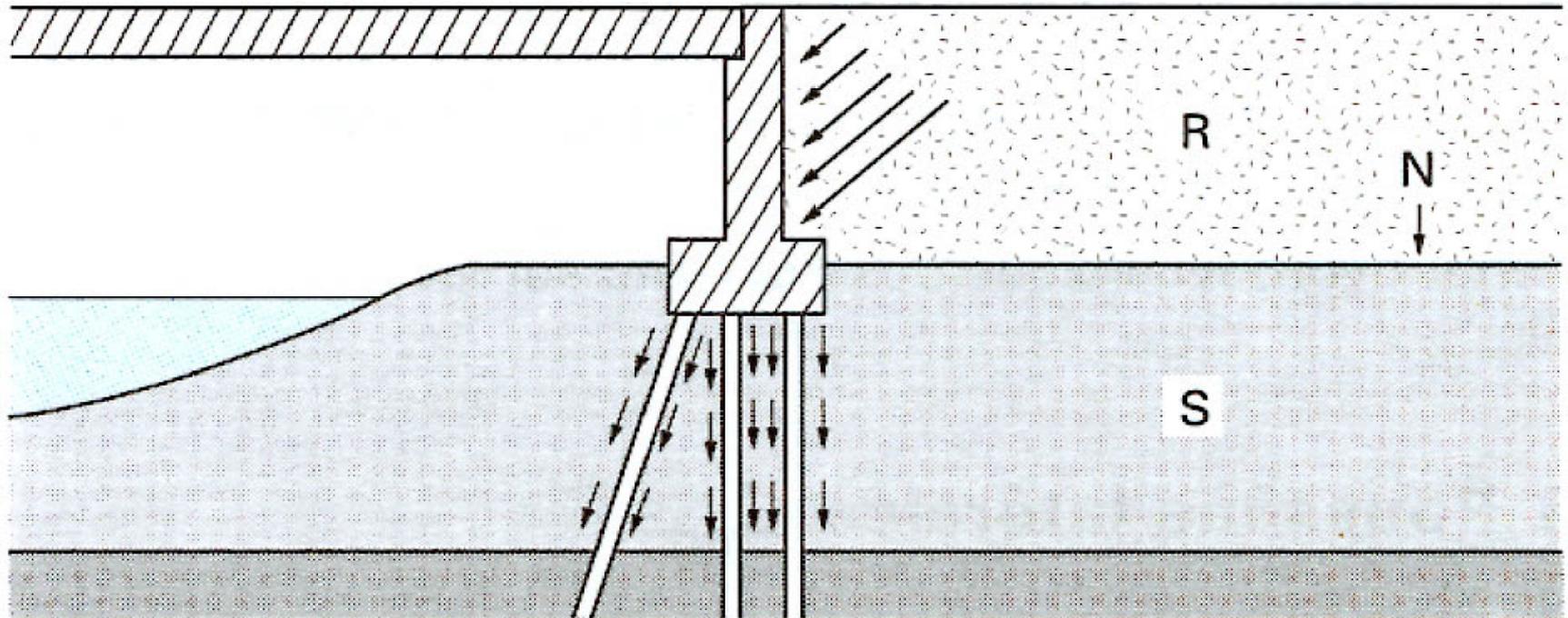
⇒ Fondation d'une tour de grande hauteur



Origine des charges transversales :  
vent latéral et mouvement sismique

# Position du problème

⇒ Fondation d'une culée d'ouvrage d'art soutenant un remblai d'accès

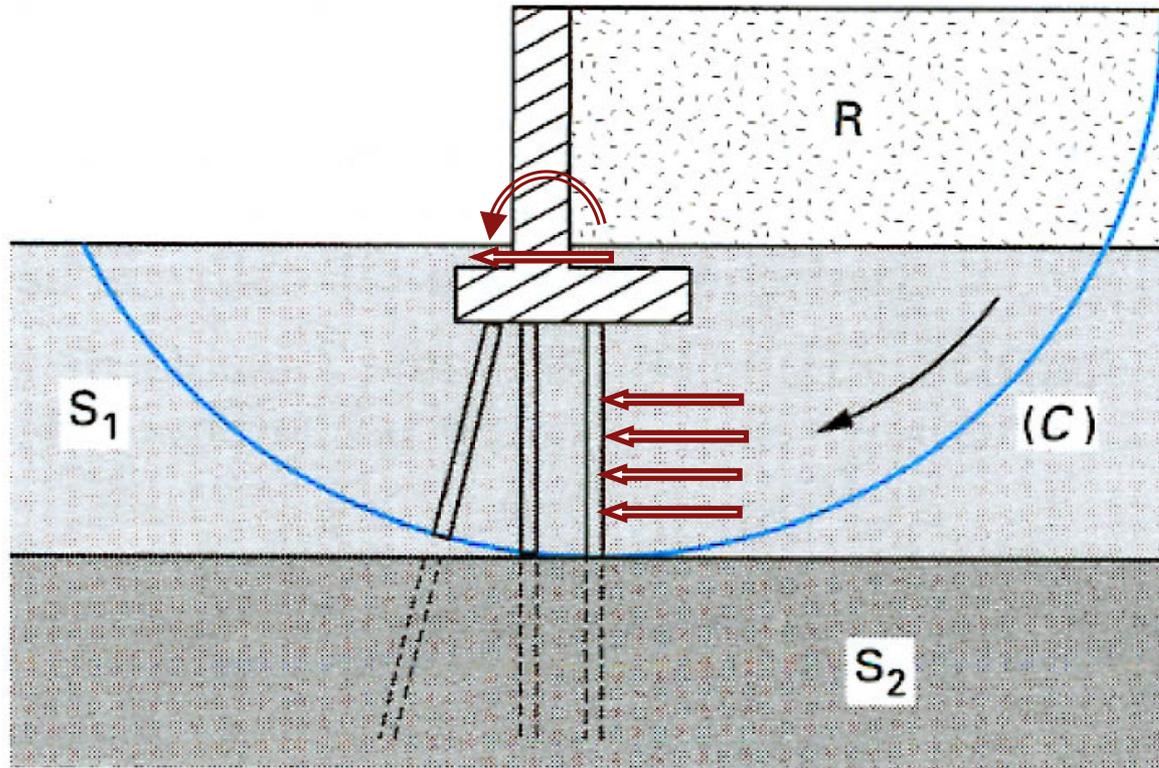


N niveau du terrain naturel  
R remblai

S sol compressible

# Position du problème

⇒ Fondation d'une culée d'ouvrage d'art soutenant un remblai d'accès



R remblai

$S_1$  sol mou compressible

$S_2$  sol compact

# Position du problème

⇒ Bâtiment en interaction avec des opérations de terrassement



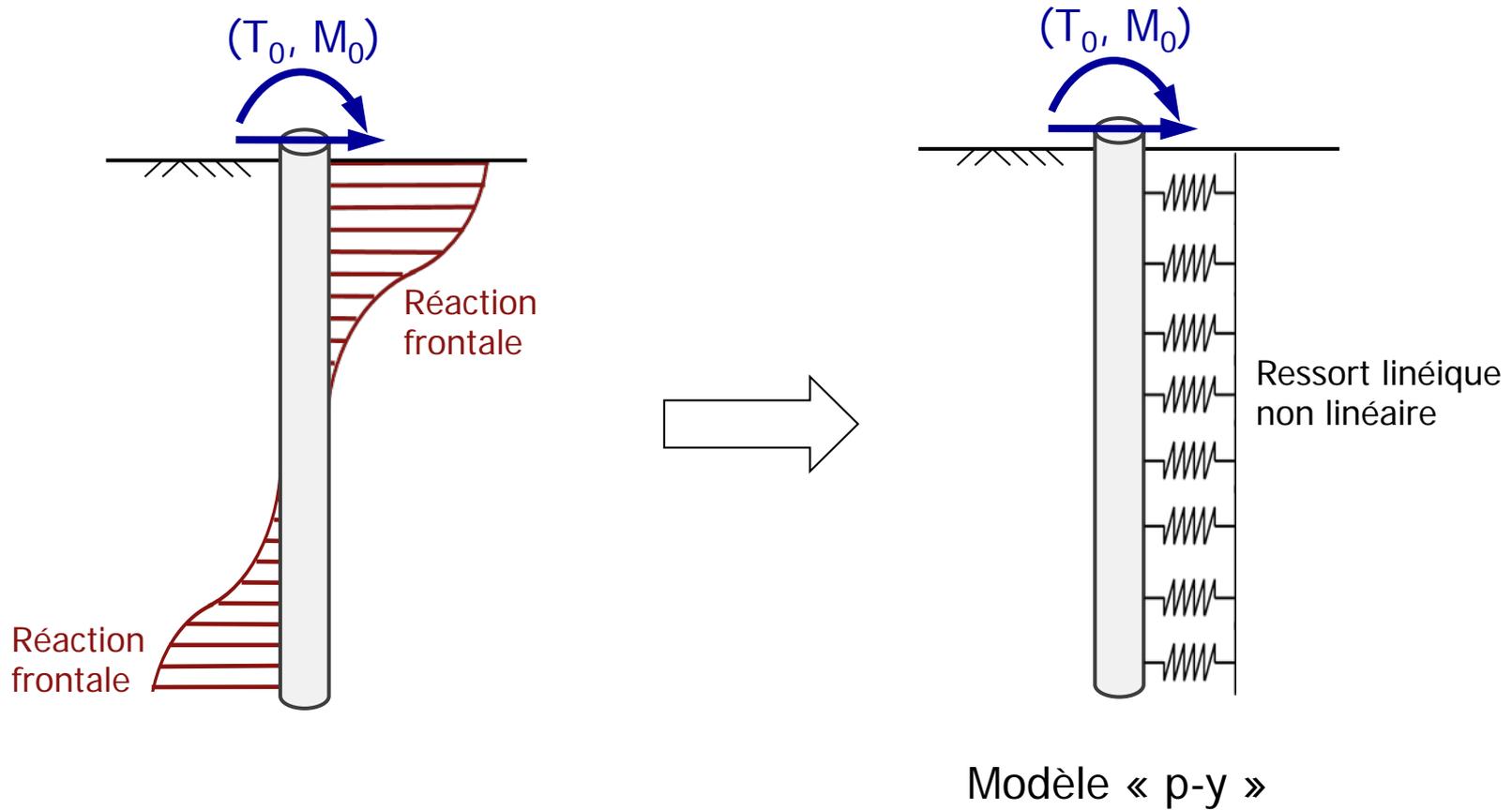
# Position du problème

⇒ Mouvements vibratoires du terrain sous séisme (interaction cinématique)



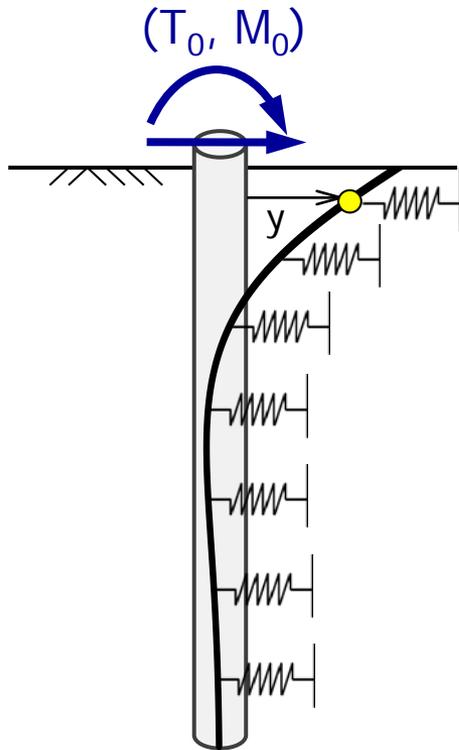
# Principe de modélisation

⇒ Interaction sol/pieu modélisée par une série de ressorts non linéaires

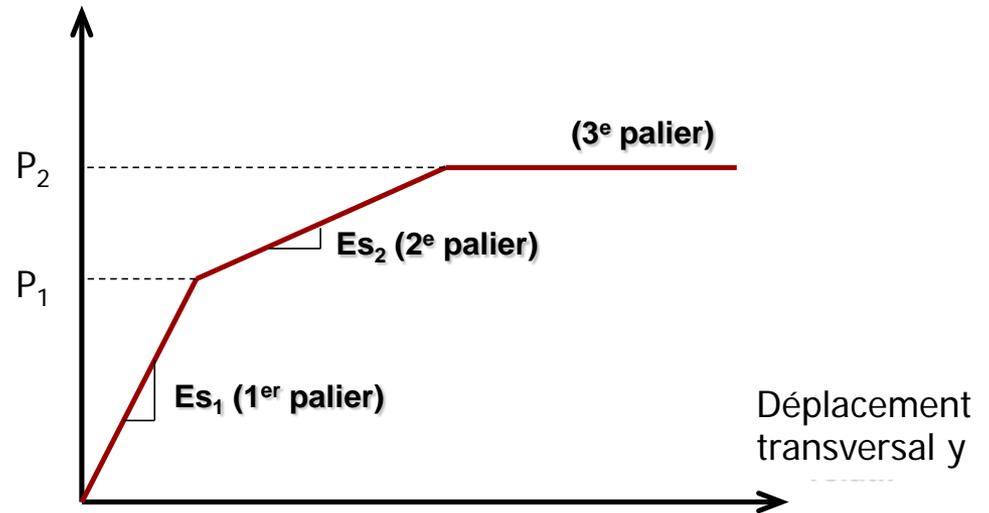


# Principe de modélisation

⇒ Loi de mobilisation de la réaction frontale du terrain

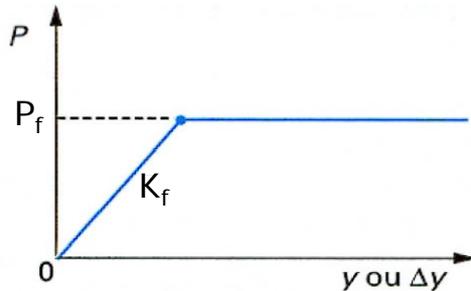


Réaction frontale

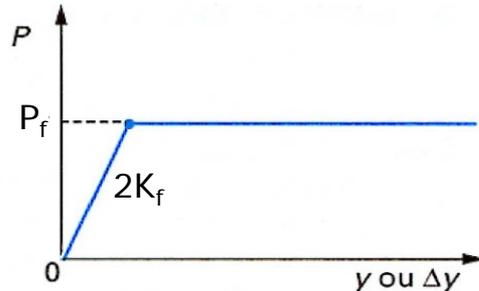


# Principe de modélisation

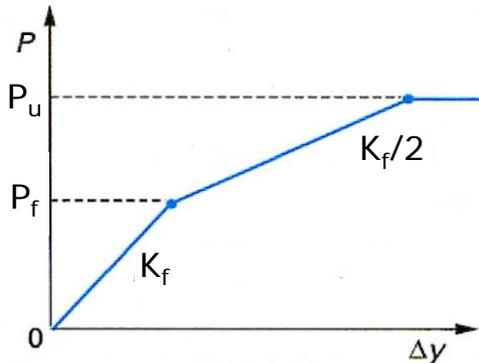
⇒ Loi de mobilisation de la réaction frontale du terrain



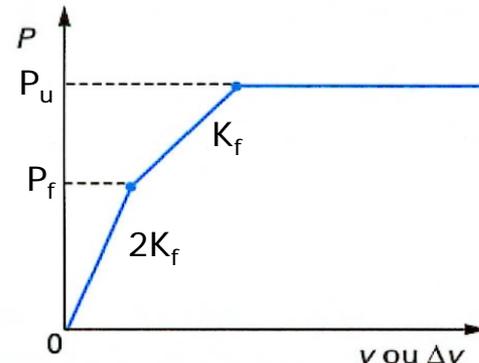
**(a) sollicitations permanentes en tête dominantes**



**(c) sollicitations de courte durée en tête dominantes**



**(b) poussées latérales du sol dominantes**



**(d) sollicitations accidentelles très brèves en tête dominantes**

A partir d'essais in situ (PMT)

$$K_f = E_M \frac{18\rho}{4(2,65\rho)^\alpha + 3\alpha\rho}$$

$$\rho = \max\left(\frac{B}{B_0}; 1\right)$$

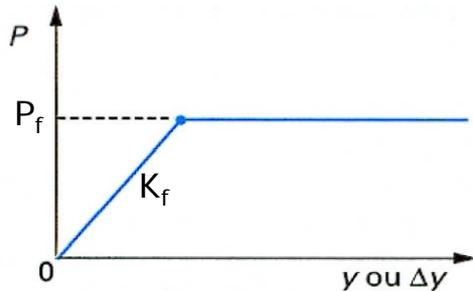
$$P_f = p_f^* B \quad P_u = p_l^* B$$

$K_f$  = module de réaction linéique exprimé en kN/m/m

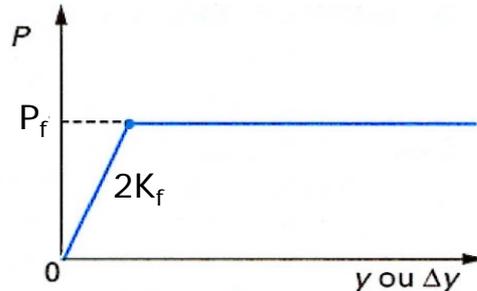
$k_f = K_f/B$  = coefficient de réaction exprimé en kPa/m

# Principe de modélisation

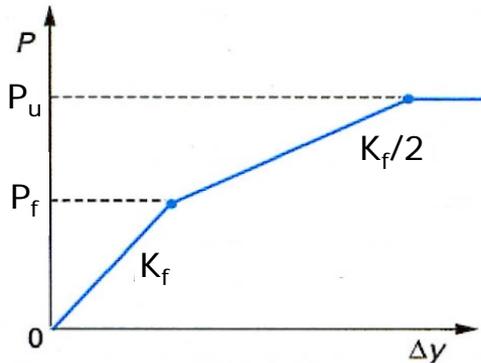
⇒ Loi de mobilisation de la réaction frontale du terrain



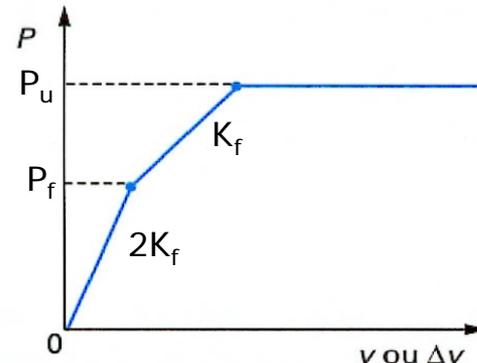
(a) sollicitations permanentes en tête dominantes



(c) sollicitations de courte durée en tête dominantes



(b) poussées latérales du sol dominantes



(d) sollicitations accidentelles très brèves en tête dominantes

A partir d'essais in situ (CPT)

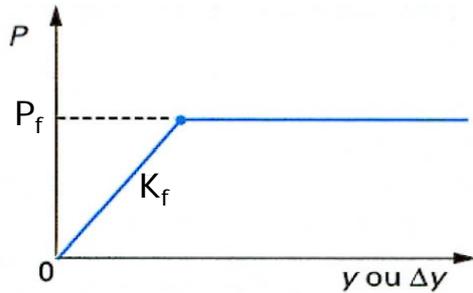
$$K_f = \beta q_c$$

$$P_f = \frac{Bq_c}{\beta_1} \quad P_u = \frac{Bq_c}{\beta_2}$$

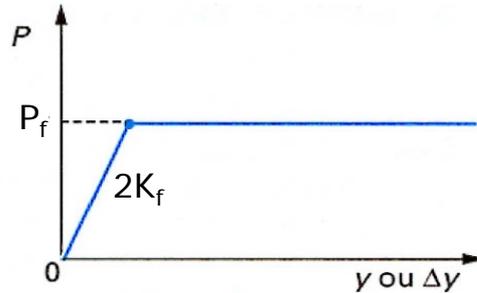
NF P 94 262				
Type de sol	Sols sableux $I_R < 2,05$	Sols intermédiaires $2,05 \leq I_R \leq 2,6$	Sols argileux $I_R > 2,6$	Craie et Marne
$\beta$	2	4	6	2
$\beta_1$	13	10	5	13
$\beta_2$	8	6	3,5	8

# Principe de modélisation

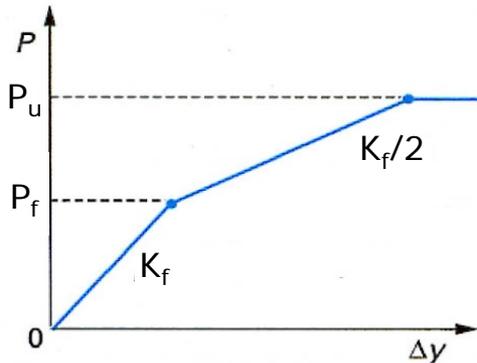
⇒ Loi de mobilisation de la réaction frontale du terrain



