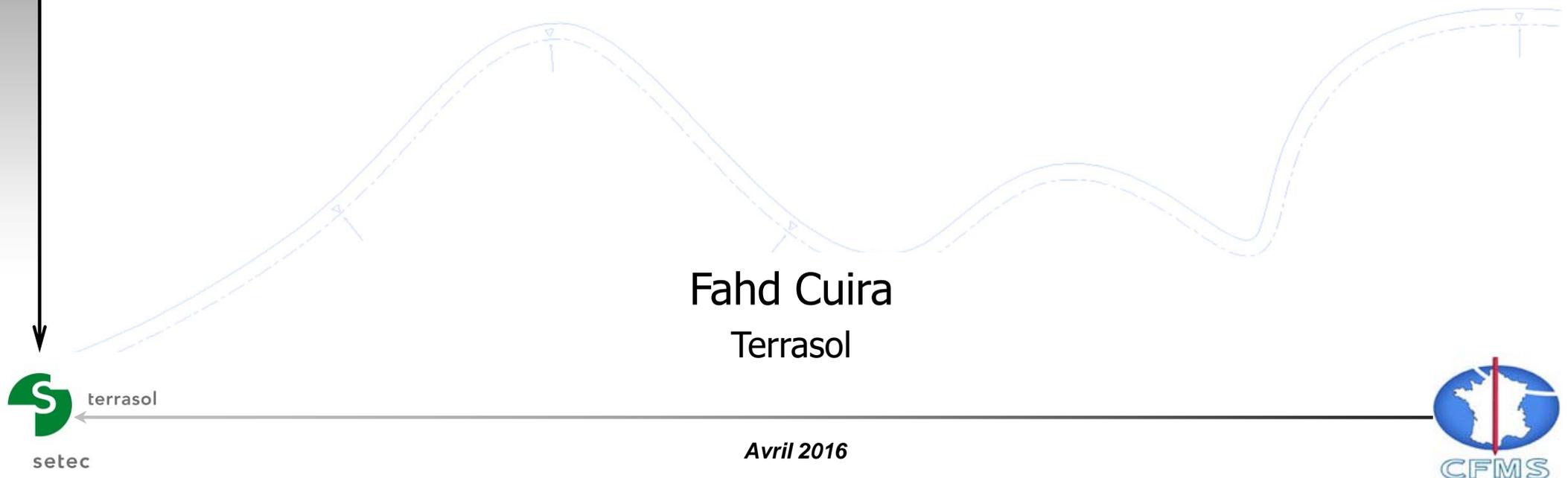
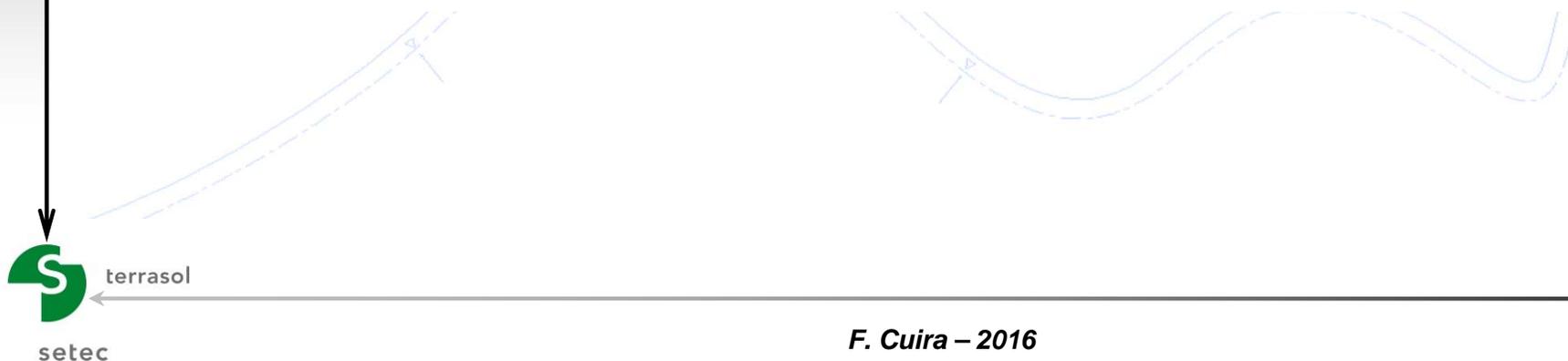


Quelques exemples de problèmes posés dans la justification parasismique des ouvrages

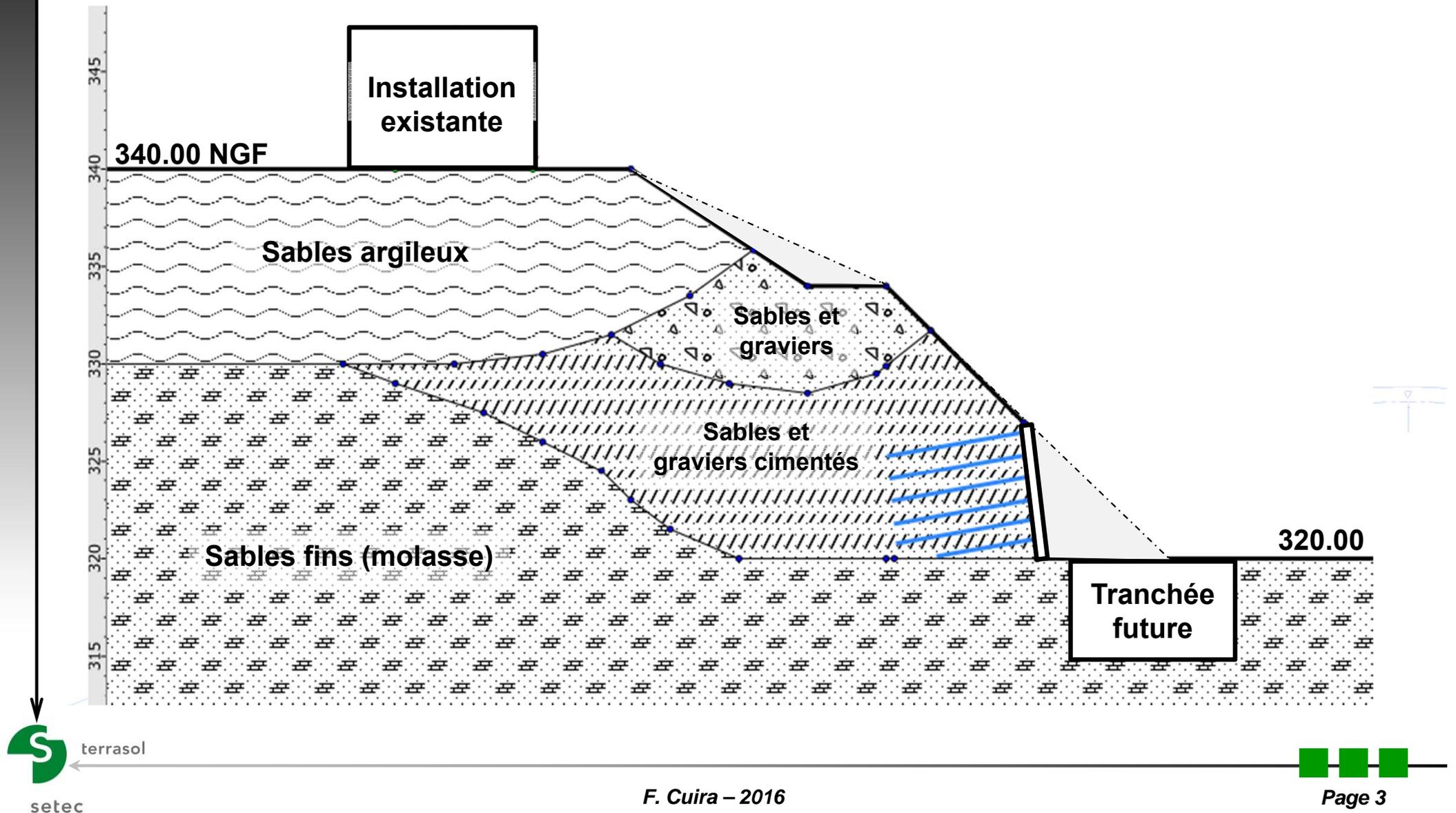


- Poussées des terres sous séisme
- Traitement des effets fréquentiels pour un ouvrage fondé superficiellement
- Le cas d'une fondation sur pieux



