

« Guide pour la conception et le dimensionnement des fondations profondes sous actions sismiques des bâtiments à risque normal »
Cahier technique n° 38 - Publication AVRIL 2017



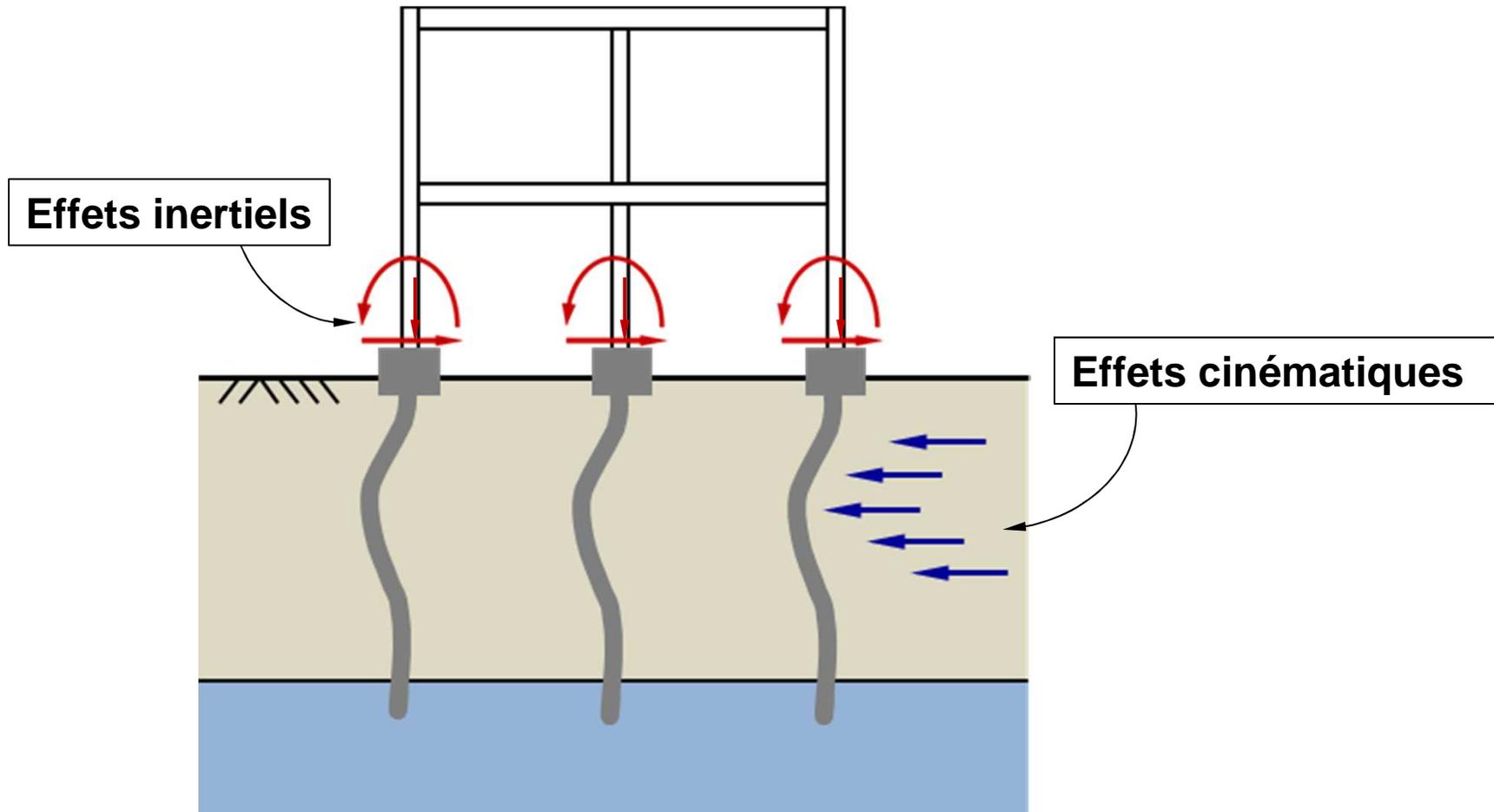
Traitement des effets inertiels dans le calcul des pieux sous séisme

Fahd Cuira
Terrasol



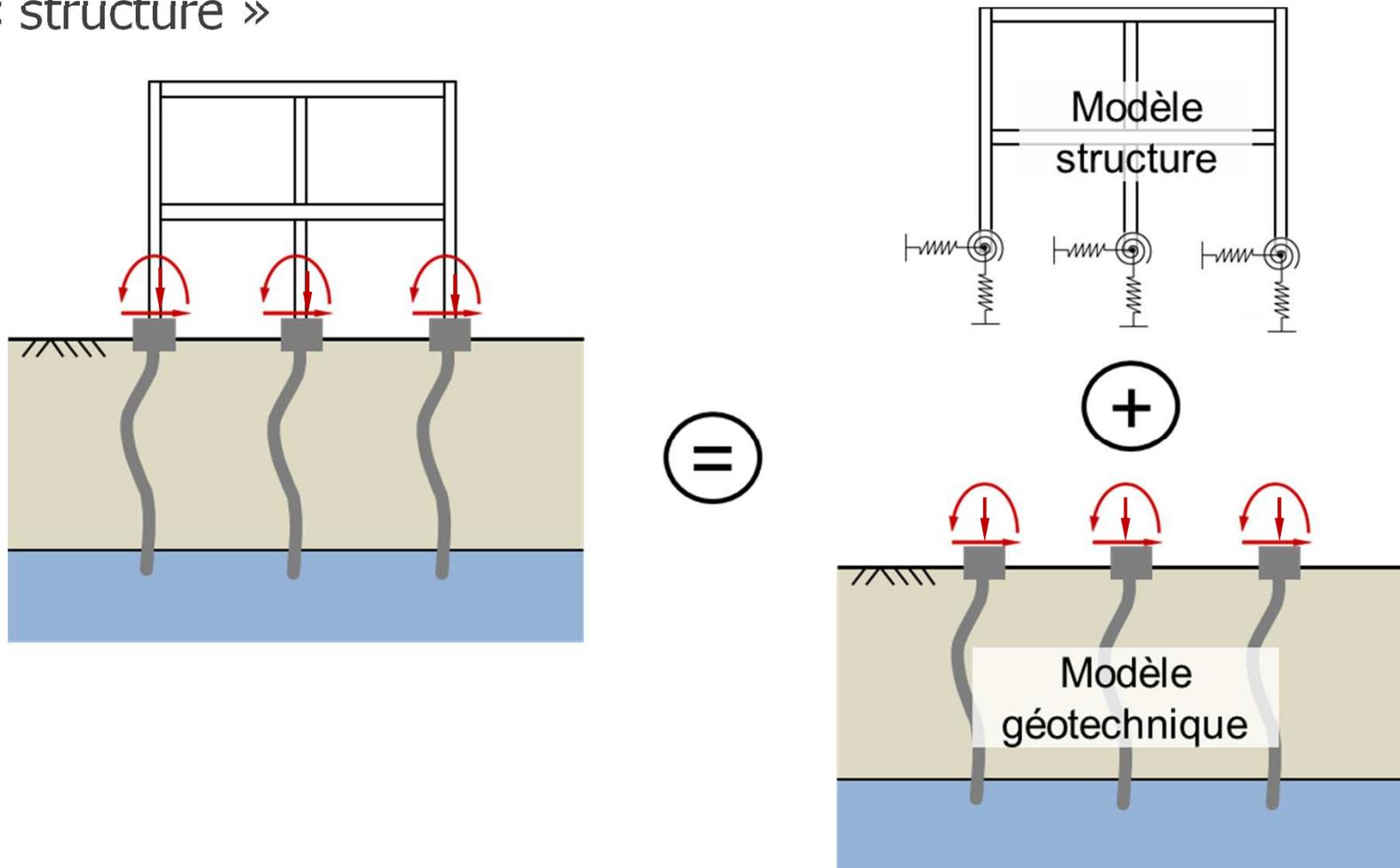
A propos des effets inertiels

- Effet inertiel = sollicitations liées aux forces d'inertie du bâtiment



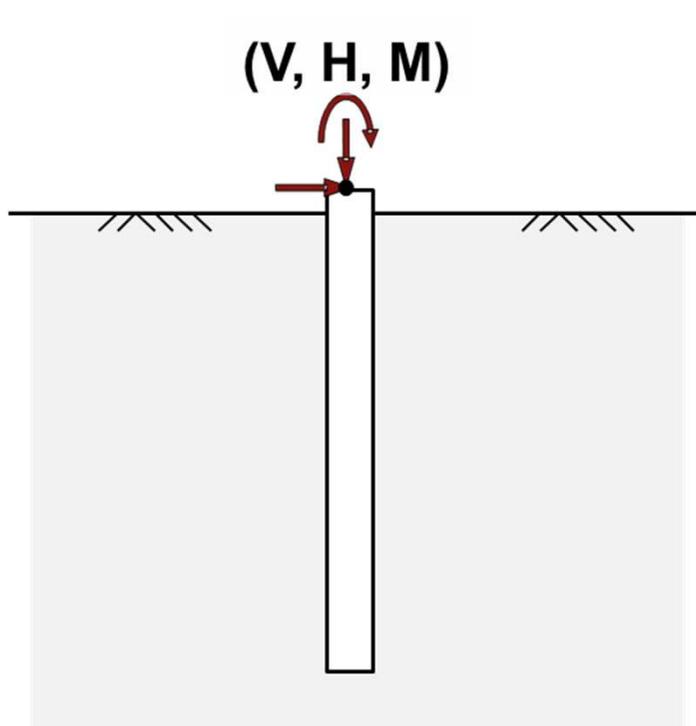
Traitement de l'interaction Structure/Pieux

