



Dimensionnement des fondations superficielles sous charge sismique

Youssef Abboud
Terrasol

Sommaire

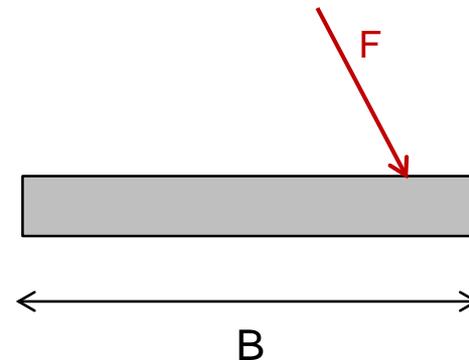
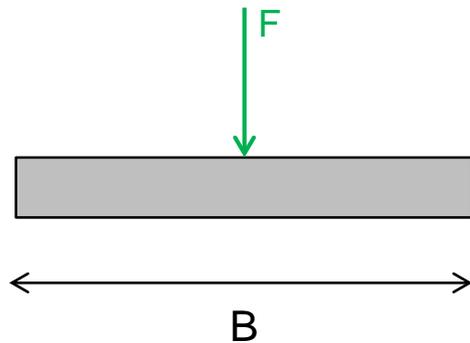
- Spécificité du dimensionnement sismique
- Dimensionnement conventionnel sous séisme
- Définition de l'action sismique : Prise en compte de l'ISS
 - Mécanismes de l'ISS
 - Effets de l'ISS sur le dimensionnement
- Calcul des impédances des fondations
 - Méthodes pseudo statiques
 - Méthodes dynamiques
- Perspectives
 - Dimensionnement en capacité
 - Prise en compte des non linéarités dans l'ISS

Spécificité du dimensionnement sismique

- Sollicitations des ouvrages dans la direction horizontale

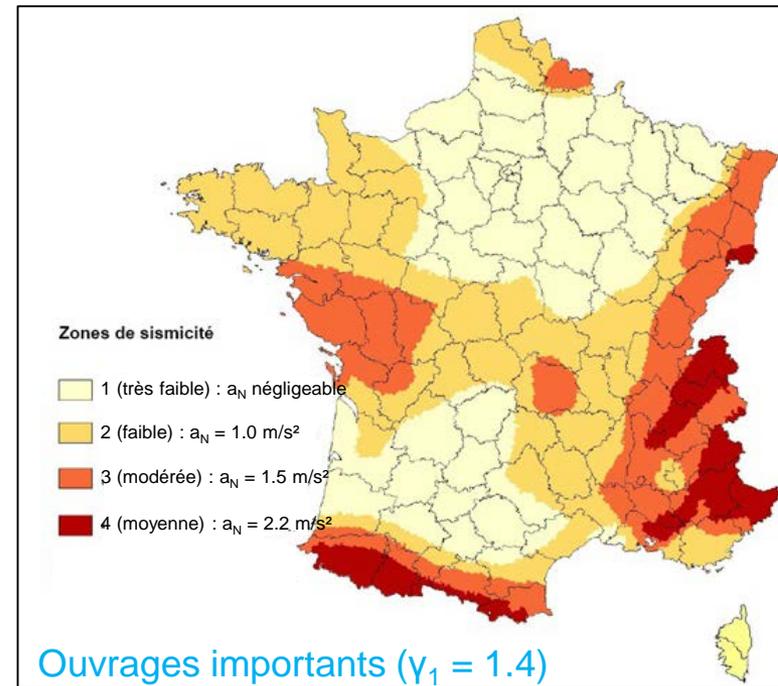
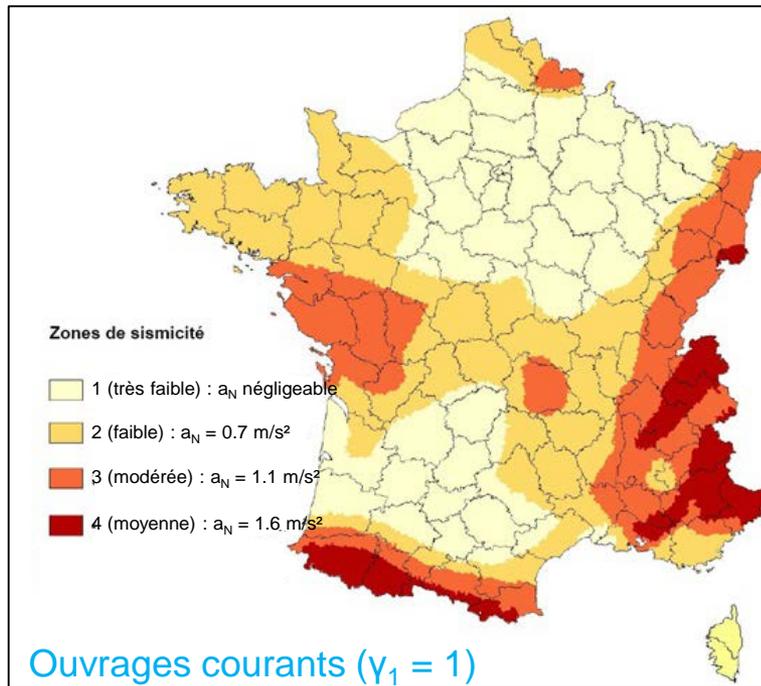


*Séisme du
11 mars 2011 au Japon*



Spécificité du dimensionnement sismique

- Amplitudes élevée des sollicitations (*exemple : France Métropolitaine*)

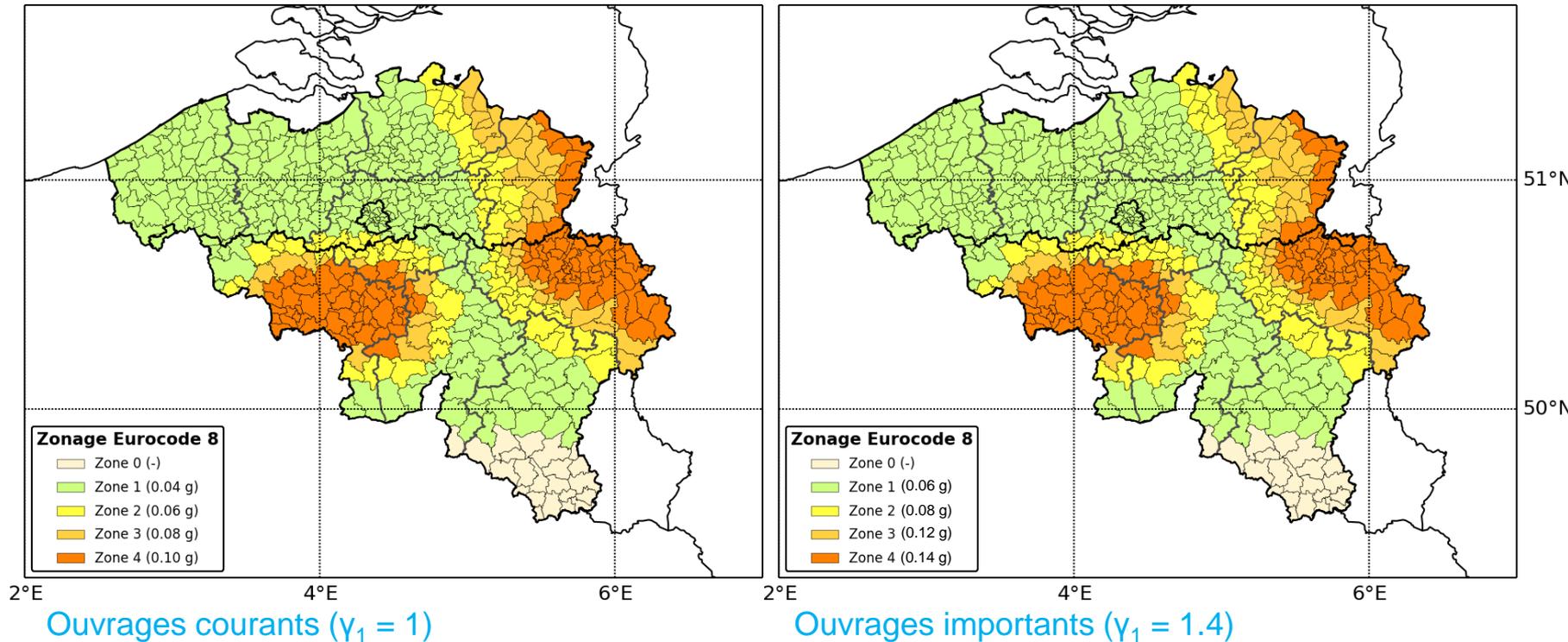


+ effets de site ($\times S = 1$ (rocher) à 1.8 (sol mou)

→ a_N peut atteindre 2,5 – 3,0 m/s^2 en France métropolitaine

Spécificité du dimensionnement sismique

- Amplitudes élevée des sollicitations (*exemple : Belgique*)



+ effets de site ($\times S = 1$ (rocher) à 1.8 (sol mou)

→ a_N peut atteindre 2,0 – 2,5 m/s² en Belgique

Stabilité sismique des fondations

- Liquéfaction : perte de résistance des sables saturés

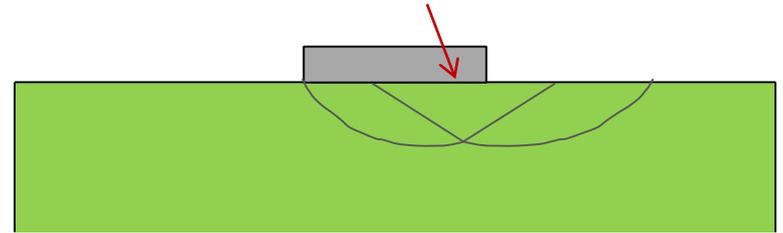


Séisme Niigata (1964)

Source : wikipedia

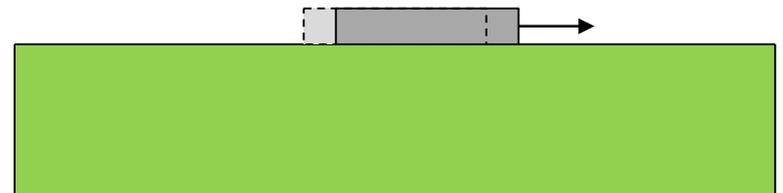
Stabilité sismique des fondations

Instabilité par défaut de portance

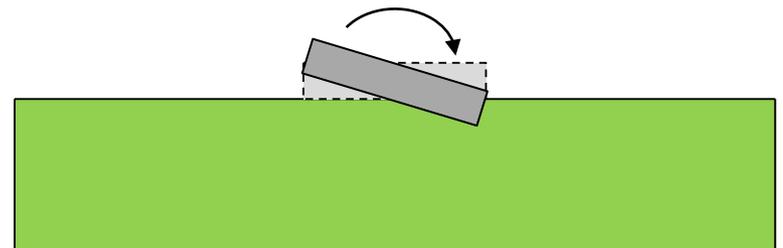


Instabilité géométrique

Glissement



Renversement



Instabilité par perte de portance

Capacité portante statique

$$N_{\max} = \begin{cases} cN_c + \frac{\gamma B}{2} N_\gamma & \text{X A} & \text{Méthode (indirecte) à partir des propriétés de cisaillement (c, } \varphi) \\ k_p p_{le} & \text{X A} & \text{Méthode (directe) à partir du pressiomètre (NF P 94-261)} \\ k_c q_{ce} & \text{X A} & \text{Méthode (directe) à partir du pénétromètre statique (NF P 94-261)} \end{cases}$$

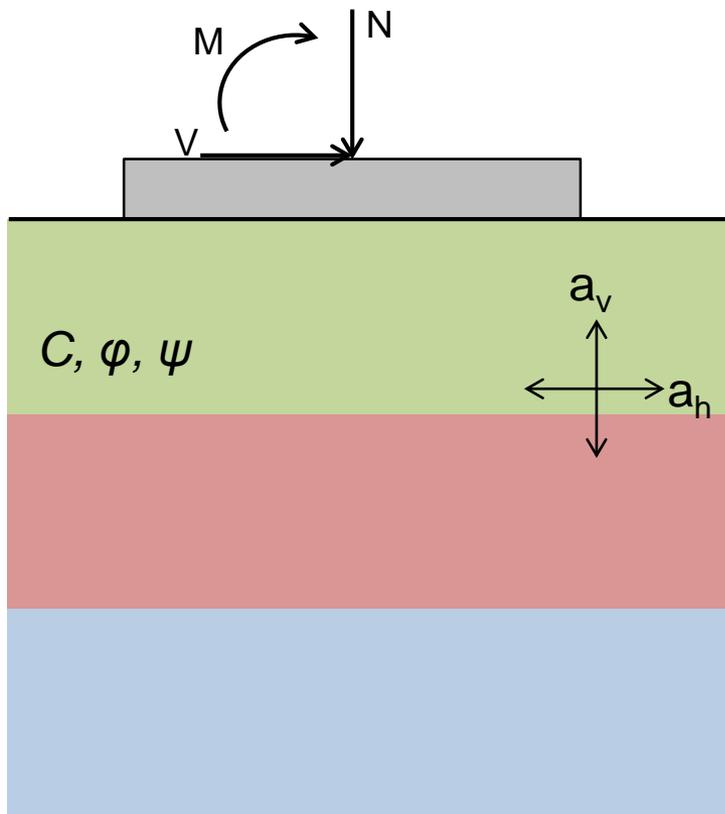
Effets du séisme = réduction de la capacité portante, par :

