



Exemples de problèmes posés dans la justification des ouvrages mêlant géotechnique et parasismique



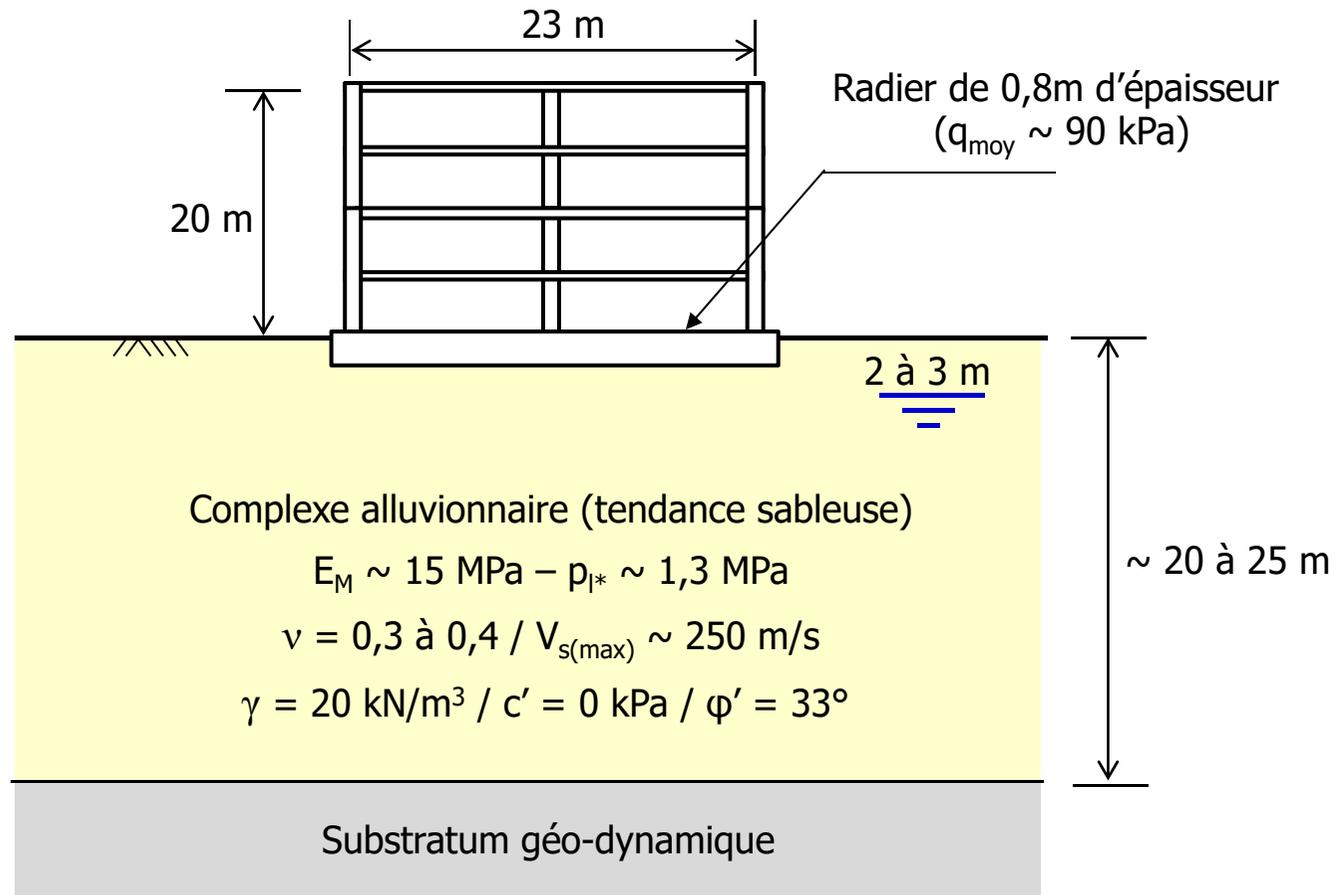
Fahd Cuira
Terrasol

Sommaire

- Fondation d'un bâtiment industriel : aspects géotechniques et parasismiques
- Impasse conceptuelle des formalismes de « sécurité » pseudo-statiques sous séisme
- Approche en déplacements et concept d'isolation sismique

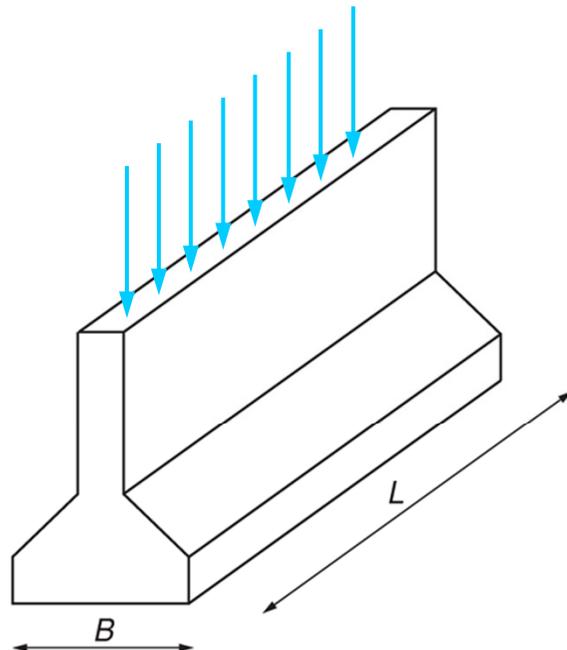
Etude d'un bâtiment industriel

- Fondation sur radier général reposant sur sol alluvionnaire



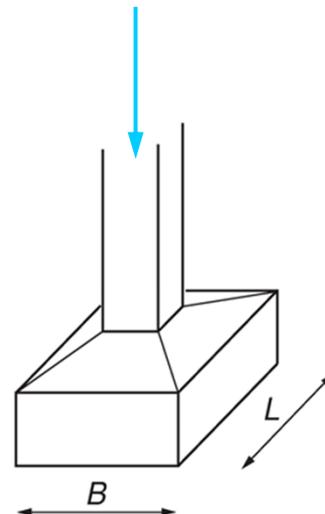
Aspects « géotechniques »

- Particularité d'une fondation sur radier général



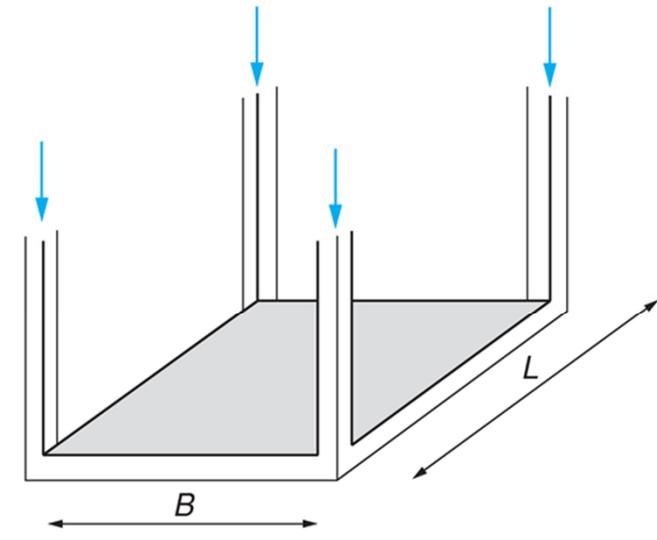
$B \times L \ll$ aire de l'ouvrage porté

(a) **semelle filante**



$B < L$

(b) **semelle isolée**



$B \times L$: aire de l'ouvrage porté

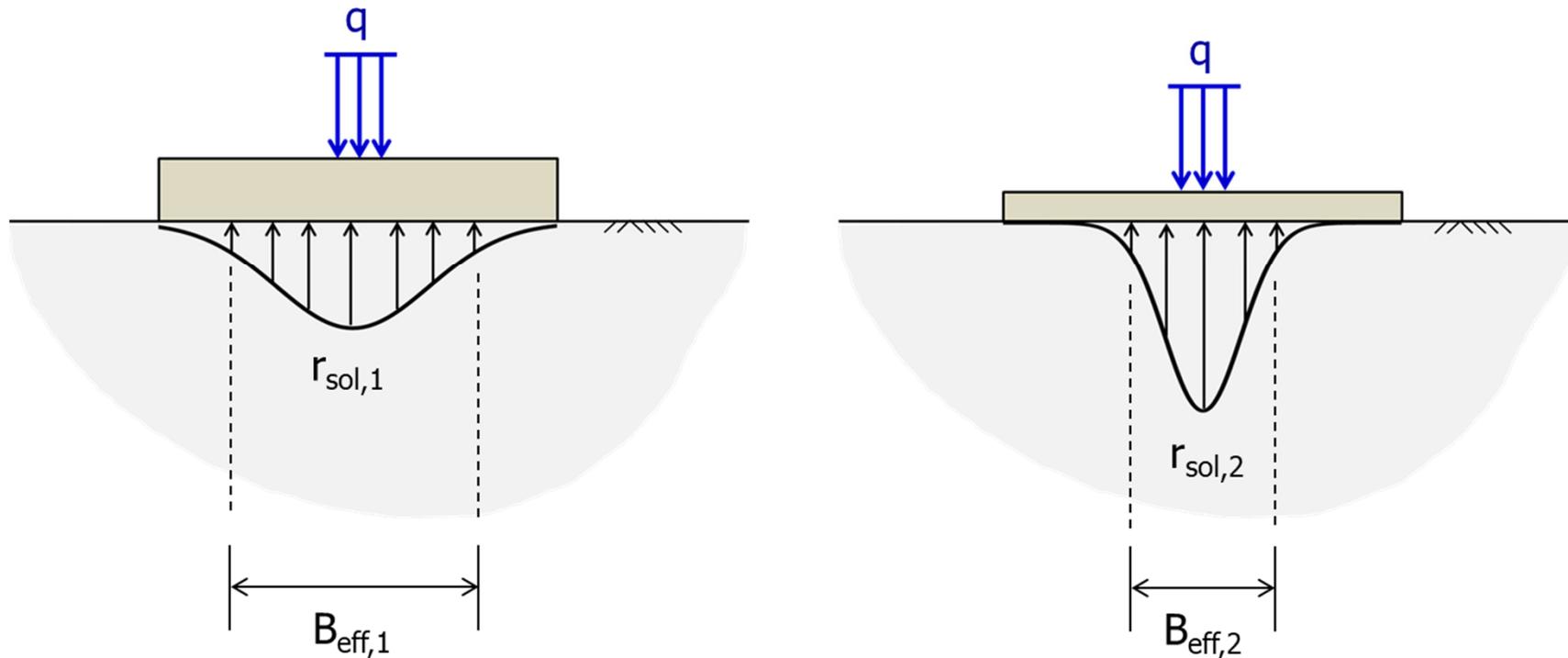
(c) **radier (ou dallage)**

Fondation de comportement
infiniment rigide

Prise en compte de
la souplesse relative

Aspects « géotechniques »

