



# Prise en compte des effets d'interaction sol-structure dans les problématiques de fondation



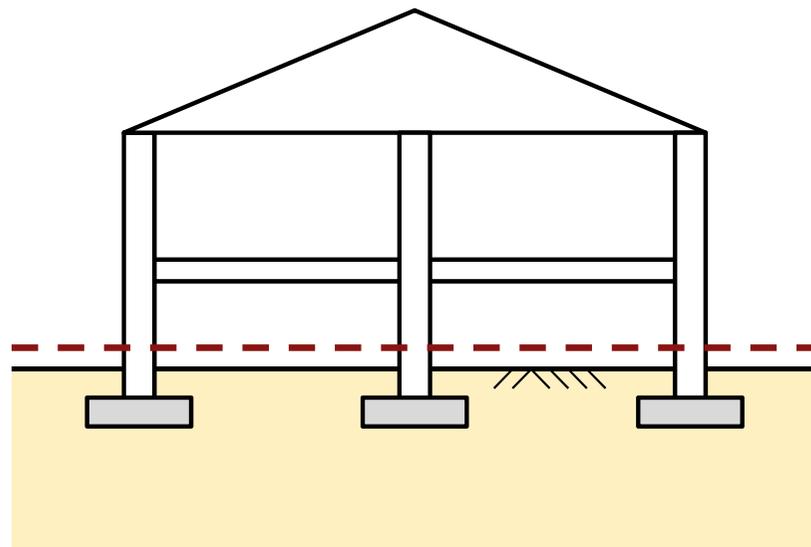
Fahd Cuira  
Terrasol

# Sommaire

- Réponse d'une fondation isolée
- Les enjeux de l'ISS
- Radiums et dallages
- Prise en compte du séisme

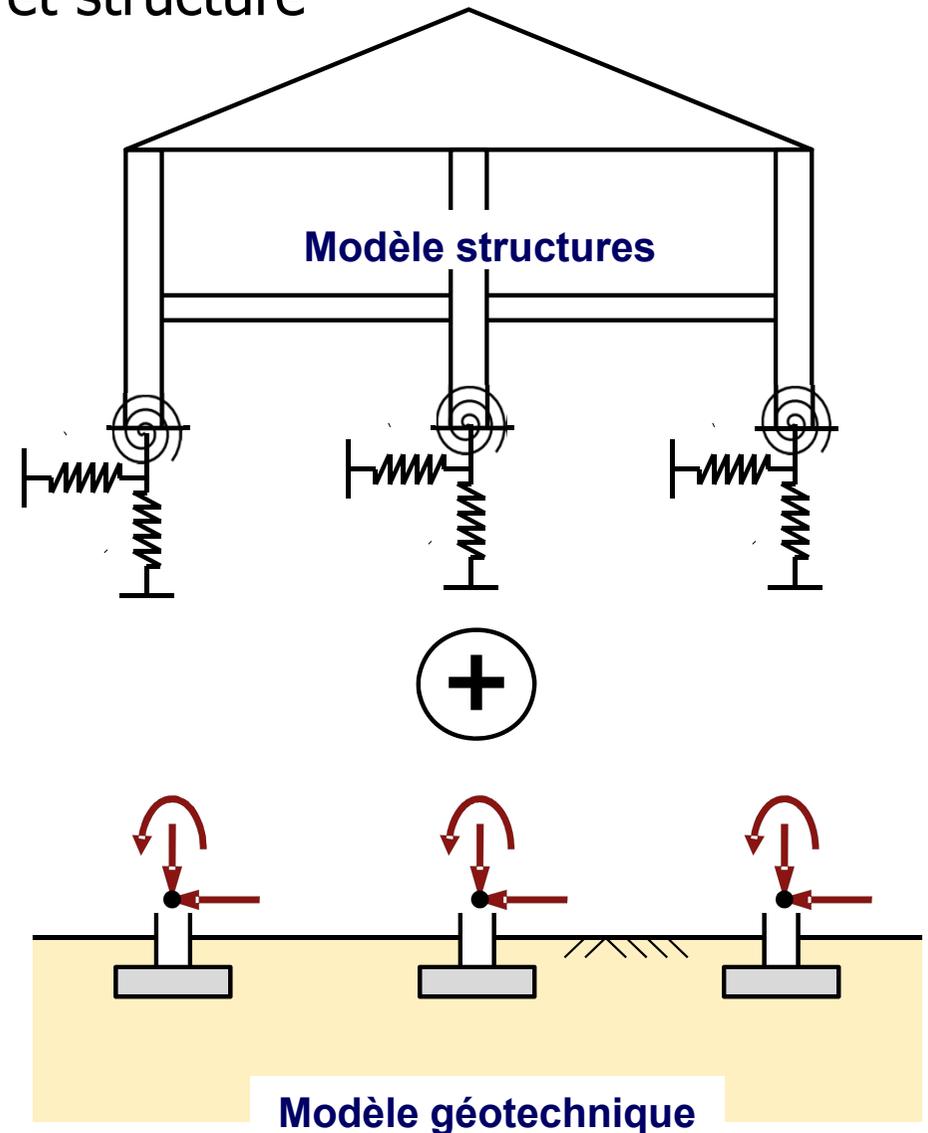
# Préambule

- Frontière entre modèles géotechnique et structure



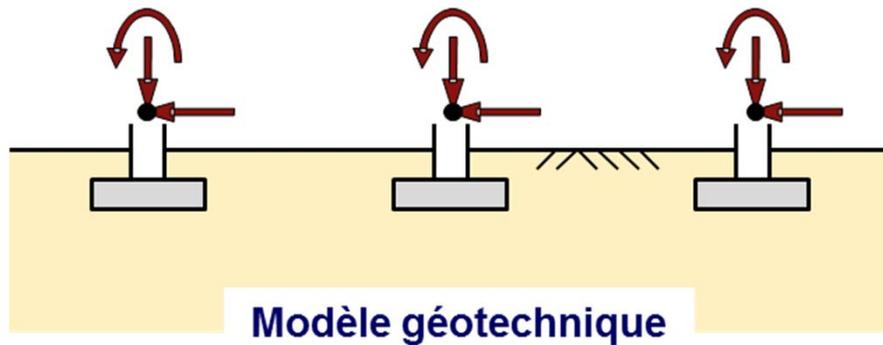
Ouvrage à concevoir

(Cuira et Simon 2016)

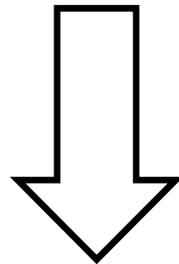


# Préambule

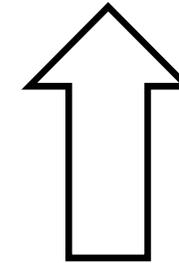
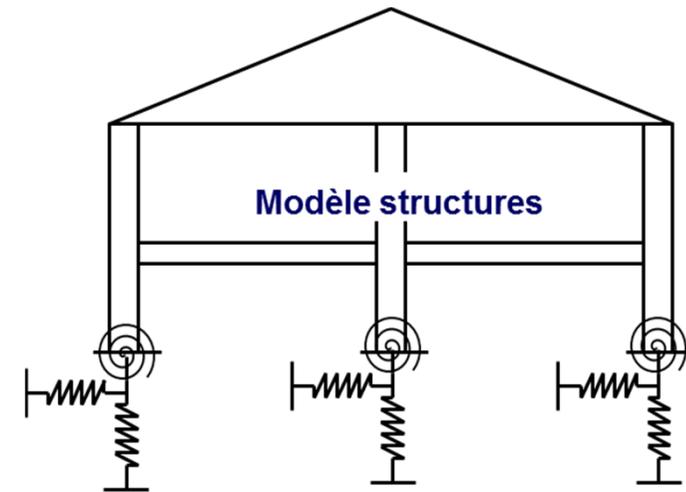
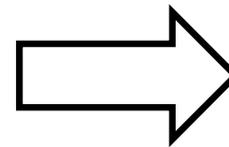
- Echanges entre modèles géotechnique et structure



Réactions des appuis  
Déflexion et sollicitations

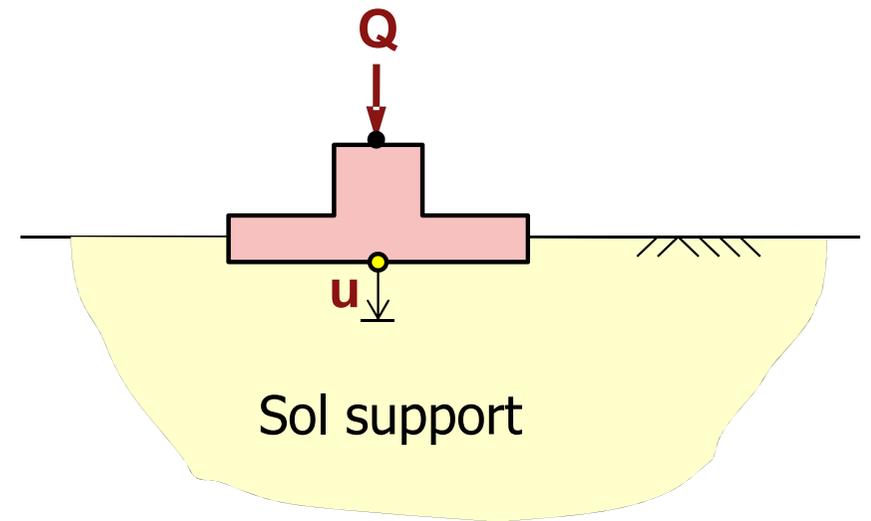
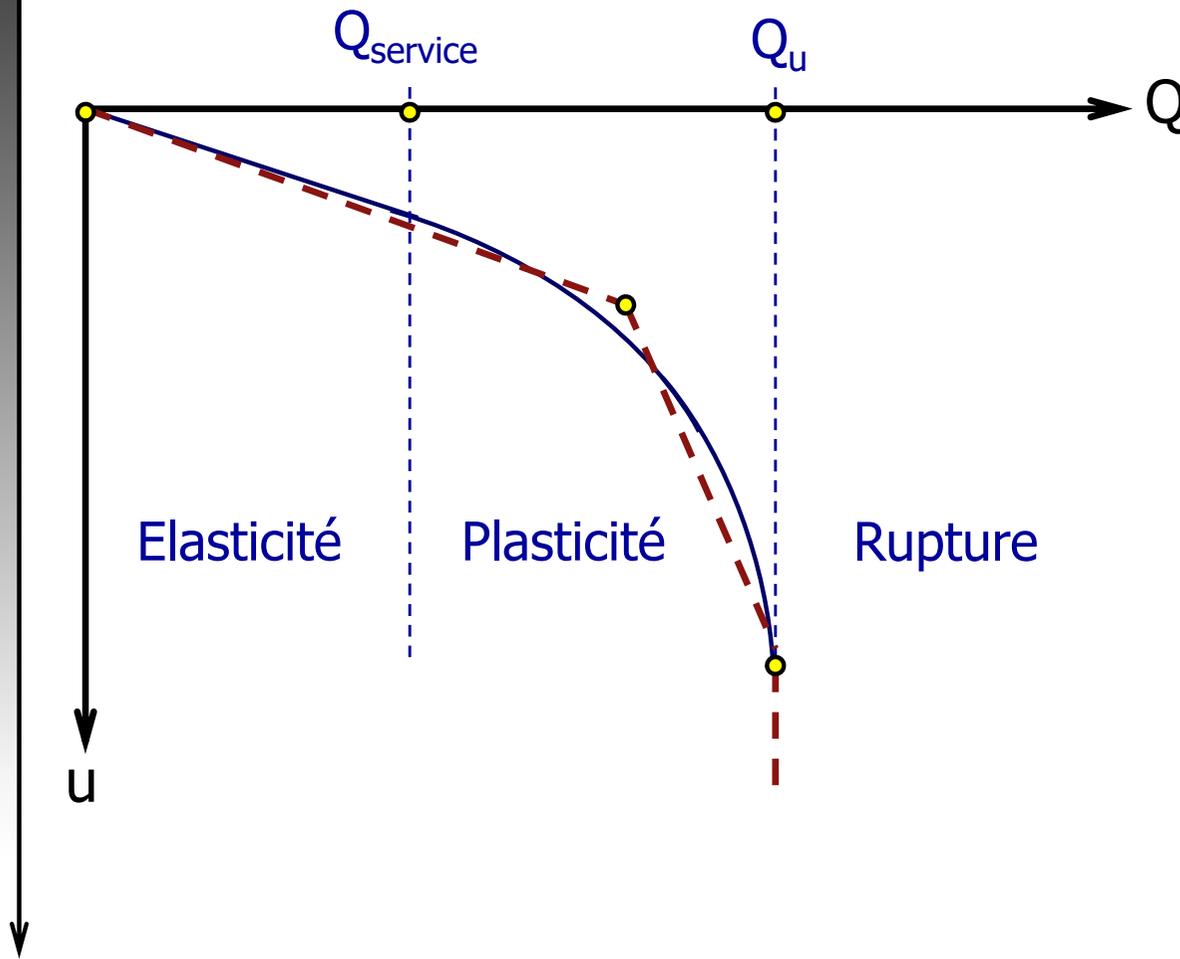


Raideurs « apparentes »  
des appuis



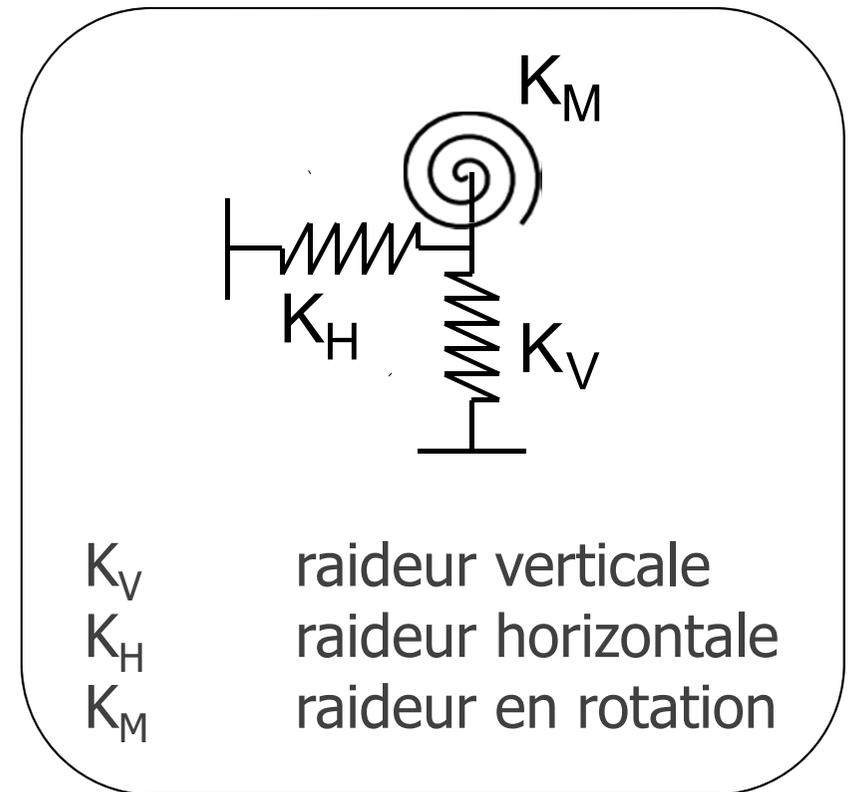
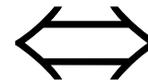
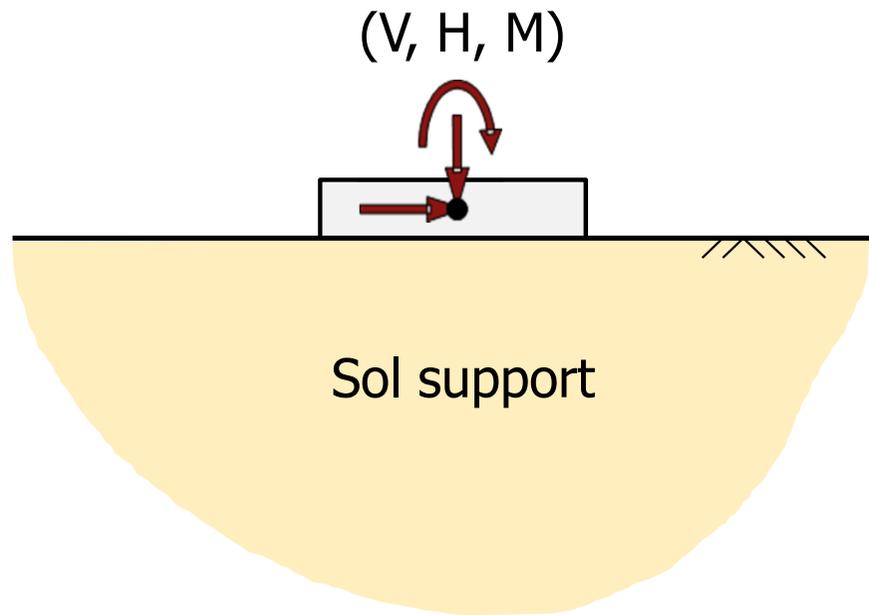
# Réponse d'une fondation isolée

- Justification d'un domaine de pseudo-élasticité



# Réponse d'une fondation isolée

- Matrice de rigidité d'une semelle superficielle



Raideurs obtenues par recours à des modèles semi-empiriques ou des solutions dérivées de la théorie de l'élasticité

# Réponse d'une fondation isolée

- Matrice de rigidité d'un pieu isolé

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)

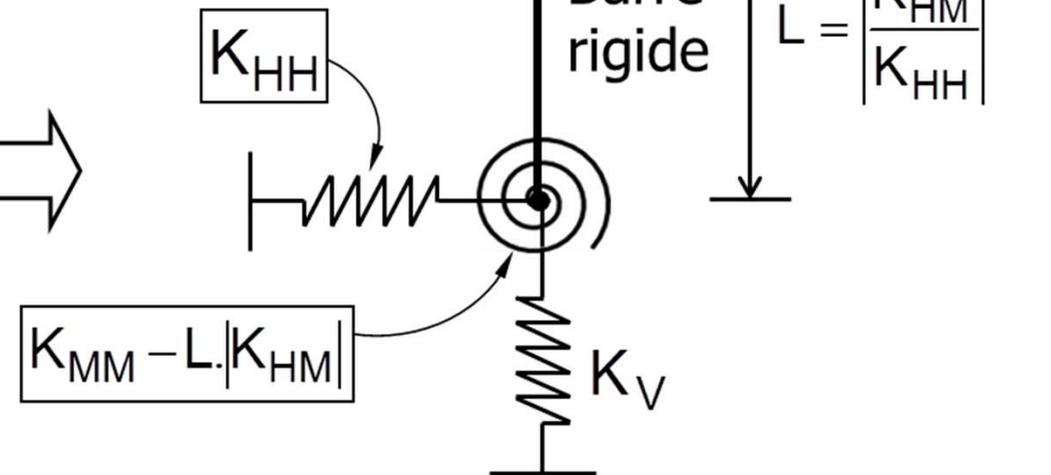
Raideurs obtenues par recours à des modèles t-z / p-y caractérisés directement à partir du pressiomètre

# Réponse d'une fondation isolée

- Matrice de rigidité d'un pieu isolé : traitement des termes couplés

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

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



(Cuira 2014)