- Inclinaison de la charge (efforts d'inertie horizontaux dans la structure)
- Excentrement de la charge (efforts d'inertie appliqués à une hauteur)
- Forces d'inertie dans le sol

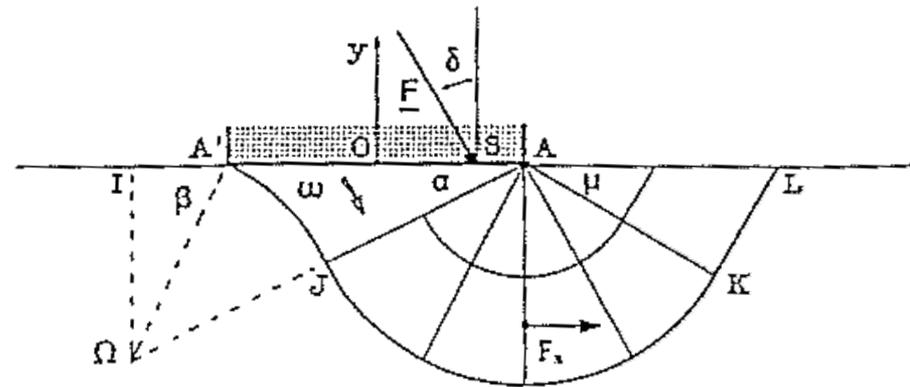
Effets du séisme

- Diagrammes d'interaction : enveloppe des efforts (N, V, M) admissibles

Méthodes numériques



Méthodes analytiques



(Pecker 1997)

Eurocode 8 – Partie 5

Instabilité par perte de portance

Méthode pseudo statique

- **Annexe F de l'Eurocode 8 – Partie 5 (Pecker 1997)**

$$f(\bar{V}, \bar{N}, \bar{M}, \bar{F}) = \frac{(1 - e\bar{F})^{c_T} (\beta\bar{V})^{c_T}}{\bar{N}^a \left[(1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N} \right]^b} + \frac{(1 - f\bar{F})^{c_M} (\gamma\bar{M})^{c_M}}{\bar{N}^c \left[(1 - m\bar{F}^k)^{k'} - \bar{N} \right]^d} - 1 \leq 0$$

$$\bar{V} = \frac{\gamma_{Rd} V}{N_{\max}} \quad \bar{N} = \frac{\gamma_{Rd} N}{N_{\max}} \quad \bar{M} = \frac{\gamma_{Rd} M}{B N_{\max}}$$

$$\bar{F} = \begin{cases} \bar{F} = \frac{\rho a_h S B}{c} & \text{sol purement cohérent} \\ \bar{F} = \frac{a_h}{g \tan(\varphi)} & \text{sol purement frottant} \end{cases}$$

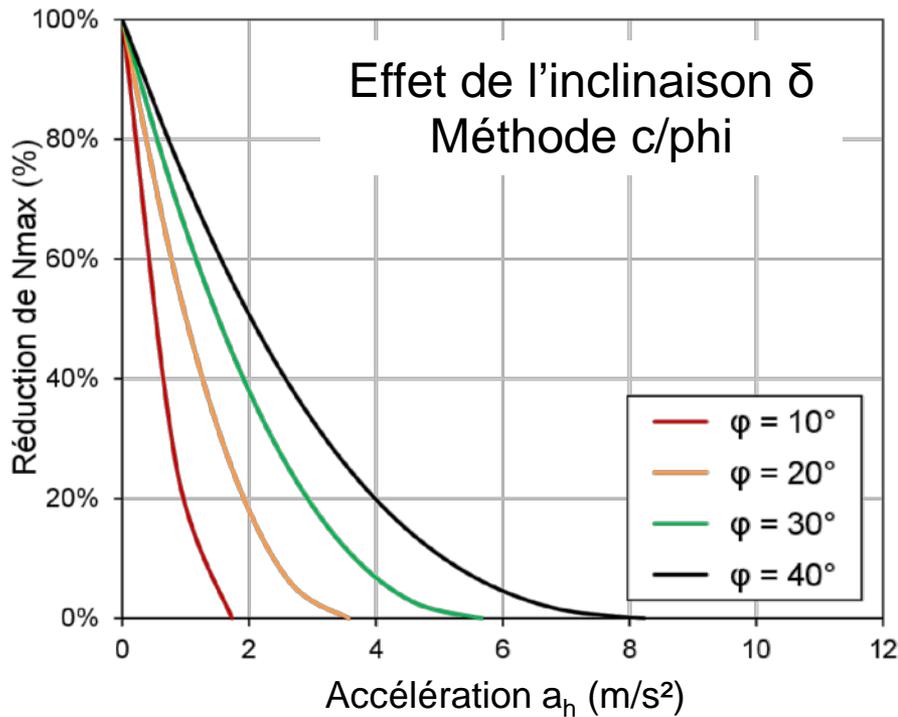
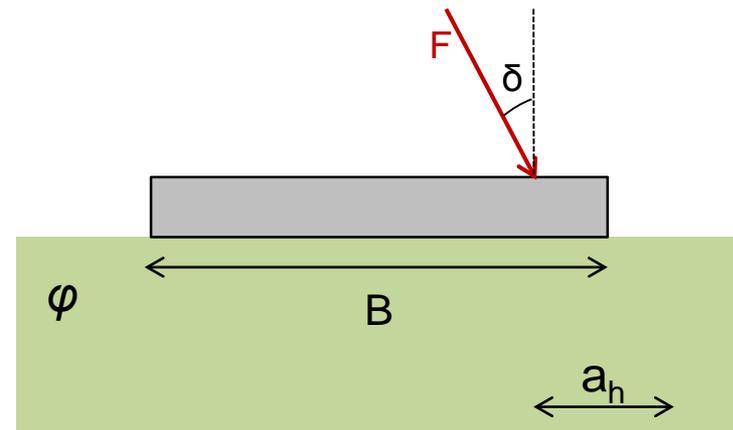
(Forces d'inertie)

a_h est l'accélération du sol

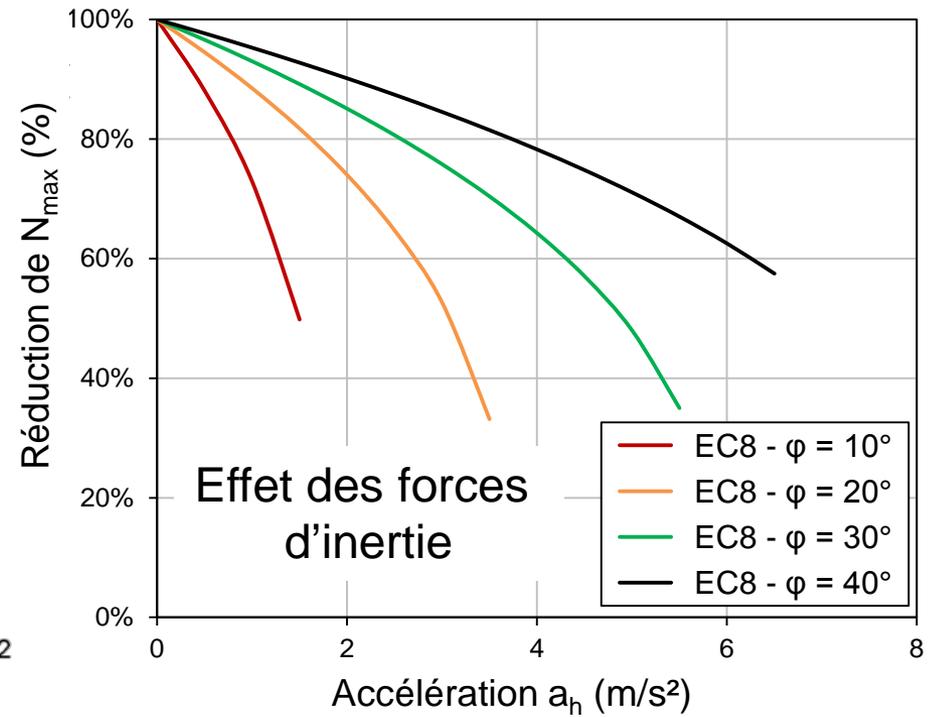
	Sol purement cohérent	Sol purement frottant
a	0,7	0,92
b	1,29	1,25
c	2,14	0,92
d	1,81	1,25
e	0,21	0,41
f	0,44	0,32
m	0,21	0,96
k	1,22	1
k'	1	0,39
Ct	2	1,14
Cm	2	1,01
Cm'	1	1,01
β	2,57	2,9
γ	1,85	2,8

Effets du séisme

- Sol purement frottant

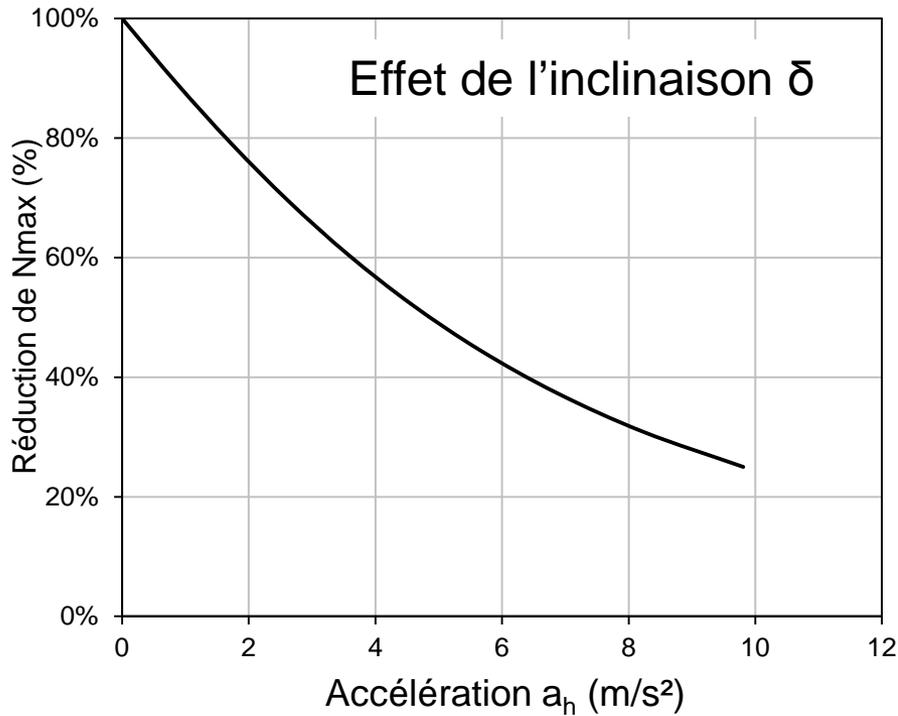
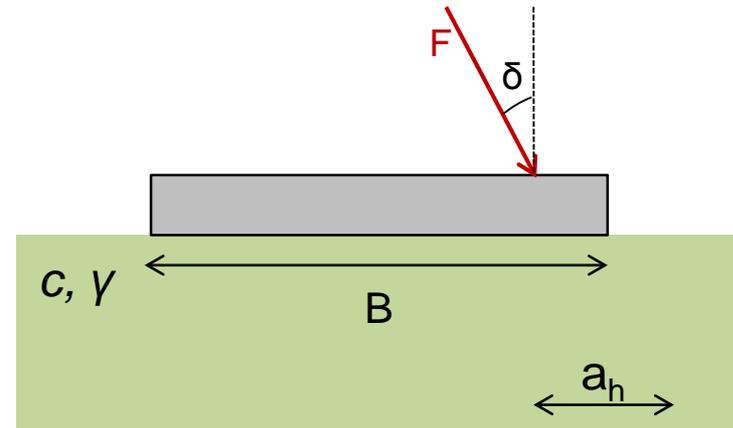