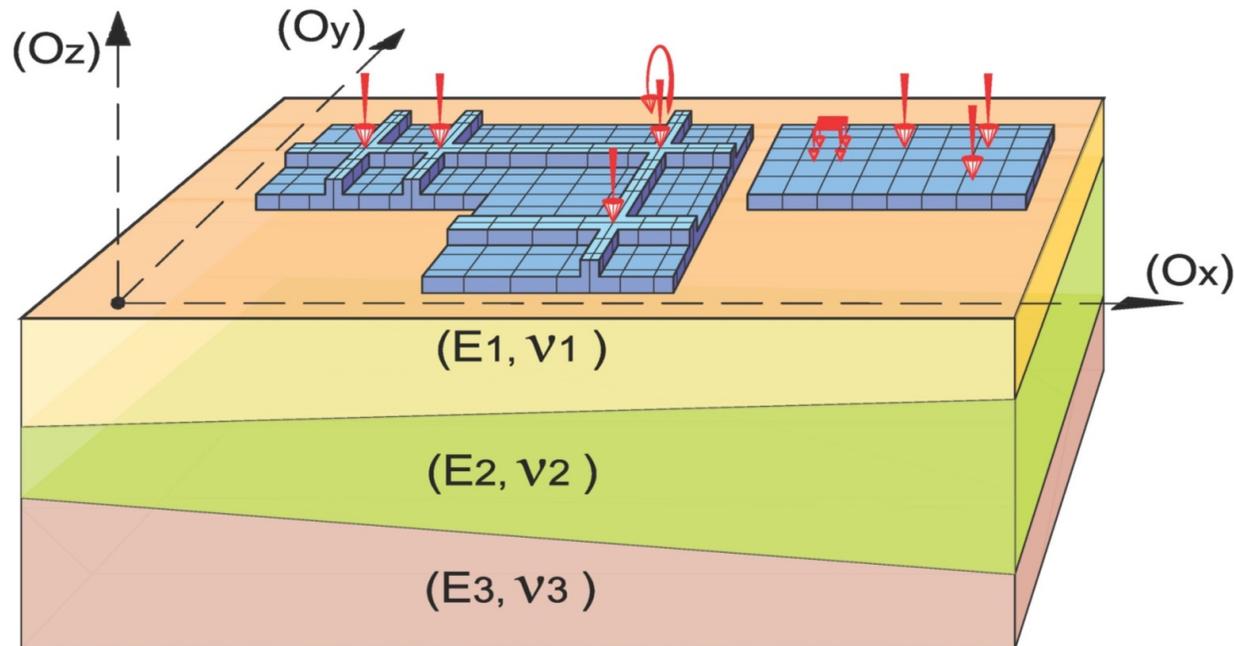
- Particularité d'une fondation sur radier général



$$B_{\text{eff}} \approx 3 \sqrt[3]{\frac{EI_{\text{radier}}}{E_{\text{sol}}}} \approx 6 \text{ à } 9 H_{\text{radier}} \quad (\times 0,5 \text{ pour une charge au bord du radier})$$

Aspects « géotechniques »

- Utilisation d'un modèle en déplacements

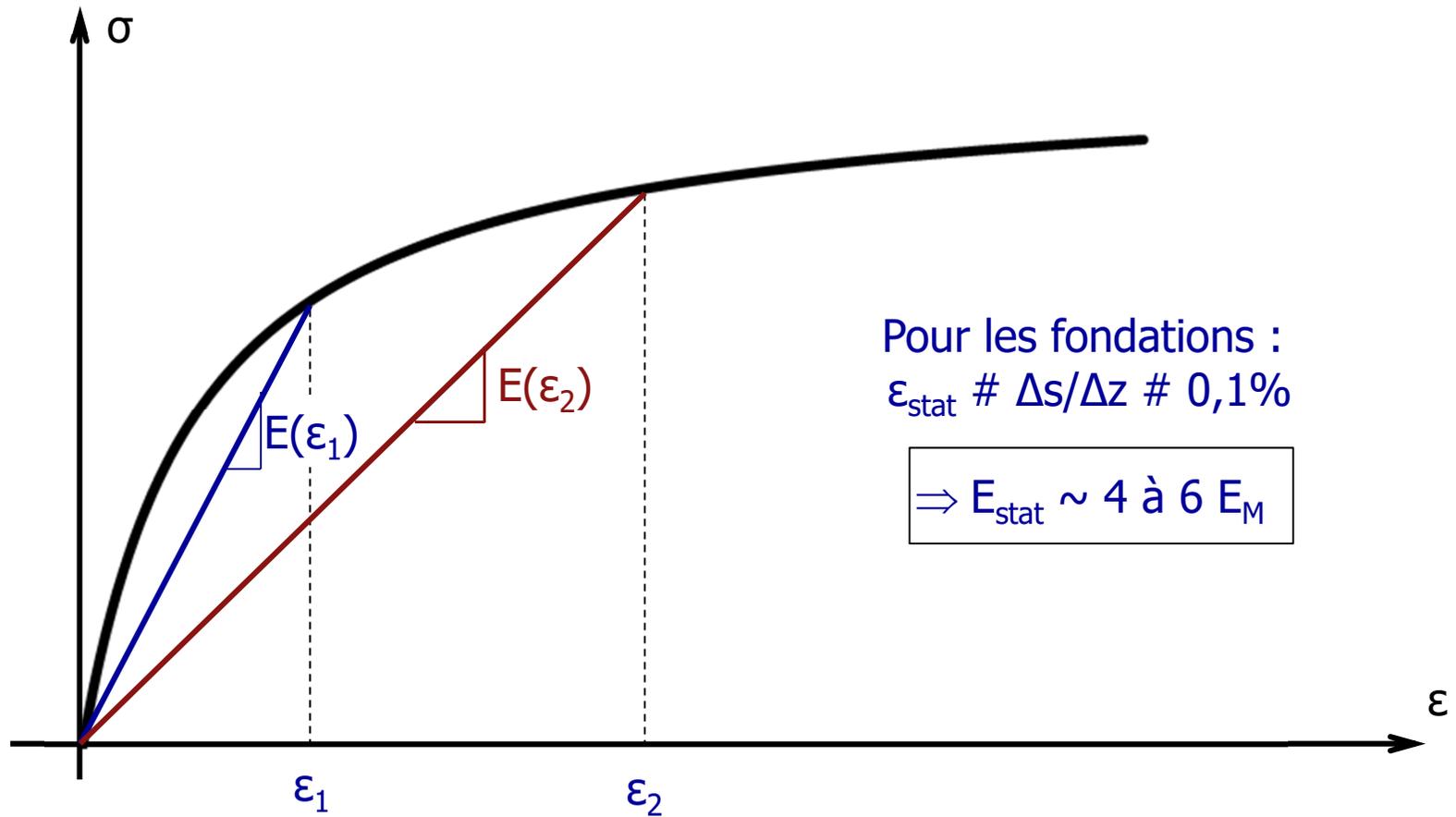


Modélisation hybride :

- ⇒ radier modélisé en éléments finis de plaque
- ⇒ massif de sol par des solutions analytiques pré-établies (théorie élasticité)

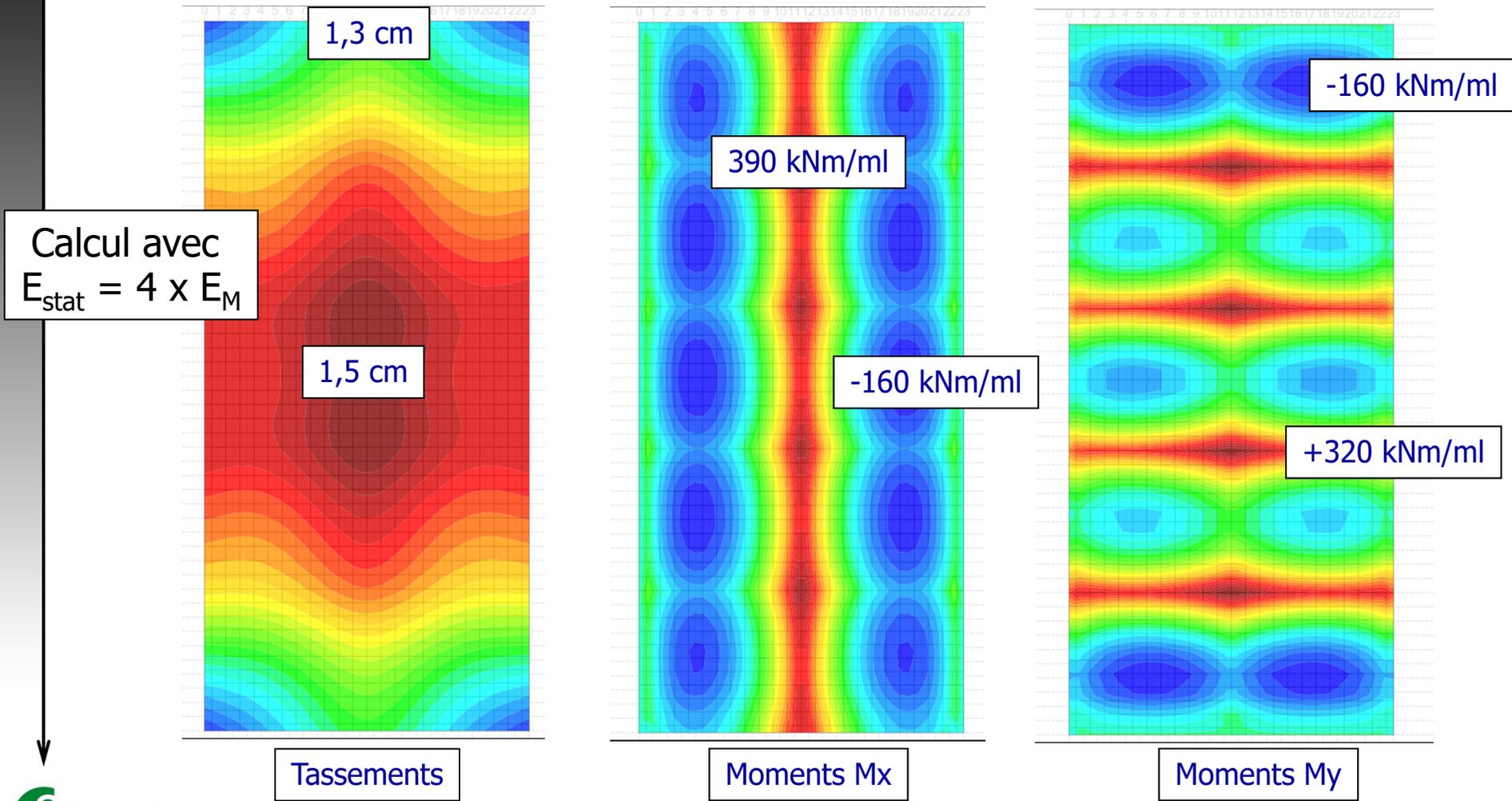
Aspects « géotechniques »