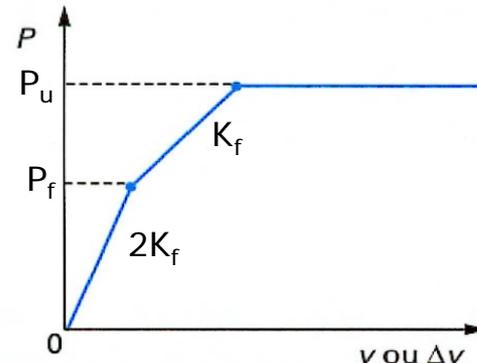
(a) sollicitations permanentes en tête dominantes



(c) sollicitations de courte durée en tête dominantes



(b) poussées latérales du sol dominantes



(d) sollicitations accidentelles très brèves en tête dominantes

A partir des propriétés de cisaillement

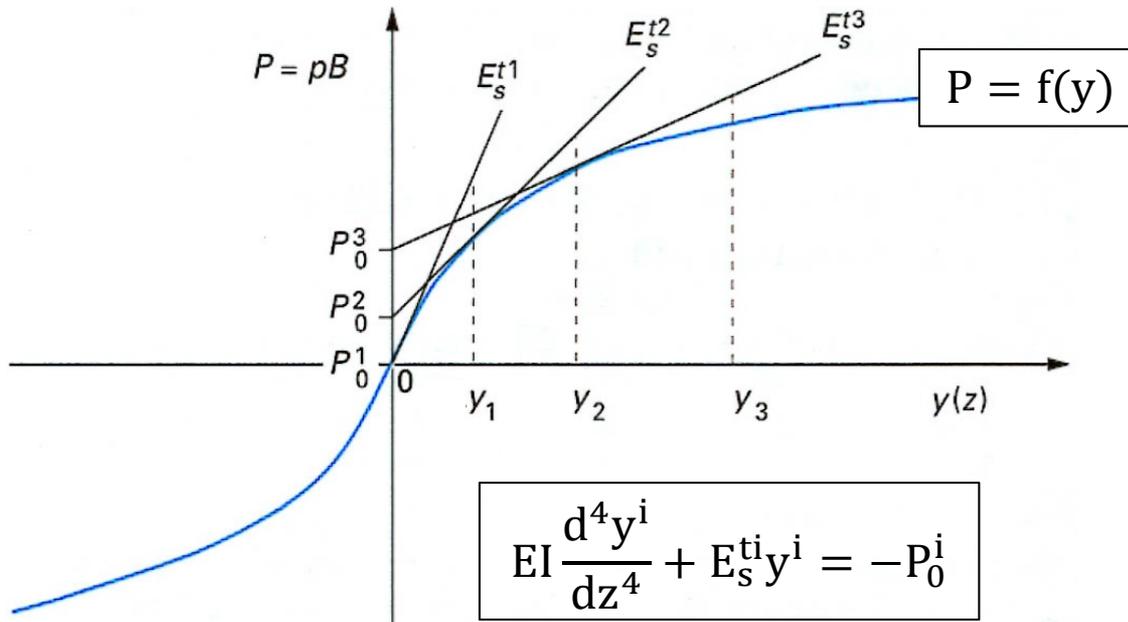
$$K_f = 2G$$

$$P_f = 4c_u B$$

$$P_u = 6c_u B$$

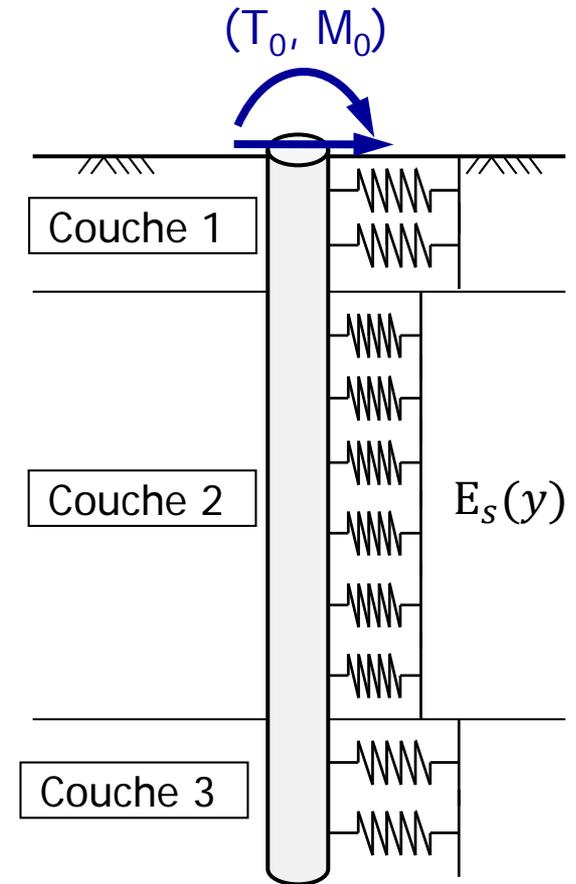
# Principe de modélisation

⇒ Mise en équation et résolution



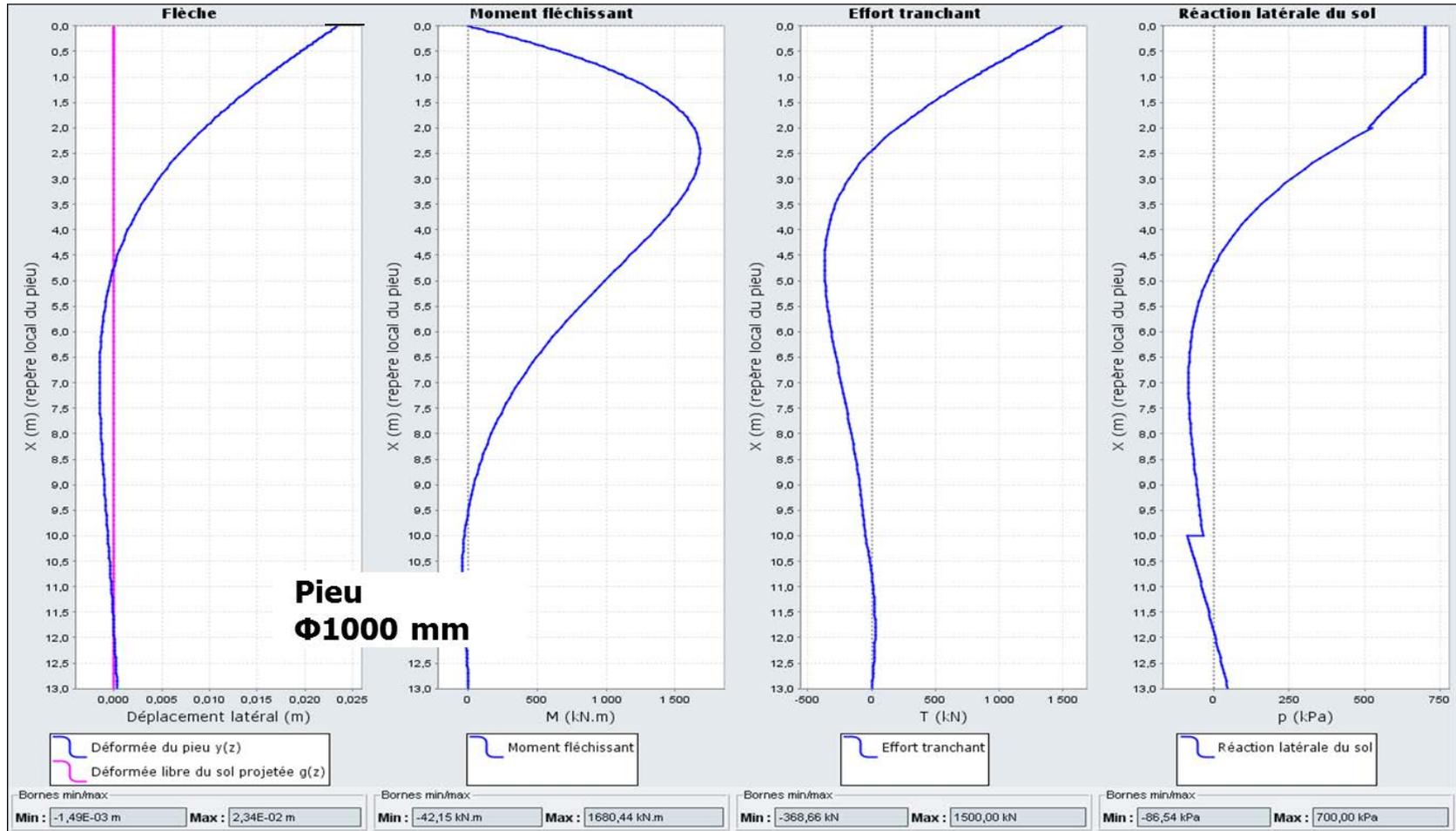
$$EI \frac{d^4 y^i}{dz^4} + E_s^{ti} y^i = -P_0^i$$

Résolution numérique itérative  
(pieu discrétisé en éléments de poutre)



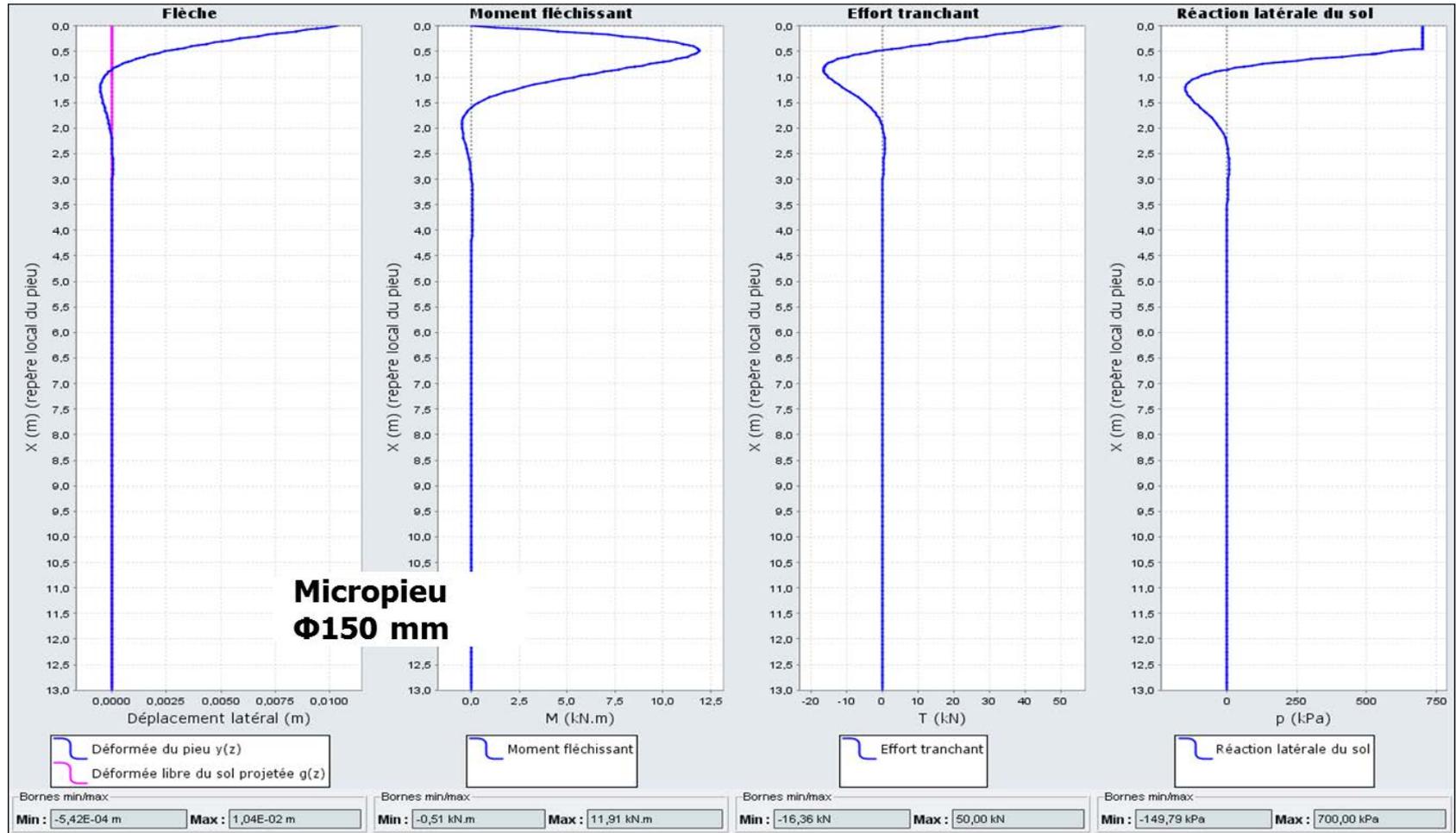
# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Exemple d'un pieu sous charge transversale en tête



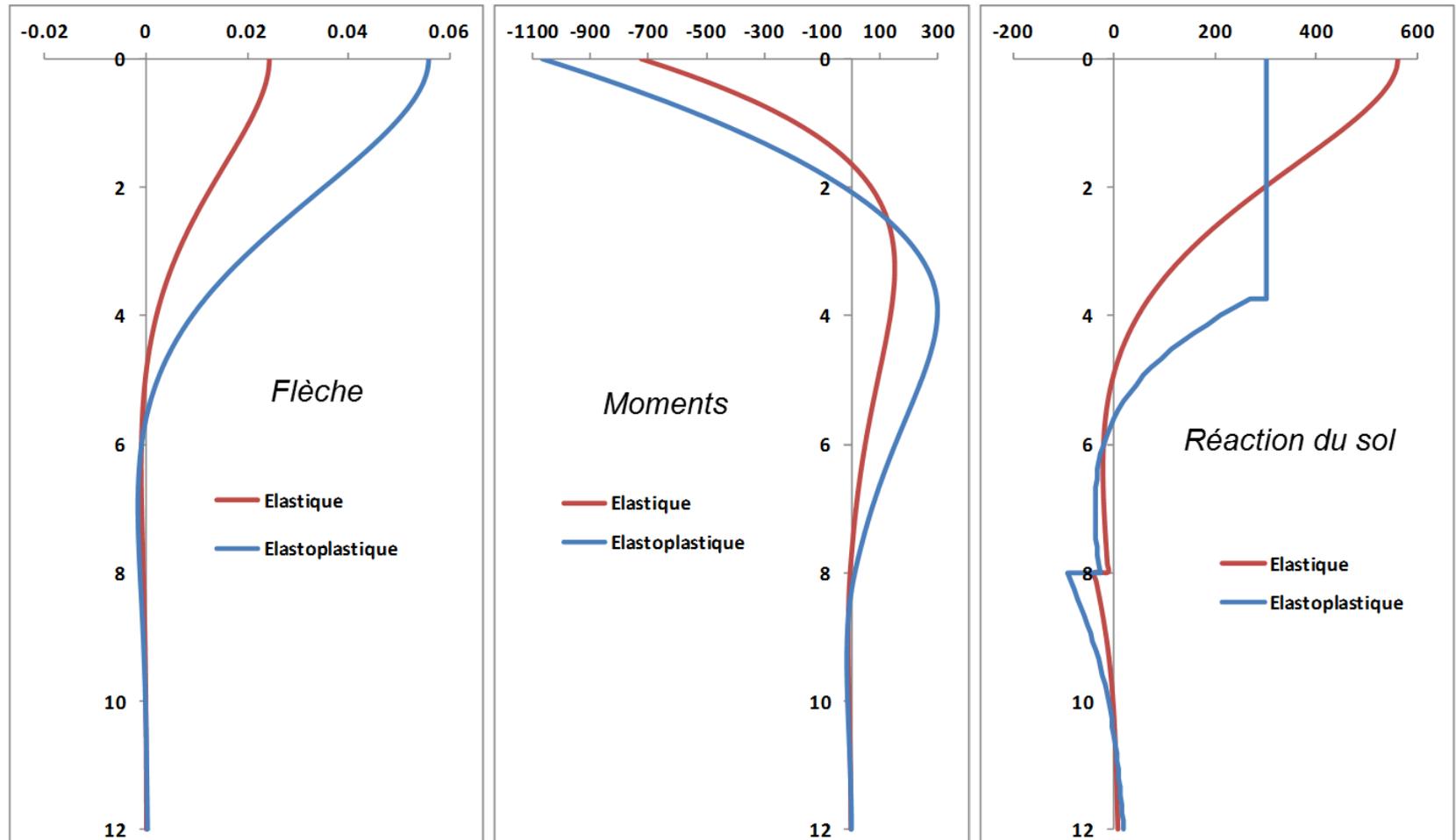
# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Exemple d'un micropieu sous charge transversale en tête



# Mise en œuvre dans Foxta v4

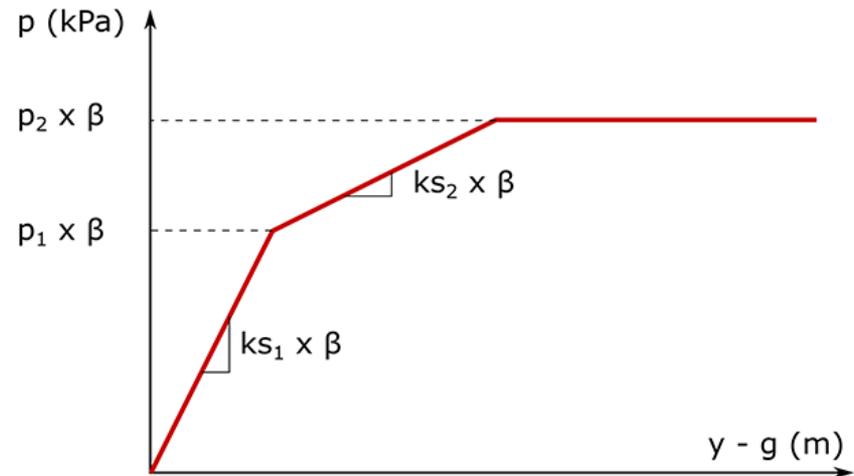
⇒ Traitement automatique des non-linéarités



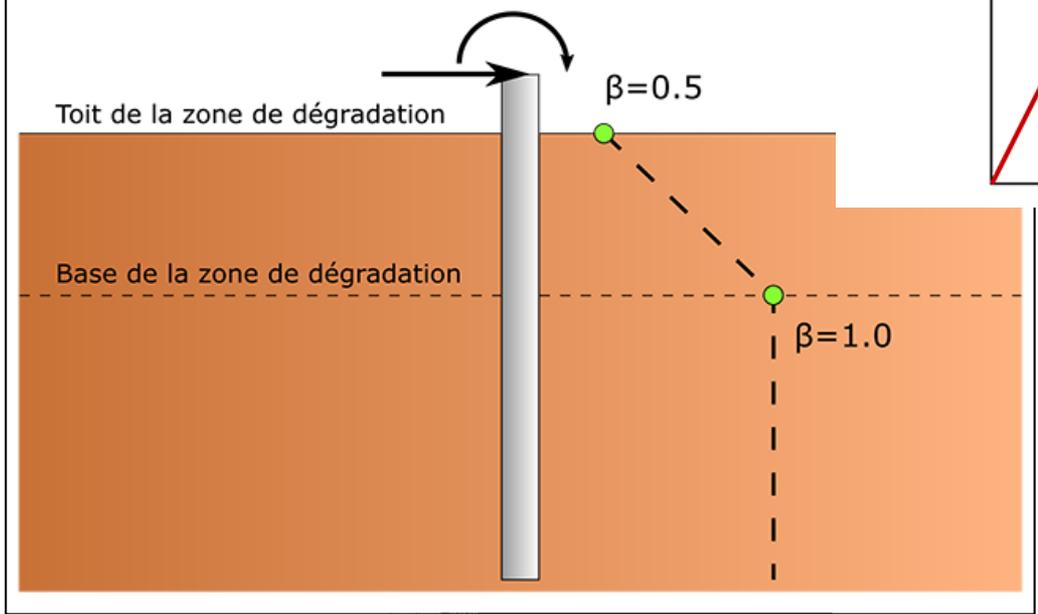
# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Prise en compte d'une dégradation à proximité de la surface

Aide sur l'application de la dégradation



Aide sur la définition de la dégradation



# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Exercice 01 : Pieu sous charge transversale en tête ( $T_0 = 400$  kN)

The screenshot displays the software interface for a pile calculation. On the left, a vertical cross-section shows soil layers with a reference level at 0.0 m. The layers are: Remblai (0.0 to -6.0 m), Sable (-6.0 to -15.0 m), and Marnes (-15.0 to -20.0 m). A pile is shown extending from the surface down to -20.0 m.