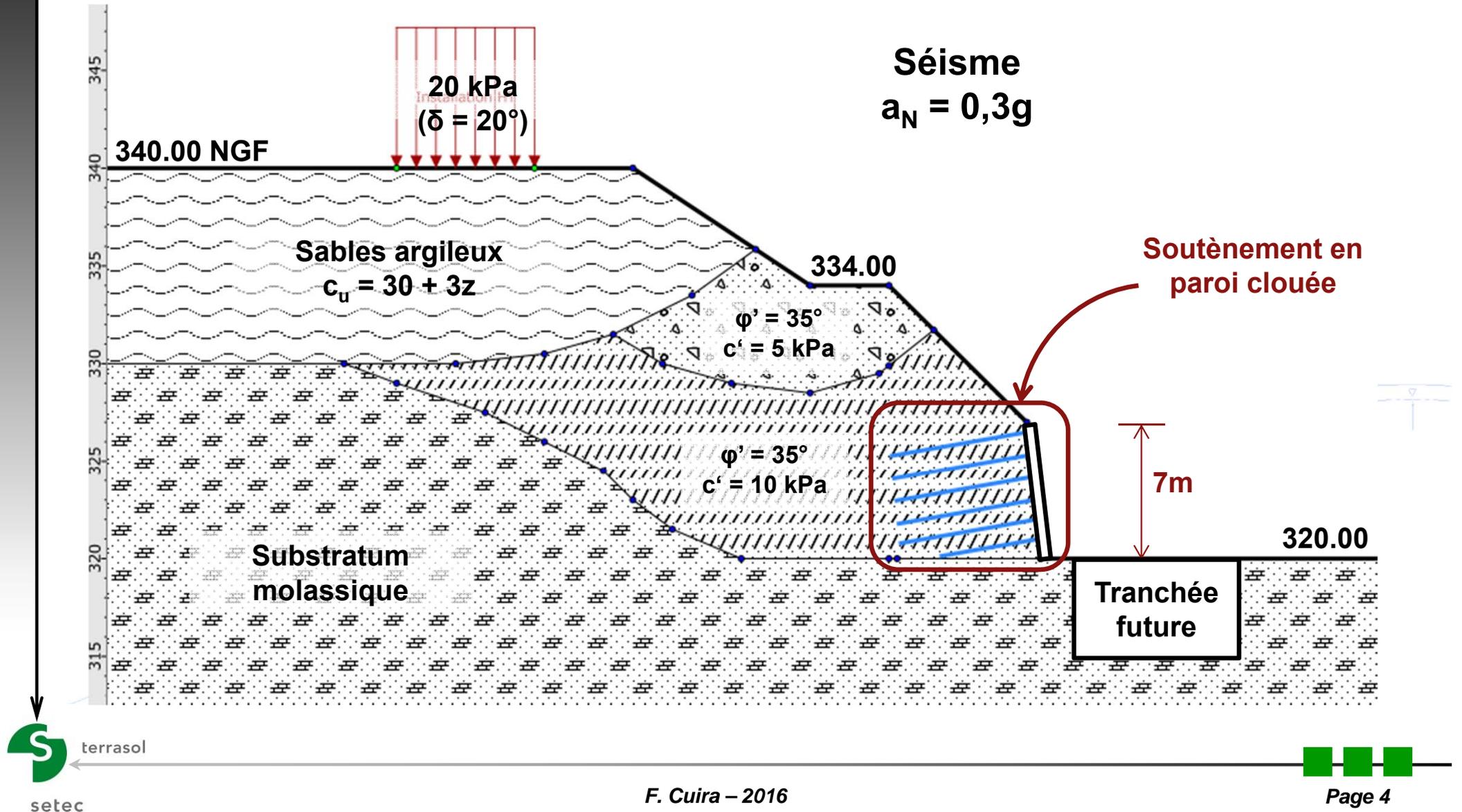
Poussées des terres sous séisme

- Confortement parasismique d'un versant existant



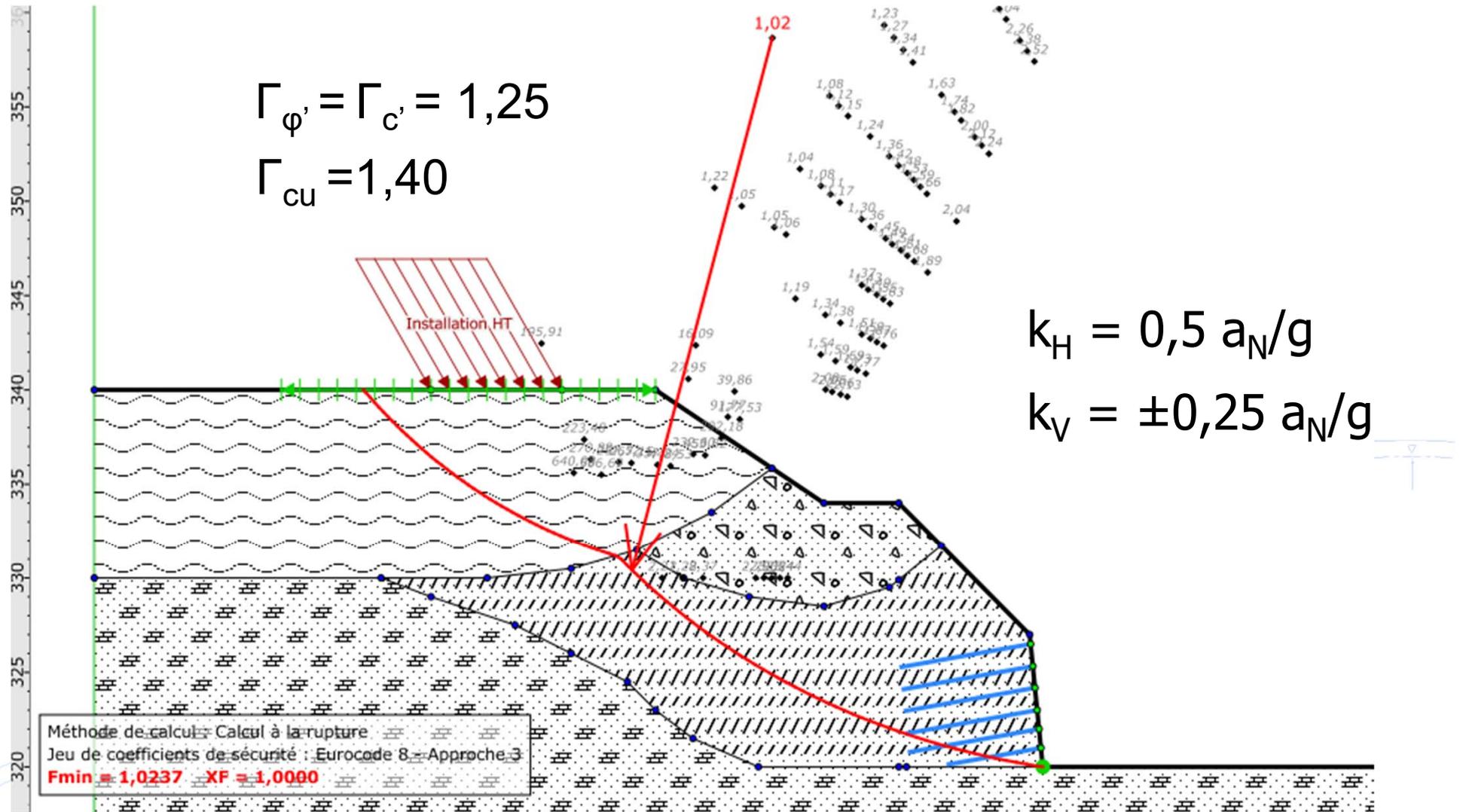
Poussées des terres sous séisme

- Confortement parasismique d'un versant existant



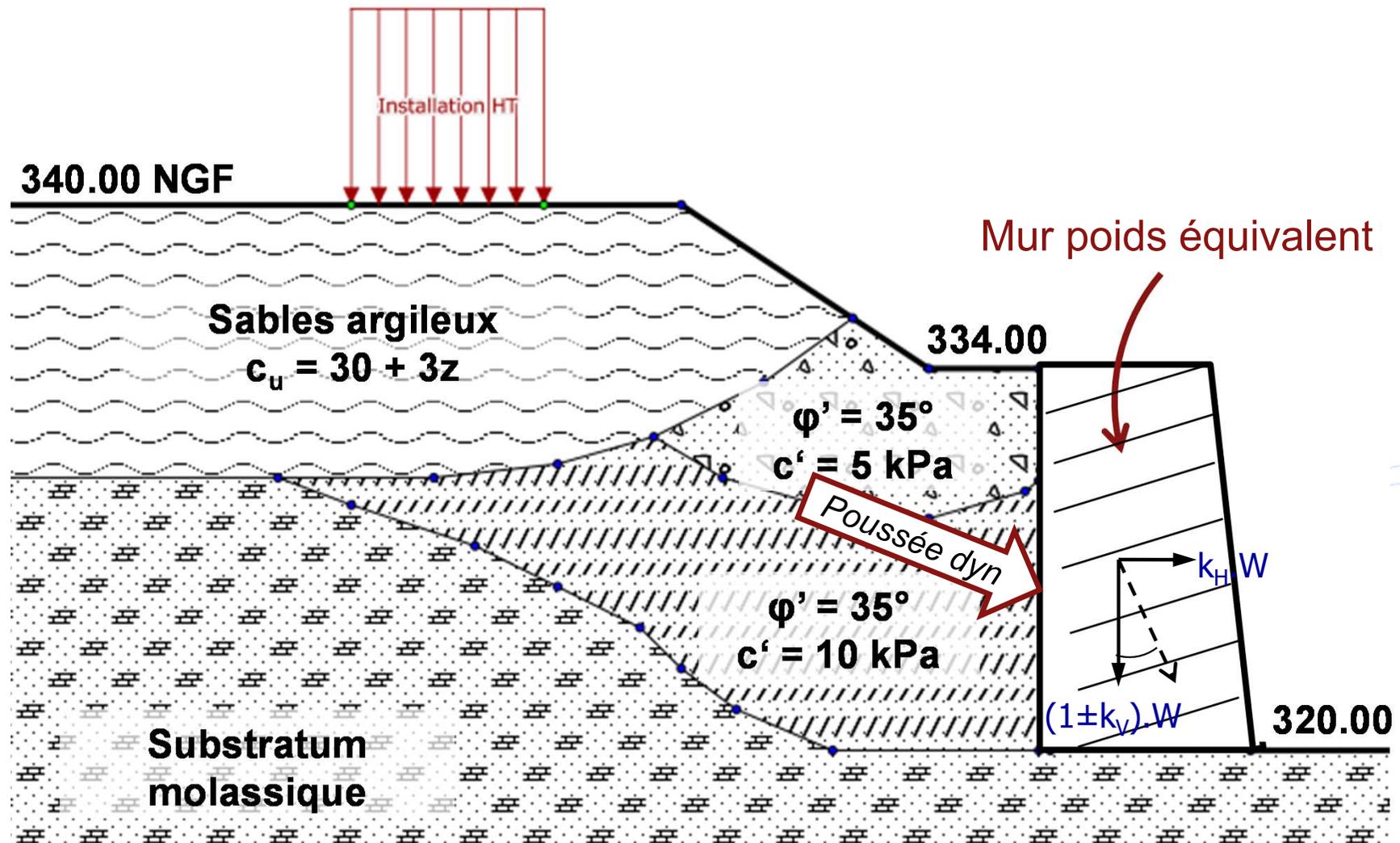
Poussées des terres sous séisme

- Stabilité générale et mixte justifiée avec une sécurité suffisante



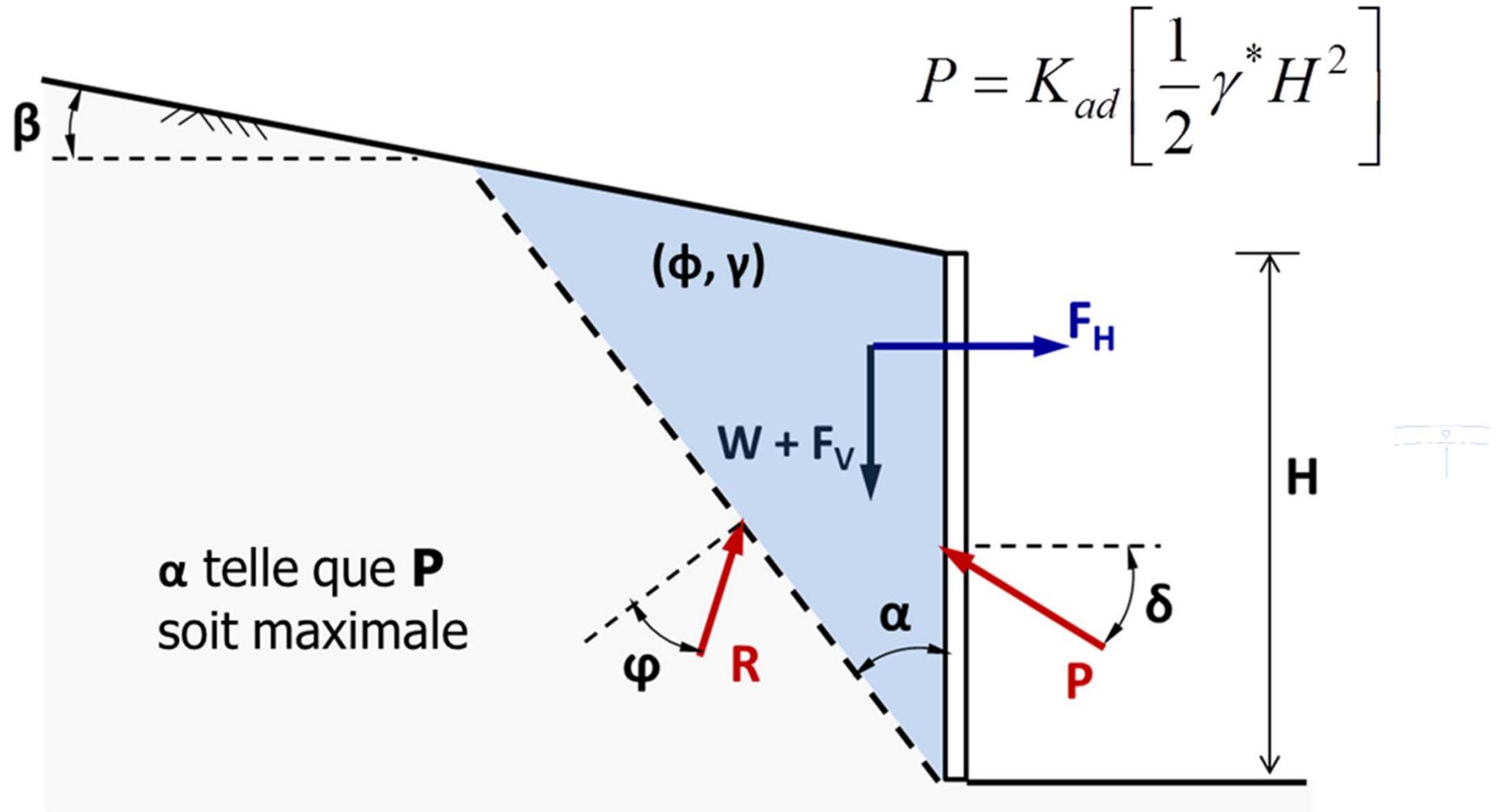
Poussées des terres sous séisme

- Stabilité externe : nécessite l'évaluation des poussées « dynamiques »



Poussées des terres sous séisme

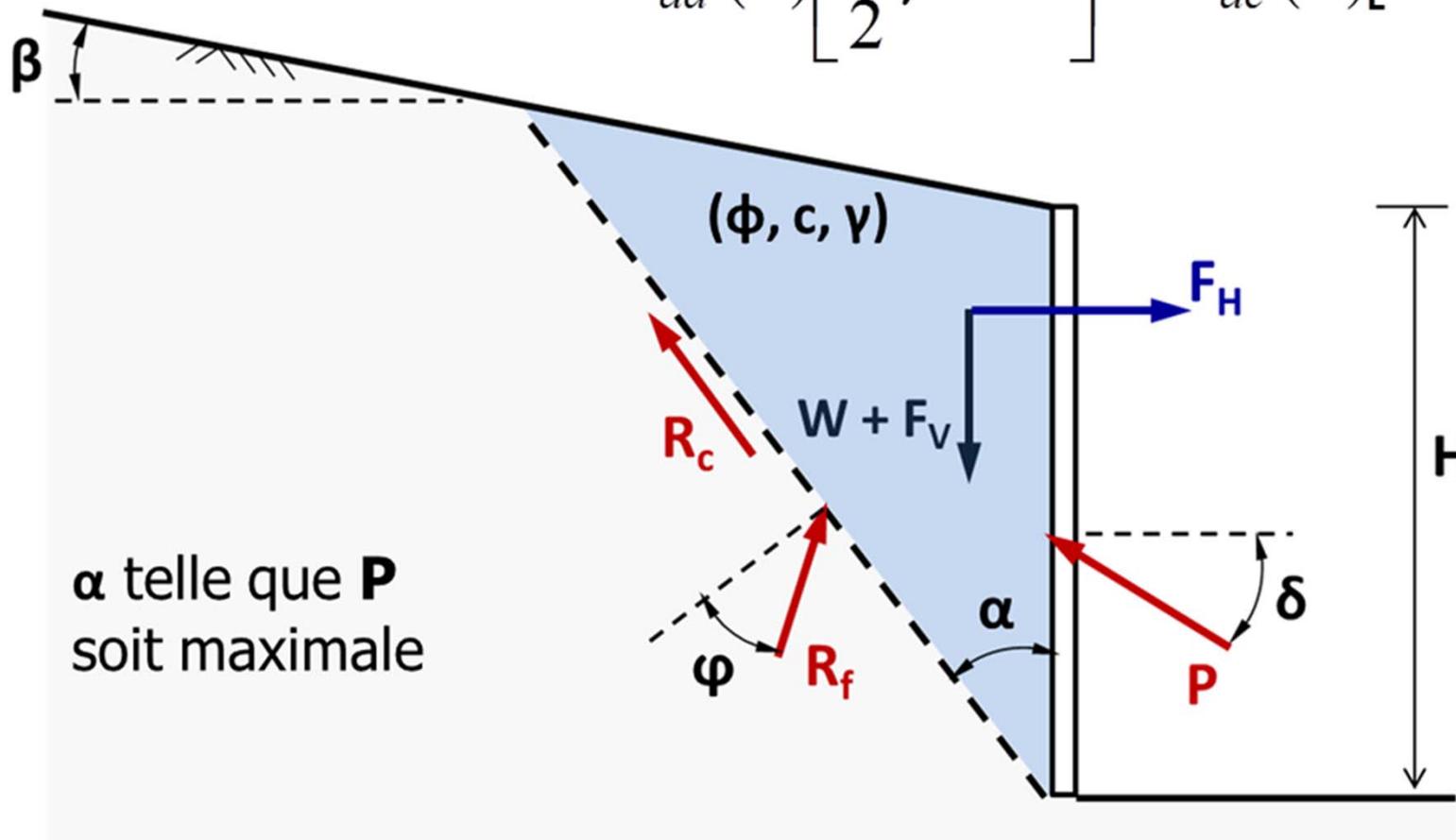
- Modèle de Mononobé-Okabé (1924) – Cas d'un sol frottant (EC8)



Poussées des terres sous séisme

- Modèle de Mononobé-Okabé (1924) – prise en compte de la cohésion

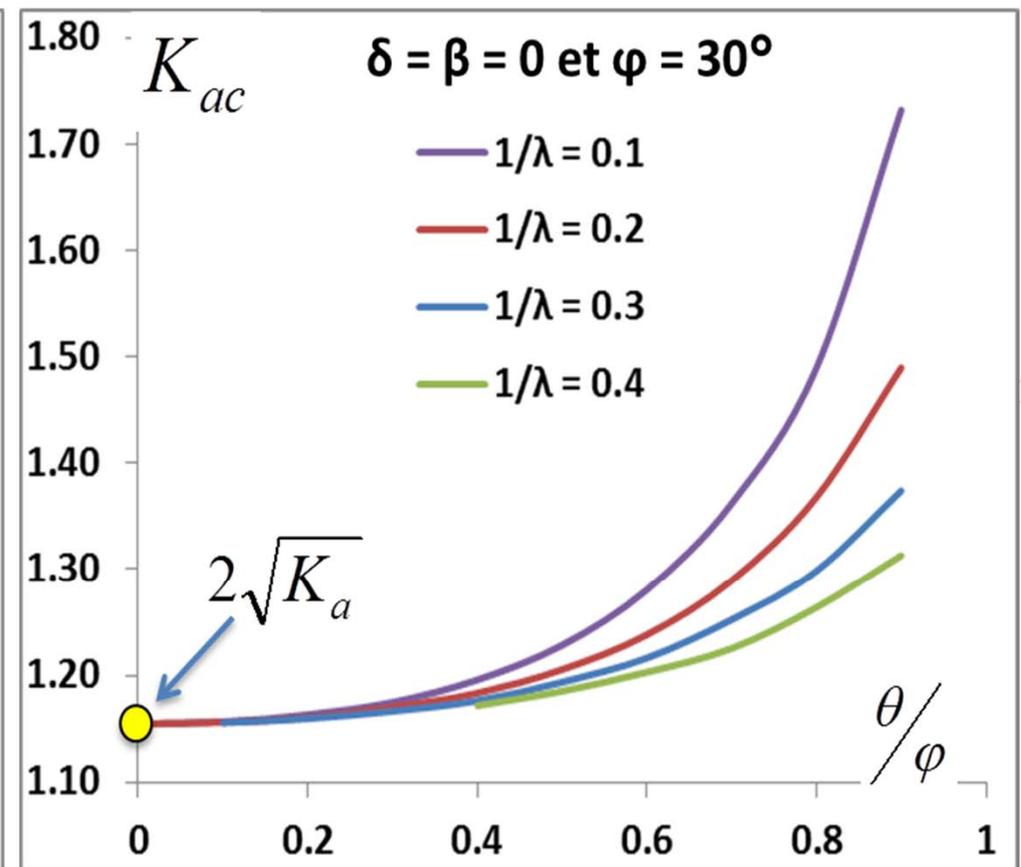
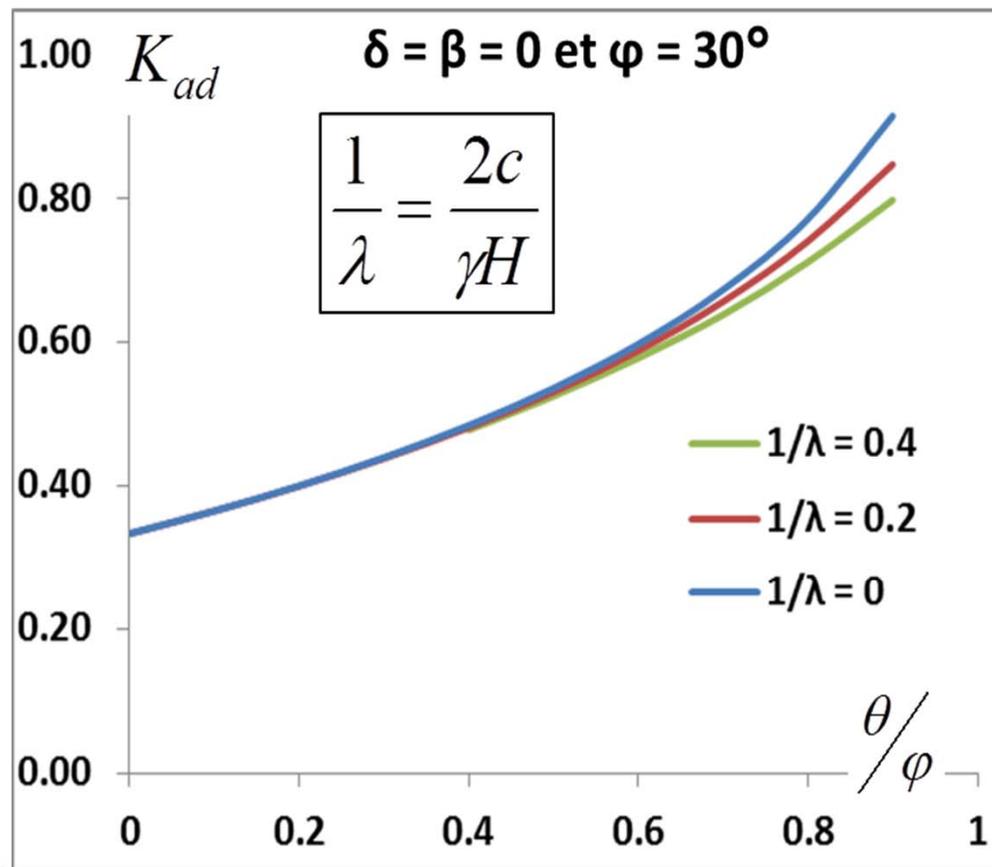
$$P = K_{ad}(\lambda) \left[\frac{1}{2} \gamma^* H^2 \right] - K_{ac}(\lambda) [cH] \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{2c}{\gamma H}$$