- La question des modules de déformation



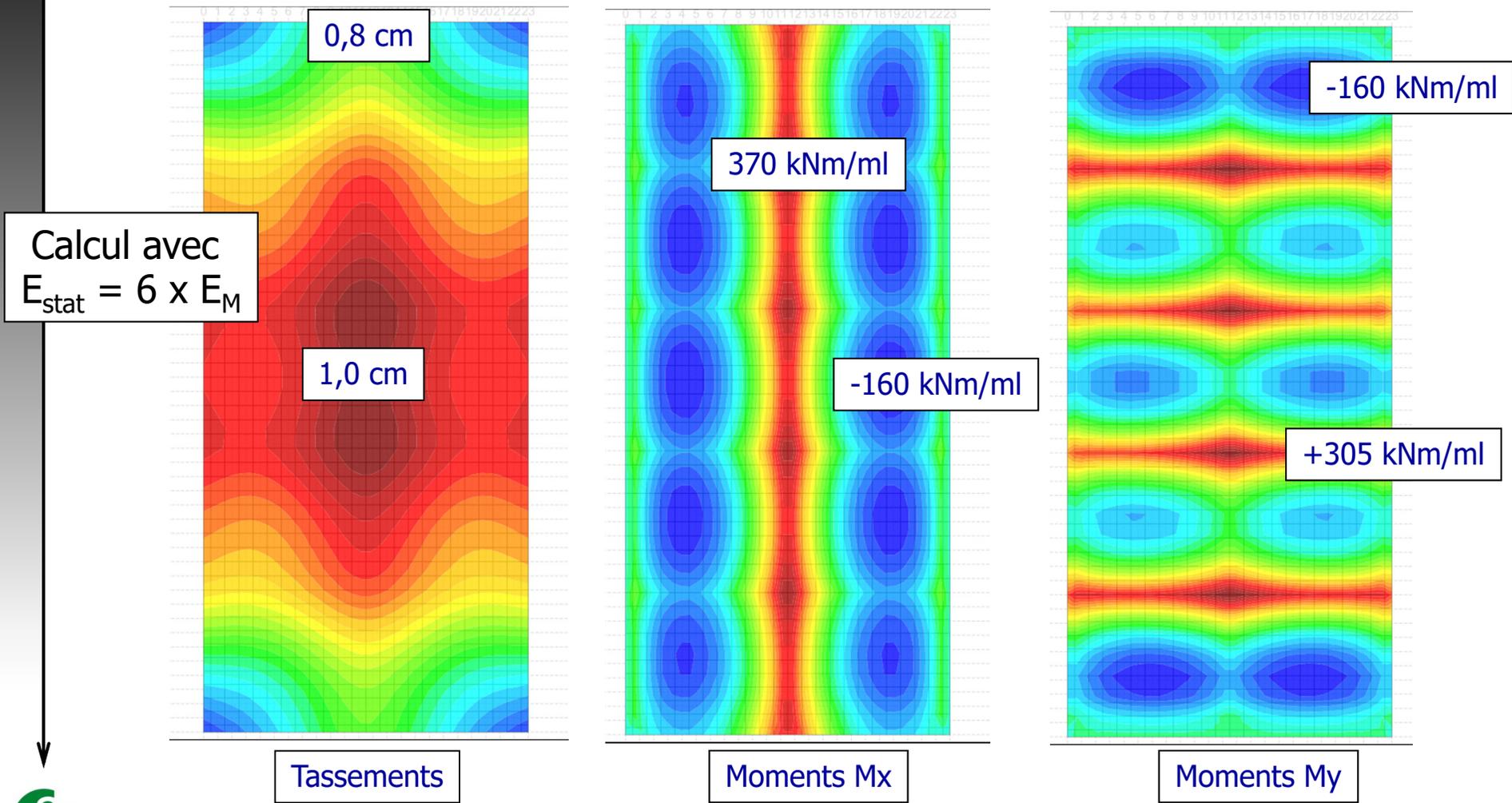
Aspects « géotechniques »

- Vérification de la fondation en conditions « statiques » (G + 0,3Q)



Aspects « géotechniques »

- Vérification de la fondation en conditions « statiques » ($G + 0,3Q$)



Aspects « parasismiques »

- Contexte sismique : Zone 4 / importance III / Sol C => $a_N \sim 0,3g$

Décret 2010 – 1254 Zonage administratif proposé

Arrêtés

Bâtiments 22/10/2010

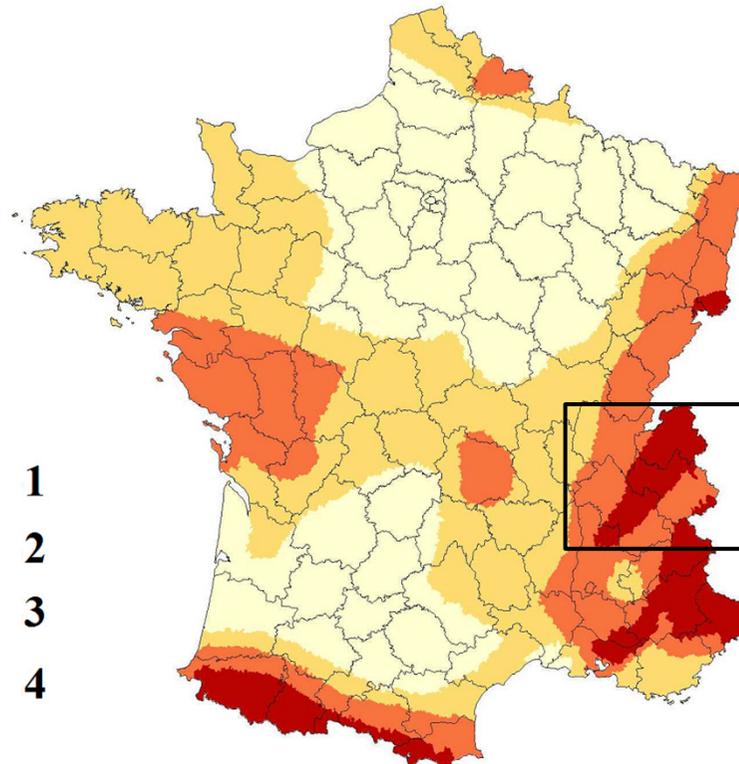
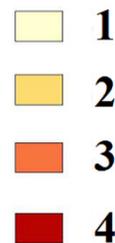
Ponts 26/10/2011

- 1 : 0.4 m/s²
- 2 : 0.7 m/s²
- 3 : 1.1 m/s²
- 4 : 1.6 m/s²
- 5 : 3.0 m/s²

Arrêtés

ICPE 24/01/2011

- 1 : 0.88 / 0.74 m/s²
- 2 : 1.54 / 1.30 m/s²
- 3 : 2.42 / 2.04 m/s²
- 4 : 3.52 / 2.96 m/s²
- 5 : 6.60 / 5.55 m/s²



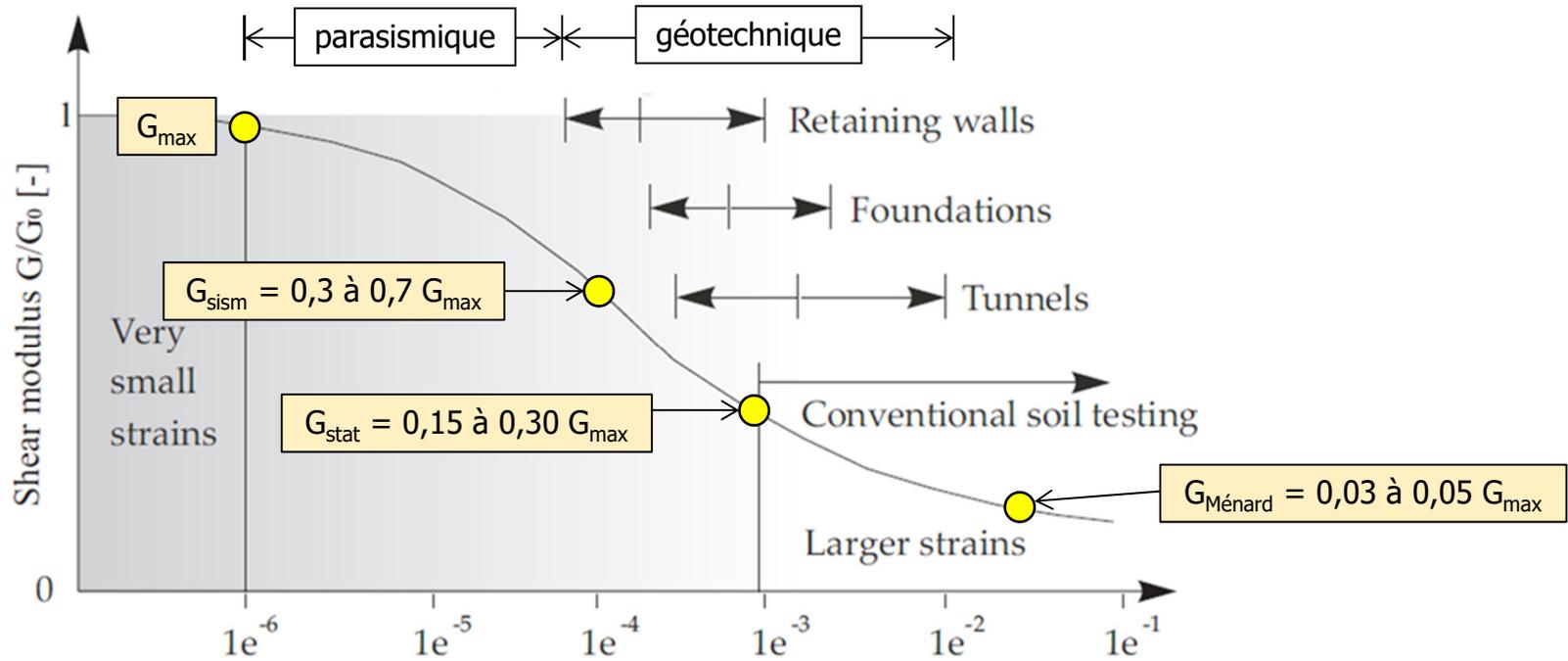
Aspects « parasismiques »

