



JST du 07 Avril 2022 – Optimisation des ouvrages géotechniques

Mise à profit de l'interaction sol structure
sous actions statique et sismique



Fahd Cuira
Terrasol

Sommaire

- Introduction
- Les points clés à gérer
- Apports de l'ISS sous charge statique
- Apports de l'ISS sous action sismique
- Enseignements

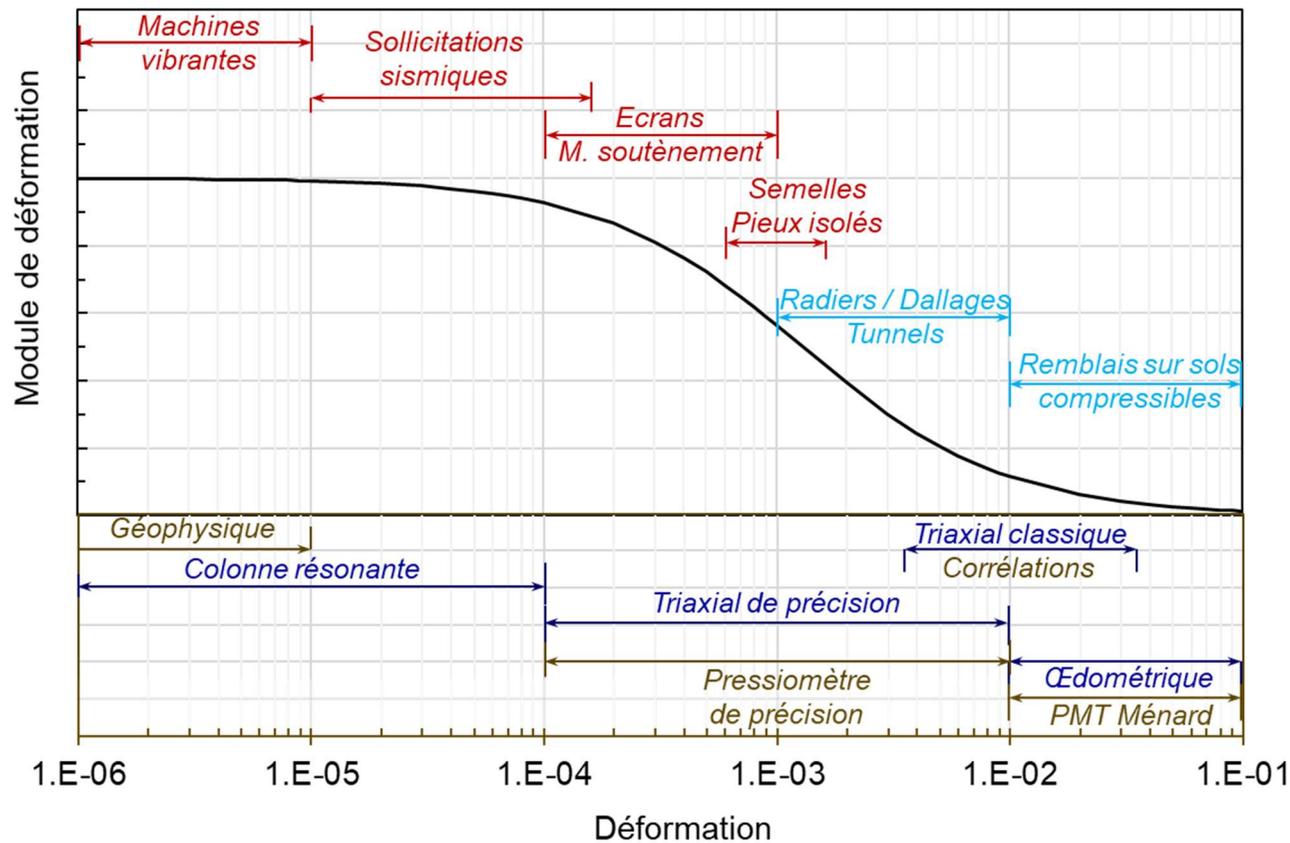
Introduction

- Interaction sol-structure (ISS) = démarche visant à fiabiliser le dimensionnement (géotechnique et/ou structural) vis-à-vis des effets induits par la déformabilité du terrain (tassement, déplacement latéral, rotation etc.)
- Une approche « sans ISS » est une approche qui ignore la déformabilité du terrain (supposé indéformable)
- La prise en compte de l'ISS permet de fiabiliser l'estimation :
 - ⇒ de la déformée de l'ouvrage et la vérification des critères ELS (façades, installations sensibles aux déplacements, canalisations, trafic etc.)
 - ⇒ des sollicitations : descente de charges, sollicitations internes dans la superstructure portée
- ISS ne signifie pas forcément optimisation
 - ⇒ N'a pas toujours un impact sur le dimensionnement
 - ⇒ Impact pas nécessairement favorable (STR vs GEO)
 - ⇒ Problème admettant plusieurs solutions (importance du « point de départ »)

Les points clés à gérer

- Bien caractériser la déformabilité du sol

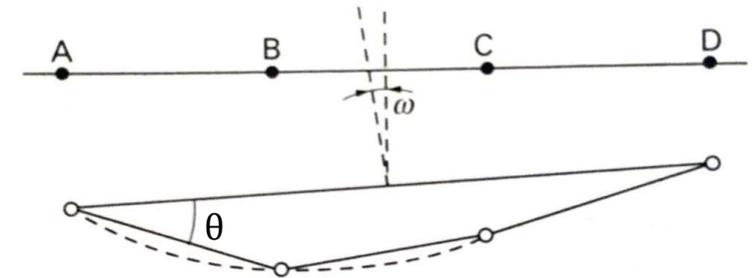
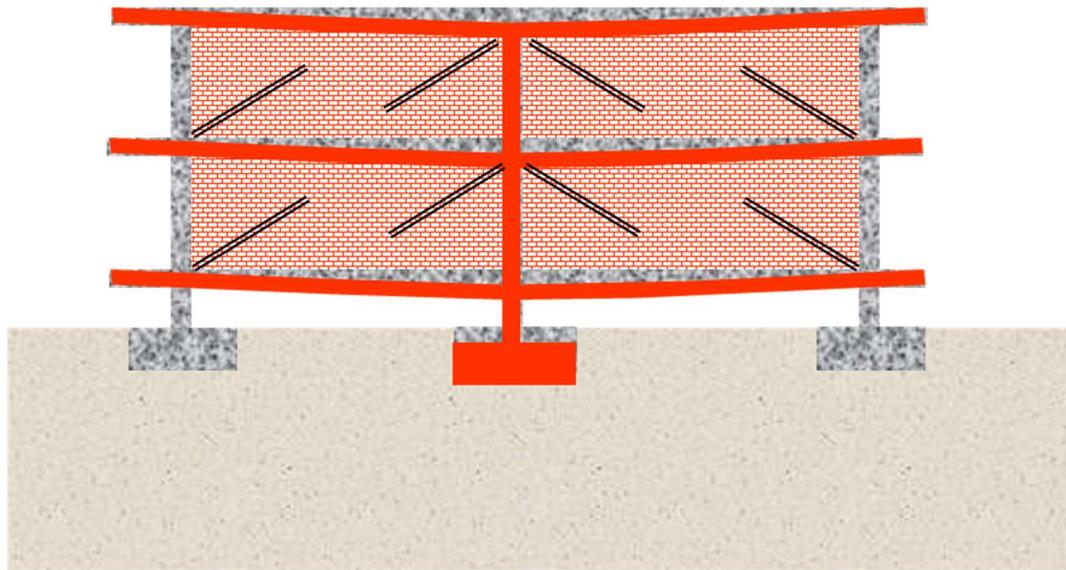
Déformation prépondérante
 Déviatorique
 Volumique et/ou déviatorique



Type d'essai
 Sur le terrain
 Laboratoire

Les points clés à gérer

- Les critères de conception



⇒ Bâtiments courants

$\theta_{adm} \# 1/500^e$

⇒ Ouvrages d'art et tours de grande hauteur

$\theta_{adm} \# 1/1000^e \text{ à } 1/500^e$

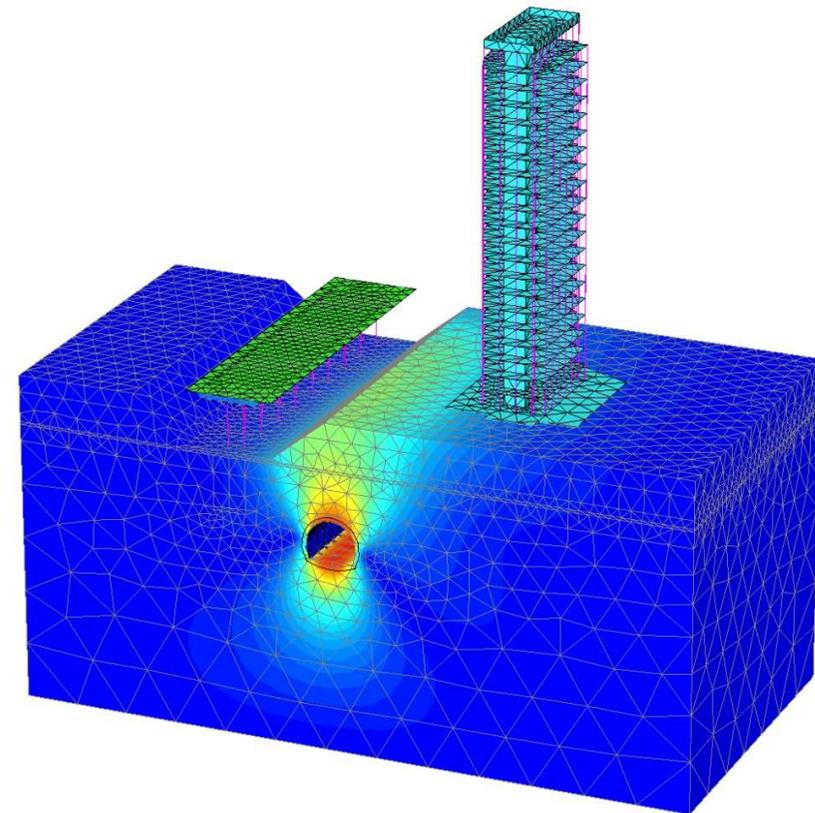
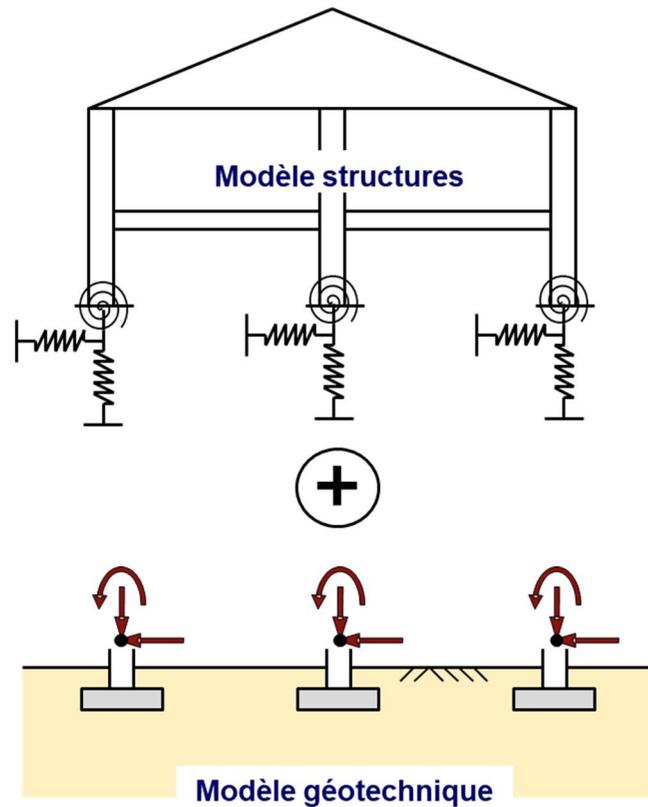
⇒ Installations industrielles sensibles

$\theta_{adm} \# 1/2000^e \text{ à } 1/500^e$

Critères ELS usuels

Les points clés à gérer

- Procédure de « couplage » sol/structure

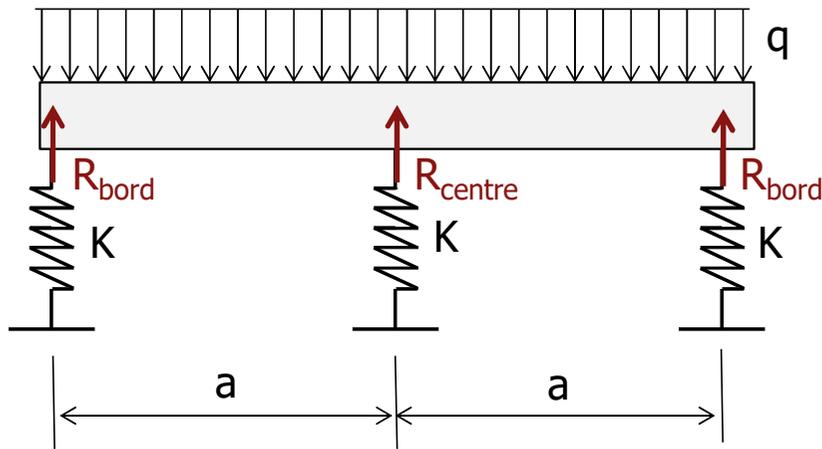


Sommaire

- Introduction
- Les points clés à gérer
- **Apports de l'ISS sous charge statique**
- Apports de l'ISS sous action sismique
- Enseignements

Apports de l'ISS sous charge statique

- Notion de rigidité relative : exemple d'une structure sur trois appuis



$$R_{\text{centre}} = 2qa \frac{\frac{5}{8} + 3\beta}{1 + 9\beta}$$

$$R_{\text{bord}} = 2qa \frac{\frac{3}{16} + 3\beta}{1 + 9\beta}$$

$$\beta = \frac{EI}{a^3 K}$$

Taux de rigidité relative

⇒ Appuis rigides

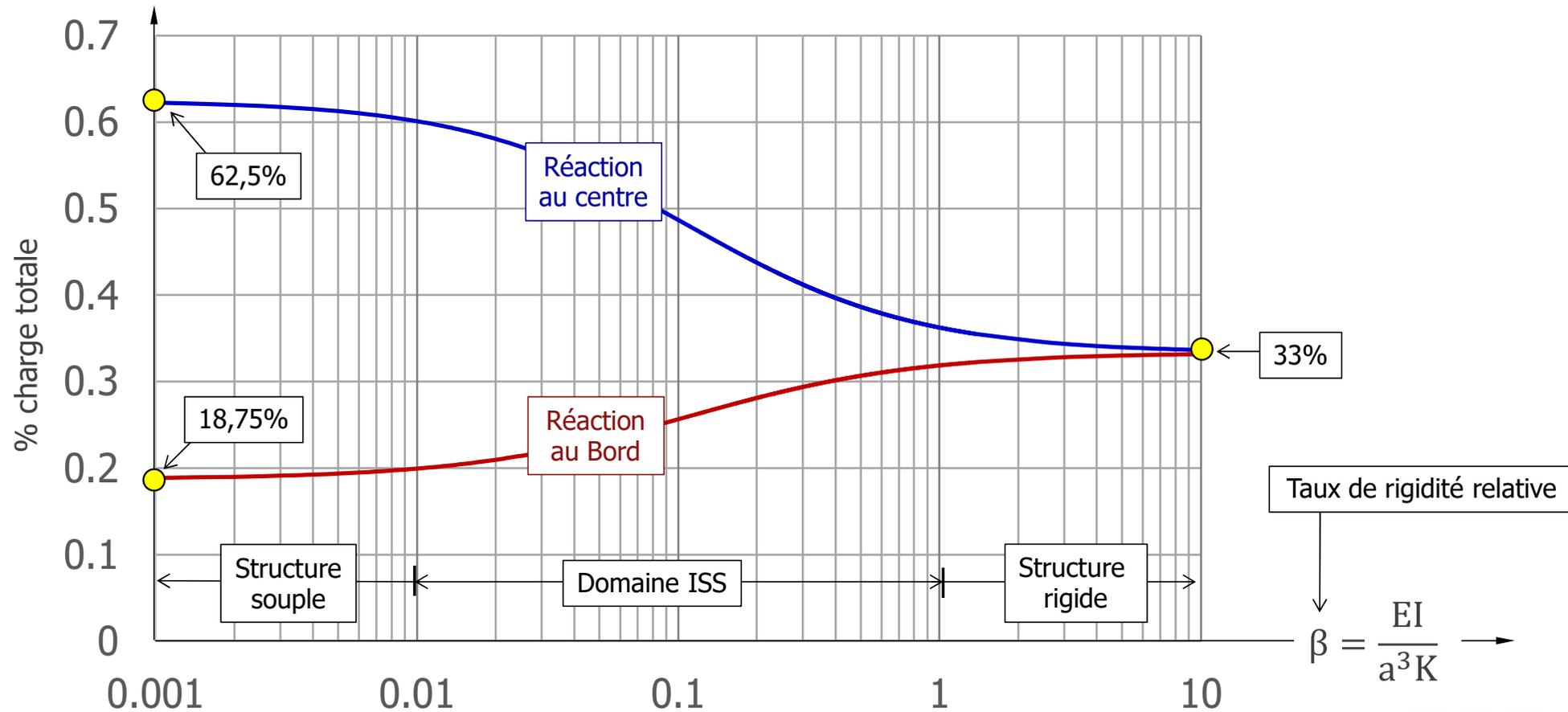
$R_{\text{centre}} \sim 60\%$ charge totale
 $R_{\text{bord}} \sim 20\%$ charge totale (x2)