Pour $\delta = \text{atan}(a_h/g)$

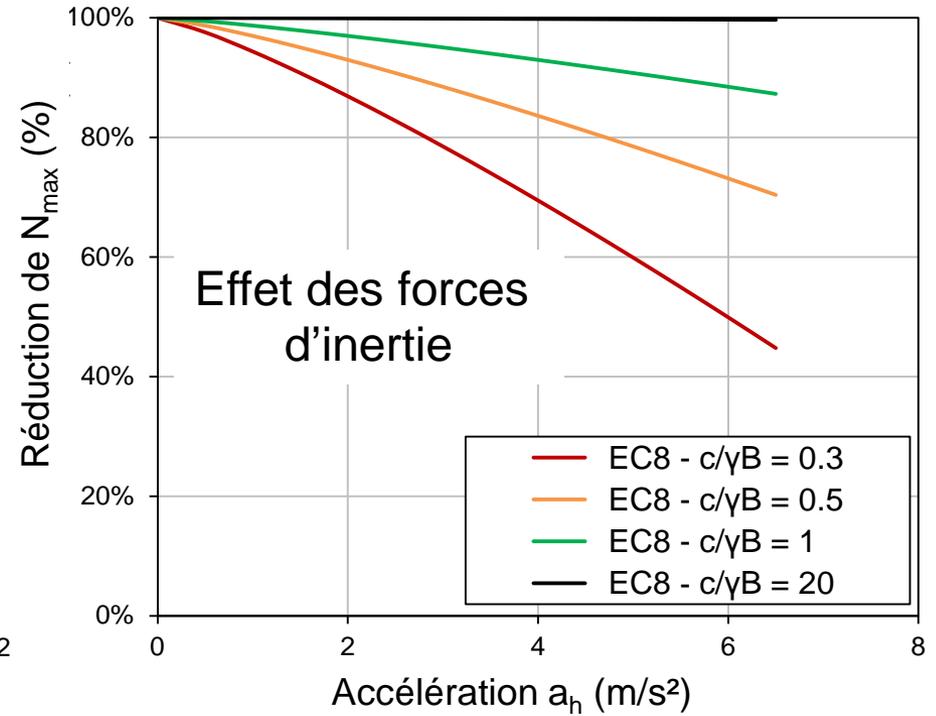


Effets du séisme

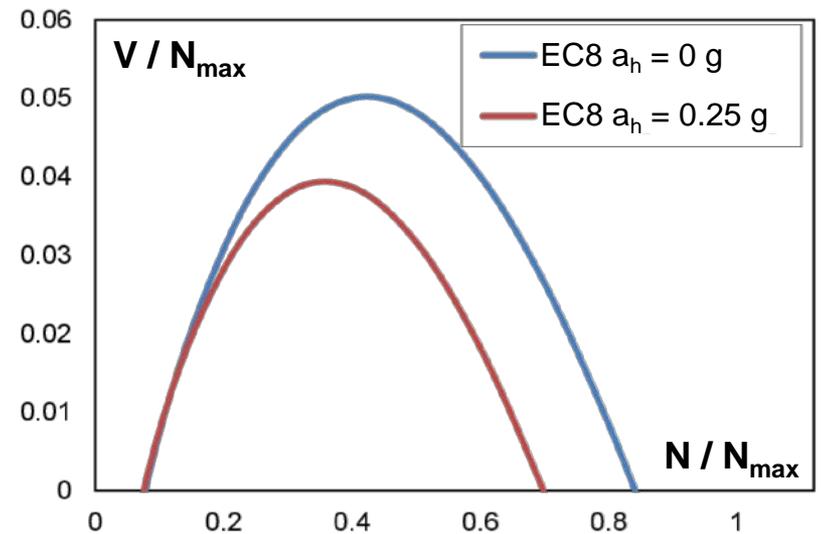
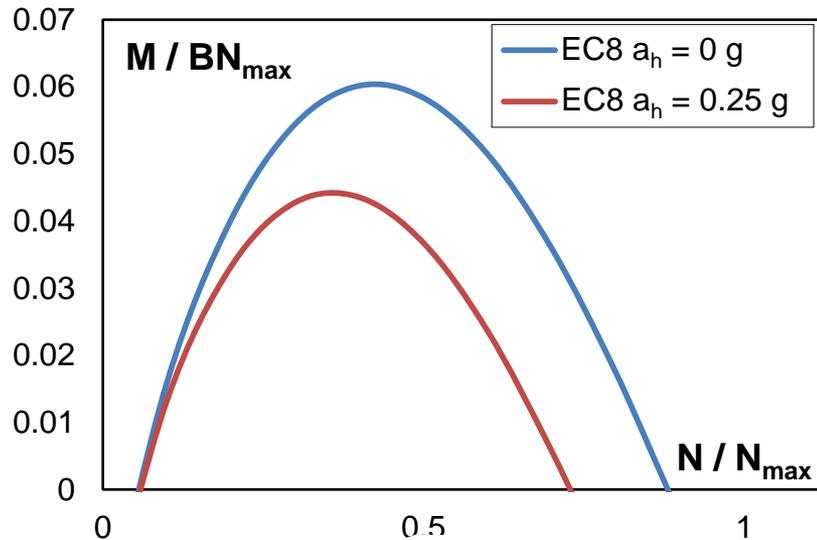
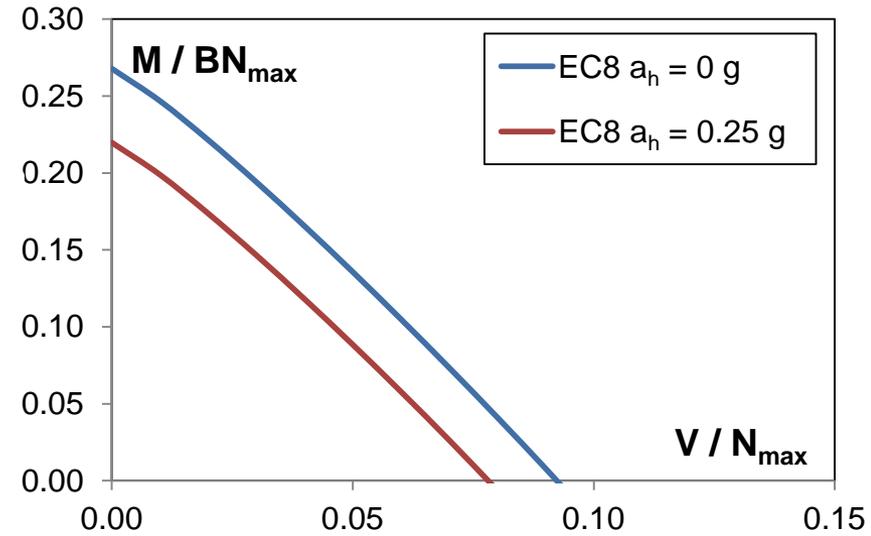
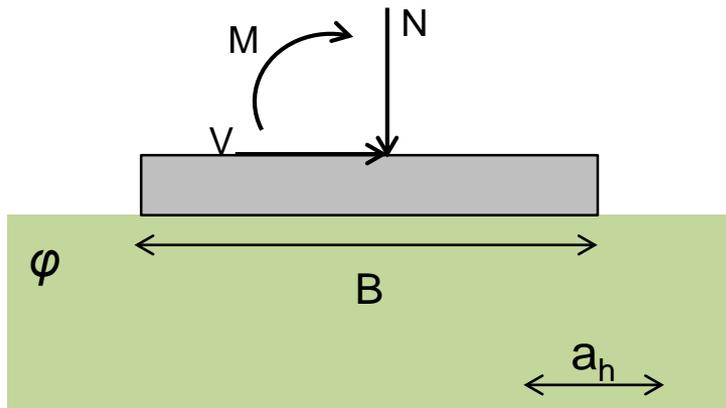
- Sol purement cohérent



Pour $\delta = \text{atan}(a_h/g)$



Instabilité par perte de portance – Effets du séisme



Instabilité « géométrique »

Glissement

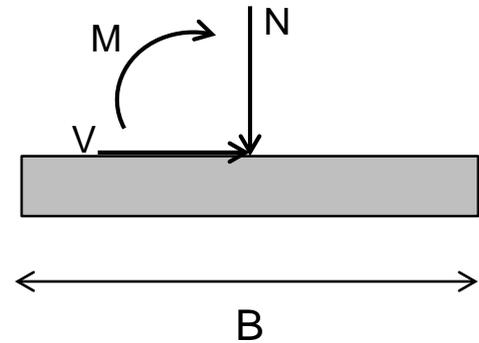
Justification de l'effort horizontal par rapport à l'effort vertical

$$V \leq \frac{N \tan(\delta_d)}{1.25}$$

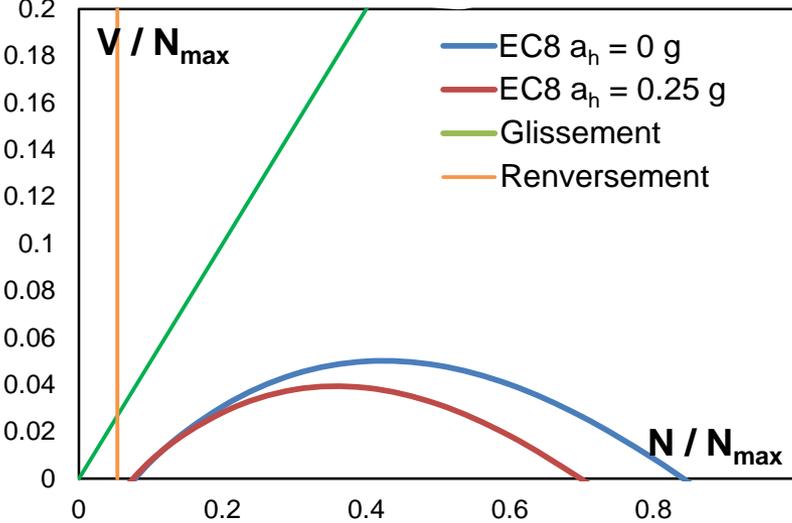
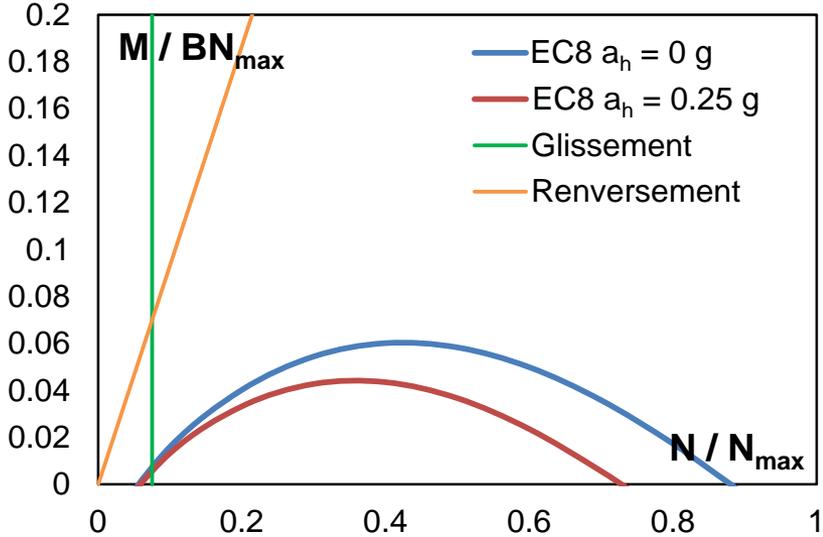
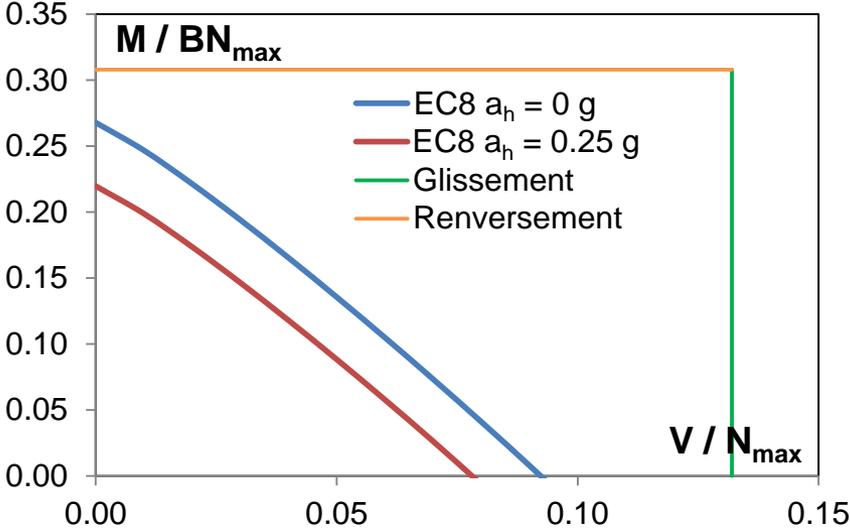
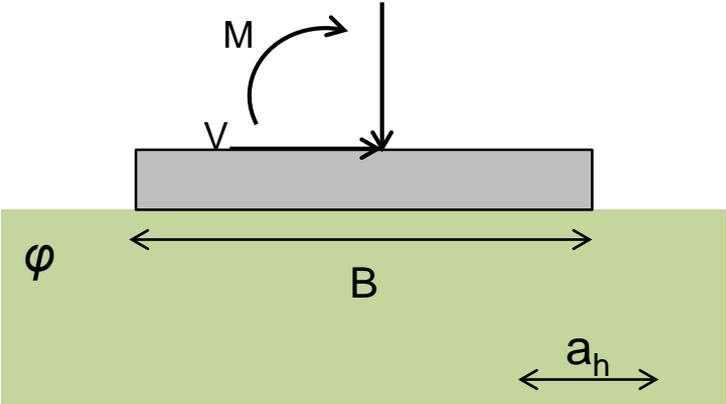
Renversement