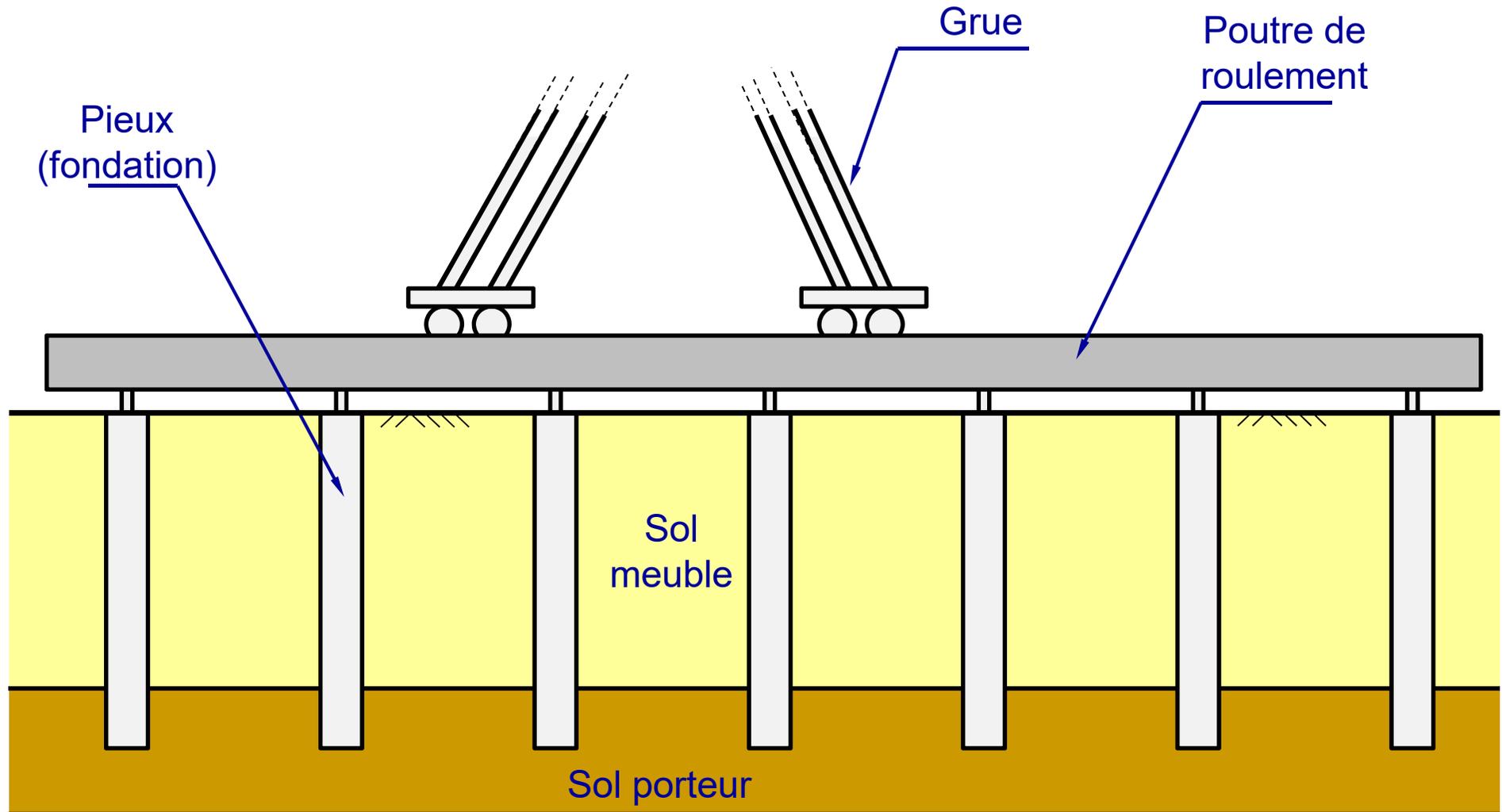
# Enjeux ISS : les déplacements

- Exemple d'un pont roulant sur fondations profondes



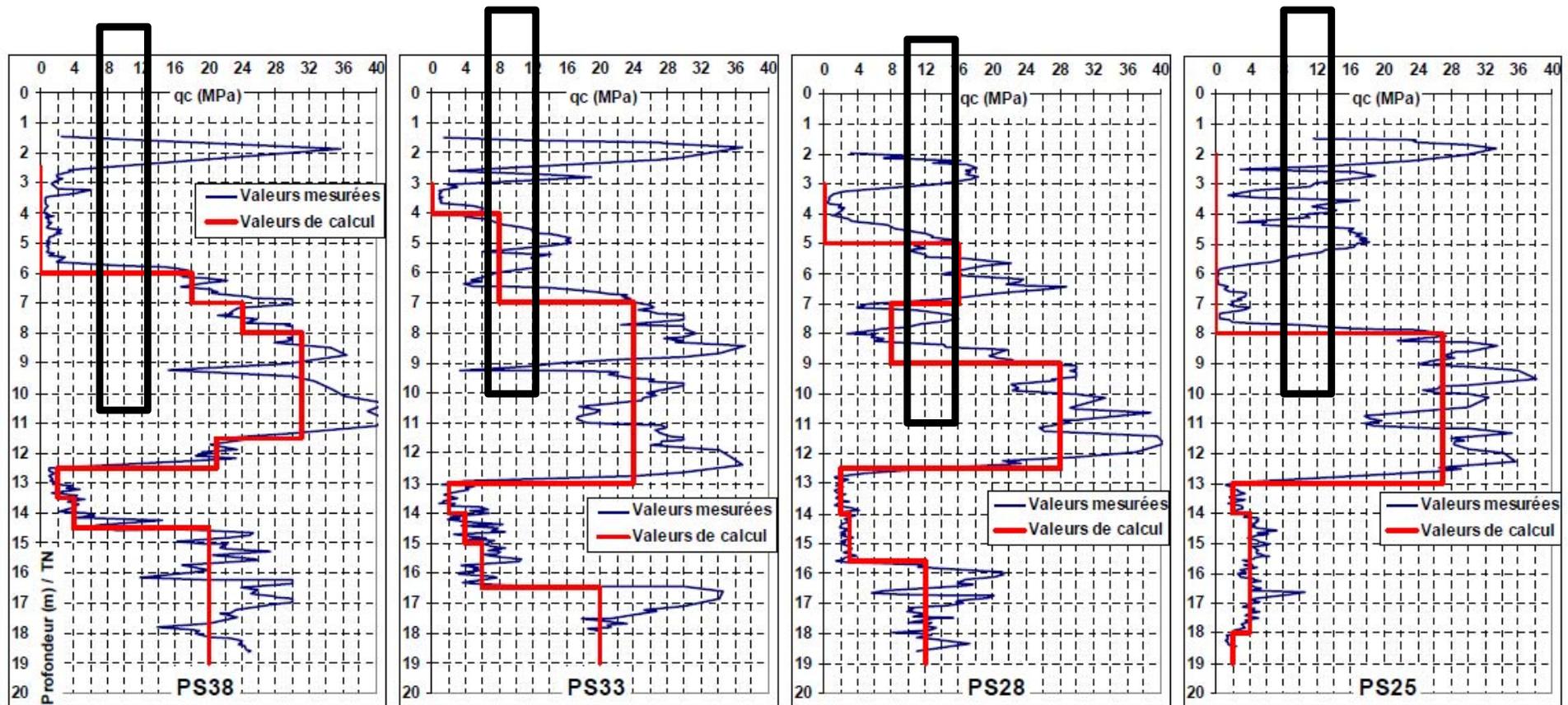
# Enjeux ISS : les déplacements

- Exemple d'un pont roulant sur fondations profondes



# Enjeux ISS : les déplacements

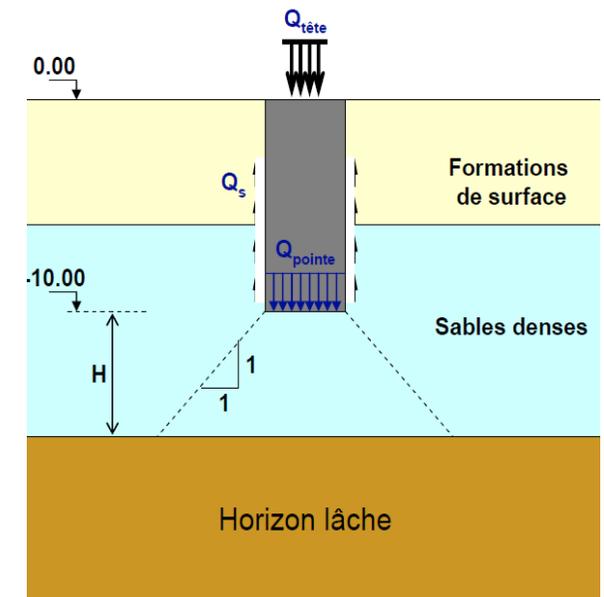
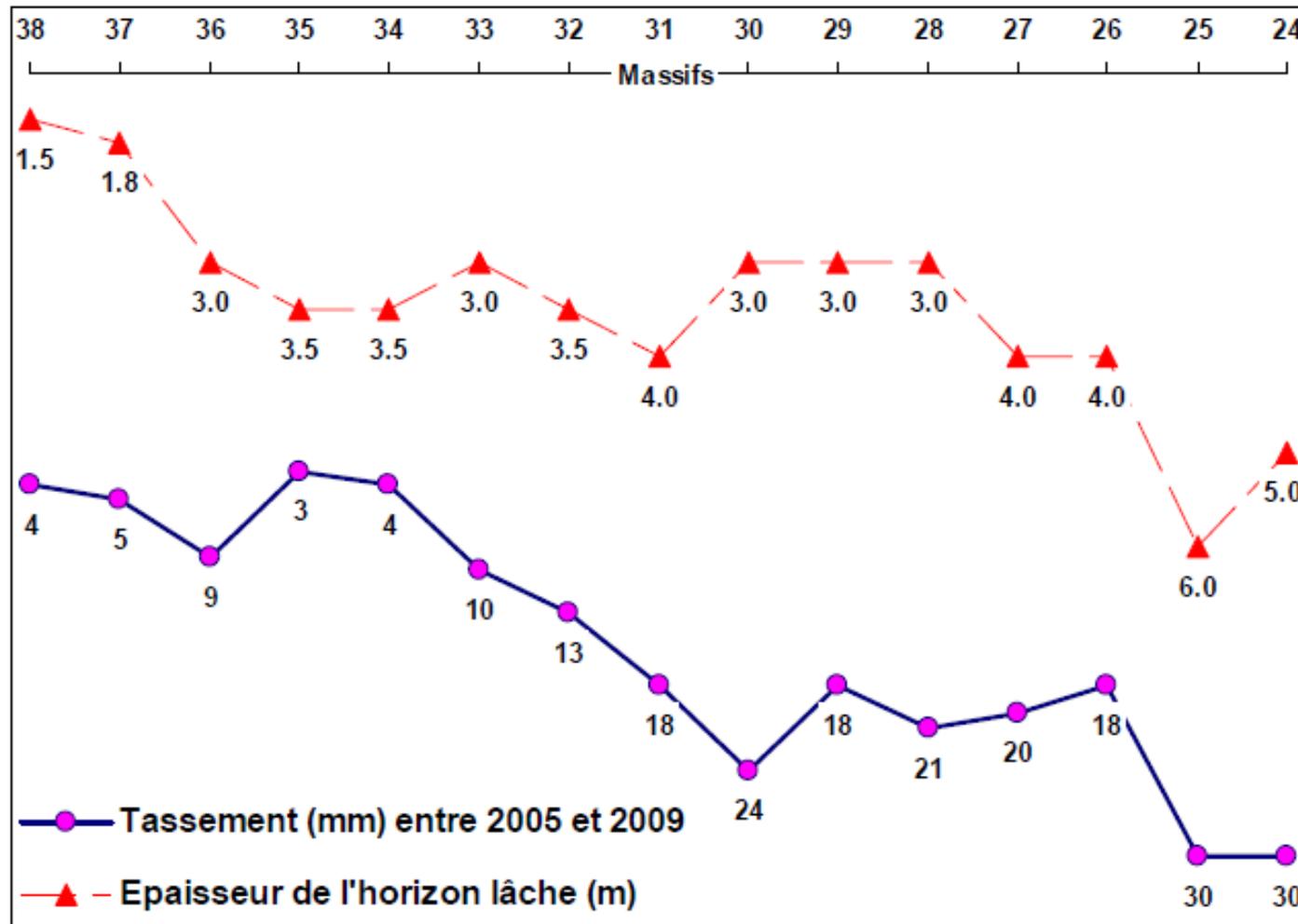
- Exemple d'un pont roulant sur fondations profondes



Etude conception/exe : portance ELS/ELU OK / aucun calcul de tassement /  
Structure dimensionnée pour un tassement forfaitaire de 1 cm ( $\sim B/100$ )

# Enjeux ISS : les déplacements

- Exemple d'un pont roulant sur fondations profondes



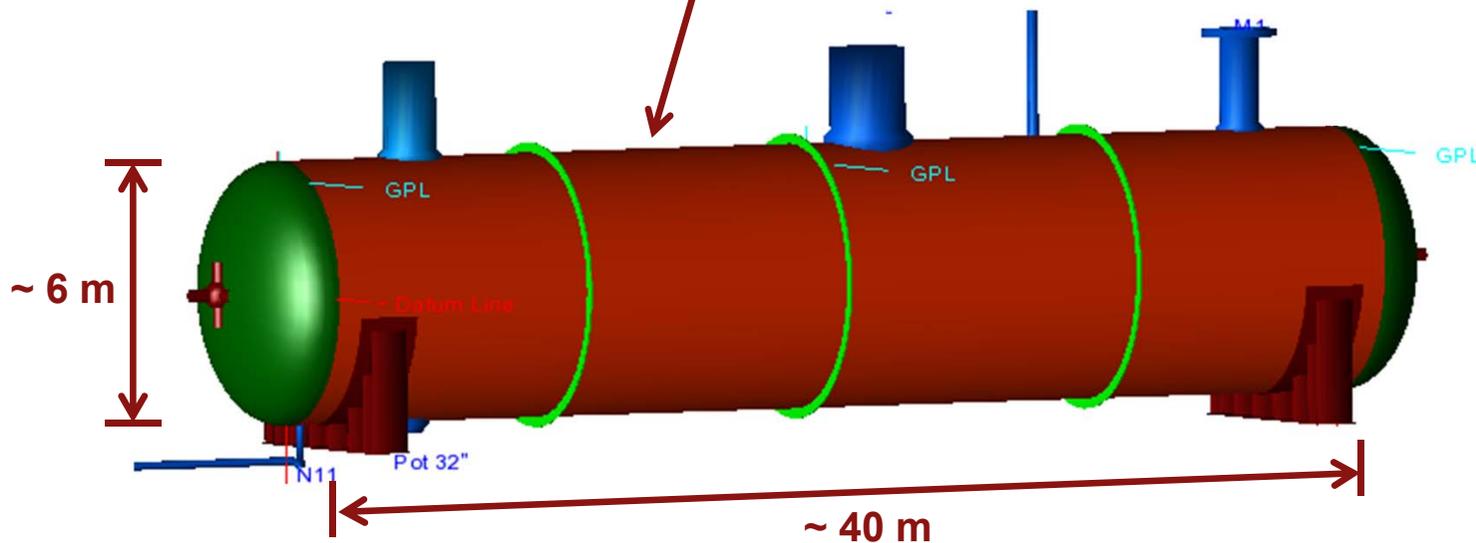
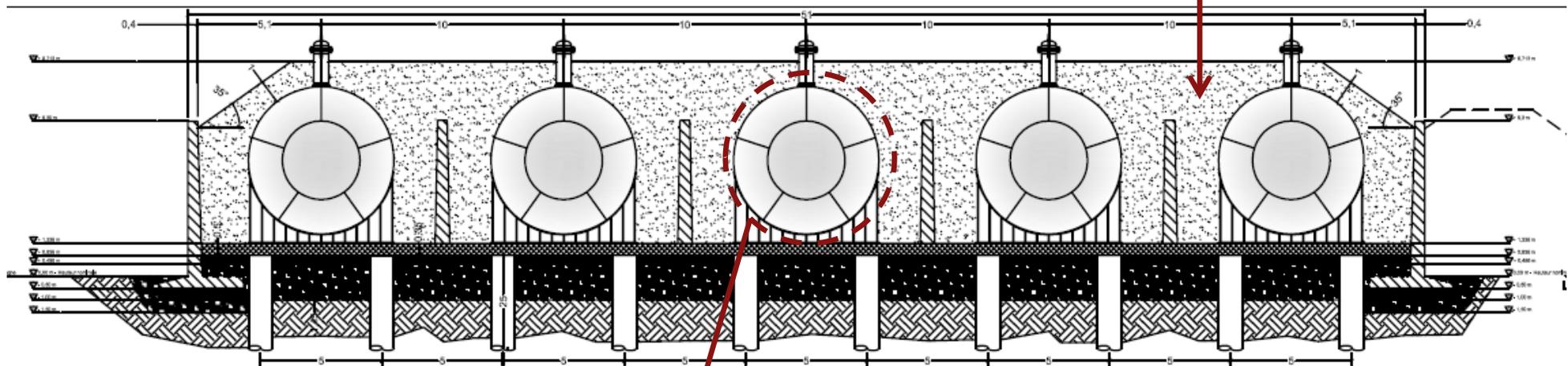
Contribution de l'horizon lâche : 0 à 3 cm

Corrélation entre tassement et épaisseur sol lâche

# Enjeux ISS : les sollicitations

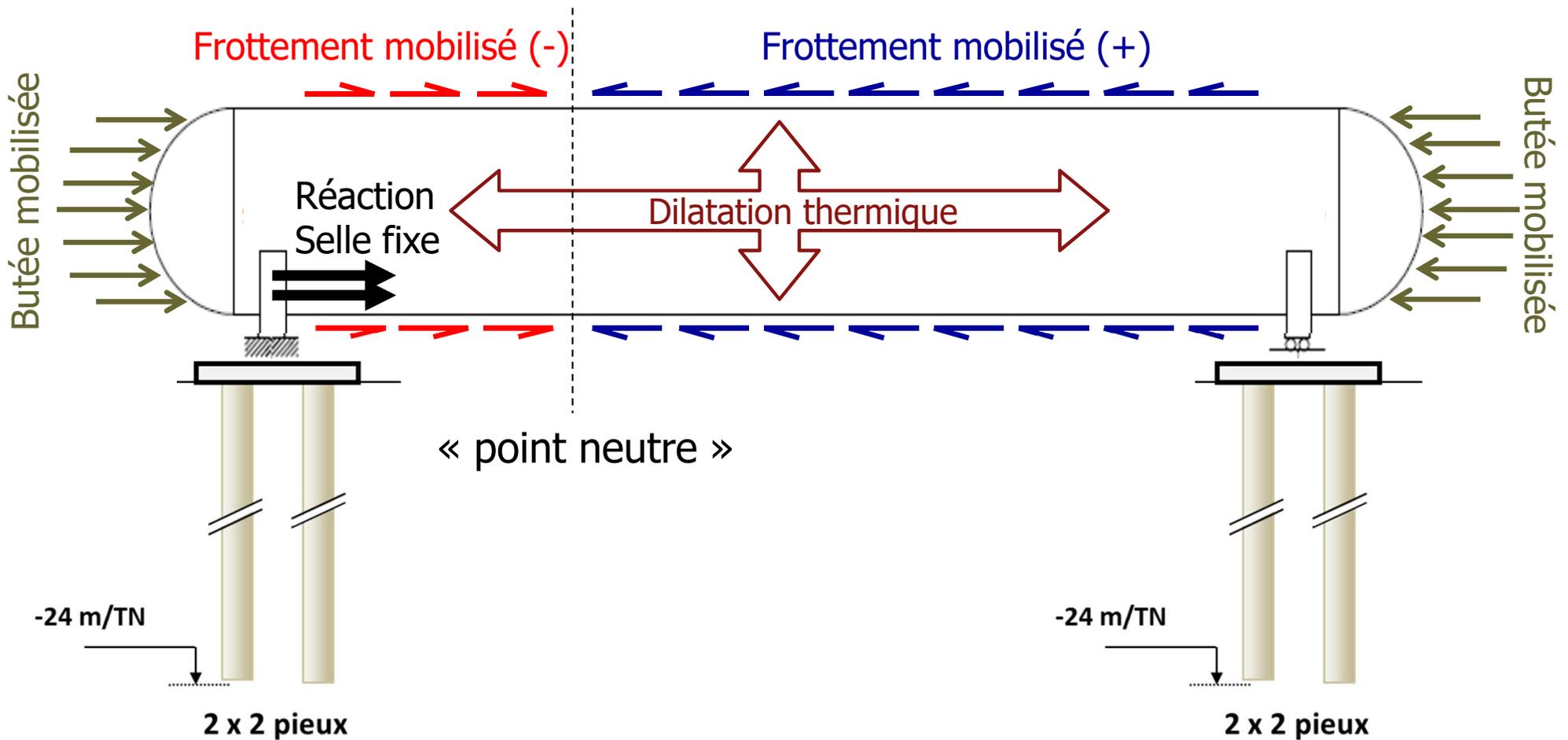
- Exemple d'un ouvrage soumis à sollicitations d'origine thermique

Remblai compacté



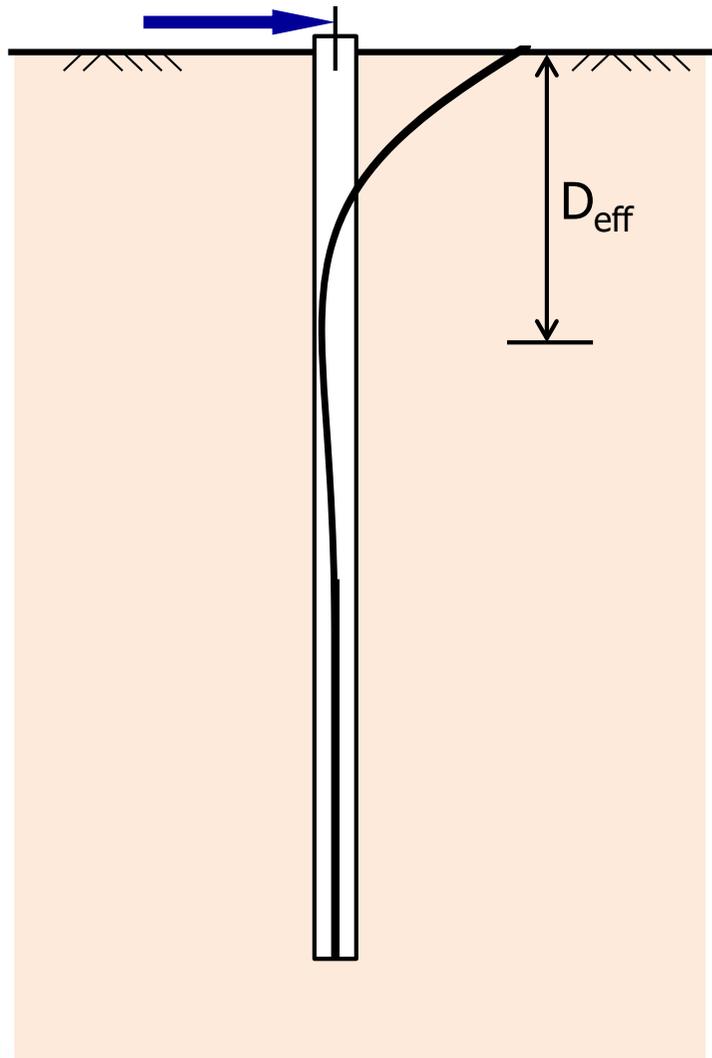
# Enjeux ISS : les sollicitations

- Exemple d'un ouvrage soumis à sollicitations d'origine thermique



# Enjeux ISS : les sollicitations

- Exemple d'un ouvrage soumis à sollicitations d'origine thermique



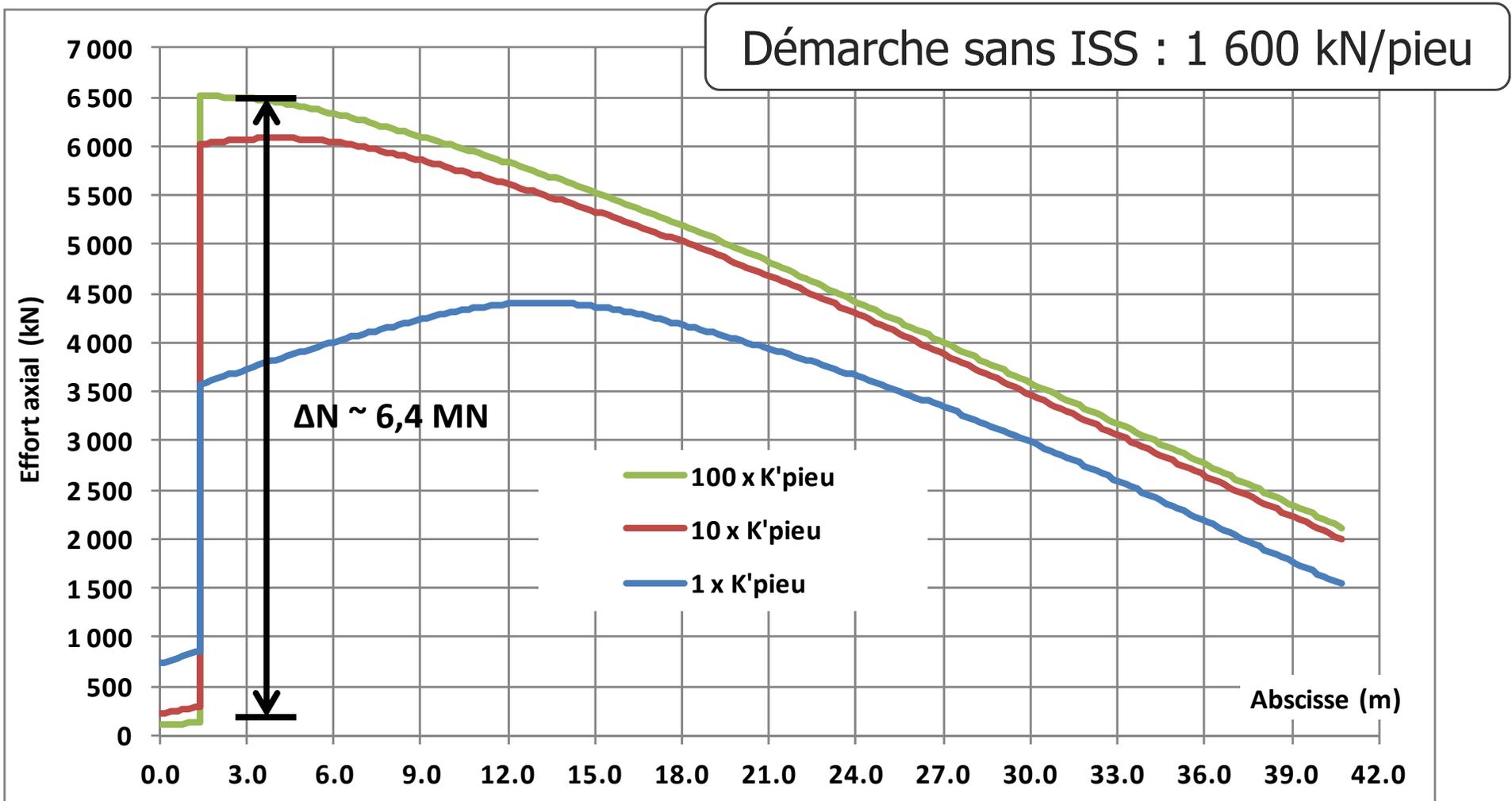
Particularité d'un pieu sous charge transversale

Réaction frontale du sol mobilisable sur une profondeur limitée  $D_{\text{eff}}$  fonction de la rigidité relative du pieu par rapport au sol

Cas courants :  $D_{\text{eff}} \sim 3 \text{ à } 6 \times B \Rightarrow$  raideur latérale principalement contrôlée par les terrains superficiels (généralement de faible consistance)