⇒ Appuis élastiques

$R_{\text{centre}} \sim 60$ à 33% charge totale
 $R_{\text{bord}} \sim 20$ à 33% charge totale (x2)

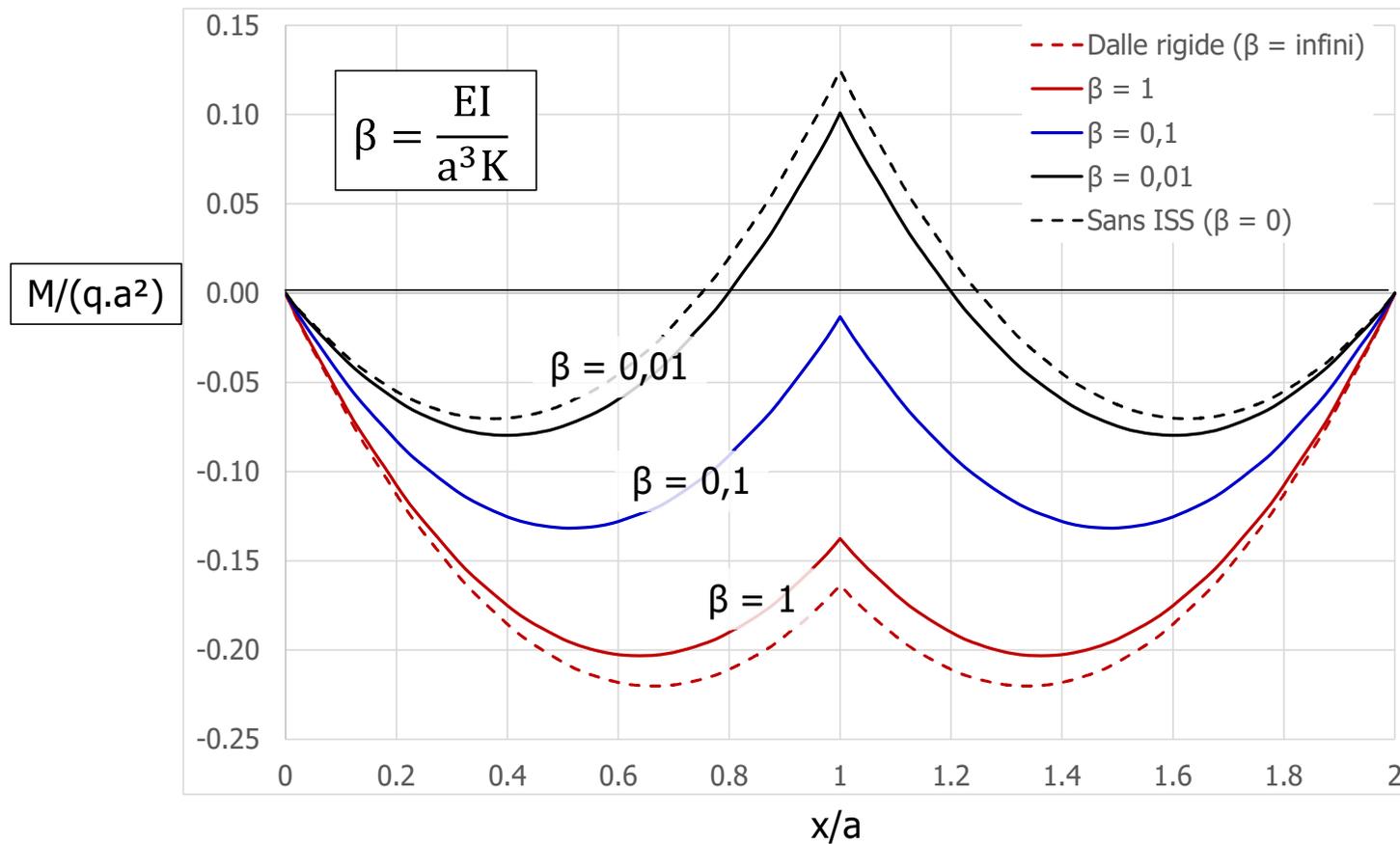
Apports de l'ISS sous charge statique

- Notion de rigidité relative : exemple d'une structure sur trois appuis – DDC



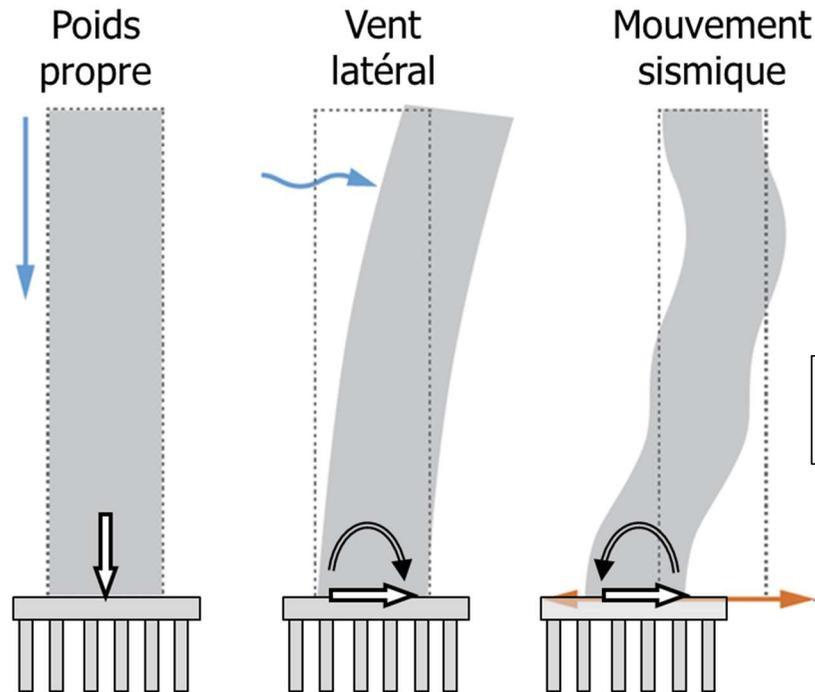
Apports de l'ISS sous charge statique

- Notion de rigidité relative : exemple d'une structure sur trois appuis – sollicitations STR



Apports de l'ISS sous charge statique

- Notion de rigidité relative : deux cas extrêmes



L'ISS a une forte incidence sur le dimensionnement

Cas d'un IGH : structure souple sous charge transversale mais relativement rigide sous chargement vertical ($\beta \gg 0,01$)

Apports de l'ISS sous charge statique

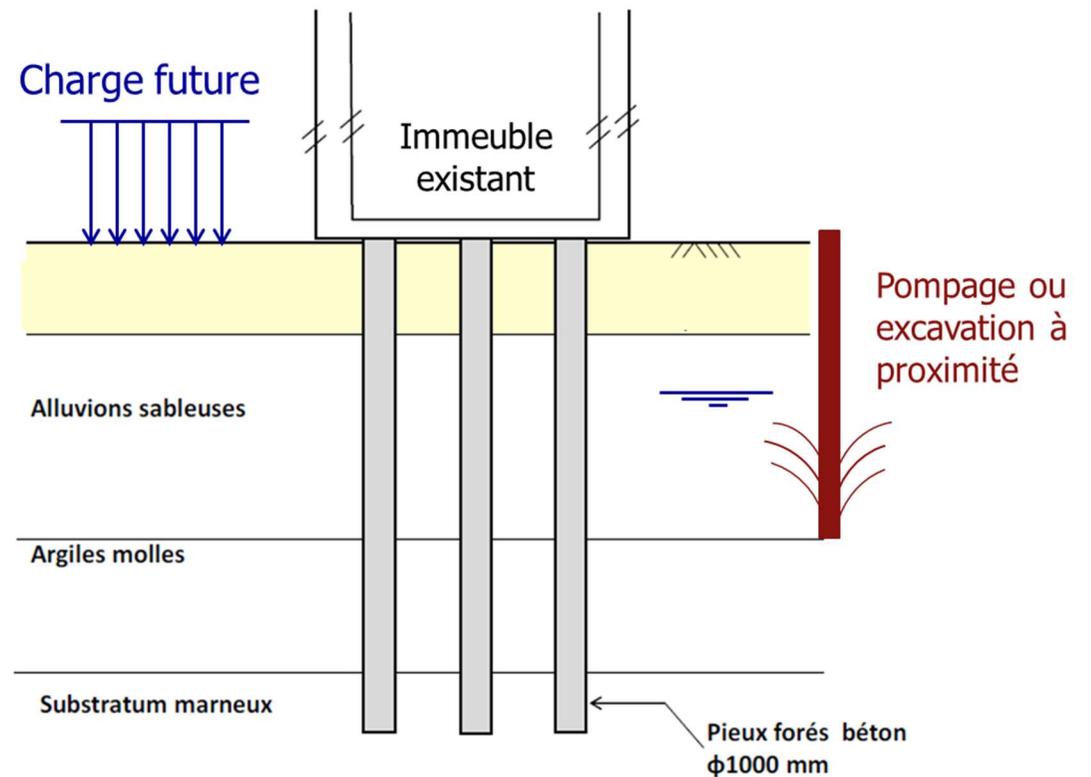
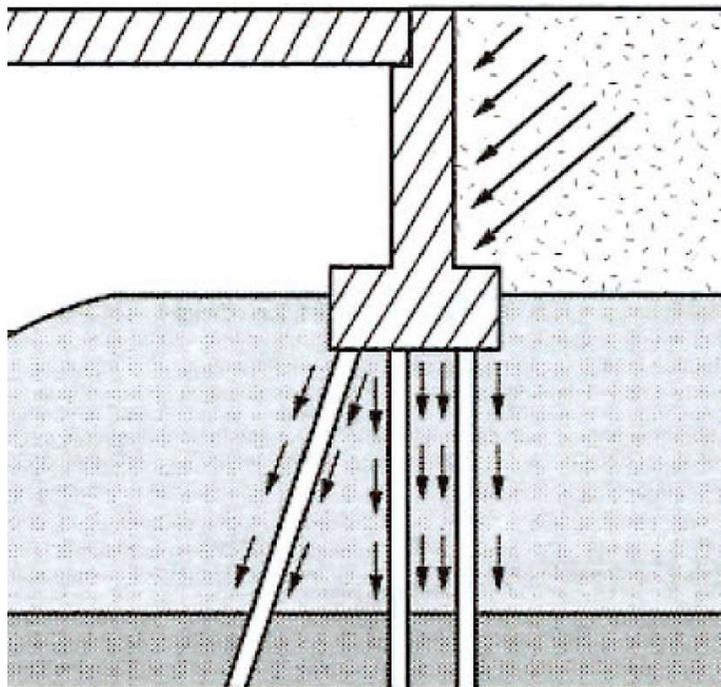
- Notion de rigidité relative : deux cas extrêmes



Particularité d'un OA de grande portée : $\beta \ll 0,01 \Rightarrow$ l'ISS a peu d'incidence sur le comportement l'ouvrage sous charge verticale

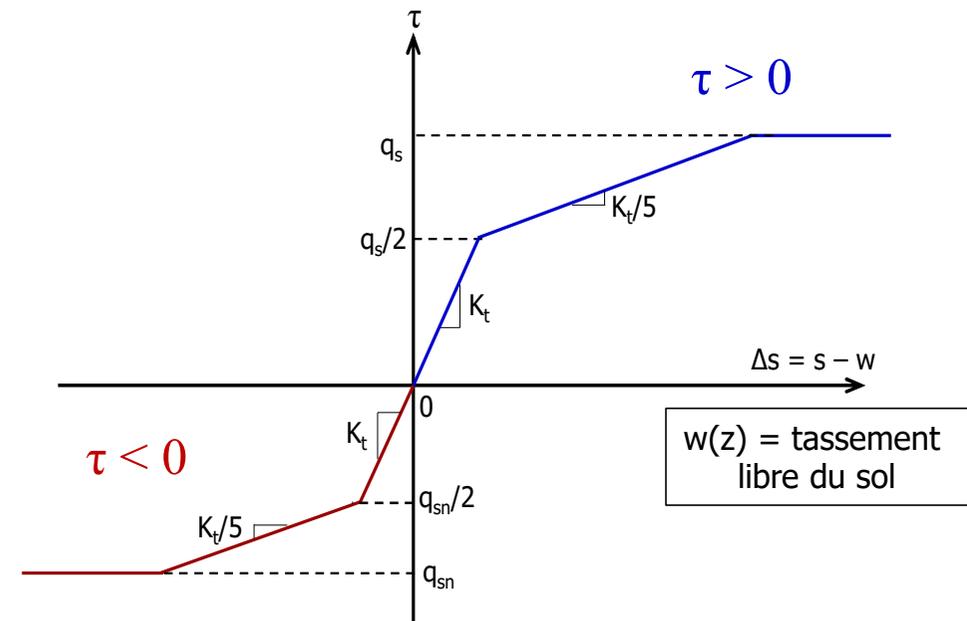
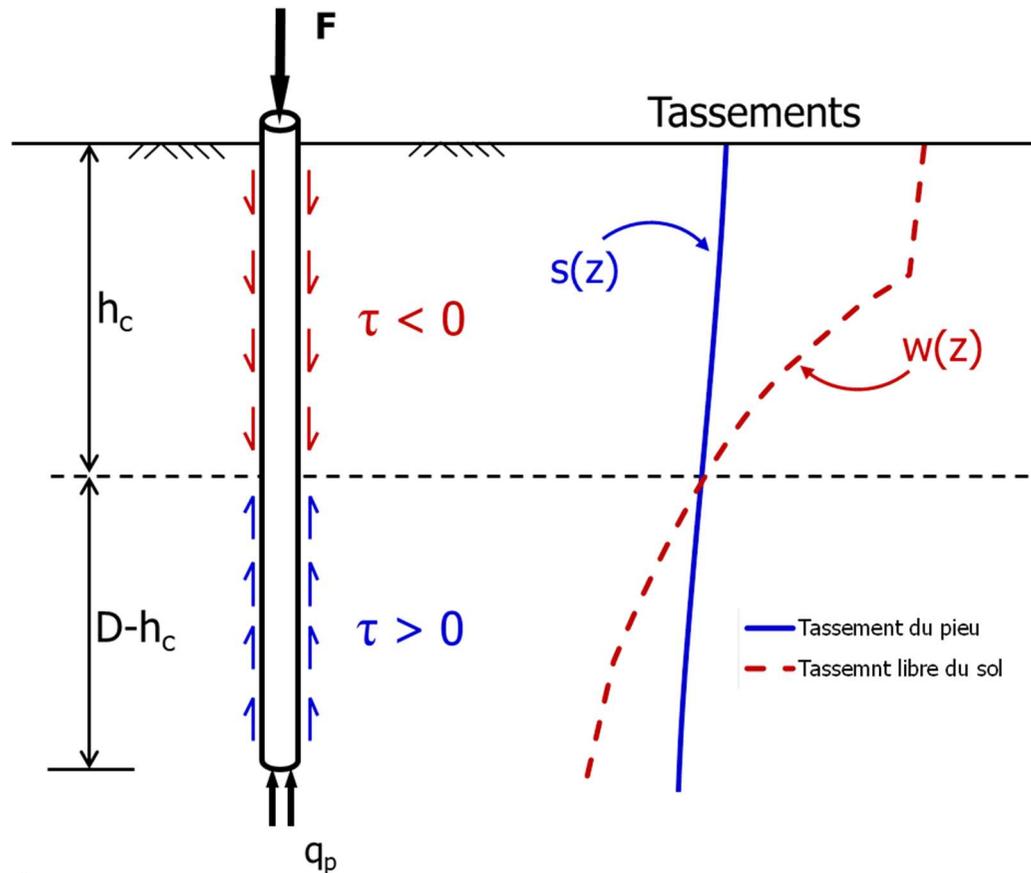
Apports de l'ISS sous charge statique

- Cas où l'origine de la sollicitation est un déplacement : par ex. frottement négatif