- Particularité du chargement sismique

	Conception parasismique	Conception géotechnique
Durée d'application	10 à 40 secondes	1 mois à 50 ans
Signe de chargement	Cyclique alterné (# 10 cycles)	Monotone
Direction de chargement	Horizontale dominante	Verticale dominante
Chemin de chargement	Déviatorique (cisaillement)	Volumique / Déviatorique
Type de chargement	Mouvement imposé (au support)	Charge imposée (le plus souvent)
Gamme de déformation	10^{-5} à 10^{-4}	10^{-3} à 10^{-2}

Aspects « parasismiques »

- La question des modules de déformation (de cisaillement) sous séisme

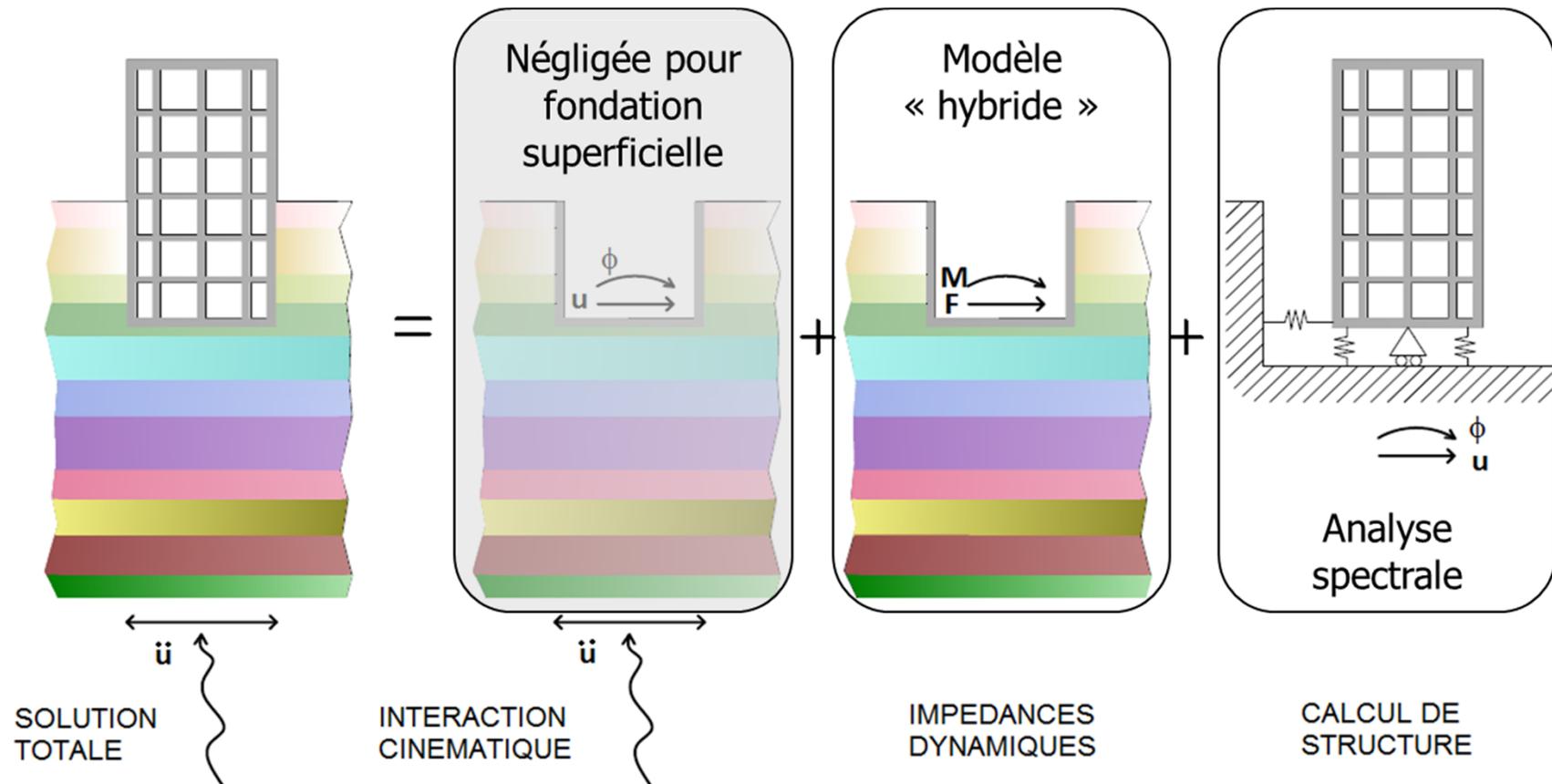


Rapport d'accélération du sol, $\alpha \cdot S$	Coefficient d'amortissement max.	$\frac{v_s}{v_{s,max}}$	$\frac{G}{G_{max}}$
0,10	0,03	0,90 ($\pm 0,07$)	0,80 ($\pm 0,10$)
0,20	0,06	0,70 ($\pm 0,15$)	0,50 ($\pm 0,20$)
0,30	0,10	0,60 ($\pm 0,15$)	0,36 ($\pm 0,20$)

Approche « forfaitaire »
EC8-5 pour $V_s \leq 360$ m/s

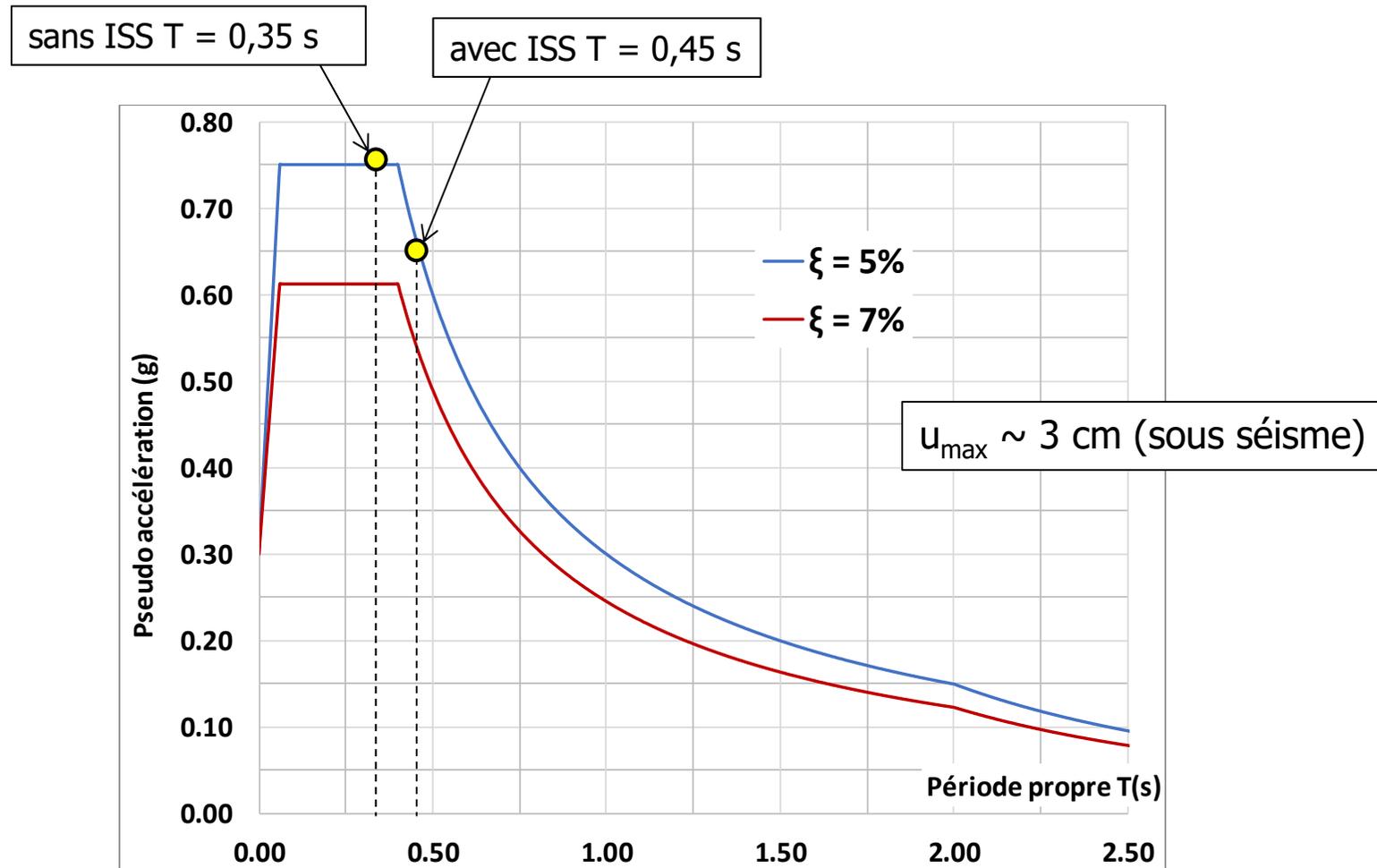
Réponse sismique de l'ouvrage

- Prise en compte des effets d'interaction sol-structure (effets inertiels)