On the right, the 'Sol/pieu' configuration panel is shown with the following settings:

- Dégradation à proximité de la surface:**
  - Prise en compte d'une dégradation à proximité de la surface
  - Cote du toit de la zone de dégradation (m): 0,00
  - Cote de la base de la zone de dégradation (m): -2,00
- Définition des couches de sol:**

N°	Nom	Couleur	Z <sub>base</sub> [m]	E <sub>II</sub> [kPa]	α	B [m]	P <sub>i</sub> * [kPa]	P <sub>1</sub> * [kPa]
1	Remblai	[Green]	-6,00	4,00E03	0,50	0,80	200,00	400,00
2	Sable	[Blue]	-15,00	8,00E03	0,33	0,80	500,00	800,00
3	Marnes	[Brown]	-20,00	2,00E04	0,50	0,80	1300,00	2000,00
- Discretisation du pieu:**
  - Prise en compte des déformations d'effort tranchant

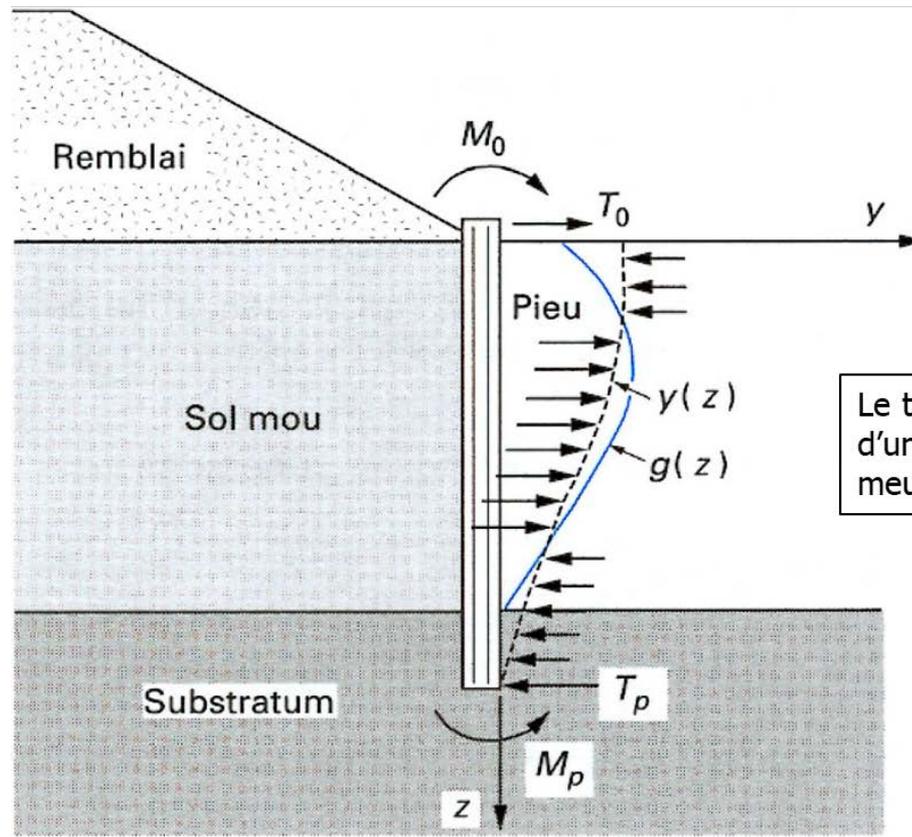
Nom	h [m]	EI [kN.m <sup>2</sup> ]	n
Remblai	6,00	2,01E05	20
Sable	9,00	2,01E05	20
Marnes	5,00	2,01E05	10

Additional parameters: Nb de couches : 3, Base de données, Nb de découpages : 50.

Sollicitations de courte durée

# Mise en œuvre dans Foxta v4

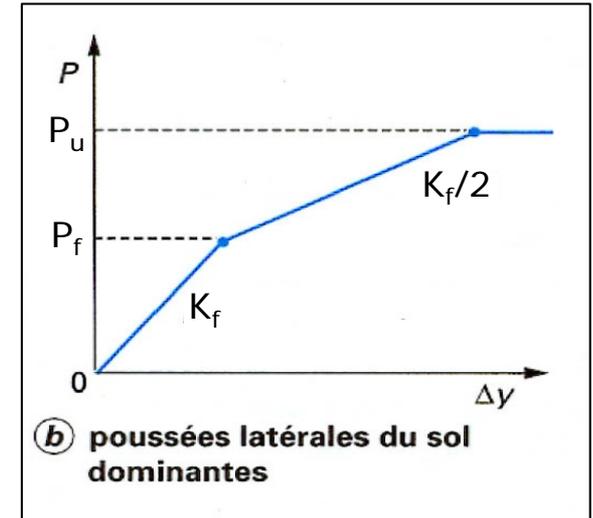
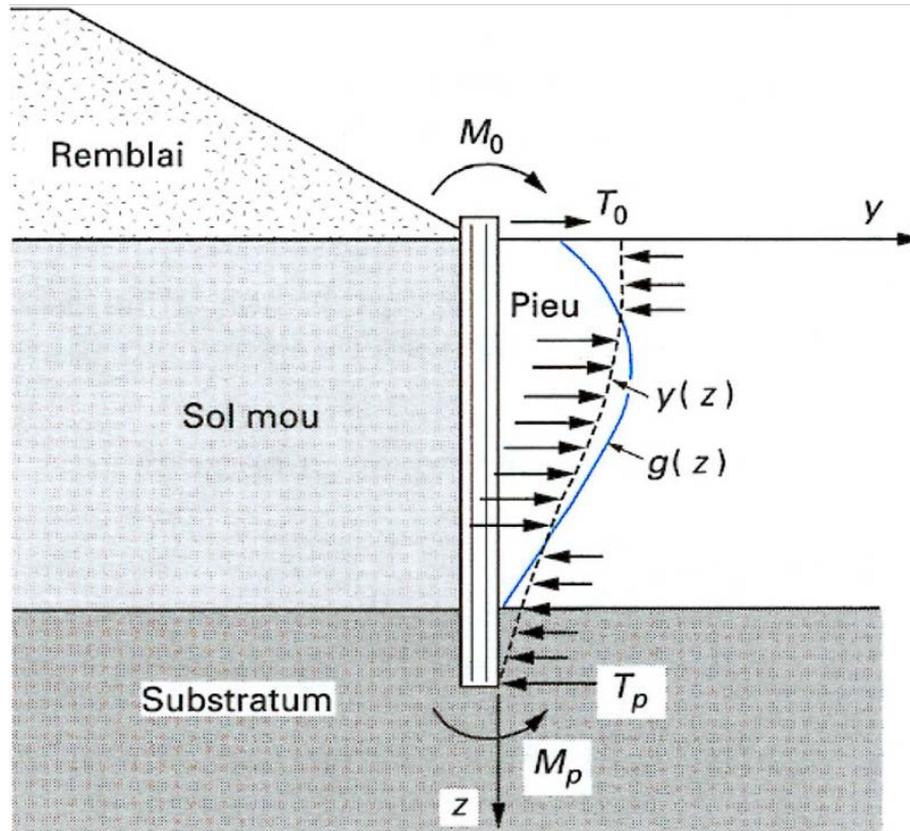
⇒ Prise en compte d'un déplacement libre du terrain (poussées latérales)



Le tassement du remblai s'accompagne d'un déplacement transversal du sol meuble, dit « déplacement libre »

# Mise en œuvre dans Foxta v4

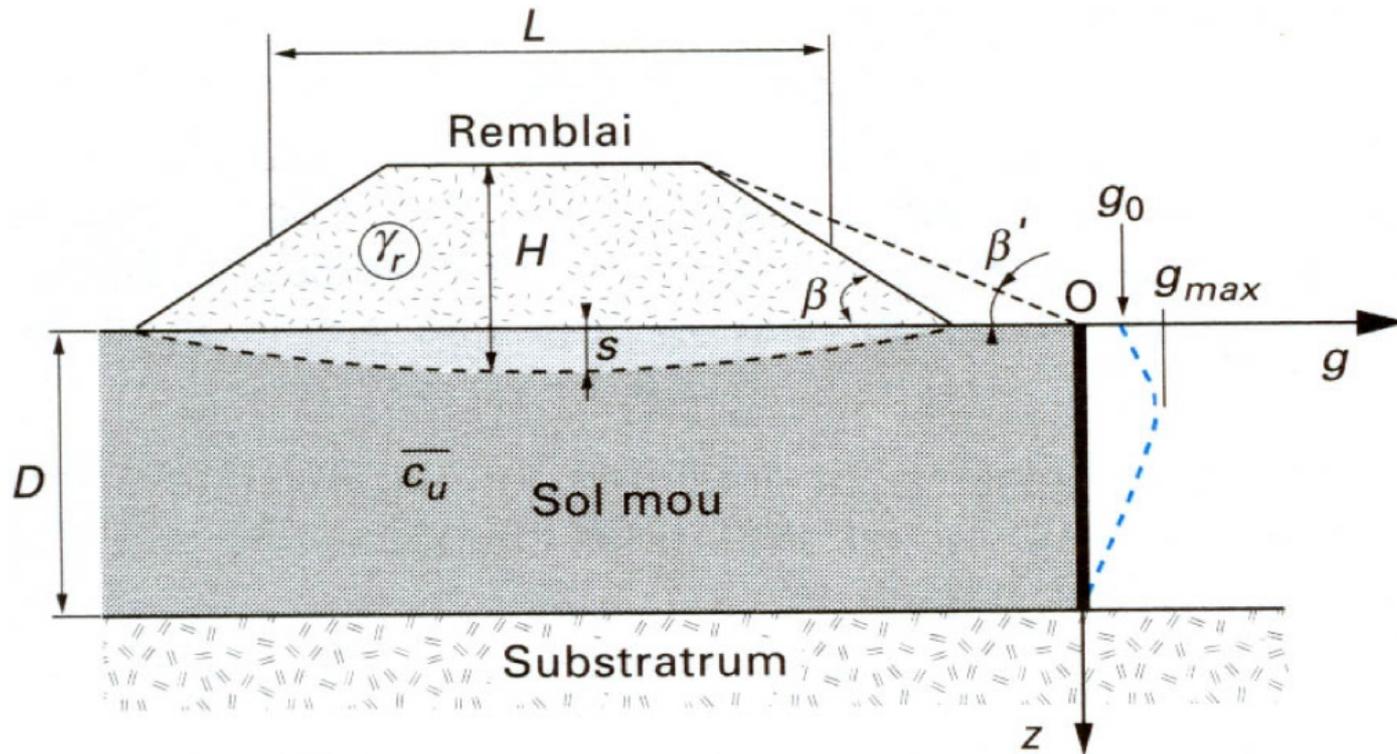
⇒ Prise en compte d'un déplacement libre du terrain (poussées latérales)



La réaction du sol est de caractère actif => la sécurité est mieux assurée avec une courbe de réaction allant jusqu'au palier de rupture  $P_u$

# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Lien avec la NF P 94 262 : comment estimer la fonction  $g(z)$  ?



Deux démarches possibles :

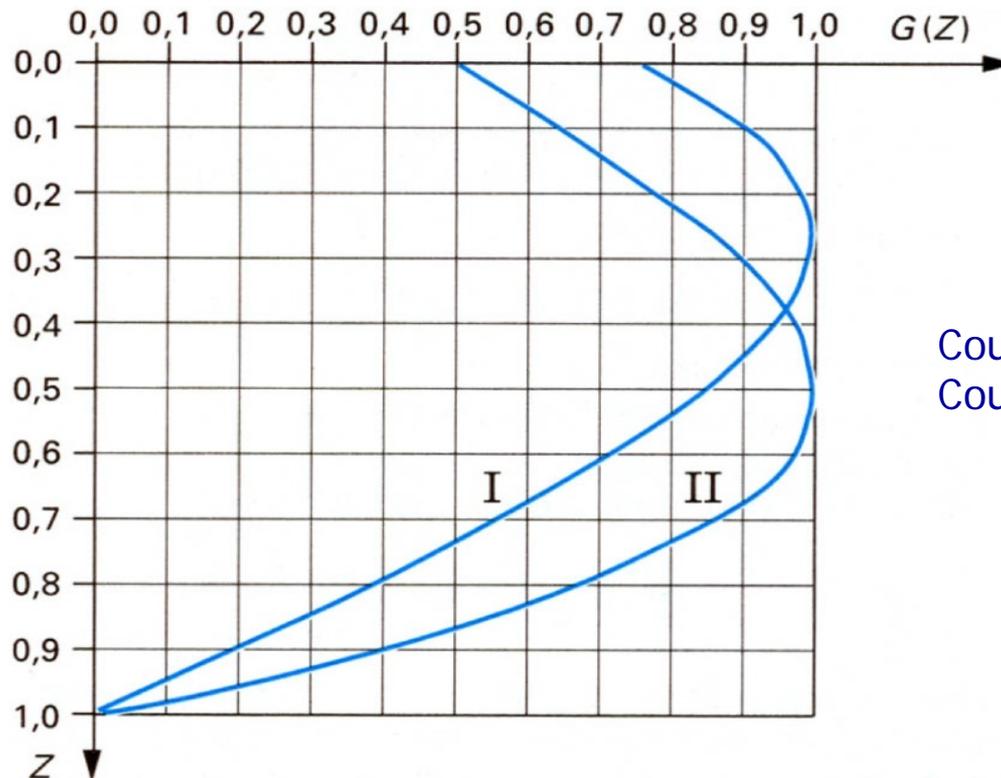
- modèles « directs » (approche empirique)
- modèles « indirects » (solutions d'élasticité ou numériques)

# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Lien avec la NF P 94 262 : approche empirique pour  $g(z)$

$$g(z) = g_{\max} G\left(\frac{z}{D}\right)$$

$g_{\max}$  = fonction du temps et de la position du pieu par rapport à la zone de chargement



Courbe I : cas général  
 Courbe II : couche raide en surface

# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Lien avec la NF P 94 262 : amplitude du déplacement transversal  $g_{\max}$

$$g_{\max} = g_{\max,0} + \Delta g_{\max}(t)$$

Déplacement  
instantané

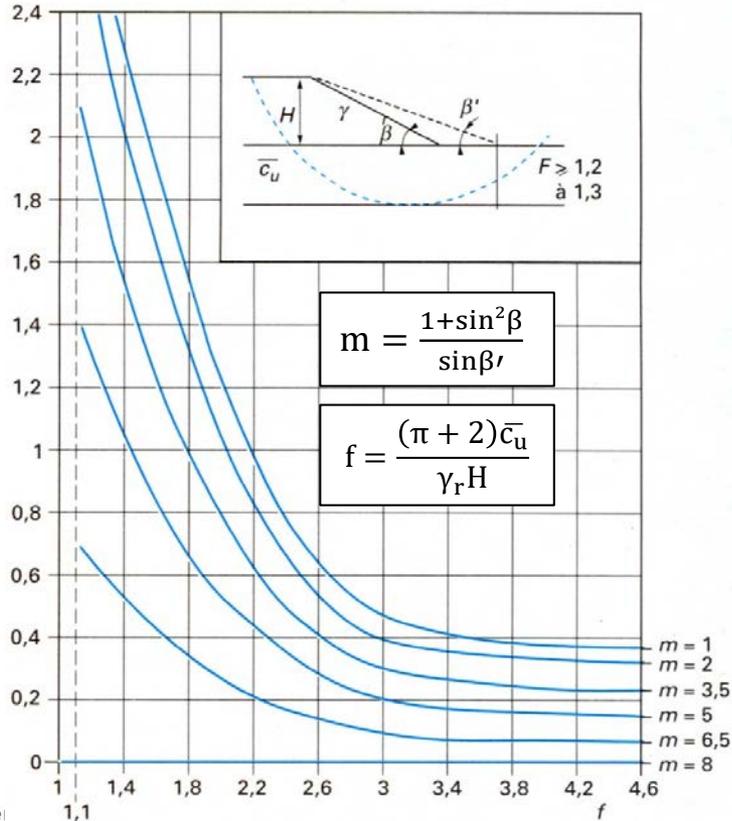
Déplacement  
différé

# Mise en œuvre dans Foxta v4

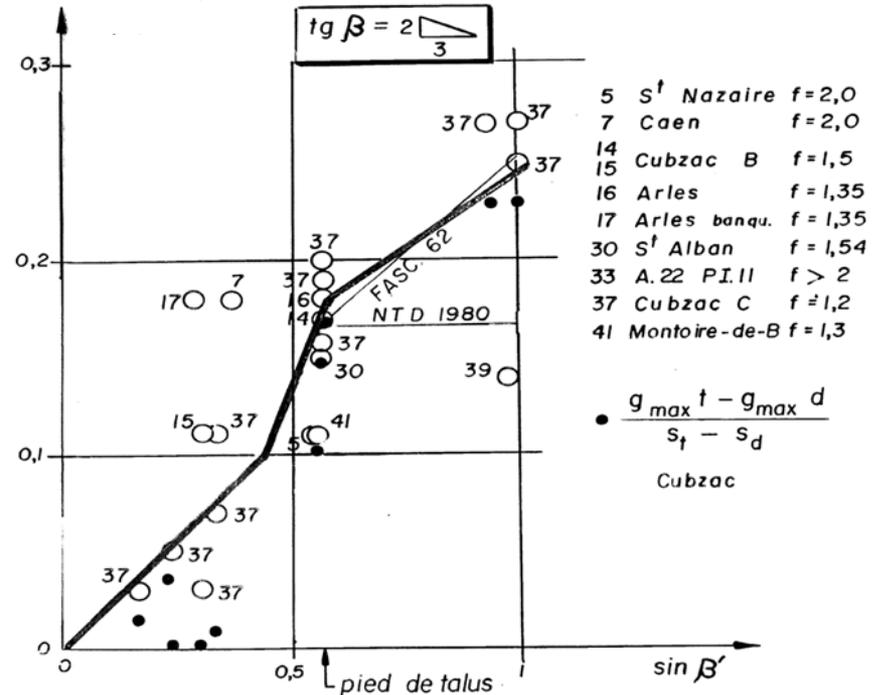
⇒ Lien avec la NF P 94 262 : amplitude du déplacement transversal  $g_{max}$