Apports de l'ISS sous charge statique

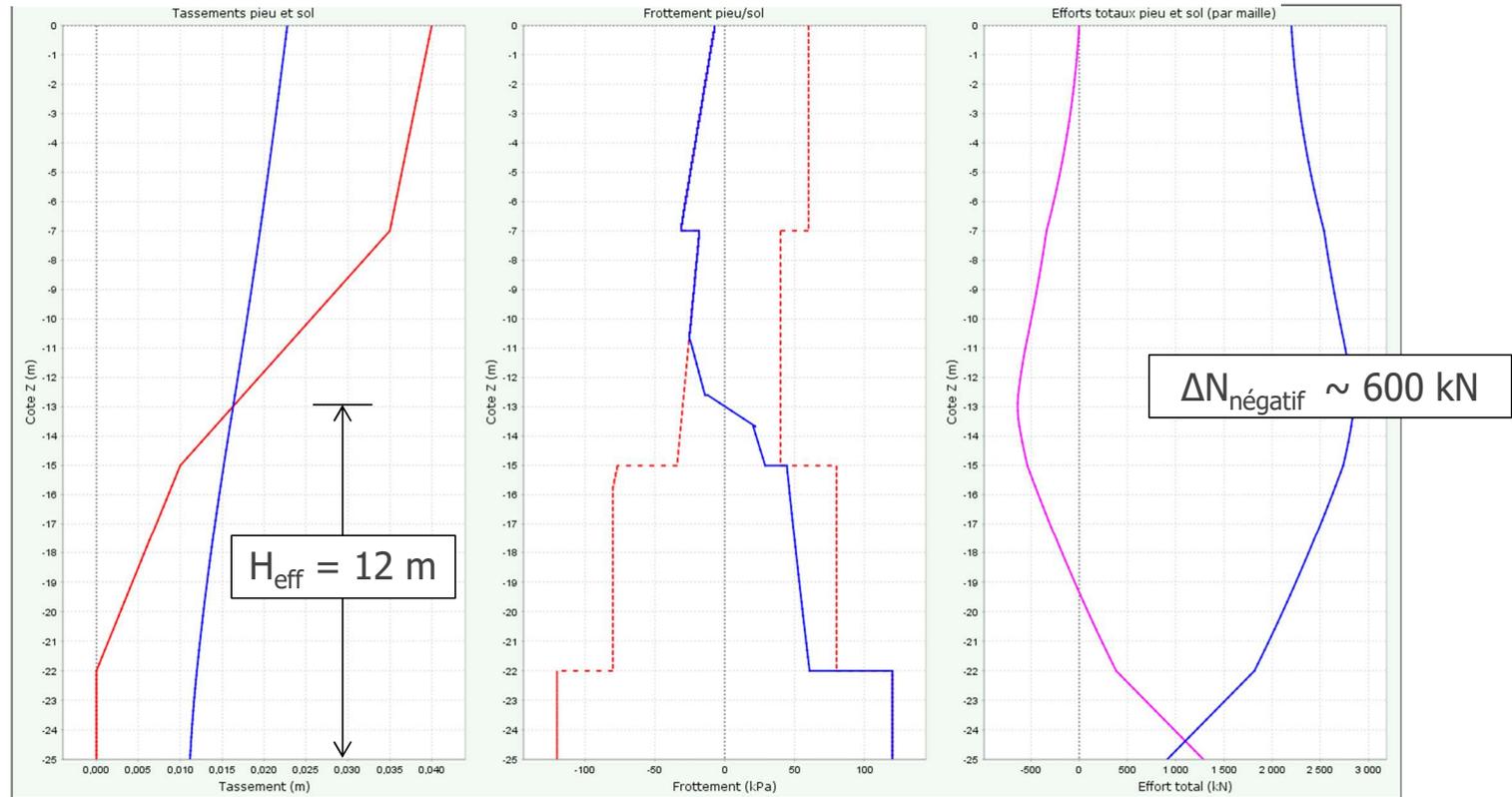
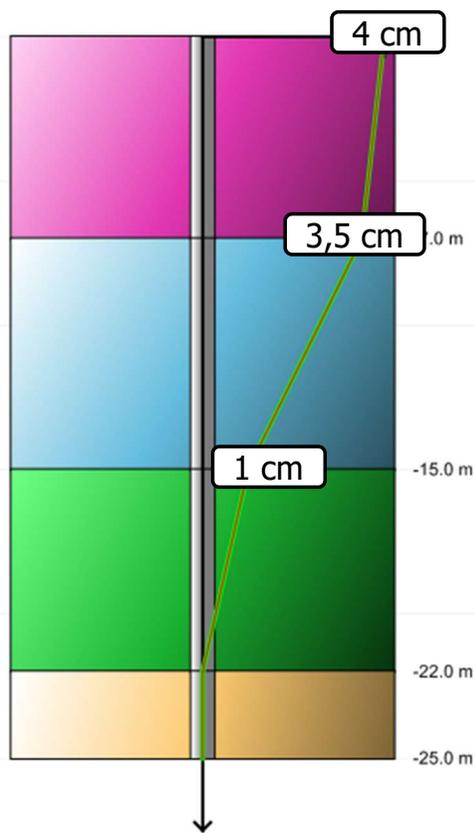
- Cas où l'origine de la sollicitation est un déplacement : par ex. frottement négatif



Utilisation d'un modèle t-z généralisé comme approche d'ISS

Apports de l'ISS sous charge statique

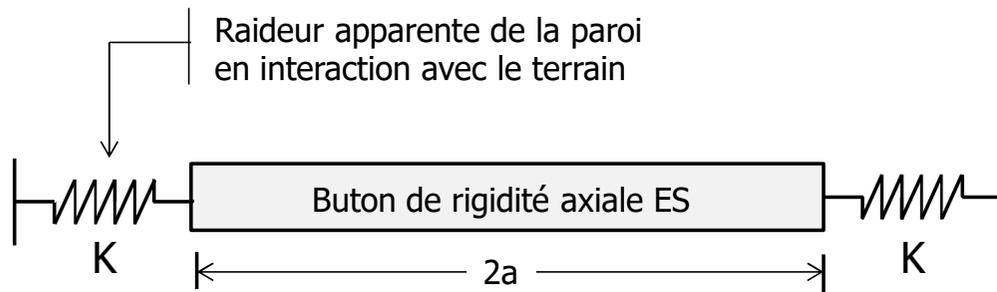
- Cas où l'origine de la sollicitation est un déplacement : par ex. frottement négatif



Approche ISS $\Delta N_{négatif} \sim 600$ kN vs Approche sans ISS $\Delta N_{négatif} \sim 1\ 250$ kN !

Apports de l'ISS sous charge statique

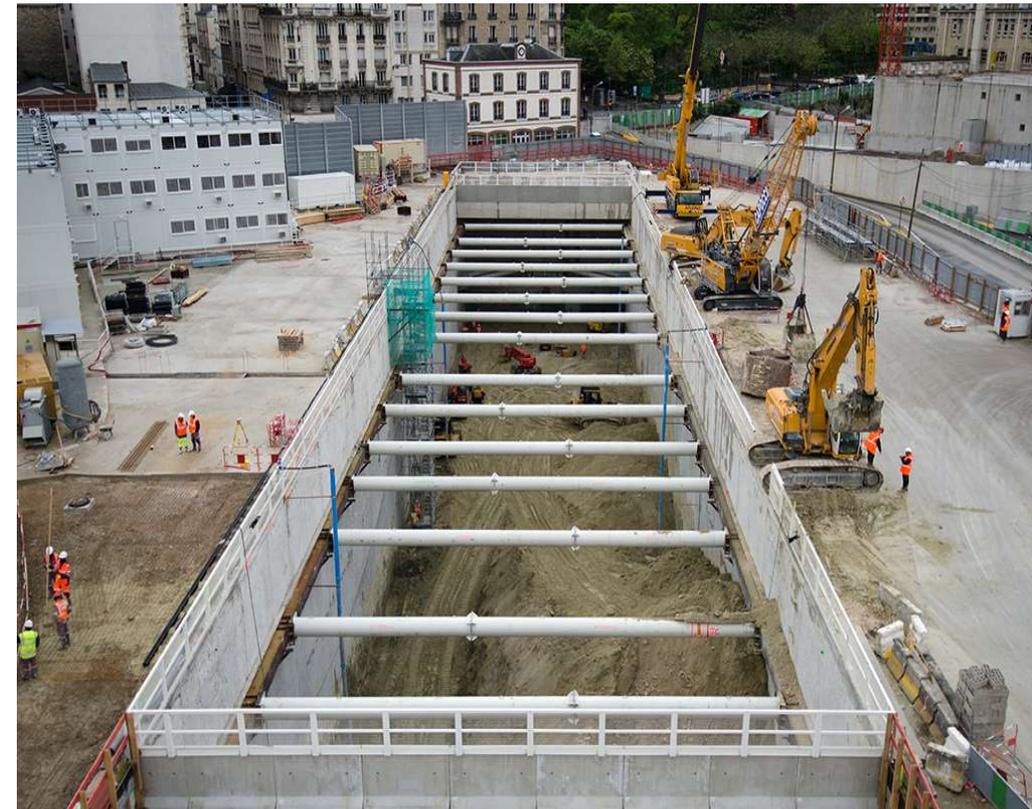
- Cas où l'origine de la sollicitation est un déplacement : par ex. buton soumis à dilatation thermique



$$N = ES \frac{\alpha \Delta T}{1 + \beta}$$

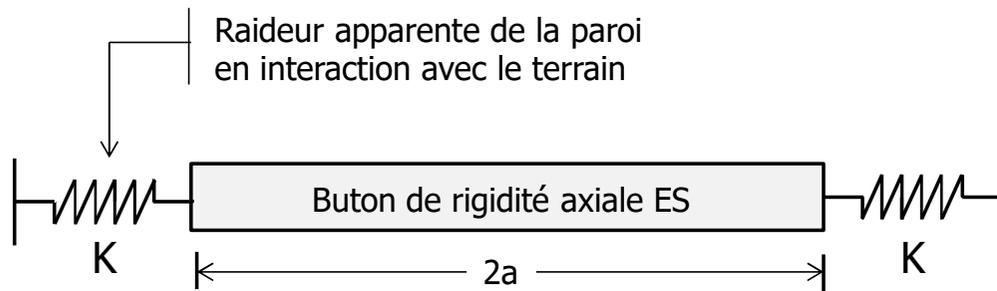
$$\beta = \frac{ES}{aK}$$

Taux de rigidité relative



Apports de l'ISS sous charge statique

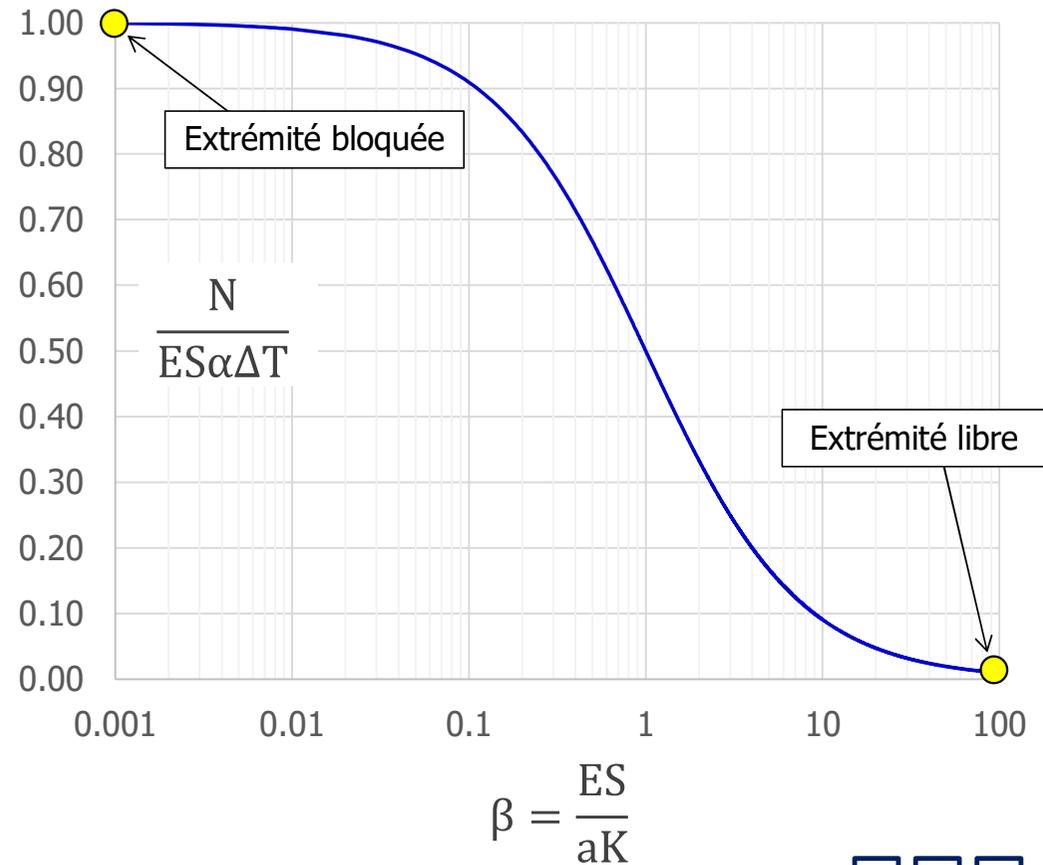
- Cas où l'origine de la sollicitation est un déplacement : par ex. bouton soumis à dilatation thermique



$$N = ES \frac{\alpha \Delta T}{1 + \beta}$$

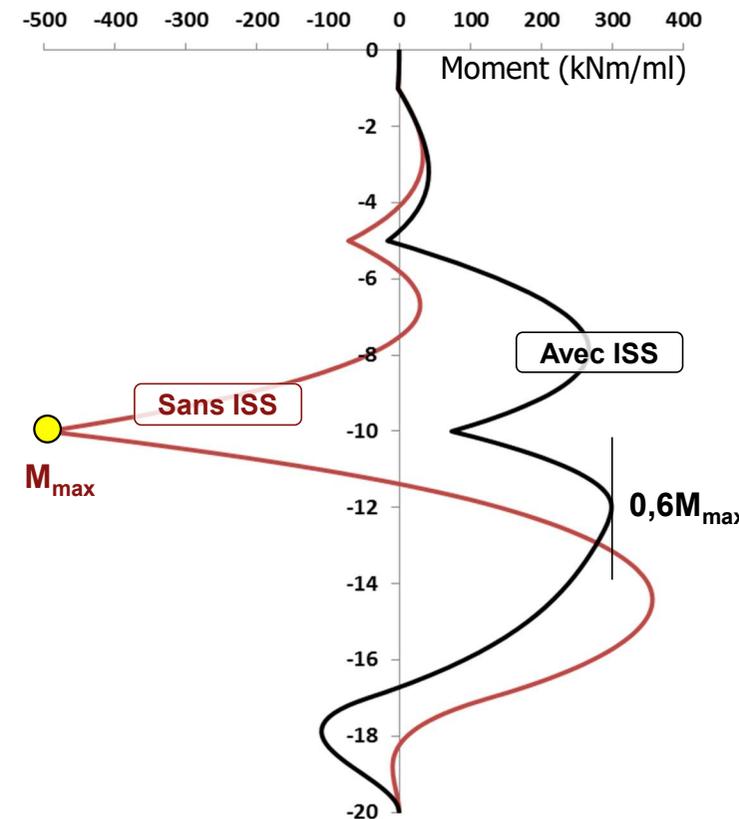
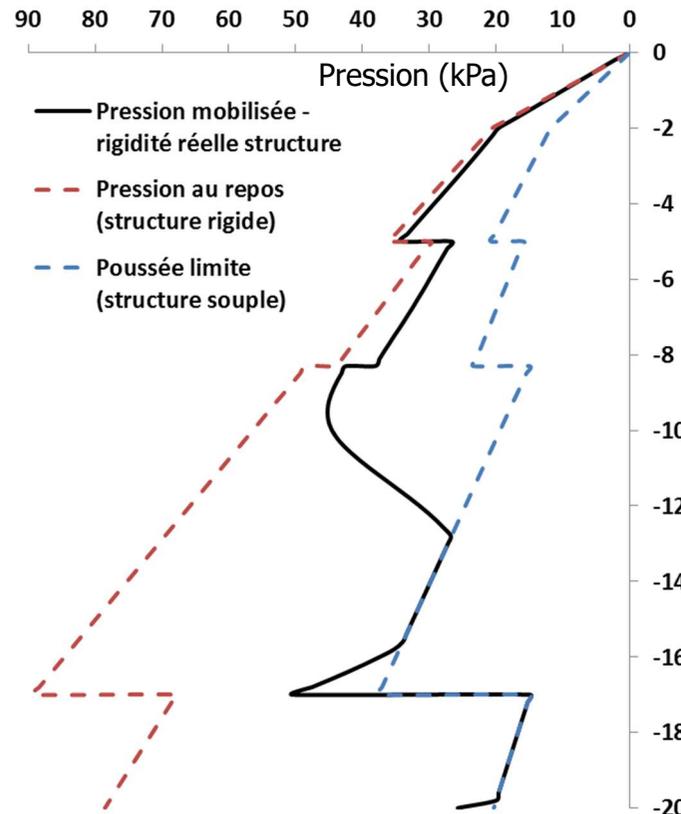
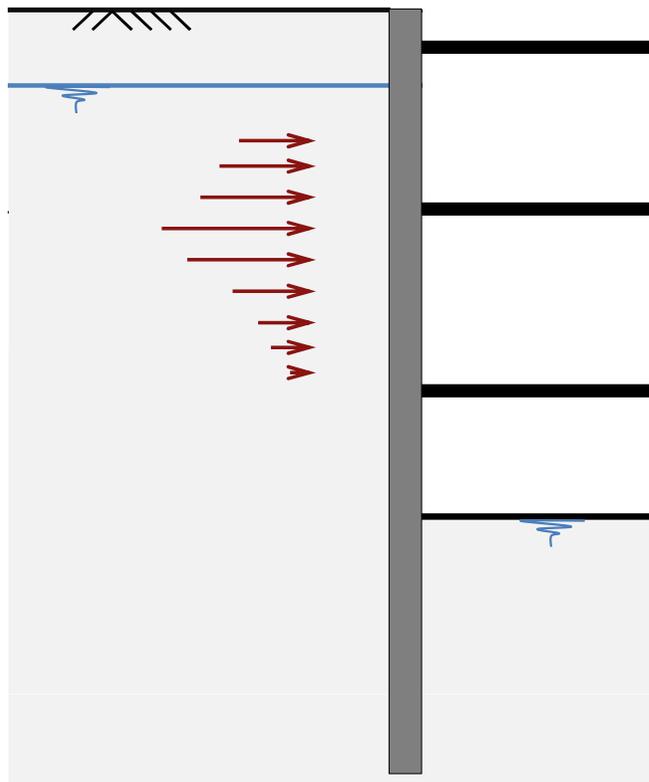
$$\beta = \frac{ES}{aK}$$