- Approche usuelle : séparation des modèles « géotechnique » et « structure »



Représentation de la réponse en tête des pieux

- Matrice de rigidité en tête d'un pieu isolé : principe général



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

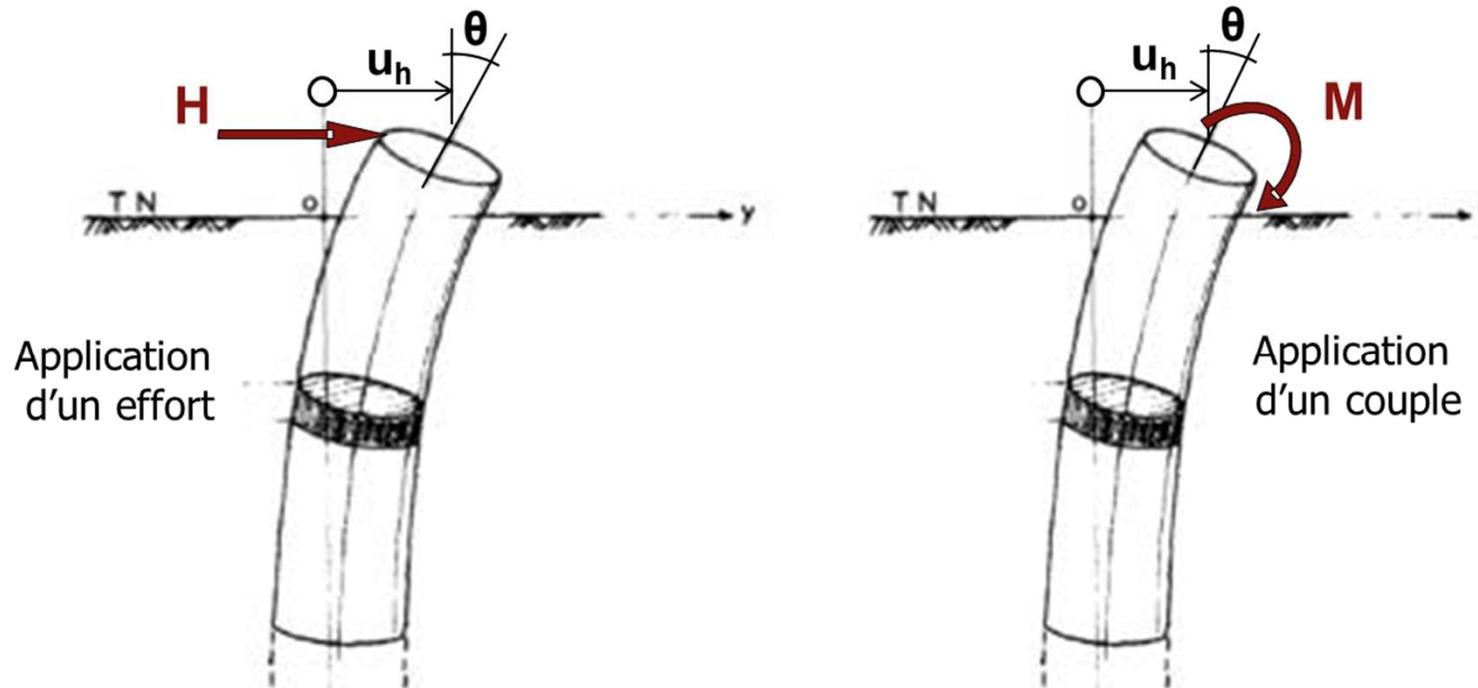
K_{HH} raideur en translation horizontale pure ($\theta = 0$)

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

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

Représentation de la réponse en tête des pieux

- Matrice de rigidité en tête d'un pieu isolé : termes de couplage



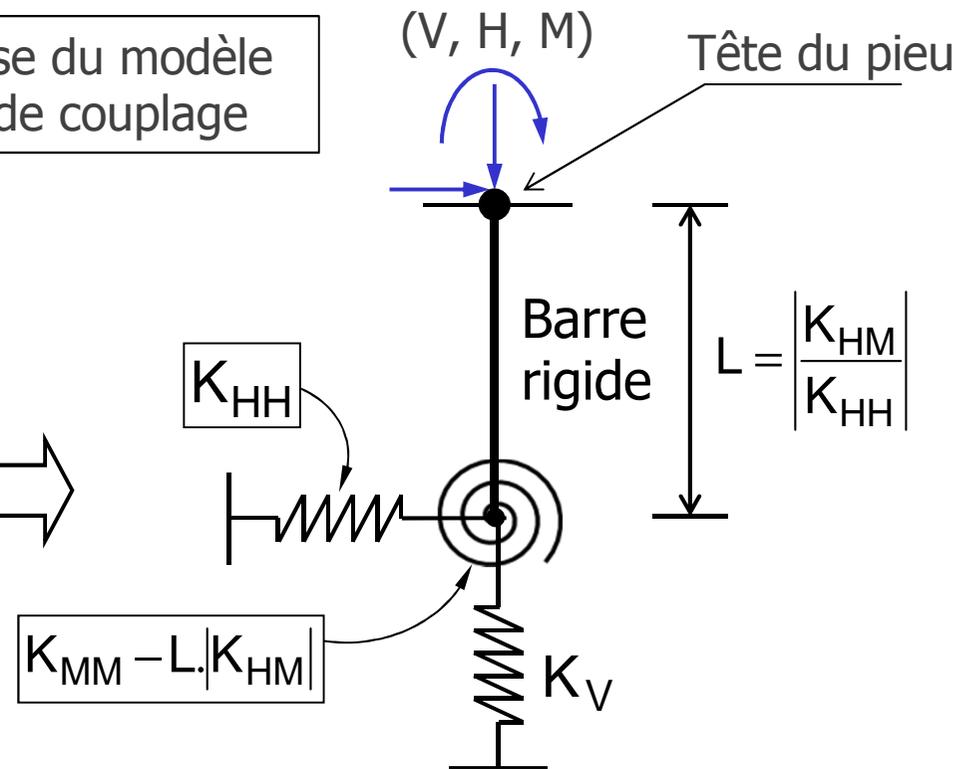
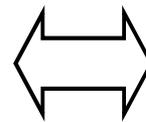
$$\begin{cases} H = K_{HH}u_h + K_{HM}\theta \\ M = K_{HM}u_h + K_{MM}\theta \end{cases}$$

Représentation de la réponse en tête des pieux

- Couplage avec le modèle structure : méthode « directe »

L'introduction d'une barre rigide à la base du modèle structure permet de simuler les termes de couplage

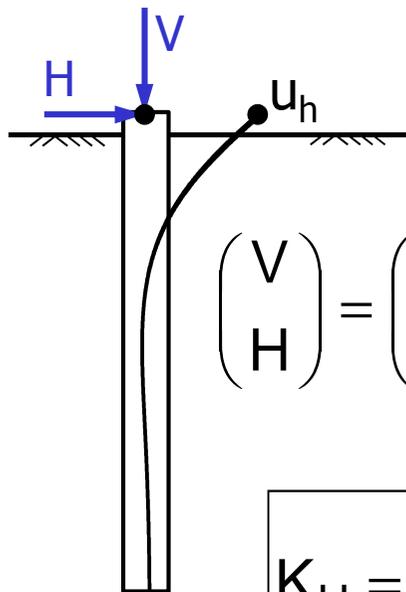
$$\begin{pmatrix} V \\ H \\ M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_V & 0 & 0 \\ 0 & K_{HH} & K_{HM} \\ 0 & K_{HM} & K_{MM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_v \\ u_h \\ \theta \end{pmatrix}$$



Représentation de la réponse en tête des pieux

- Couplage avec le modèle structure : méthode « simplifiée »

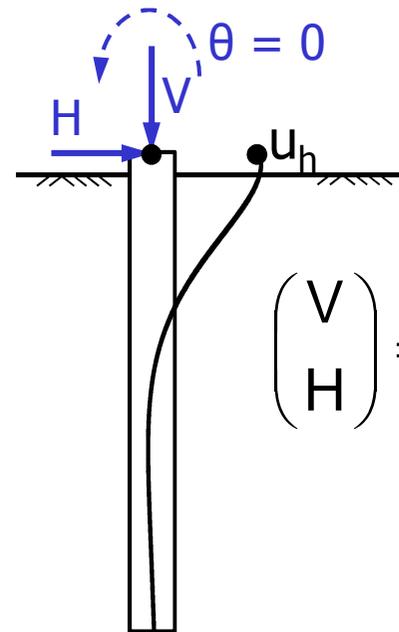
Rotation libre en tête ($M = 0$)