Poussées des terres sous séisme

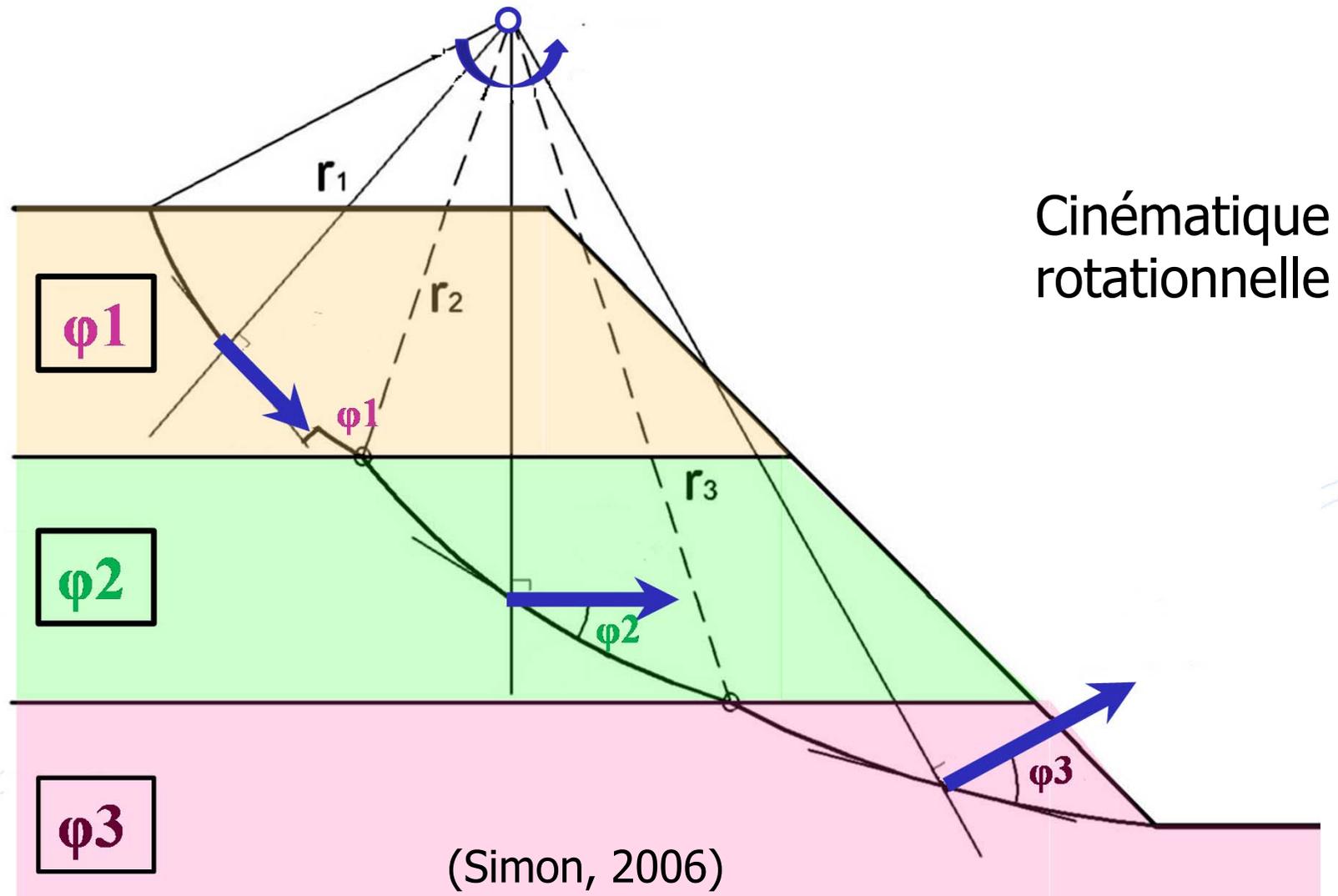
- Modèle de Mononobé-Okabé (1924) – prise en compte de la cohésion

$$P = K_{ad}(\lambda) \left[\frac{1}{2} \gamma^* H^2 \right] - K_{ac}(\lambda) [cH]$$



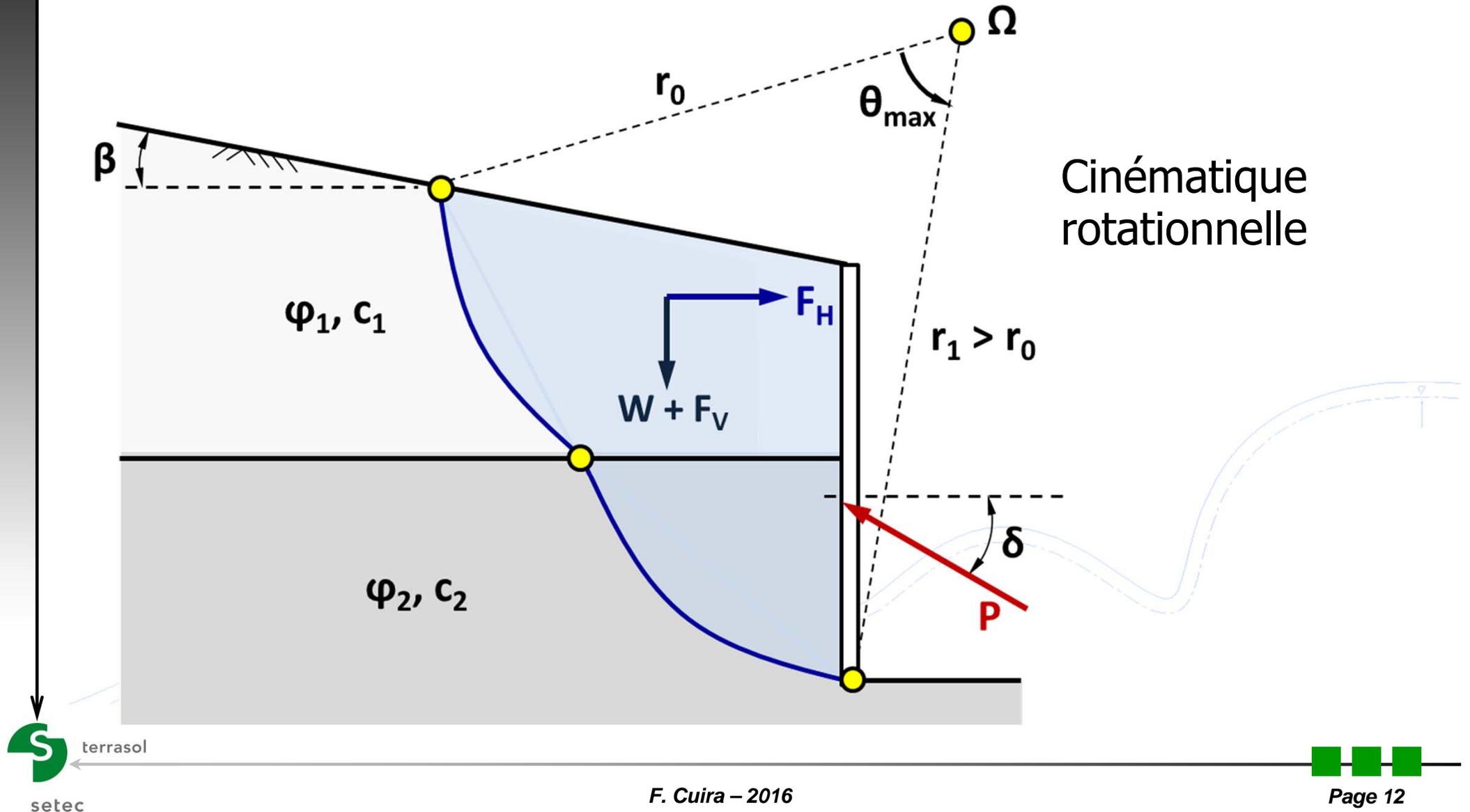
Poussées des terres sous séisme

Recours à la méthode cinématique du calcul à la rupture (Salençon, 1983)



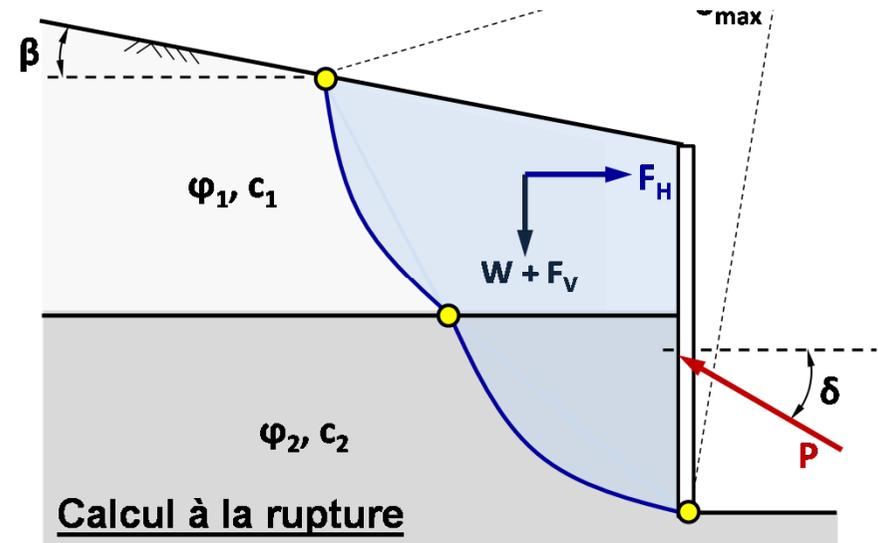
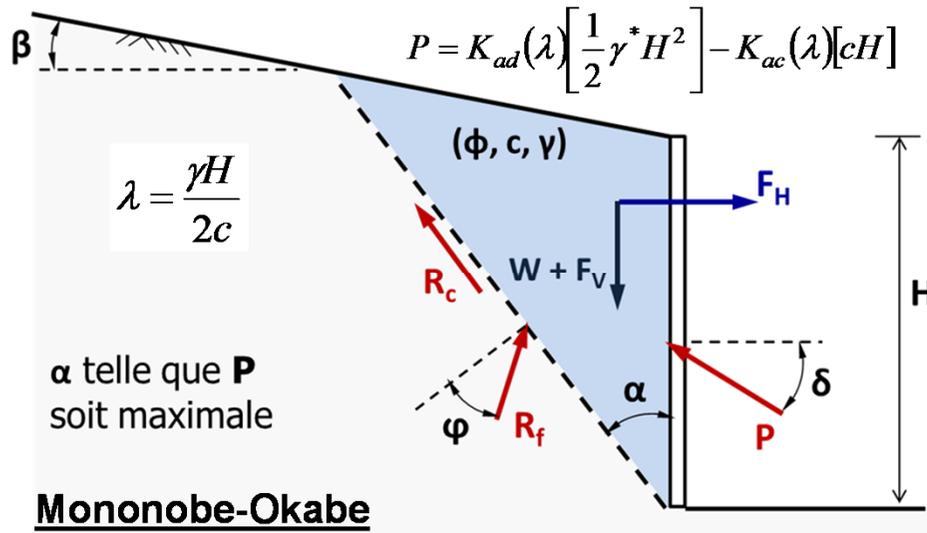
Poussées des terres sous séisme

Recours à la méthode cinématique du calcul à la rupture (Salençon, 1983)



Poussées des terres sous séisme

Recours à la méthode cinématique du calcul à la rupture (Salençon, 1983)



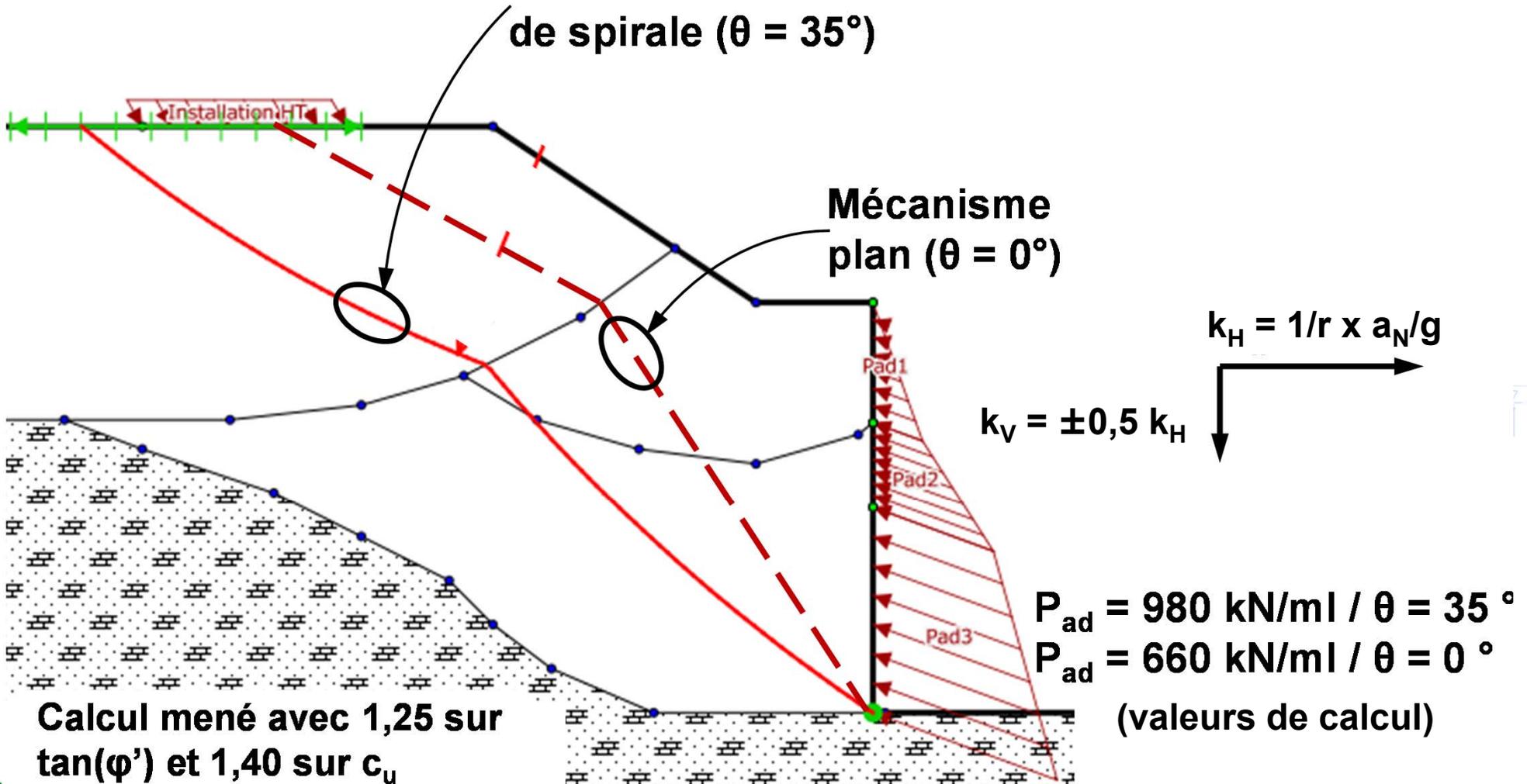
ϕ' (°)	pente talus (°)	cohésion (kPa)	Mononobe- Okabe	Calcul à la rupture cinématique plane	Calcul à la rupture arcs de spirale
30	0	0	570 kN/ml	570 kN/ml	575 kN/ml (+01%)
30	0	20	305 kN/ml	305 kN/ml	310 kN/ml (+02%)
30	16	20	450 kN/ml	450 kN/ml	500 kN/ml (+11%)
0	0	50	368 kN/ml	368 kN/ml	450 kN/ml (+22%)

Poussées des terres sous séisme

⇒ Application au projet : poussée dynamique derrière le mur poids fictif

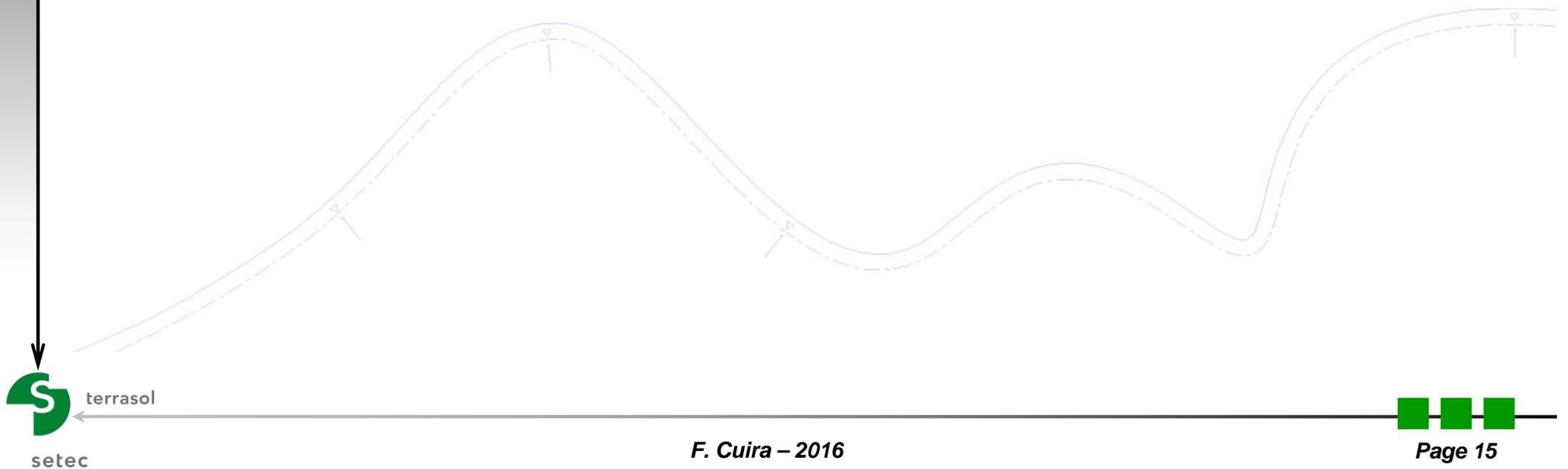
Mécanisme en arcs de spirale ($\theta = 35^\circ$)

Mécanisme plan ($\theta = 0^\circ$)