Taux de rigidité relative



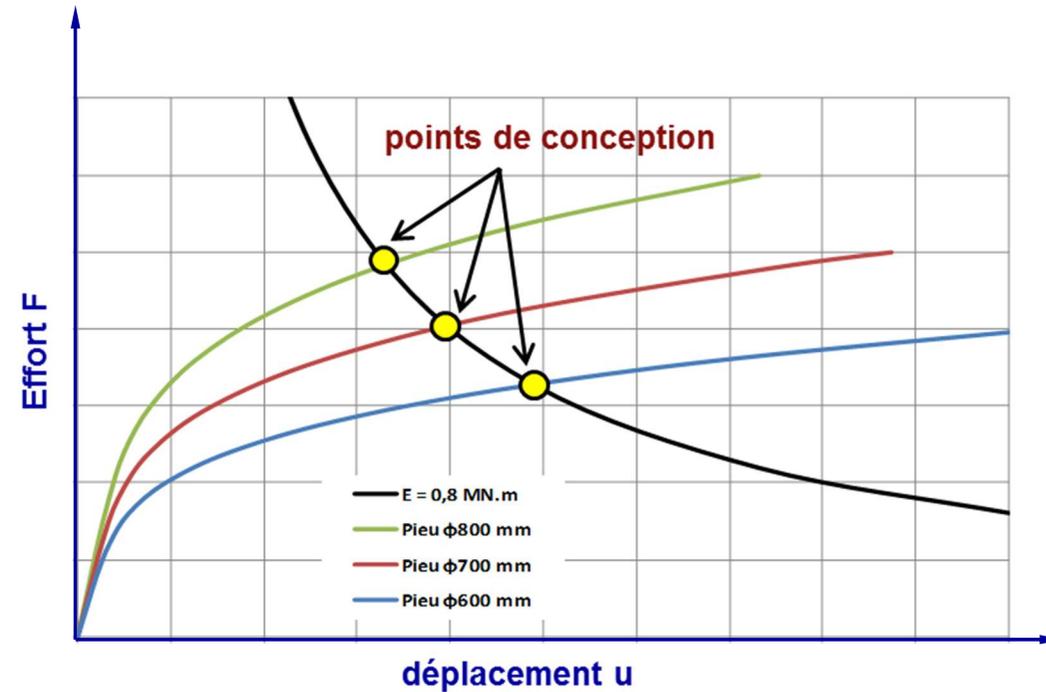
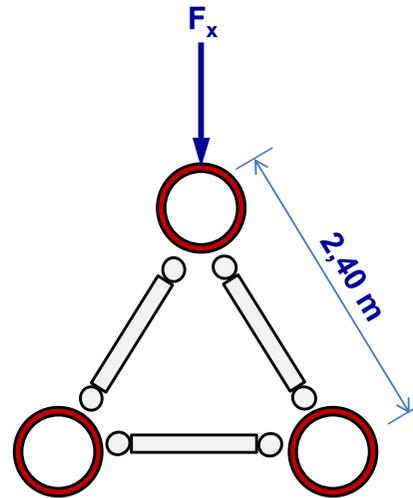
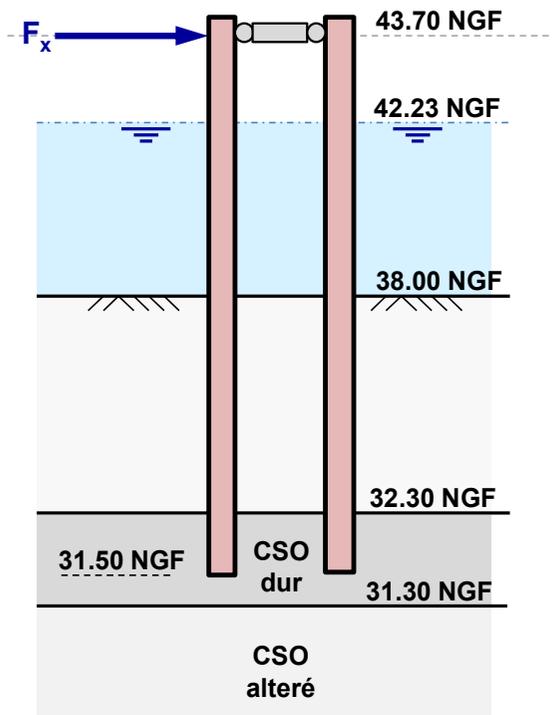
Apports de l'ISS sous charge statique

- Cas où la structure est un système de soutènement (rigidité relative évoluant au cours de phasage)



Apports de l'ISS sous charge statique

- Problèmes à énergie imposée : exemple d'un duc d'albe soumis à un choc de bateau



La prise en compte de l'ISS permet une estimation plus fine de la force de choc et une optimisation du dimensionnement structural

Sommaire

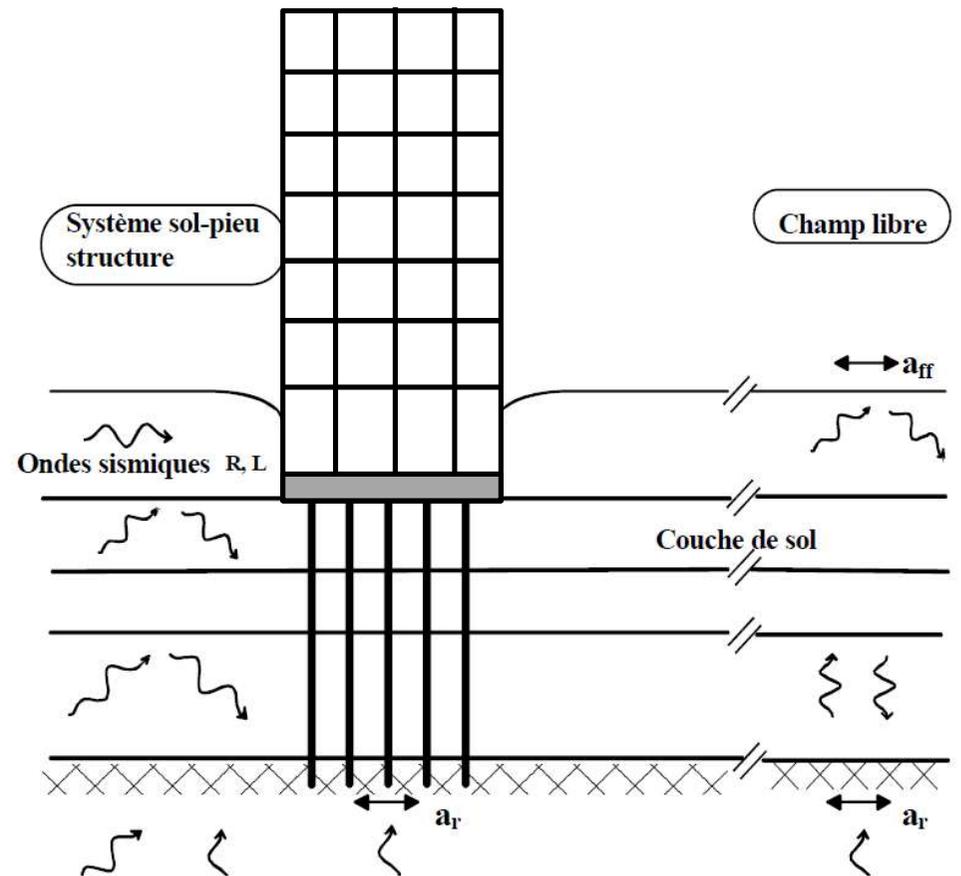
- Introduction
- Les points clés à gérer
- Apports de l'ISS sous charge statique
- Apports de l'ISS sous action sismique
- Enseignements

Apports de l'ISS sous action sismique

- Mécanismes d'interaction sol-structure sous séisme

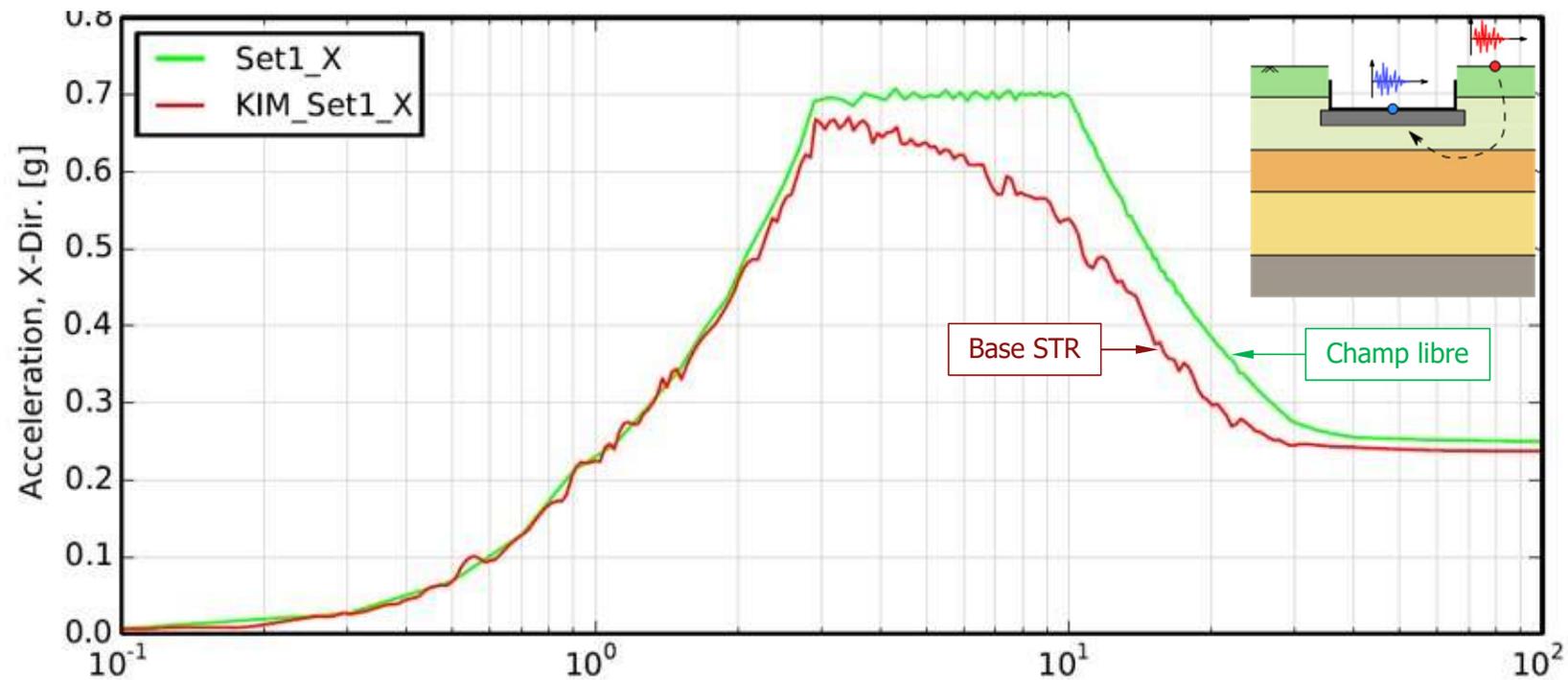
Mécanisme lié à l'oscillation de la structure sous l'effet des mouvements sismiques transmis par le sol => Interaction inertielle

Mécanisme lié à la modification du champ d'ondes au voisinage des éléments structuraux dans le sol => Interaction cinématique



Apports de l'ISS sous action sismique

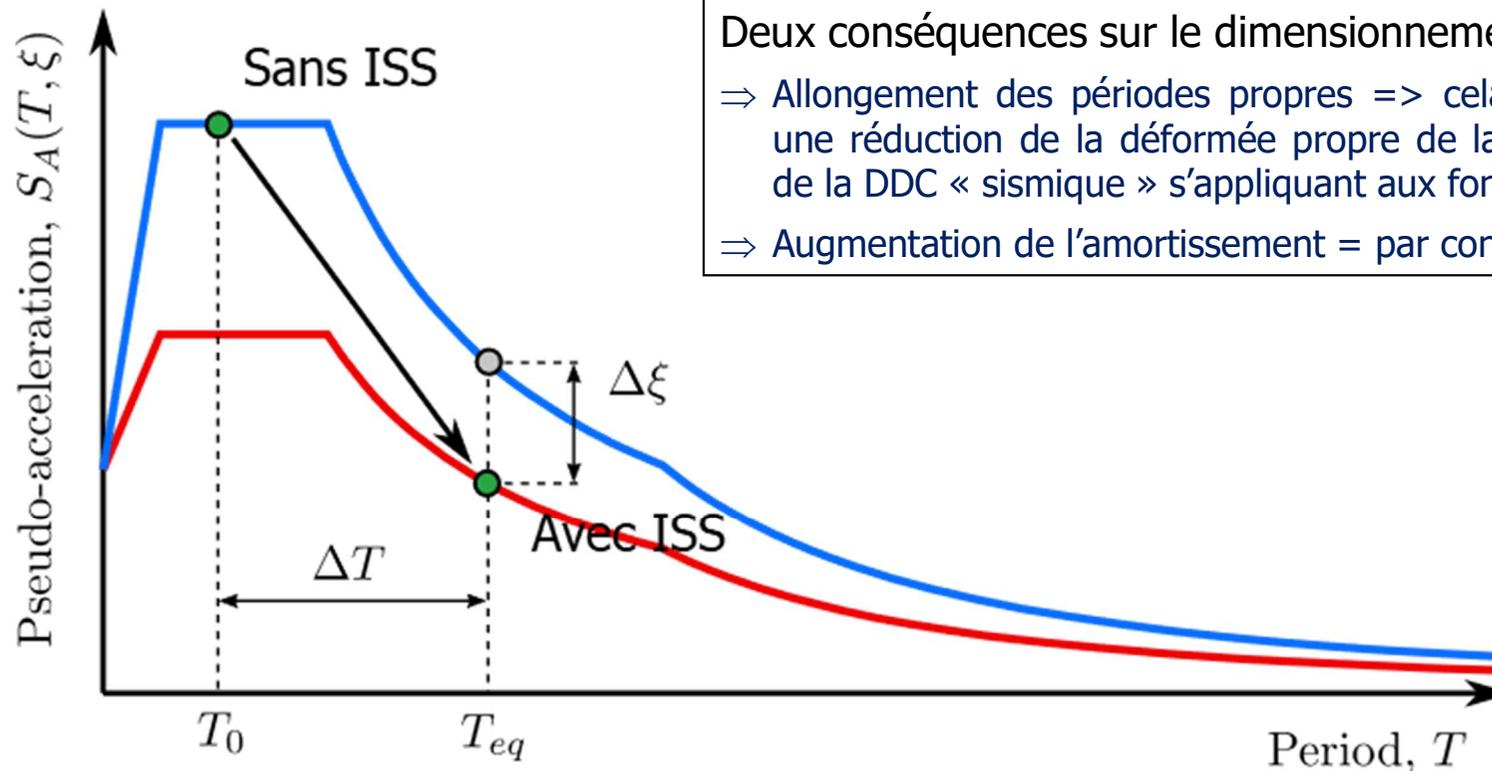
- Interaction cinématique = peut être source d'optimisation pour les structures encastrées



Exemple d'une redéfinition du spectre de réponse élastique tenant compte de la modification du champ d'ondes au voisinage des éléments structuraux

Apports de l'ISS sous action sismique

- Interaction inertielle = peut être source d'optimisation pour les sollicitations d'origine sismique

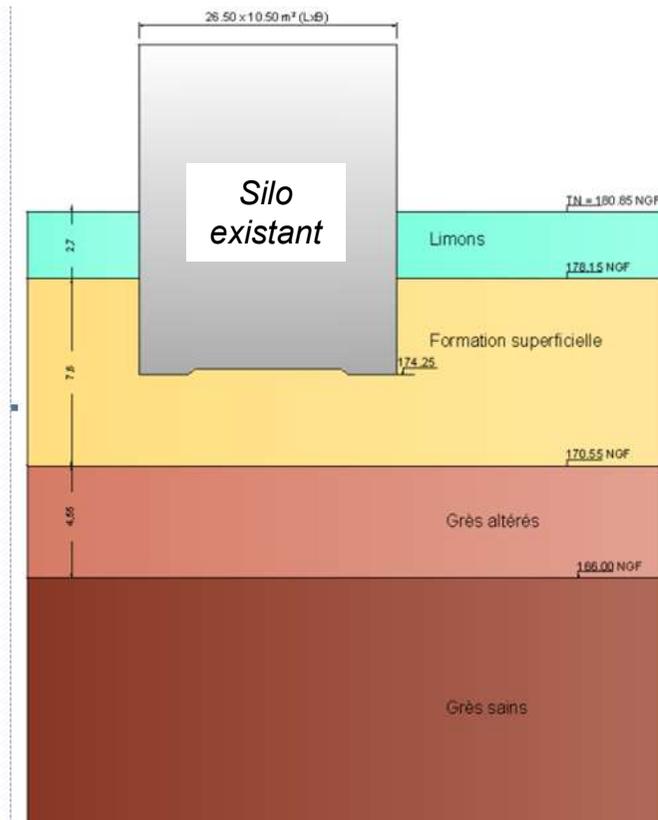


Deux conséquences sur le dimensionnement

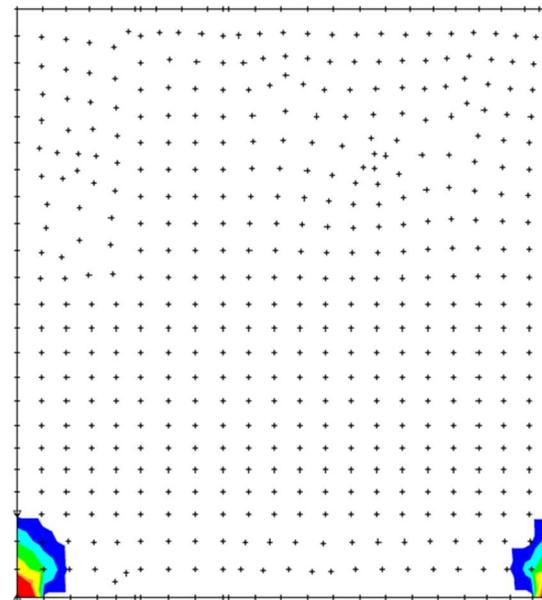
- ⇒ Allongement des périodes propres => cela conduit le plus souvent à une réduction de la déformée propre de la structure et de l'amplitude de la DDC « sismique » s'appliquant aux fondations
- ⇒ Augmentation de l'amortissement = par construction toujours favorable