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

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

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

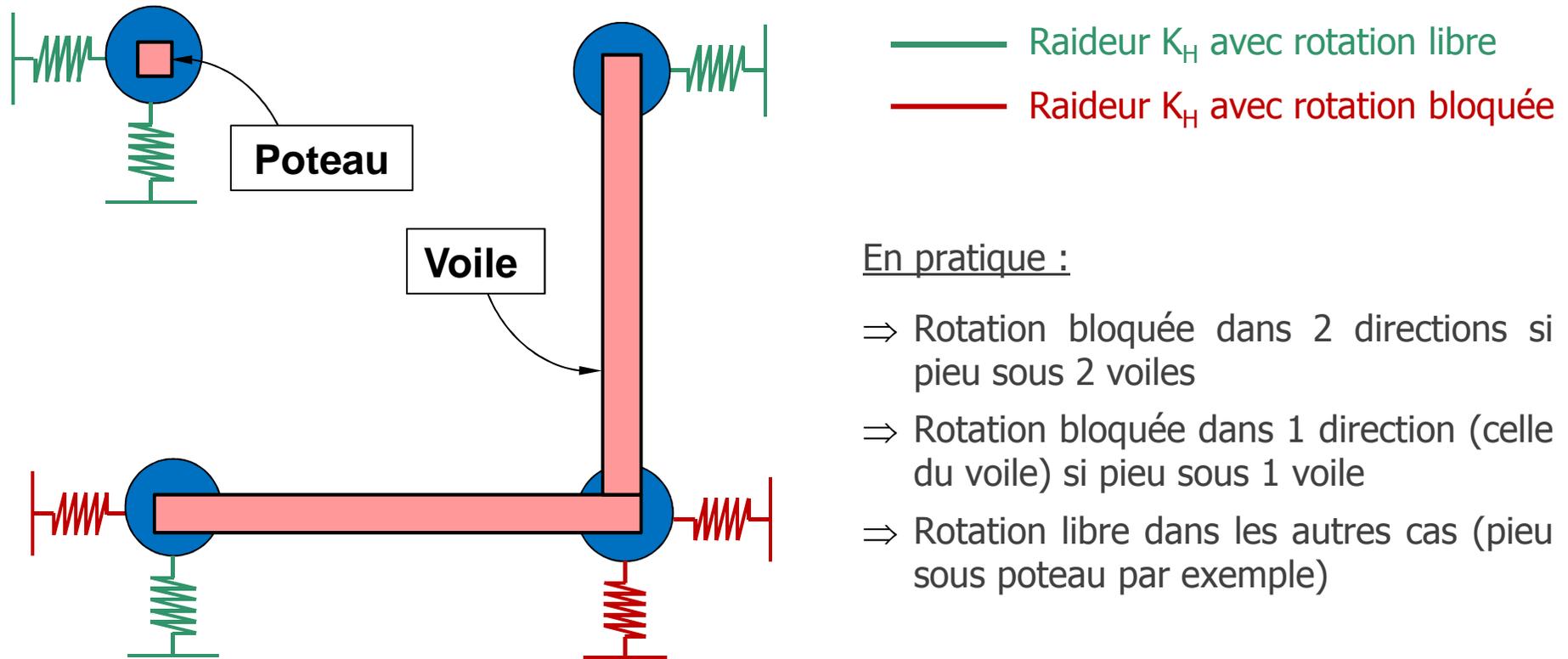


$$\begin{pmatrix} V \\ H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_V & 0 \\ 0 & K_H \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_v \\ u_h \end{pmatrix}$$

$$K_H = K_{HH}$$

Représentation de la réponse en tête des pieux

- Couplage avec le modèle structure : méthode « simplifiée »



Calcul des raideurs et sollicitations

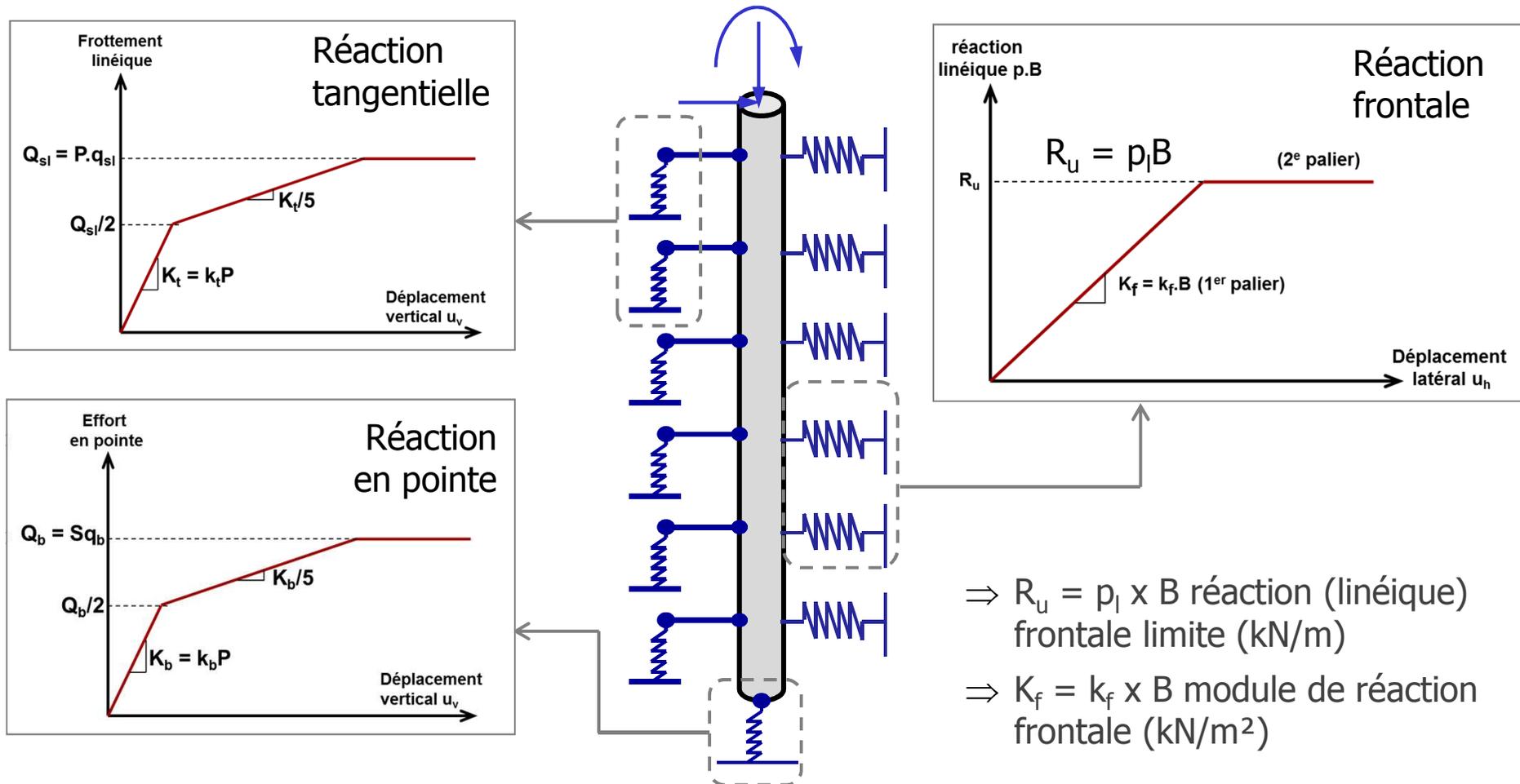
➤ Modèles dérivés de la théorie de l'élasticité