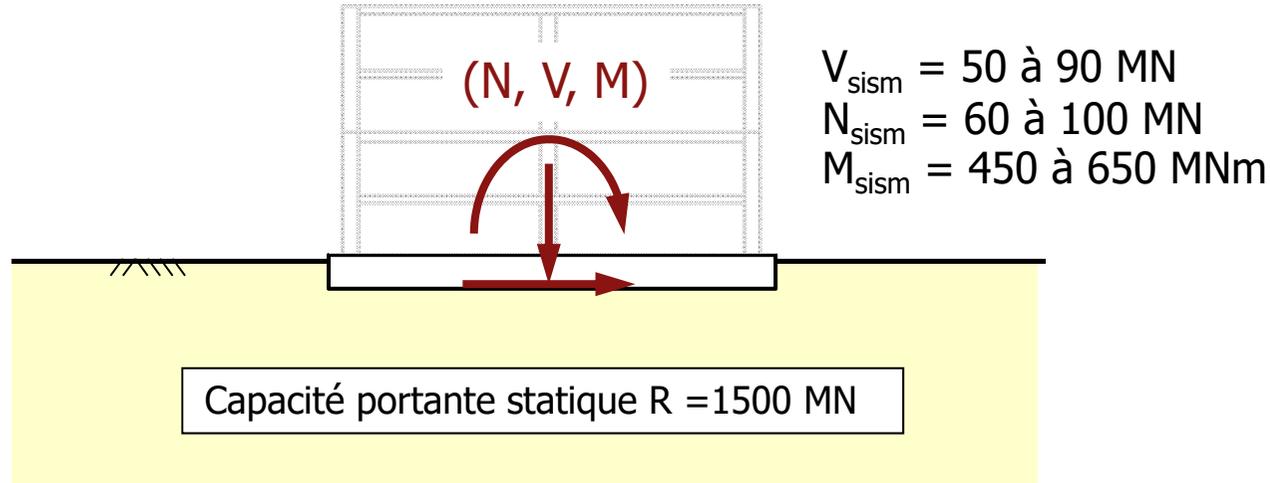
Réponse sismique de l'ouvrage

- Analyse spectrale du bâtiment : période $\sim 0,45\text{s}$ / déformée $\sim 3\text{ cm}$



Stabilité sismique de la fondation

- Descente de charges sismique issue de l'analyse spectrale



Vérification de la portance sismique par un formalisme pseudo-statique (EC8-5)

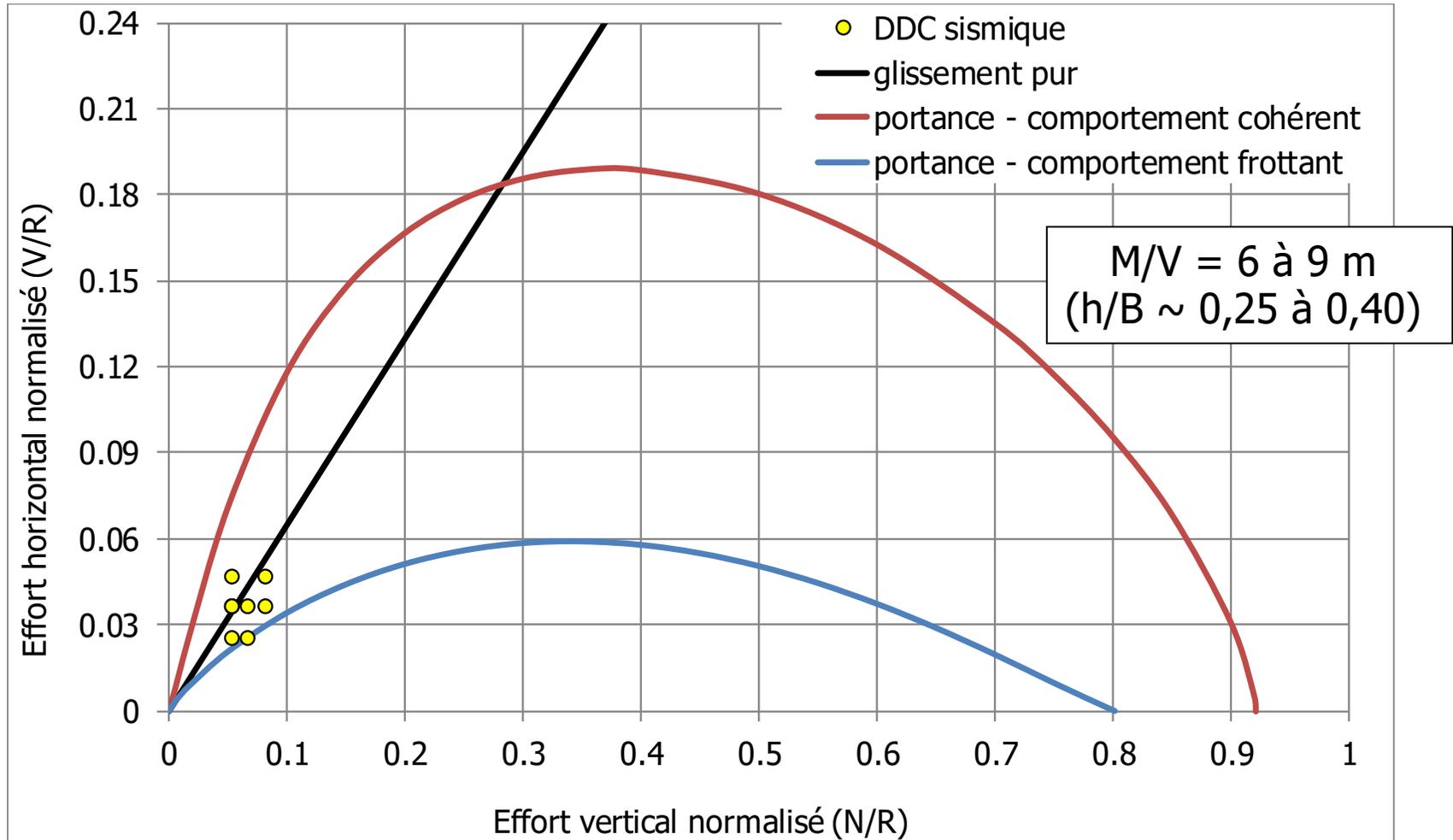
$$G = \frac{(1 - e\bar{F})^{c_T} (\beta\bar{V})^{c_T}}{\bar{N}^a [(1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N}]^b} + \frac{(1 - f\bar{F})^{c'_M} (\gamma\bar{M})^{c_M}}{\bar{N}^c [(1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N}]^d} \leq 1$$

$$\bar{N} = \frac{N}{R} \quad \bar{V} = \frac{V}{R} \quad \bar{M} = \frac{M}{B \cdot R}$$

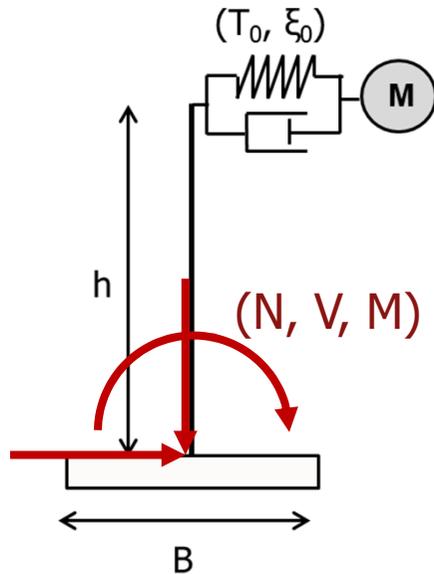
N'est vérifié pour aucune combinaison !

Stabilité sismique de la fondation

- Représentation de la DDC dans un repère (N/R , V/R)



Stabilité sismique de la fondation



$$G(a) = \frac{(1 - e\bar{F})^{c_T} (\beta\bar{V})^{c_T}}{\bar{N}^a [(1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N}]^b} + \frac{(1 - f\bar{F})^{c'_M} (\gamma\bar{M})^{c_M}}{\bar{N}^c [(1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N}]^d} = 1$$

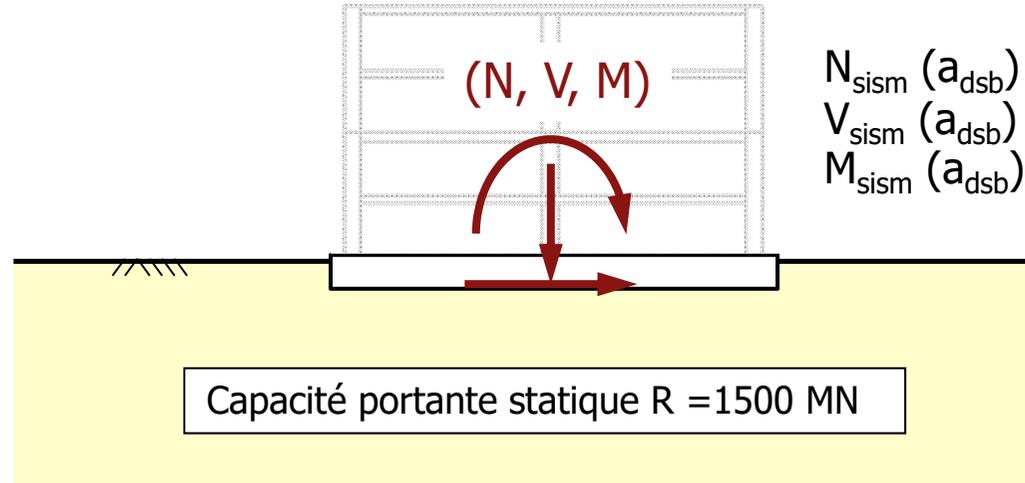
$$\bar{N} = \frac{N}{R} \quad \bar{V} = \frac{S_e a}{g} \bar{N} \quad \bar{M} = \frac{h}{B} \bar{V}$$