$$g_{max} = g_{max,0} + \Delta g_{max}(t)$$

$$\frac{g_{max,0}}{D} (\%)$$

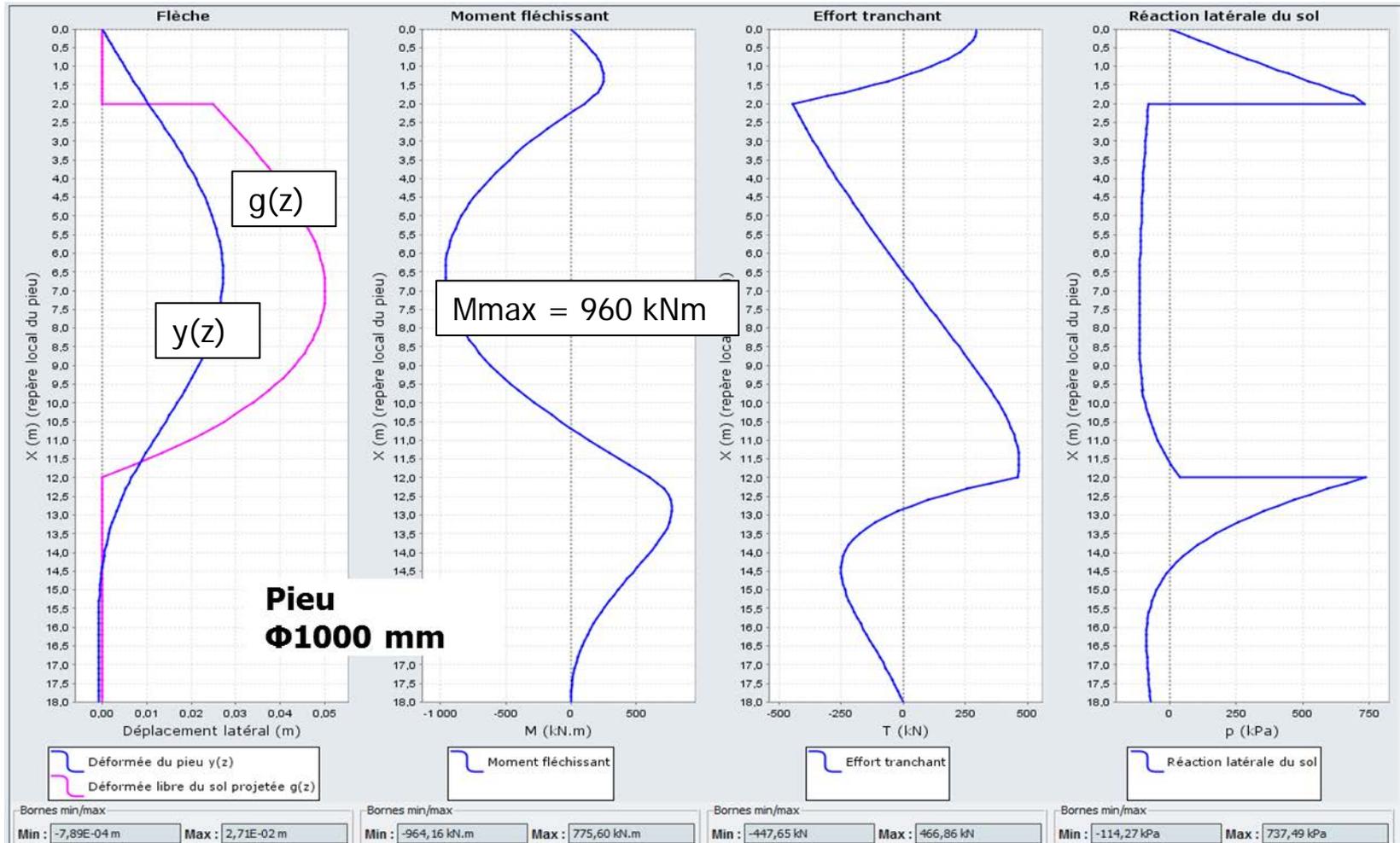


$$\frac{\Delta g_{max}(t)}{\Delta s(t)}$$



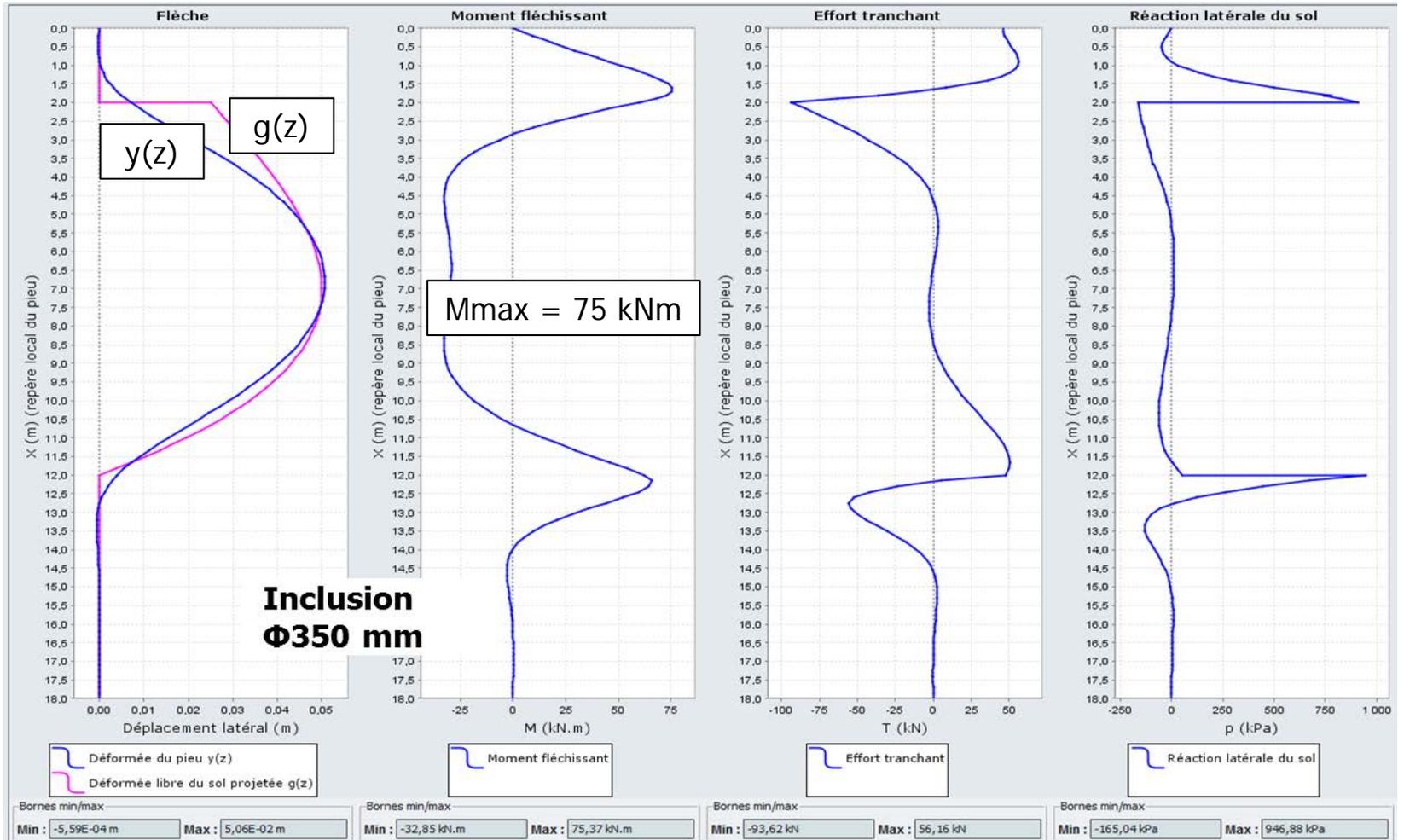
# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Exemple d'un pieu soumis à des poussées transversales



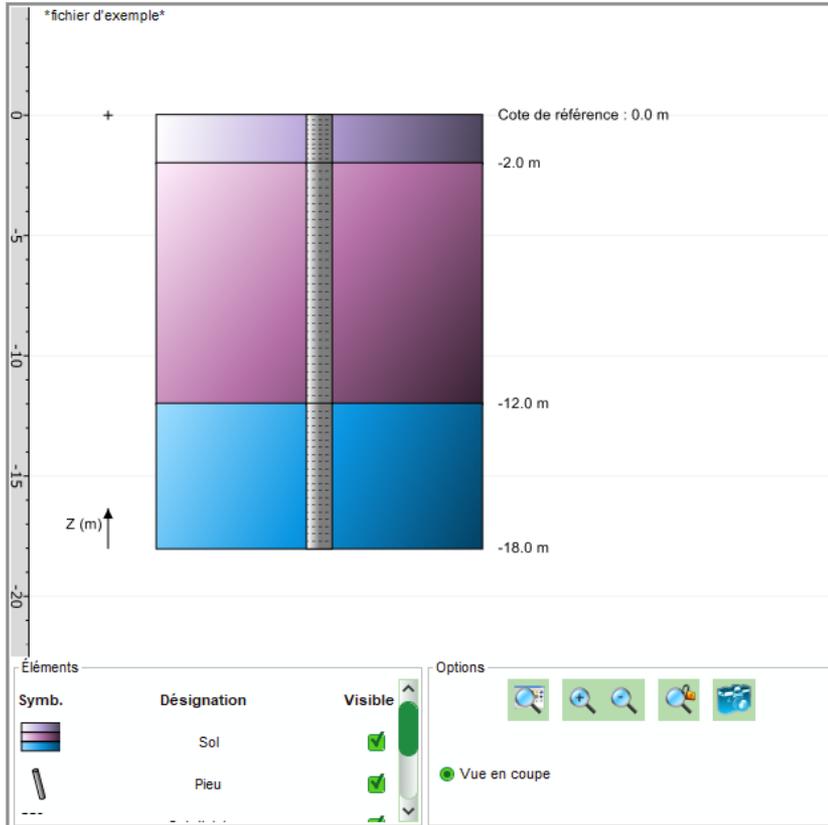
# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Exemple d'un pieu soumis à des poussées transversales



# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Exercice 02a : Pieu phi1000 mm sous poussée transversale du sol



Exemple 02a

Paramètres Sol/pieu Chargement extérieur sur le pieu Déformée libre du sol g(z)

### Sol/pieu

Dégradation à proximité de la surface

Prise en compte d'une dégradation à proximité de la surface

Cote du toit de la zone de dégradation (m) 0,00

Cote de la base de la zone de dégradation (m) 0,00

Définition des couches de sol

N°	Nom	Couleur	Z <sub>base</sub> [m]	E <sub>M</sub> [kPa]	α	B [m]	P <sub>f</sub> * [kPa]	P <sub>l</sub> * [kPa]
1	Couche de fo...		-2,00	2,00E04	0,33	1,00	700,00	1000,00
2	Argiles molles		-12,00	2,00E03	0,50	1,00	100,00	200,00
3	Sables denses		-18,00	3,00E04	0,33	1,00	2500,00	3500,00

Nb de couches : 3

Base de données

Discretisation du pieu

Prise en compte des déformations d'effort tranchant

Nom	h [m]	EI [kN.m <sup>2</sup> ]	n
Couche de forme	2,00	4,91E05	10
Argiles molles	10,00	4,91E05	30
Sables denses	6,00	4,91E05	20

Nb de découpages : 60

Configurer le D.L. Lancer le calcul Voir les résultats

# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Exercice 02a : Pieu phi1000 mm sous poussée transversale du sol

The screenshot displays the Foxta v4 software interface for modeling a pile under lateral soil pressure. The main window shows a vertical cross-section of the soil profile with a pile. The vertical axis is labeled 'Z (m)' and ranges from 0 to -20. The soil is divided into layers: a top layer (purple) from 0 to -2.0 m, a middle layer (dark purple) from -2.0 to -12.0 m, and a bottom layer (blue) from -12.0 to -18.0 m. A reference level is marked at 0.0 m. A green curve represents the soil deformation profile.

An 'Assistant g(z) selon l'Eurocode 7' dialog box is open, allowing the user to define the soil deformation parameters. It includes the following fields:

- Définition de l'horizon compressible:**
  - Cote de toit de l'horizon Z1 (m): -2,0
  - Cote de base de l'horizon Z2 (m): -12,0
- Définition adimensionnelle:**
  - A1: 0,50
  - A2: 1,50
  - A3: 0,00
  - A4: -2,00
- Amplitude:**
  - G<sub>max</sub> (m): 0,05

The dialog box also shows 'Courbes EC7' with options I and II, and the formula:  $g(z) = G_{max} * (A1 + A2 * Z + A3 * Z^2 + A4 * Z^3)$  avec  $Z = (Z1 - z) / (Z1 - Z2)$ .

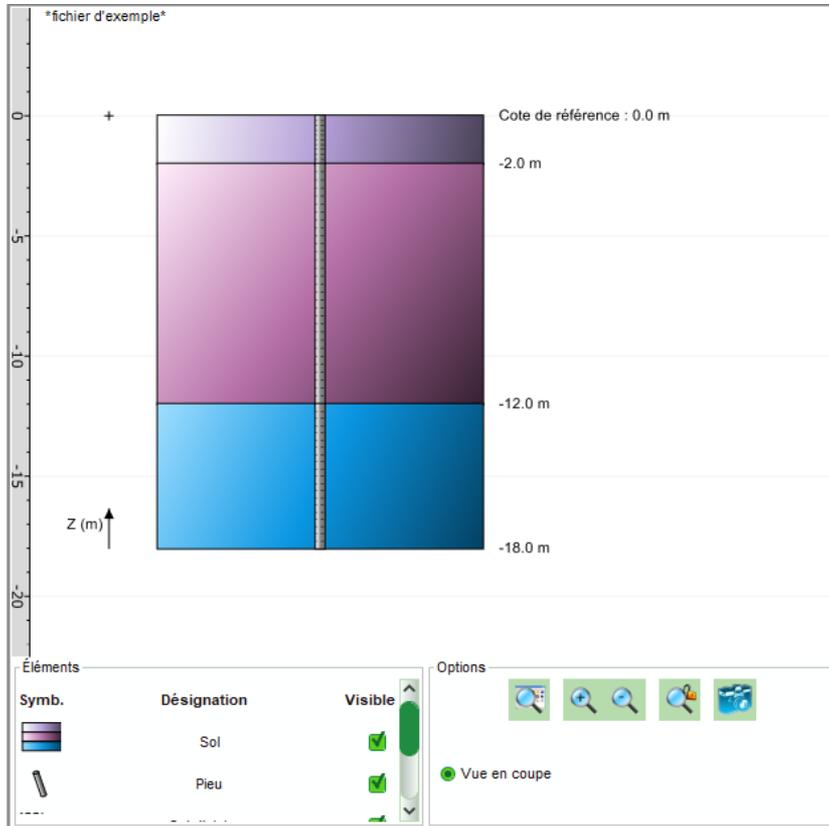
To the right, a table titled 'Déformée libre du sol g(z)' displays the calculated soil deformation values for various depths. The table has two columns: 'z [m]' and 'g(z) [m]'. The data points are as follows:

z [m]	g(z) [m]
-2,00	0,0000
-2,00	0,0250
-2,33	0,0275
-2,67	0,0300
-3,00	0,0324
-3,33	0,0348
-3,67	0,0370
-4,00	0,0392
-4,33	0,0412
-4,67	0,0431
-5,00	0,0448
-5,33	0,0463
-5,67	0,0476
-6,00	0,0486
-6,33	0,0494
-6,67	0,0498
-7,00	0,0500
-7,33	0,0498
-7,67	0,0493
-8,00	0,0484

The interface also includes a legend for 'Sol' and 'Pieu', a 'Vue en coupe' option, and buttons for 'Configurer le D.I.', 'Lancer le calcul', and 'Voir les résultats'.

# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Exercice 02b : Pieu phi350 mm sous poussée transversale du sol



Exemple 02a

Paramètres Sol/pieu Chargement extérieur sur le pieu Déformée libre du sol g(z)

### Sol/pieu

Dégradation à proximité de la surface

Prise en compte d'une dégradation à proximité de la surface

Cote du toit de la zone de dégradation (m) 0,00

Cote de la base de la zone de dégradation (m) 0,00

Définition des couches de sol

N°	Nom	Couleur	Z <sub>base</sub> [m]	k <sub>s1</sub> [kPa/m]	p <sub>1</sub> [kPa]	k <sub>s2</sub> [kPa/m]	p <sub>2</sub> [kPa]	B [m]
1	Couche de fo...		-2,00	1,58E05	700,00	7,90E04	1000,00	0,35
2	Argiles molles		-12,00	1,28E04	100,00	6,42E03	200,00	0,35
3	Sables denses		-18,00	2,37E05	2500,00	1,19E05	3500,00	0,35

Nb de couches : 3

Base de données

Discretisation du pieu

Prise en compte des déformations d'effort tranchant

Nom	h [m]	EI [kN.m <sup>2</sup> ]	n
Couche de forme	2,00	7,37E03	10
Argiles molles	10,00	7,37E03	30
Sables denses	6,00	7,37E03	20

Nb de découpages : 60

Configurer le D.I. Lancer le calcul Voir les résultats

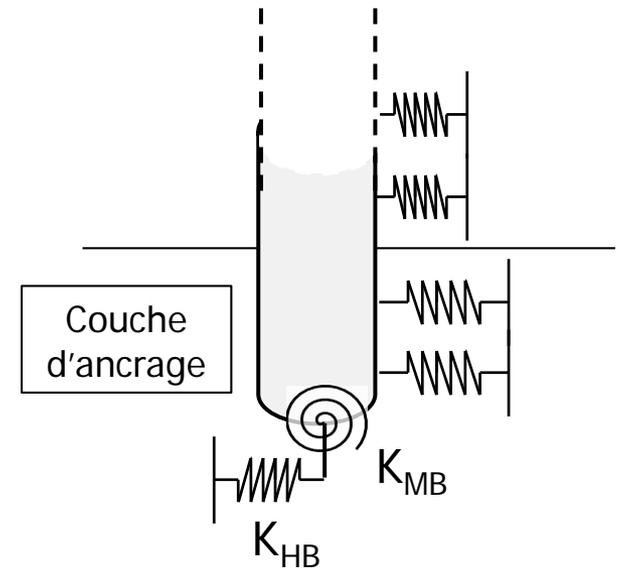
# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Prise en compte des effets de « blocage » élastique en pied