- Justification de l'excentricité

$$1 - \frac{2M}{BN} \geq \frac{1}{15}$$



Instabilité sismique

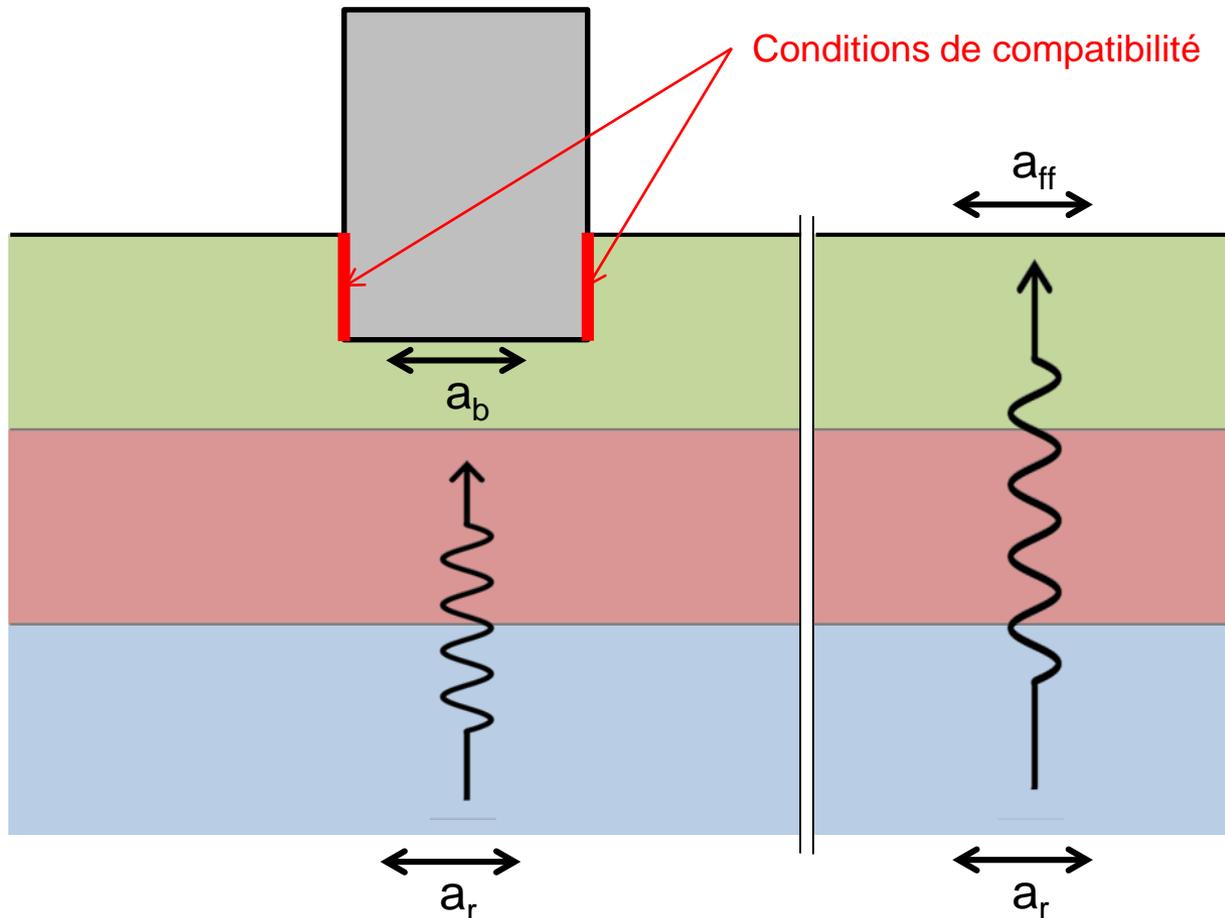


Définition du torseur d'efforts sismique

Avec ou sans effets d'interaction sol structure

Mécanismes d'interaction sol structure

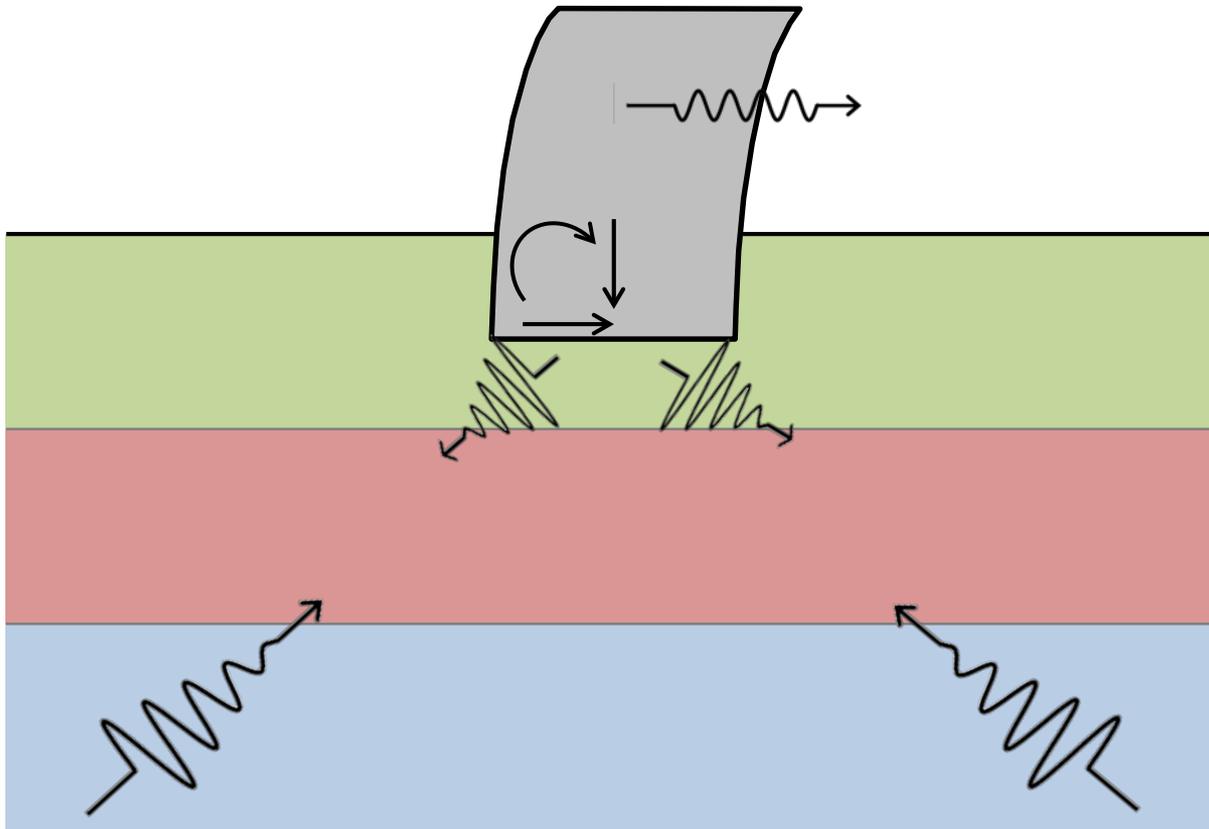
- Interaction cinématique : liée au contraste de rigidités structure/sol
- Interaction inertielle



- Considérée pour les fondations encastrées
- Modification du signal sismique (d'entrée) en présence de l'ouvrage

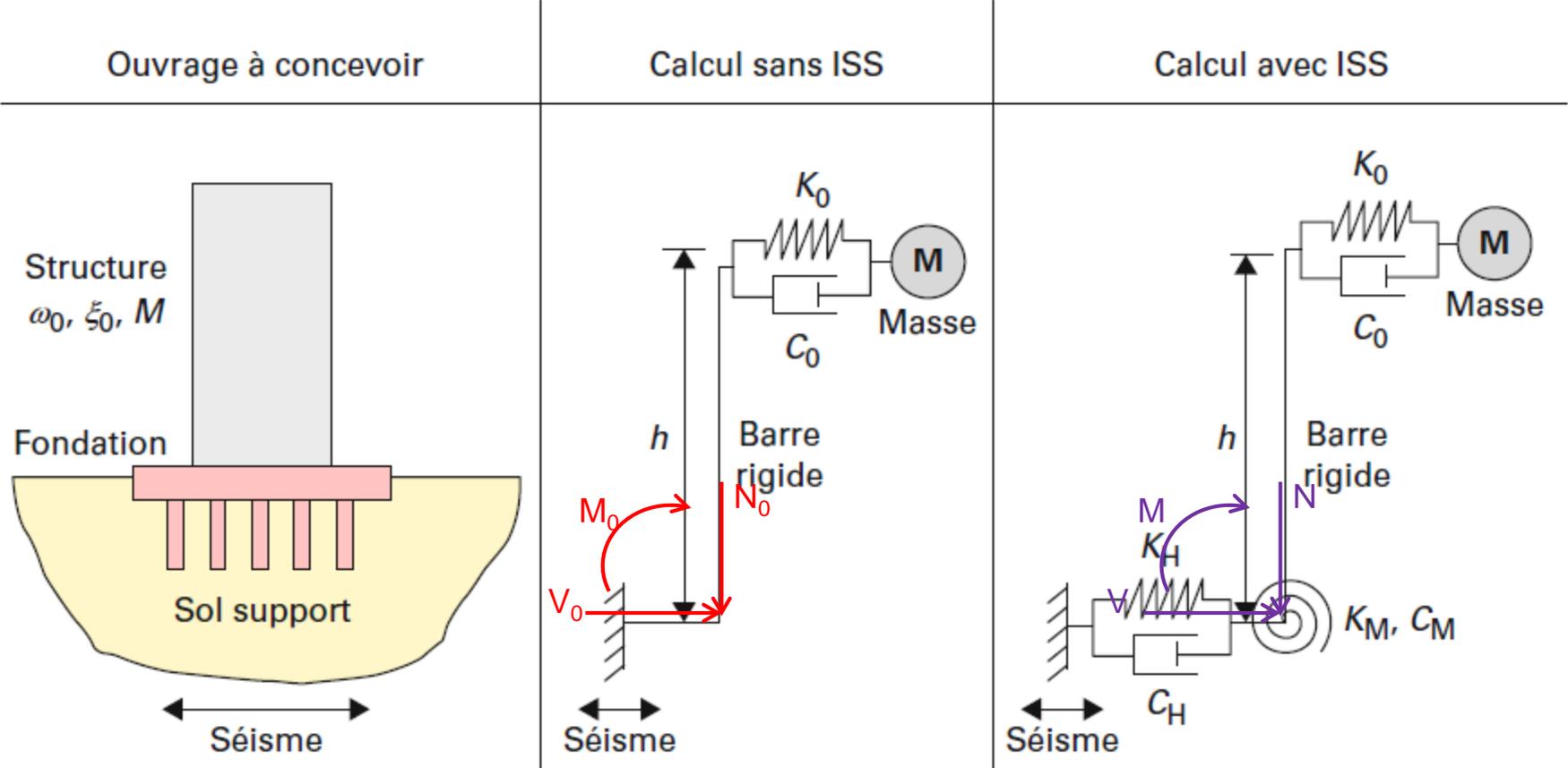
Mécanismes de l'interaction sol structure

- Interaction cinématique
- Interaction inertielle : liée aux forces d'inertie dans la structure



- La structure devient source de vibrations
- Affine le torseur sismique sur la fondation

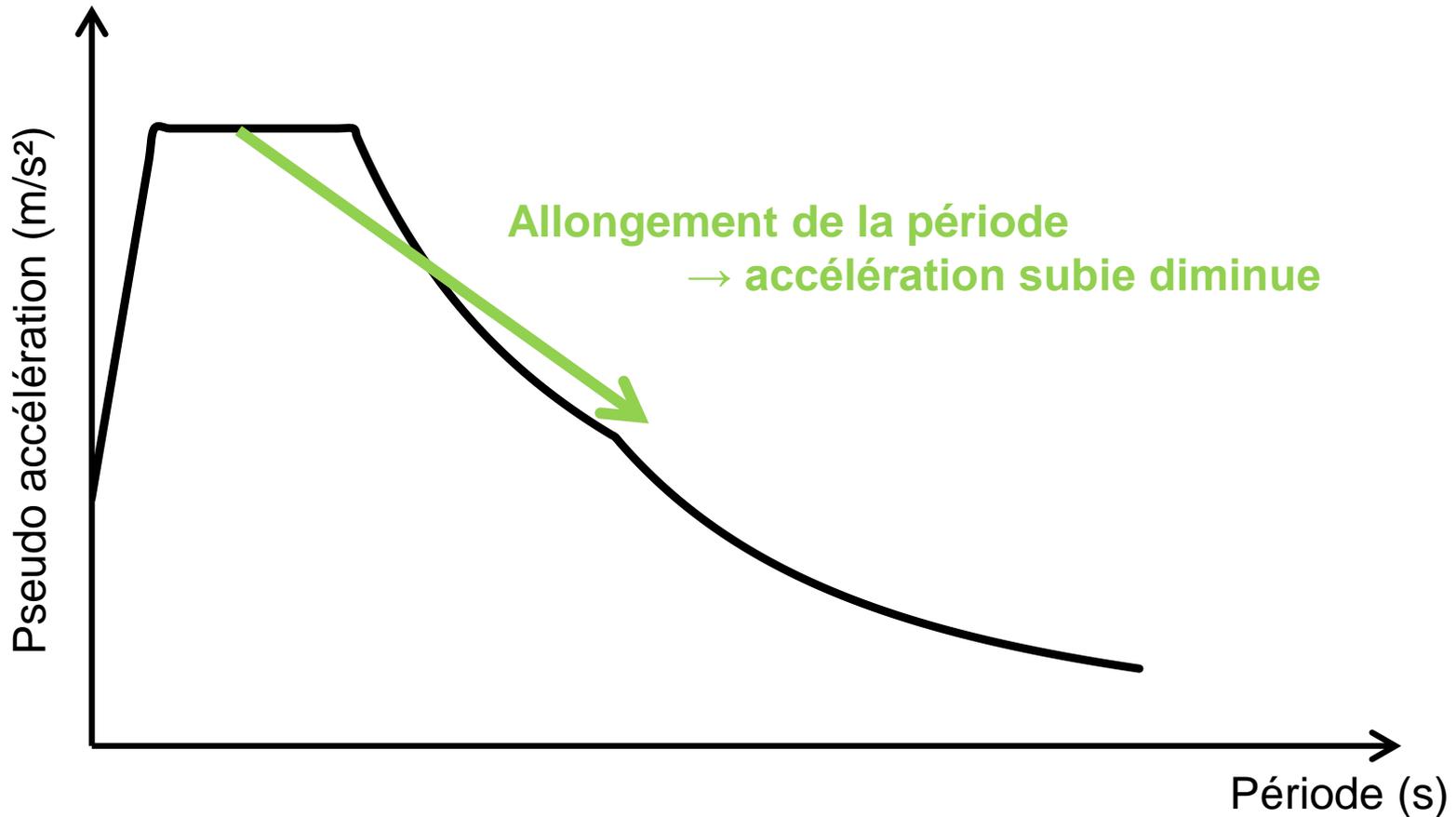
Interaction inertielle



(Cuir et Brulé, 2017)