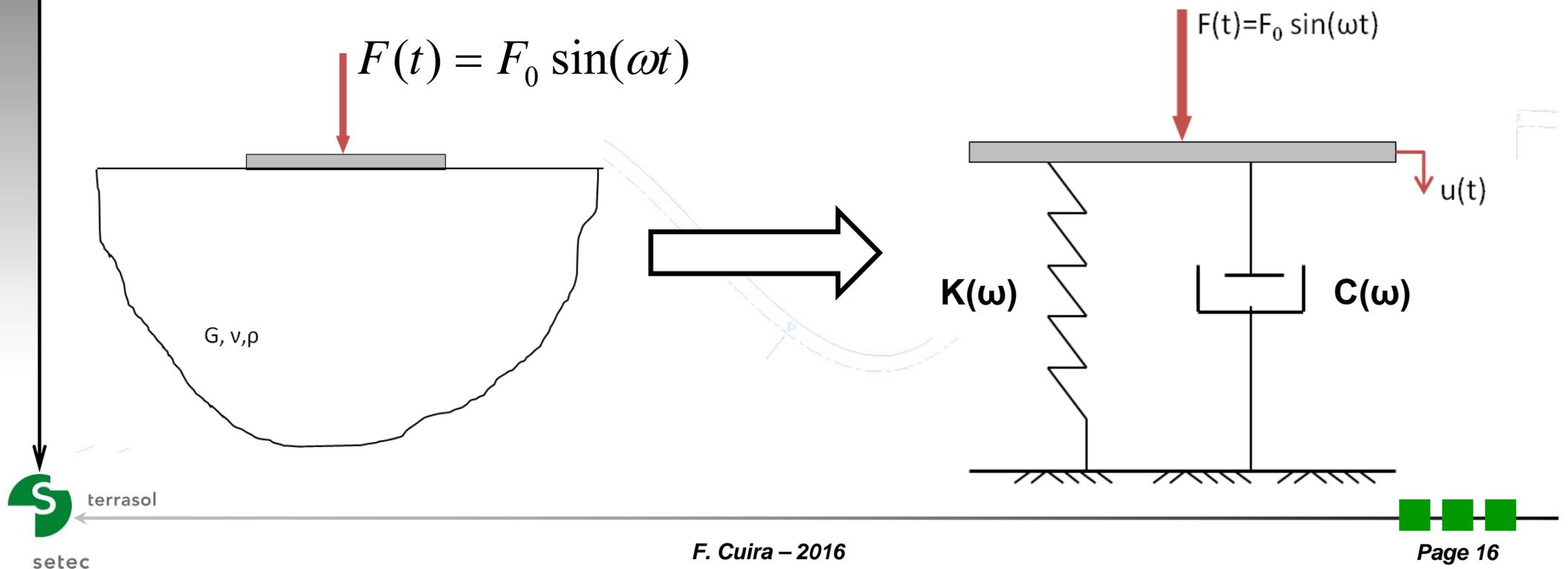
Calcul mené avec 1,25 sur $\tan(\varphi')$ et 1,40 sur c_u

ISS et effets fréquentiels



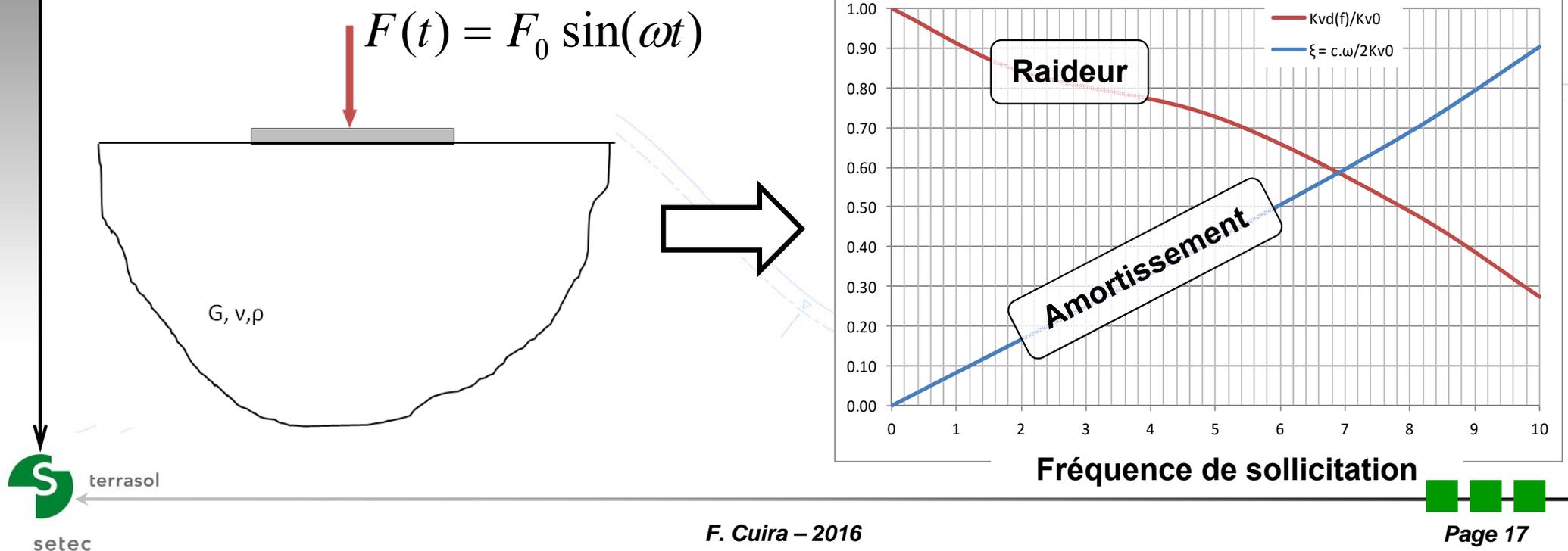
Effets fréquentiels

- Réponse dynamique d'une fondation superficielle
 - ⇒ L'amplitude des déplacements dépend du contenu fréquentiel de la charge appliquée : la raideur varie avec la fréquence de sollicitation
 - ⇒ Il y a un déphasage entre la sollicitation et la réponse, synonyme de l'apparition d'un terme d'amortissement qui augmente très rapidement avec la fréquence : amortissement matériel + géométrique (ou radiatif)



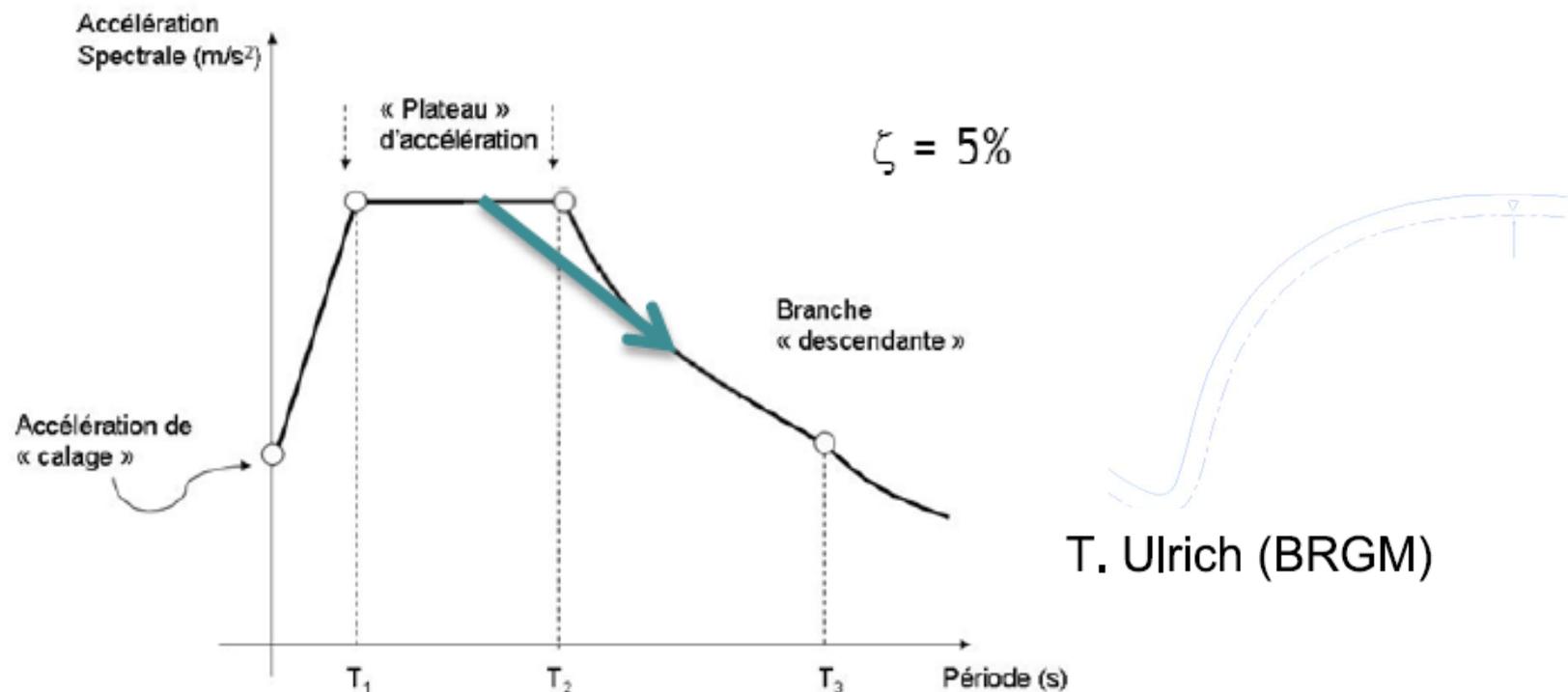
Effets fréquentiels

- Réponse dynamique d'une fondation superficielle
 - ⇒ L'amplitude des déplacements dépend du contenu fréquentiel de la charge appliquée : la raideur varie avec la fréquence de sollicitation
 - ⇒ Il y a un déphasage entre la sollicitation et la réponse, synonyme de l'apparition d'un terme d'amortissement qui augmente très rapidement avec la fréquence : amortissement matériel + géométrique (ou radiatif)



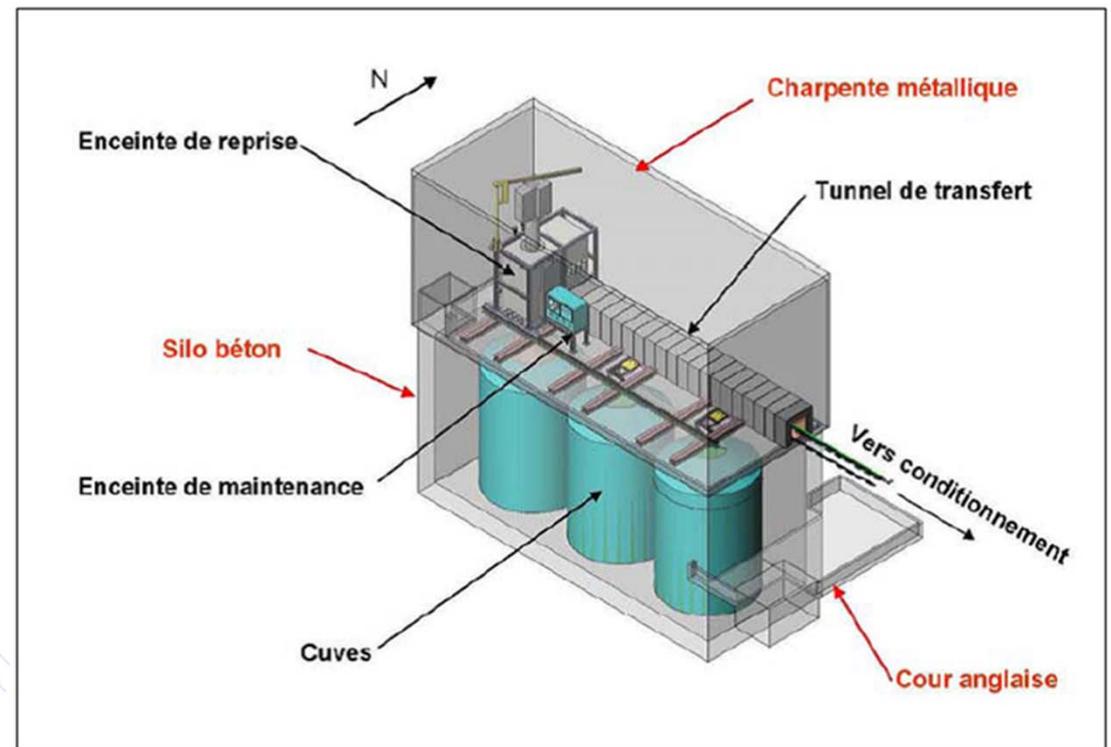
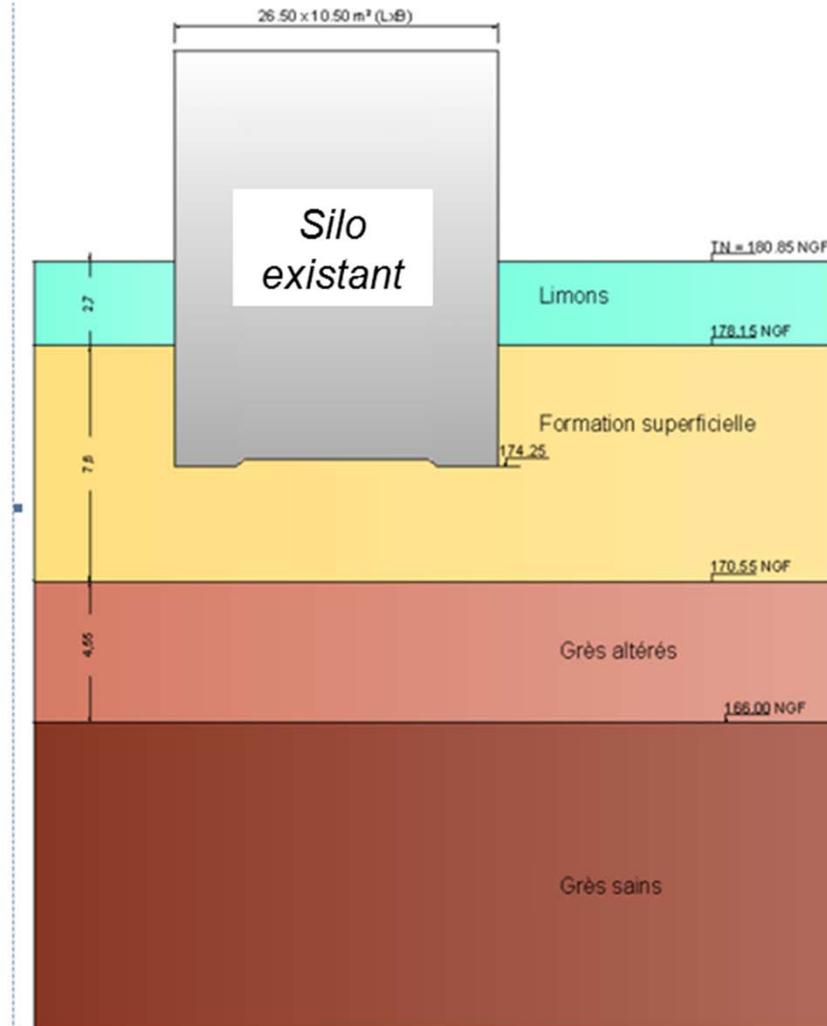
Effets fréquentiels

- Enjeux conceptuels
 - ⇒ Diminution des effets d'inertie et augmentation de la période propre
 - ⇒ Dissipation significative de l'énergie par « radiation » dans le sol
 - ⇒ Effet généralement favorable au dimensionnement (sauf cas particuliers comme celui des structures très élancées)



Effets fréquentiels

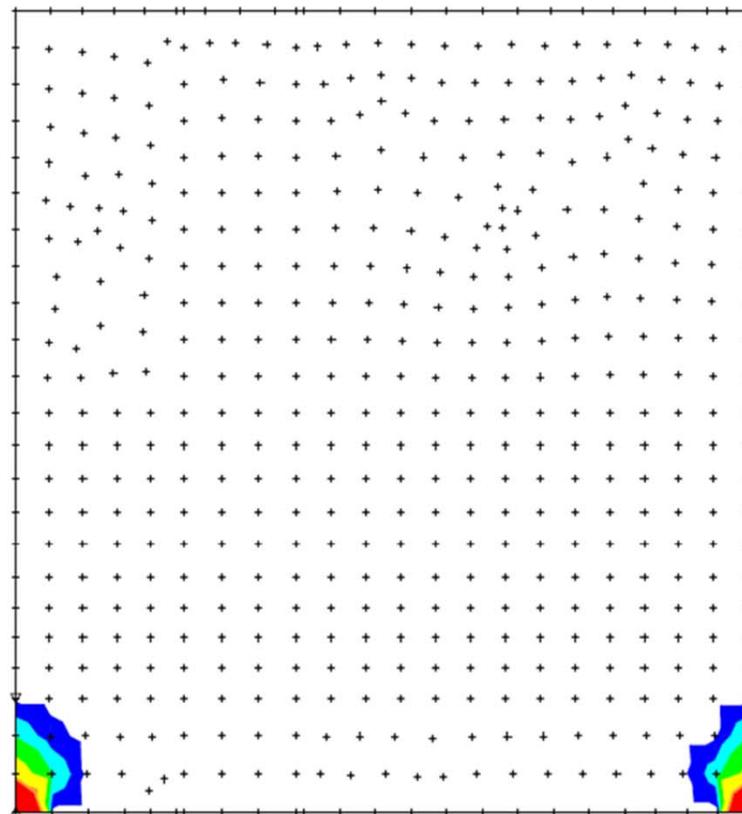
- Enjeux conceptuels : confortement parasismique d'un ouvrage existant