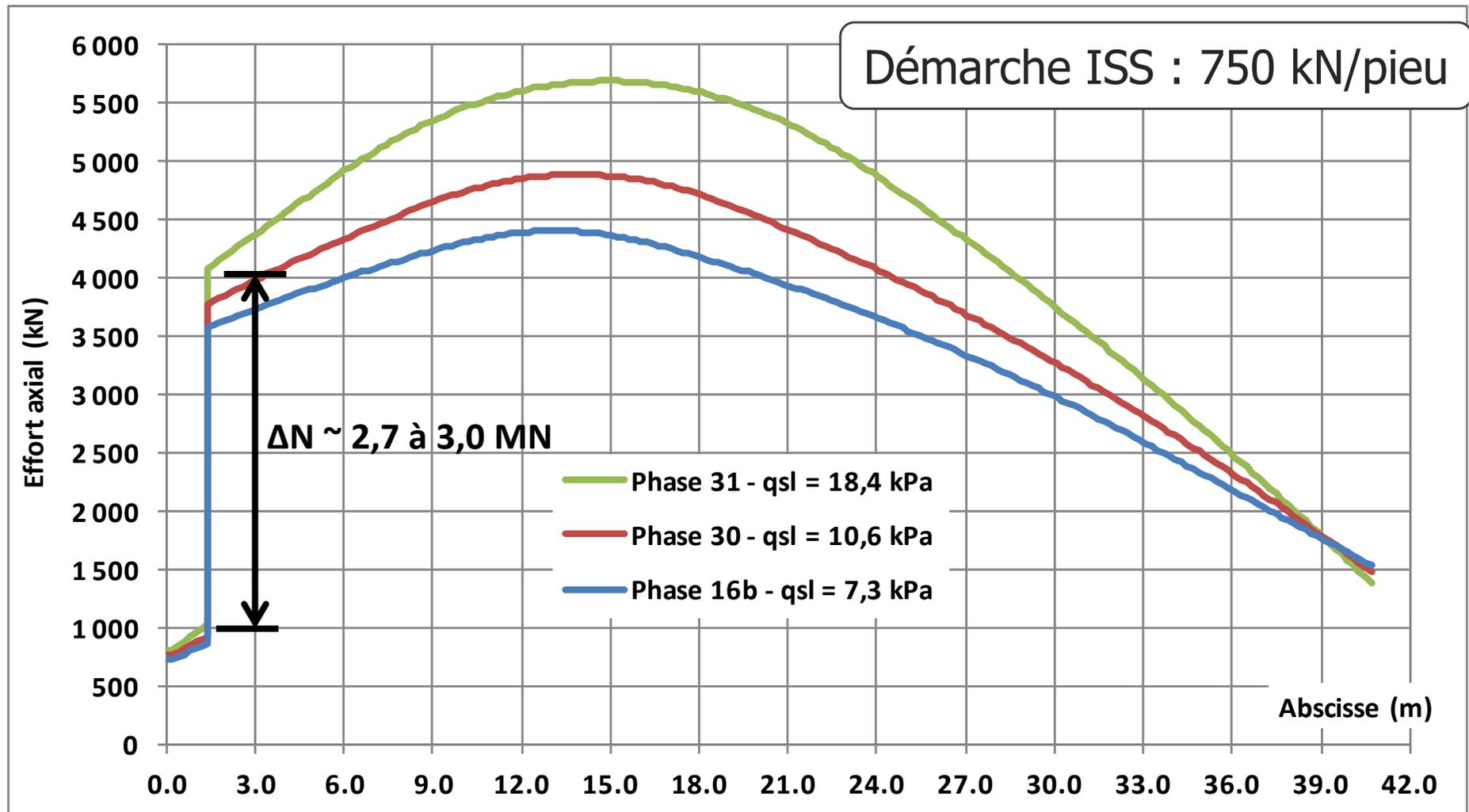
# Enjeux ISS : les sollicitations

- Exemple d'un ouvrage soumis à sollicitations d'origine thermique



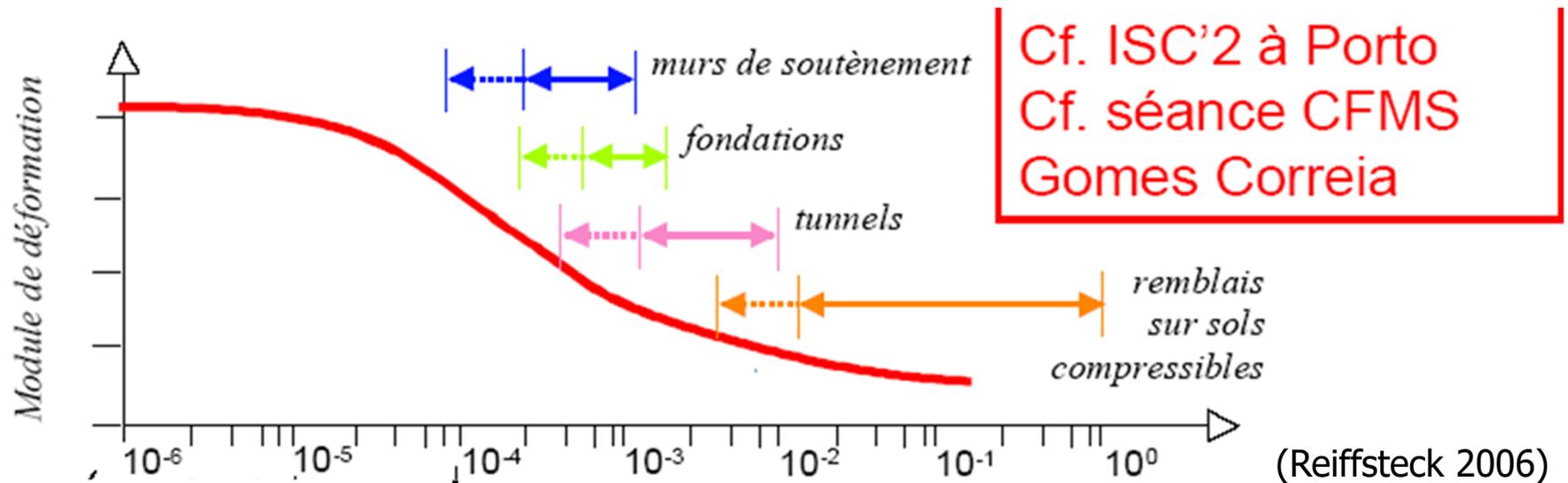
# Enjeux ISS : les sollicitations

- Exemple d'un ouvrage soumis à sollicitations d'origine thermique



# Enjeux ISS : la déformabilité du sol

- Le module « apparent » du sol dépend de l'amplitude de la déformation induite par l'ouvrage

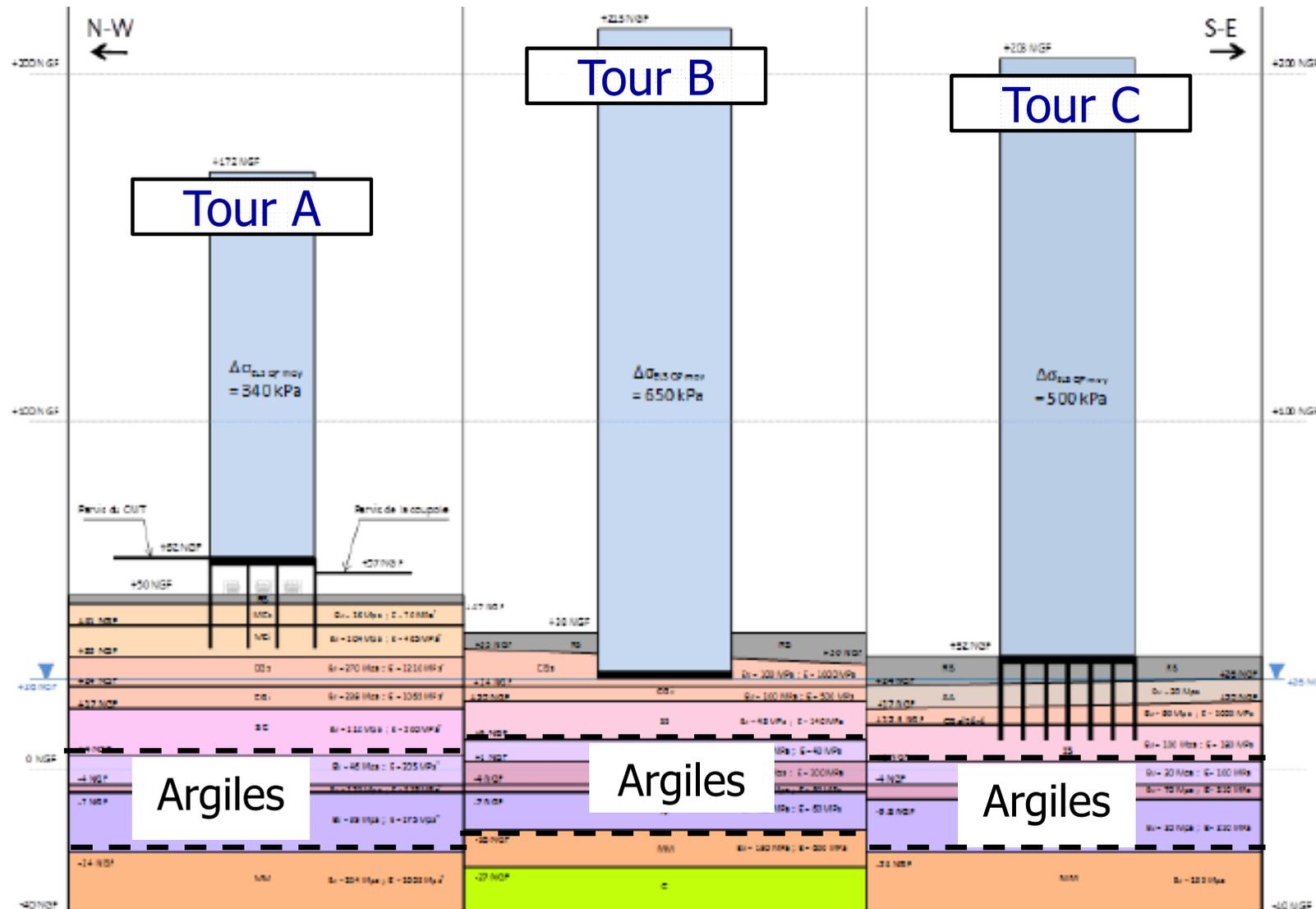


Essais dynamiques | Triaxiaux de précision | Essais labo classiques  
Essais in situ classiques

La réponse du sol doit être décrite en lien avec cette gamme de déformation

# Enjeux ISS : la déformabilité du sol

- Fondation d'un immeuble de grande hauteur (site de la Défense)



# Enjeux ISS : la déformabilité du sol

- Fondation d'un immeuble de grande hauteur (site de la Défense)

Rapport $E/E_M$ dans Argiles	Modèle numérique (éléments finis 3D)	Modèle analytique (Boussinesq)	Rapport des résultats
6,0	5,2 cm	5,5 cm	1,06
4,5	6,0 cm	6,5 cm	1,08
3,0	7,5 cm	8,5 cm	1,13
1,5	12,0 cm	14,2 cm	1,18

En affinant le choix du « modèle » : marge de 5 à 20%

En affinant le choix du « module » : rapport de 1 à 3 sur le résultat !

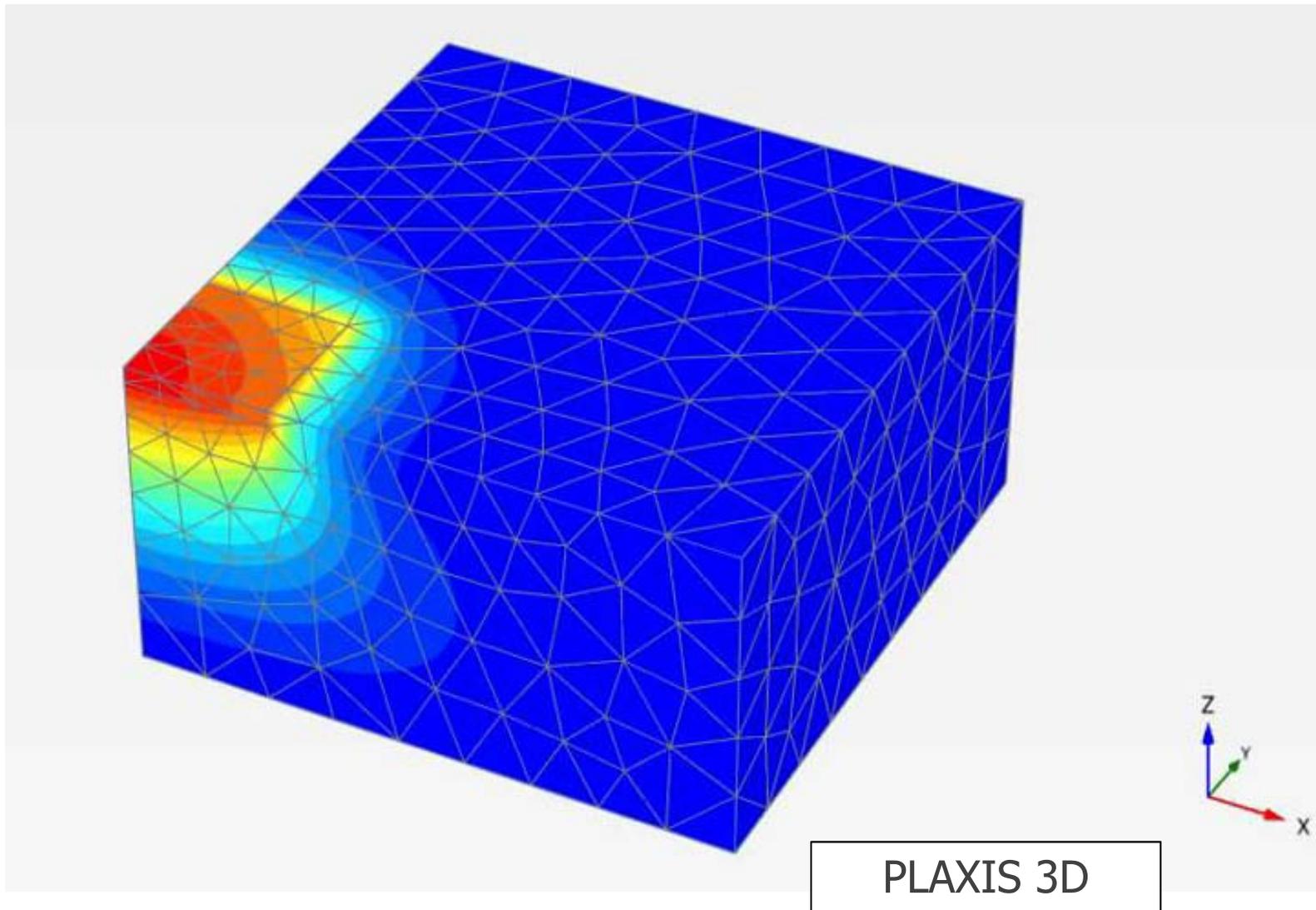
# Le cas des radiers et dallages

⇒ Dimensionnement nécessairement basé sur une approche « ISS »



# Le cas des radiers et dallages

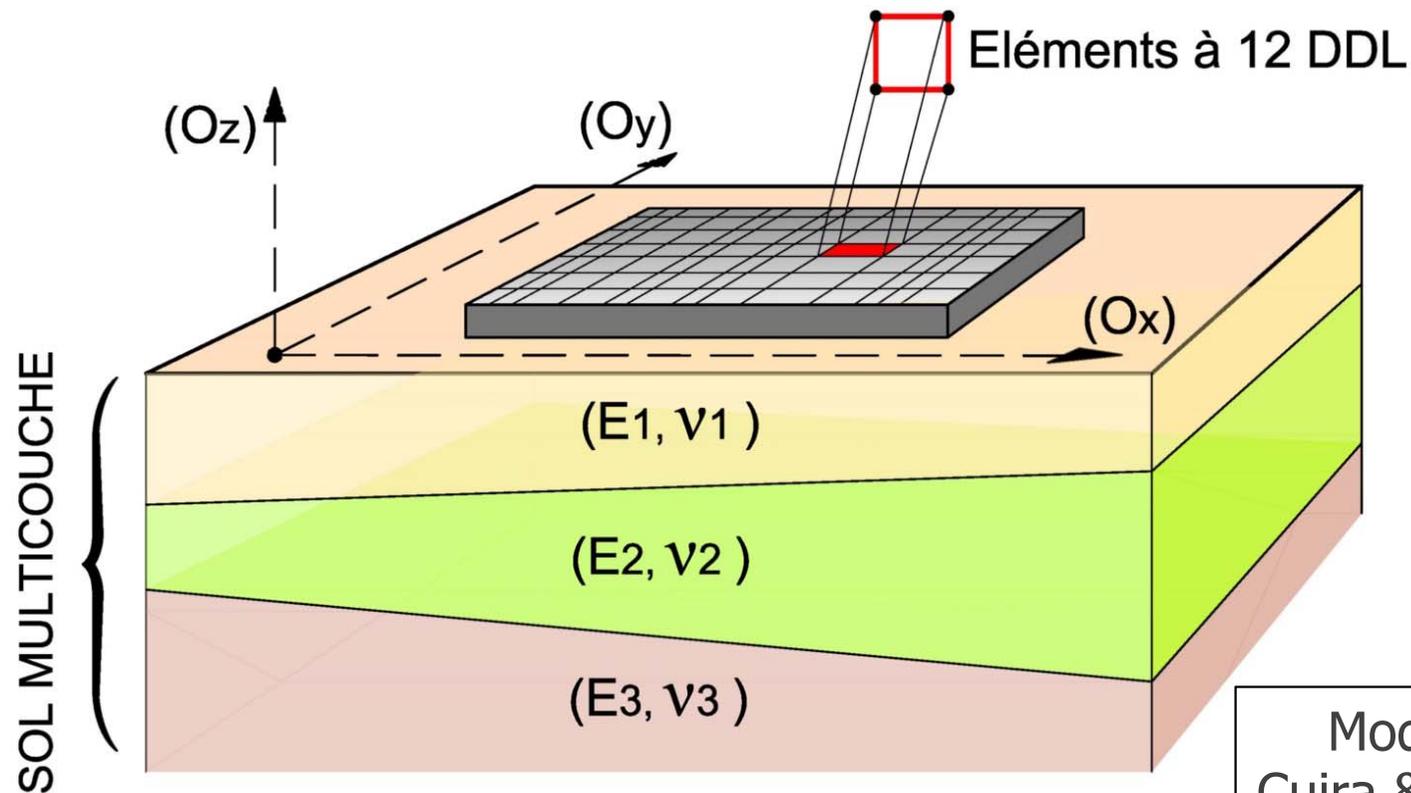
⇒ Modèle géotechnique : traitement numérique complet en 3D



# Le cas des radiers et dallages

⇒ Modèle géotechnique : modèles hybrides

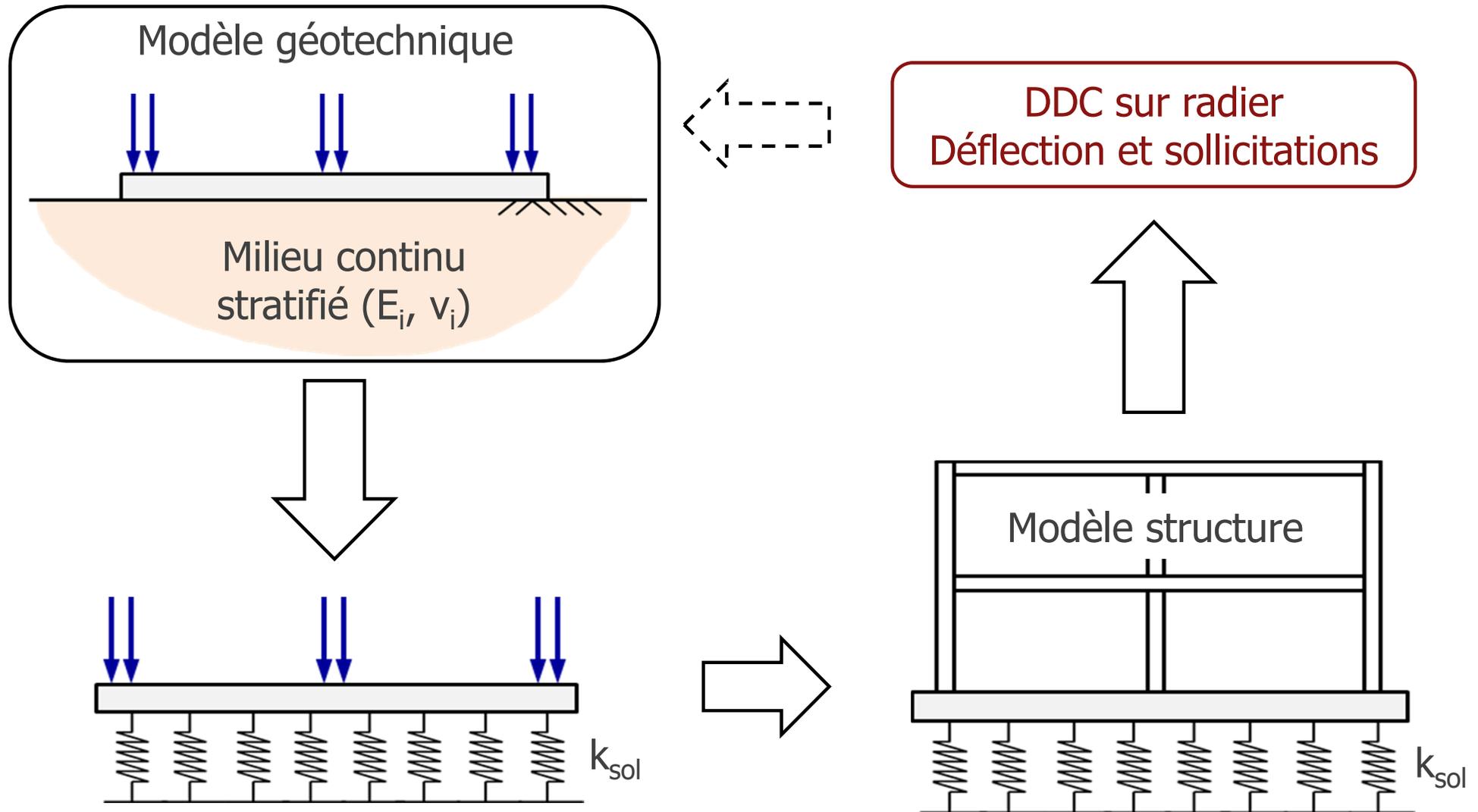
- Radier ou dallage : discrétisation en éléments finis de plaque (12 DDL)
- Sol support : solutions analytiques de Boussinesq (multicouche quelconque)
- Non linéarités « concentrées » à l'interface (décollement/plastification)



Modèle Tasplaq  
Cuira & Simon (2006)