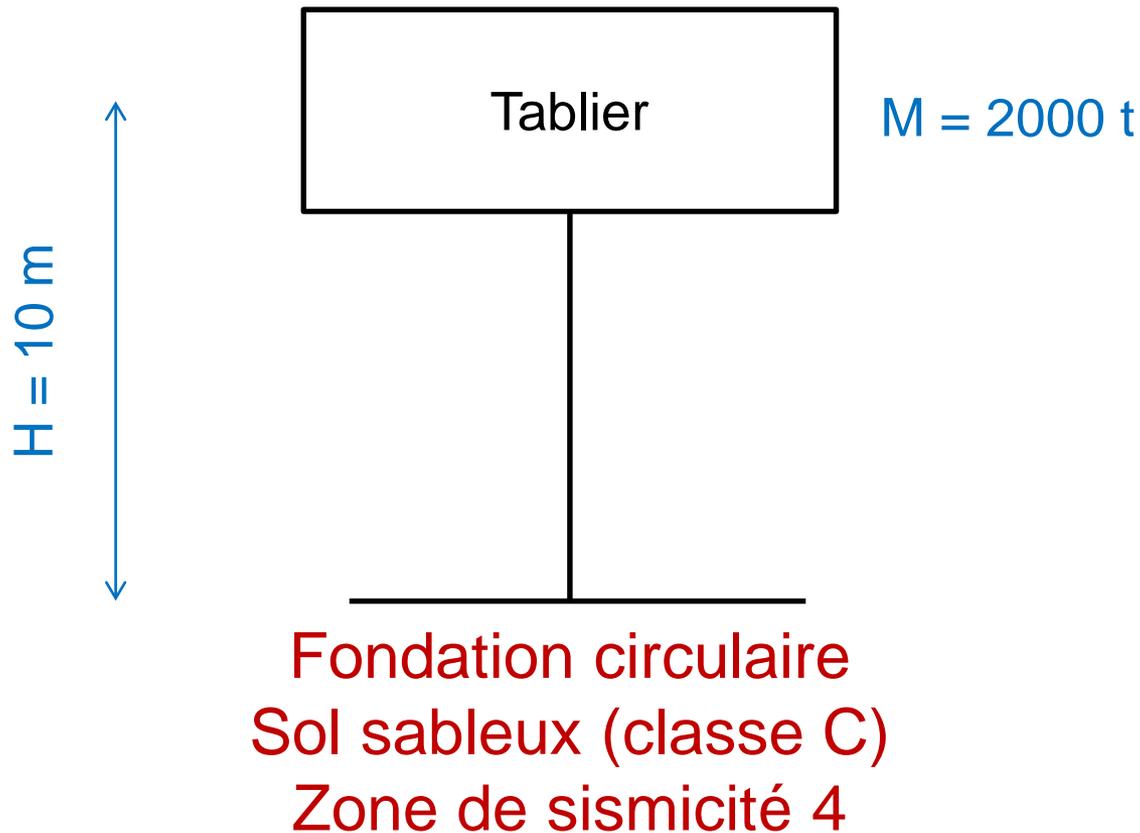
Effets de l'interaction inertielle

- Allongement de la période : bénéfique pour le dimensionnement



Effets de l'interaction inertielle – Exemple

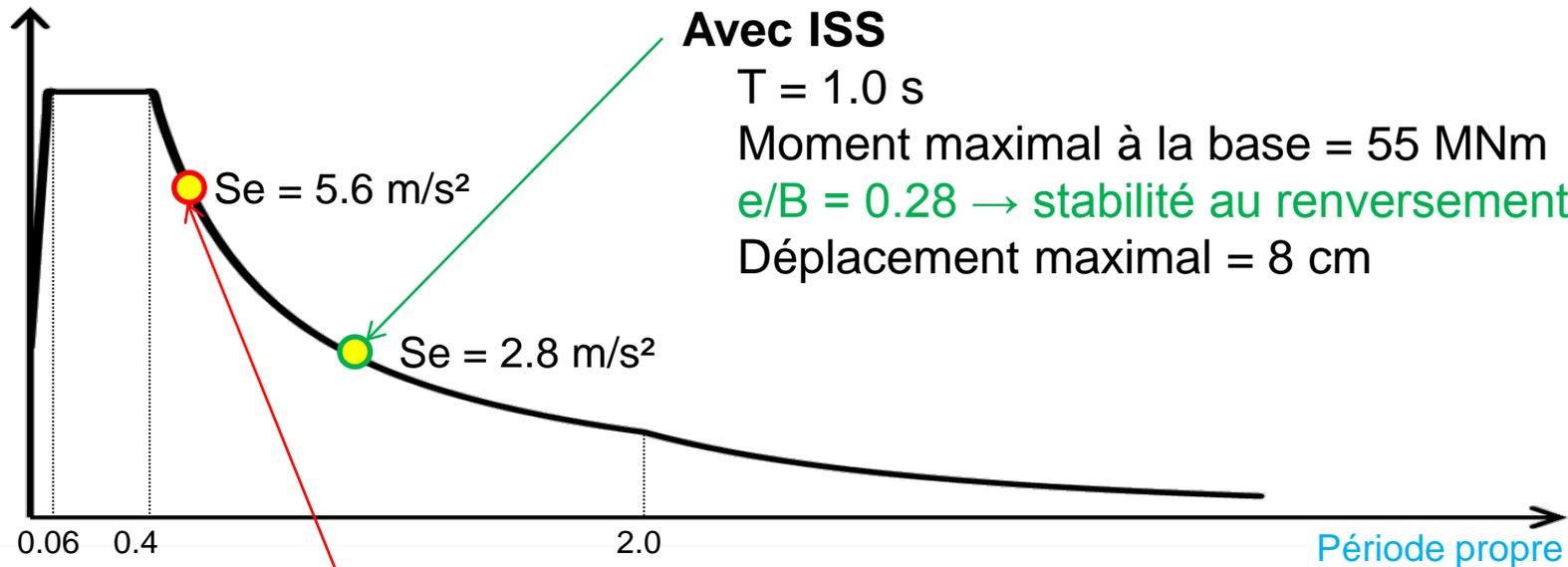
- Exemple : Réponse sismique d'une pile de pont



Effets de l'interaction inertielle – Exemple

- Spectre de réponse

Pseudo accélération



Avec ISS

$T = 1.0 \text{ s}$

Moment maximal à la base = 55 MNm

$e/B = 0.28 \rightarrow$ stabilité au renversement assurée

Déplacement maximal = 8 cm

Sans ISS (base encastrée)

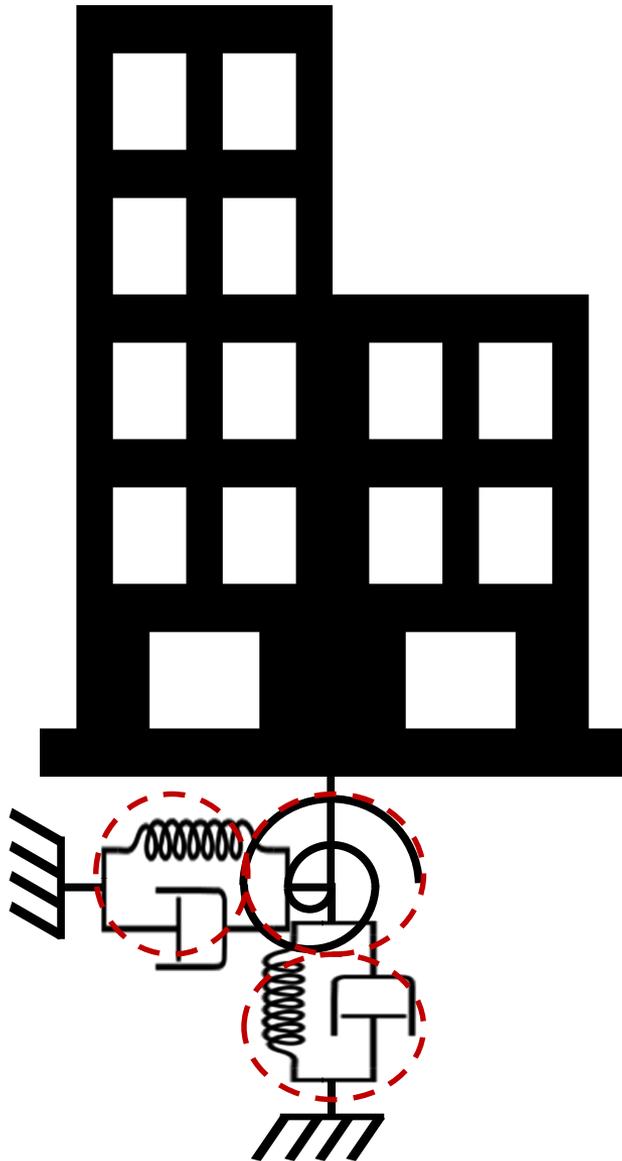
$T_0 = 0.5 \text{ s}$

Moment maximal à la base = 110 MNm

$e/B = 0.56 \rightarrow$ pas de stabilité au renversement

Déplacement maximal = 2 cm

Calcul des raideurs



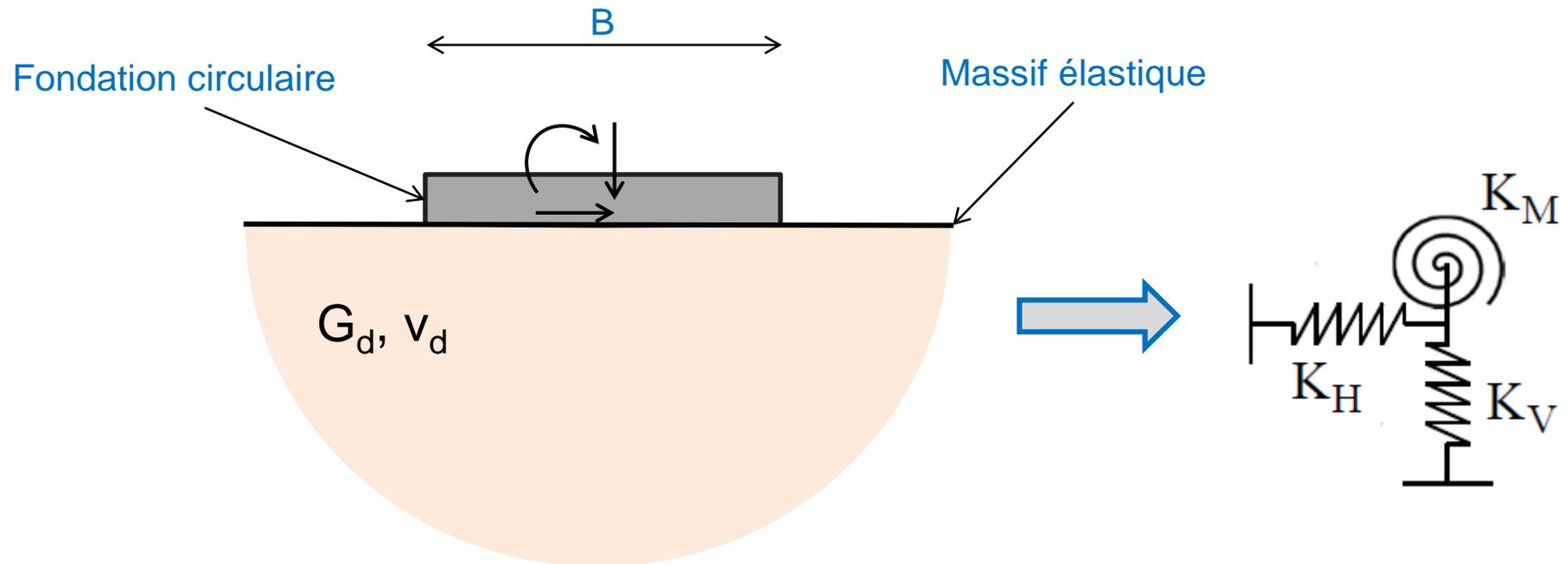
$$K_V = ? \quad K_H = ? \quad K_M = ?$$

- Approche pseudo statique ou approche dynamique (fonctions d'impédance)
- Solutions analytiques, solutions numériques, modèles hybrides ...