Accélération déstabilisante pour $S_e = 2$ / sol frottant (33°)

	$h/B = 0$	$h/B = 0,3$	$h/B = 0,6$	$h/B = 1,0$
$N/R = 0,05$	0,28g	0,21g	0,16g	0,13g
$N/R = 0,10$	0,23g	0,17g	0,14g	0,11g
$N/R = 0,20$	0,18g	0,13g	0,11g	0,09g
$N/R = 0,30$	0,14g	0,11g	0,09g	0,07g

Stabilité sismique de la fondation

- Notion d'accélération déstabilisante



⇒ Accélération déstabilisante = celle correspondant à l'état limite de portance

$$G(a) = \frac{(1 - e\bar{F})^{c_T} (\beta\bar{V})^{c_T}}{\bar{N}^a [(1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N}]^b} + \frac{(1 - f\bar{F})^{c'_M} (\gamma\bar{M})^{c_M}}{\bar{N}^c [(1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N}]^d} = 1$$

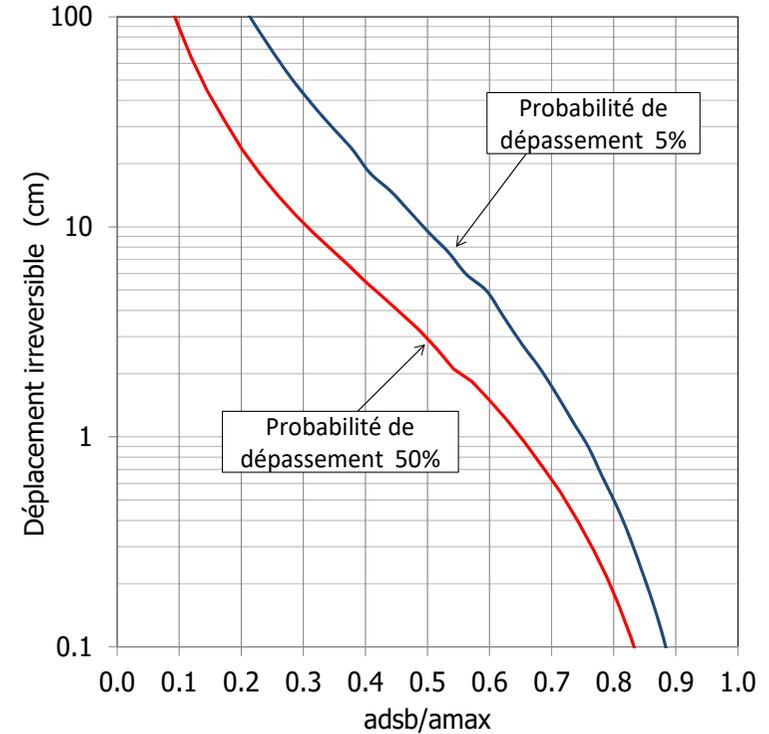
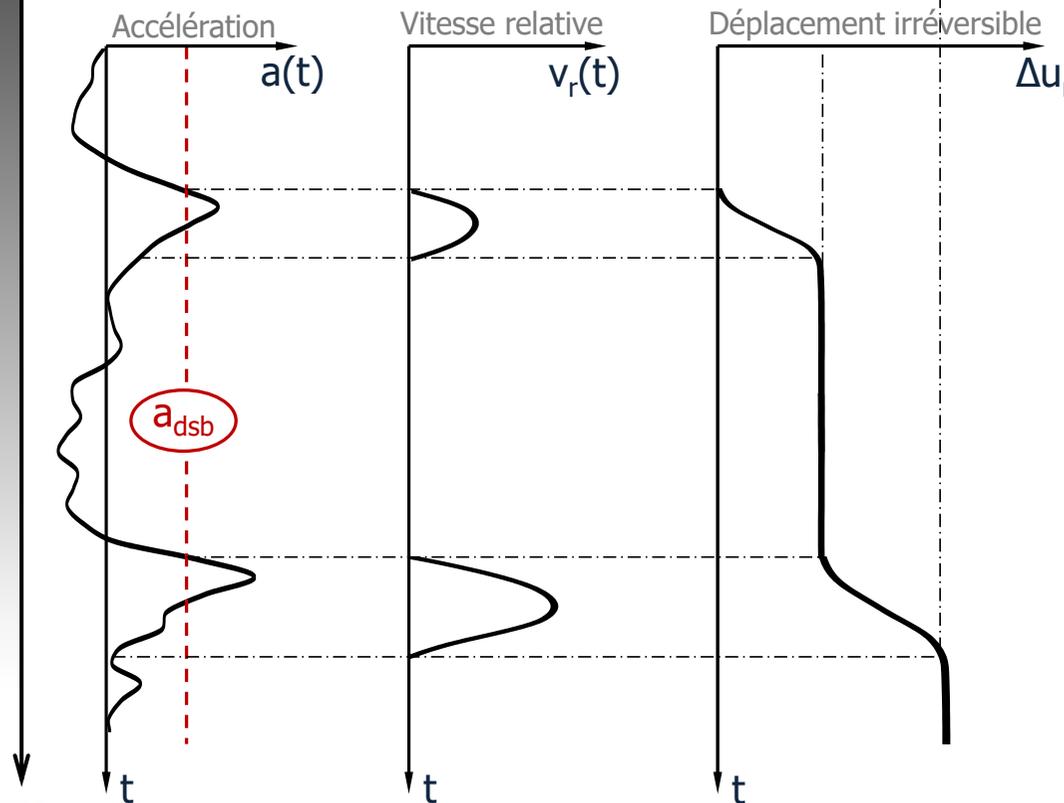
⇒ Dans le cas présent : $a_{dsb} = 0,20g$ (pour un comportement frottant)

Stabilité sismique de la fondation

- Notion d'accélération déstabilisante

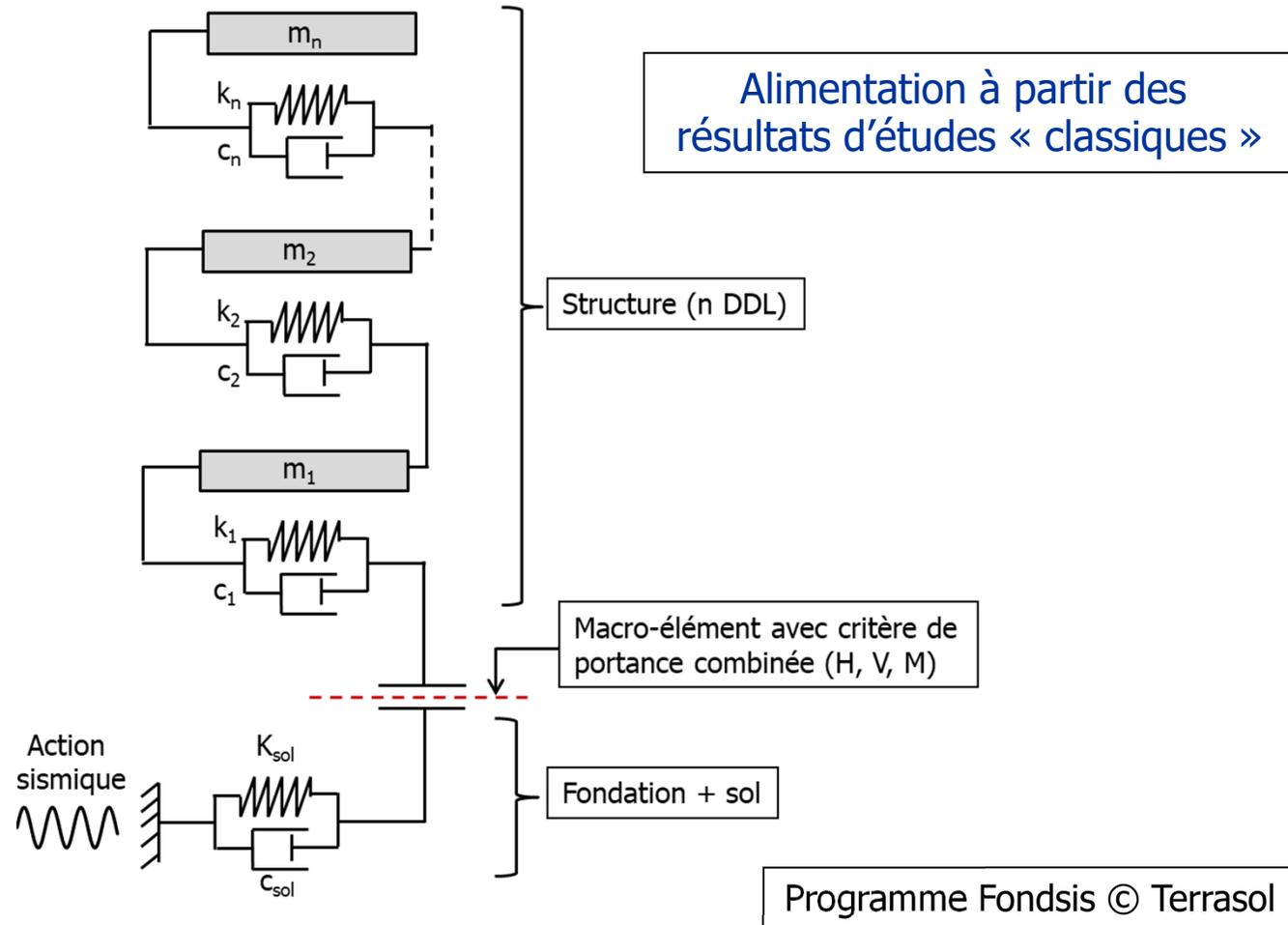


$$\Delta u_r \approx \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i^2}{2} a_{\max,i} \left(\frac{a_{\max,i}}{a_{\text{dsb}}} - 1 \right)$$