Modèle de sol	$\frac{K_{HH}}{dE_s}$	$\frac{K_{MM}}{d^3E_s}$	$\frac{K_{HM}}{d^2E_s}$
$E = E_s \cdot z/d$	$0,60 \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{0,35}$	$0,14 \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{0,80}$	$-0,17 \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{0,60}$
$E = E_s \sqrt{z/d}$	$0,79 \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{0,28}$	$0,15 \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{0,77}$	$-0,24 \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{0,53}$
$E = E_s$	$1,08 \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{0,21}$	$0,16 \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{0,75}$	$-0,22 \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{0,50}$

d = diamètre du pieu, E_p = module du pieu, E_s = module du sol à $z = d$

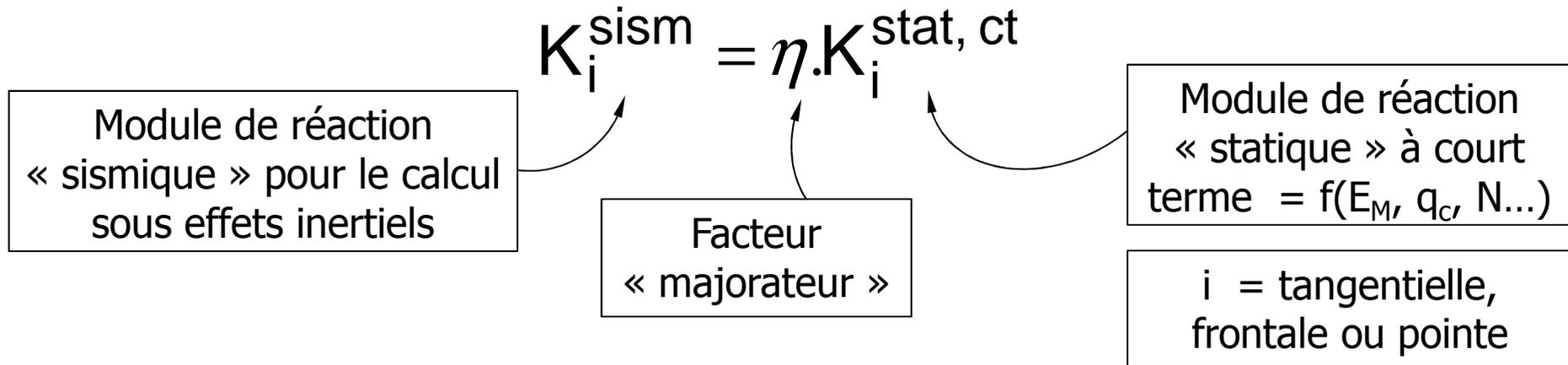
Calcul des raideurs et sollicitations

➤ Modèles dérivés de la théorie des courbes de transfert t-z / p-y



Calcul des raideurs et sollicitations

- Estimation des modules de réaction : approche « forfaitaire »



$$\eta = \min(\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3, 3)$$

⇒ η_1 : facteur lié à la « brièveté » de l'action

⇒ η_2 : facteur lié à l'intensité du séisme (zonage)

⇒ η_3 : facteur lié au niveau de distorsion (comportement latéral)

Calcul des raideurs et sollicitations

- Estimation des modules de réaction : approche « forfaitaire »

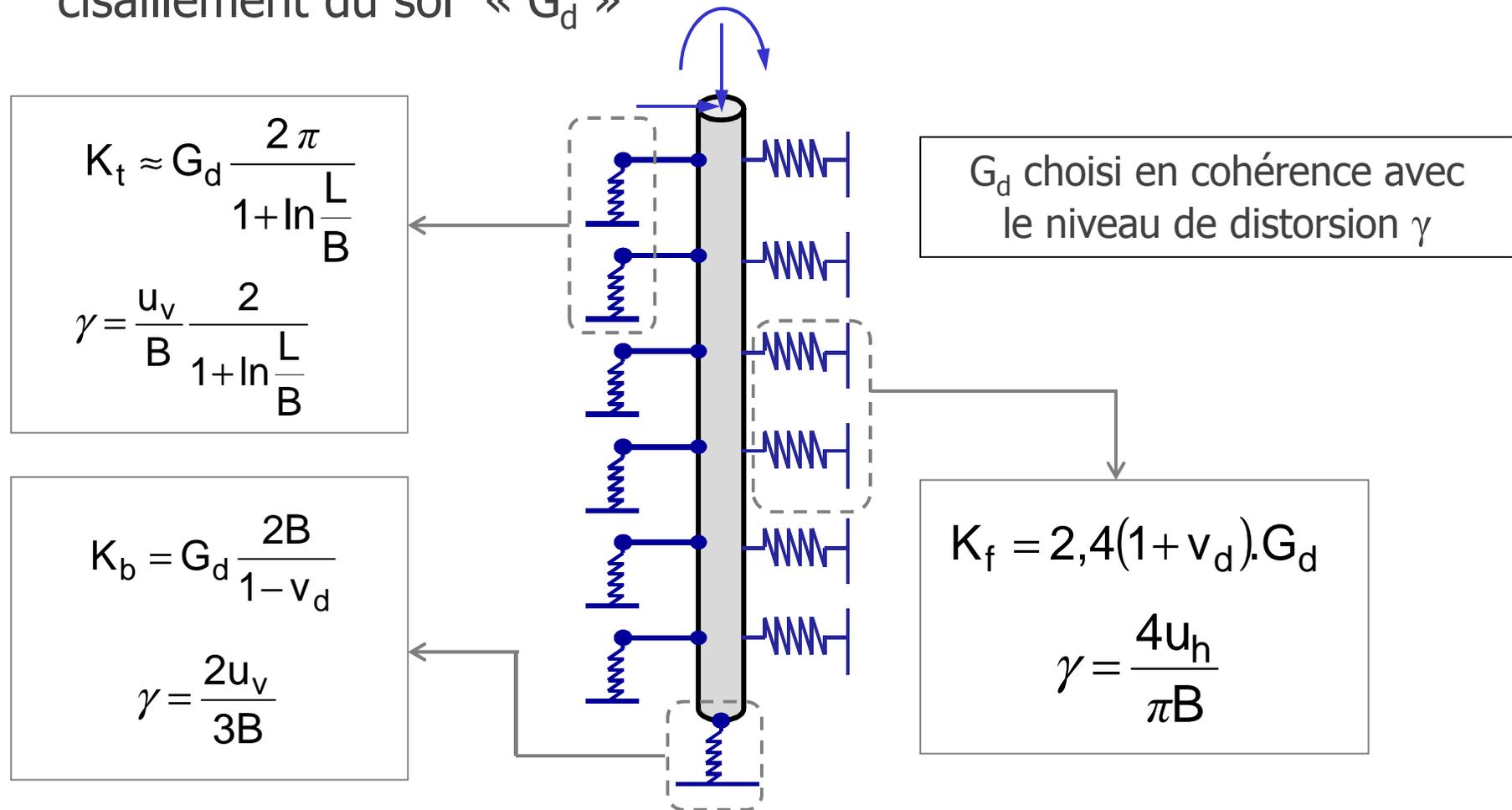
$$\eta = \min(\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3, 3)$$

Zone de sismicité	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
η_1	3,0	2,0	1,5	1,0
η_2	1,5	1,5	1,0	1,0

Réaction frontale	$\leq 0,25 R_u$	0,25 à 0,50 R_u	0,50 à 0,75 R_u	0,75 à 1,00 R_u
η_3	3,0	2,0	1,5	1,0

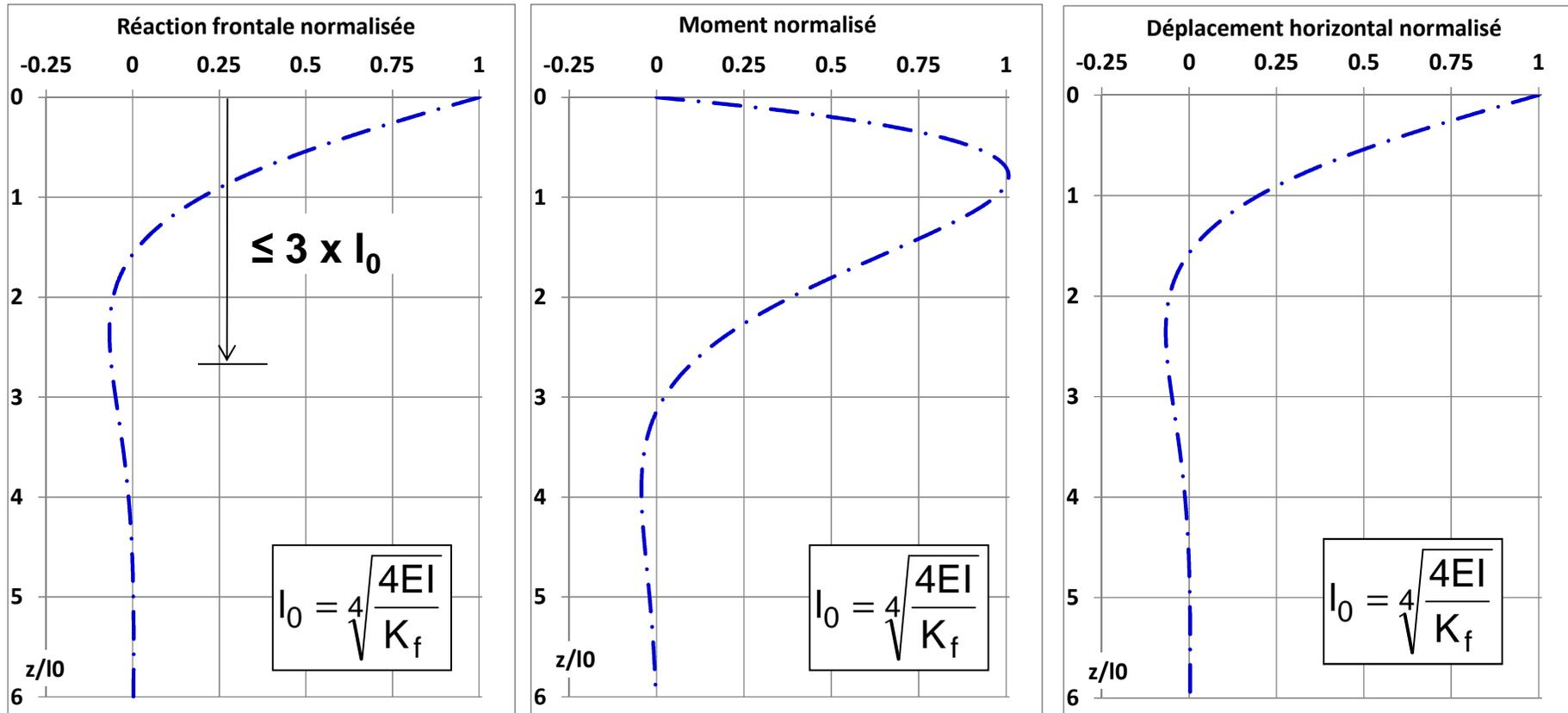
Calcul des raideurs et sollicitations

- Estimation des modules de réaction à partir du module de cisaillement du sol « G_d »



