



Journée Scientifique et Technique - 3 avril 2019

A la frontière entre géotechnique et parasismique

Etude expérimentale en centrifugeuse du comportement d'un groupe de pieux sous séisme

Jesús Pérez Herreros (Terrasol/ECN/IFSTTAR)

Encadrement: S. Escoffier (IFSTTAR), P. Kotronis (ECN) et F. Cuira (Terrasol)

Réponse dynamique d'une structure supportée par des fondations profondes → **problème complexe d'Interaction Sol-Structure (ISS)**



Traditionnellement: **études/dimensionnement limités au cas des problèmes linéaires** et de préférence approches linéaires équivalents



Nouveaux codes (ex. EC8): reconnaissent désormais **l'effet d'ISS et des mécanismes non-linéaires de dissipation d'énergie**



Intérêt grandissant pour **modéliser le comportement non-linéaire des fondations sous séisme**



Développement de **nouvelles approches de calcul permettant de prendre en compte ces phénomènes**

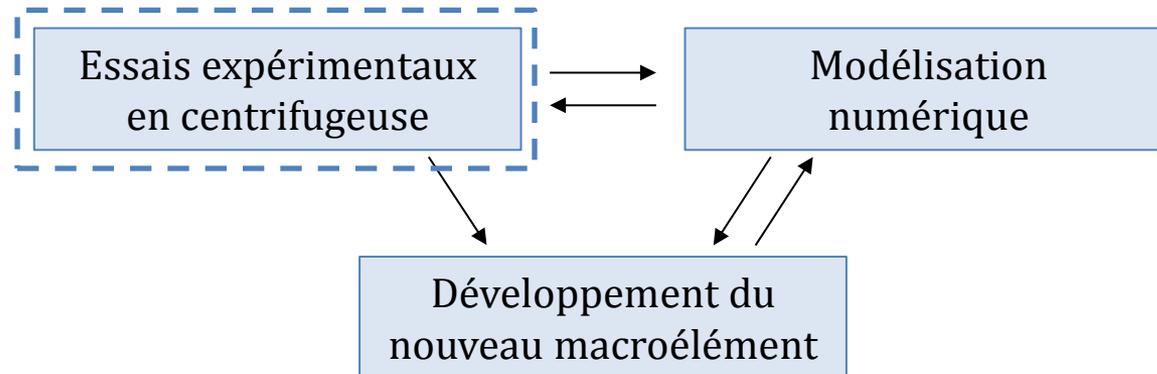
(ex. projets de recherche récents, Recommandations AFPS2020)

Contexte de l'étude

- Thèse CIFRE
« *Comportement sismique des fondations: vers l'introduction d'un aspect fréquentiel dans l'outil macroélément pour les fondations profondes* »



- **Objectif:** introduire l'effet de groupe et de la fréquence dans l'outil macroélément pour les fondations profondes sous sollicitations dynamiques (Correia *et al.* 2012, Li *et al.* 2016)
- Approche couplée expérimentale/numérique



Pourquoi faire de la modélisation physique en centrifugeuse?

- Le comportement des sols est fonction de **l'histoire et du niveau de contraintes** auxquelles ils sont soumis.
- Reproduire le même état de contraintes est donc une **condition nécessaire** pour que les modèles réduits simulent le comportement réel de l'ouvrage en vraie grandeur.
- La modélisation en centrifugeuse permet d'obtenir ce résultat en augmentant à volonté les forces de masse dans le modèle.



[Vidéo centrifugeuse en fonctionnement](#)

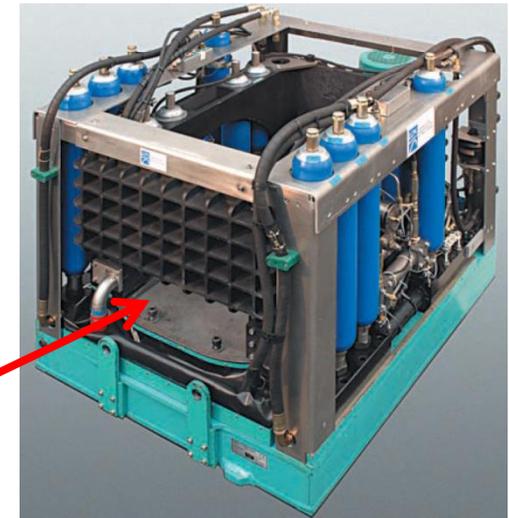
- Ouvrage réel:
$$\sigma_v = \rho g z$$
- Modèle réduit au 1/N non centrifugé
$$\sigma_v = \rho g (z/N)$$
- Modèle réduit au 1/N centrifugé à Ng
$$\sigma_v = \rho (Ng) (z/N) = \rho g z$$

Pourquoi faire de la modélisation physique en centrifugeuse?