Apports de l'ISS sous action sismique

- Interaction inertielle = peut être source d'optimisation pour les sollicitations d'origine sismique

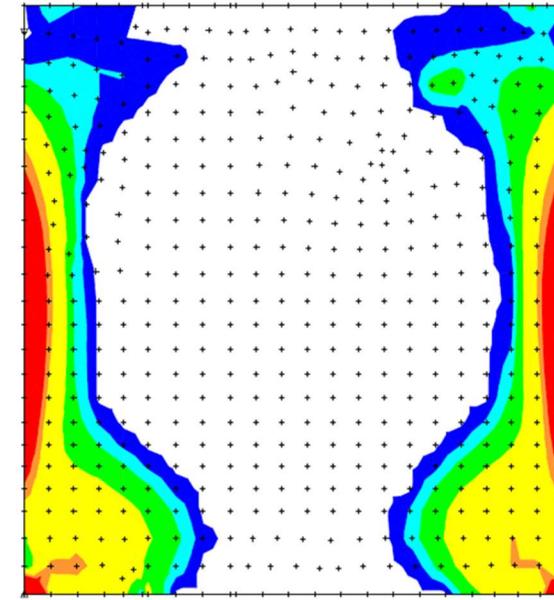


Avec ISS

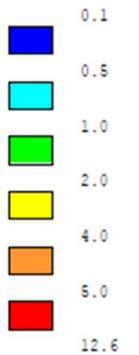


ARMATEC 3.08 by Setec TPI - 03/07/14

Sans ISS



ARMATEC 3.08 by Setec TPI - 03/07/14

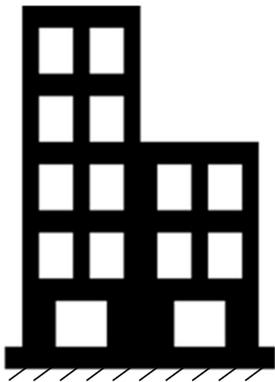


Demande complémentaire de ferrailage dans le radier

Apports de l'ISS sous action sismique

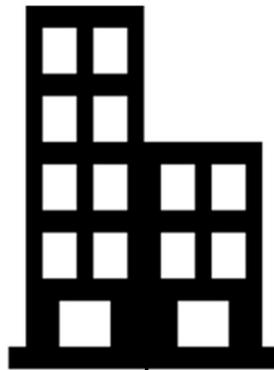
- Interaction inertielle : mise en œuvre pratique selon 4 niveaux de complexité

Niveau 1



Base fixe

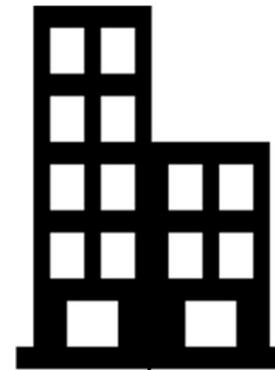
Niveau 2



Ressorts statiques

Prise en compte de la déformabilité du sol

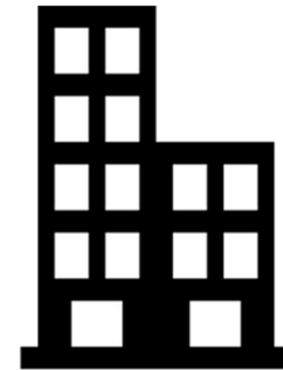
Niveau 3



Impédances dynamiques

Prise en compte de l'amortissement radiatif

Niveau 4



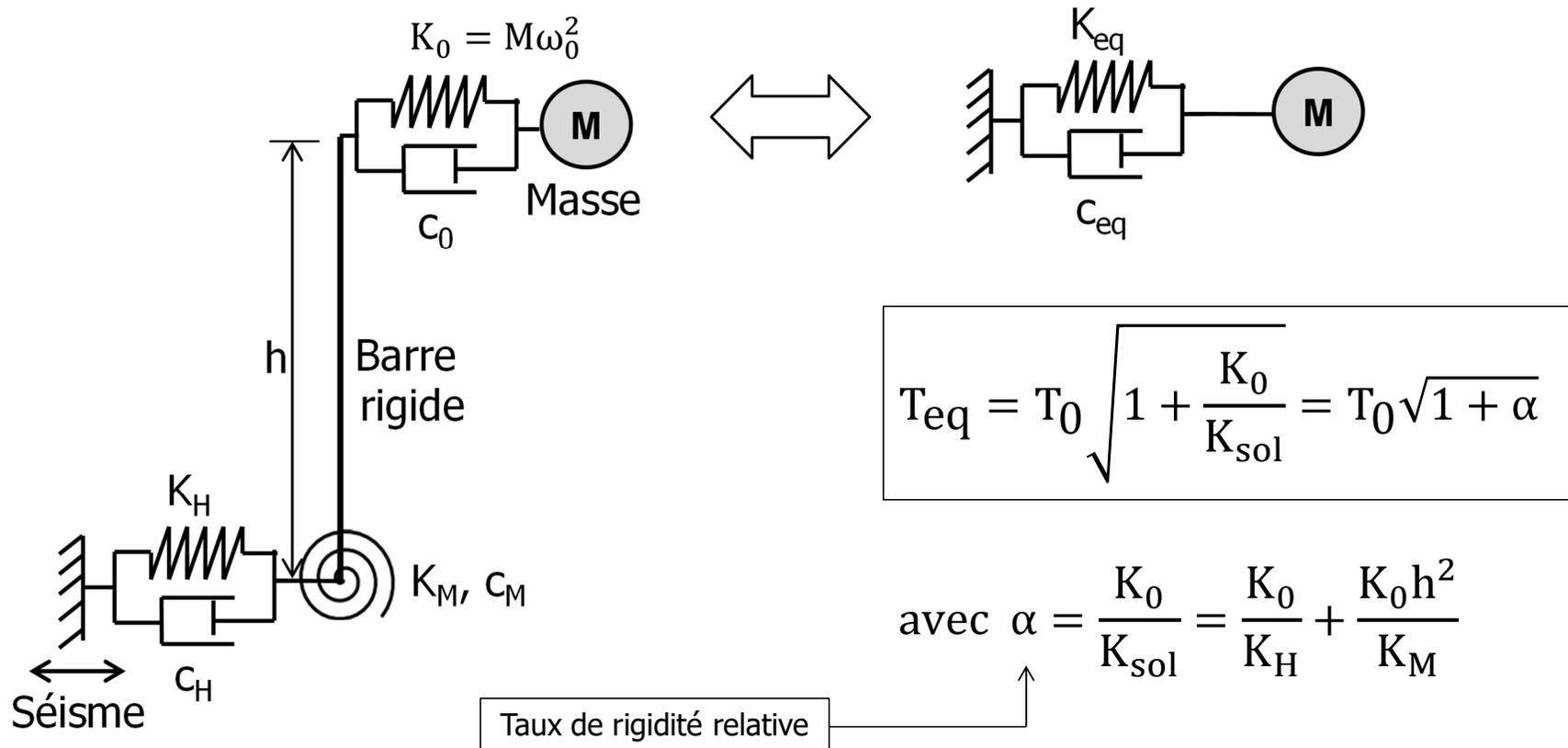
Impédances dynamiques non-linéaires

Mise à profit des non linéarités du sol

Non linéarités

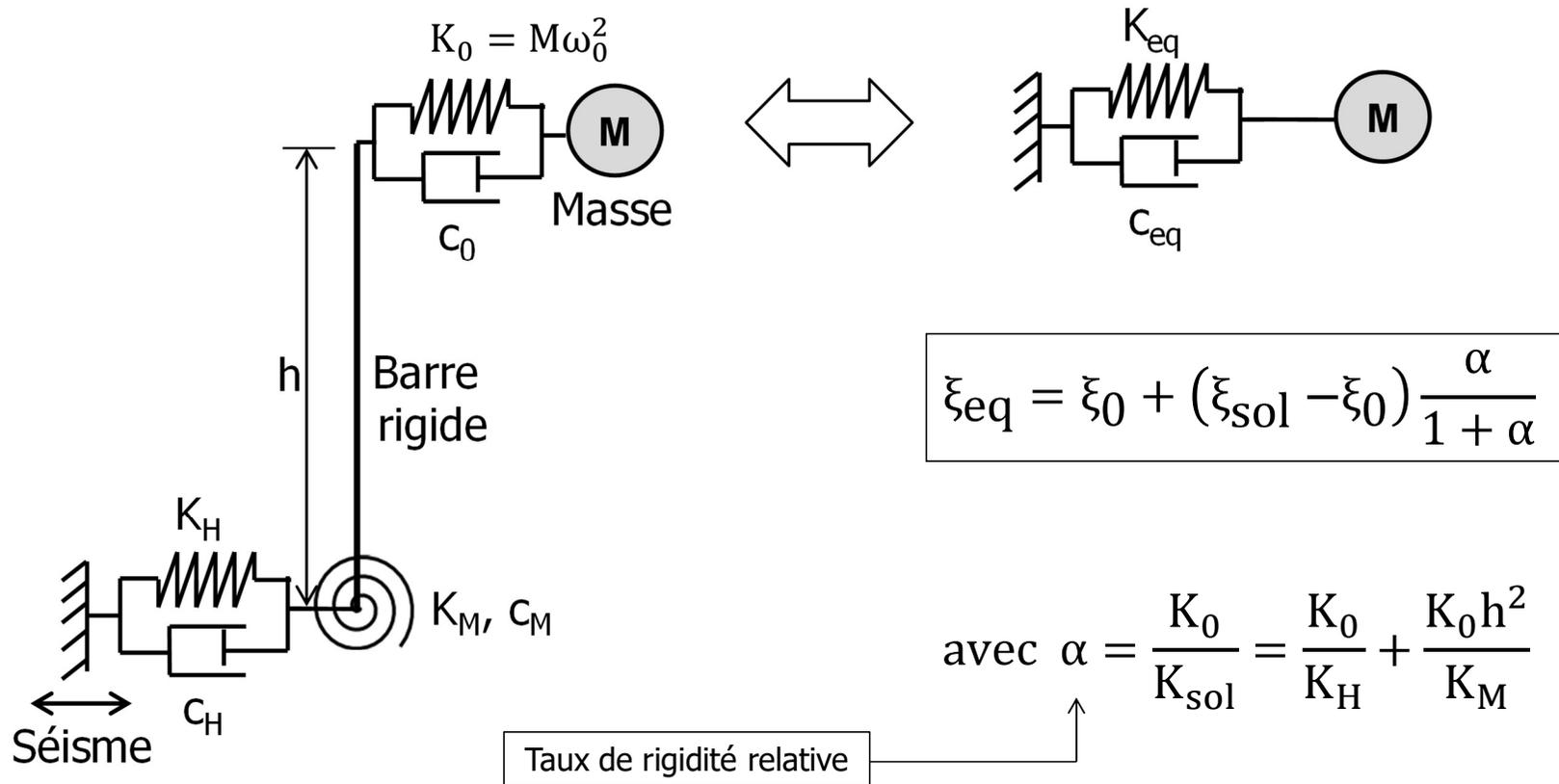
Apports de l'ISS sous action sismique

- Interaction inertielle : illustration par modèle analogique – **allongement des périodes propres**



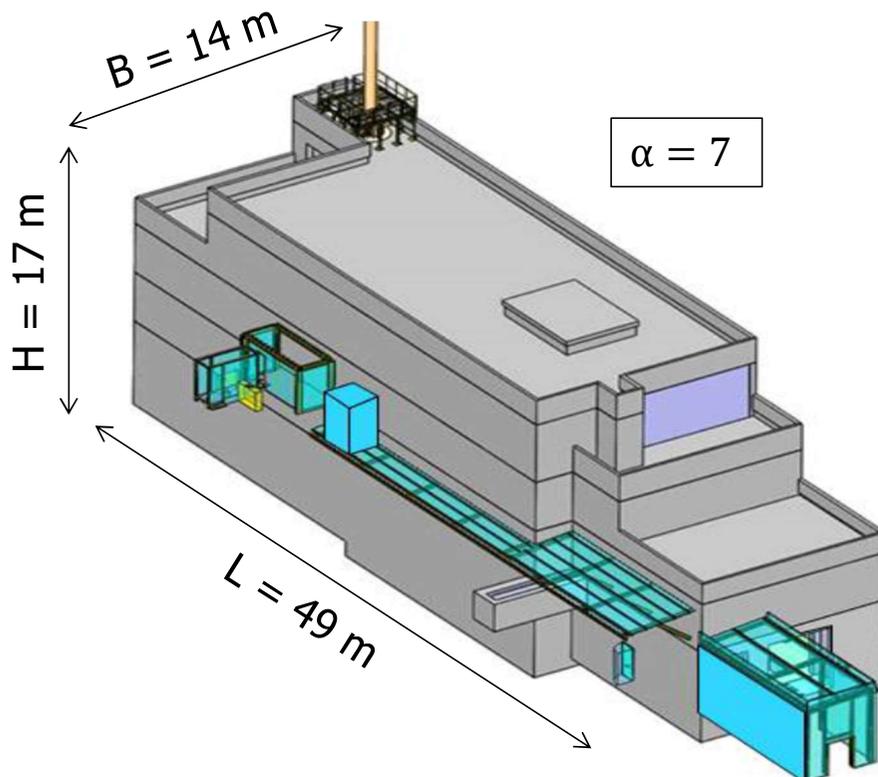
Apports de l'ISS sous action sismique

- Interaction inertielle : illustration par modèle analogique – **augmentation de l'amortissement**

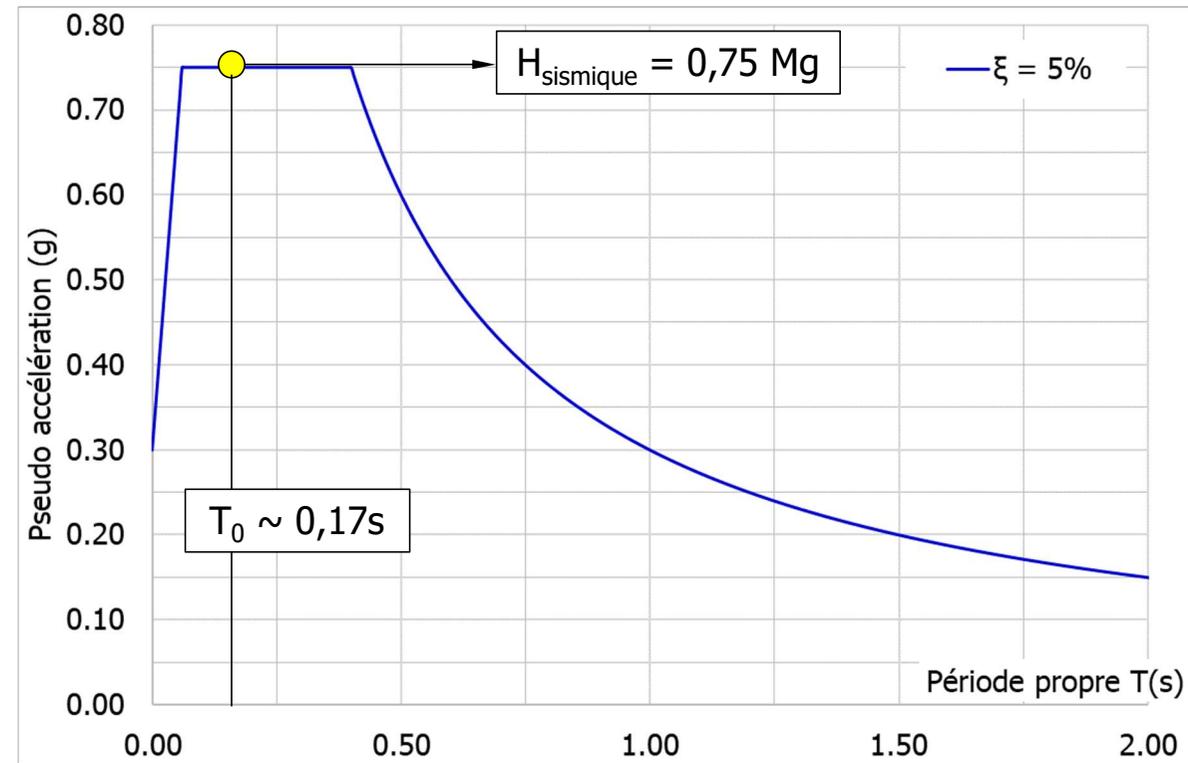


Apports de l'ISS sous action sismique

- Interaction inertielle : exemple d'un bâtiment « rigide » – ISS de niveau 1 (base fixe)