Mise en œuvre : en phase élastique

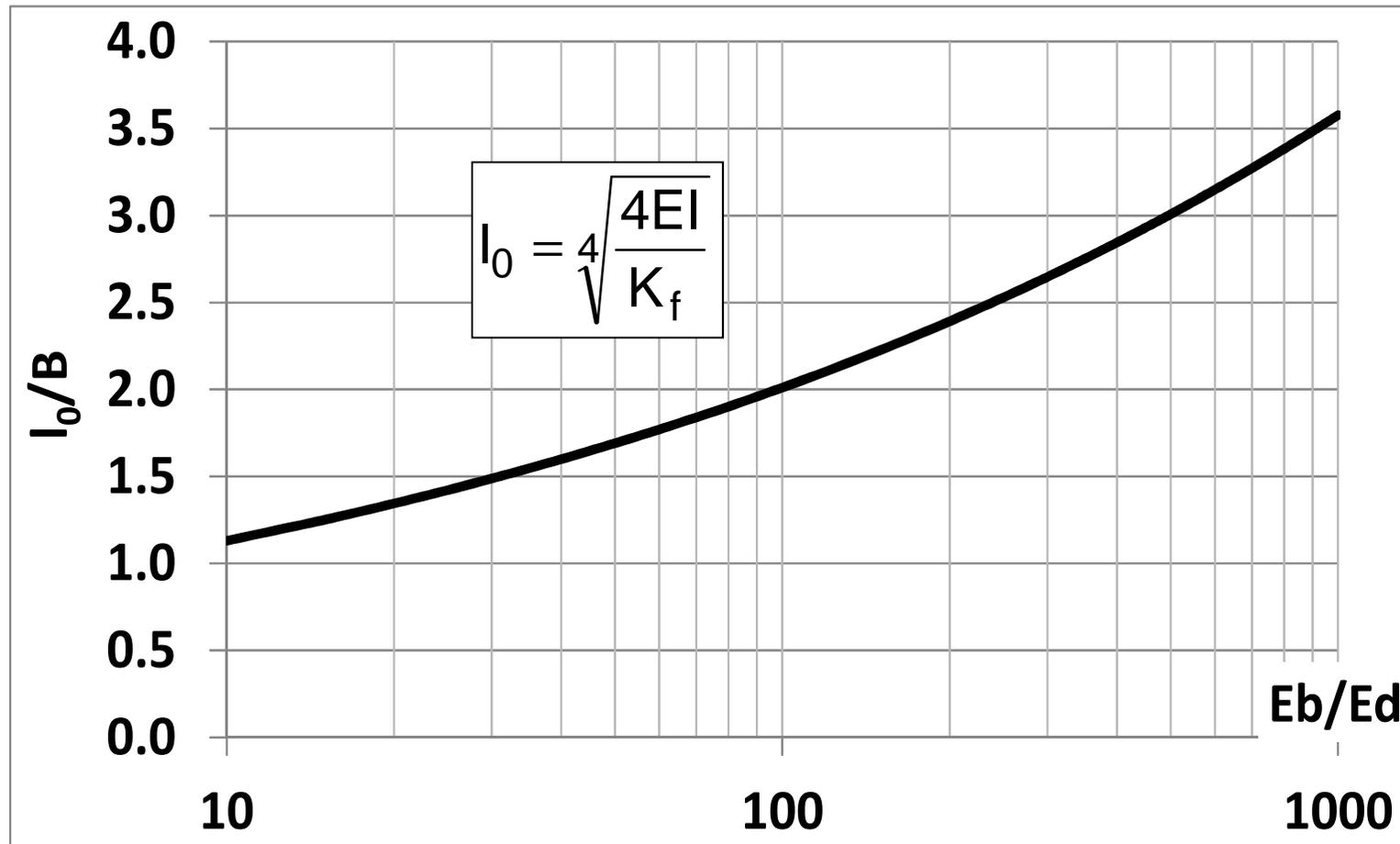
- Comportement latéral contrôlé par celui des horizons superficiels



Exemple d'un pieu articulé en tête dans sol homogène (rotation libre)

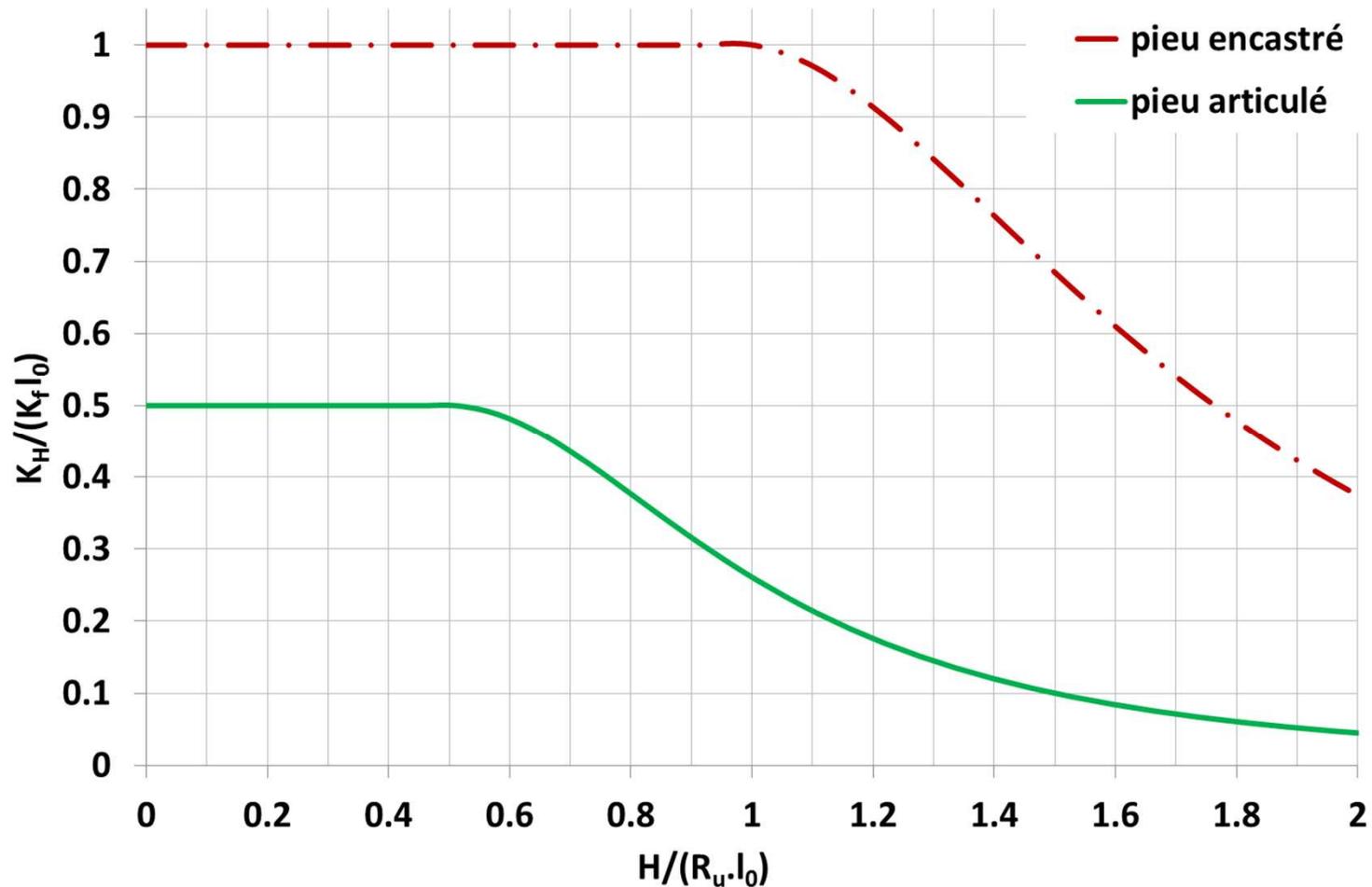
Mise en œuvre : en phase élastique

- Comportement latéral contrôlé par celui des horizons superficiels



Mise en œuvre : influence de la plasticité

➤ Génération d'une courbe de dégradation de la raideur en tête



Mise en œuvre : influence de la plasticité

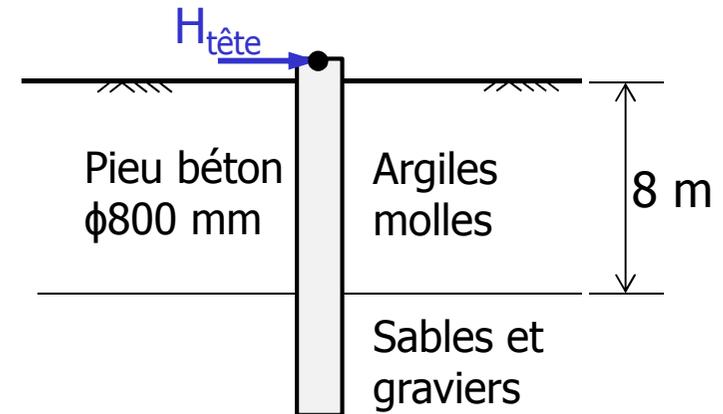
➤ Exemple d'un pieu béton $\phi 800\text{mm}$