# Le cas des radiers et dallages

⇒ Interaction avec le modèle « structure » : le schéma classique



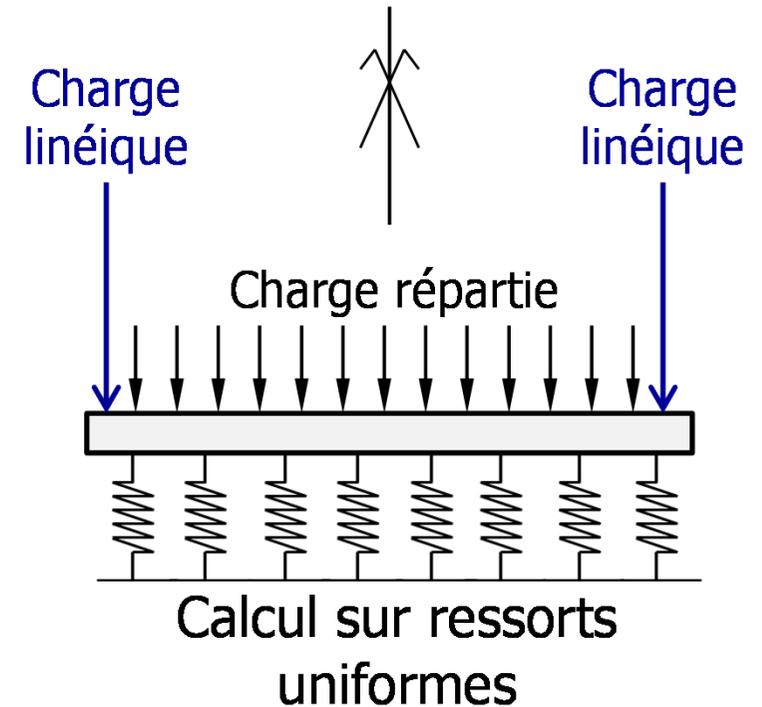
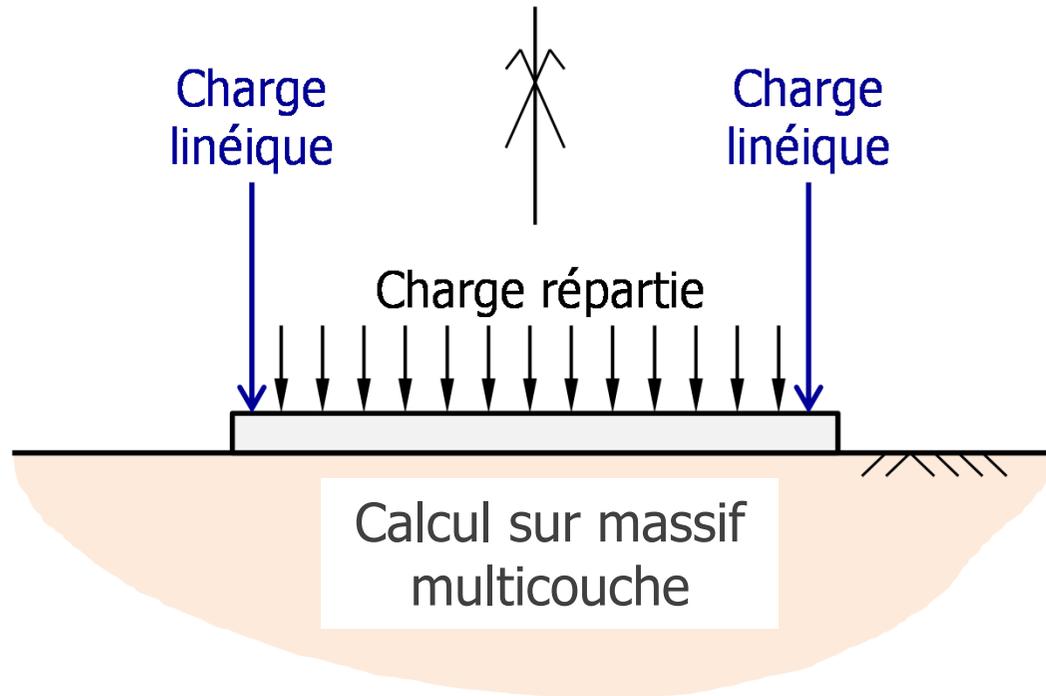
# Le cas des radiers et dallages

⇒ L'exemple d'un bassin circulaire en béton armé



# Le cas des radiers et dallages

⇒ L'exemple d'un bassin circulaire en béton armé

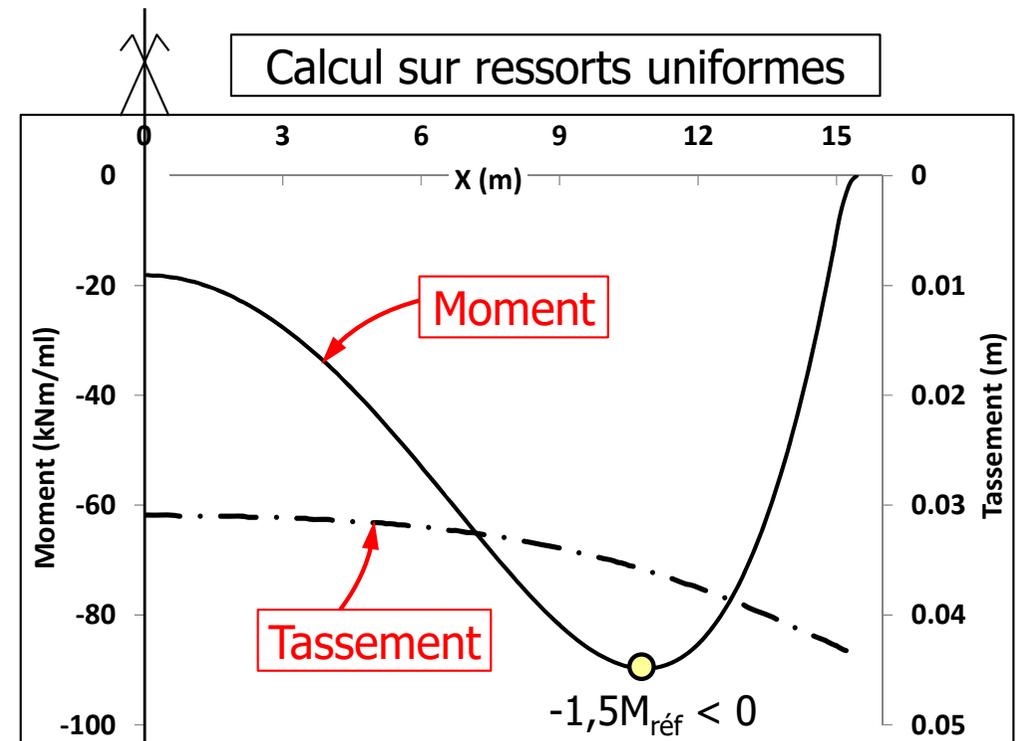
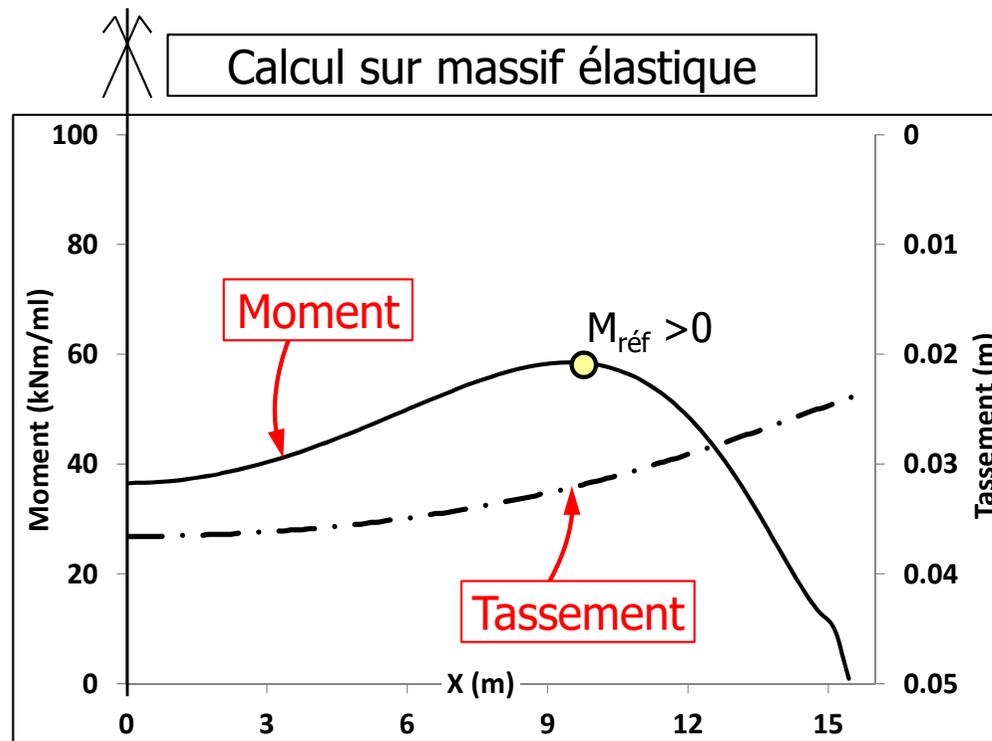


Exemple d'un bassin circulaire : quel coefficient de réaction fournir au BE structure chargé de dimensionner le radier et la superstructure ?

# Le cas des radiers et dallages

(Cuira et Brulé 2017)

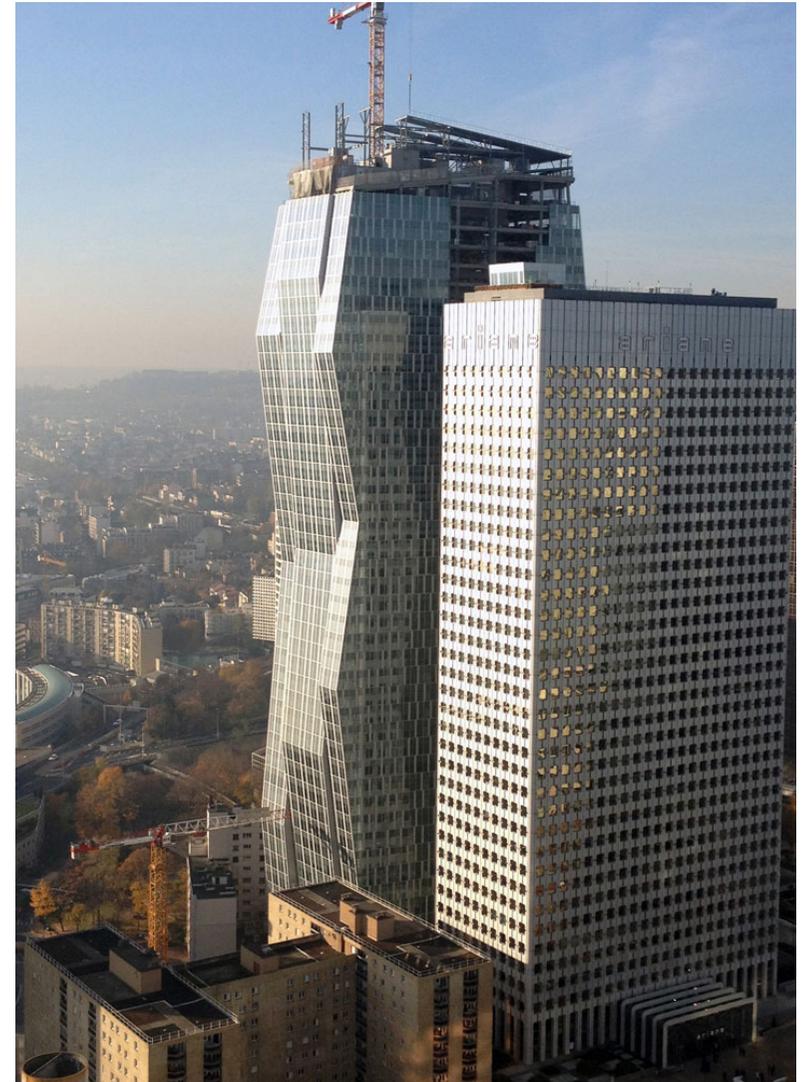
⇒ L'exemple d'un bassin circulaire en béton armé



Un calcul sur ressorts uniformes conclurait à la nécessité de « ferrailler » la fibre supérieure du radier alors que c'est la fibre inférieure qui est tendue ici... ce constat est valable quelque soit la valeur du « ressort »

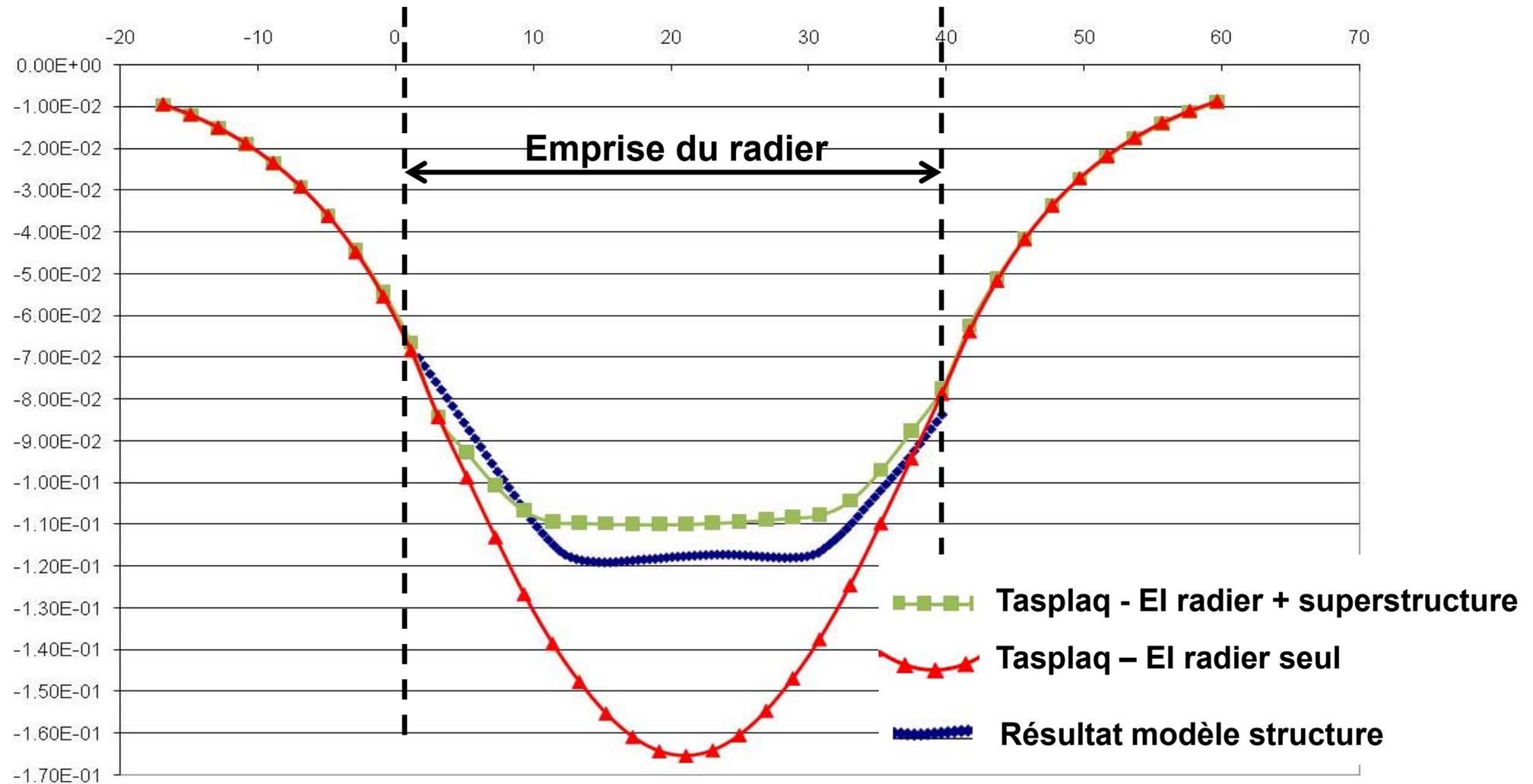
# Le cas des radiers et dallages

- Choix éclairé du coefficient de réaction : fondation d'un IGH



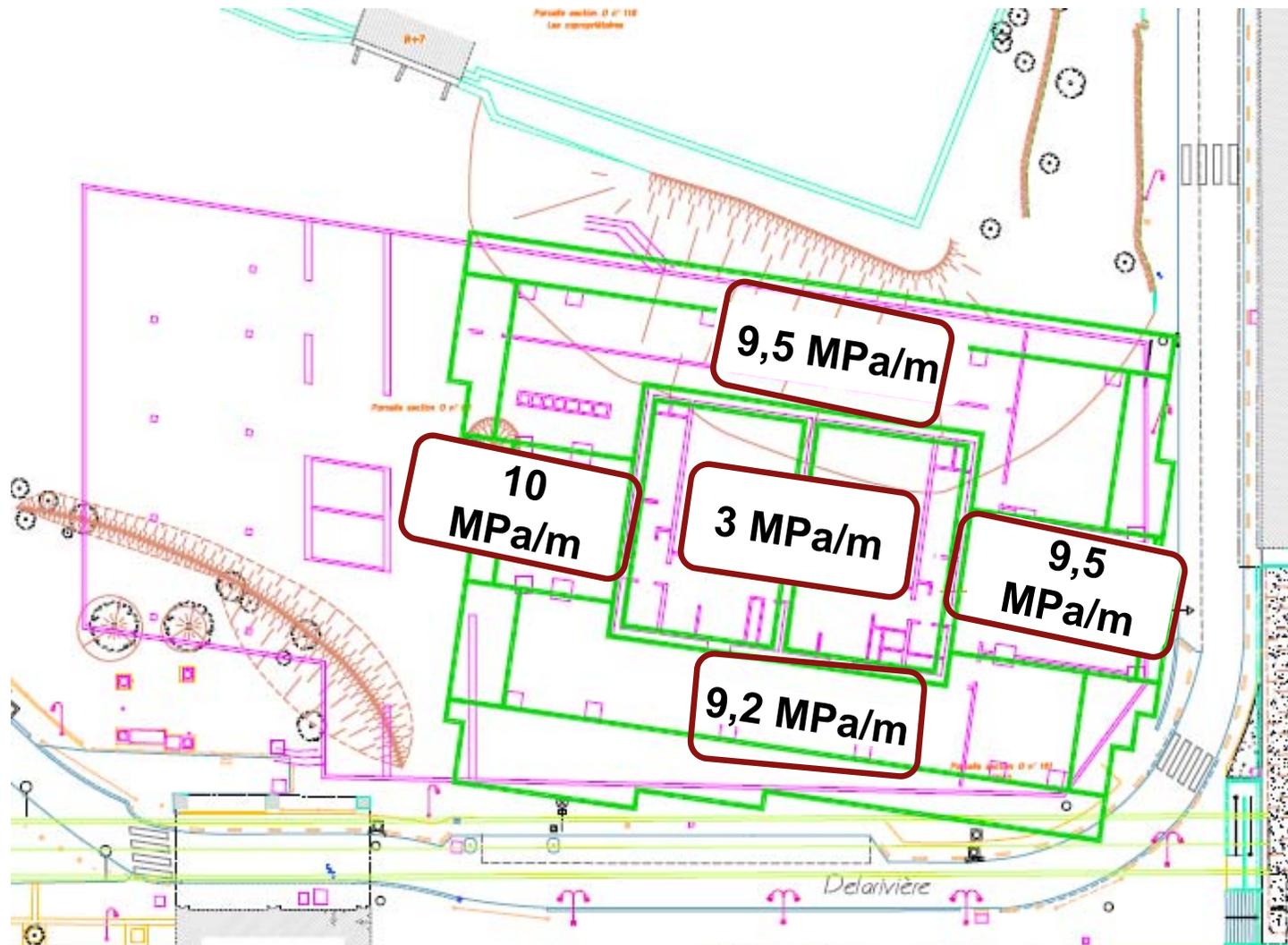
# Le cas des radiers et dallages

- Choix éclairé du coefficient de réaction : fondation d'un IGH



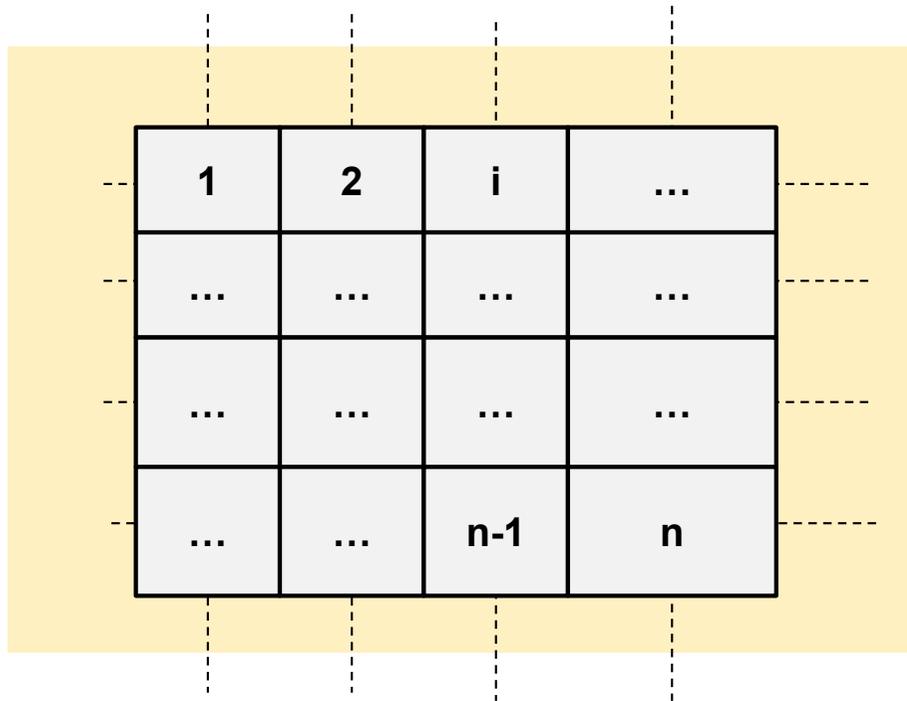
# Le cas des radiers et dallages

- Choix éclairé du coefficient de réaction : fondation d'un IGH



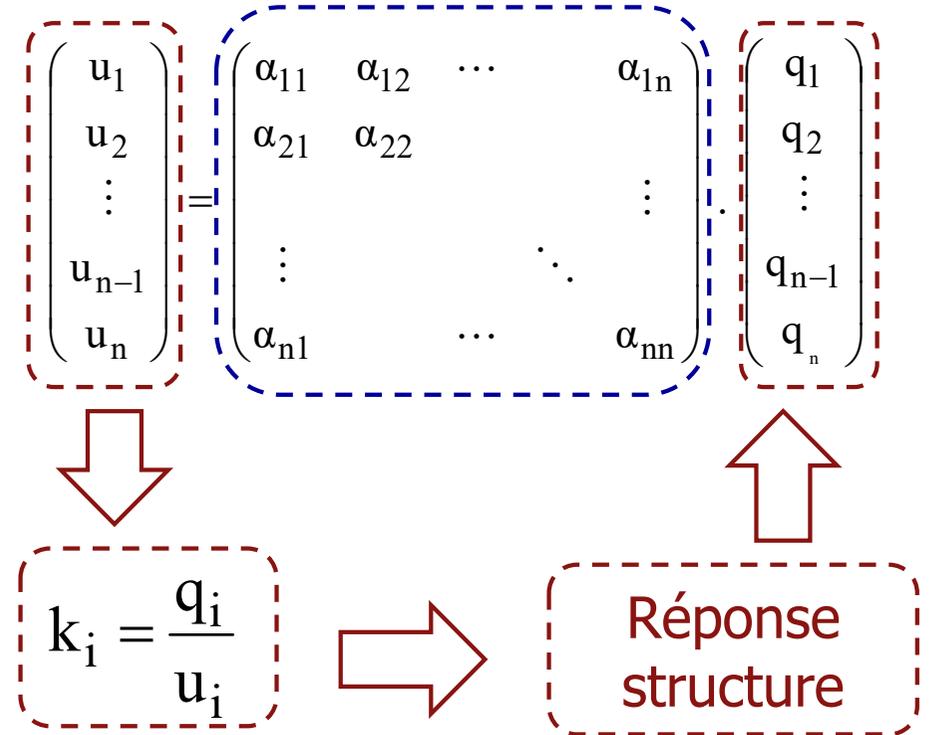
# Le cas des radiers et dallages

- S'affranchir de la dépendance à la DDC : notion de matrice de souplesse



$$k_s^i = \frac{q_i}{u_i} = \frac{q_i}{\sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \cdot q_j}$$