Effets fréquentiels

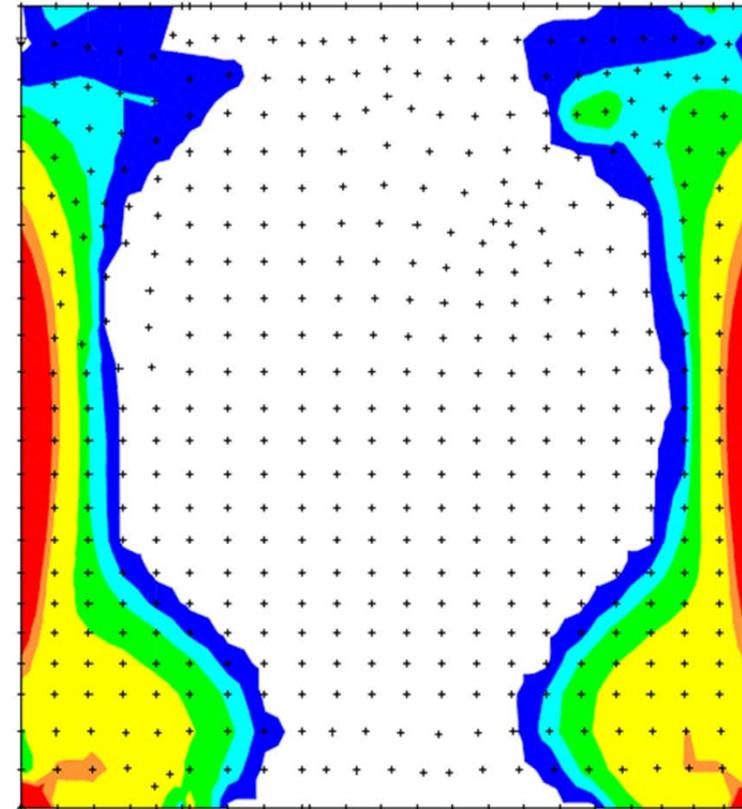
- Enjeux conceptuels : confortement parasismique d'un ouvrage existant

Avec ISS

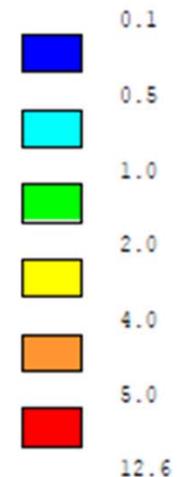


ARMATEC 3.08 by Setec TPI - 03/07/14

Sans ISS



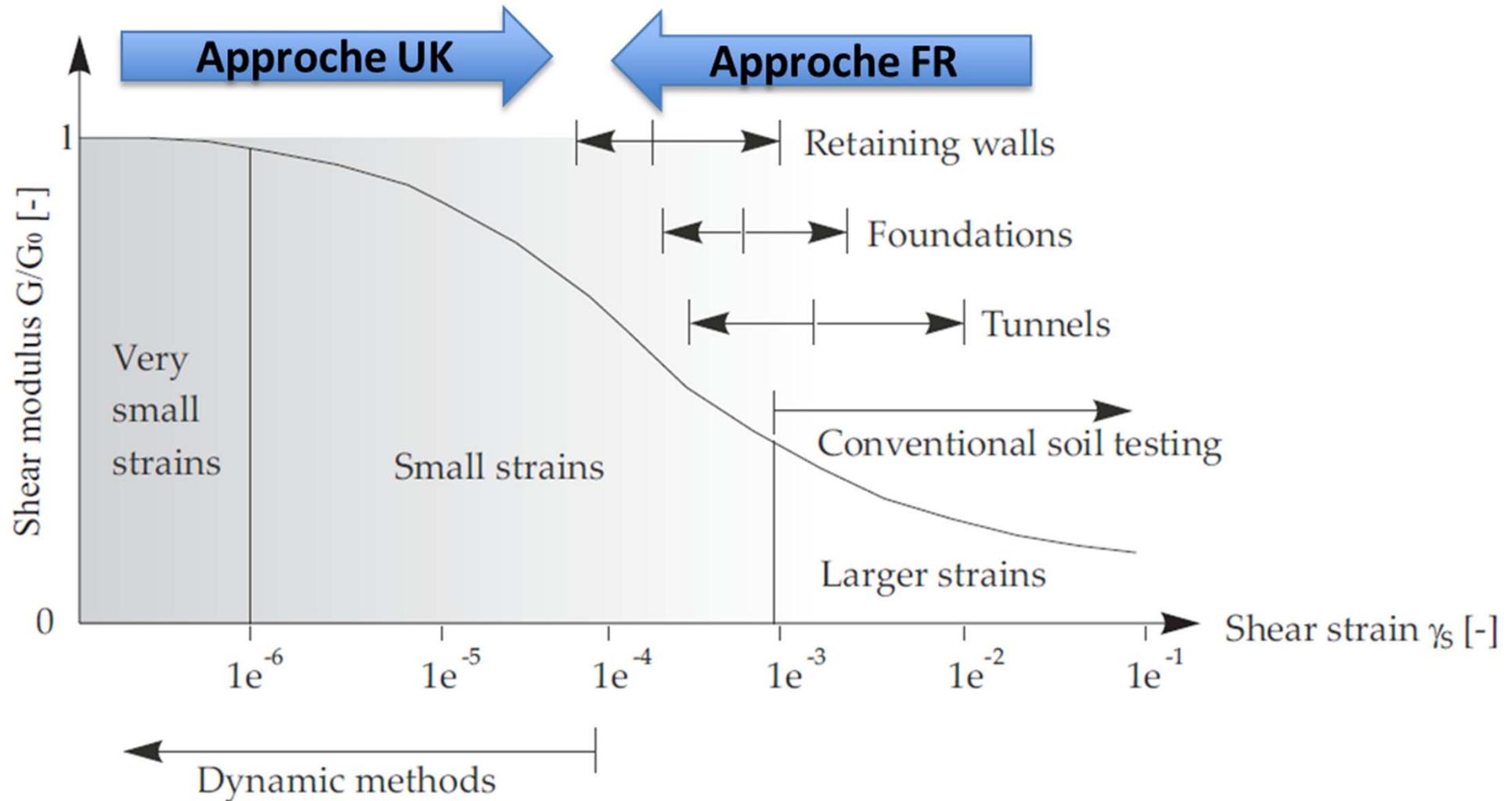
ARMATEC 3.08 by Setec TPI - 03/07/14



Déficit d'armatures en cm²/ml sous séisme réévalué

Effets fréquentiels

- La question des modules... qui n'est pas propre au séisme



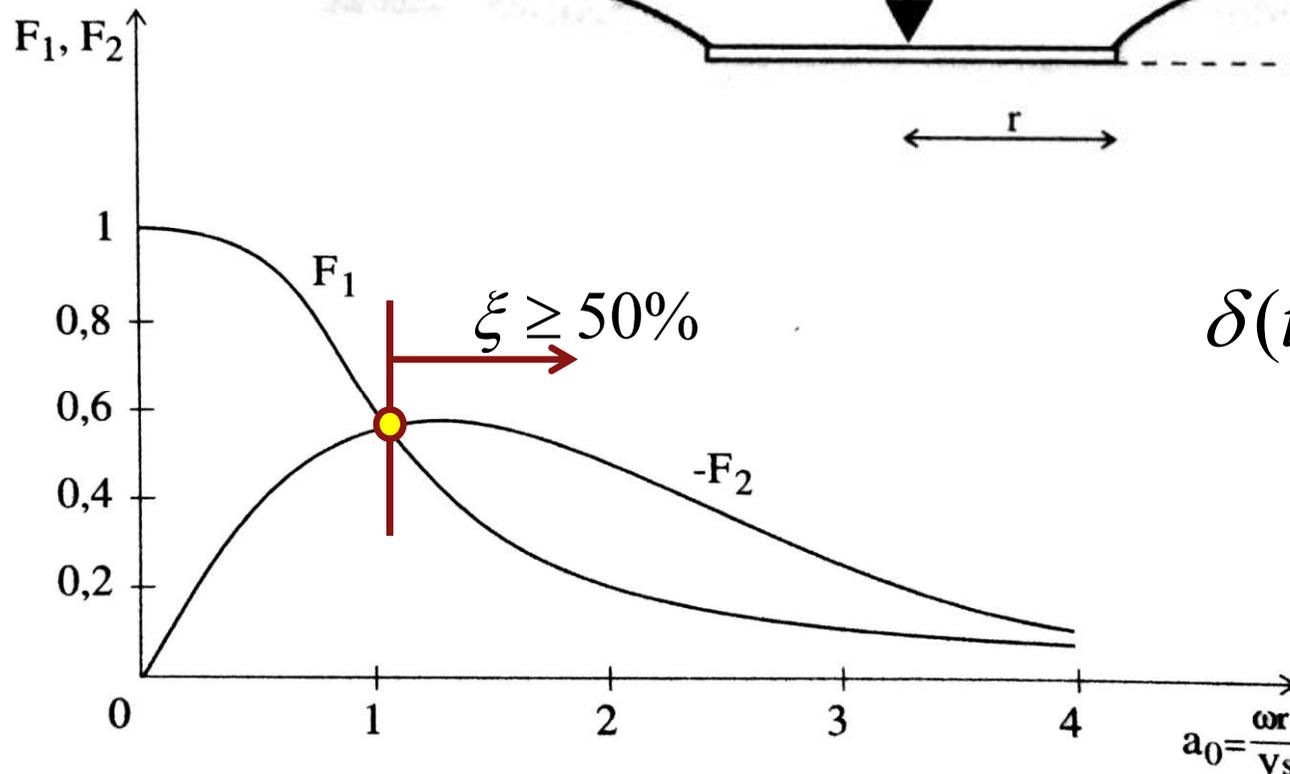
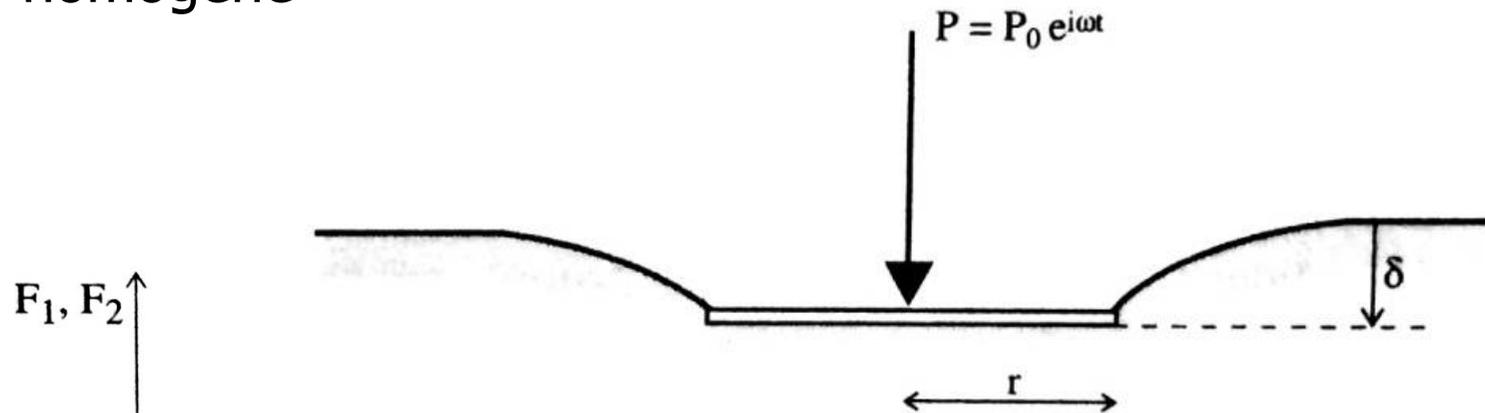
Effets fréquentiels

- La question des modules... qui n'est pas propre au séisme
 - ⇒ Idéalement : disposer d'un dossier géotechnique complet avec des essais permettant de couvrir une gamme de déformations allant de 10^{-2} à 10^{-6}
 - ⇒ Choisir le module en cohérence avec le taux de déformation attendu sous l'ouvrage : par « itérations » ou à l'aide de lois avancées de types « HS-small » (si on a de quoi les alimenter...)
- Approche forfaitaire – Eurocode 8 (en l'absence de lois de dégradation) :
 - ⇒ $\varepsilon \geq 10^{-3}$: essais statiques (essai triaxial ou corrélation avec N_{SPT} , q_c ou E_M)
 - ⇒ $\varepsilon \leq 10^{-4}$: essais dynamiques (G = fraction du G_{max} issu d'un essai Cross Hole)

Rapport d'accélération du sol, $\alpha \cdot S$	Coefficient d'amortissement max.	$\frac{v_s}{v_{s,max}}$	$\frac{G}{G_{max}}$
0,10	0,03	0,90 ($\pm 0,07$)	0,80 ($\pm 0,10$)
0,20	0,06	0,70 ($\pm 0,15$)	0,50 ($\pm 0,20$)
0,30	0,10	0,60 ($\pm 0,15$)	0,36 ($\pm 0,20$)

Effets fréquentiels

- Le problème de l'amortissement : exemple d'une fondation sur sol homogène

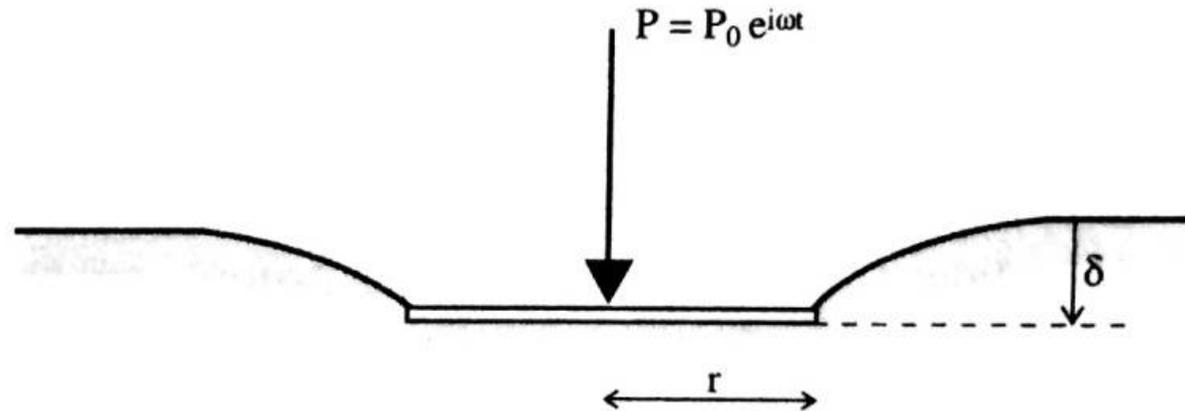


$$\delta(t) = \delta_0 e^{i\omega t} (F_1 + iF_2)$$

$$\xi = -\frac{1}{2} \frac{F_2}{F_1}$$

Effets fréquentiels

- Le problème de l'amortissement : exemple d'une fondation sur sol homogène

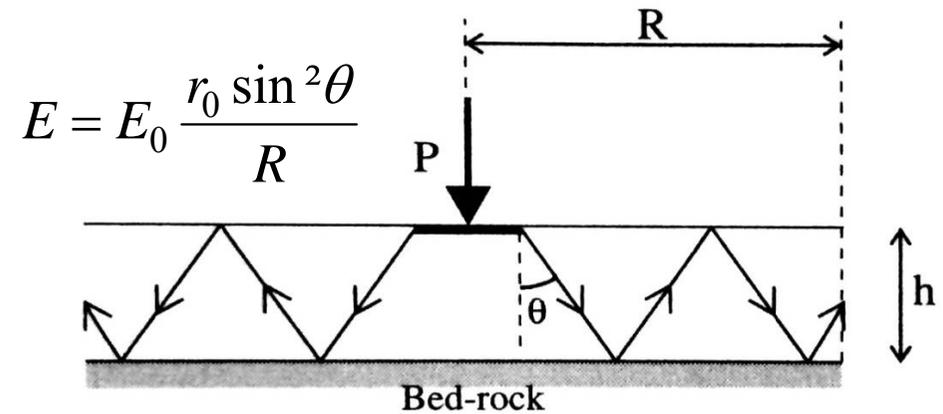
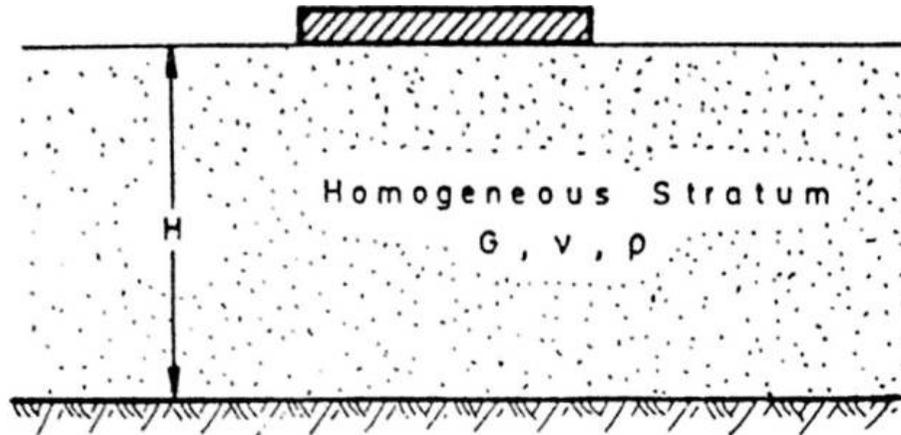


- Fréquence au-delà de laquelle $\xi \geq 50\%$

	$V_s = 100 \text{ m/s}$	$V_s = 200 \text{ m/s}$	$V_s = 300 \text{ m/s}$	$V_s = 400 \text{ m/s}$
$B = 10 \text{ m}$	3,2 Hz	6,4 Hz	9,5 Hz	12,7 Hz
$B = 20 \text{ m}$	1,6 Hz	3,2 Hz	4,8 Hz	6,4 Hz
$B = 30 \text{ m}$	1,1 Hz	2,1 Hz	3,2 Hz	4,2 Hz