$$B = 0,8 \text{ m}, E_b = 30 \text{ GPa}$$

$$p_l = 0,2 \text{ MPa} \Rightarrow R_u = 0,16 \text{ MN/m}$$

$$K_f = 72 \text{ MPa/m}, l_0 = 2,4 \text{ m}$$

Rotation libre en tête ($M_{\text{tête}} = 0$)



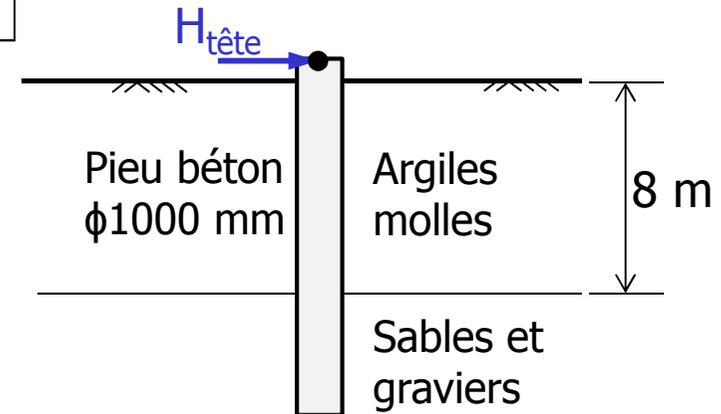
$H_{\text{tête}}$ (kN)	$H/(R_u \times l_0)$	K_H (MN/m)
95	0,25	86
125	0,33	86
255	0,67	78
385	1,00	45
510	1,33	23
640	1,67	17
770	2,00	8

Mise en œuvre : influence de la plasticité

➤ Exemple d'un pieu béton $\phi 1000\text{mm}$

$B = 1,0 \text{ m}$, $E_b = 30 \text{ GPa}$
 $\rho_l = 0,2 \text{ MPa} \Rightarrow R_u = 0,20 \text{ MN/m}$
 $K_f = 72 \text{ MPa/m}$, $l_0 = 3,0 \text{ m}$

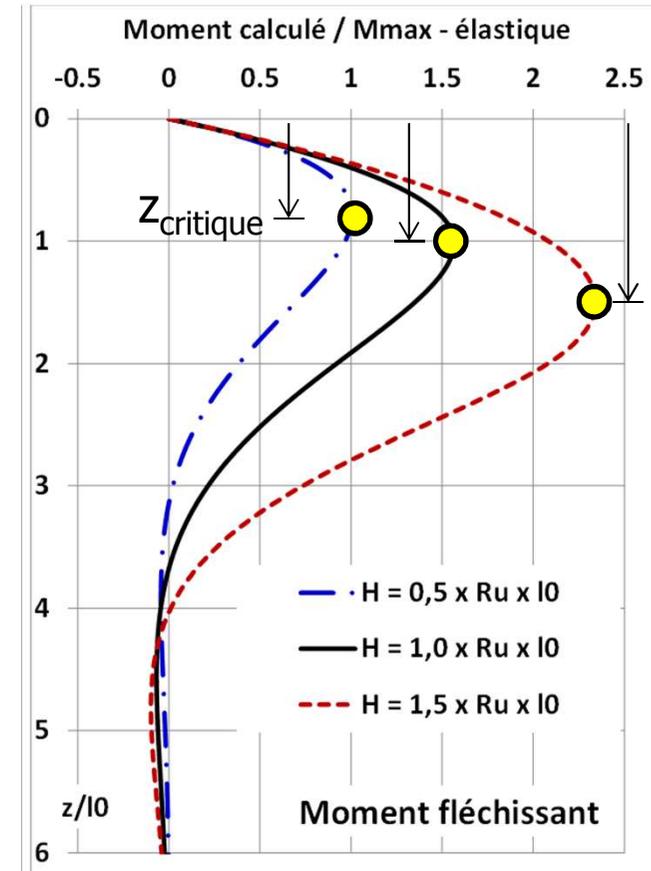
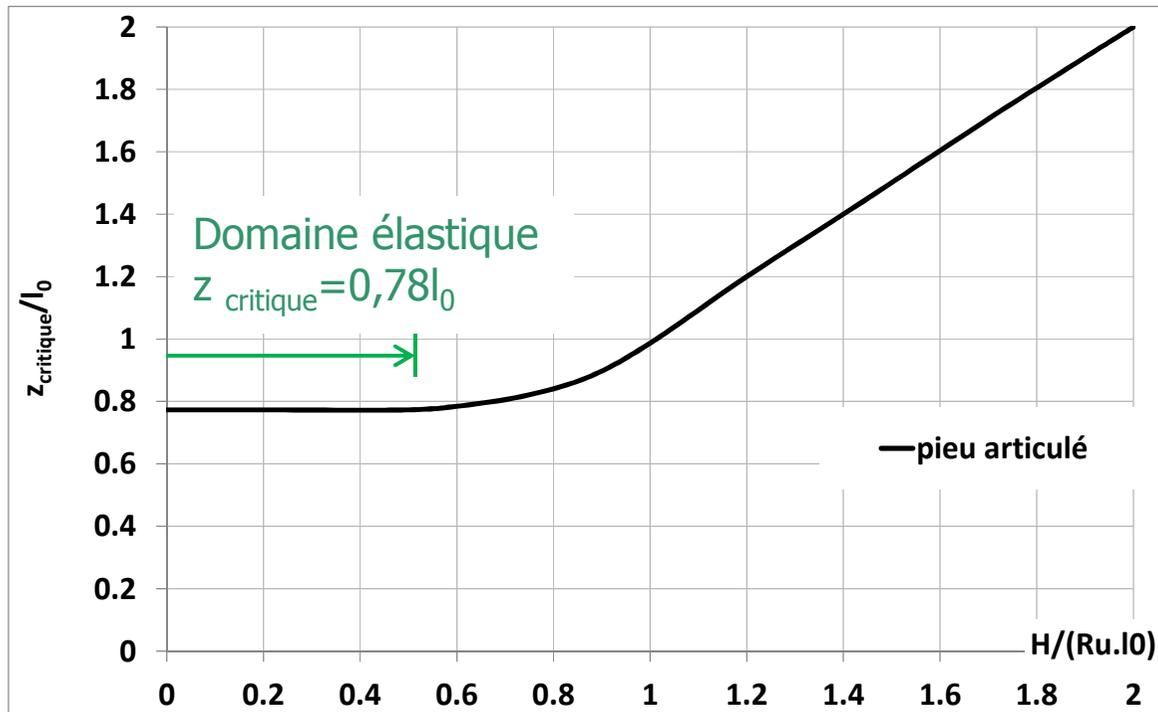
Rotation libre en tête ($M_{\text{tête}} = 0$)



Données		Calcul élastique	Calcul élasto-plastique
$H_{\text{tête}}$ (MN)	$H/(R_u \times l_0)$	M_{max} (MNm)	M_{max} (MNm)
0,15	0,25	0,15	0,15
0,20	0,33	0,19	0,19
0,40	0,67	0,39	0,42
0,60	1,00	0,58	0,90
0,80	1,33	0,77	1,60
1,00	1,67	0,97	2,50
1,20	2,00	1,16	3,60

Mise en œuvre : influence de la plasticité

- Sur les sollicitations d'origine inertielle : profondeur critique



Cas d'un pieu articulé en tête dans sol homogène (rotation libre)

Ce qu'il faut retenir

- Représentation de la réponse en tête d'un pieu
 - Méthode directe tenant compte des termes de couplage (pouvant être simulés en décalant par barre rigide le point d'application)
 - Méthode simplifiée nécessitant un choix (BET) conventionnel (choix BET) sur la condition de rotation en tête du pieu (rotation libre ou bloquée)
- Caractérisation de l'interaction sol/pieu
 - Modèles t-z/p-y adaptés aux conditions de chargement sismique
 - Module de réaction estimé soit par majoration du module de réaction statique (court terme) soit par corrélation directe avec le module de cisaillement du sol
- Mise en œuvre : influence de la plasticité
 - Notable sous chargement latéral : raideur et sollicitation
 - N'est pas nécessairement favorable au dimensionnement !