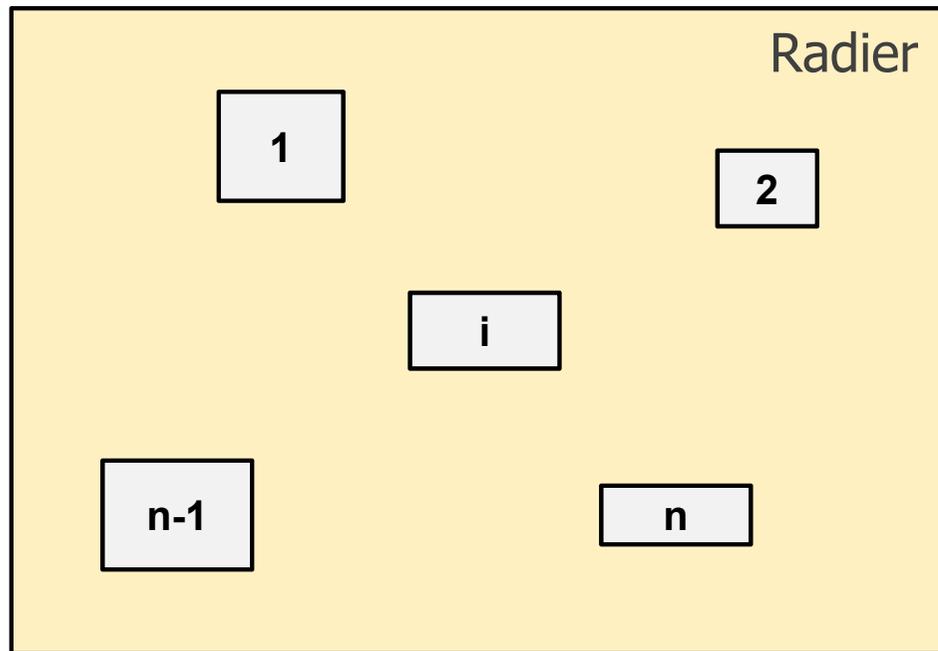
## Réponse du sol



(Cuira et Simon 2016)

# Le cas des radiers et dallages

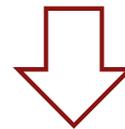
- Alternative possible : définir la matrice de souplesse « au dessus » du radier (limite le nombre des degrés de libertés)



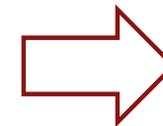
« Empreinte » des appuis sur le radier

Modèle géotechnique  
= « sol + radier »

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{n-1} \\ u_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1n} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \alpha_{n1} & & \dots & \alpha_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_{n-1} \\ F_n \end{pmatrix}$$



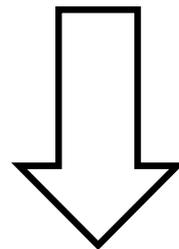
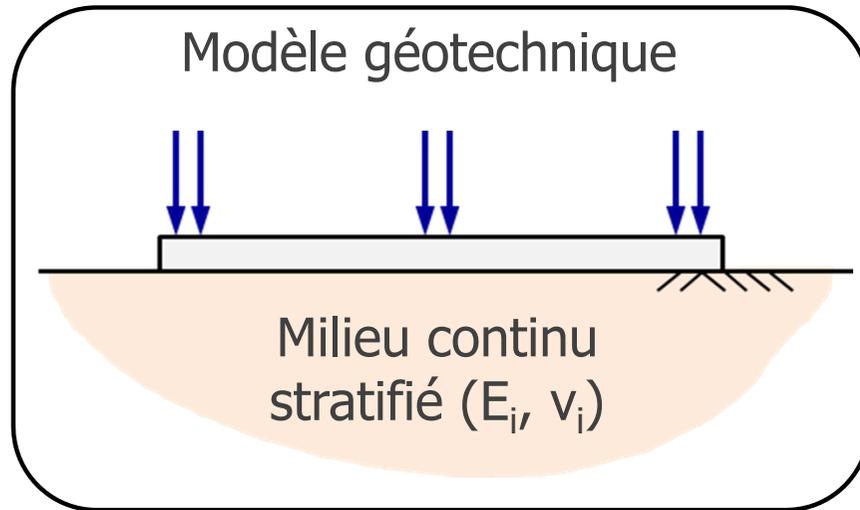
$$K_i = \frac{F_i}{u_i}$$



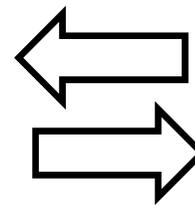
Modèle structure

# Le cas des radiers et dallages

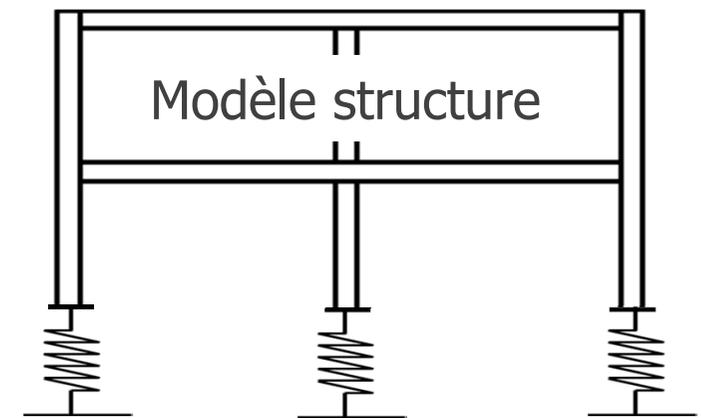
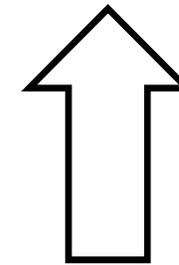
- Utilisation de la matrice de souplesse => schéma ISS « optimisé »



Matrice de souplesse aux points d'appui

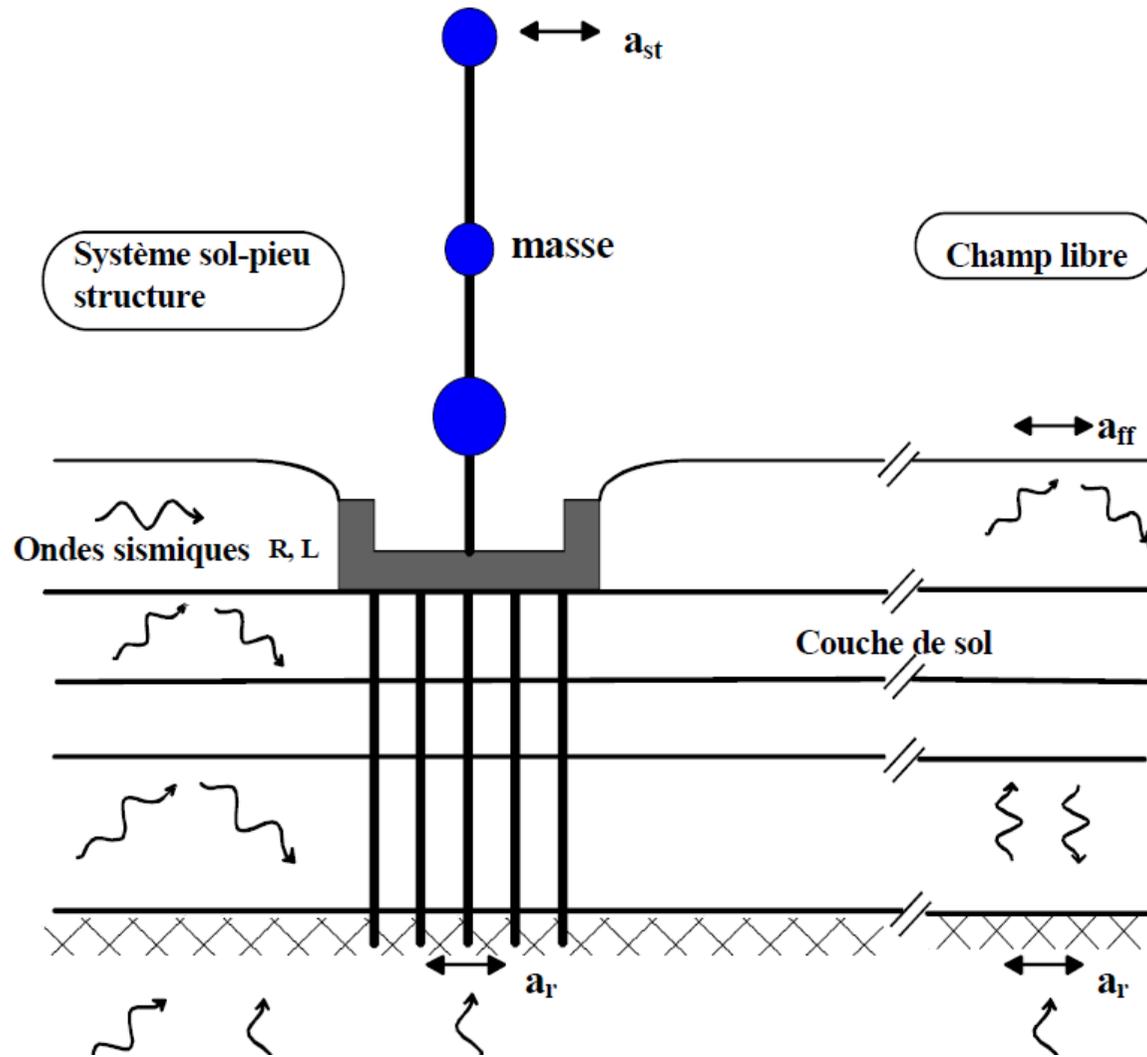


DDC définitive aux points d'appui



# Prise en compte du séisme

- Mécanismes d'ISS sous séisme : Effets « cinématiques » et « inertiels »



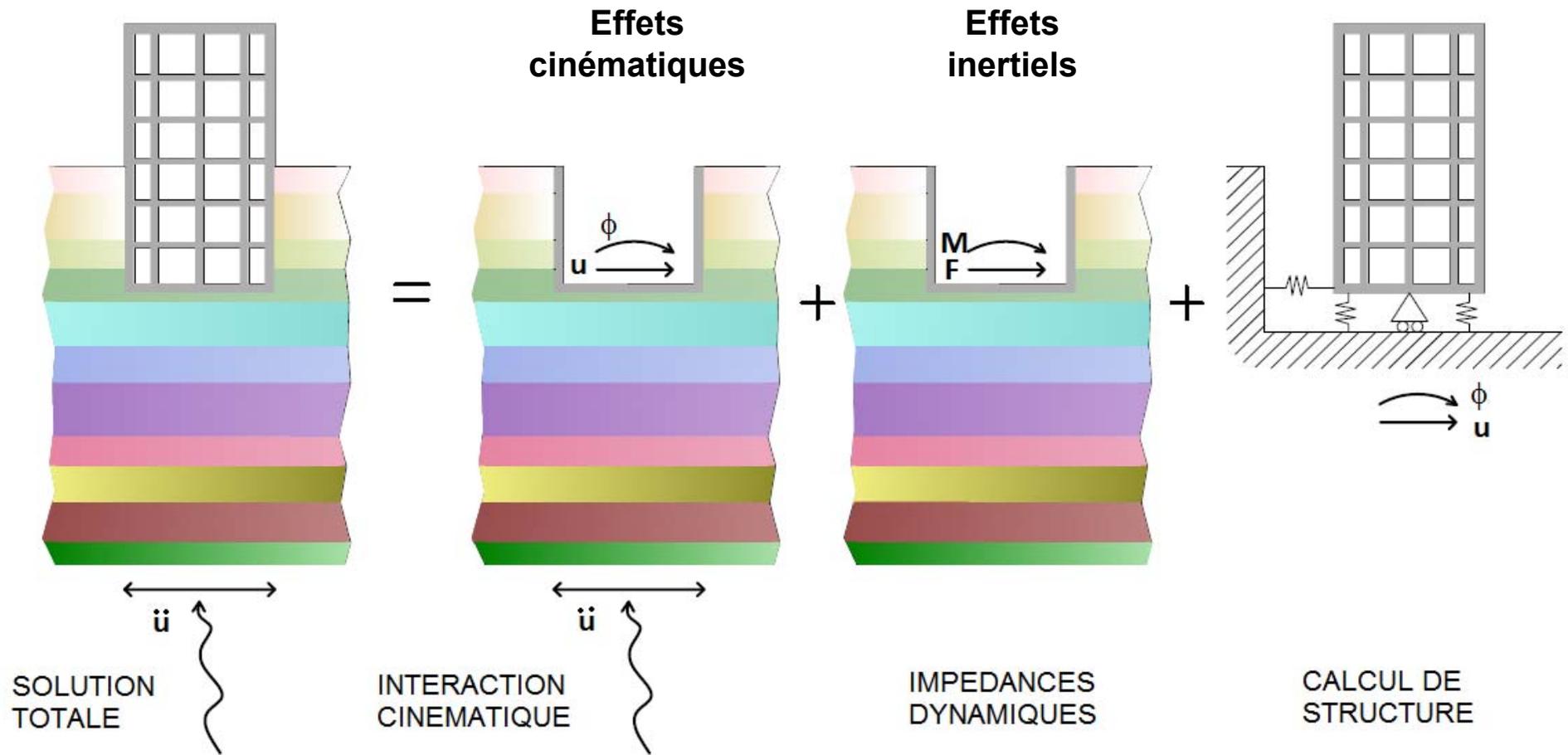
Oscillation de la structure sous l'effet du séisme => interaction inertielle (effet de masse)

Modification du champ d'ondes au voisinage de la structure => interaction cinématique (effet de souplesse relative)

(d'après A. Pecker)

# Prise en compte du séisme

- Méthode d'analyse usuelle : principe de superposition (analyse linéaire)



# Prise en compte du séisme

- Effets cinématiques : cas d'une fondation « surélevée »



1 m = 3.28 ft



# Prise en compte du séisme

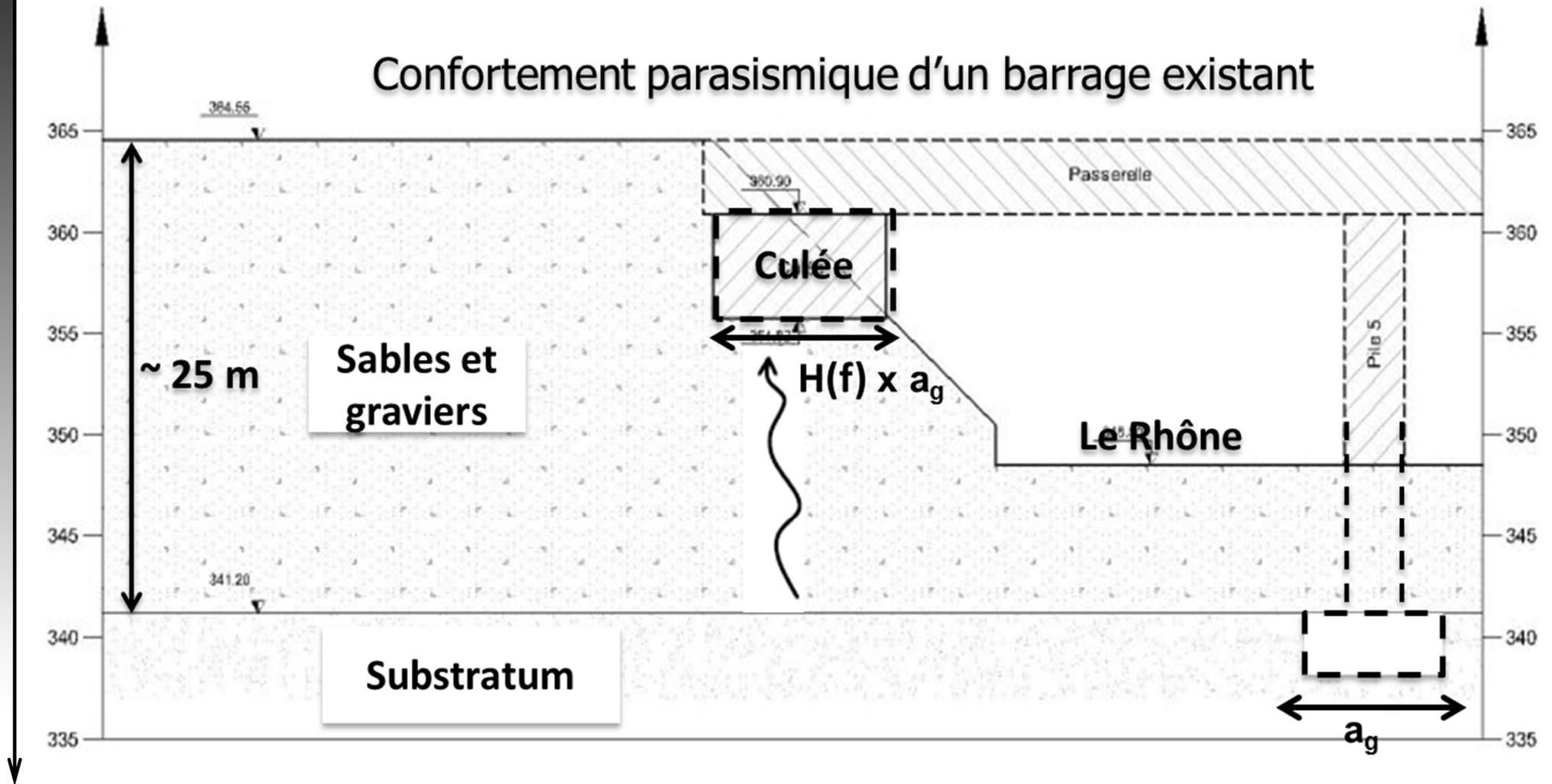
- Effets cinématiques : cas d'une fondation « surélevée »



Confortement parasismique d'un barrage hydro-électrique

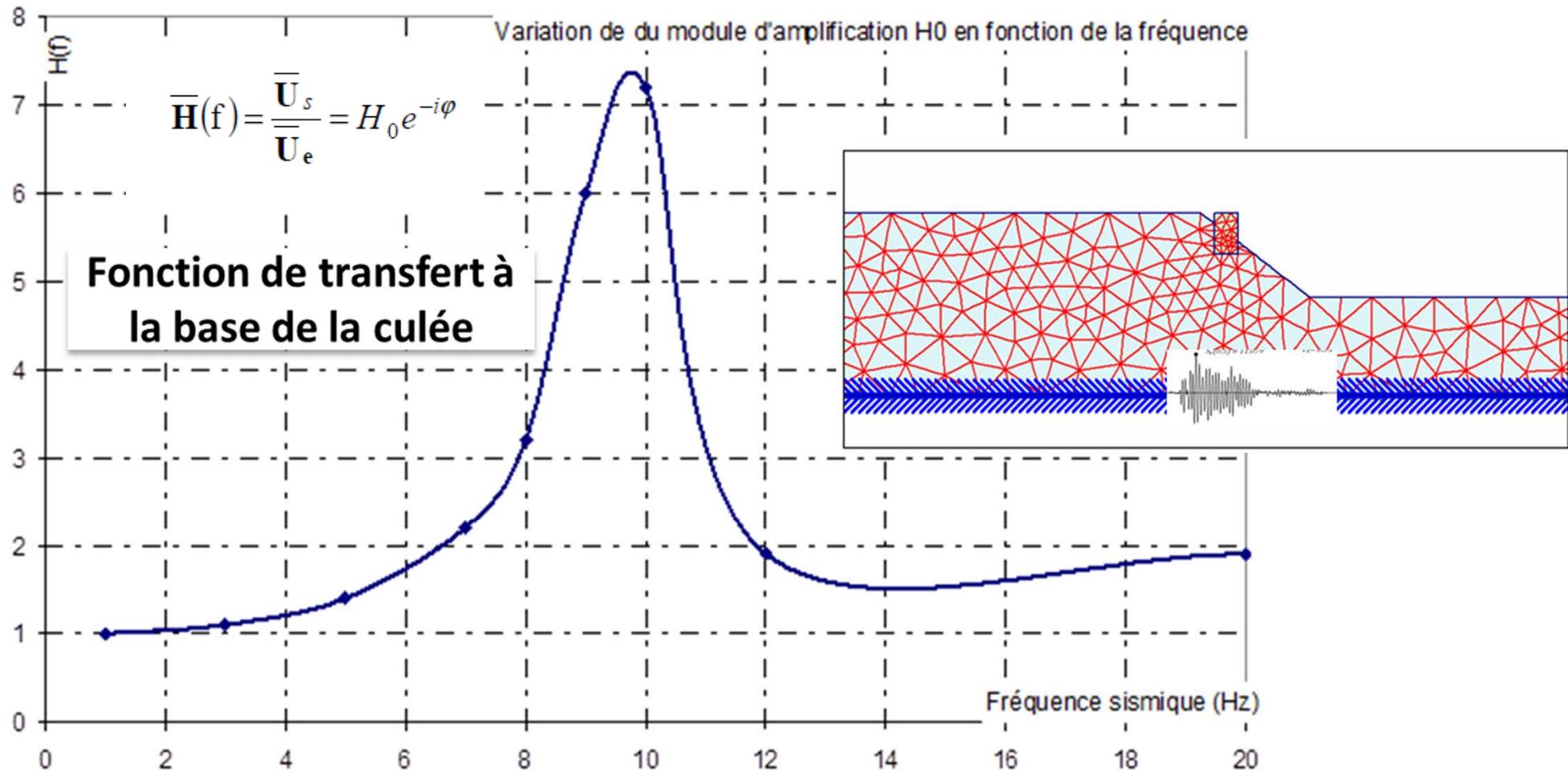
# Prise en compte du séisme

- Effets cinématiques : cas d'une fondation « surélevée »