Effets fréquentiels

- Le problème de l'amortissement : influence de la stratigraphie



Vertical, z

$$\left[\begin{array}{l} C_z(H/B) \simeq 0 \text{ at frequencies } f < f_c, \text{ regardless of foundation shape} \\ C_z(H/B) \simeq 0.8C_z(\infty) \text{ at } f \geq 1.5f_c \\ \text{At intermediate frequencies: interpolate linearly. } f_c = \frac{V_{La}}{4H}, \quad V_{La} = \frac{3.4V_s}{\pi(1-\nu)} \end{array} \right.$$

Lateral, y or x

$$\left[\begin{array}{l} C_y(H/B) \simeq 0 \text{ at } f < \frac{3}{4}f_s; \quad C_y(H/B) \simeq C_y(\infty) \text{ at } f > \frac{4}{3}f_s \\ \text{At intermediate frequencies: interpolate linearly. } f_s = V_s/4H. \text{ Similarly for } C_x \end{array} \right.$$

Rocking, rx or ry

$$C_{rx}(H/B) \simeq 0 \text{ at } f < f_c; \quad C_{rx}(H/B) \simeq C_{rx}(\infty) \text{ at } f > f_c. \text{ Similarly for } C_{ry}$$

Torsional, t

$$C_t(H/B) \simeq C_t(\infty)$$

Effets fréquentiels

- L'ISS passe aussi par le traitement des effets cinématiques

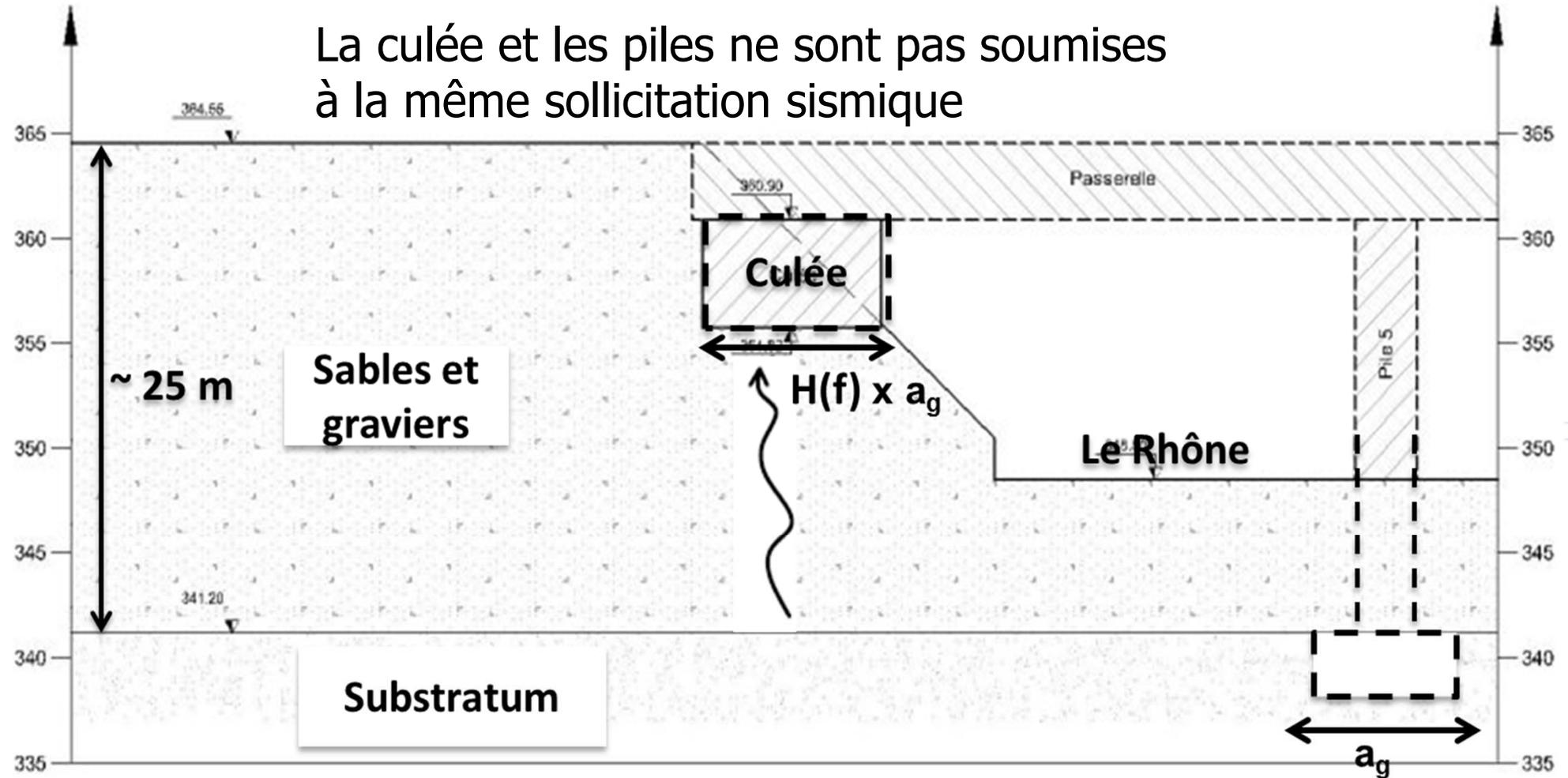


Confortement parasismique d'un barrage hydro-électrique existant

Effets fréquentiels

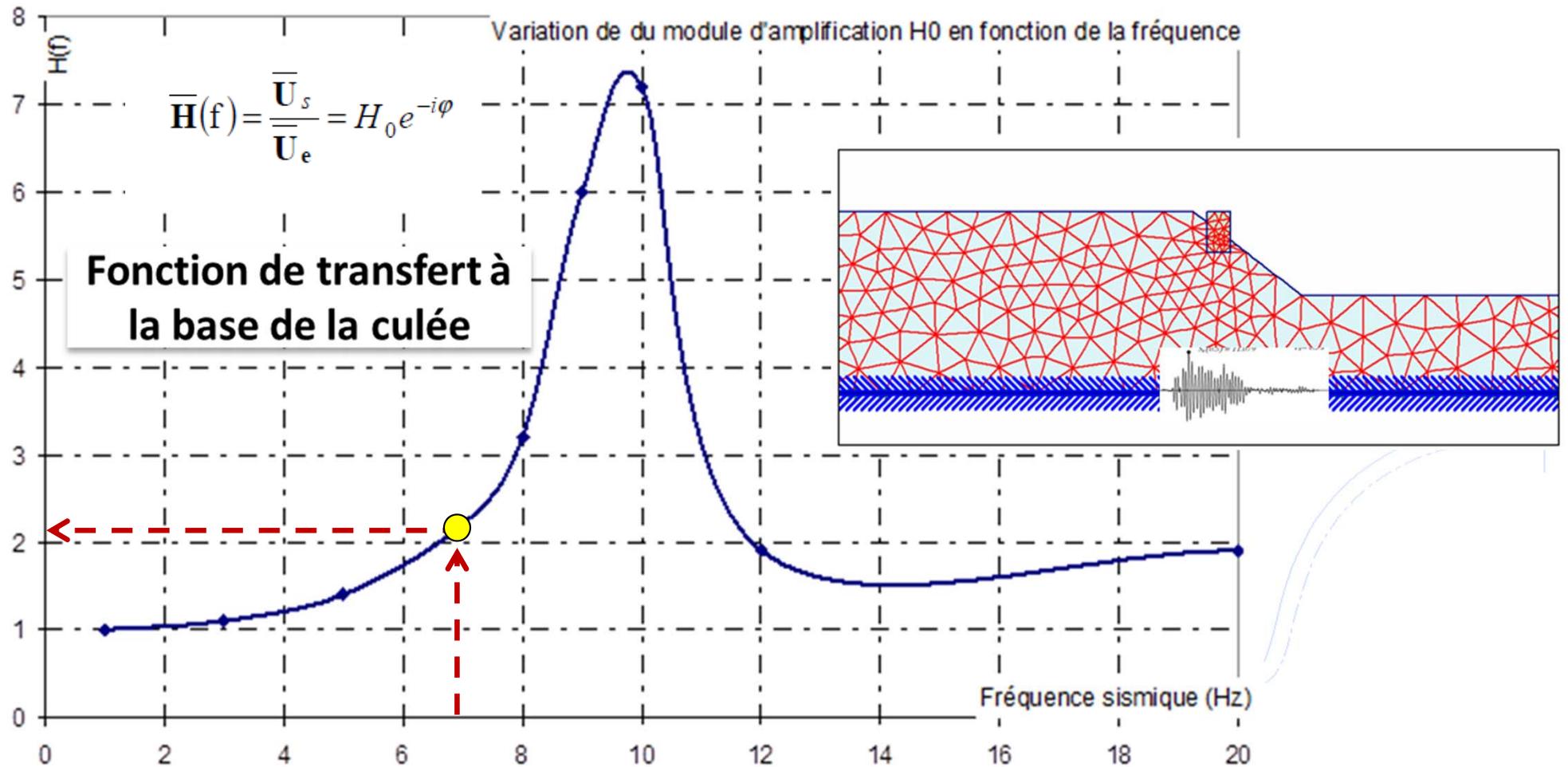
- L'ISS passe aussi par le traitement des effets cinématiques

La culée et les piles ne sont pas soumises à la même sollicitation sismique

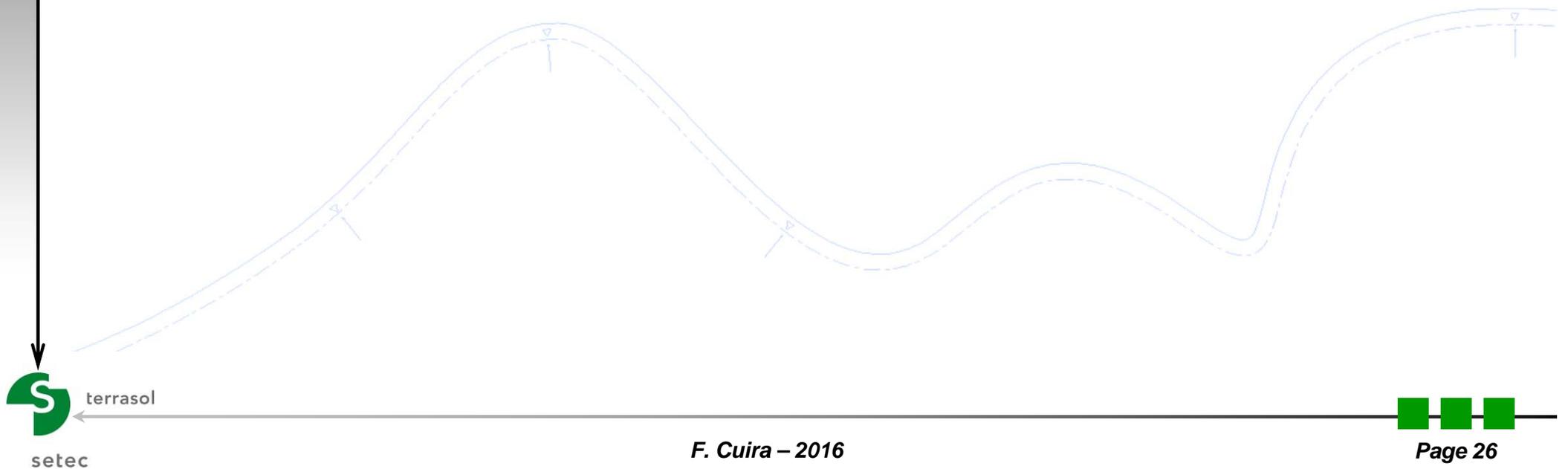


Effets fréquentiels

- Application au projet : évaluation de la fonction de transfert



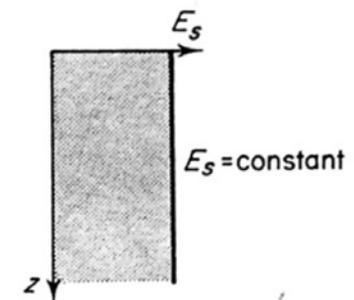
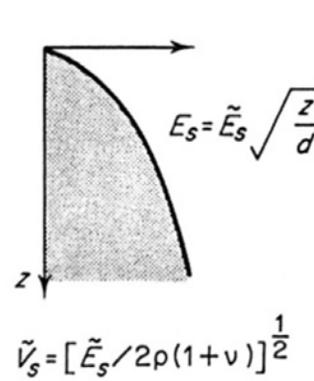
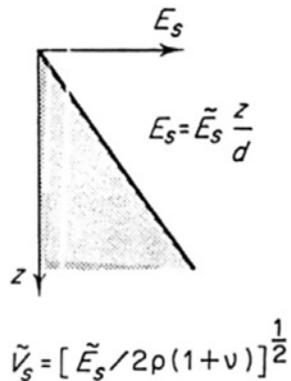
Le cas particulier des fondations profondes



Pieux sous séisme

- Raideurs dynamiques : effet fréquentiel limité (pour pieu isolé !)

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



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

$$k_{HH} \approx 1$$

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

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

$$K_{MM} = 0.15d^3\tilde{E}_s (E_p / \tilde{E}_s)^{0.80}$$

$$k_{MM} \approx 1$$

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

$$k_{HH} \approx 1$$

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

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

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

$$k_{MM} \approx 1$$

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

$$k_{HH} \approx 1$$

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

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

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

$$k_{MM} \approx 1$$

Pieux sous séisme

- Raideurs dynamiques : (Tableau C.1 de l'EC8-5)

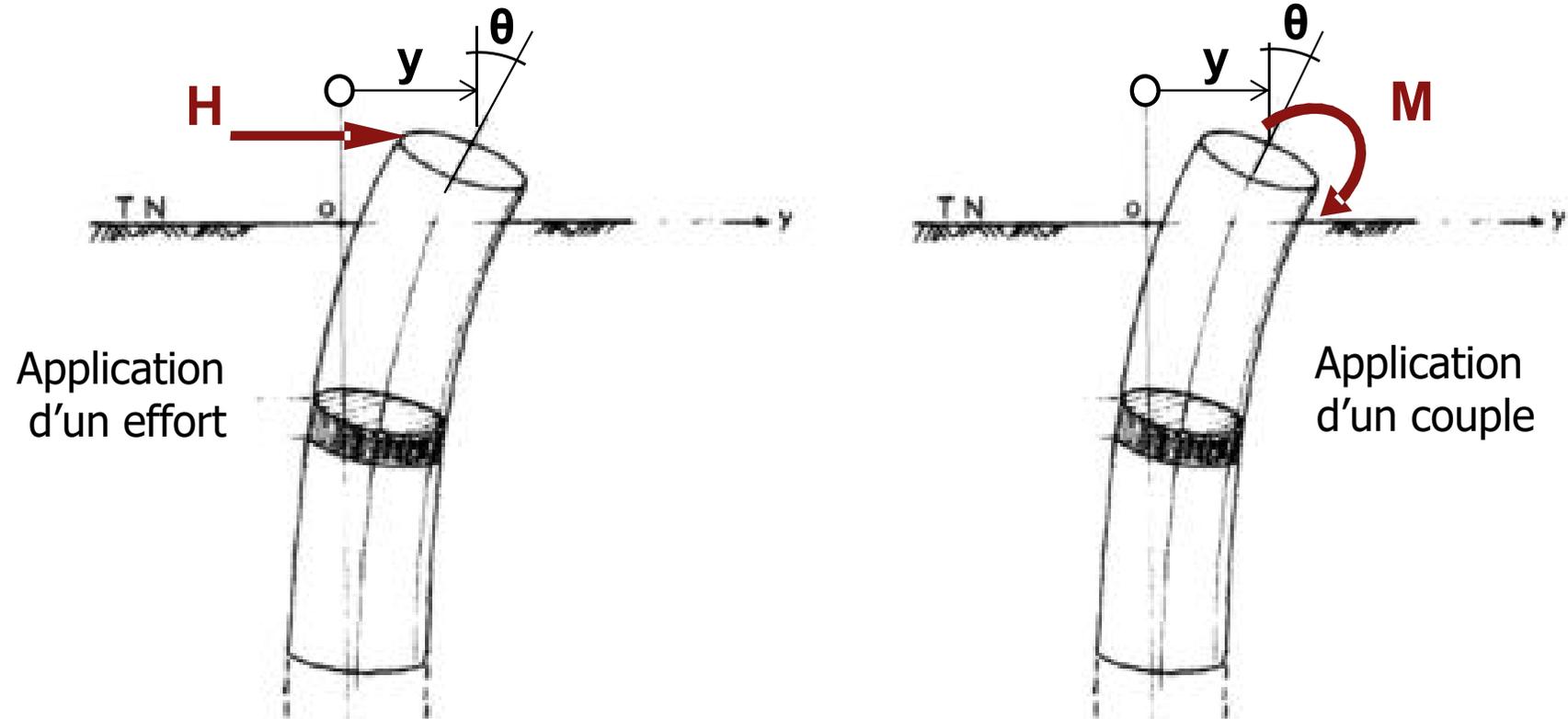
Modèle de sol	$\frac{K_{HH}}{dE_s}$	$\frac{K_{MM}}{d^3E_s}$	$\frac{K_{HM}}{d^2E_s}$
$E = E_s \cdot zld$	$0,60 \left(\frac{E_p}{E_s} \right)^{0,35}$	$0,14 \left(\frac{E_p}{E_s} \right)^{0,80}$	$-0,17 \left(\frac{E_p}{E_s} \right)^{0,60}$
$E = E_s \sqrt{zld}$	$0,79 \left(\frac{E_p}{E_s} \right)^{0,28}$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



=> Les trois termes (K_{HH} , K_{HM} , K_{MM}) forment un ensemble indissociable !