- Le comportement des sols est fonction de **l'histoire et du niveau de contraintes** auxquelles ils sont soumis.
- Reproduire le même état de contraintes est donc une **condition nécessaire** pour que les modèles réduits simulent le comportement réel de l'ouvrage en vraie grandeur.
- La modélisation en centrifugeuse permet d'obtenir ce résultat en augmentant à volonté les forces de masse dans le modèle.

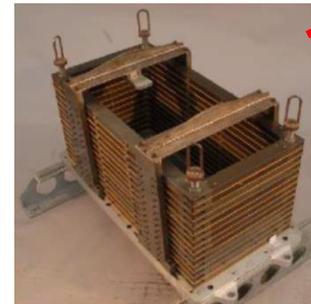
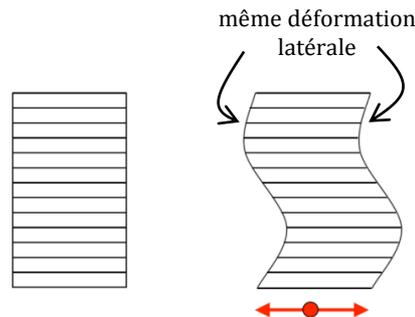
Simulateur de séismes embarqué

- Permet d'appliquer des sinusoïdes et des séismes réels à la base du modèle (prise en compte des effets inertiels et cinématiques)



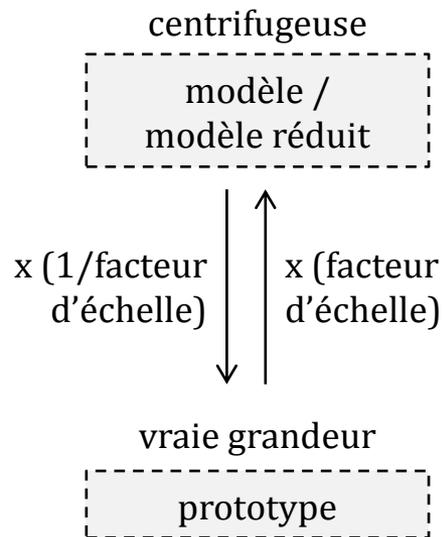
Conteneur ESB (équivalent shear beam)

- Conditions aux limites semblables à celles d'une colonne de sol (champ libre)



Conditions de similitude et facteurs d'échelle

- Similitude de comportement modèle réduit/ouvrage en vraie grandeur → rapports constants (facteurs d'échelle) entre les variables au niveau modèle réduit et celles décrivant le système prototype.
- Analyse dimensionnelle appliquée aux équations de la mécanique → relations entre les différents facteurs d'échelle (Schofield 1981, Schofield et Steedman 1988, Garnier 2001, etc.)



Grandeur physique	Facteur d'échelle	Unité SI
Déplacement, longueur	1/N	m
Vitesse	1	m/s
Accélération	N	m/s ²
Masse volumique	1	kg/m ³
Masse	1/N ³	kg
Pression, contrainte	1	Pa (N/m ²)
Déformation	1	-
Force	1/N ²	N
Moment	1/N ³	N/m
Rigidité à la flexion (EI)	1/N ⁴	N.m ²
Module de déformation	1	N/m ²
Temps (problème de dynamique)	1/N	s
Temps (problème de diffusion)	1/N ²	s
Fréquence	N	Hz (1/s)
Energie	1/N ³	J

Présentation de l'étude expérimentale en centrifugeuse

- Autres avantages de la modélisation en centrifugeuse:
 - Prise en compte de la **réponse non-linéaire** du sol dans les simulations;
 - Réalisation d'**études paramétriques** → observer impact de certains paramètres dans la réponse: type de fondation, fréquence de sollicitation, type de sol, stratigraphie, etc.;
 - Accès aux grandeurs physiques couramment mesurées sur les ouvrages réels grâce à des capteurs adaptés: déplacement, rotation, déformation, pression, accélération, température...
- Une série d'essais expérimentaux en centrifugeuse:
 - **incrémenter la base de données existante:**
 - peu d'études expérimentales sur le comportement des pieux dans des sols argileux et des profils stratifiés et soumis à des chargements sismiques (Meymand 1998, Wang *et al.* 1998, Wilson 1998, Boulanger *et al.* 1999, Banerjee 2009, Zhang *et al.* 2017, Taghavi *et al.* 2017);
 - support au développement des nouvelles normes et recommandations de calcul;
 - **valider les modèles numériques.**



Nota: tous les tests ont été réduits au 1/50^{ème} et testés sous 50g (N=50)