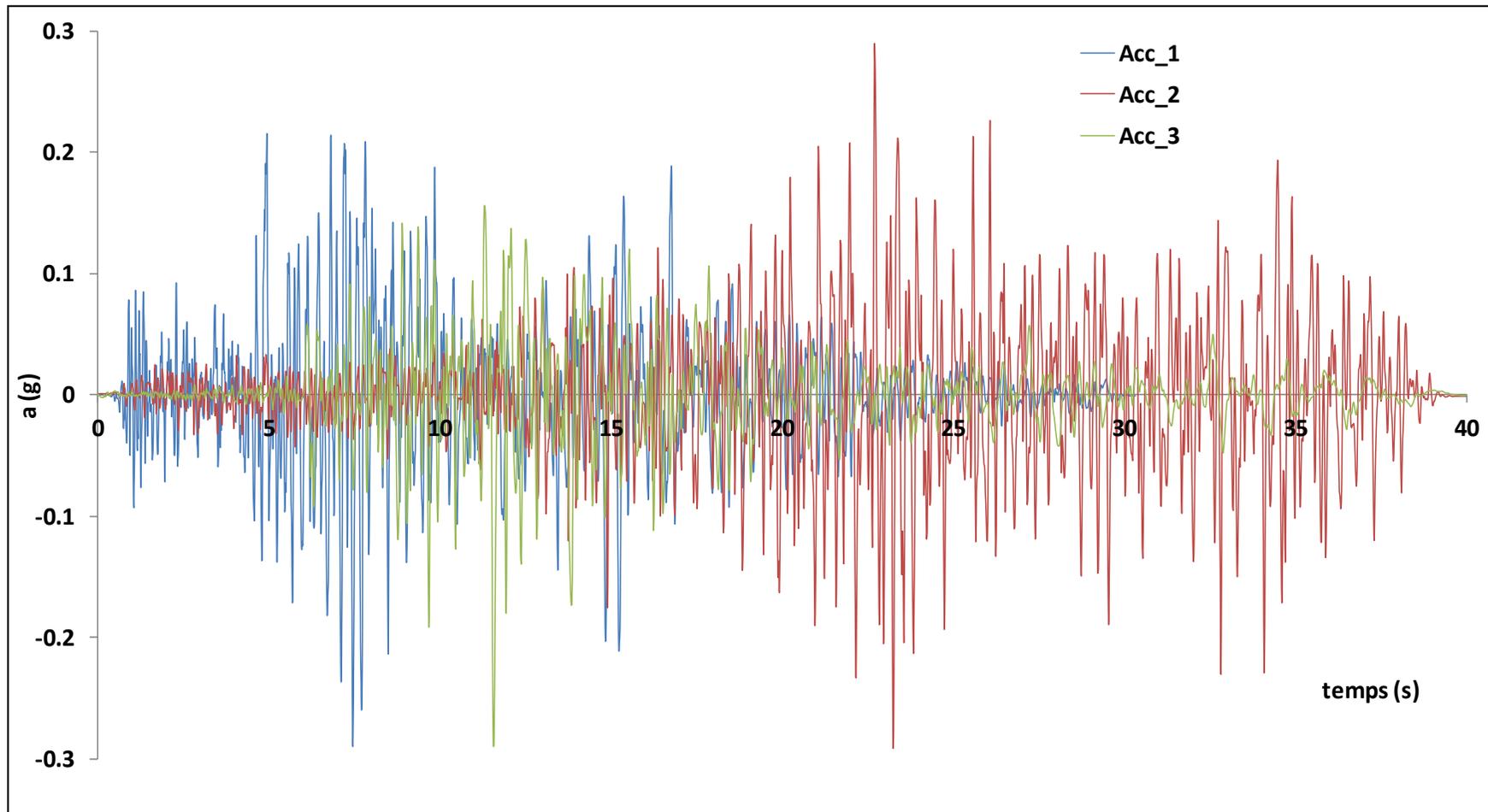
Approche en déplacements

- Utilisation d'un modèle analogique équivalent intégrant le mécanisme de portance combinée



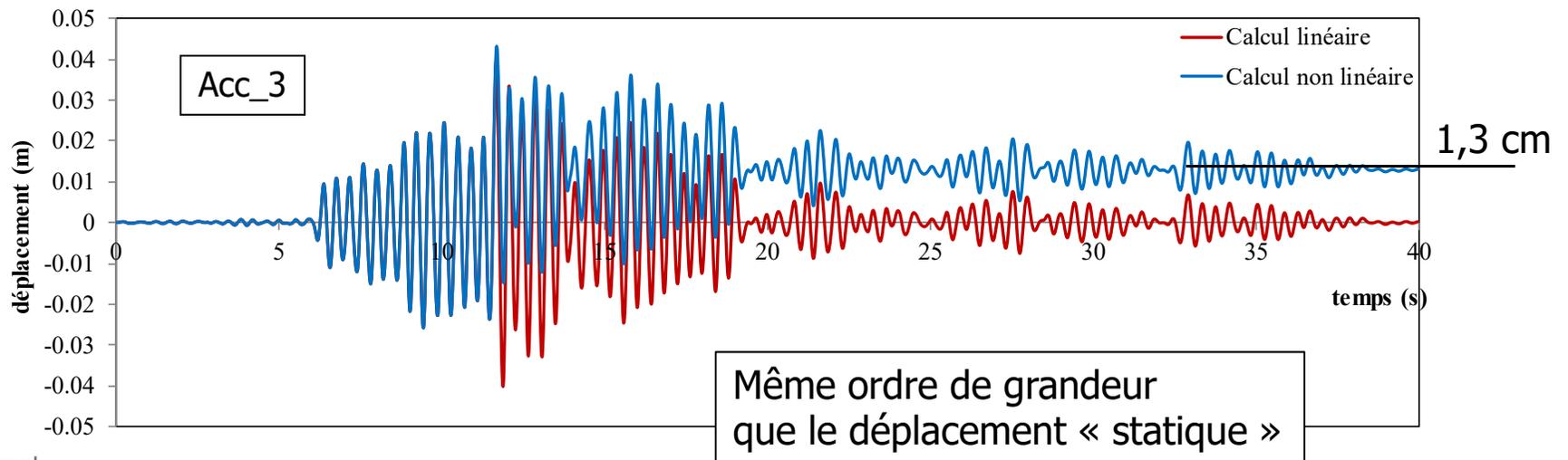
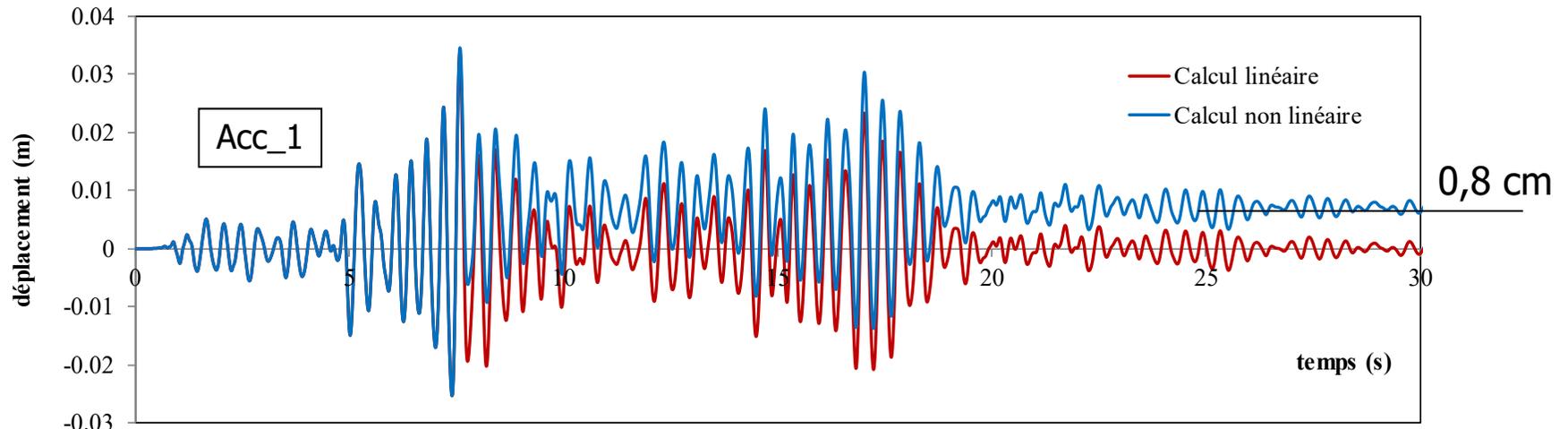
Approche en déplacements

- Action sismique : accélérogrammes calés sur le spectre de réponse



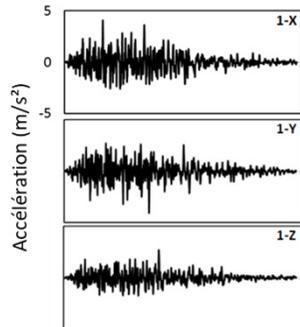
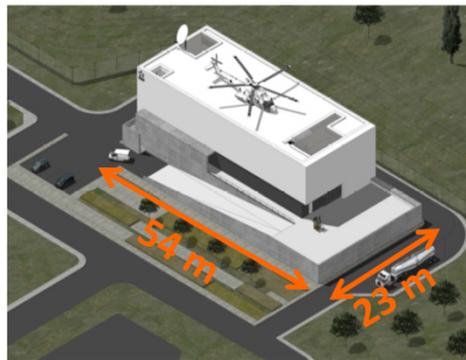
Approche en déplacements