Pieux sous séisme

- La question des raideurs couplées



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

Pieux sous séisme

- La question des raideurs couplées

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

⇒ Rotation nulle en tête ($\theta = 0$)

$$\begin{cases} H = K_{HH} y & \text{(raideur en translation)} \\ M = K_{HM} y & \text{(moment à l'encastrement)} \end{cases}$$

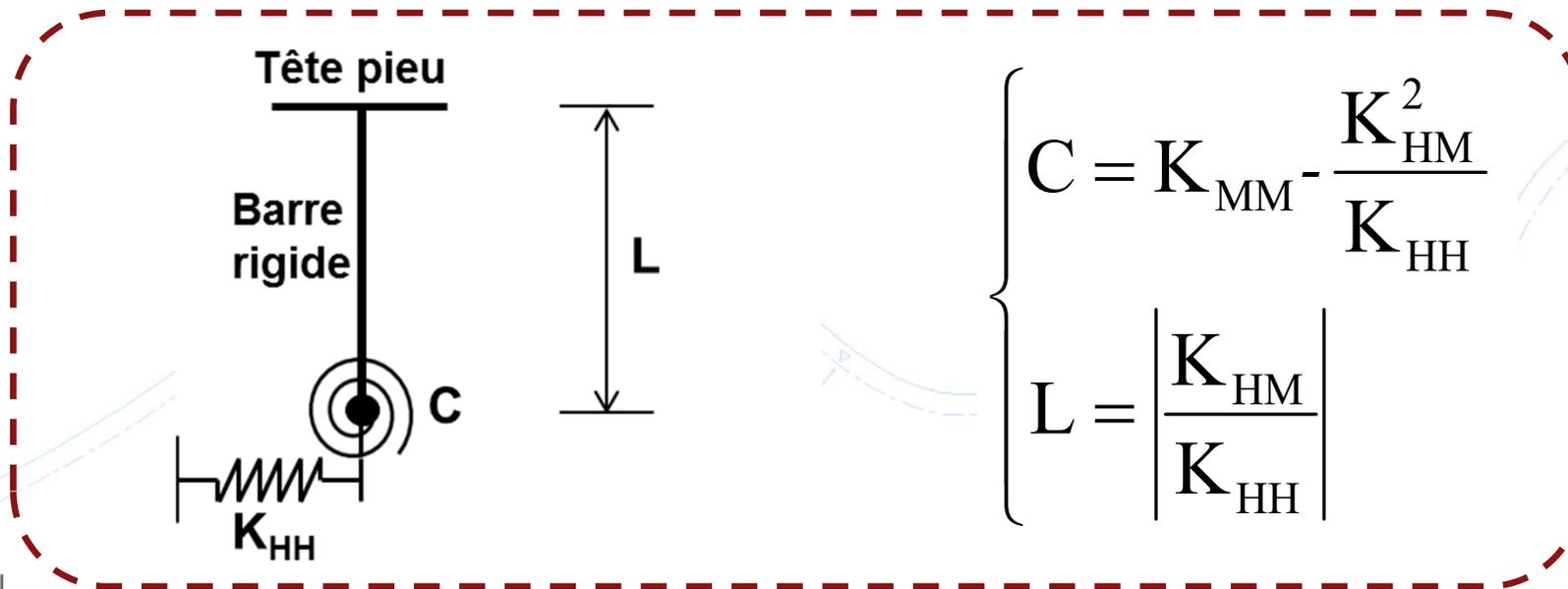
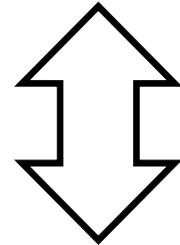
⇒ Rotation libre en tête ($M = 0$)

$$\begin{cases} H = \left(K_{HH} - \frac{K_{HM}^2}{K_{MM}} \right) \cdot y \\ \theta = -\frac{K_{HM}}{K_{MM}} y \end{cases}$$

Pieux sous séisme

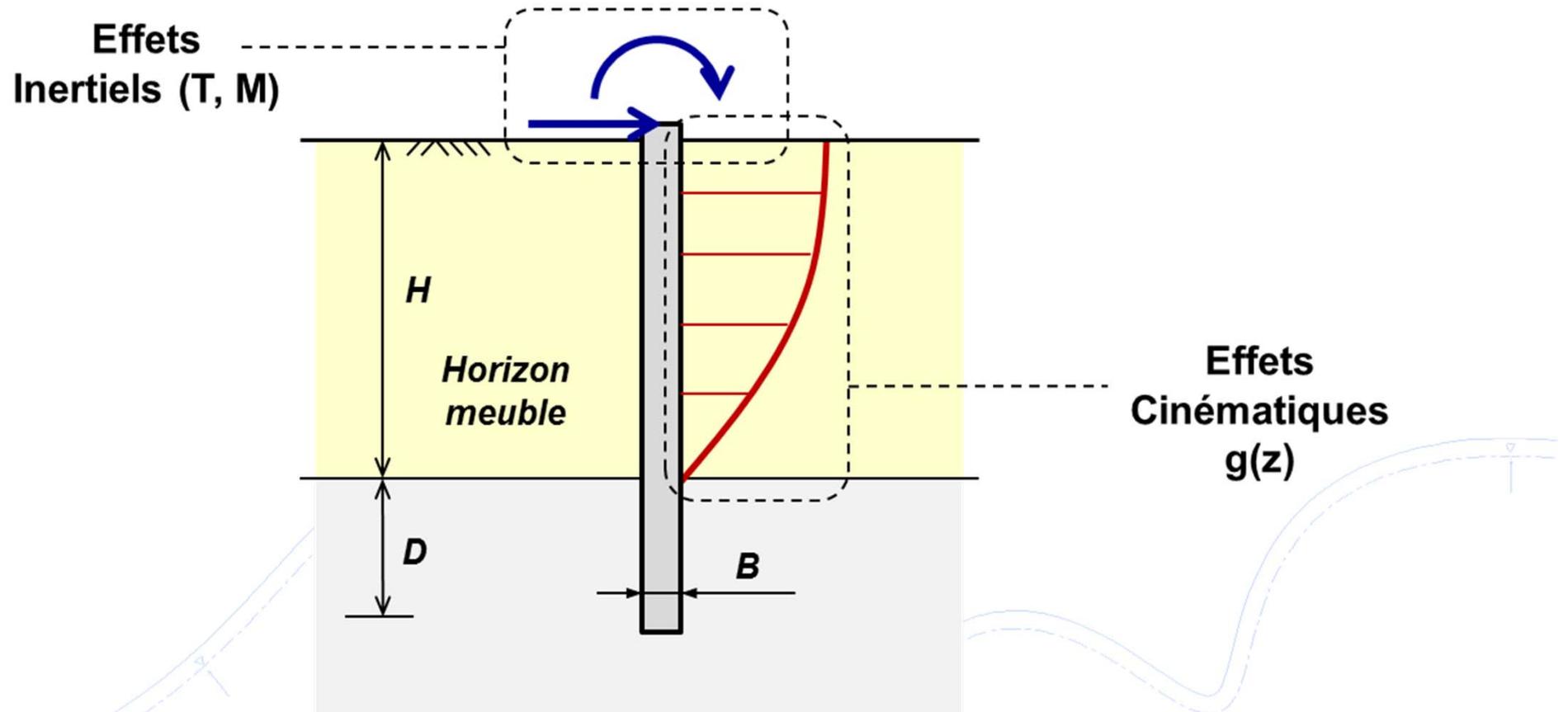
- La question des raideurs couplées

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



Pieux sous séisme

- La question des effets cinématiques

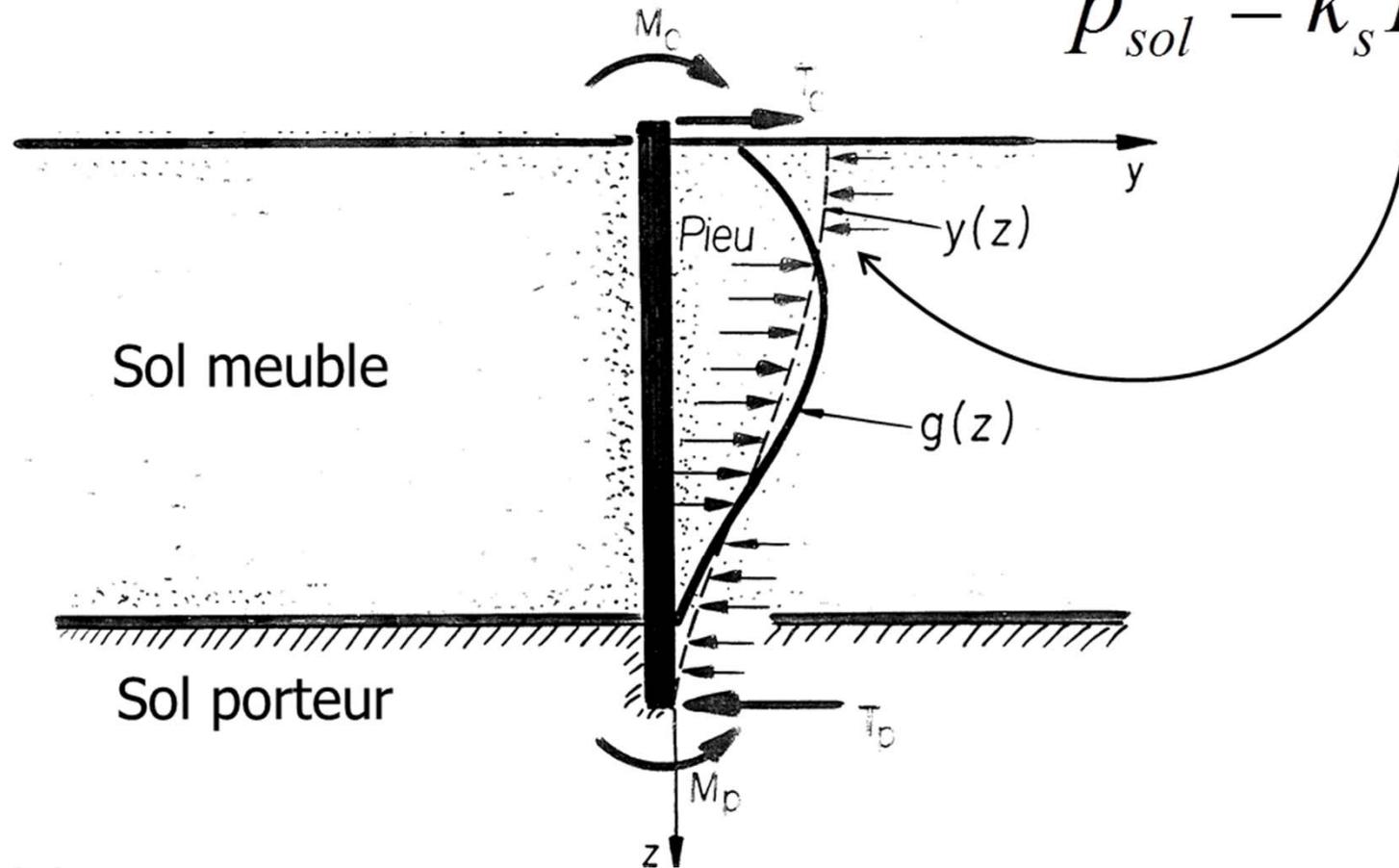


$g(z)$ = déplacement libre du sol (et non imposé au pieu)

Pieux sous séisme

- La question des effets cinématiques

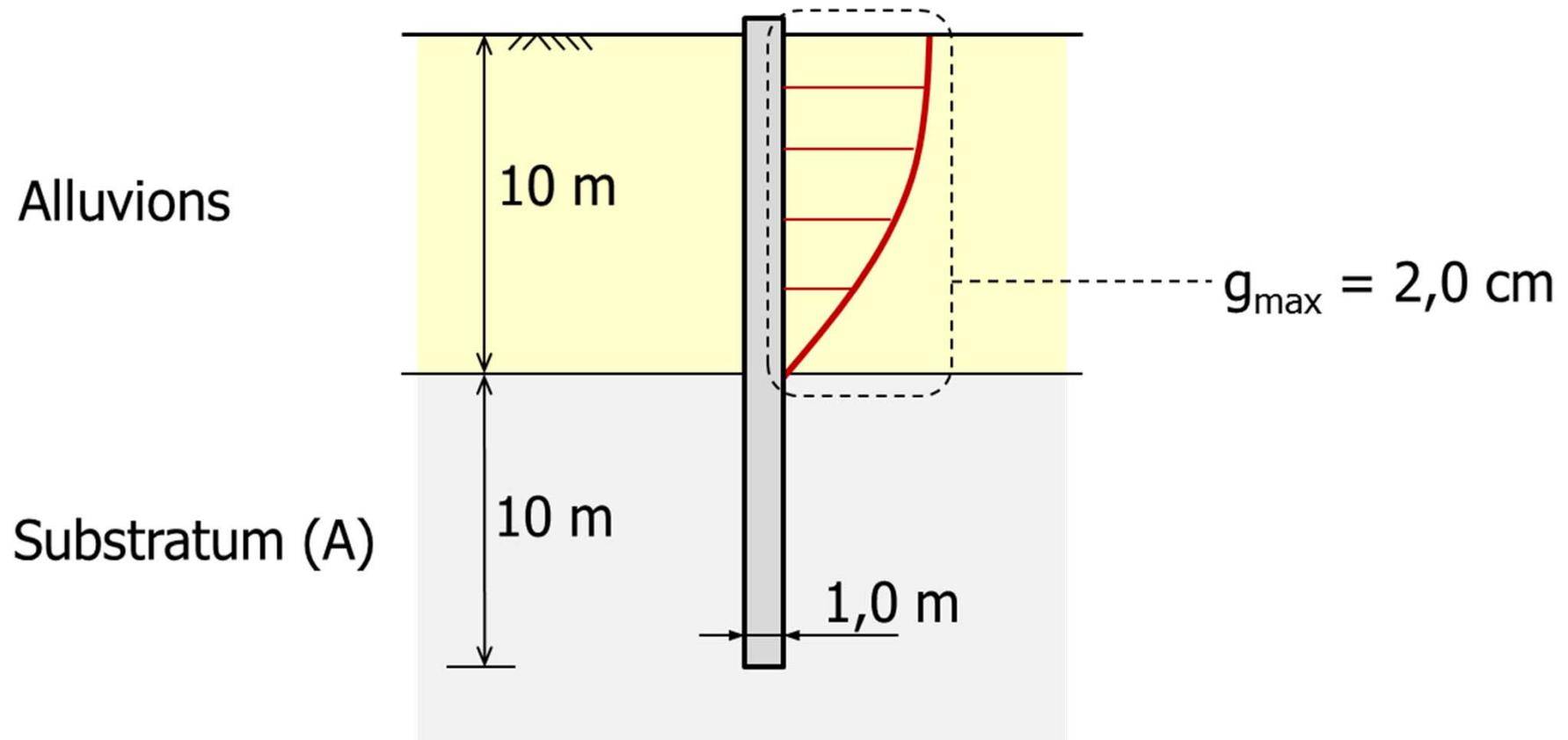
$$p_{sol} = k_s B(y - g)$$



$g(z)$ = déplacement libre du sol (et non imposé au pieu)