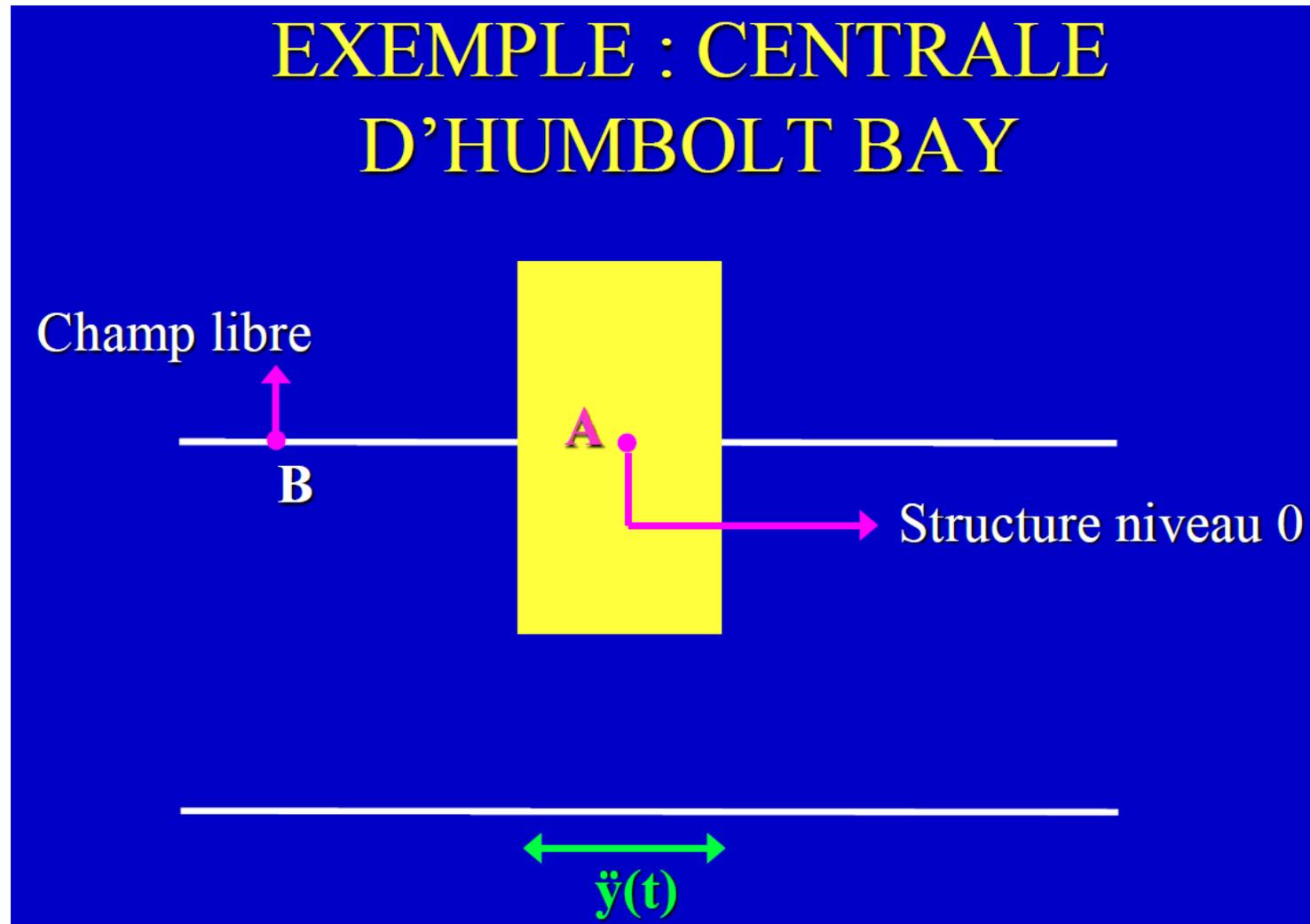
# Prise en compte du séisme

- Effets cinématiques : cas d'une fondation « surélevée »



# Prise en compte du séisme

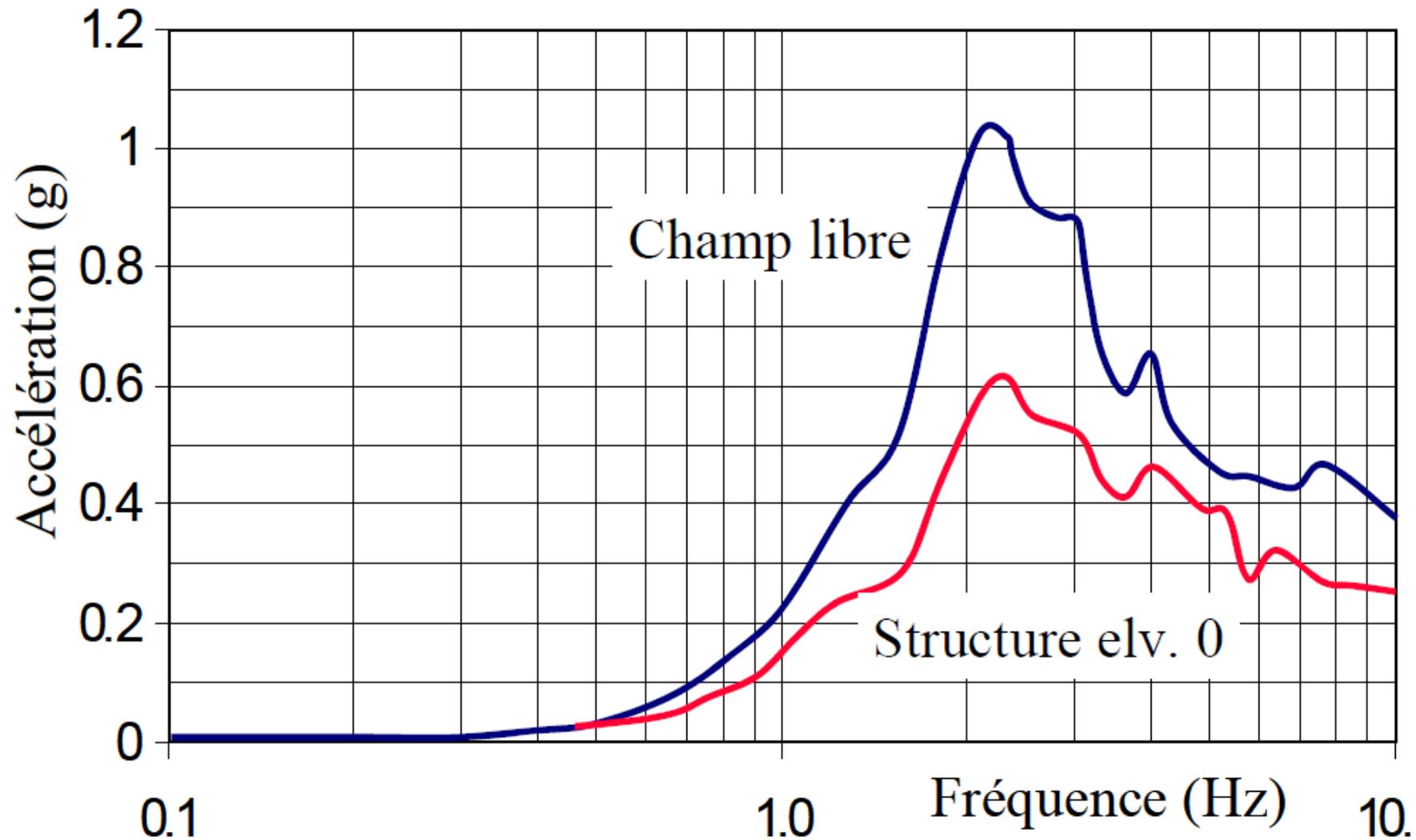
- Effets cinématiques : cas d'une fondation « encastrée »



(d'après A. Pecker)

# Prise en compte du séisme

- Effets cinématiques : cas d'une fondation « encastrée »



(d'après A. Pecker)

# Prise en compte du séisme

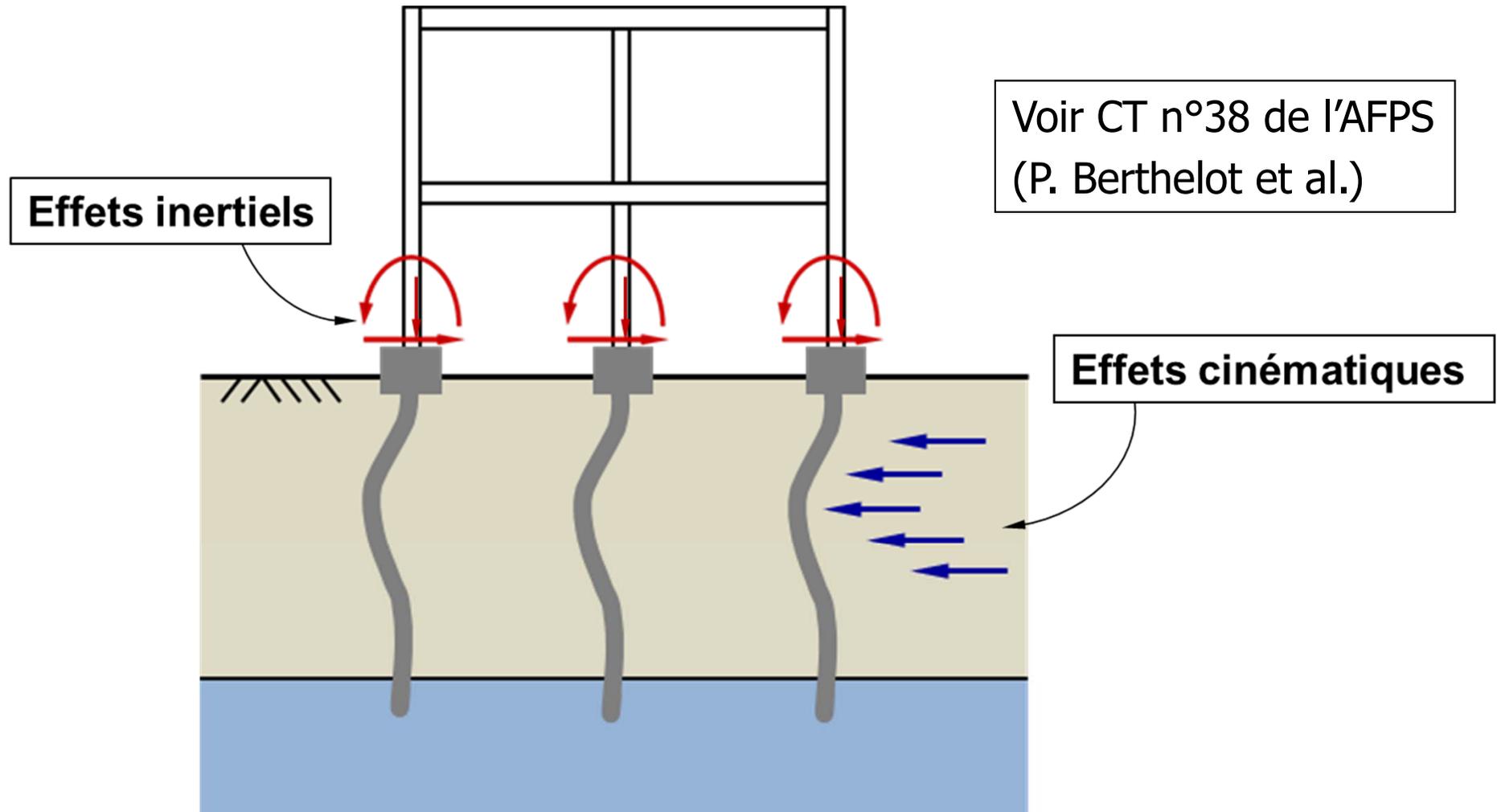
- Effets cinématiques : cas d'une fondation profonde



Désordres liés aux effets cinématiques

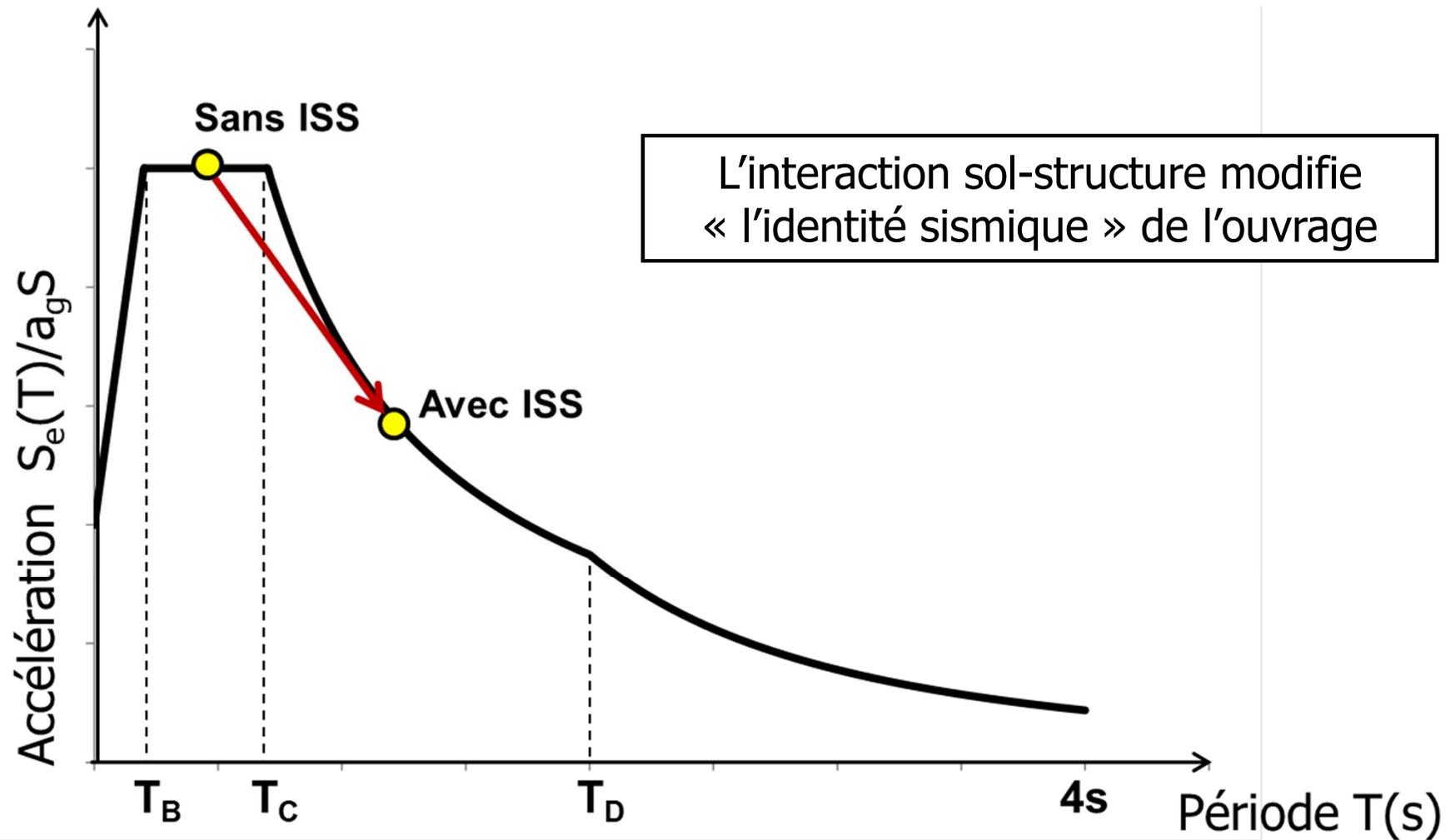
# Prise en compte du séisme

- Effets cinématiques : cas d'une fondation profonde



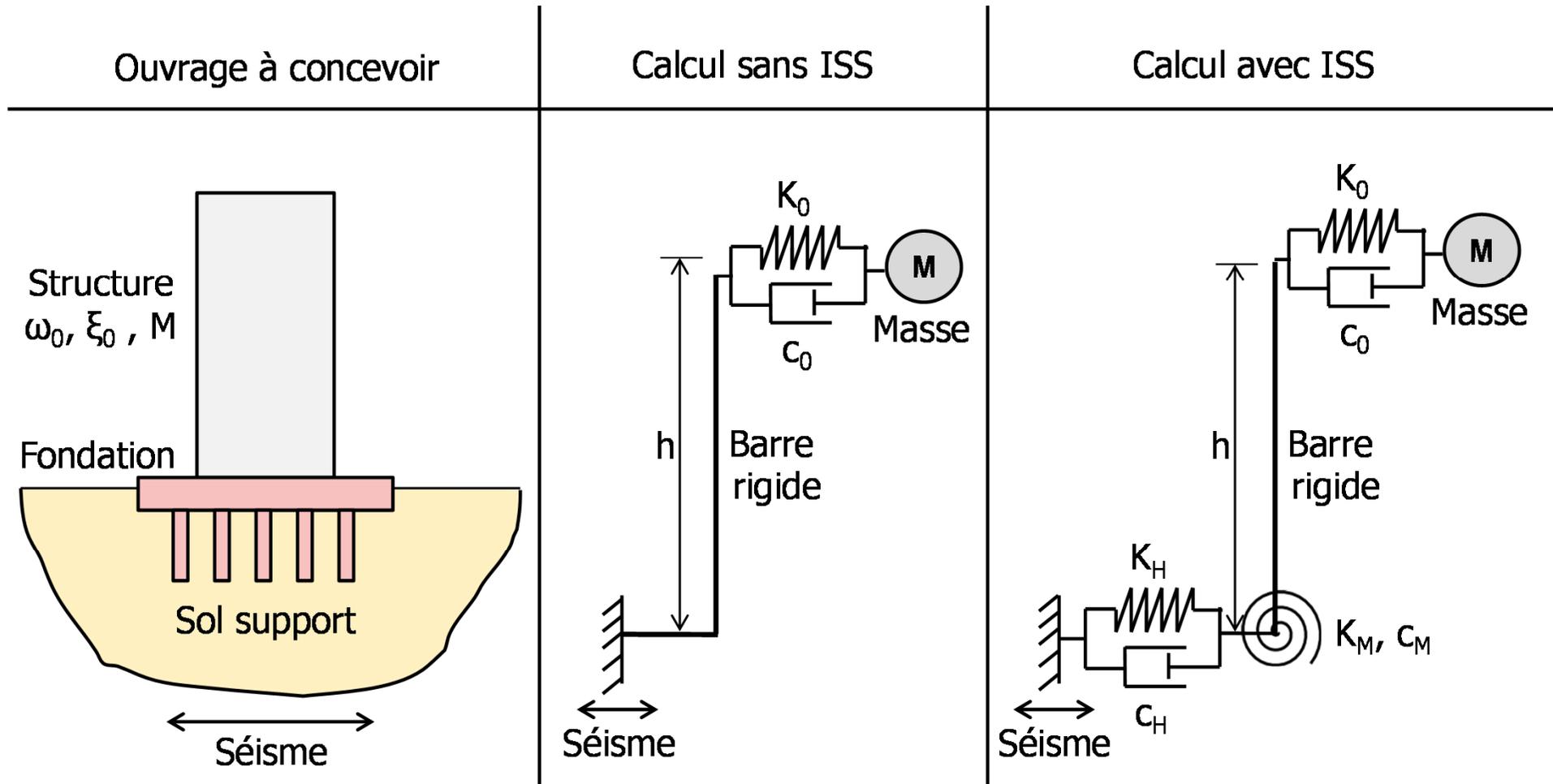
# Prise en compte du séisme

- Illustration des effets d'interaction « inertielle »



# Prise en compte du séisme

- Modélisation « analogique » de l'interaction inertielle

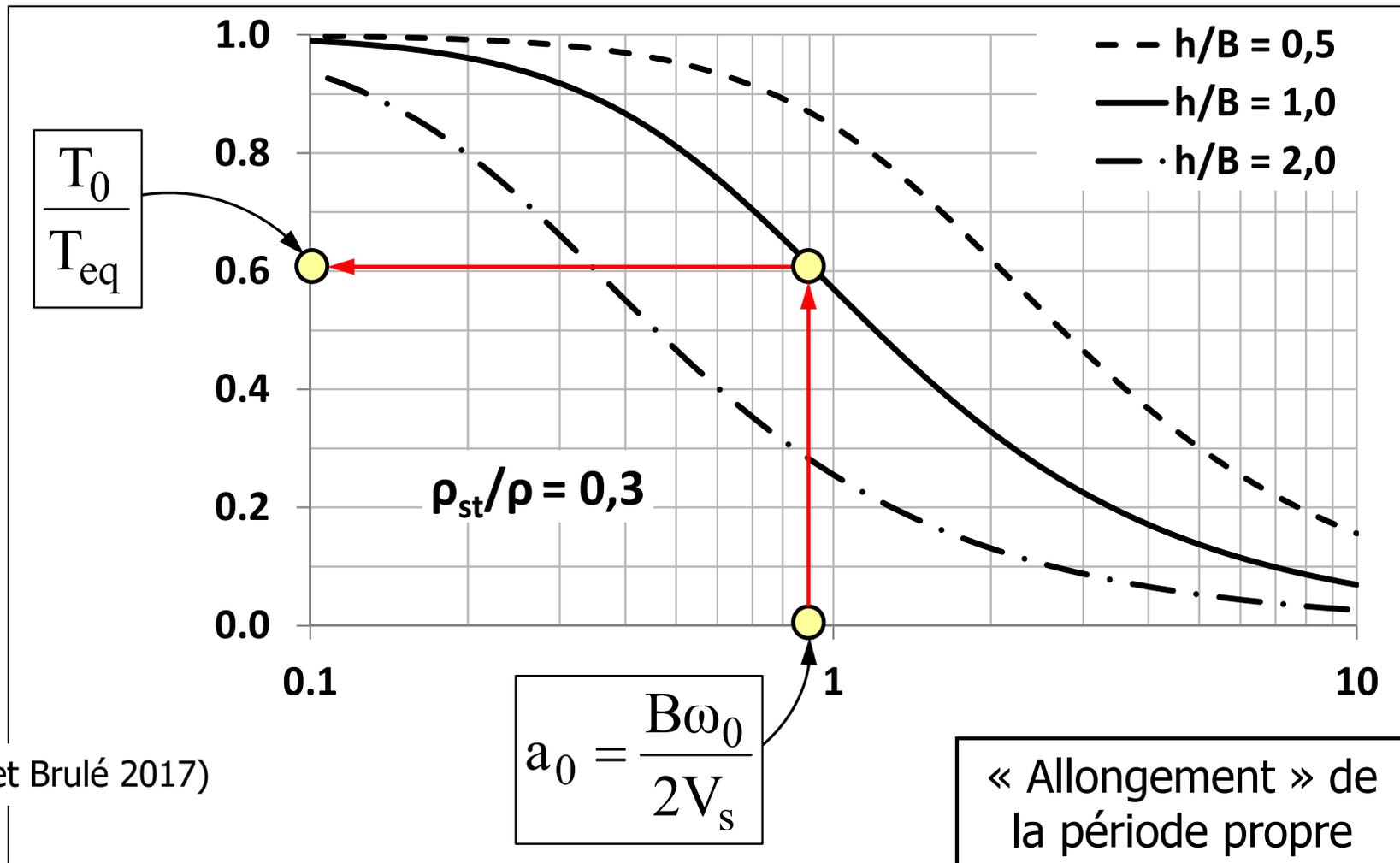


L'interaction sol-structure modifie « l'identité sismique » de l'ouvrage

# Prise en compte du séisme

- Modélisation « analogique » de l'interaction inertielle

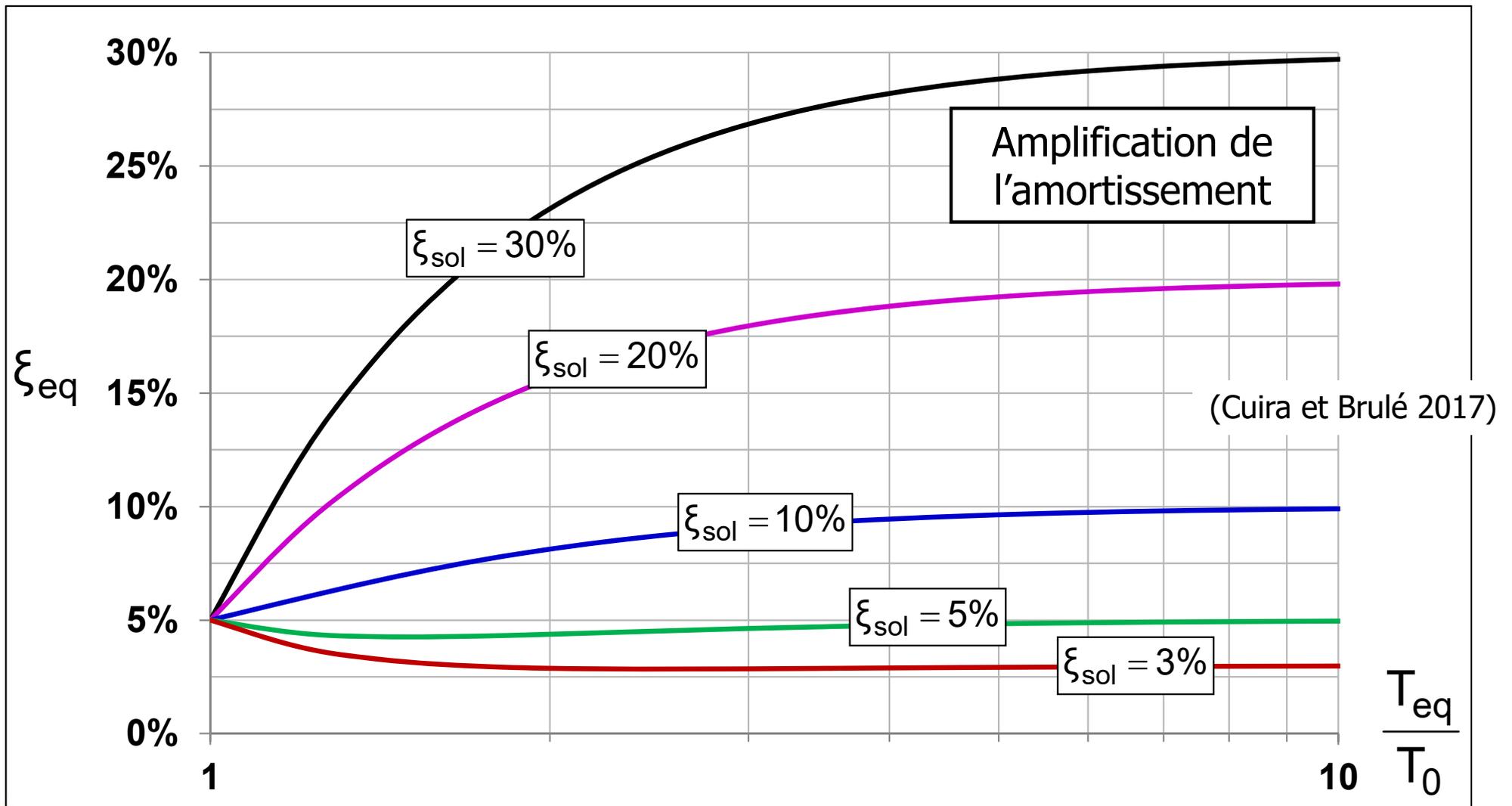
$$\rho_{st} = \frac{M}{\frac{\pi}{4} B^2 h}$$