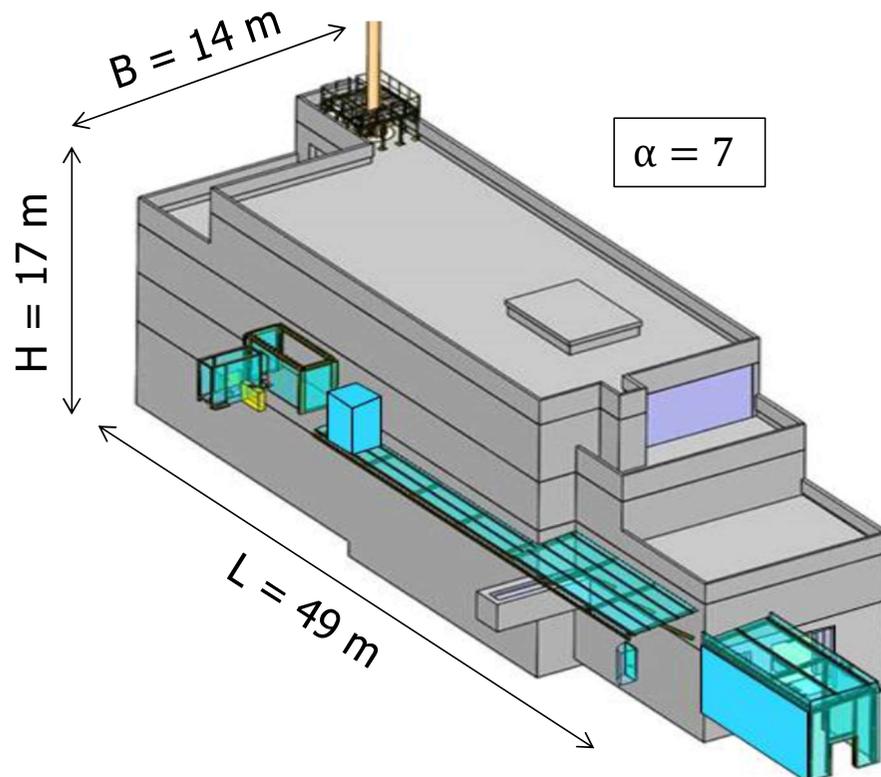
$T_0 = 0,17\text{s}$, $\xi_0 = 5\%$, $M = 10\ 500 \text{ tonnes}$



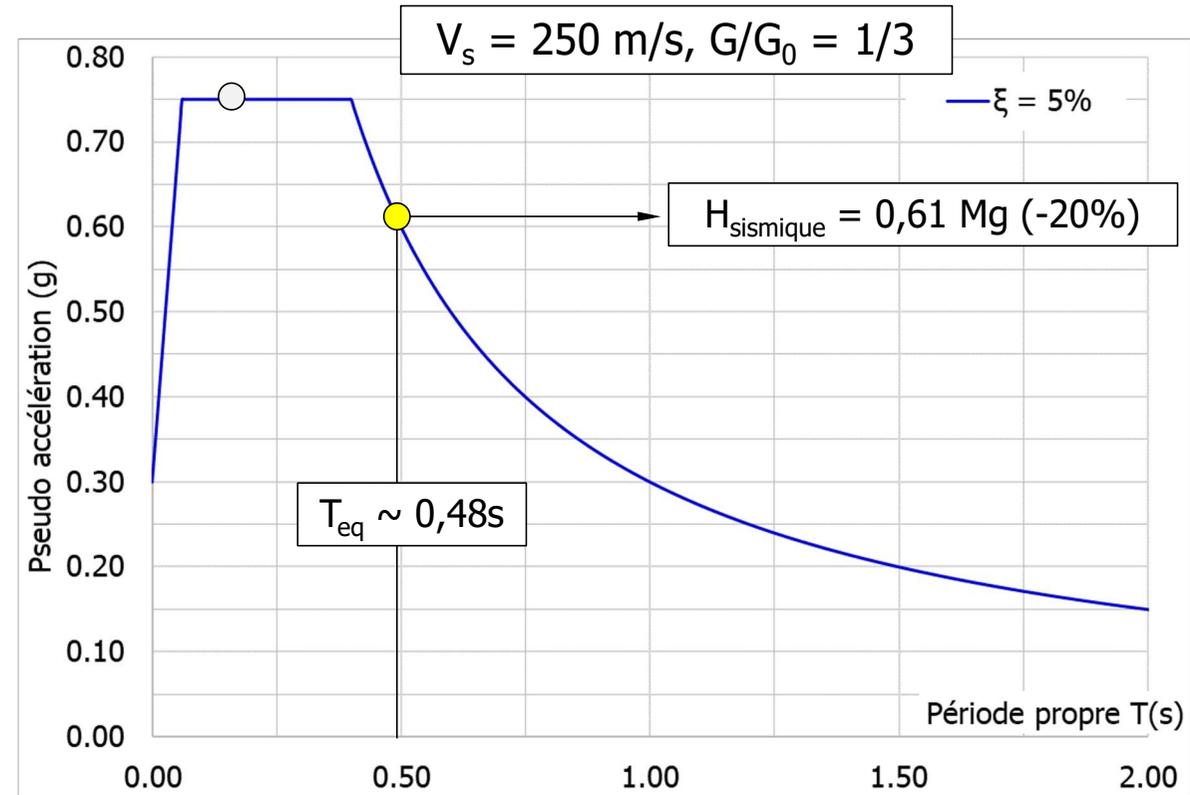
Spectre de réponse en pseudo-accélération (EC8 – sol C – PGA = 0,3g)

Apports de l'ISS sous action sismique

- Interaction inertielle : exemple d'un bâtiment « rigide » – ISS de niveau 2 (ressorts stat.)



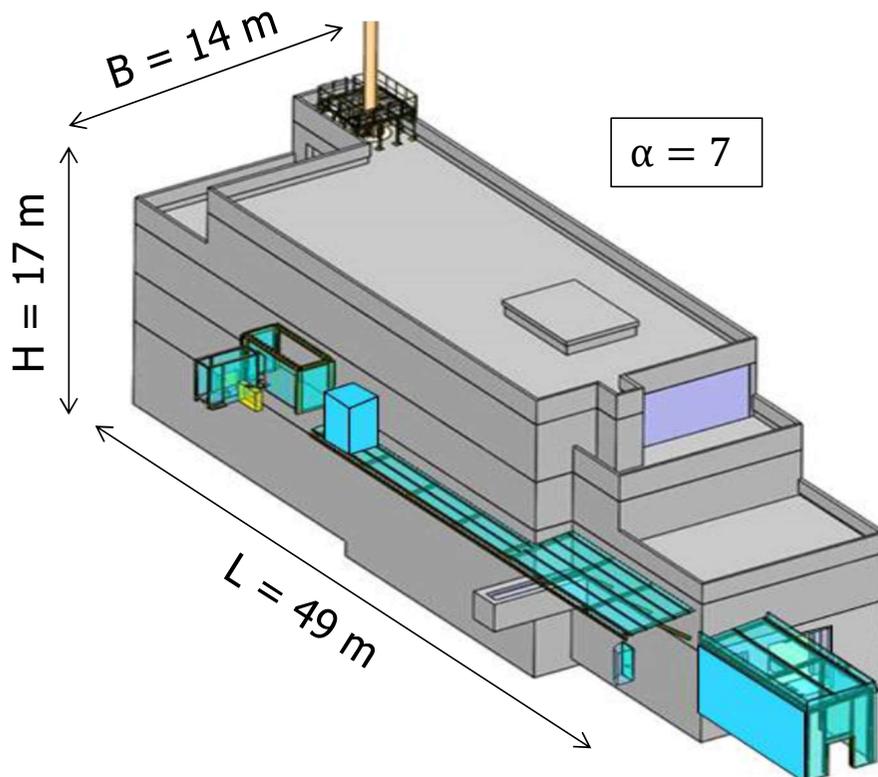
$T_0 = 0,17\text{s}$, $\xi_0 = 5\%$, $M = 10\,500$ tonnes



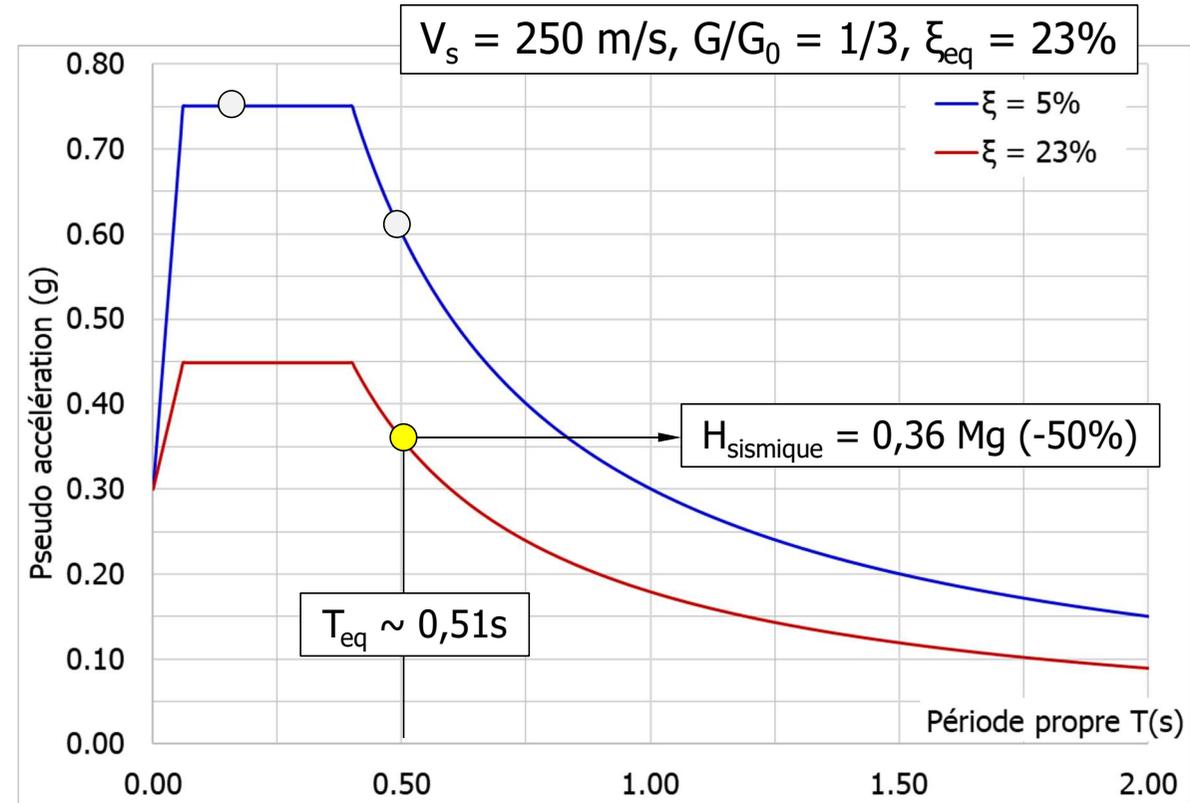
Spectre de réponse en pseudo-accélération (EC8 – sol C – PGA = 0,3g)

Apports de l'ISS sous action sismique

- Interaction inertielle : exemple d'un bâtiment « rigide » – ISS de niveau 3 (impédances dyn)



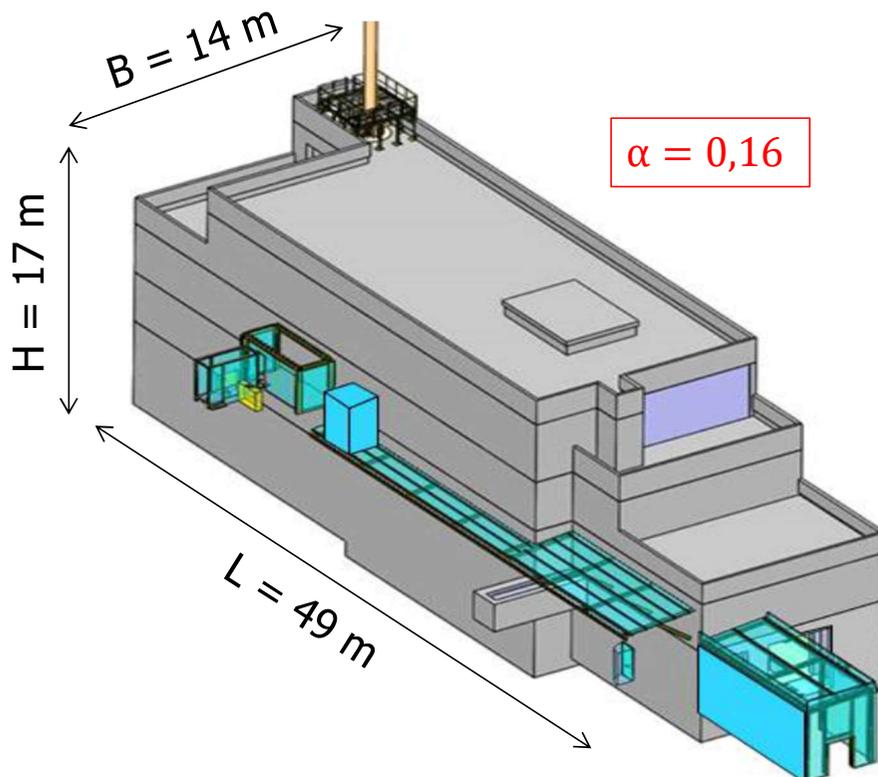
$T_0 = 0,17s, \xi_0 = 5\%, M = 10\ 500$ tonnes



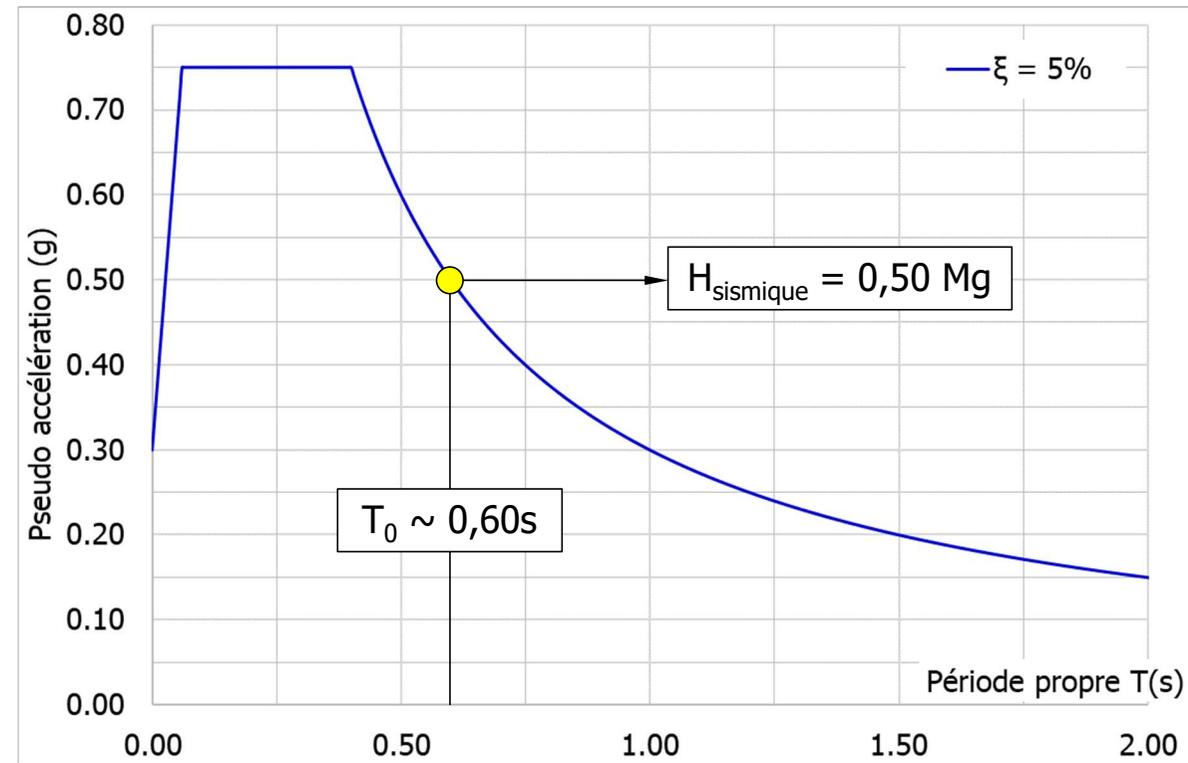
Spectre de réponse en pseudo-accélération (EC8 – sol C – PGA = 0,3g)

Apports de l'ISS sous action sismique

- Interaction inertielle : exemple d'un bâtiment « souple » – ISS de niveau 1 (base fixe)



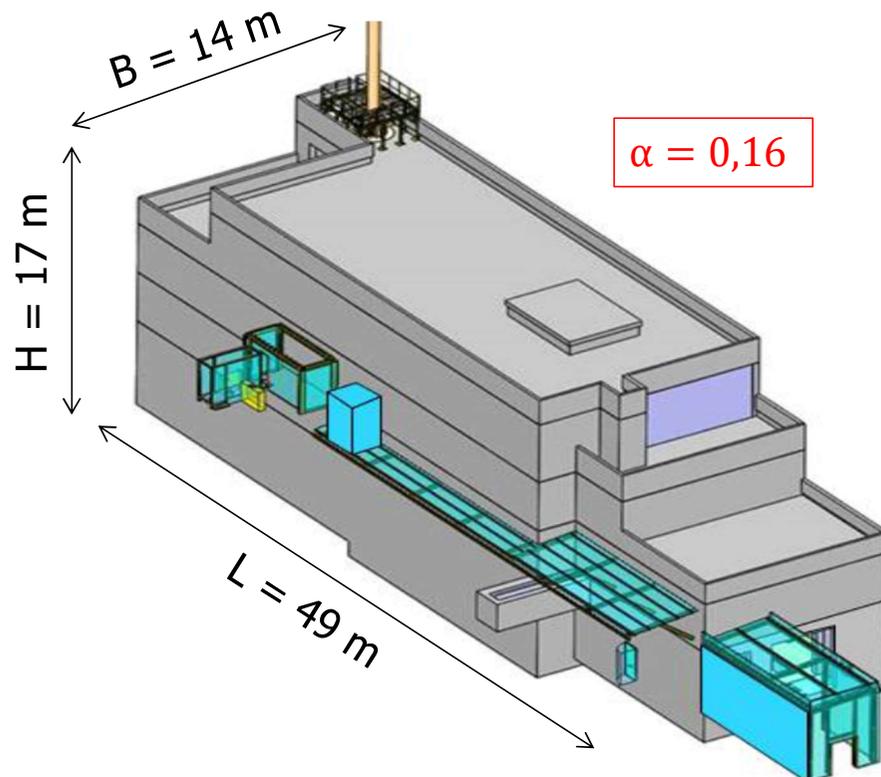
$T_0 = 0,60s$, $\xi_0 = 5\%$, $M = 3\ 000$ tonnes