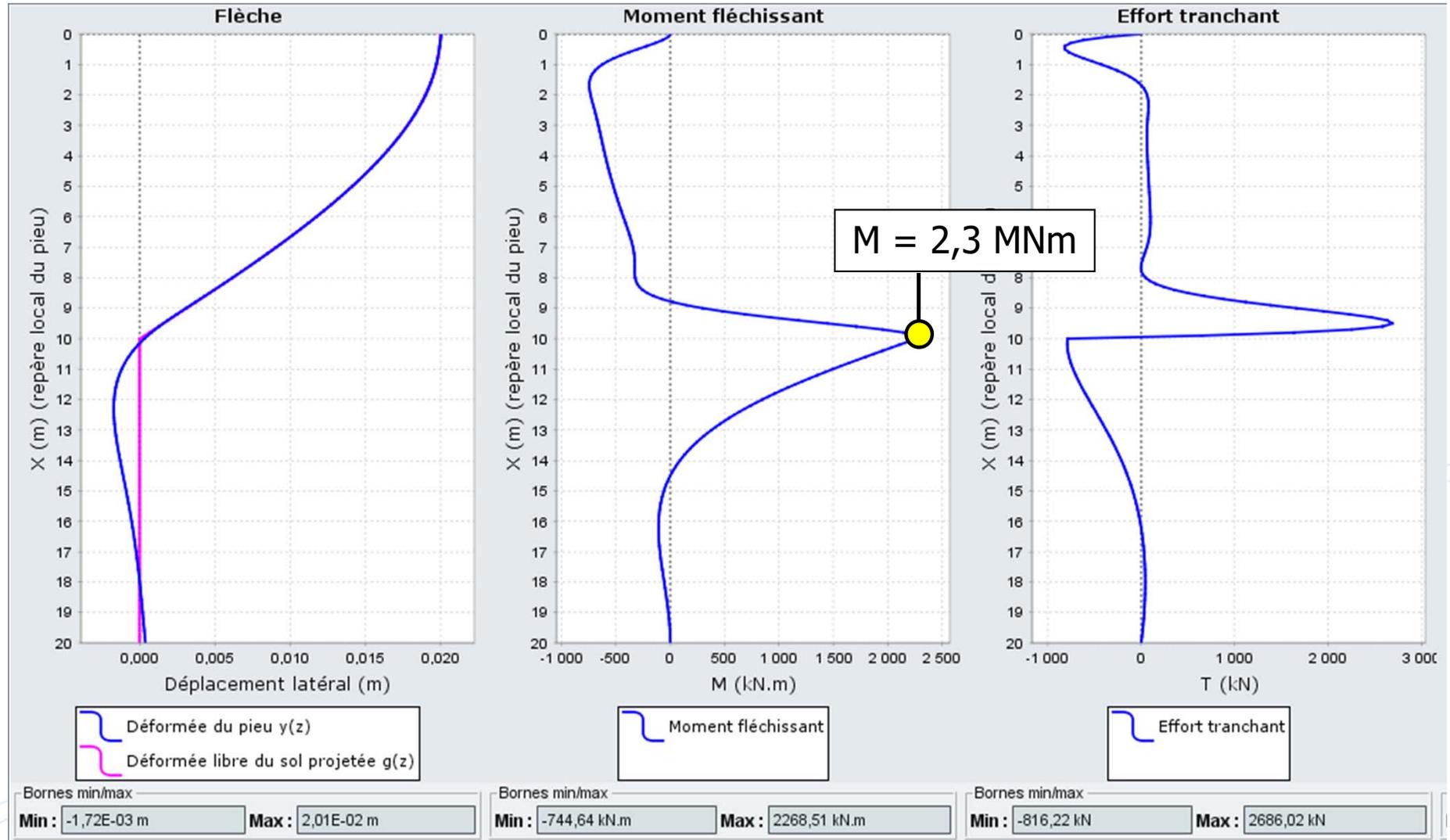
Pieux sous séisme

- La question des effets cinématiques : cas rencontré



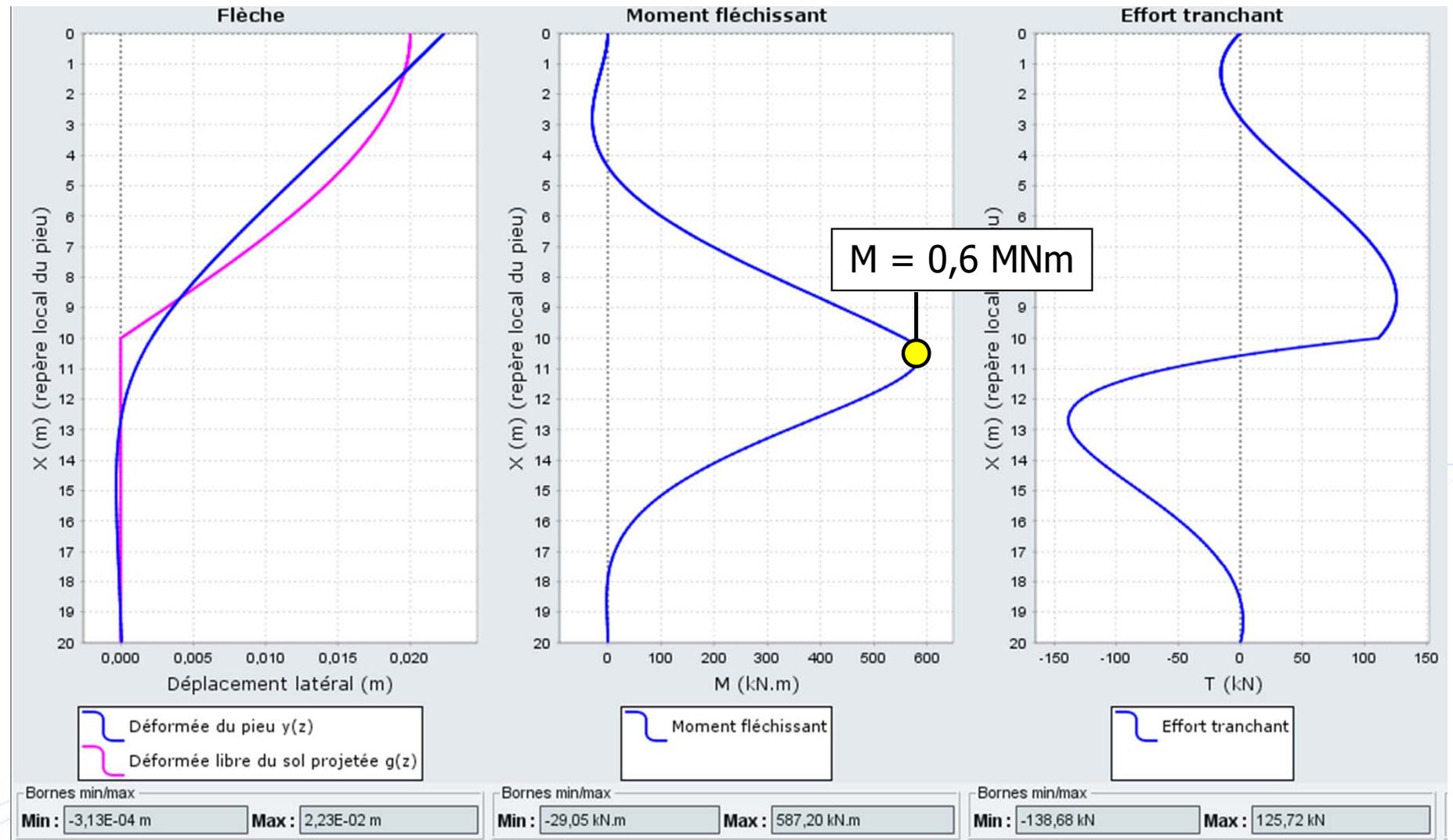
Pieux sous séisme

- Effets cinématiques : comportement avec $y(z) = g(z)$



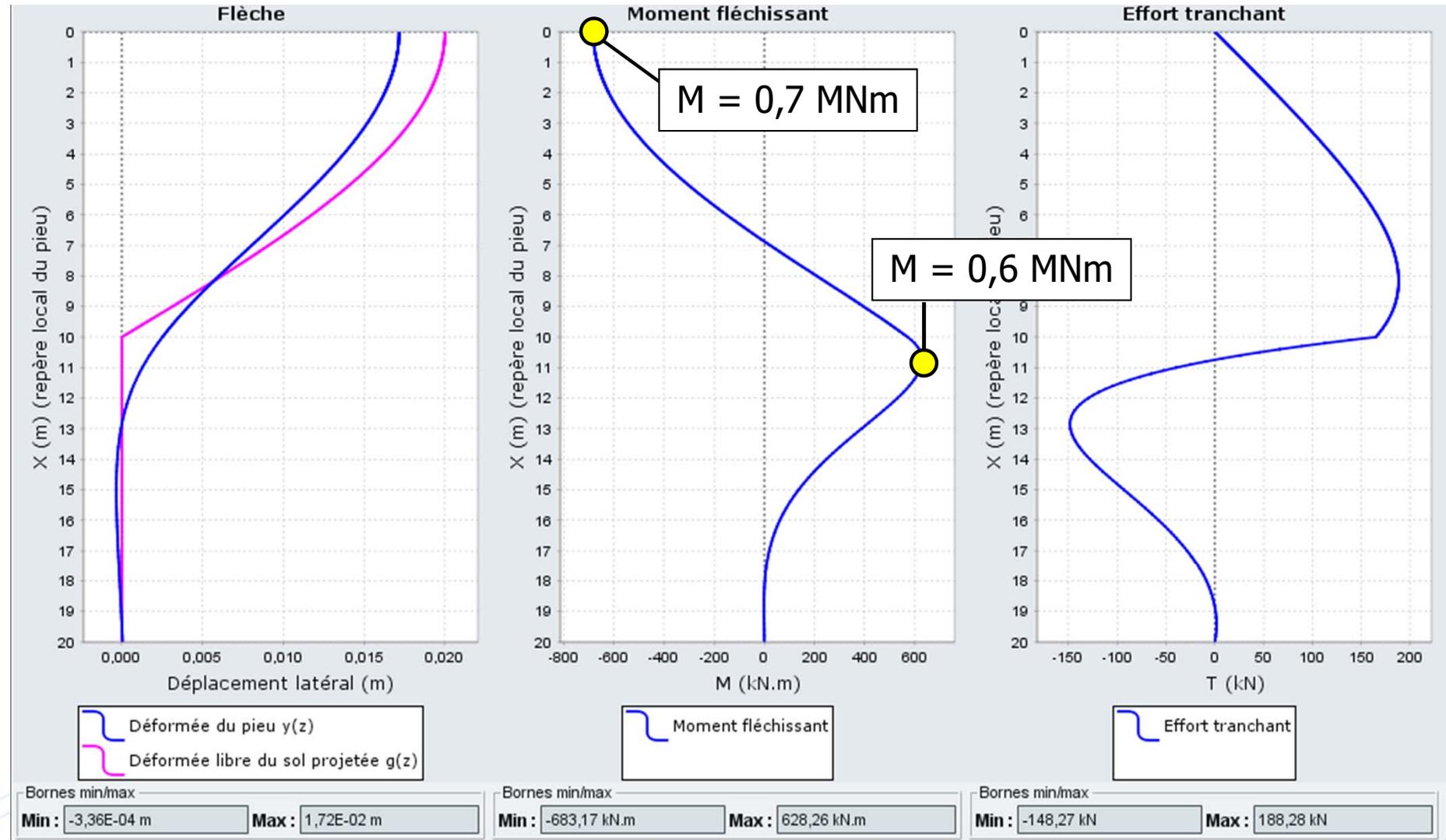
Pieux sous séisme

- Effets cinématiques : tête libre



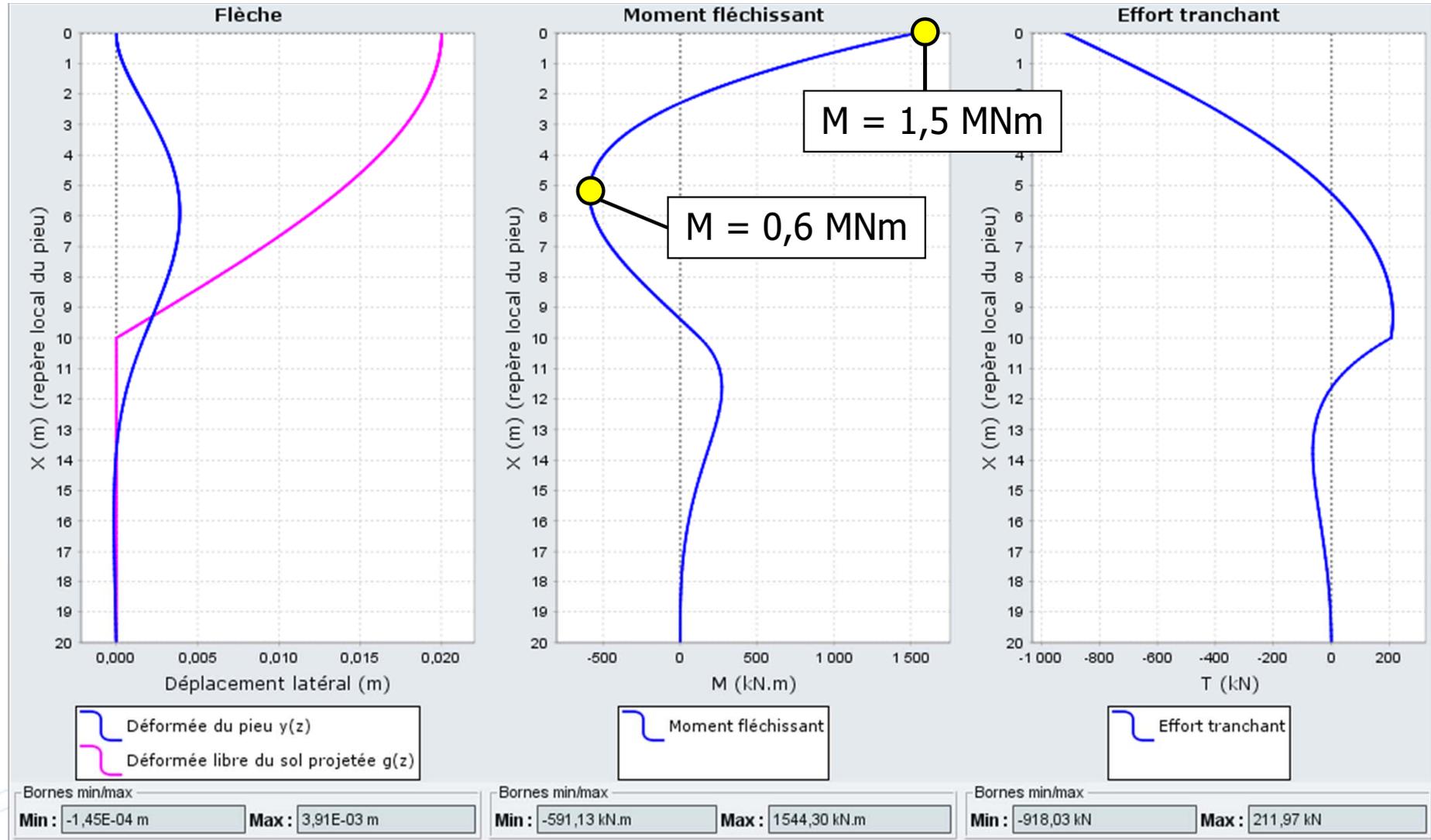
Pieux sous séisme

- Effets cinématiques : $\omega_{\text{tête}} = 0$



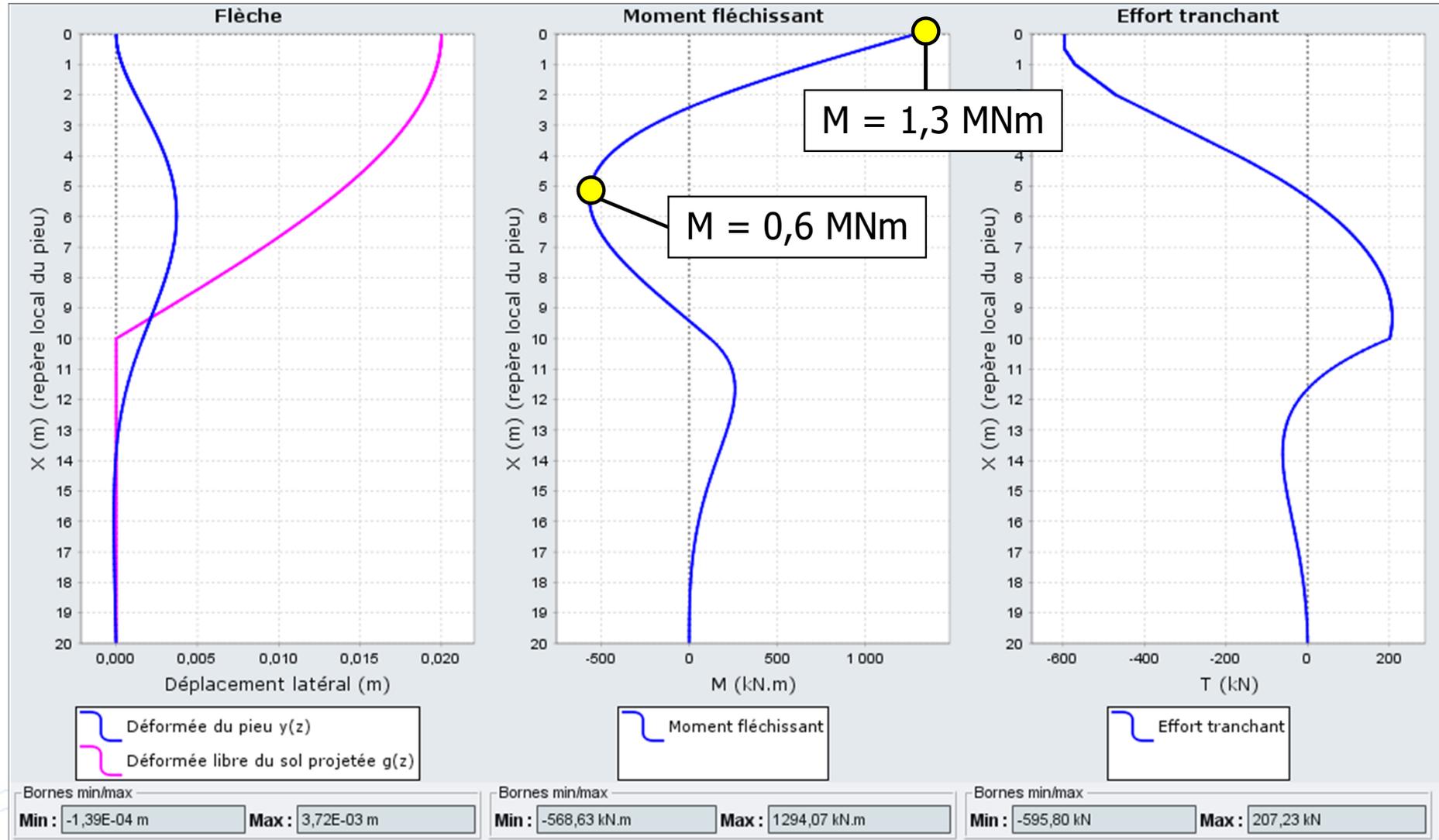
Pieux sous séisme

- Effets cinématiques : $\omega_{\text{tête}} = 0$ et $y_{\text{tête}} = 0$



Pieux sous séisme

- Effets cinématiques : $\omega_{tête} = 0$ et $y_{tête} = 0$ / $r_{max} = p_l$



Conclusion

- « Cadrer » les situations nécessitant d'aller au-delà des approches simplifiées usuelles
- Nécessité de « penser » préalablement le modèle géotechnique tenant compte de la problématique parasismique
- Recommandations (attendues) visent également à faciliter les échanges entre les BE géotechnique et structure

Merci de votre attention