$$K_V \sim 5 \text{ à } 11 \times E_M B \quad (\text{PMT})$$

$$K_V \sim 5 \text{ à } 20 \times q_c B \quad (\text{CPT})$$

$$K_V \sim \frac{B}{1 - \nu^2} E \quad (\text{Elasticité})$$

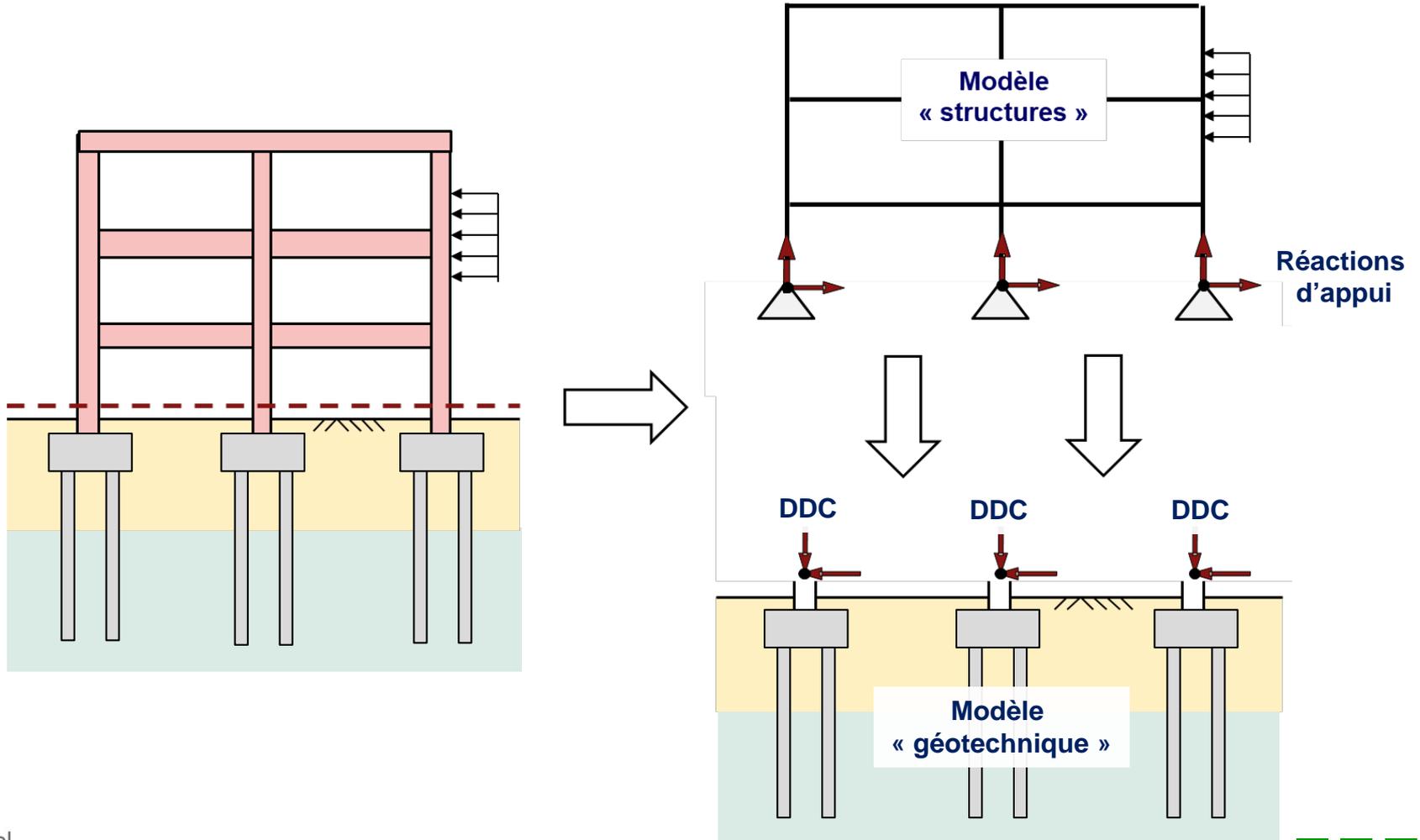


$$K_{HB} \sim \frac{4}{5} K_V$$

$$K_{MB} \sim \frac{B^2}{6} K_V$$

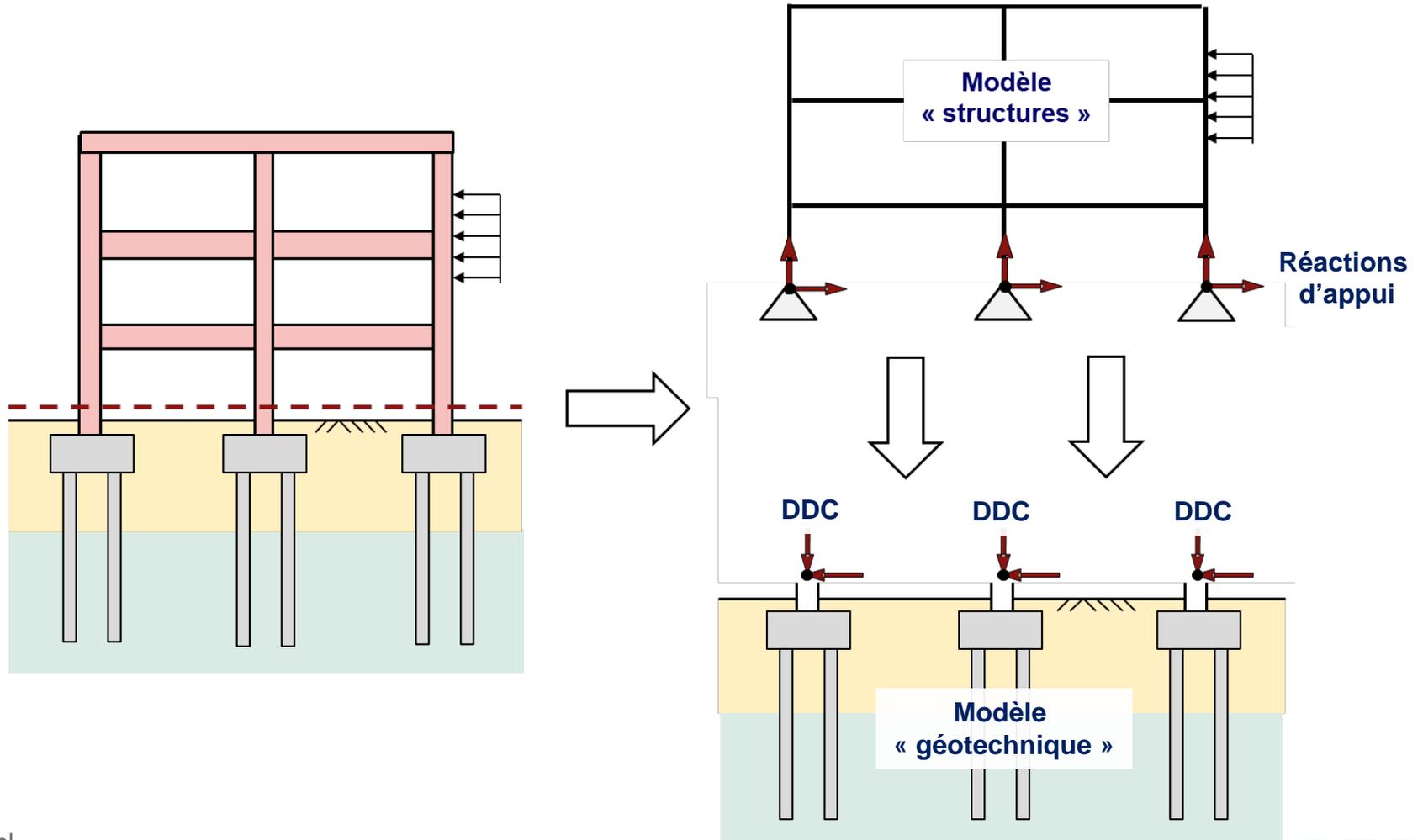
# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Estimation de la matrice de rigidité en tête



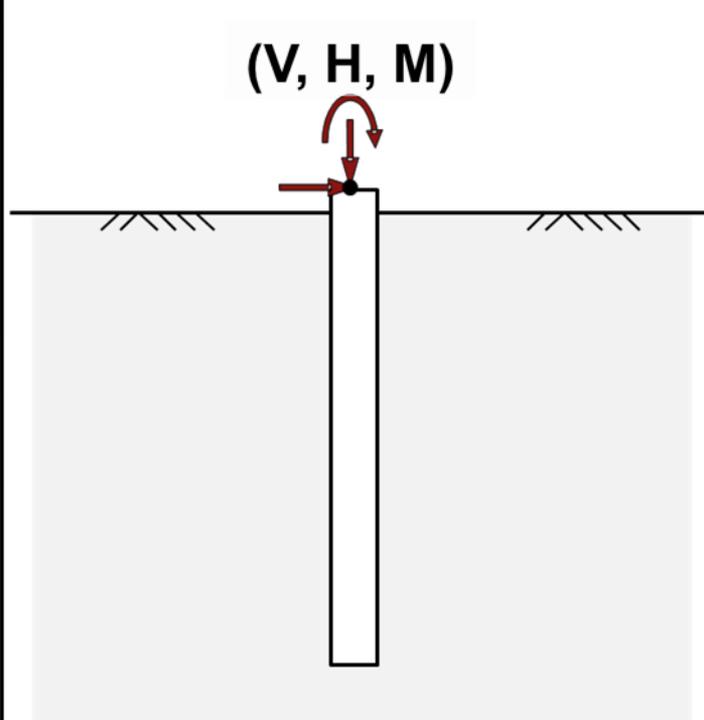
# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Estimation de la matrice de rigidité en tête



# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Estimation de la matrice de rigidité en tête



Matrice de rigidité

$$\begin{pmatrix} V \\ H \\ M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_V & 0 & 0 \\ 0 & K_{HH} & K_{HM} \\ 0 & K_{HM} & K_{MM} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_v \\ u_h \\ \theta \end{pmatrix}$$

$K_V$  raideur verticale

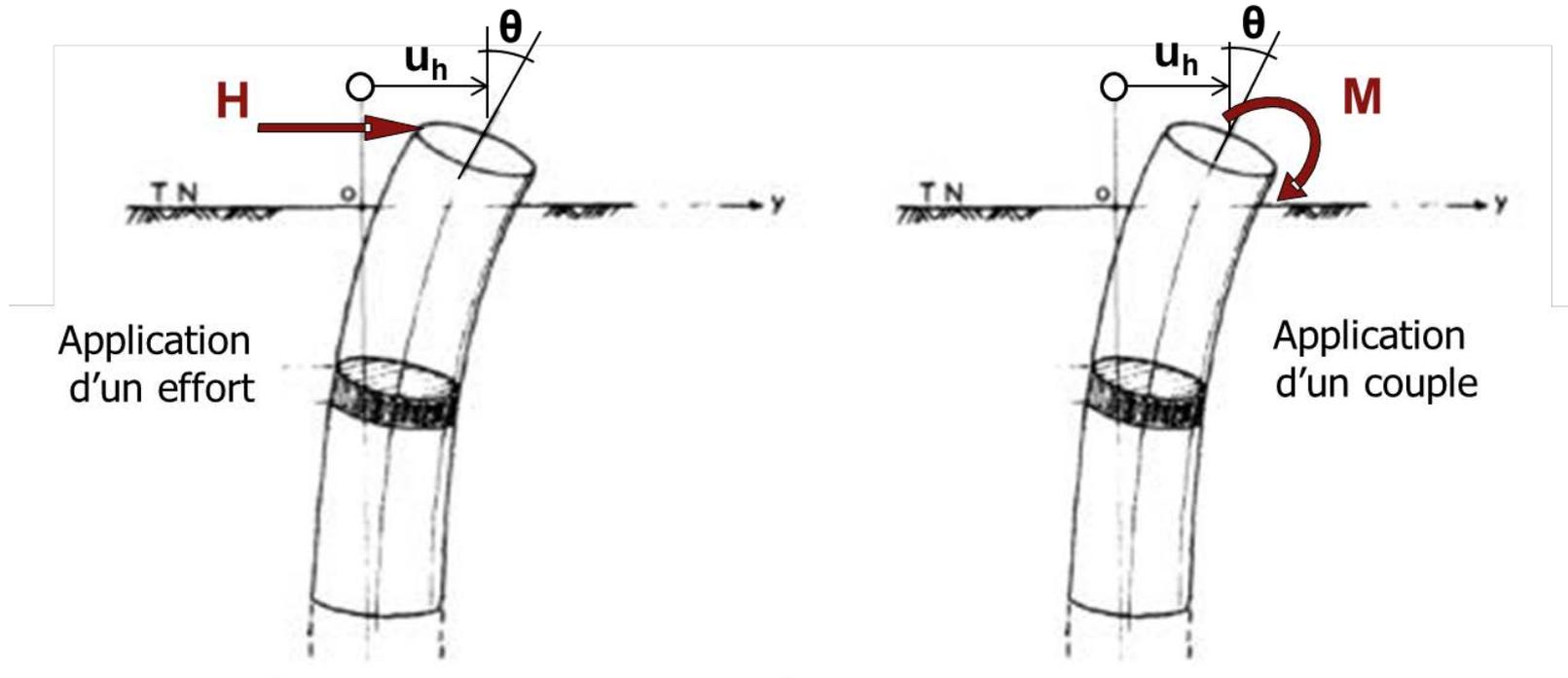
$K_{HH}$  raideur en translation horizontale pure ( $\theta = 0$ )

$K_{MM}$  raideur en rotation pure ( $u_h = 0$ )

$K_{HM}$  raideur de « couplage » (rotation/translation)

# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Estimation de la matrice de rigidité en tête

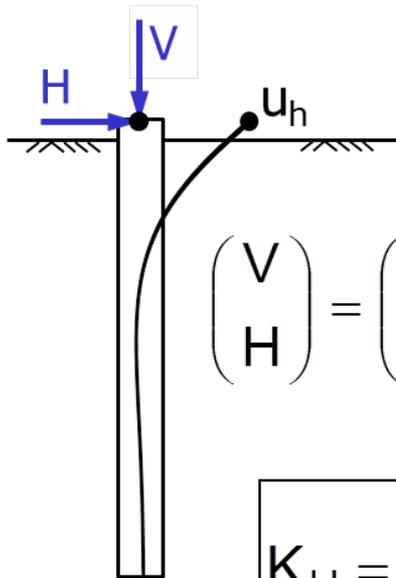


$$\begin{cases} H = K_{HH}u_h + K_{HM}\theta \\ M = K_{HM}u_h + K_{MM}\theta \end{cases}$$

# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Estimation de la matrice de rigidité en tête

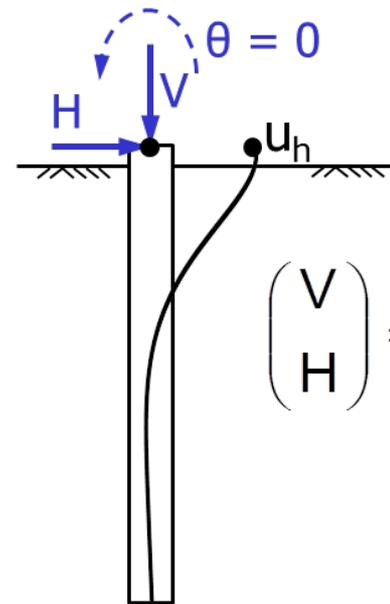
Rotation libre en tête ( $M = 0$ )



$$\begin{pmatrix} V \\ H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_V & 0 \\ 0 & K_H \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_v \\ u_h \end{pmatrix}$$

$$K_H = K_{HH} - \frac{K_{HM}^2}{K_{MM}}$$

Rotation bloquée en tête ( $\theta = 0$ )



$$\begin{pmatrix} V \\ H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_V & 0 \\ 0 & K_H \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_v \\ u_h \end{pmatrix}$$

$$K_H = K_{HH}$$

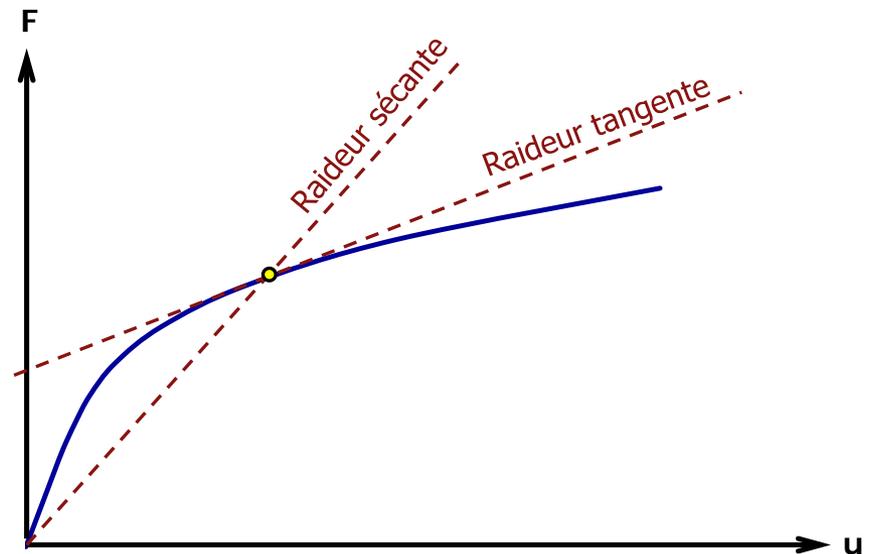
# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Estimation de la matrice de rigidité en tête

$$\begin{pmatrix} V \\ H \\ M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_V & 0 & 0 \\ 0 & K_{HH} & K_{HM} \\ 0 & K_{HM} & K_{MM} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_v \\ u_h \\ \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_0 \\ H_0 \\ M_0 \end{pmatrix}$$

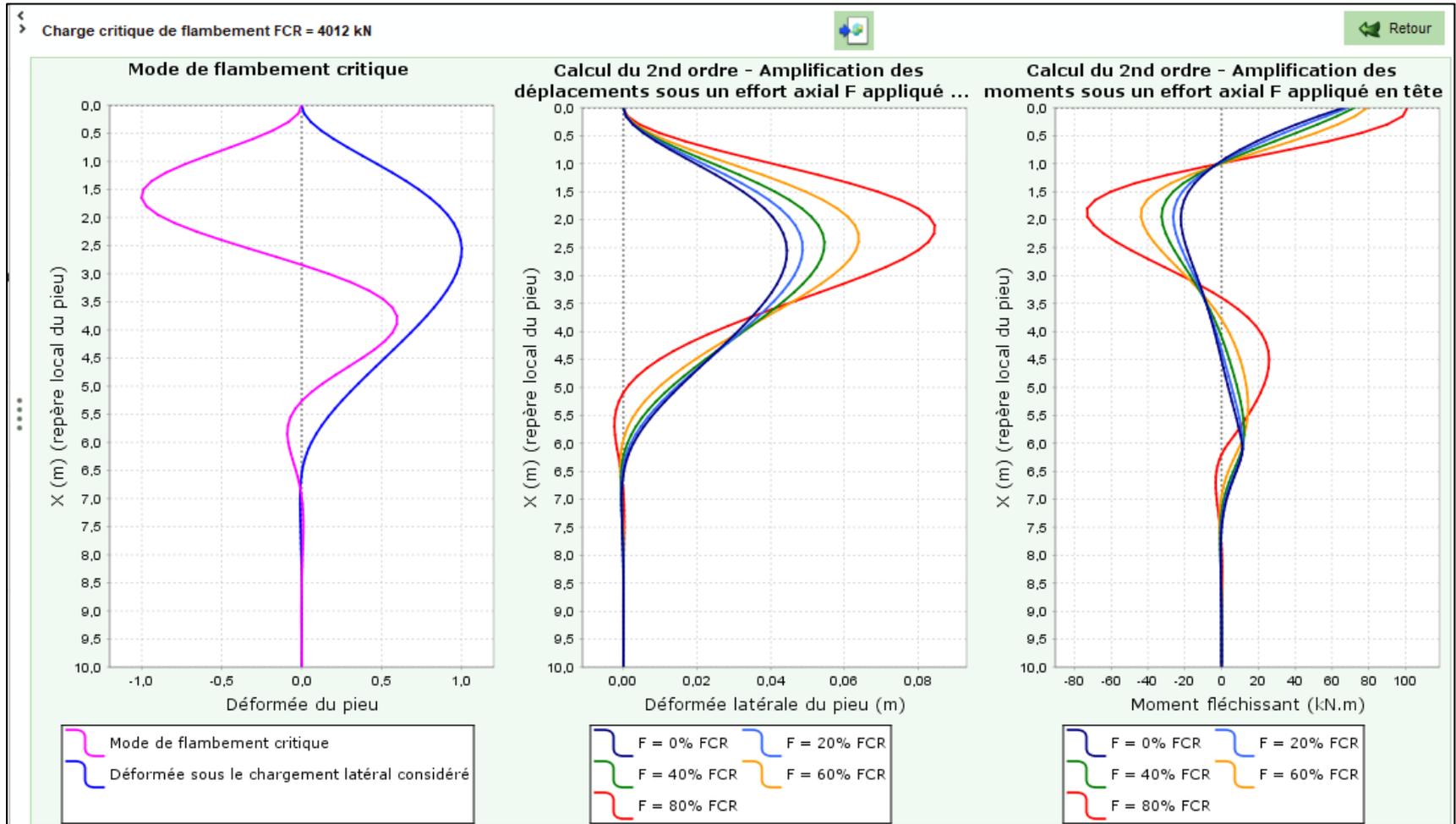
Terme « constant »,  
indissociable de la  
raideur

Raideur **tangente** : valable « autour »  
d'un niveau de chargement



# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Flambement et effets de 2<sup>nd</sup> ordre



# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Exercice 03 : Effets de 2<sup>nd</sup> ordre dans un micropieu

The screenshot displays the software interface for configuring a micropile. On the left, a cross-section diagram shows a vertical pile with a diameter of 100 mm, embedded in a soil profile. The soil profile consists of two layers: Argiles (Clay) from 0.0 m to -6.0 m, and Sable (Sand) from -6.0 m to -10.0 m. The reference level is 0.0 m.

The right panel shows the configuration settings for the micropile, organized into several sections:

- Micropieu sous g(z)**: Parameters for soil/pile interaction.
- Dégradation à proximité de la surface**: Options to consider surface degradation, with a top depth of 0.00 m and a base depth of -3.20 m.
- Définition des couches de sol**: A table defining the soil layers.
- Discretisation du pieu**: Options to consider shear deformation, with a table defining the pile discretization.

N°	Nom	Couleur	Z <sub>base</sub> [m]	E <sub>M</sub> [kPa]	α	B [m]	p <sub>f</sub> * [kPa]	p <sub>i</sub> * [kPa]
1	Argiles	Blue	-6,00	2,00E03	0,67	0,20	150,00	250,00
2	Sable	Dark Green	-10,00	1,00E04	0,33	0,20	700,00	1000,00

Nom	h [m]	EI [kN.m <sup>2</sup> ]	n
Argiles	6,00	1,00E03	40
Sable	4,00	1,00E03	40

Additional parameters shown include: Nb de couches : 2, Base de données, and Nb de découpages : 80.

# Mise en œuvre dans Foxta v4

⇒ Exercice 03 : Effets de 2<sup>nd</sup> ordre dans un micropieu

The screenshot displays the software interface for calculating soil deformation. A central dialog box, 'Assistant g(z) selon l'Eurocode 7', is open, allowing for the definition of a compressible horizon and the selection of curves according to Eurocode 7. The dialog includes fields for 'Cote de toit de l'horizon Z1 (m)' (0,0), 'Cote de base de l'horizon Z2 (m)' (-6,0), and 'Amplitude G<sub>max</sub> (m)' (0,0500). It also features a 'Définition adimensionnelle' section with parameters A1 (0,73), A2 (2,13), A3 (-4,69), and A4 (1,83), and a choice between 'Courbes EC7' I and II. The formula for g(z) is given as  $g(z) = G_{max} * (A1 + A2 * Z + A3 * Z^2 + A4 * Z^3)$  with  $Z = (Z1 - z) / (Z1 - Z2)$ .