(Caira et Brulé 2017)

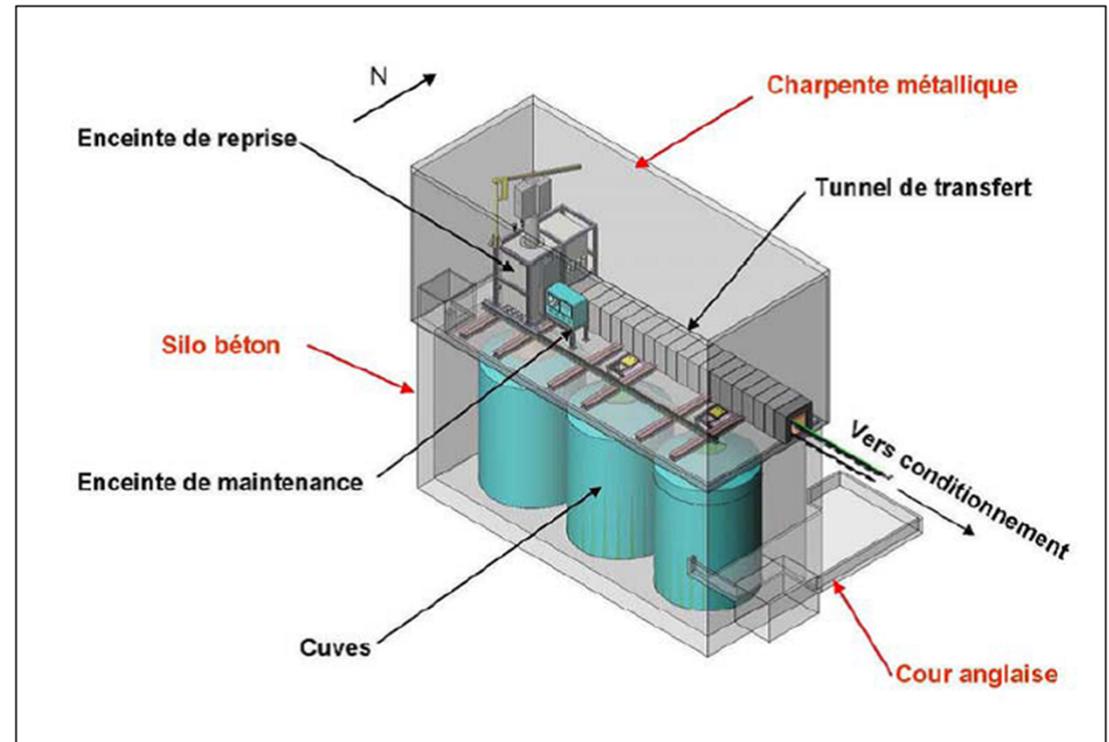
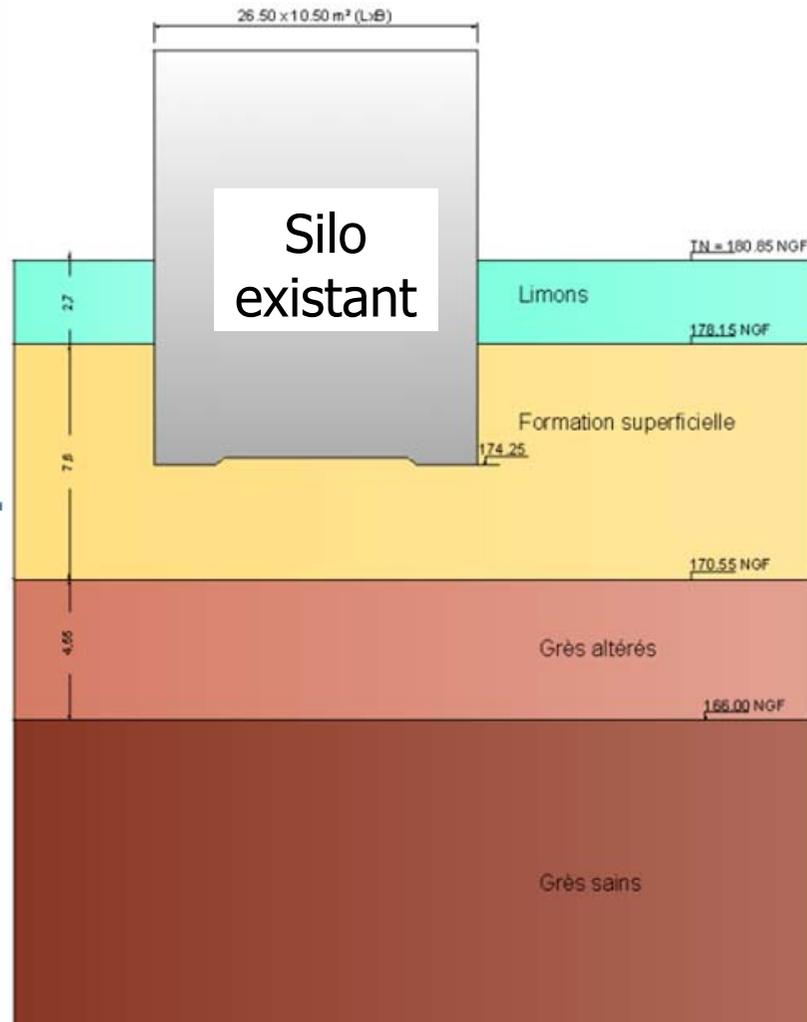
# Prise en compte du séisme

- Modélisation « analogique » de l'interaction inertielle



# Prise en compte du séisme

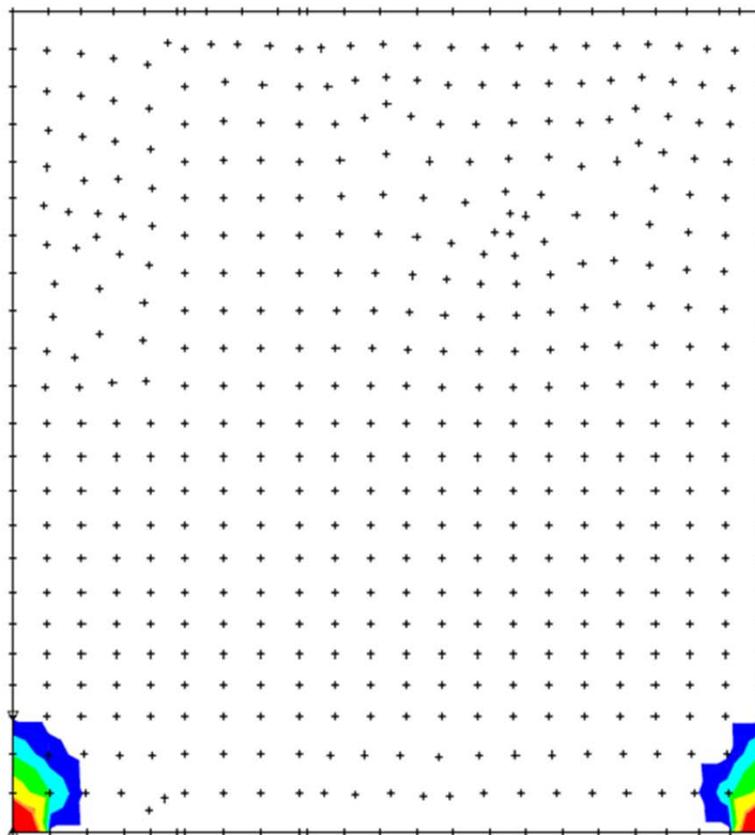
- Justification d'un ouvrage existant sous séisme réévalué



# Prise en compte du séisme

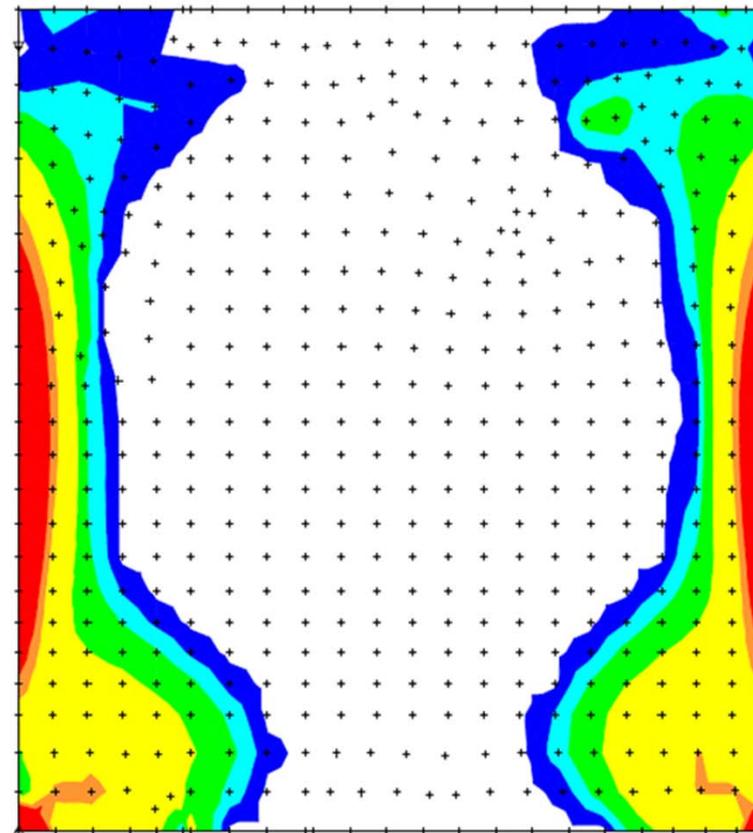
- Justification d'un ouvrage existant sous séisme réévalué

Avec ISS

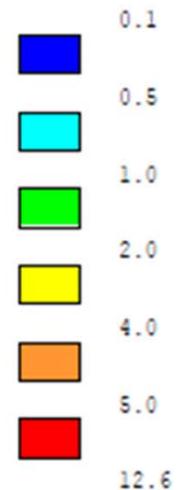


ARMATEC 3.08 by Setec TPI - 03/07/14

Sans ISS

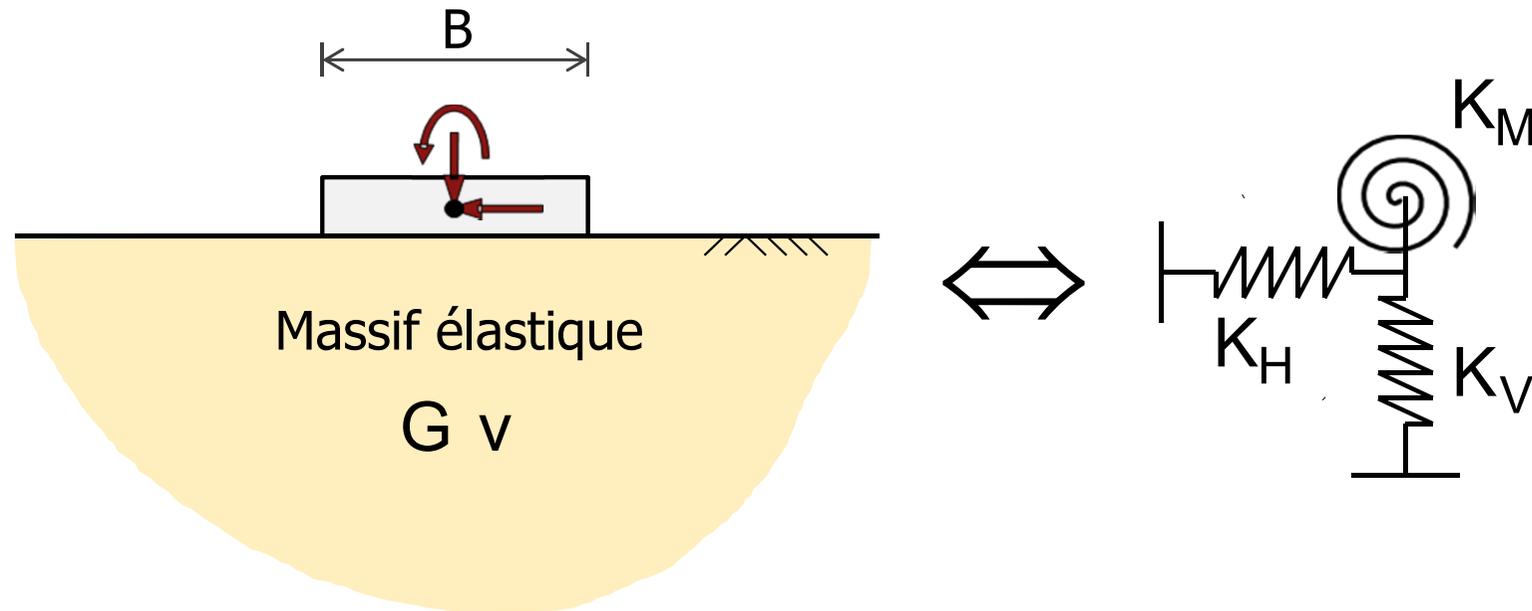


ARMATEC 3.08 by Setec TPI - 03/07/14



# Prise en compte du séisme

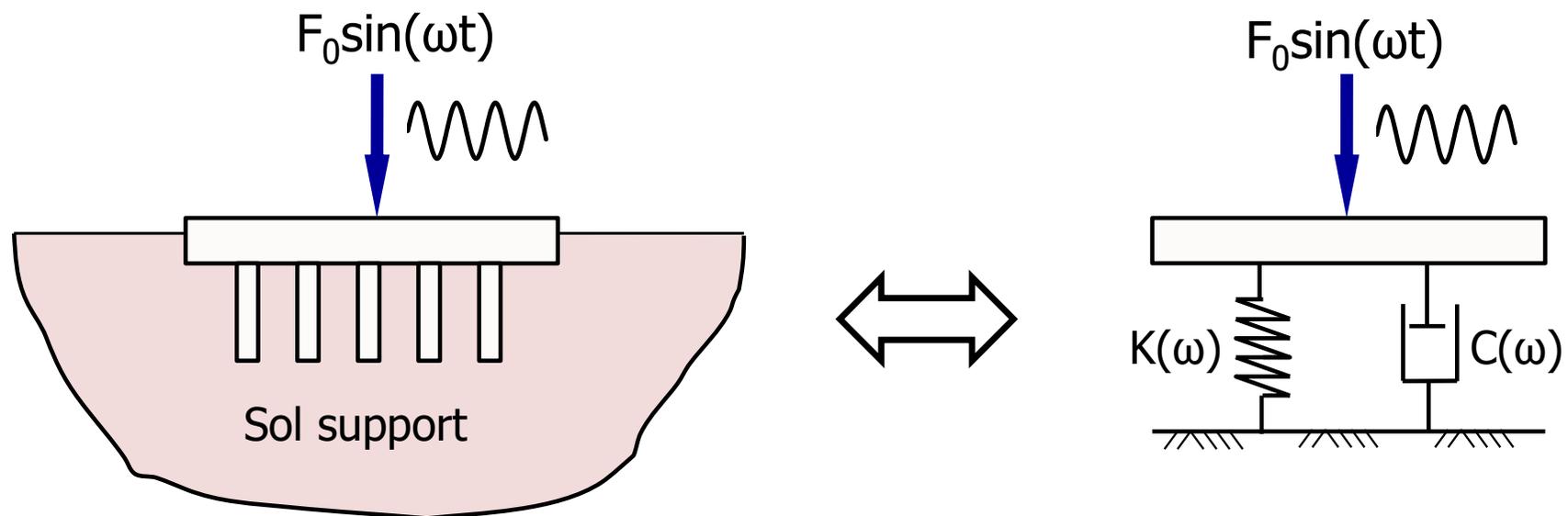
- Réponse d'une fondation sous séisme : approche « pseudo-statique »



Raideur résultante	$K_V = c_f \frac{2B}{1-\nu} G$	$K_H = c_f \frac{4B}{2-\nu} G$	$K_M = c_f \frac{B^3}{3(1-\nu)} G$
Profondeur d'influence	$z_{inf} \leq 6,0B$	$z_{inf} \leq 2,0B$	$z_{inf} \leq 1,0B$

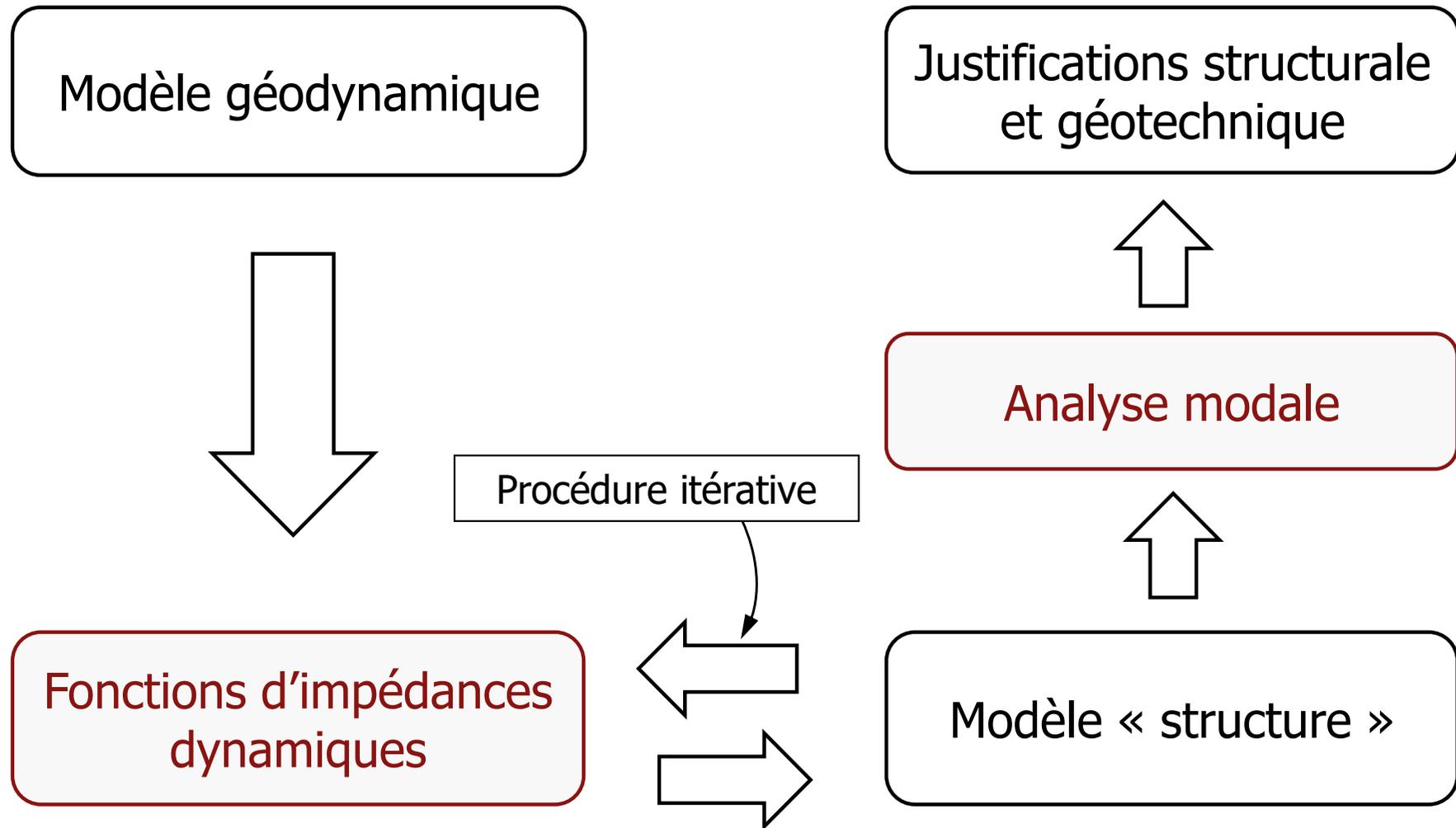
# Prise en compte du séisme

- Réponse d'une fondation sous séisme : effets fréquentiels
  - ⇒ La raideur apparente de la fondation dépend en réalité du contenu fréquentiel de la charge appliquée, on parle alors de « courbe » d'impédance
  - ⇒ Même en l'absence d'amortissement matériel, la sollicitation et la réponse sont déphasées, synonyme de l'apparition d'un terme d'amortissement dit amortissement « radiatif » dont l'amplitude est fonction de la dimension relative de la fondation et de la fréquence de sollicitation



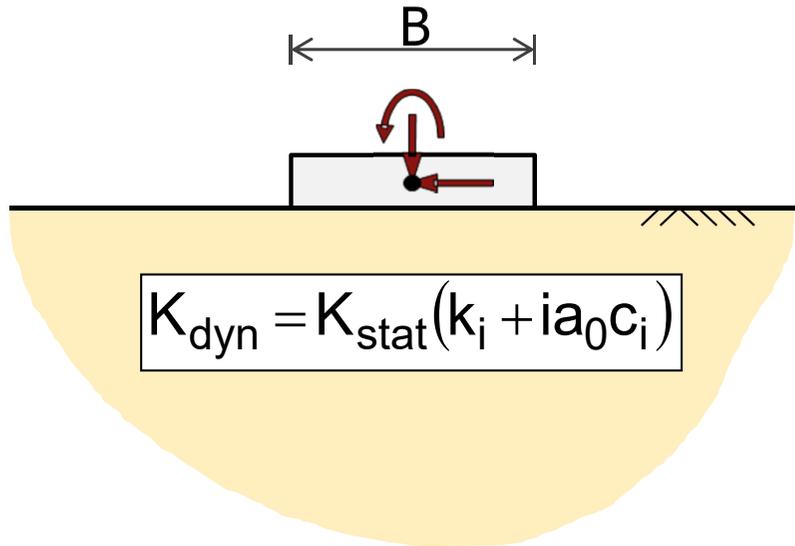
# Prise en compte du séisme

- Effets fréquentiels : couplage avec le modèle « structure »