- Mise en œuvre : estimation des déplacements irréversibles

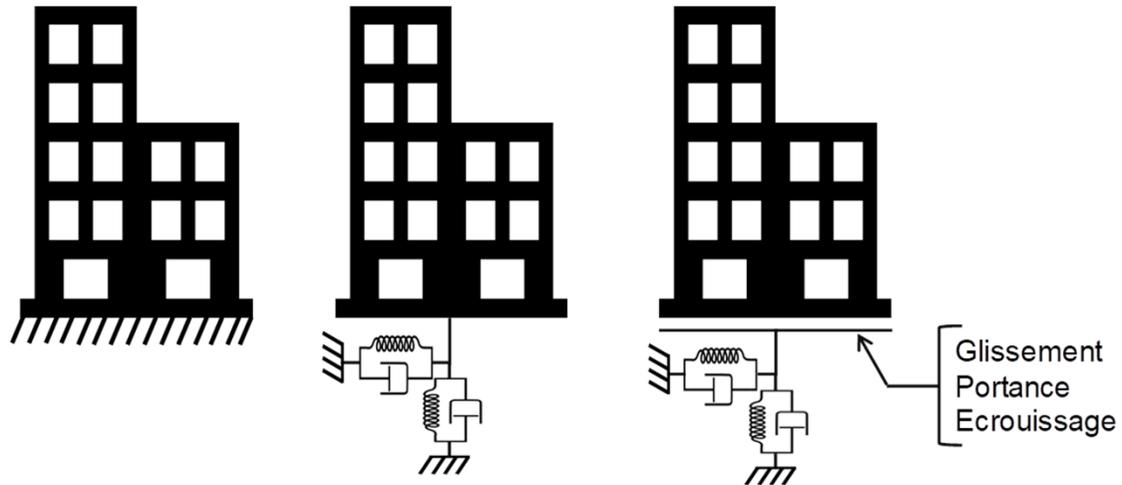


Approche en déplacements

- Autre exemple : bâtiment industriel ($f_0 \sim 8$ Hz) sous $a_N = 0,45g$



(Abboud et al. JNGG 2018)

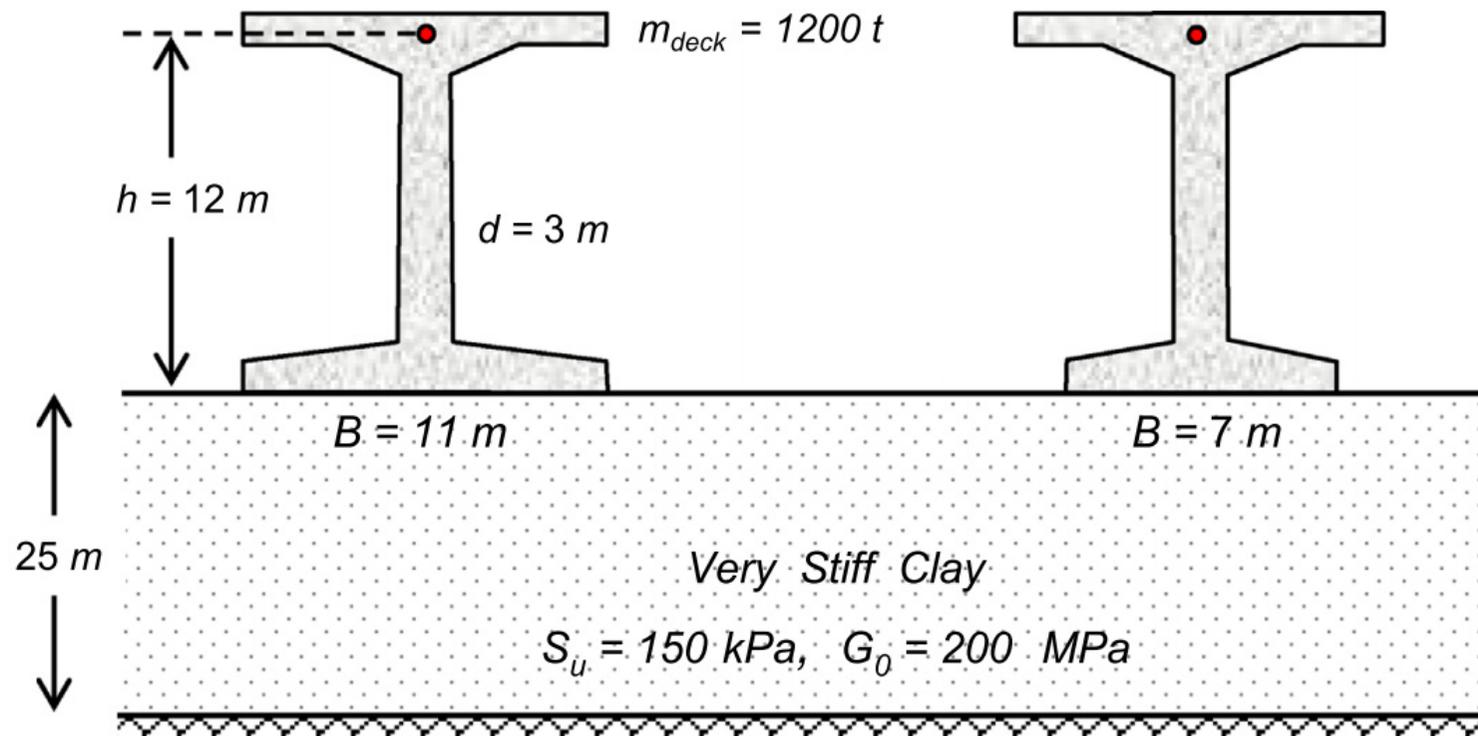


Calcul	V_{max} (MN)	F_s Glissement	F_s Portance	u_{HR} (cm)	u_{VR} (cm)
FIX (sans ISS)	96	0.64	0.79	0.00	0.00
ISS Linéaire	68	0.89	0.81	0.00	0.00
ISS Non linéaire + G	64	1.00	0.89	0.20	0.00
ISS Non linéaire + P	64	0.93	1.00	0.23	0.70
ISS Non linéaire + P + G	63	1.00	1.00	0.25	0.21
ISS Non linéaire + P + G + E	50	1.15	1.21	0.81	1.15

Concept « d'isolation » sismique

- Le fait de « sous-dimensionner » la fondation vis-à-vis des charges sismiques « isole » la structure portée

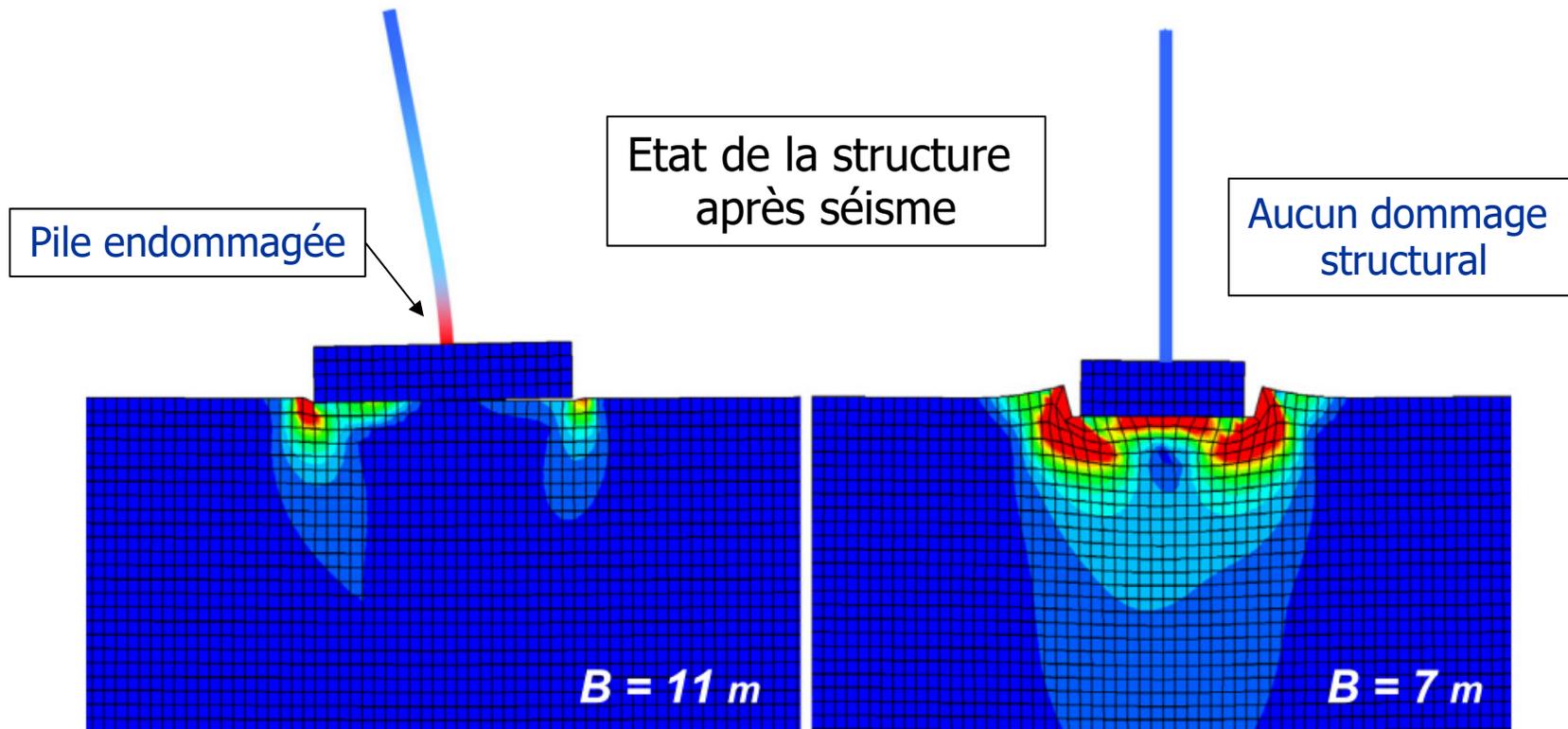
G. Gazetas et al. / Soil Dynamics and Earthquake Engineering 57 (2014) 37–45



Concept « d'isolation » sismique

- Le fait de « sous-dimensionner » la fondation vis-à-vis des charges sismiques « isole » la structure portée

G. Gazetas et al. / Soil Dynamics and Earthquake Engineering 57 (2014) 37–45



Enseignements

- ⇒ L'approche en déplacement complète les analyses basées sur l'utilisation des formalismes de sécurité
- ⇒ Ces formalismes visent principalement à contenir les contraintes et les efforts à des valeurs permettant de garantir l'acceptabilité des déformations vis-à-vis de l'ouvrage porté
- ⇒ Sous chargement monotone de longue durée, ce contrôle requiert un niveau de sécurité de l'ordre de 2 à 3
- ⇒ Sous chargement sismique, la sécurité peut être inférieure à 1,0
- ⇒ Le développement de déformations plastiques peut être « recherché » comme étant un mécanisme naturel de dissipation de l'énergie permettant d'isoler l'ouvrage porté