To the right, the 'Déformée libre du sol g(z)' table shows the resulting deformation values for various depths z. The table has two columns: 'z [m]' and 'g(z) [m]'. The data points are as follows:

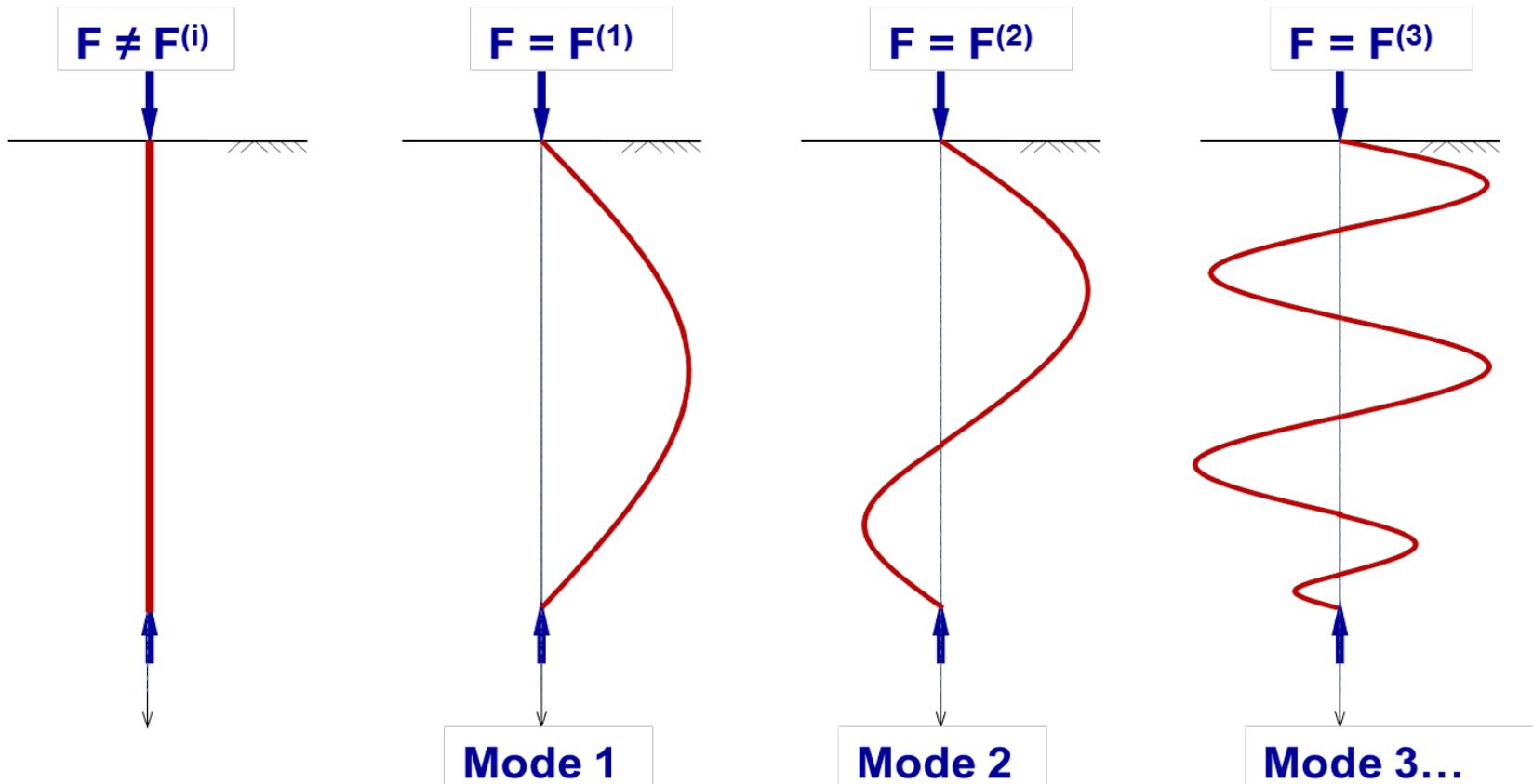
z [m]	g(z) [m]
0,00	0,0365
-0,15	0,0390
-0,30	0,0413
-0,45	0,0432
-0,60	0,0449
-0,75	0,0463
-0,90	0,0475
-1,05	0,0484
-1,20	0,0492
-1,35	0,0496
-1,50	0,0499
-1,65	0,0500
-1,80	0,0498
-1,95	0,0495
-2,10	0,0490
-2,25	0,0483
-2,40	0,0474
-2,55	0,0464
-2,70	0,0453
-2,85	0,0440

The interface also includes a cross-section diagram on the left showing a pile in soil with a reference level at 0,0 m and a pile tip at -10,0 m. At the bottom, there are buttons for 'Configurer le D.I.', 'Lancer le calcul', and 'Voir les résultats'.

# Annexes

# Flambement et effets de 2nd ordre

## Flambement d'un pieu élastique



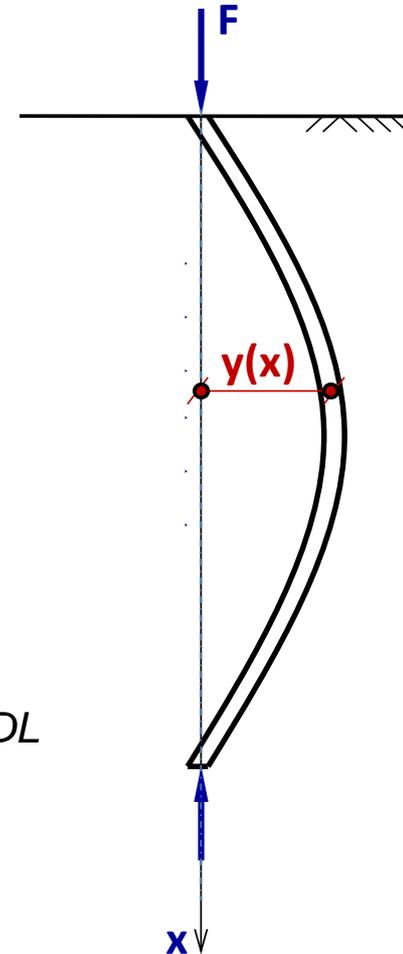
*Dimensionnement vis-à-vis du mécanisme (ou mode) correspondant à la plus petite charge critique*

# Flambement et effets de 2nd ordre

- Equilibre local de 2<sup>nd</sup> ordre (frottement négligé)

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + E_s y + F \frac{d^2 y}{dx^2} = 0$$

$EI \frac{d^4 y}{dx^4}$  : Produit d'inertie  
 $E_s y$  : Module de réaction du sol  
 $F \frac{d^2 y}{dx^2}$  : Terme de 2<sup>nd</sup> ordre



- Discrétisation du pieu en éléments finis de poutre

$$\left( \underline{\underline{\mathbf{K}^e}} + \underline{\underline{\mathbf{K}^s}} \right) \cdot \underline{\underline{\mathbf{y}}} = F \cdot \underline{\underline{\mathbf{M}}} \cdot \underline{\underline{\mathbf{y}}}$$

$\underline{\underline{\mathbf{K}^e}} + \underline{\underline{\mathbf{K}^s}}$  : Matrice de rigidité (Pieu + Sol)  
 $\underline{\underline{\mathbf{y}}}$  : Vecteur déplacement  
 $\underline{\underline{\mathbf{M}}}$  : Matrice de « rotation »

éléments à 2 nœuds et 4 DDL

# Flambement et effets de 2nd ordre

- Equilibre local de 2<sup>nd</sup> ordre (frottement négligé)

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + E_s y + F \frac{d^2 y}{dx^2} = 0$$

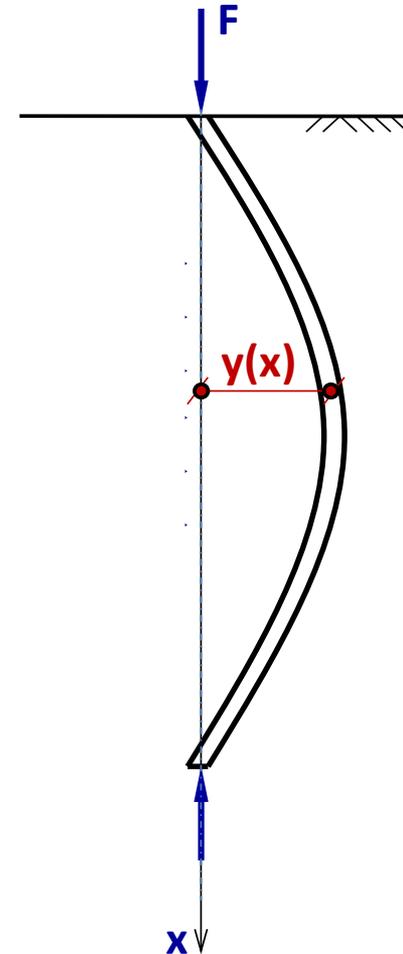
$EI \frac{d^4 y}{dx^4}$  : Produit d'inertie  
 $E_s y$  : Module de réaction du sol  
 $F \frac{d^2 y}{dx^2}$  : Terme de 2<sup>nd</sup> ordre

- Discrétisation du pieu en éléments finis de poutre

$$\left( \underline{\underline{\mathbf{K}^e}} + \underline{\underline{\mathbf{K}^s}} \right) \underline{\underline{\mathbf{y}}} = F \underline{\underline{\mathbf{M}}} \underline{\underline{\mathbf{y}}} \quad \text{Flambement}$$

$$\underline{\underline{\mathbf{K}^e}} \underline{\underline{\mathbf{y}}} = \omega^2 \underline{\underline{\mathbf{M}}} \underline{\underline{\mathbf{y}}} \quad \text{Dynamique}$$

Fréquence propre



# Flambement et effets de 2nd ordre

- Equilibre local de 2<sup>nd</sup> ordre (frottement négligé)

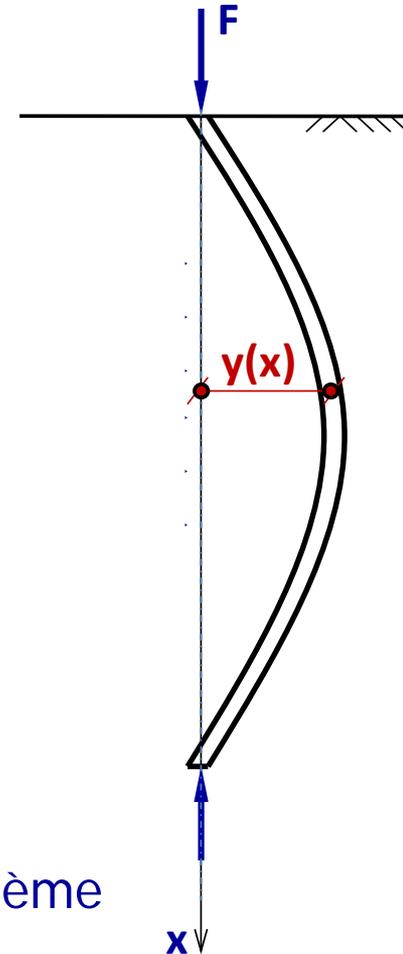
$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + E_s y + F \frac{d^2 y}{dx^2} = 0$$

$EI \frac{d^4 y}{dx^4}$  : Produit d'inertie  
 $E_s y$  : Module de réaction du sol  
 $F \frac{d^2 y}{dx^2}$  : Terme de 2<sup>nd</sup> ordre

- Discrétisation du pieu en éléments finis de poutre

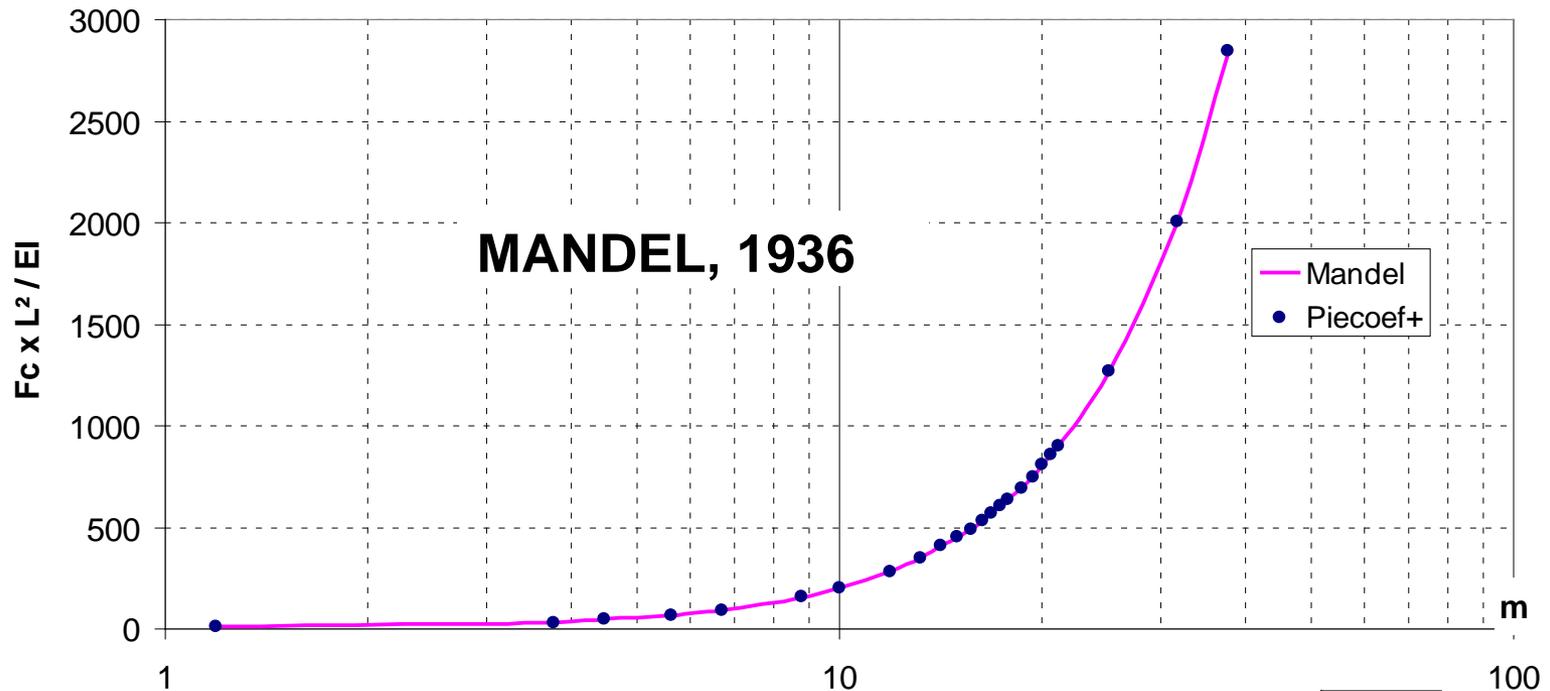
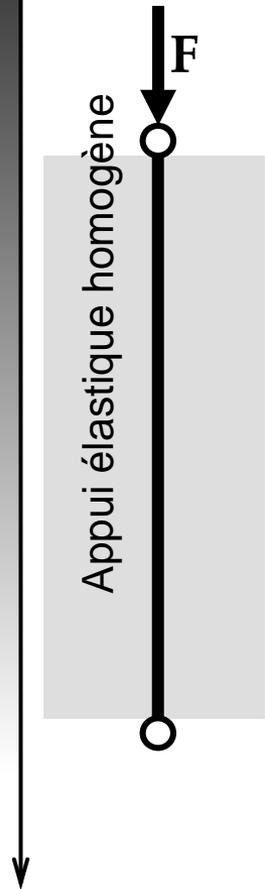
$$\left( \underline{\underline{\mathbf{K}^e}} + \underline{\underline{\mathbf{K}^s}} \right) \cdot \underline{\underline{\mathbf{y}}} = F \cdot \underline{\underline{\mathbf{M}}} \cdot \underline{\underline{\mathbf{y}}} \quad \text{Flambement}$$

F effort critique de flambement  $\Leftrightarrow$  F valeur propre du système



# Flambement et effets de 2nd ordre

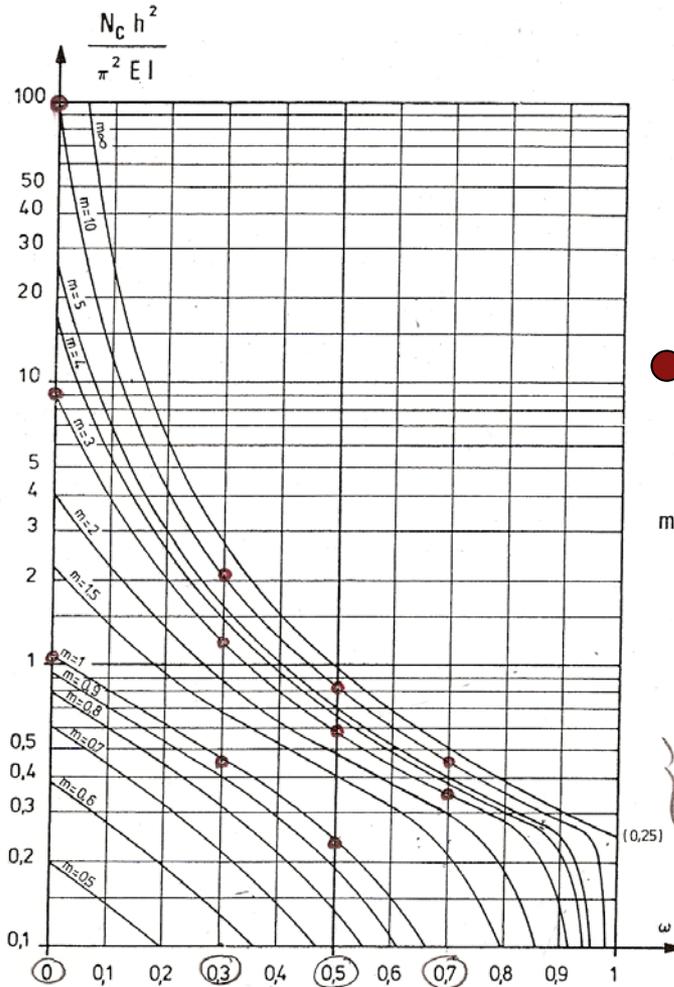
- Comparaison avec les solutions analytiques usuelles