# Prise en compte du séisme

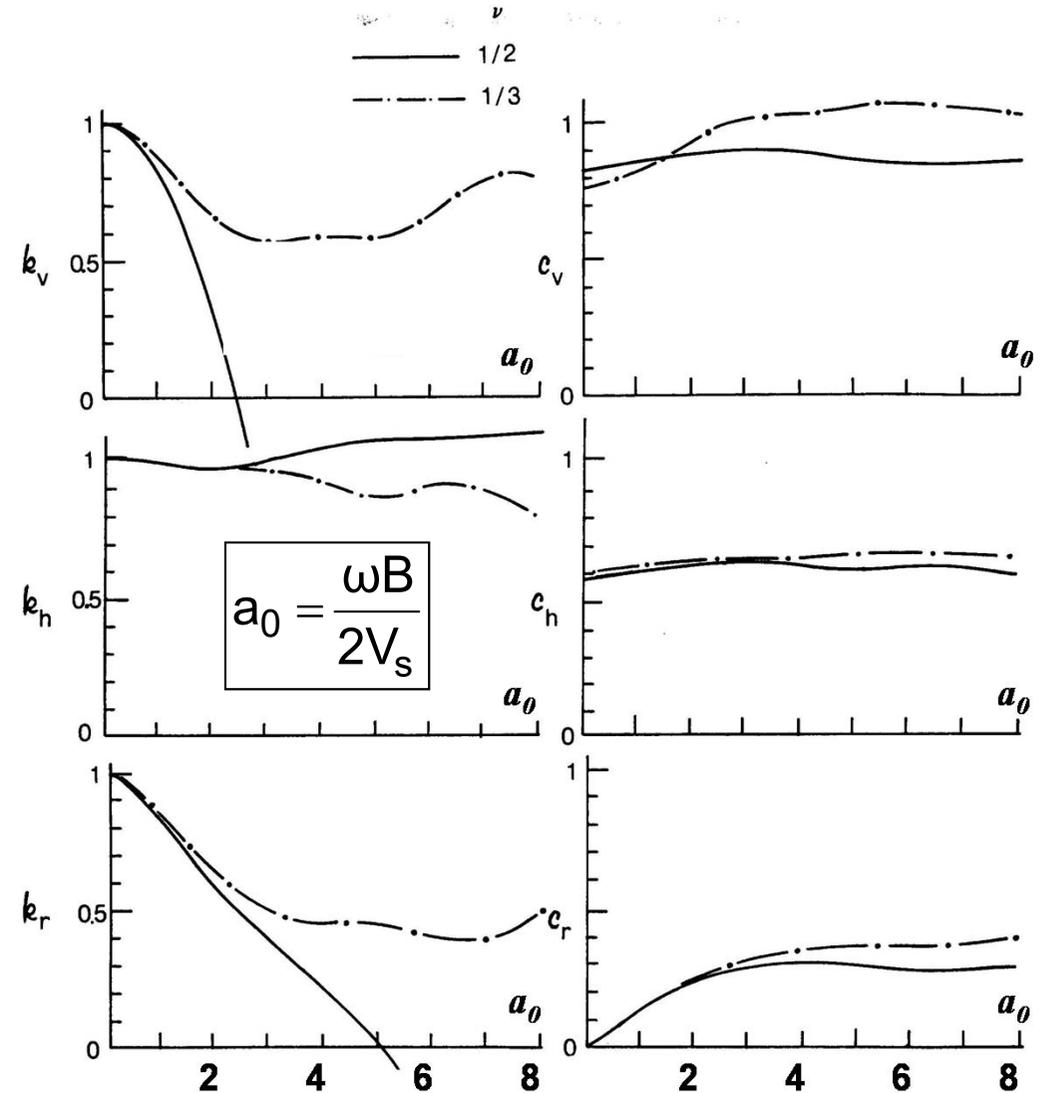
- Calcul des fonctions d'impédances : recours aux solutions analytiques



$$K_{\text{dyn}} = K_{\text{stat}}(k_i + ia_0 c_i)$$

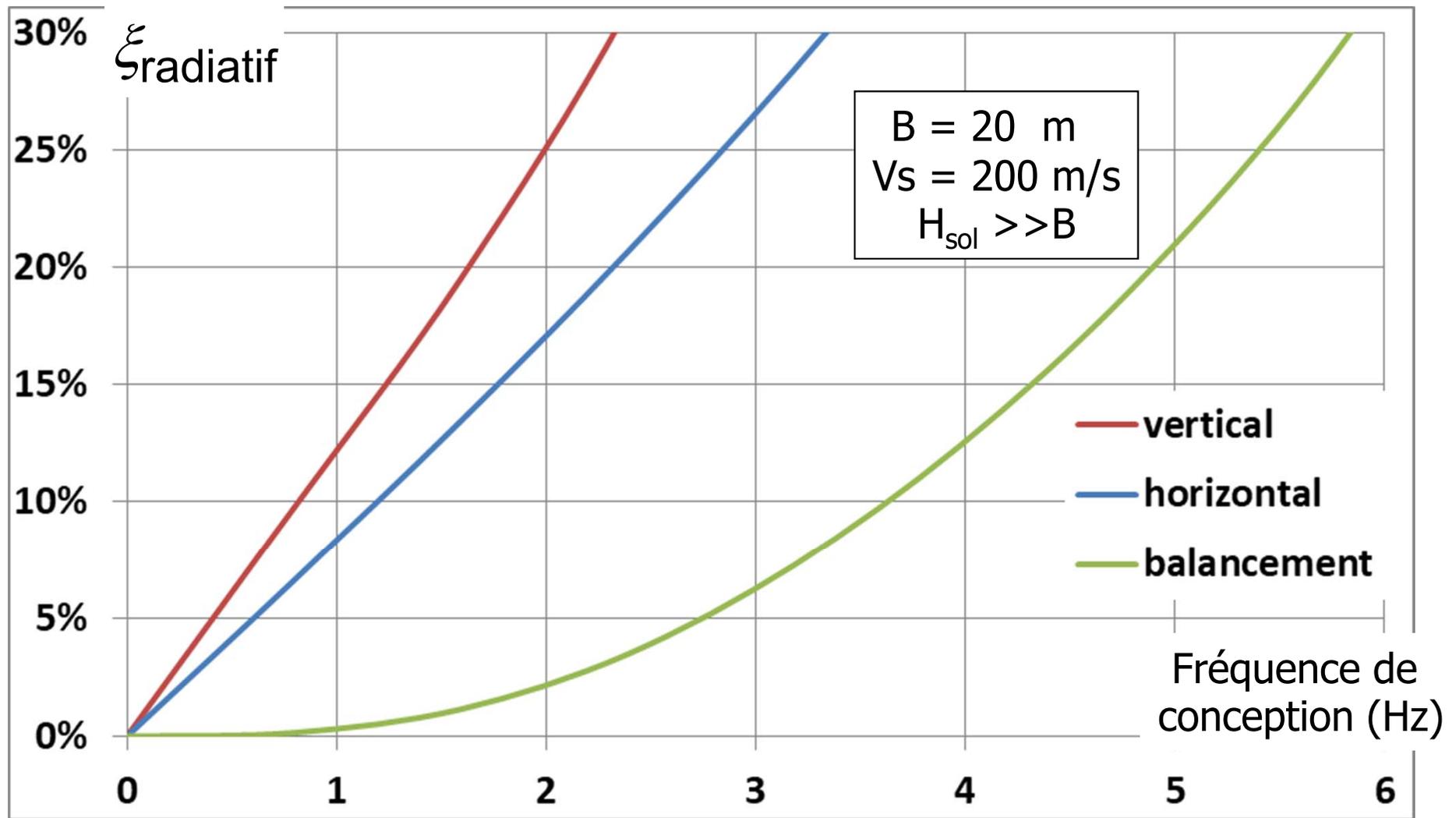
pour  $a_0 \leq 2$  (Cuira et Brulé 2017)

$$\begin{cases} k_v \approx 1 - 0,17a_0^2 \\ k_h \approx 1 - 0,04a_0^2 \\ k_r \approx 1 - 0,20a_0 \end{cases} \quad \begin{cases} c_v \approx 0,80 \\ c_h \approx 0,55 \\ c_r \approx 0,10 \ln(1 + 2a_0^2) \end{cases}$$



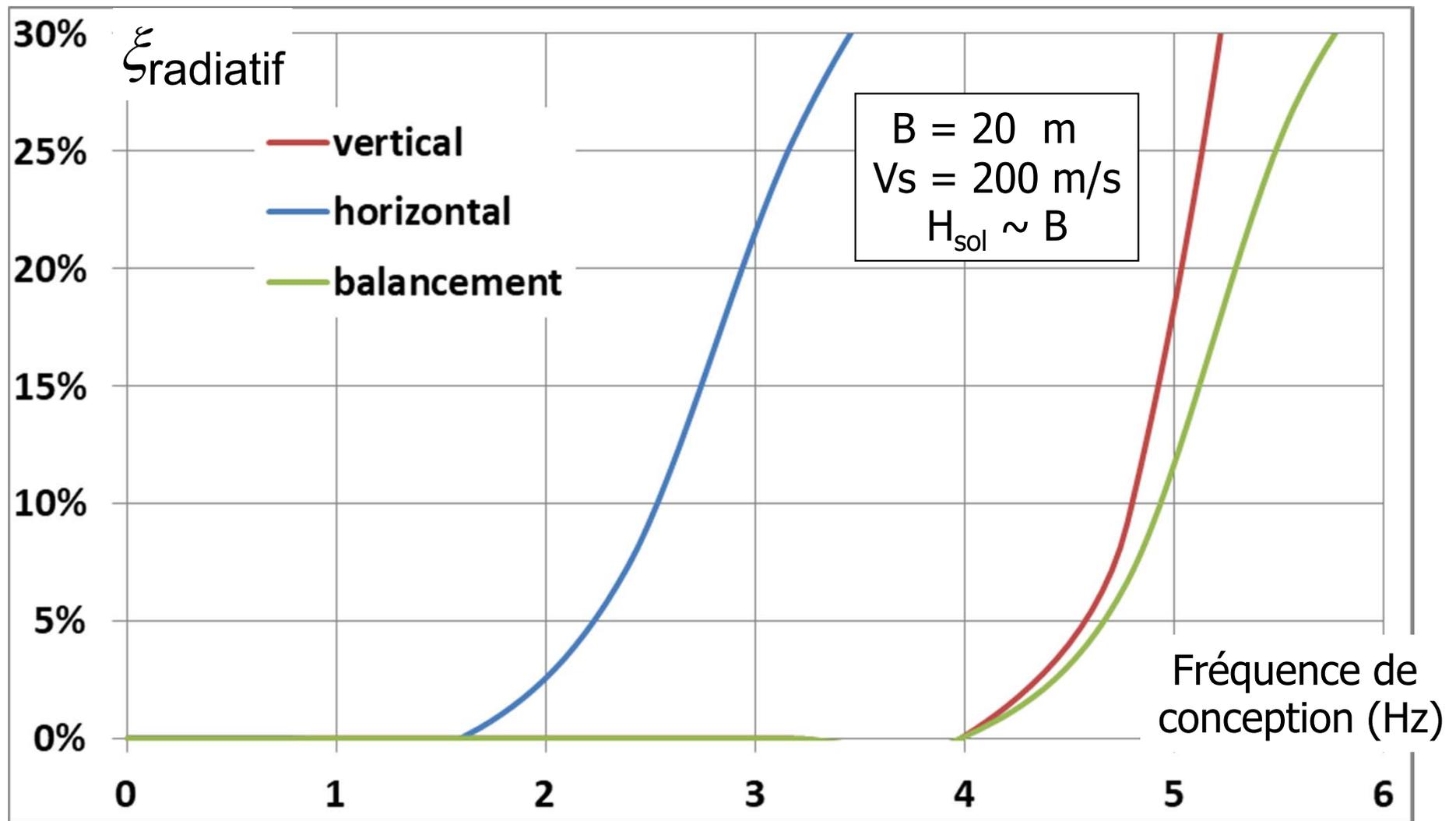
# Prise en compte du séisme

- Recours aux solutions analytiques : sol homogène (par ex. Deleuze)



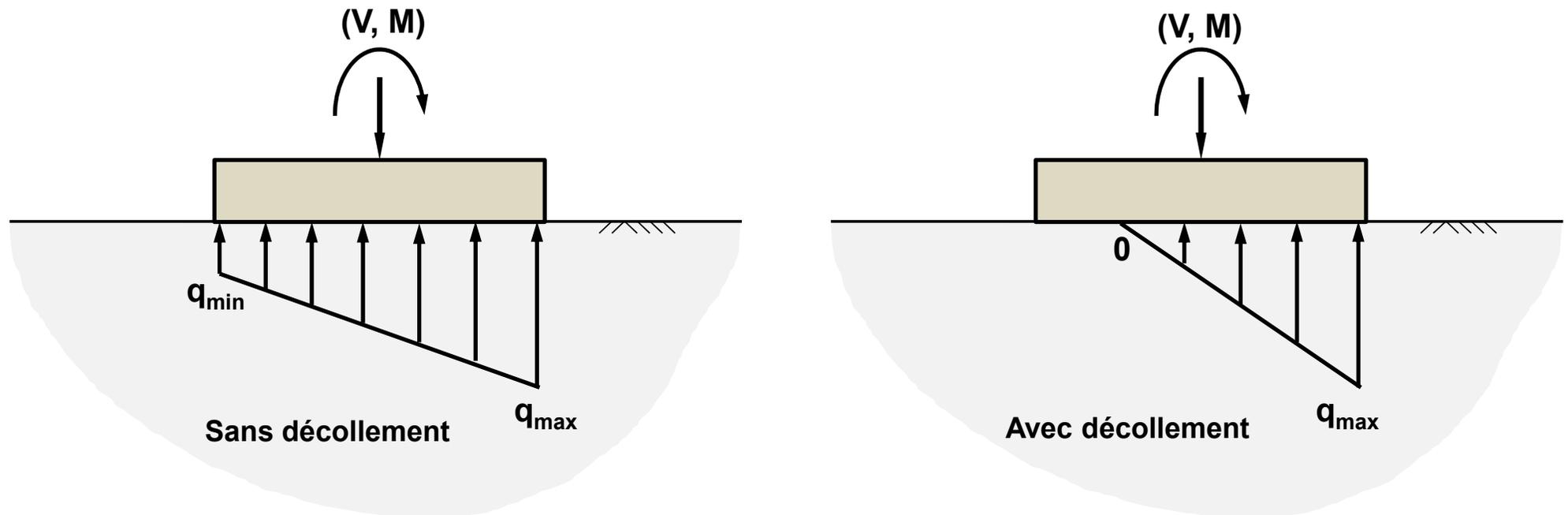
# Prise en compte du séisme

- Recours aux solutions analytiques : sol monocouche (Gazetas, 1991)



# Prise en compte du séisme

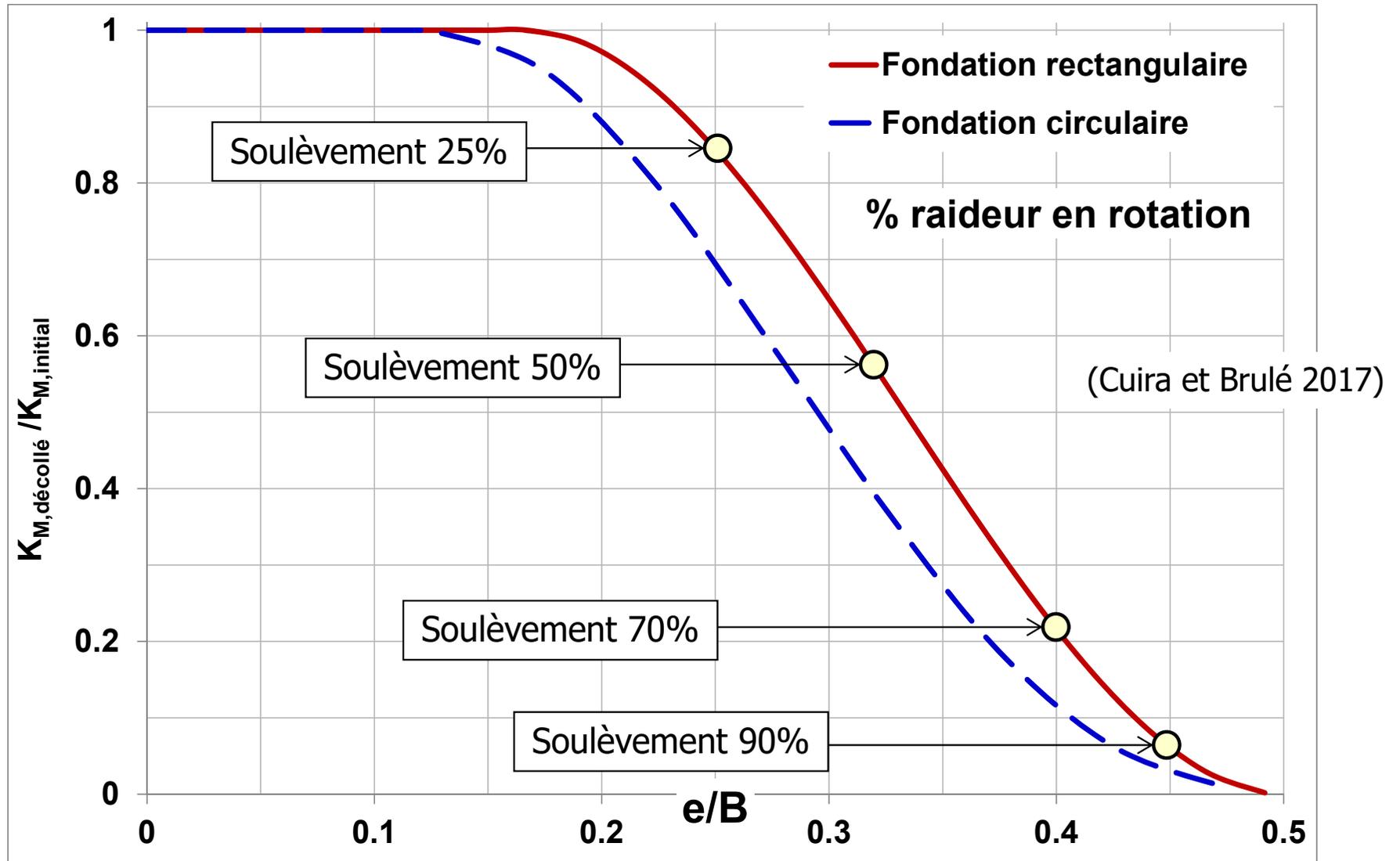
- Effets des non linéarités : le cas d'un décollement « partiel »



$$M_u = \frac{B}{2} V$$

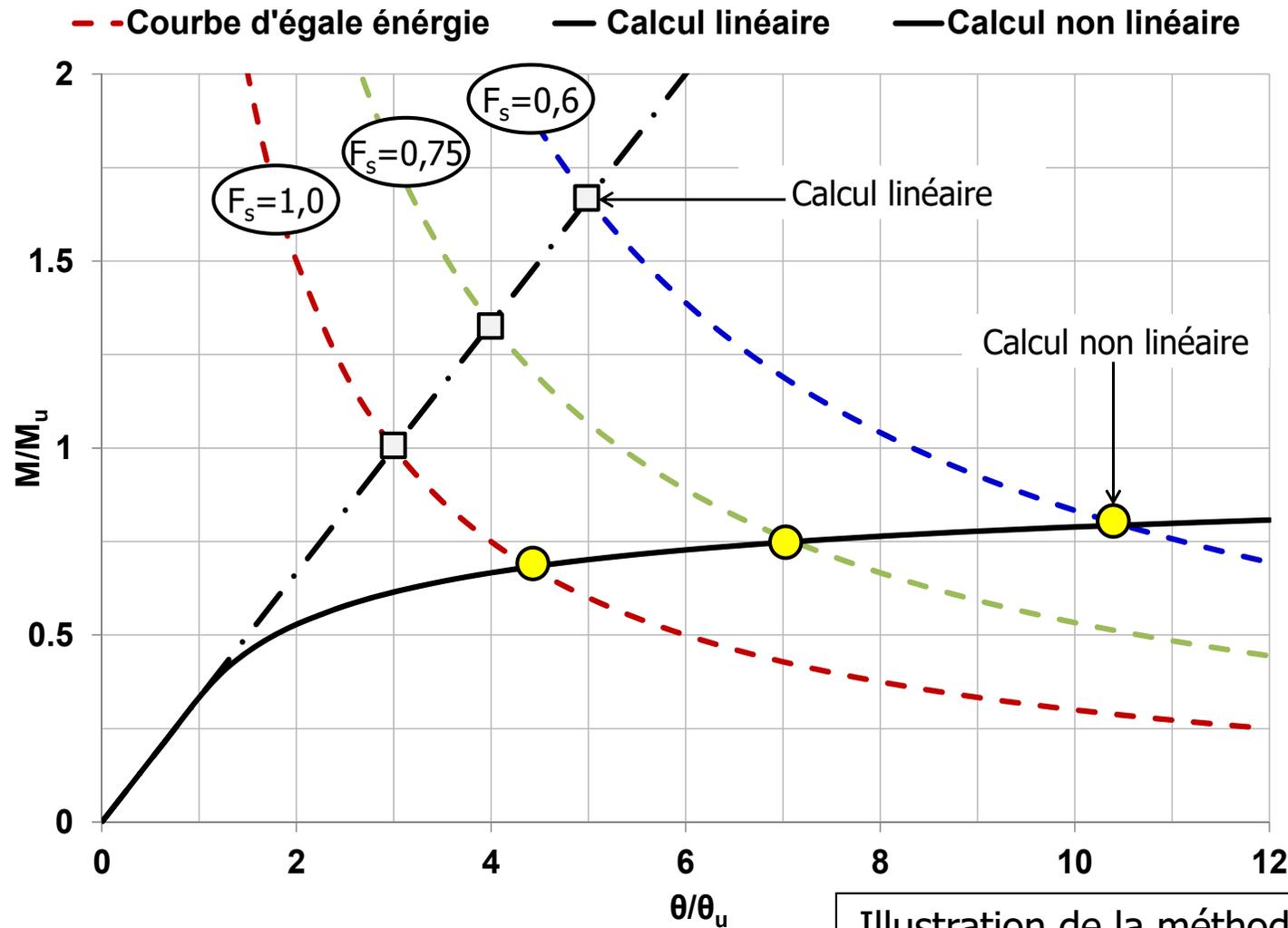
# Prise en compte du séisme

- Effets des non linéarités : le cas d'un décollement « partiel »



# Prise en compte du séisme

- Effets des non linéarités : le cas d'un décollement « partiel »



$$\frac{M_d}{M_u} = 1 + \alpha - \sqrt{\alpha(\alpha + 2)}$$

$$\alpha = \frac{2}{3} \left( \frac{F_s}{3} \right)^2$$

(Cuira et Brulé 2017)

Illustration de la méthode « énergétique »

## Ce qu'il faut retenir

- Les enjeux liés à l'ISS : efforts, déplacements et déformabilité du sol
- Importance du zonage dans la définition du coefficient de réaction sous une fondation étendue – notion de matrice de souplesse
- Sous séisme : continuité avec les formalismes « statiques » et intérêt des modèles non linéaires