Calcul de raideurs

Solutions pseudo statiques

- Solutions basées sur la théorie d'élasticité
- Utilisation des propriétés G_d , v_d « dynamiques » (faibles déformations)

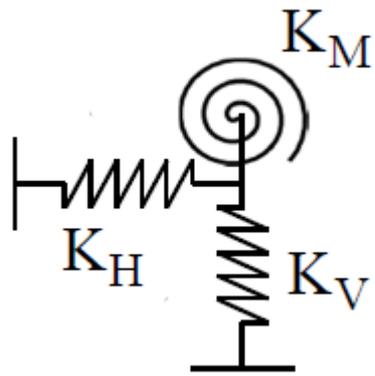


- Expressions analytiques pour K_H , K_V et K_M

Calcul de raideurs

Solutions analytiques

Fondations circulaires



$$K_H = \frac{4B}{2-\nu_d} G_d$$

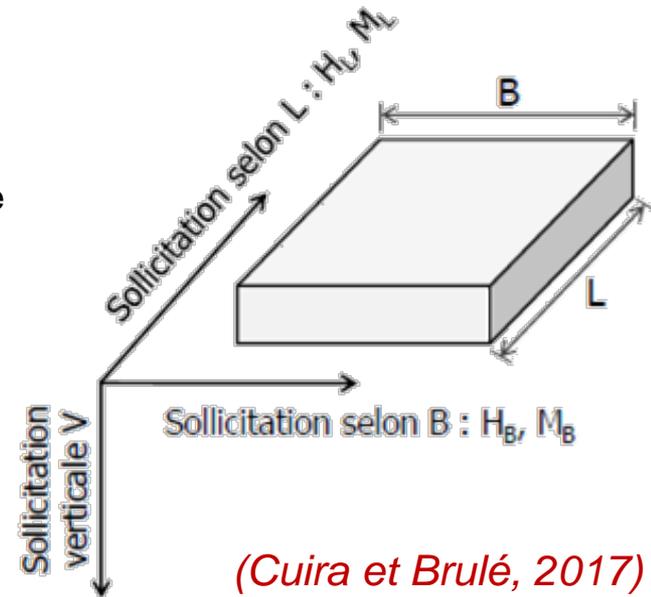
$$K_V = \frac{2B}{1-\nu_d} G_d$$

$$K_M = \frac{B^3}{3(1-\nu_d)} G_d$$

Adaptation aux fondations rectangulaires

$$K_{\text{rectangle}} = C_f K_{\text{cercle}}$$

$$C_f = k_1 \frac{L}{B} + k_2 \left(\frac{L}{B} \right)^k$$



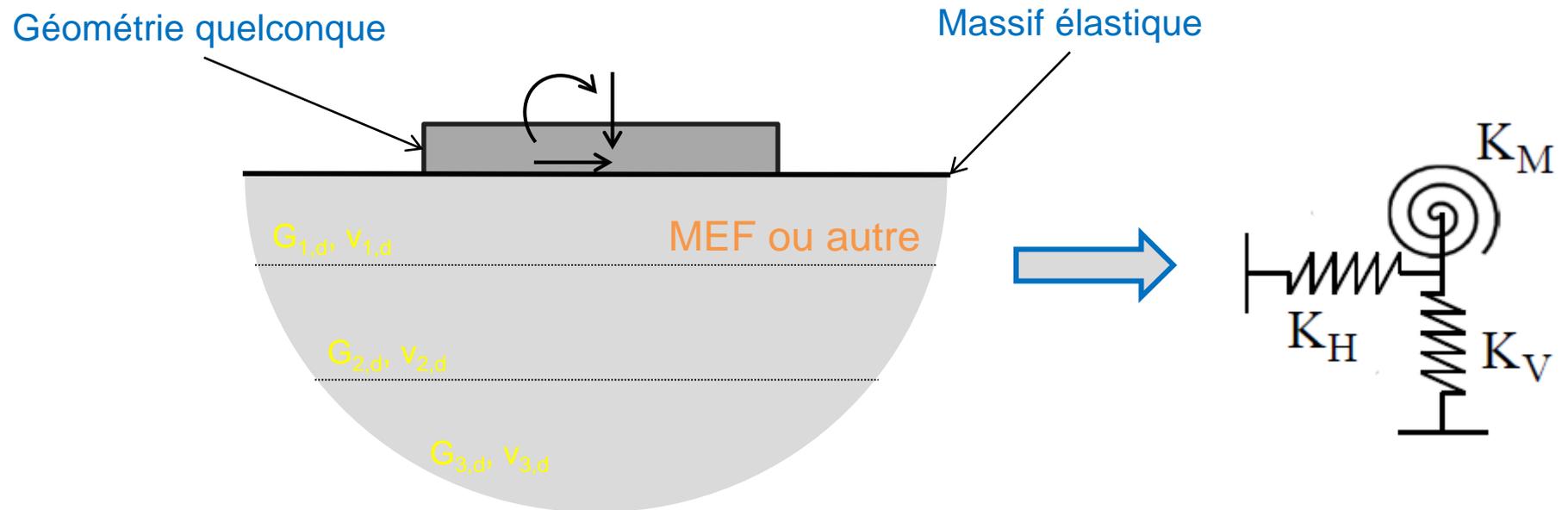
(Caira et Brulé, 2017)

Terme de raideur	k_1	k_2	k
Raideur verticale	0.37	0.77	0.25
Raideur horizontale selon B	0.50	0.63	0.15
Raideur horizontale selon L	0.37	0.77	0.25
Raideur en rotation selon B	1.12	0.23	0
Raideur en rotation selon L	0	1.40	2.40

Calcul de raideurs

Solutions numériques

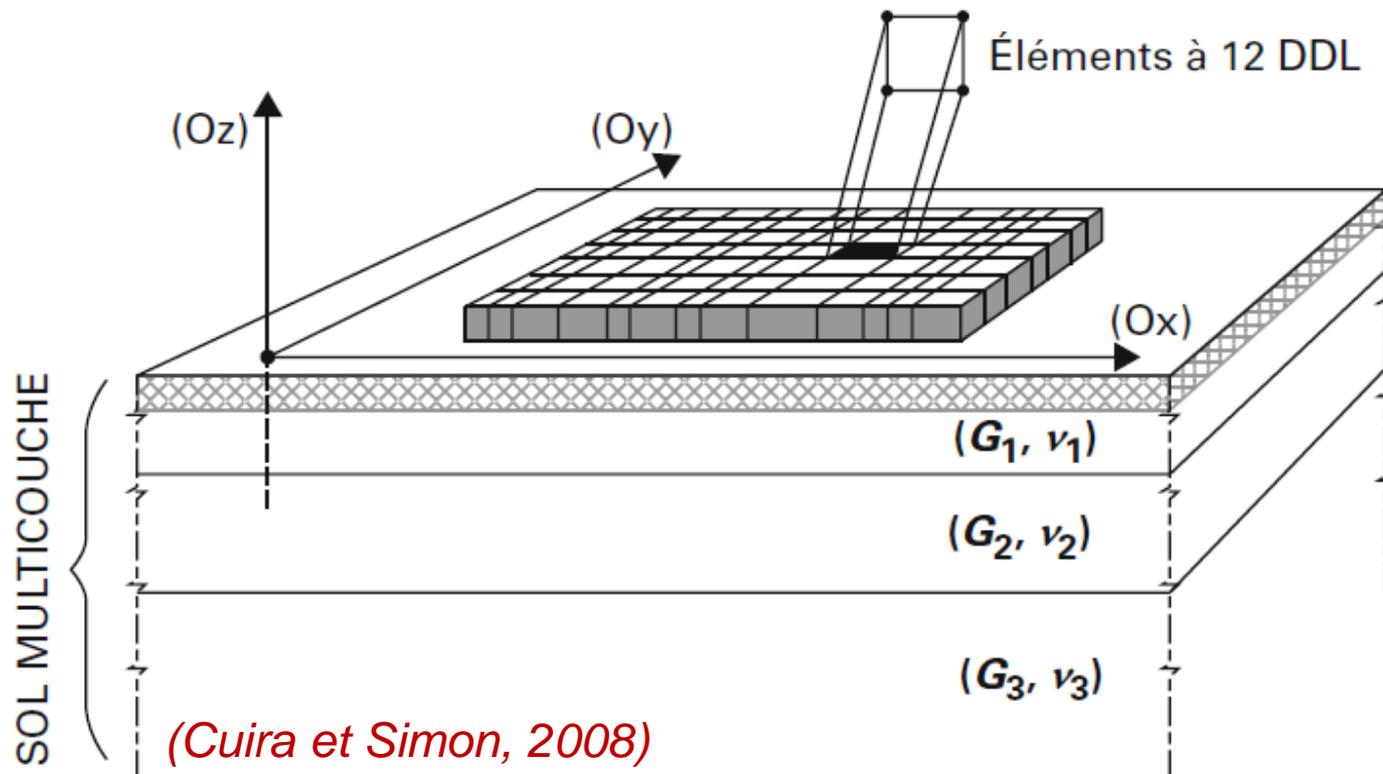
- Modélisation directe du massif sous la fondation
- Utilisation des propriétés G_d , v_d « dynamiques »



Calcul de raideurs

Méthodes hybrides : exemple du modèle Tasplaq

- Maillage numérique de l'élément de fondation (éléments de plaque)
- Solutions analytiques (Mindlin) pour le sol support (multicouche élastique)



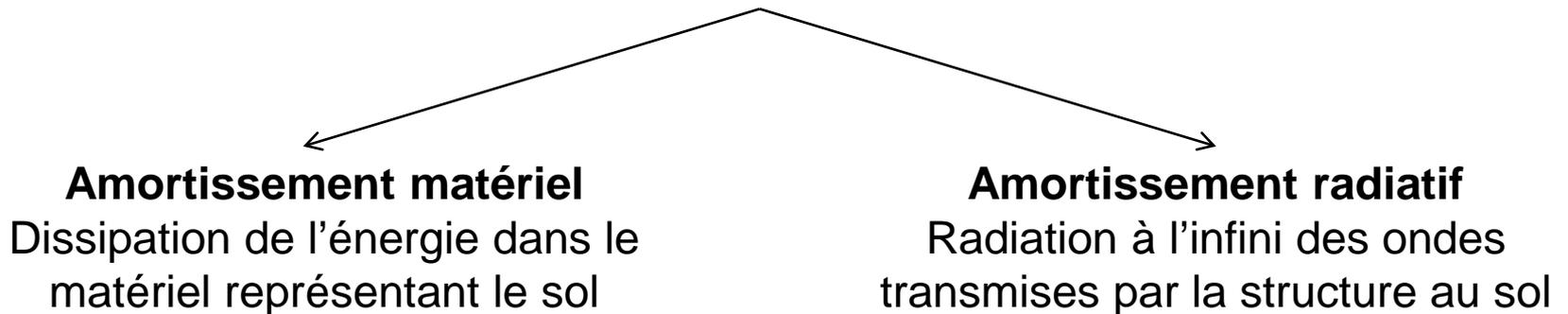
Effets fréquentiels

- **Effet de masse**

Modification de la raideur apparente en fonction de la fréquence de la sollicitation

- **Effet d'amortissement**

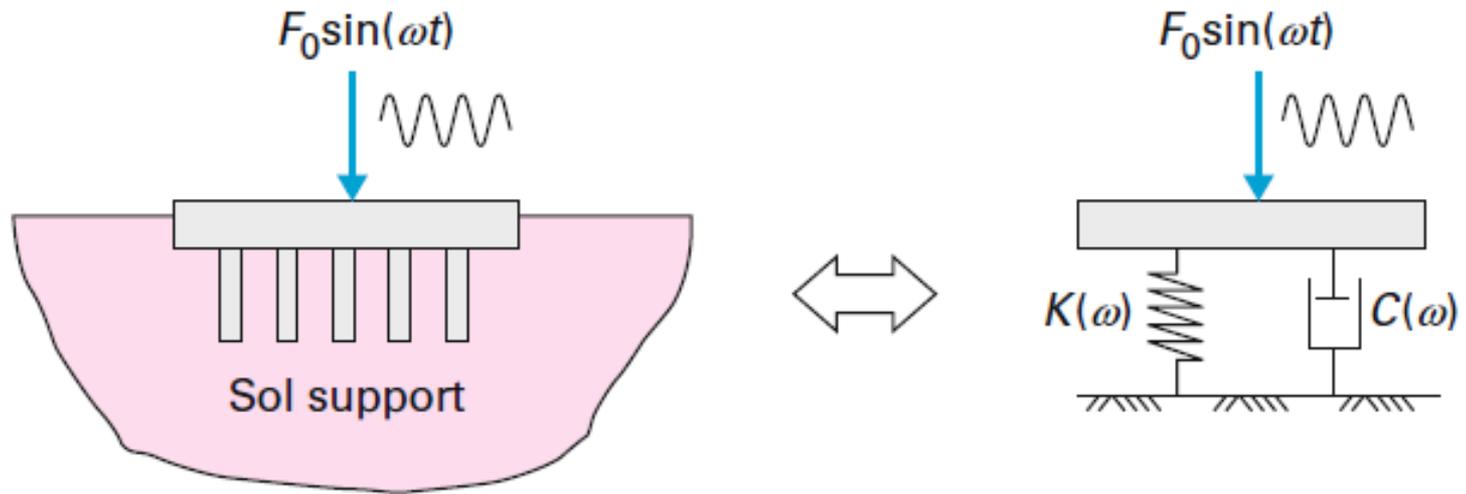
Dissipation (effective ou apparente) de l'énergie de déformation



Modèle analogique :

- Ressort $k(\omega)$
- Amortisseur $C(\omega)$

Fonctions d'impédances



(Caira et Brulé, 2017)

$$F(t) = Z(\omega) \cdot u(t)$$
$$Z(\omega) = K(\omega) + i\omega C(\omega)$$

- Solutions analytiques, modèles hybrides ...