$$m = \sqrt[4]{\frac{K_s B}{EI}} \times L$$

# Flambement et effets de 2nd ordre

- Comparaison avec les solutions analytiques usuelles



**SOUCHE, 1984**

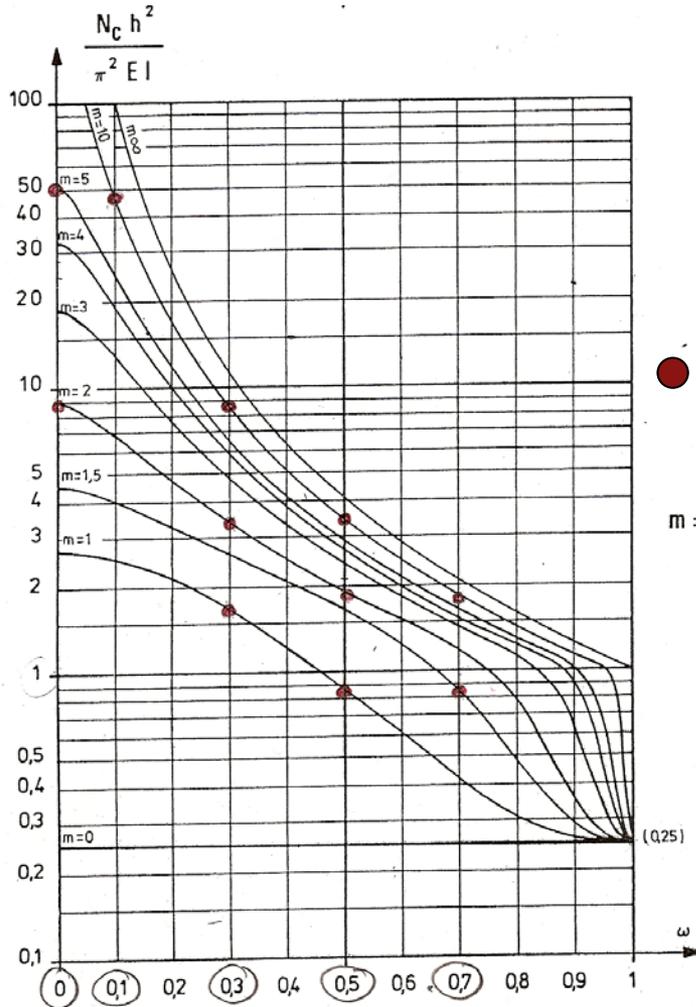
● Valeurs Piecoef+

$$m = \frac{h}{\pi} \sqrt[4]{\frac{K}{EI}}$$

$m = 1$   
 $m = 3$   
 $m = 10$

# Flambement et effets de 2nd ordre

- Comparaison avec les solutions analytiques usuelles



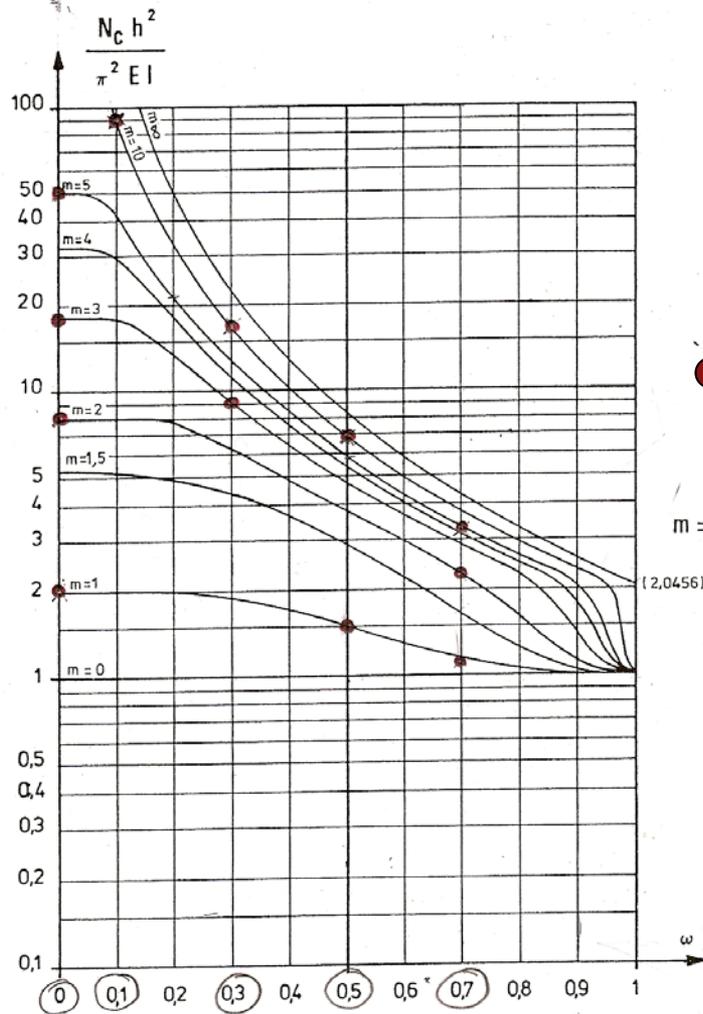
**SOUICHE, 1984**

● Valeurs Piecoef+

$$m = \frac{h}{\pi} \sqrt[4]{\frac{K}{EI}} \quad \Delta K = I$$

# Flambement et effets de 2nd ordre

## ■ Comparaison avec les solutions analytiques usuelles



**SOUCHE, 1984**

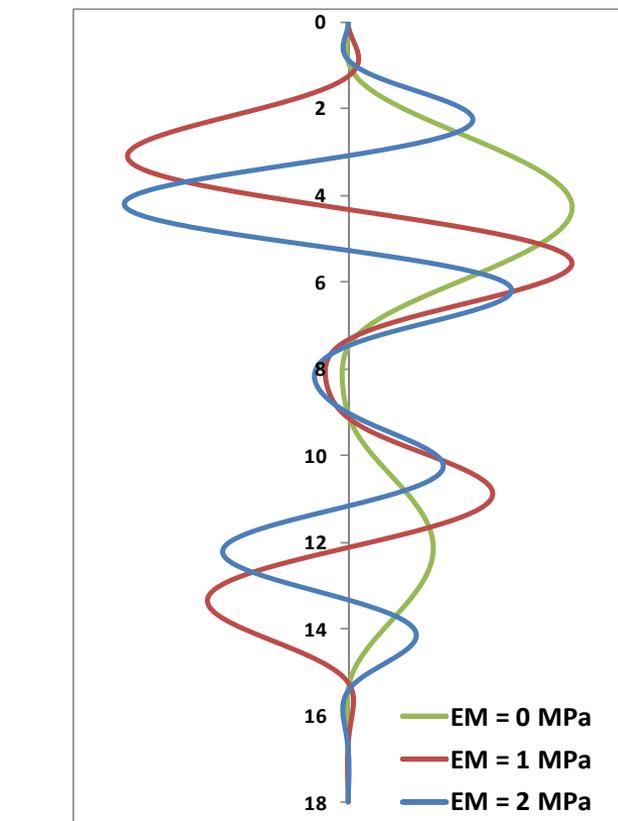
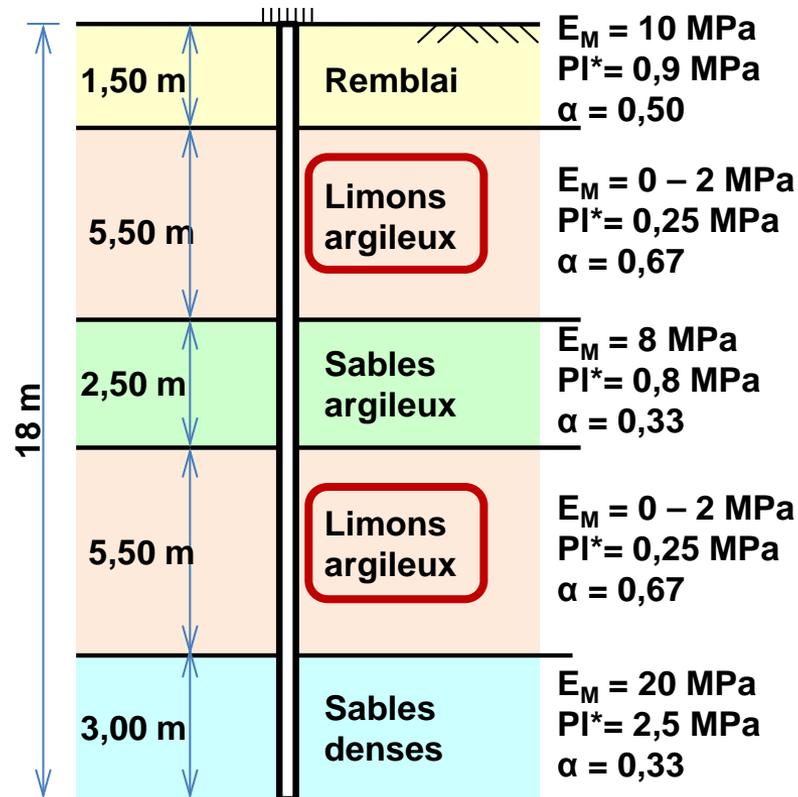
● Valeurs Piecoef+

$$m = \frac{h}{\pi} \sqrt[4]{\frac{K}{EI}}$$

- $m = 10$
- $m = 5$
- $m = 3$
- $m = 2$
- $m = 1$

# Flambement et effets de 2nd ordre

- Exemple : Micropieu dans un sol multicouche élastique

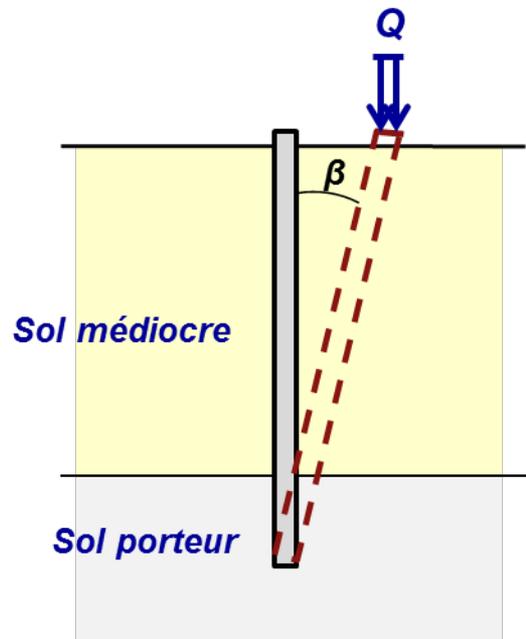


$E_M$ (MPa)	$F_{cr}$ (kN)
0	850
1	3400
2	4600

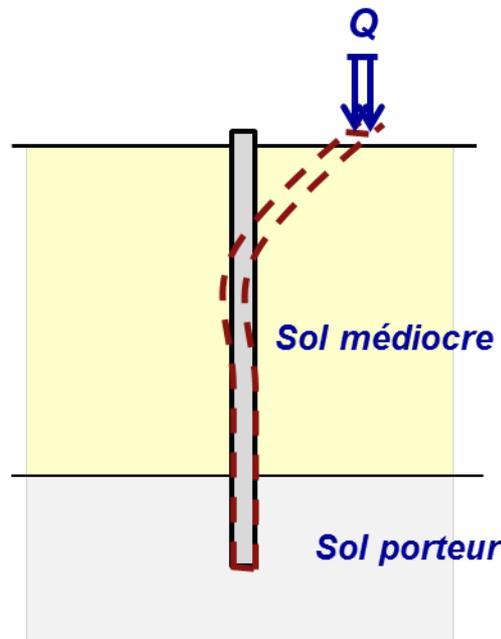
Mécanismes de flambement critiques en fonction du module pressiométrique  $E_M$  affecté aux limons argileux

Micropieu  
 $EI = 1000 \text{ kNm}^2$   
 $\Phi_{\text{forage}} = 25 \text{ cm}$

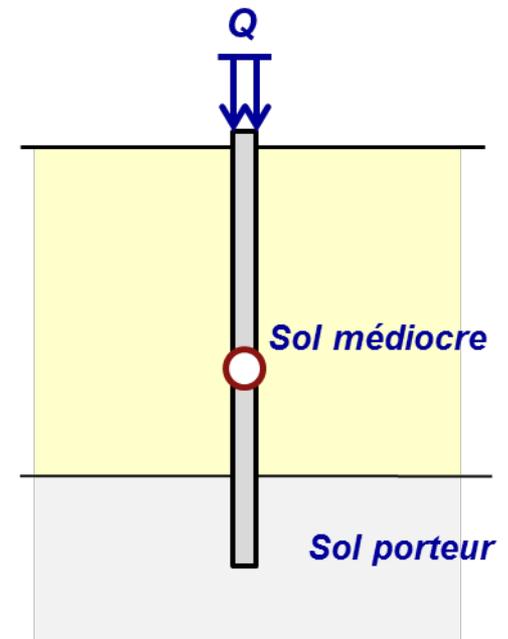
# Flambement et effets de 2nd ordre



**Cas 1 : défaut de verticalité sans courbure**



**Cas 2 : défaut de verticalité avec courbure**



**Cas 3 : défaut de bétonnage**

# Flambement et effets de 2nd ordre

⇒ Mise en équation : équilibre de 2<sup>nd</sup> ordre sous forme matricielle

$$\left( \underline{\underline{\mathbf{K}^e}} + \underline{\underline{\mathbf{K}^s}} \right) \cdot \underline{\mathbf{y}} = F \cdot \underline{\underline{\mathbf{M}}} \cdot \left( \underline{\mathbf{y}} + \underline{\mathbf{y}}_0 \right)$$

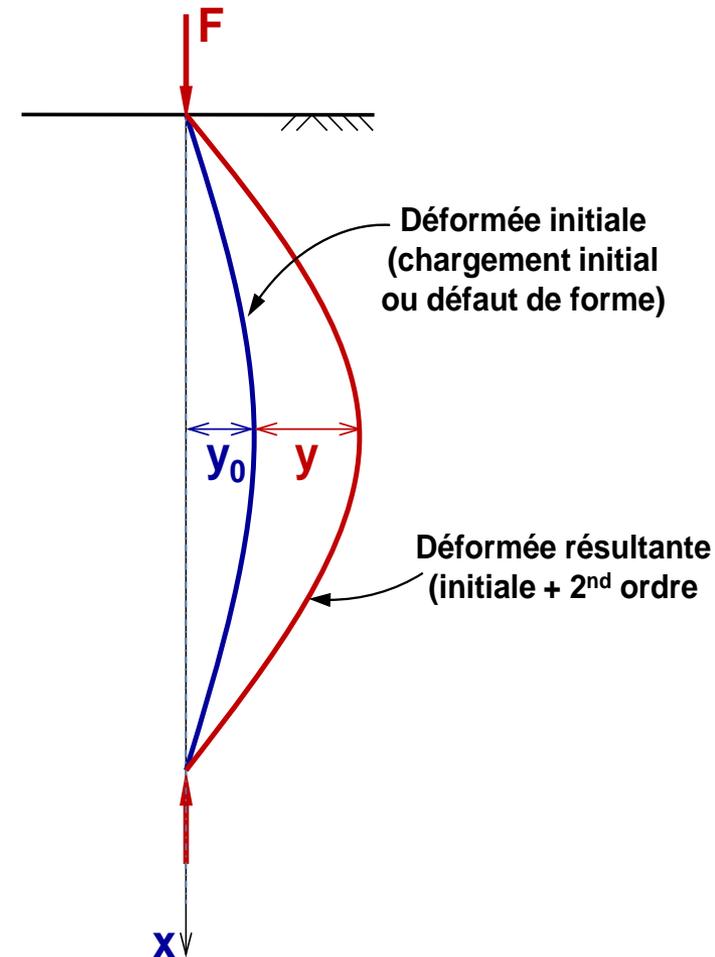
⇒ Décomposition de la déformée initiale selon les « modes propres » de flambement

$$\underline{\mathbf{y}}_0 = \sum_{i=1}^n \alpha_0^{(i)} \underline{\mathbf{y}}^{(i)}$$

⇒ Résolution par projections successives :

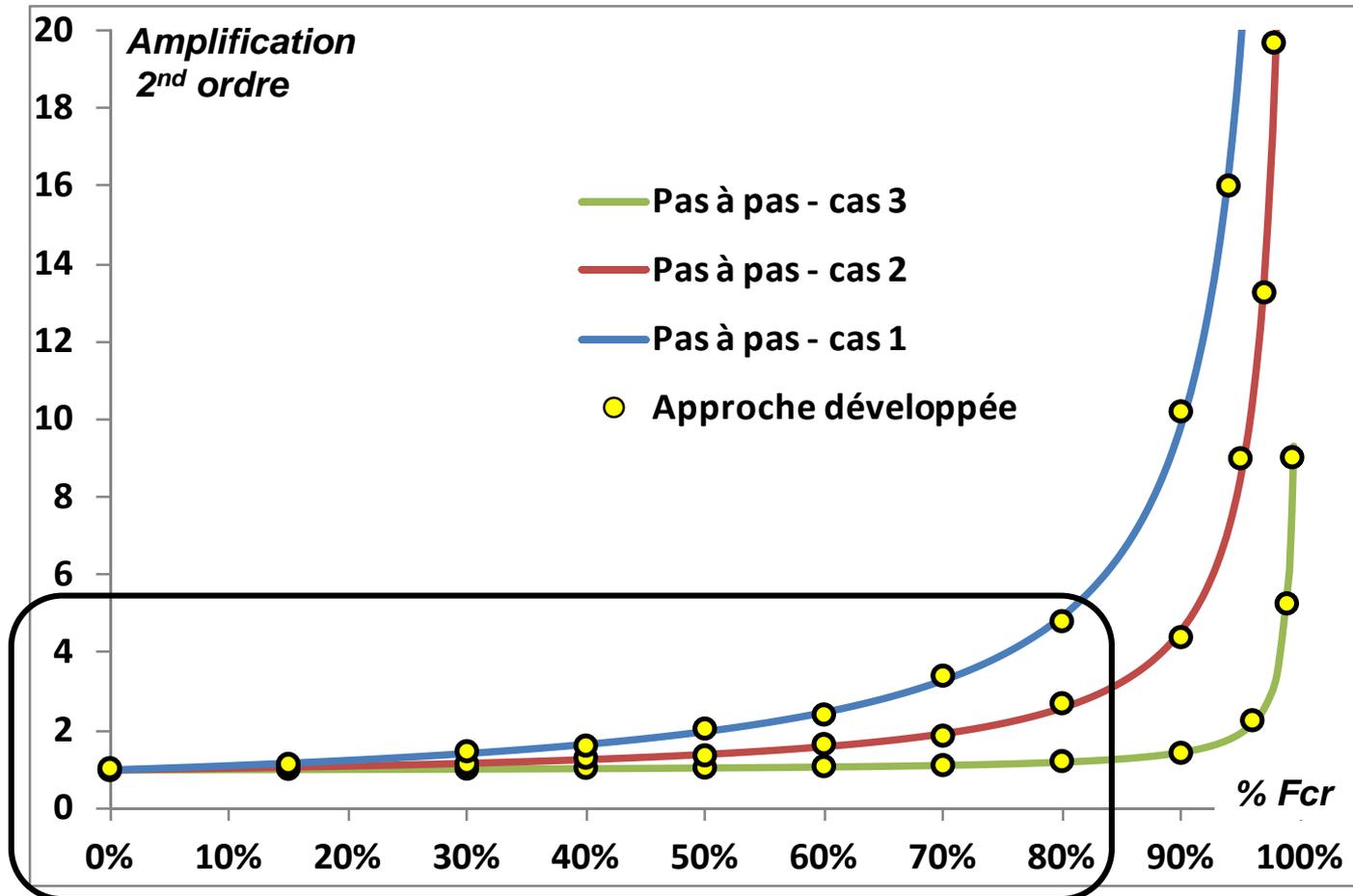
$$\underline{\mathbf{y}} + \underline{\mathbf{y}}_0 = \sum_{i=1}^n \underbrace{\left[ \frac{F^{(i)}}{F^{(i)} - F} \right]}_{\text{Facteur d'amplification}} \alpha_0^{(i)} \underline{\mathbf{y}}^{(i)}$$