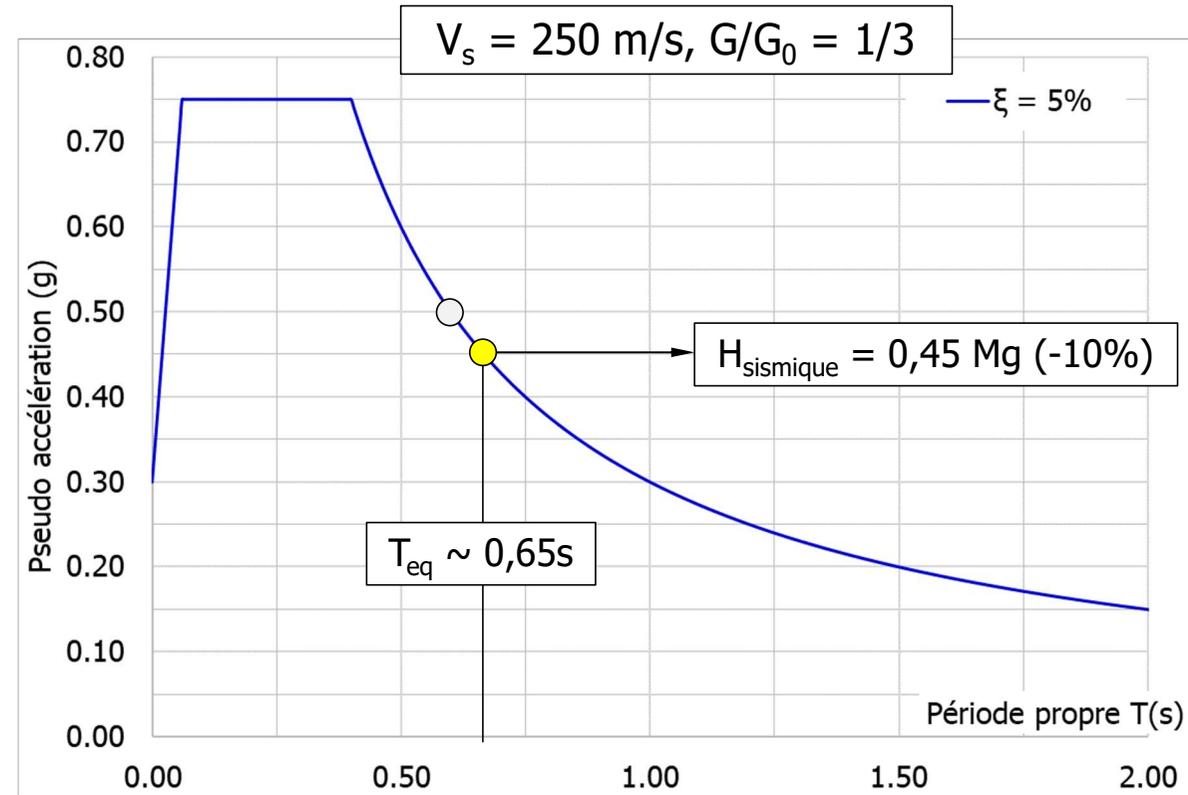
Spectre de réponse en pseudo-accélération (EC8 – sol C – PGA = 0,3g)

Apports de l'ISS sous action sismique

- Interaction inertielle : exemple d'un bâtiment « souple » – ISS de niveau 2 (ressorts stat.)



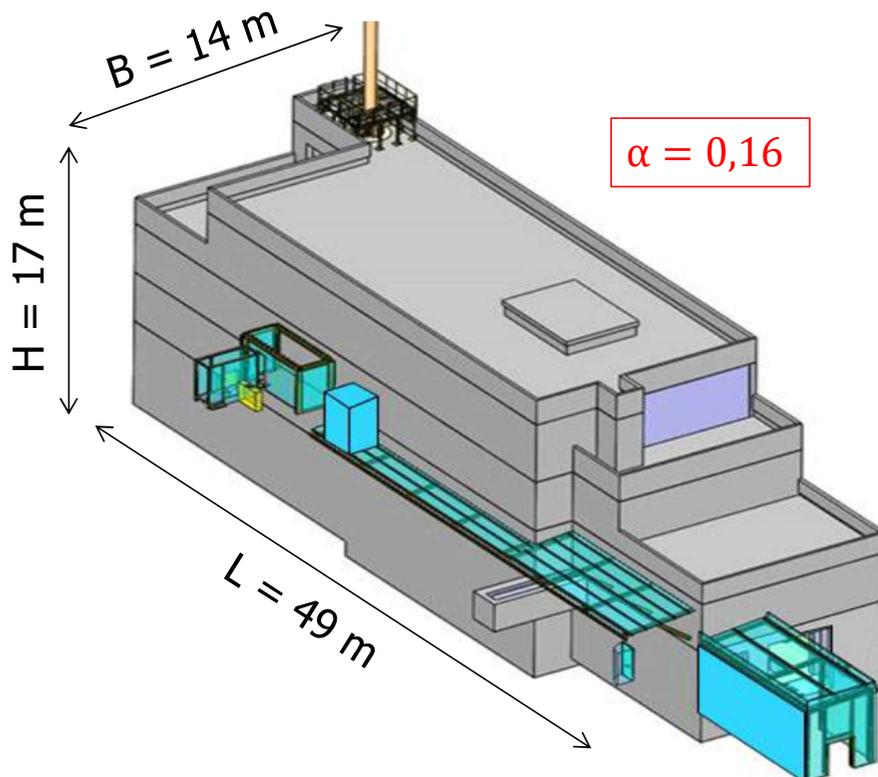
$T_0 = 0,60\text{ s}$, $\xi_0 = 5\%$, $M = 3\,000$ tonnes



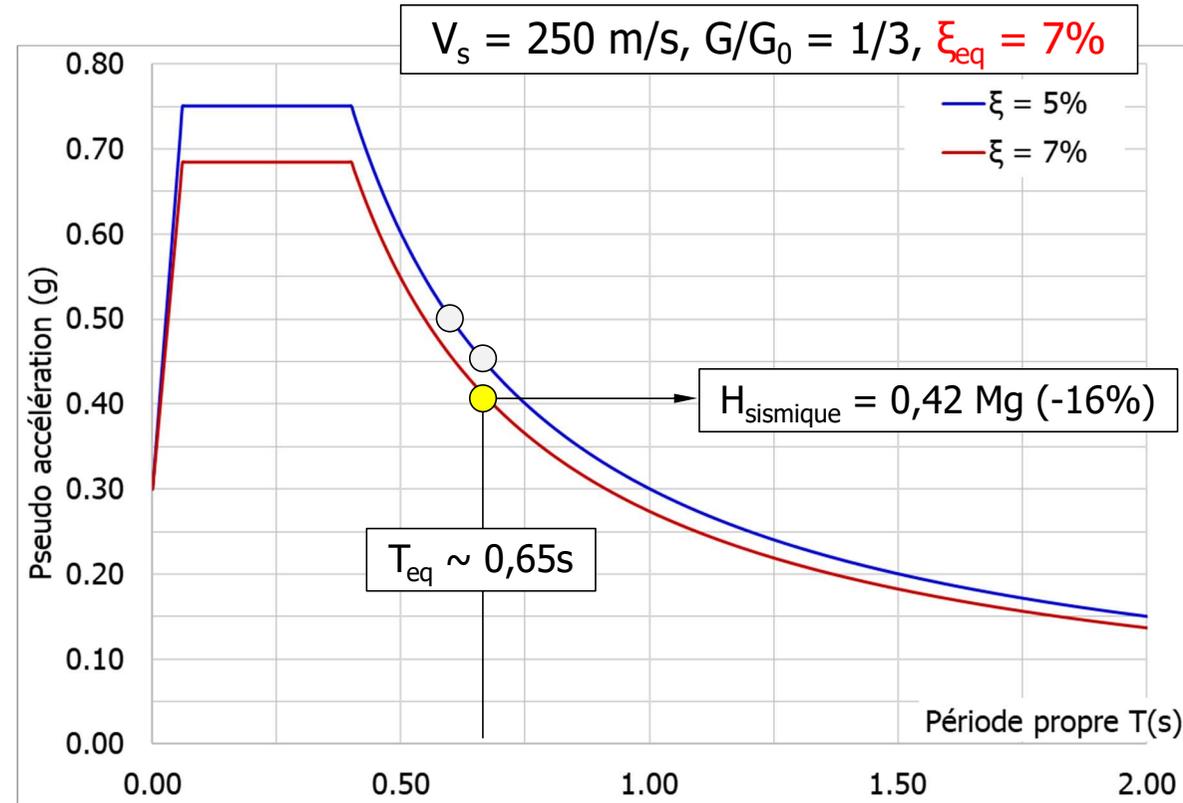
Spectre de réponse en pseudo-accélération (EC8 – sol C – PGA = 0,3g)

Apports de l'ISS sous action sismique

- Interaction inertielle : exemple d'un bâtiment « souple » – ISS de niveau 3 (impédances dyn)



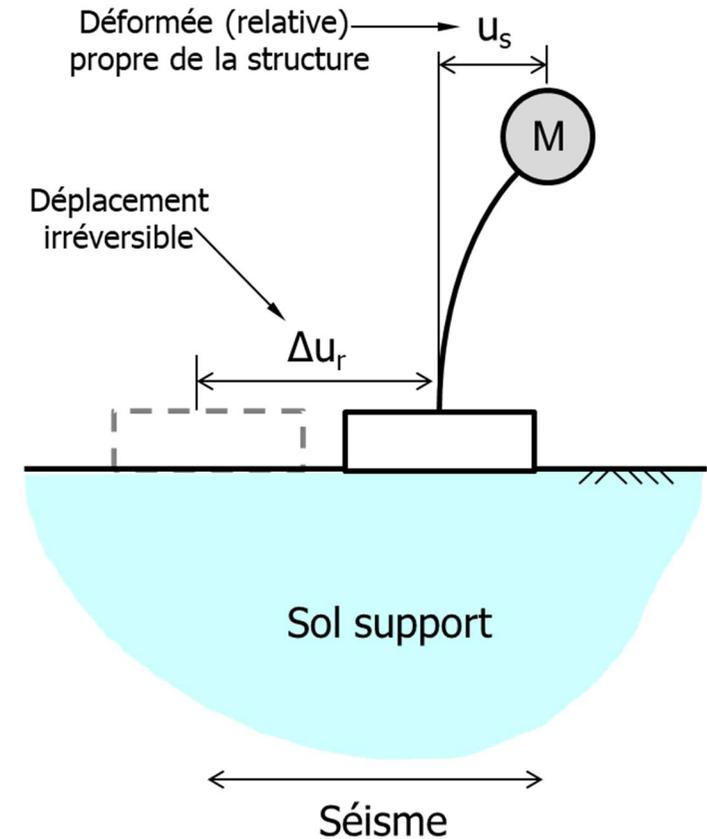
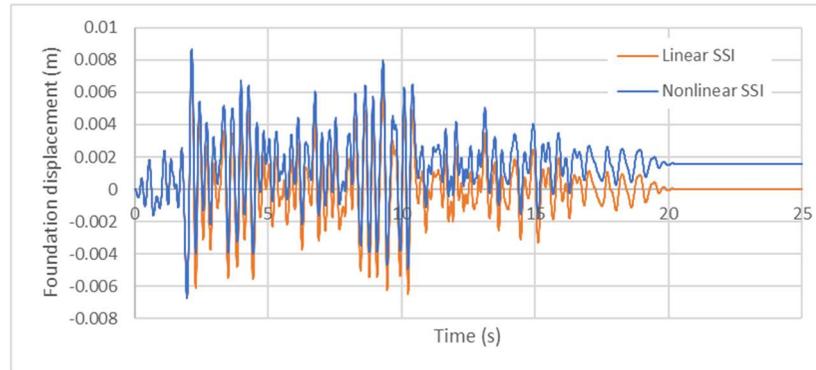
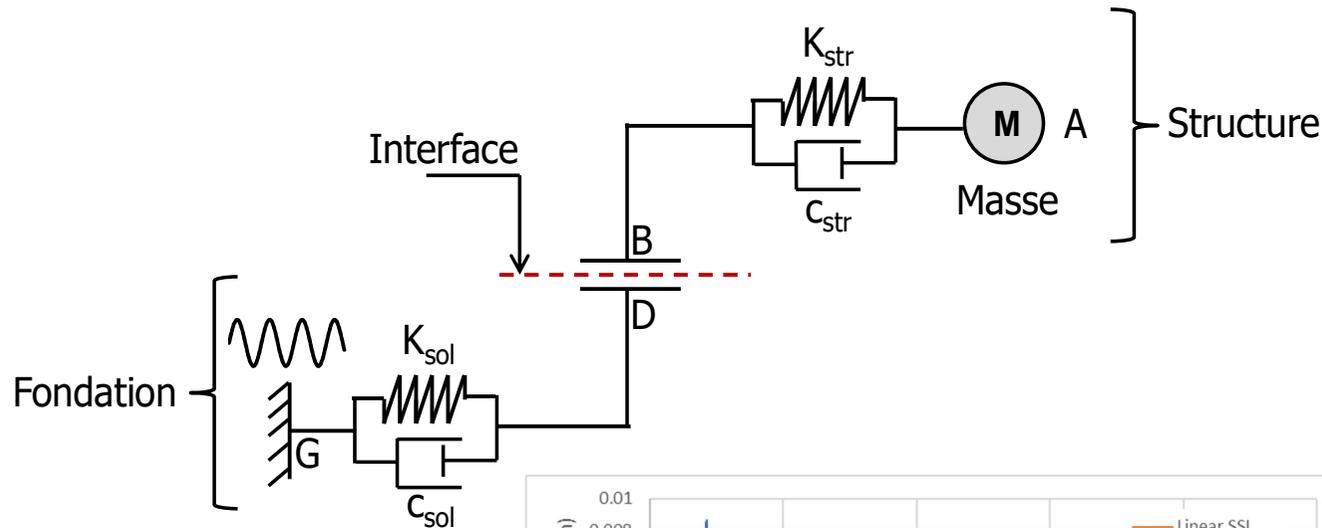
$T_0 = 0,60\text{s}$, $\xi_0 = 5\%$, $M = 3\ 000$ tonnes



Spectre de réponse en pseudo-accélération (EC8 – sol C – PGA = 0,3g)

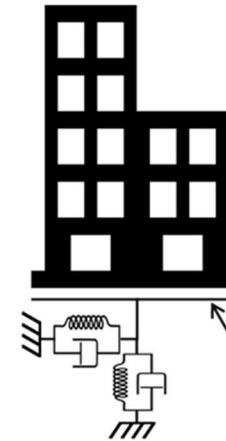
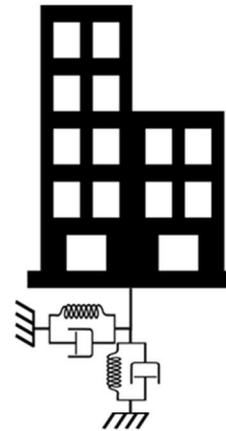
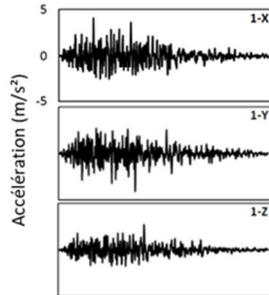
Apports de l'ISS sous action sismique

- ISS de niveau 4 : le déplacement comme critère de stabilité sismique



Apports de l'ISS sous action sismique

- ISS de niveau 4 : le déplacement comme critère de stabilité sismique



Macro élément

	Max. base shear (MN)	Max. acceleration (m/s ²)	Irreversible displacements (mm)
Without ISS - fixed base analysis	88	8.8	0
With ISS - Pseudo-static linear analysis	66	6.6	0
With ISS - Pseudo-static linear analysis with dynamic impedances	46	4.6	0
With ISS - Transient dynamic linear analysis	42	4.2	0
With ISS - Transient dynamic nonlinear analysis	35	3.5	1.56