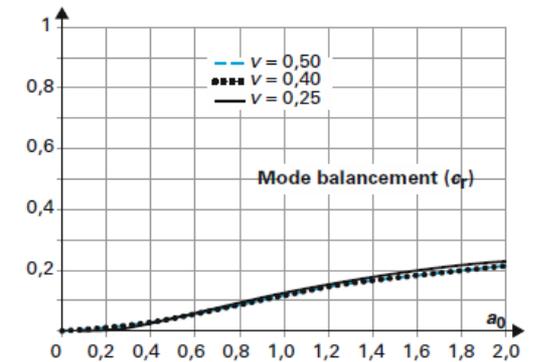
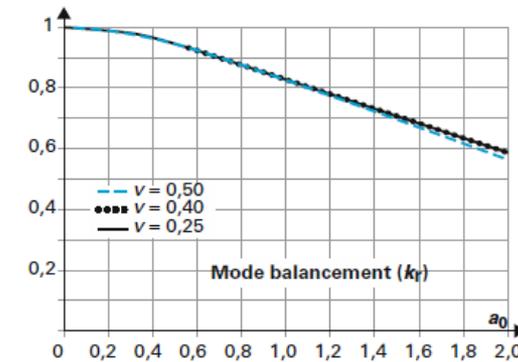
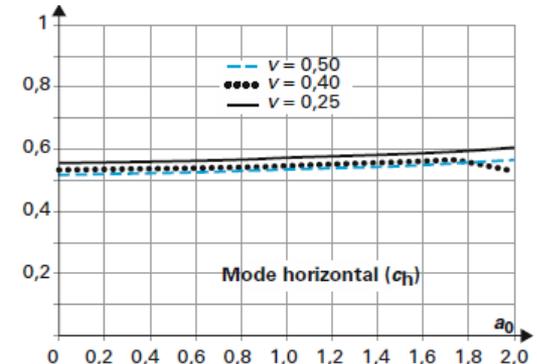
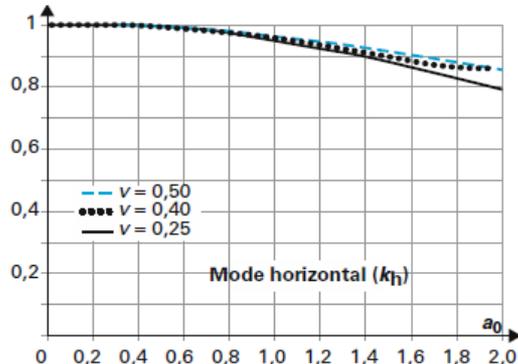
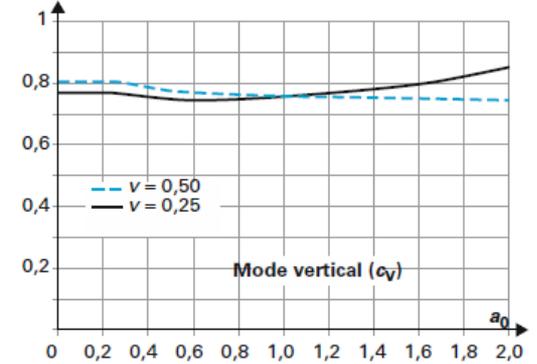
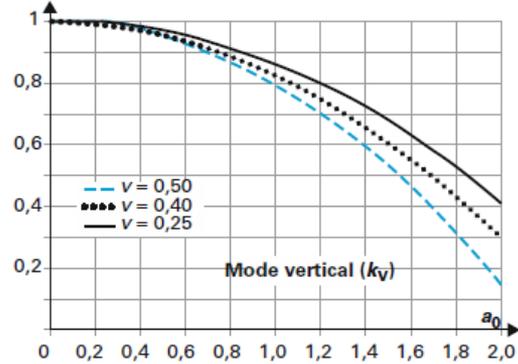
Fonctions d'impédance dynamiques

Solutions analytiques
(Deleuze 1967)

$$Z(\omega) = K(\omega) + i\omega C(\omega)$$

$$= K_{\text{stat}} (k + ia_0c)$$

$$a_0 = \frac{\omega B}{2V_s}$$

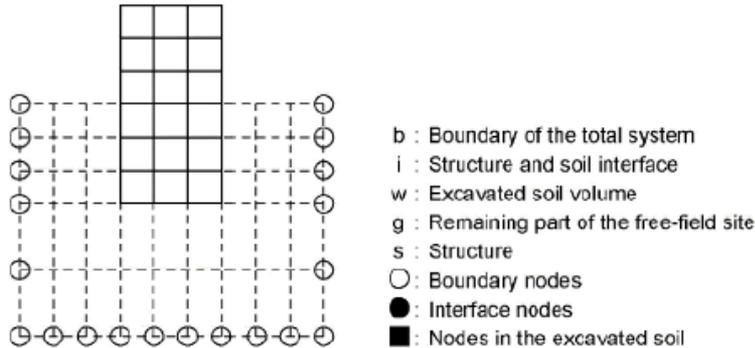


$k(a_0)$

$a_0c(a_0)$

Fonctions d'impédance dynamiques

Solutions hybrides



(a) Total System

Méthode de sous structuration

Superposition de trois réponses

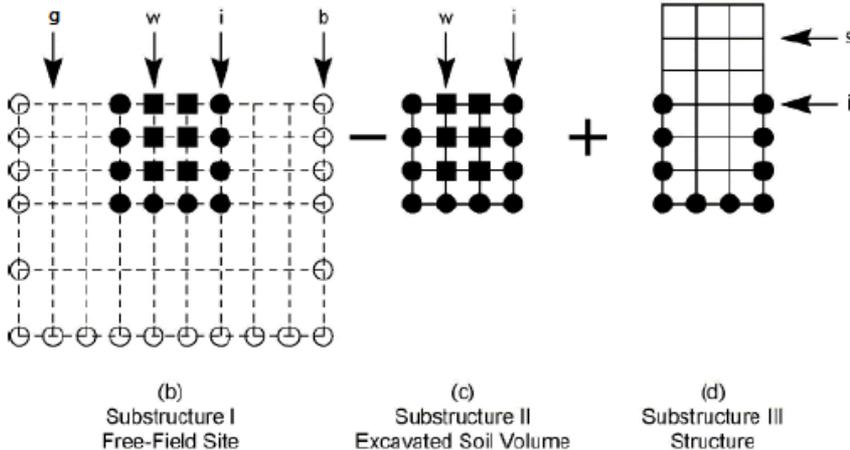
(b) Sol sans structure (champs libre)

(c) Volume de sol excavé (ou empreinte de la structure)

(d) Structure seule

Exemples :

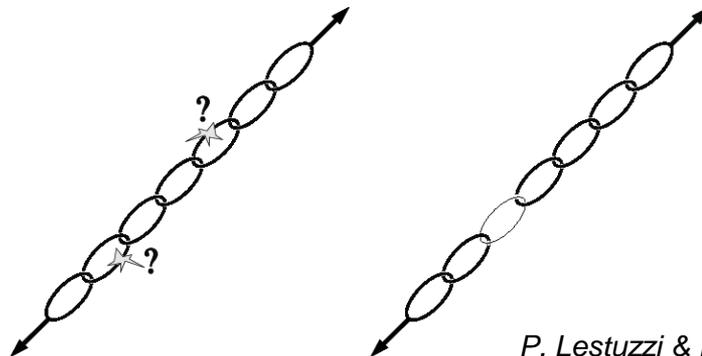
Logiciels SASSI (UC Berkeley) et MISS3D (ECP)



Approche performantielle

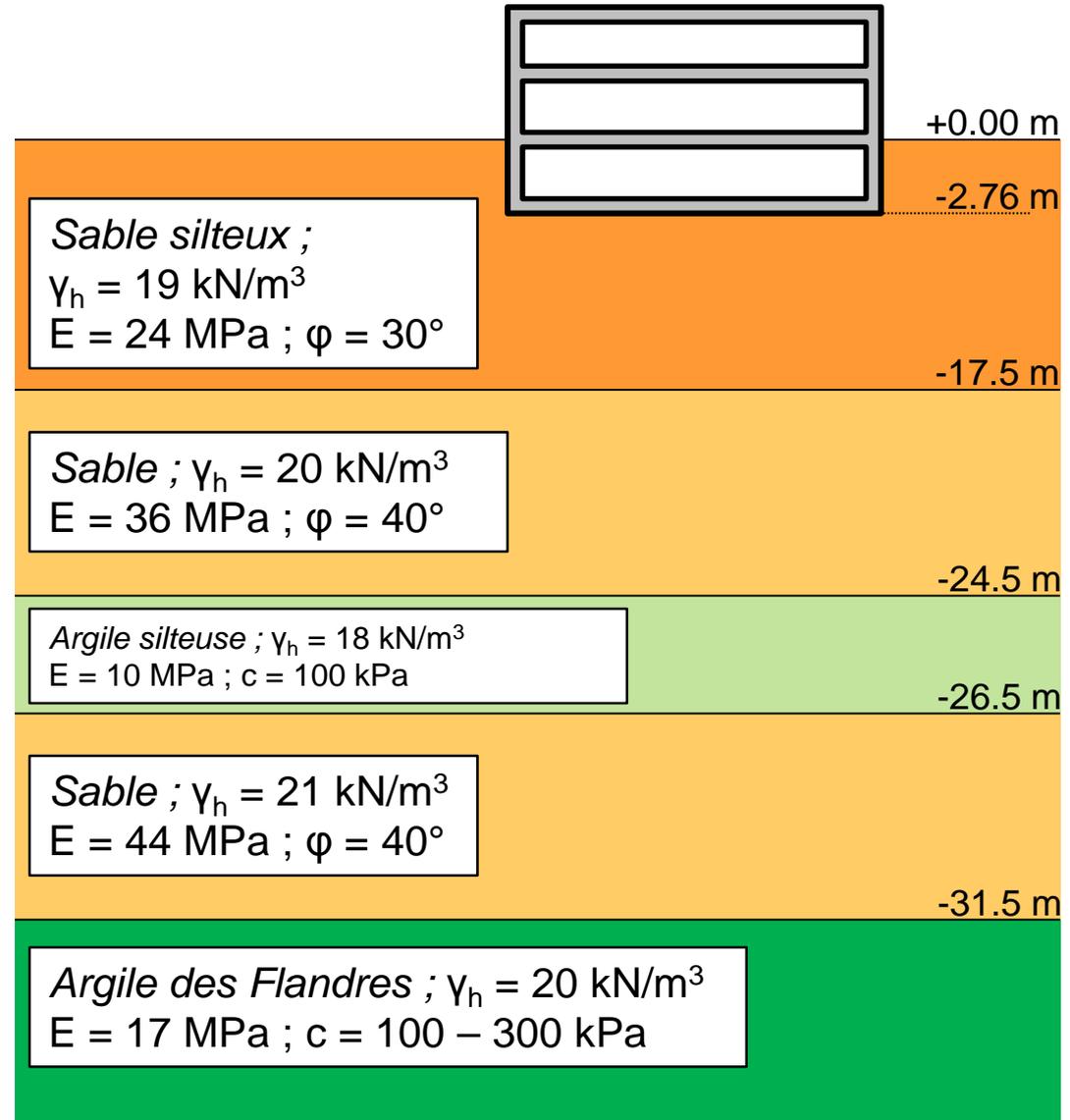
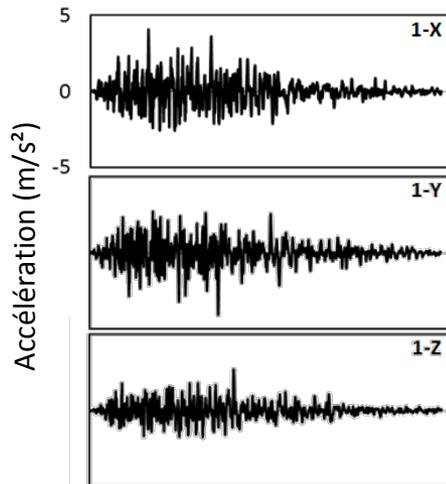
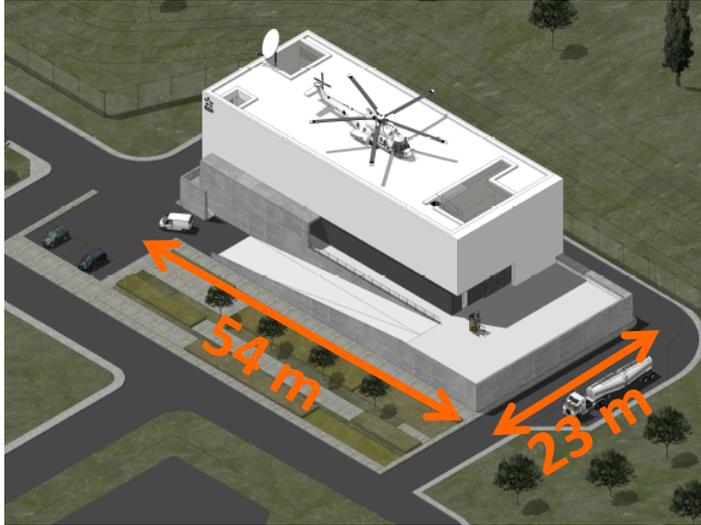
(Performance Based Design)