Facteur d'amplification  
selon le « mode »  $i$



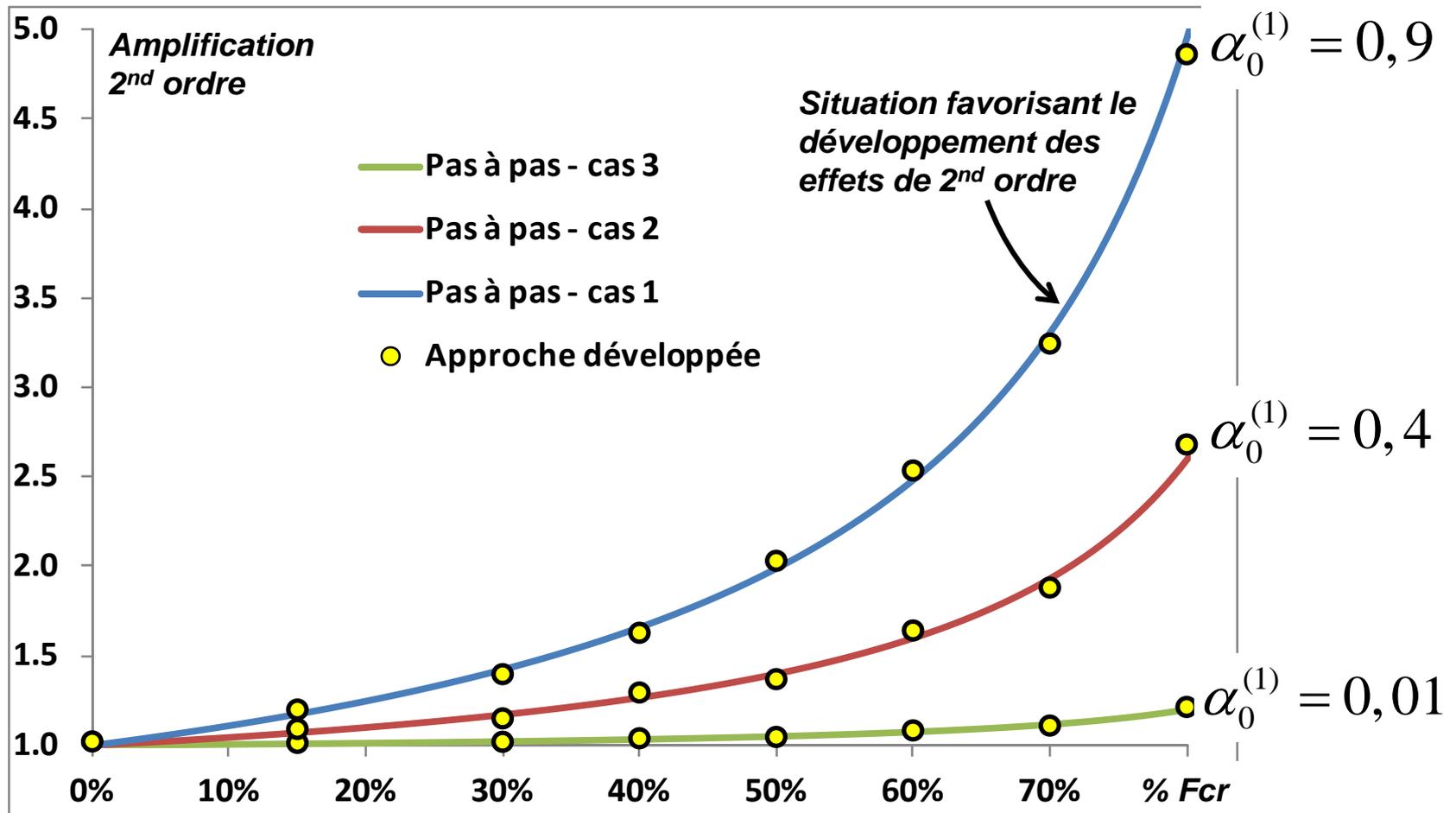
# Flambement et effets de 2nd ordre

⇒ Modes de comportement



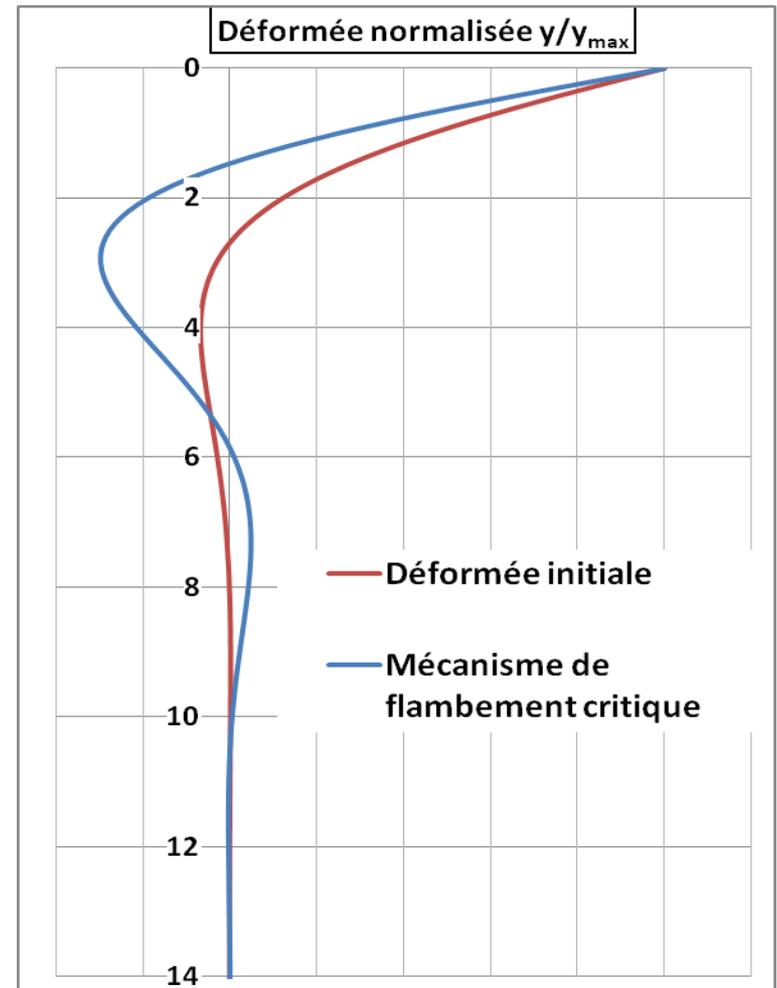
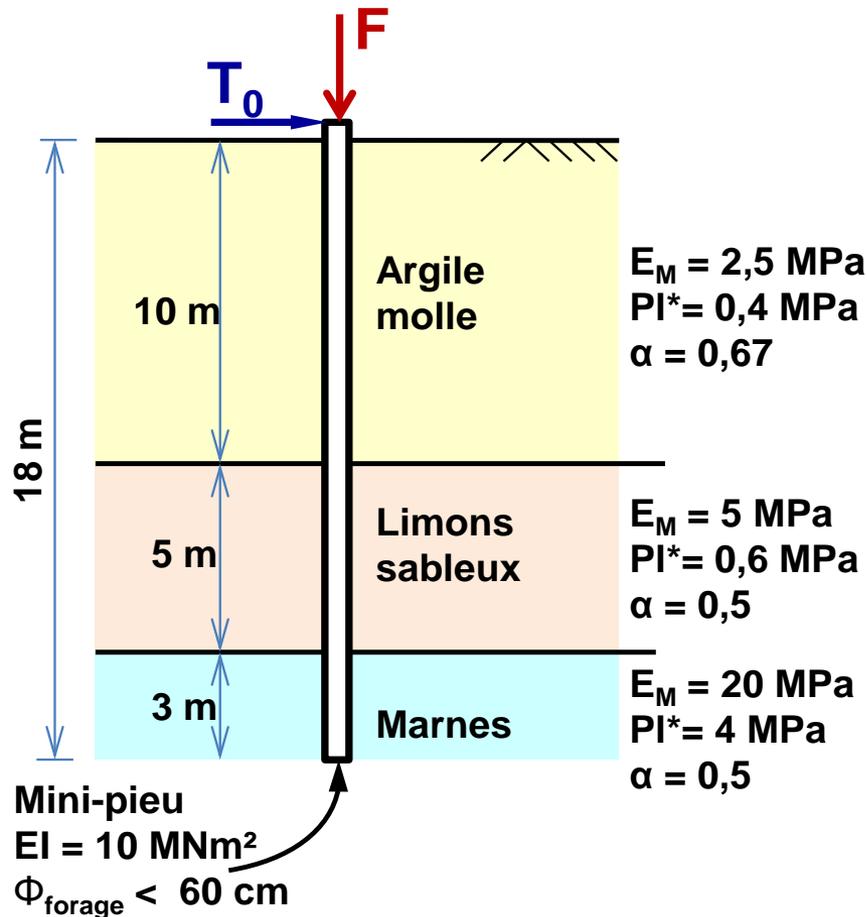
# Flambement et effets de 2nd ordre

⇒ Modes de comportement



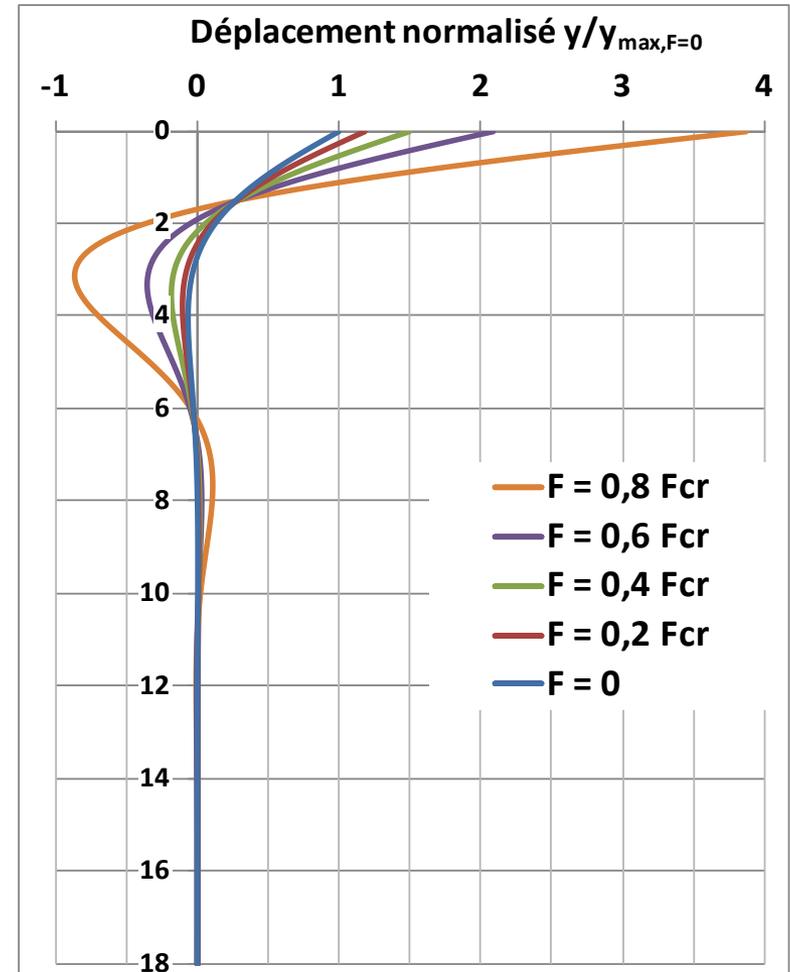
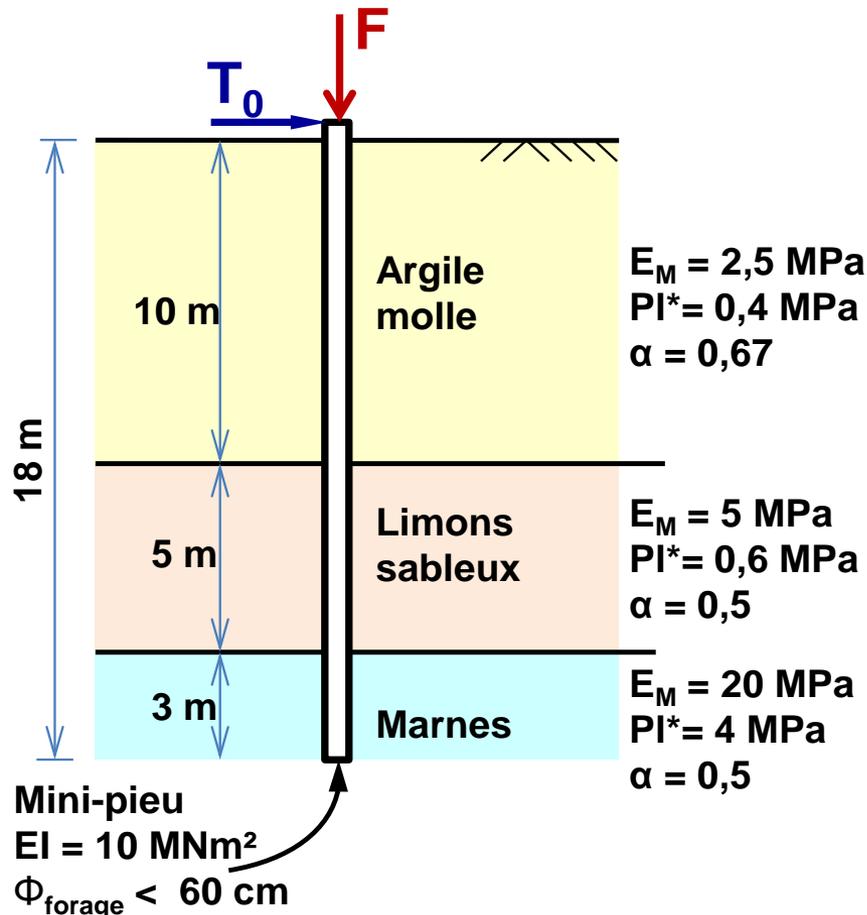
# Flambement et effets de 2nd ordre

⇒ Exemple 1



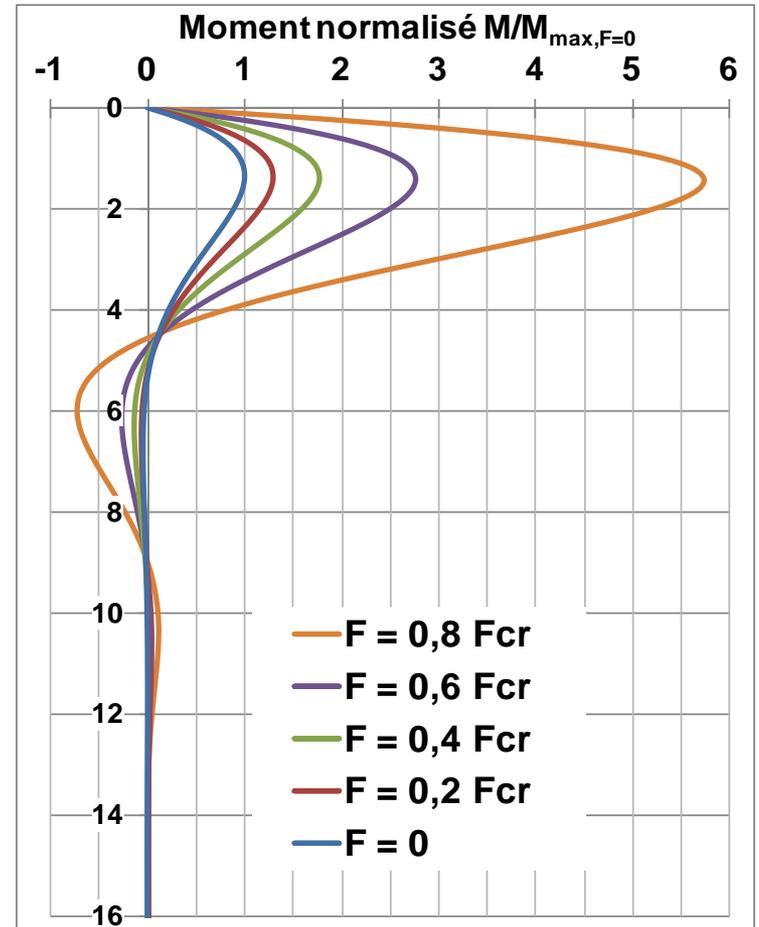
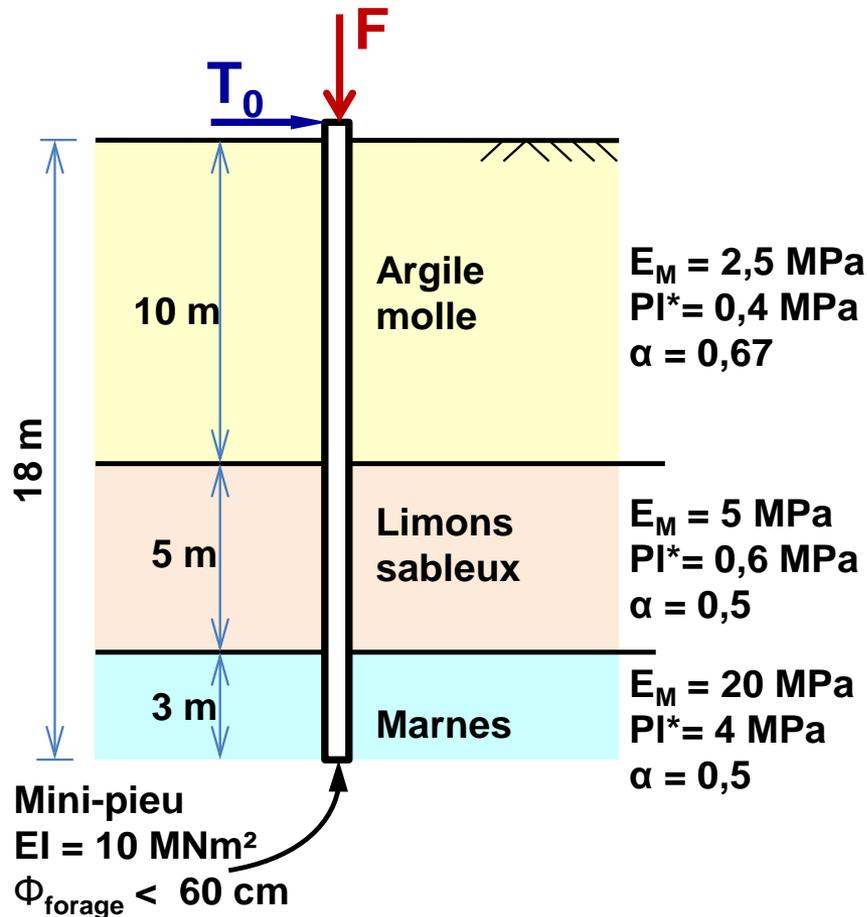
# Flambement et effets de 2nd ordre

⇒ Exemple 1



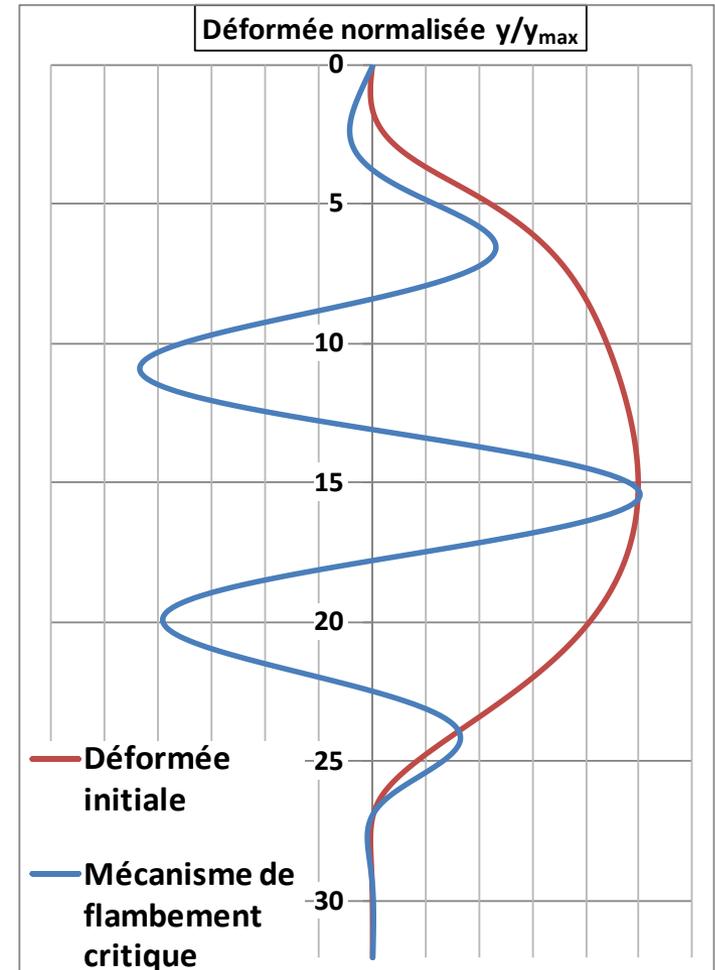
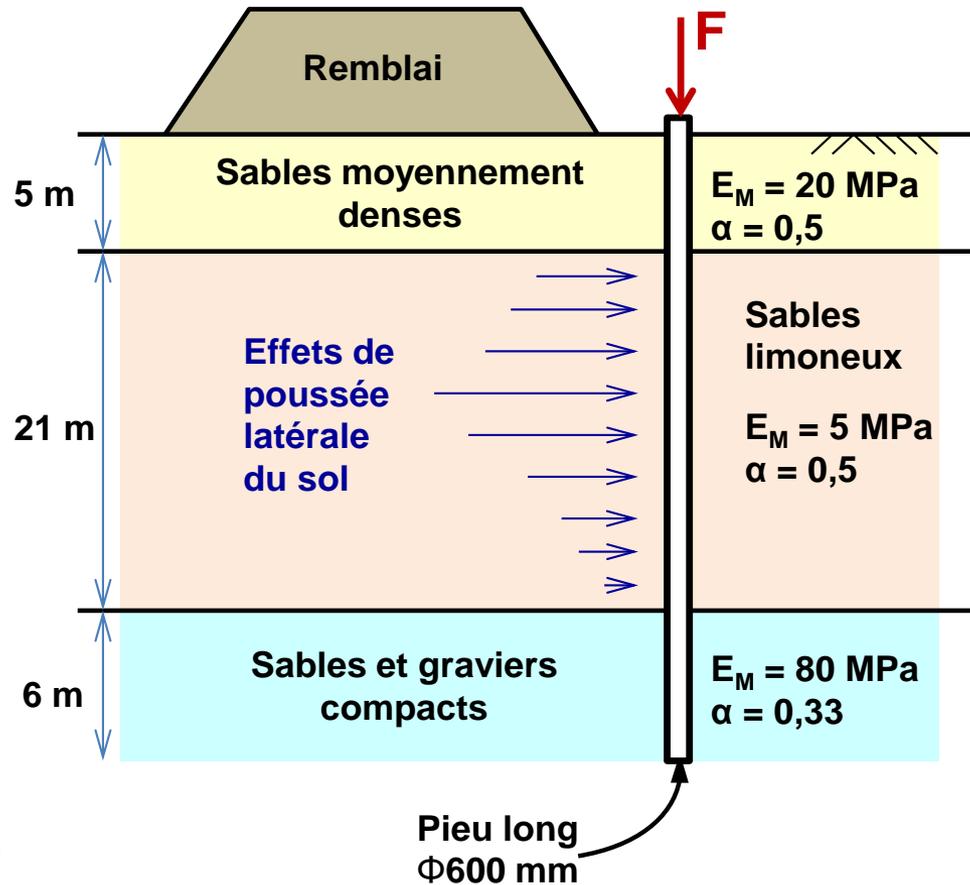
# Flambement et effets de 2nd ordre

⇒ Exemple 1



# Flambement et effets de 2nd ordre

⇒ Exemple 2



# Flambement et effets de 2nd ordre

⇒ Exemple 2