Apports de l'ISS sous action sismique

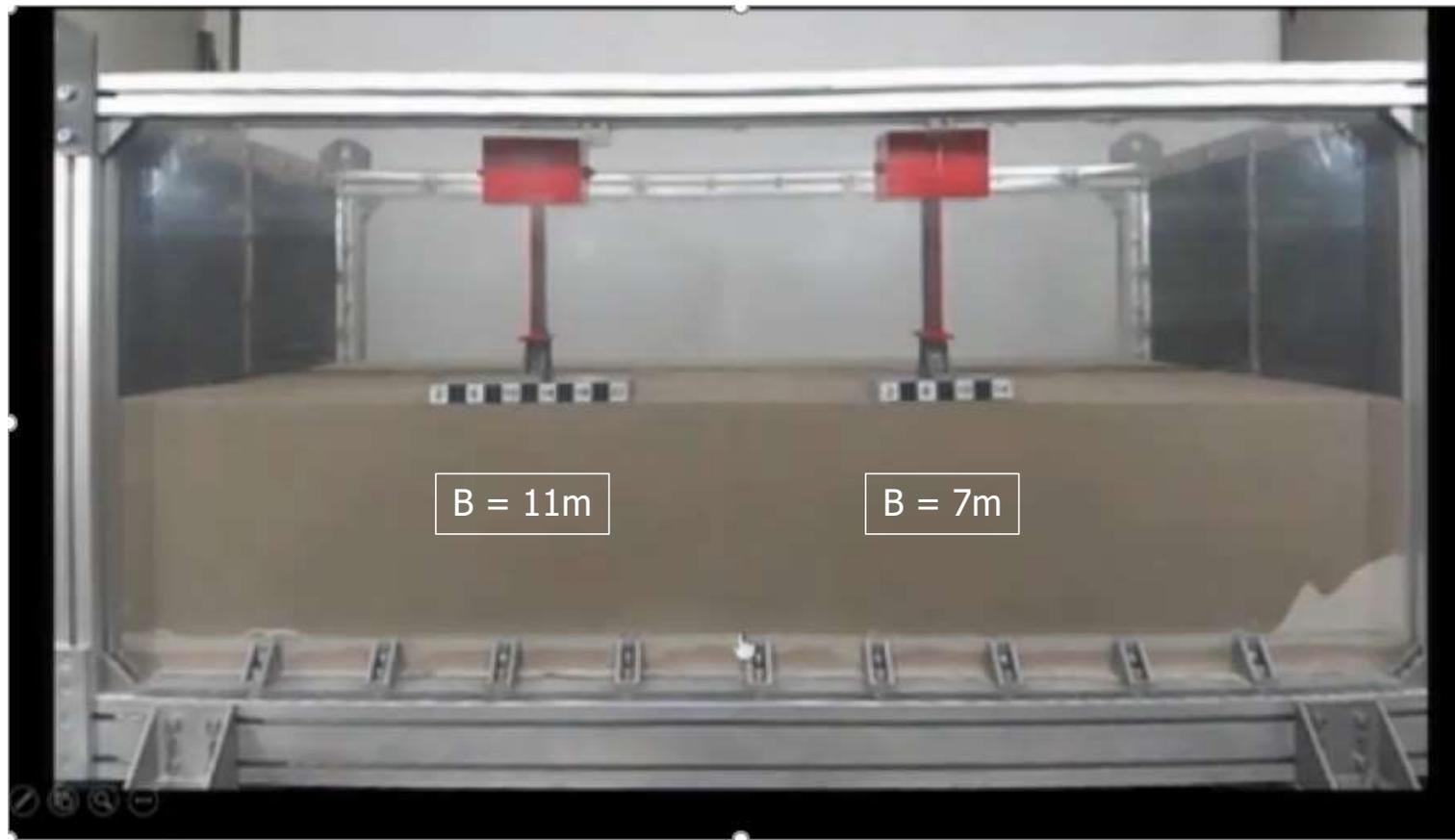
- ISS de niveau 4 : mise à profit des non linéarités du sol

Surdimensionnement n'est pas synonyme de robustesse



Apports de l'ISS sous action sismique

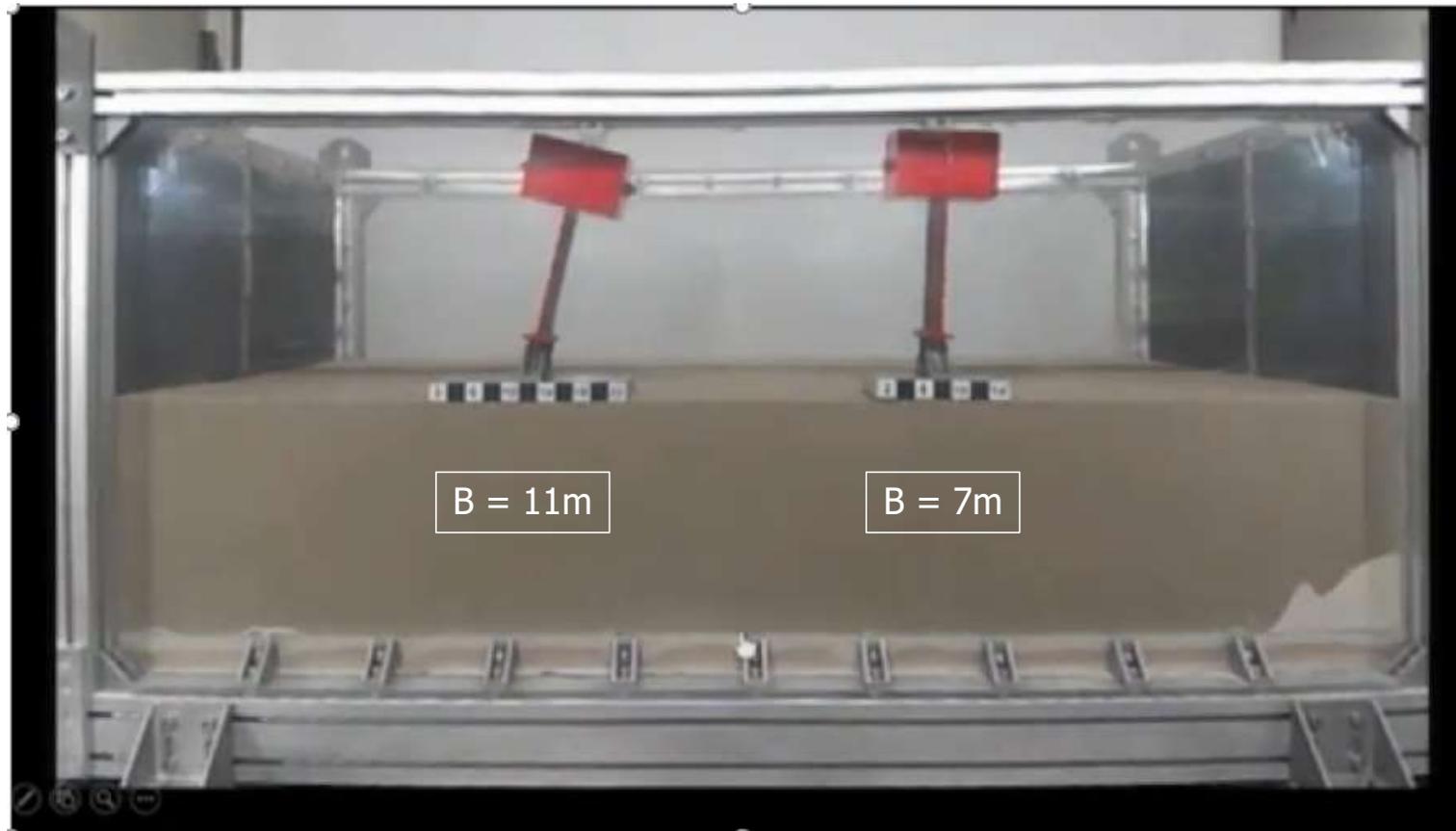
- ISS de niveau 4 : mise à profit des non linéarités du sol



(Gazetas, 2014)

Apports de l'ISS sous action sismique

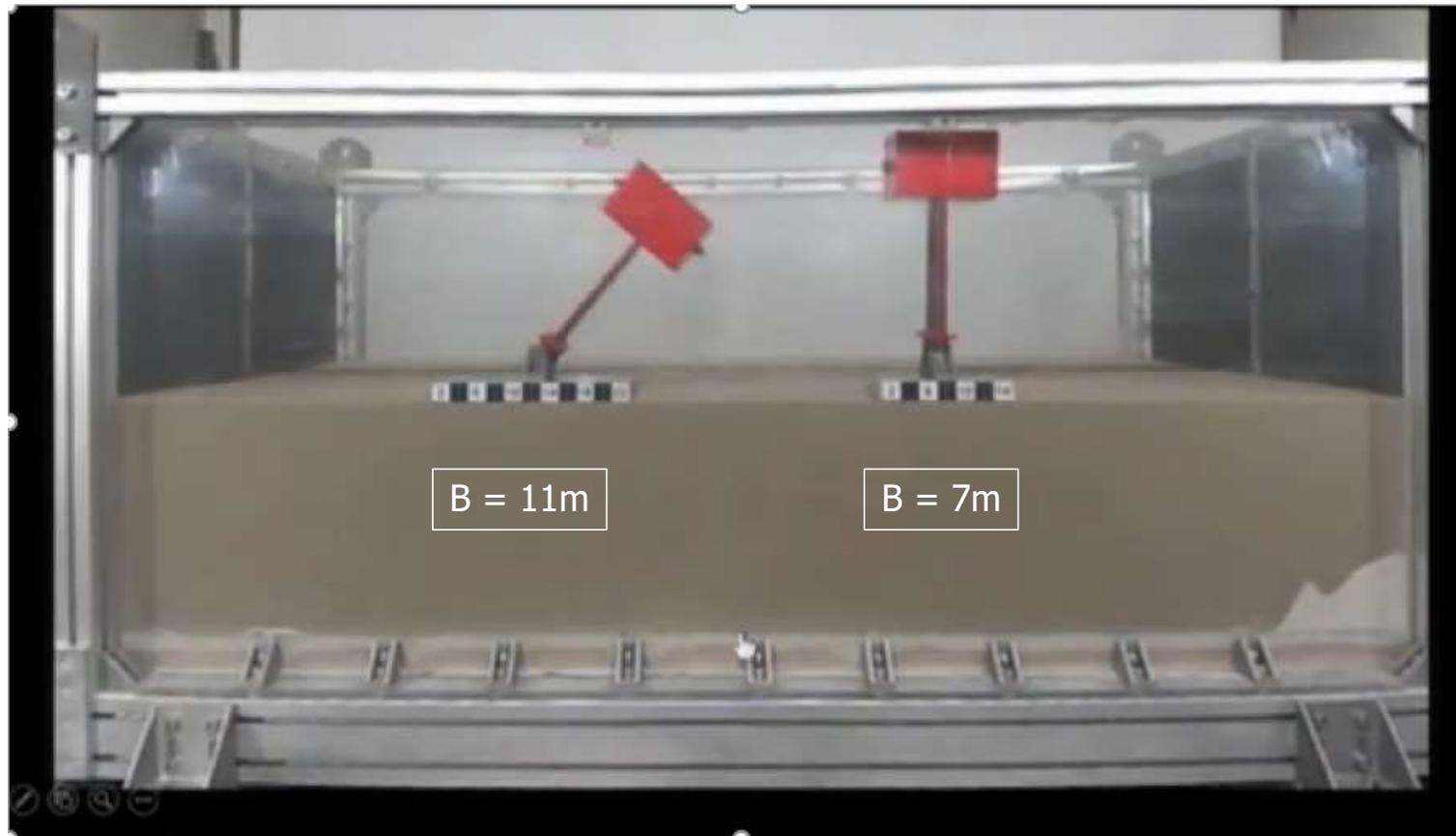
- ISS de niveau 4 : mise à profit des non linéarités du sol



(Gazetas, 2014)

Apports de l'ISS sous action sismique

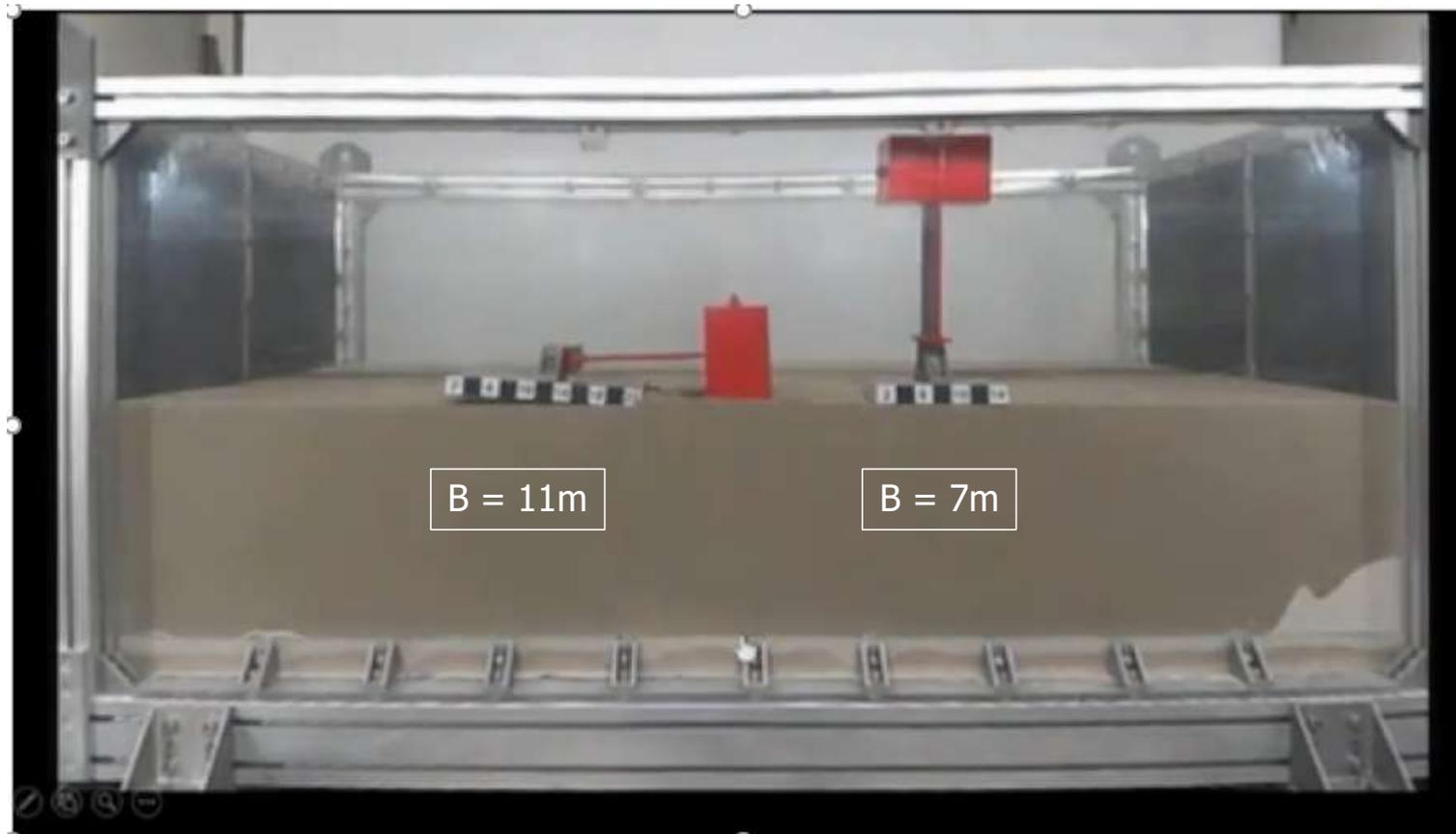
- ISS de niveau 4 : mise à profit des non linéarités du sol



(Gazetas, 2014)

Apports de l'ISS sous action sismique

- ISS de niveau 4 : mise à profit des non linéarités du sol



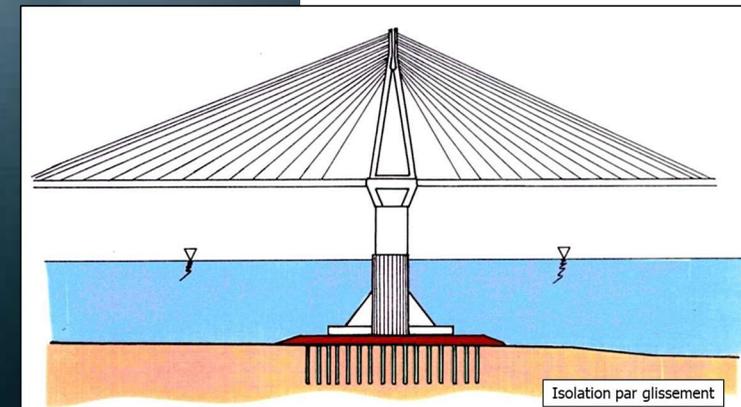
(Gazetas, 2014)

Apports de l'ISS sous action sismique

- ISS de niveau 4 : mise à profit des non linéarités du sol



L'exemple du pont Rion-Antirion



Sommaire

- Introduction
- Les points clés à gérer
- Apports de l'ISS sous charge statique
- Apports de l'ISS sous action sismique
- Enseignements

Enseignements

- L'ISS vise une estimation plus fine des déplacements et des sollicitations, son importance est liée à la notion de rigidité relative de la structure par rapport au sol
- L'ISS nécessite par construction la mise en œuvre d'un modèle en déplacement. Les déplacements calculés nécessitent d'être confrontés à des critères
- Sous charge statique, l'ISS permet une homogénéisation de la DDC. Cela permet dans certains cas d'optimiser le dimensionnement global des fondations et de s'affranchir de certains problèmes parasites (ex. : mise en traction de certains éléments de fondation)
- Sous action sismique et d'une manière générale, pour les cas où la source de sollicitation est un déplacement, l'ISS permet généralement d'optimiser l'amplitude des sollicitations

Merci pour votre attention



setec

Fahd Cuir
fahd.cuir@setec.com