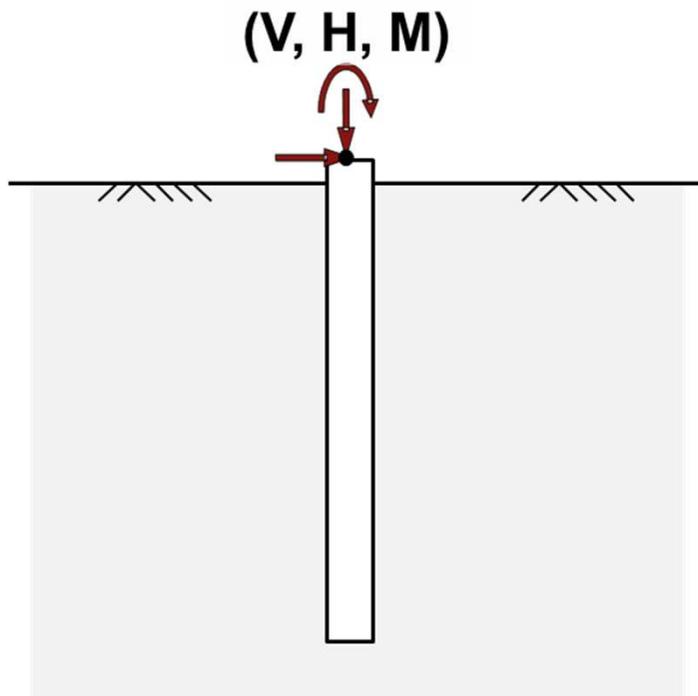


Merci de votre attention



Représentation de la réponse en tête des pieux

- Matrice de rigidité en tête d'un pieu isolé : principe général



Matrice de rigidité

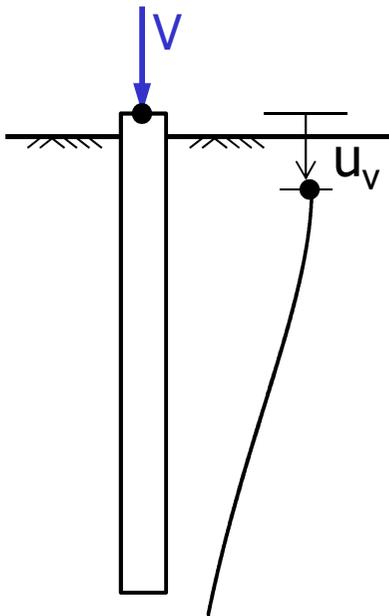
$$\begin{pmatrix} V \\ H \\ M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_V & 0 & 0 \\ 0 & K_{HH} & K_{HM} \\ 0 & K_{HM} & K_{MM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_v \\ u_h \\ \theta \end{pmatrix}$$

Matrice de souplesse

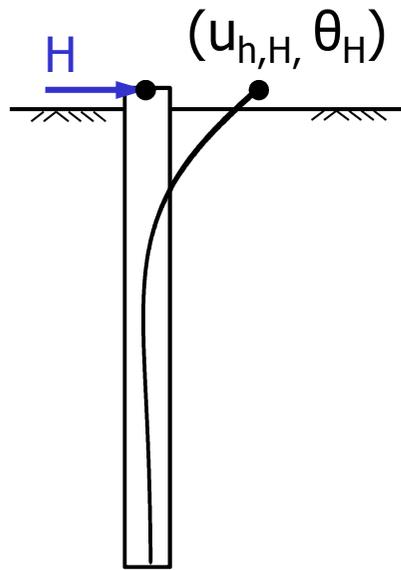
$$\begin{pmatrix} u_v \\ u_h \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_V & 0 & 0 \\ 0 & S_{HH} & S_{HM} \\ 0 & S_{HM} & S_{MM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V \\ H \\ M \end{pmatrix}$$

Représentation de la réponse en tête des pieux

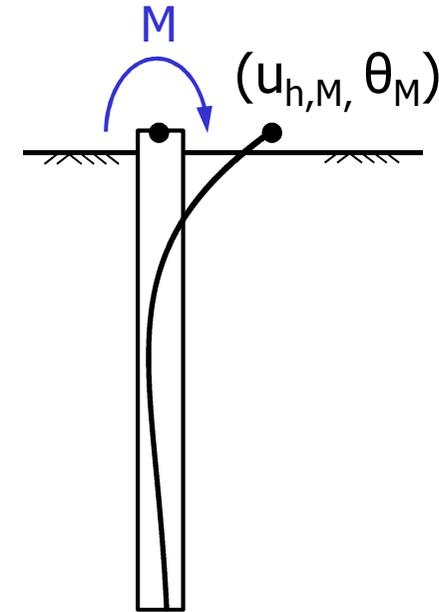
- Détermination pratique de la matrice de souplesse



$$S_V = \frac{u_v}{V}$$



$$S_{HH} = \frac{u_{h,H}}{H} \quad S_{HM} = \frac{\theta_H}{H}$$



$$S_{MH} = \frac{u_{h,M}}{M} \quad S_{MM} = \frac{\theta_M}{M}$$

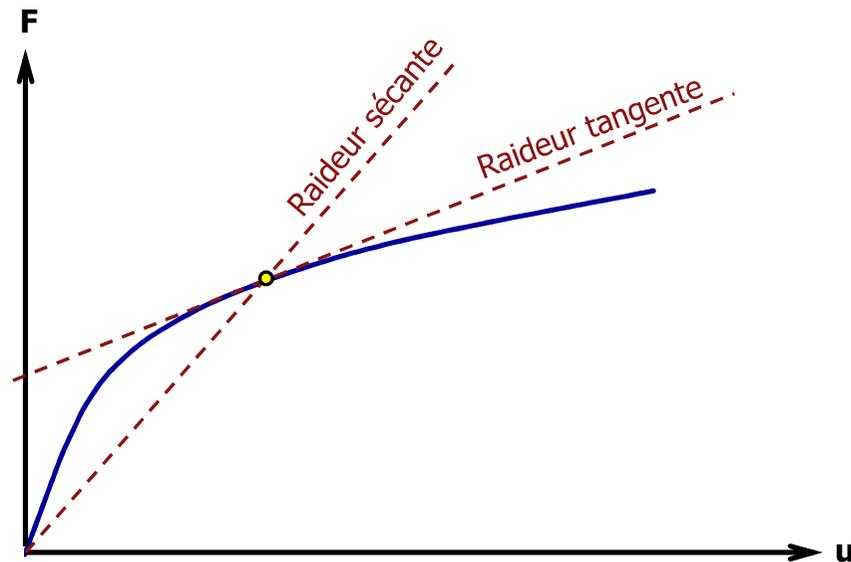
Représentation de la réponse en tête des pieux

- Prise en compte des non linéarités : matrice de rigidité tangente

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

Terme « constant », indissociable de la raideur

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

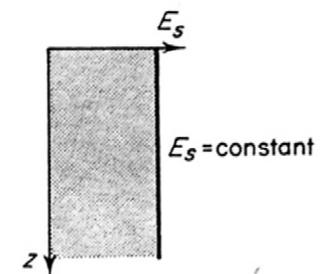
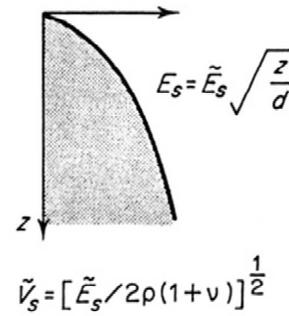
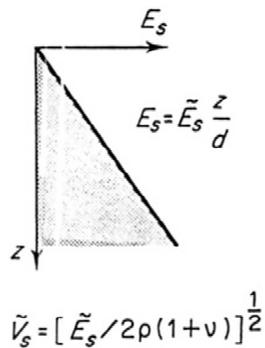