- **Dimensionner pour répondre à un ensemble d'exigences prédéfini**
 - Non effondrement de la structure
 - Seuil de déplacement (*Pender 2014 – NF P94-261*)
 - Déplacement horizontal < Déplacement sous séisme
 - Déplacement vertical ~ 5 cm
 - Déplacement vertical sous séisme < moitié du tassement statique
 - Distorsion < 1/150
 - Forcer des rotules plastiques à des endroits spécifiques

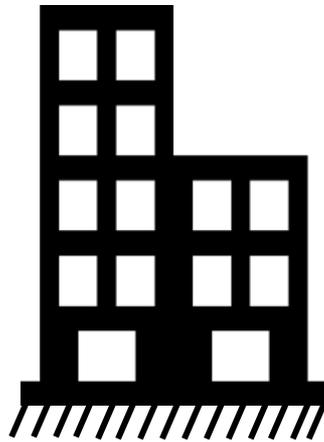


P. Lestuzzi & M. Badoux, 2008

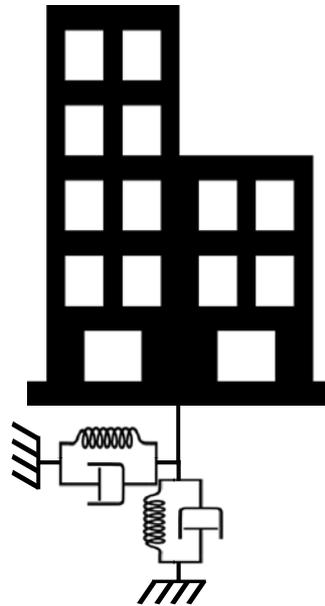
Prise en compte des effets non linéaires de l'ISS



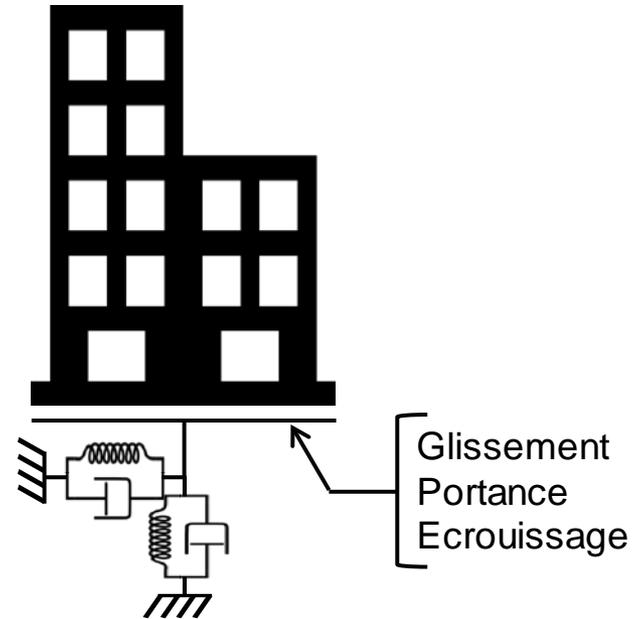
Prise en compte des effets non linéaires de l'ISS



Base fixe



ISS linéaire

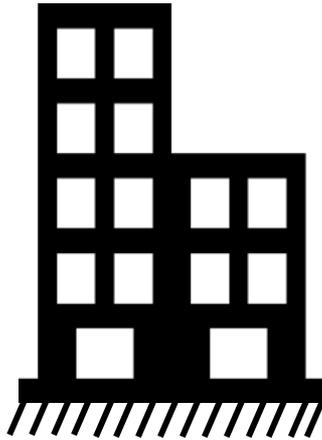


ISS non linéaire
+ Glissement
+ Portance
+ Ecroûssage

Variation temporelle de :

- l'effort horizontal à la fondation,
- déplacement horizontal de la fondation,
- et du déplacement vertical sous séisme de la fondation

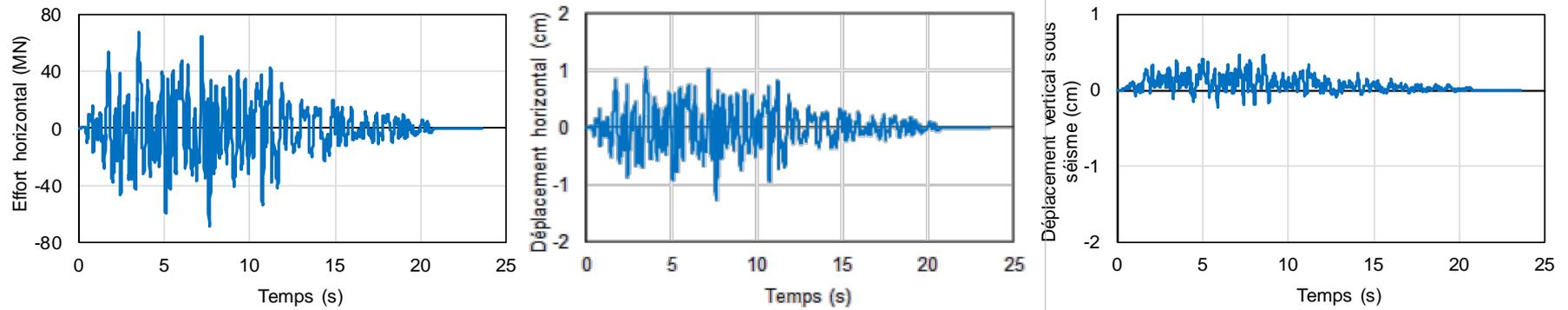
Influence sur les coefficients de sécurité



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

Influence sur les coefficients de sécurité

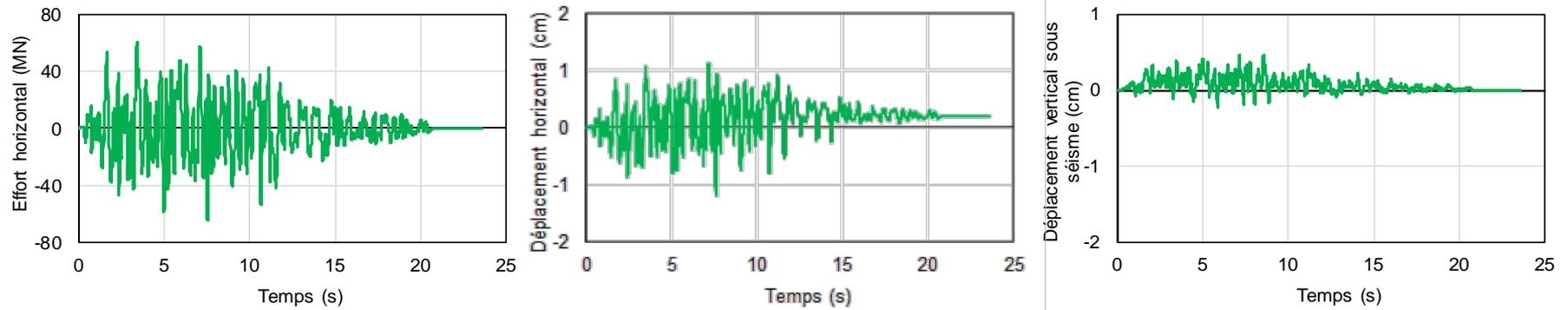
ISS Linéaire



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

Influence sur les coefficients de sécurité

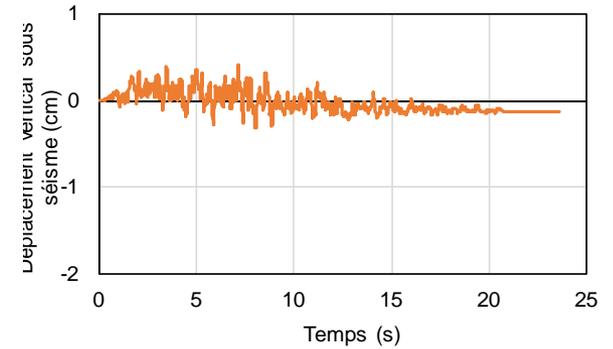
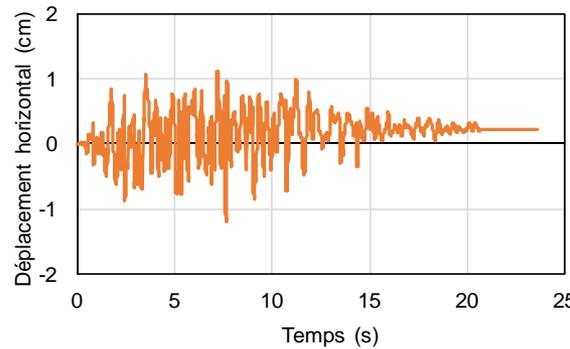
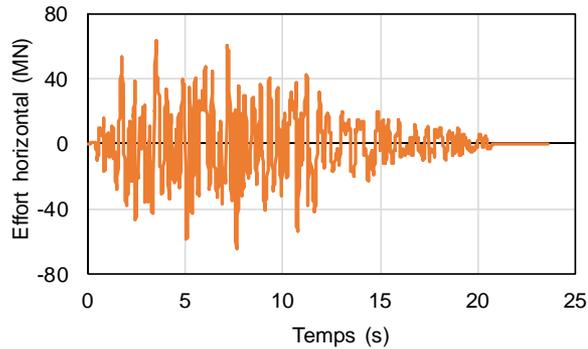
ISS NL + Glissement



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

Influence sur les coefficients de sécurité

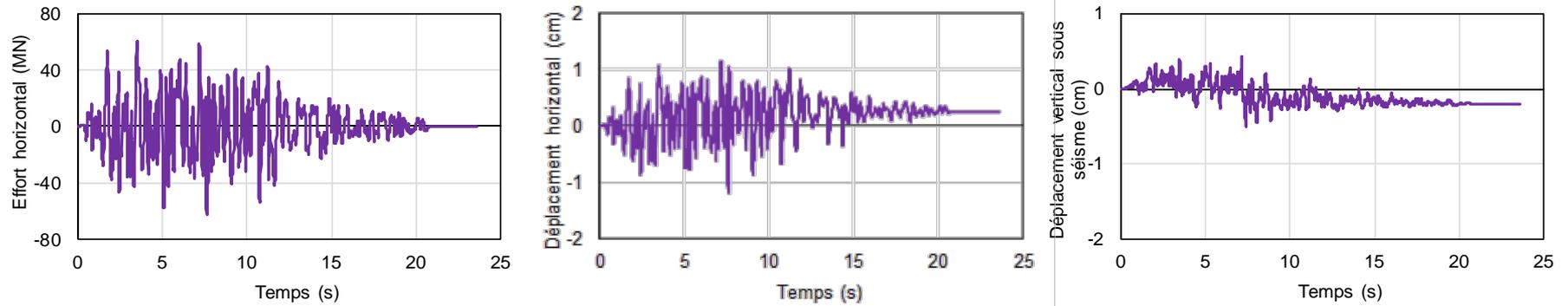
ISS NL + Portance



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	0,10

Influence sur les coefficients de sécurité

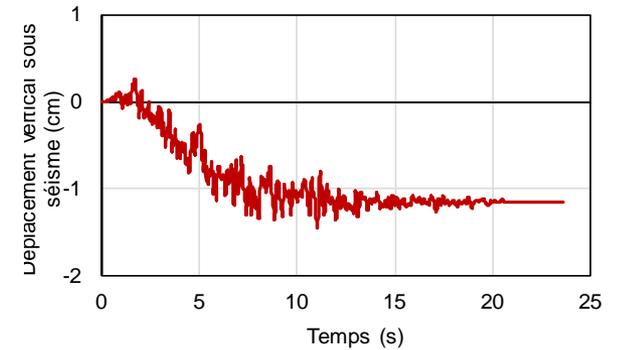
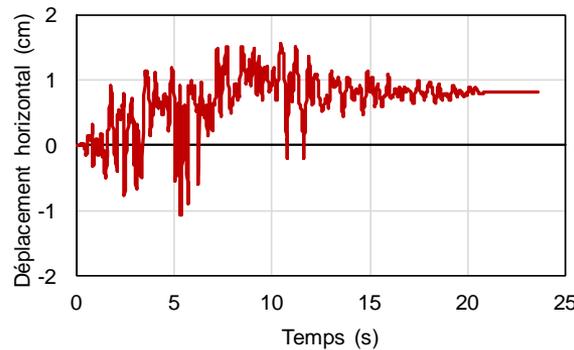
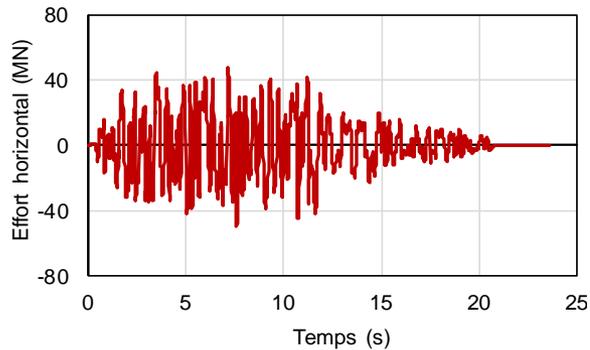
ISS NL + Glissement + Portance



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	0.10
ISS Non linéaire + P + G	63	1.00	1.00	0.25	0.20

Influence sur les coefficients de sécurité

ISS NL + Glissement + Portance + Ecrouissage



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	0.20
ISS Non linéaire + P + G + E	50	1.15	1.21	0.81	1.15

Merci de votre attention !



Youssef Abboud
Terrasol
y.abboud@terrasol.com