Traitement des effets dynamiques

➤ Cas d'un pieu isolé : effet fréquentiel négligé

$$K_{\text{dyn}} = K_{\text{stat}} \cdot k(\omega)$$

$$k(\omega) \approx 1$$



$$K_{HH} = 0.6d\tilde{E}_s (E_p/\tilde{E}_s)^{0.35}$$

$$k_{HH} \approx 1$$

$$K_{HM} = K_{MH} = -0.17d^2\tilde{E}_s (E_p/\tilde{E}_s)^{0.60}$$

$$k_{HM} = k_{MH} \approx 1$$

$$K_{MM} = 0.15d^2\tilde{E}_s (E_p/\tilde{E}_s)^{0.80}$$

$$k_{MM} \approx 1$$

$$K_{HH} = 0.8d\tilde{E}_s (E_p/\tilde{E}_s)^{0.28}$$

$$k_{HH} \approx 1$$

$$K_{HM} = K_{MH} = -0.24d^2\tilde{E}_s (E_p/\tilde{E}_s)^{0.53}$$

$$k_{HM} = k_{MH} \approx 1$$

$$K_{MM} = 0.15d^3\tilde{E}_s (E_p/\tilde{E}_s)^{0.77}$$

$$k_{MM} \approx 1$$

$$K_{HH} = dE_s (E_p/E_s)^{0.21}$$

$$k_{HH} \approx 1$$

$$K_{HM} = K_{MH} = -0.22d^2E_s (E_p/E_s)^{0.50}$$

$$k_{HM} = k_{MH} \approx 1$$

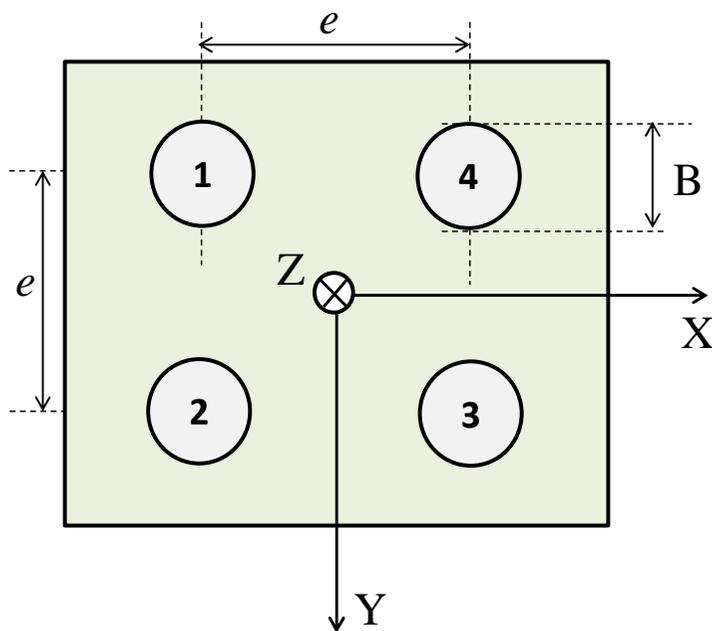
$$K_{MM} = 0.15d^3E_s (E_p/E_s)^{0.75}$$

$$k_{MM} \approx 1$$

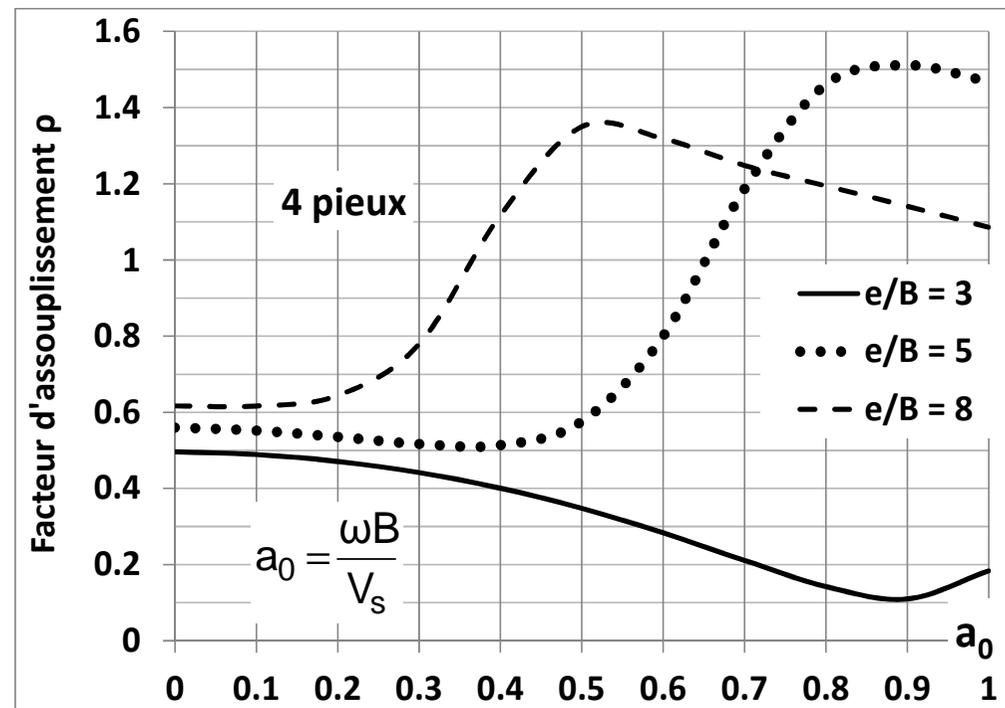


Traitement des effets dynamiques

- Cas d'un groupe de pieux : interaction dynamique présente mais dont l'évaluation nécessite le recours à des modèles « spécifiques »



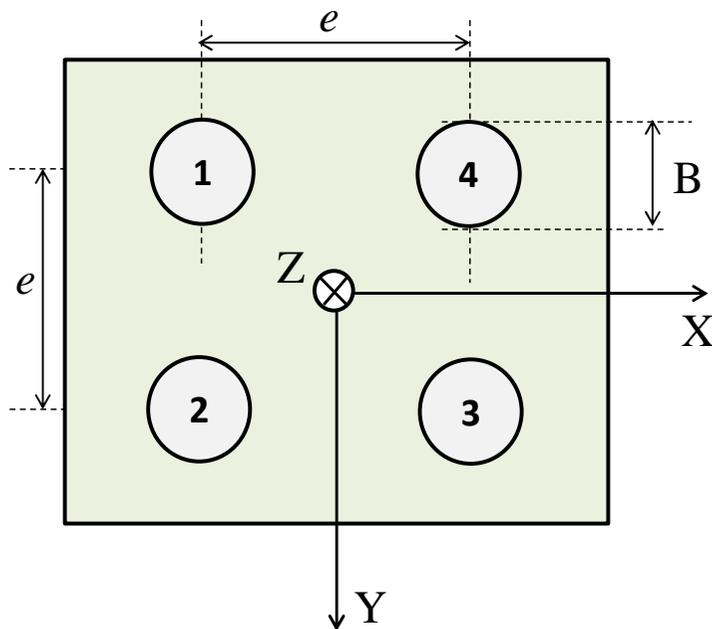
Effet d'interaction dynamique entre quatre pieux



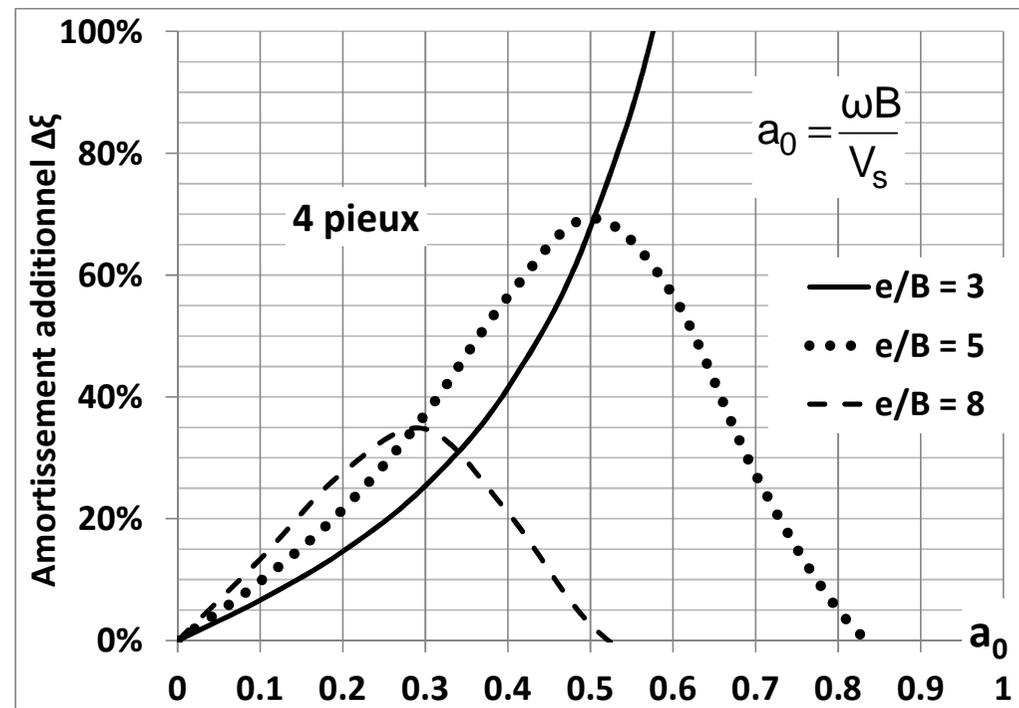
Modification de la raideur horizontale

Traitement des effets dynamiques

- Cas d'un groupe de pieux : interaction dynamique présente mais dont l'évaluation nécessite le recours à des modèles « spécifiques »



Effet d'interaction dynamique entre quatre pieux



Modification de l'amortissement (radiatif)