Essais dynamiques: groupe de 5 pieux avec superstructure courte

C07

Superstructure courte

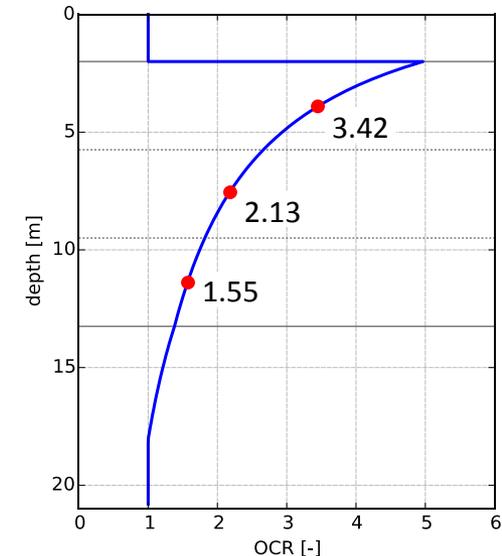
- rapport d'élanement: $H/B = 1.2$
- fréq. base encastrée (à 50g): 1.54 Hz
- masse totale (à 50g): 136.5 t

Sable d'Hostun HN31 sec

- pluviation ($I_D = 81\%$)

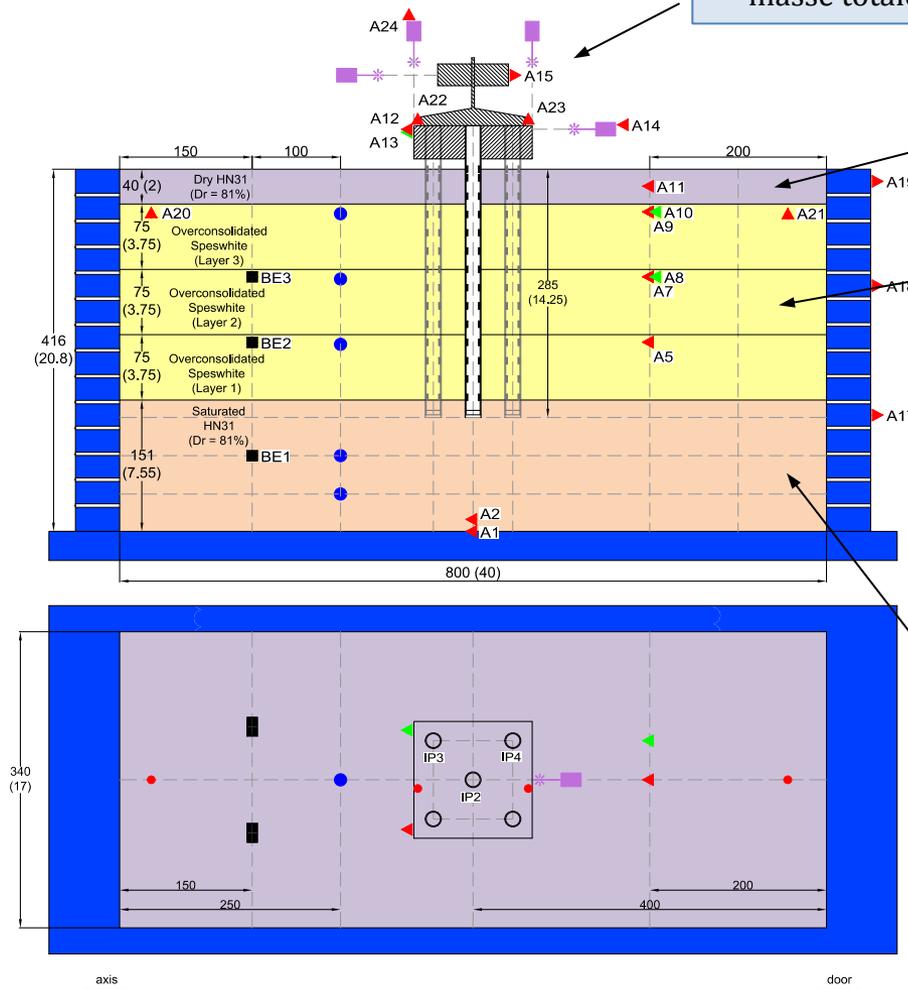
Kaolinite Speswhite surconsolidée

- préchargement 160 kPa sous 1g



Sable d'Hostun HN31 saturé

- pluviation ($I_D = 81\%$)
- saturation à l'eau sous vide



Essais dynamiques: groupe de 5 pieux avec superstructure haute

C08

Superstructure haute

- rapport d'élanement: $H/B = 3.5$
- fréq. base encastrée (à 50g): 1.5 Hz
- masse totale (à 50g): 154 t

Sable d'Hostun HN31 sec

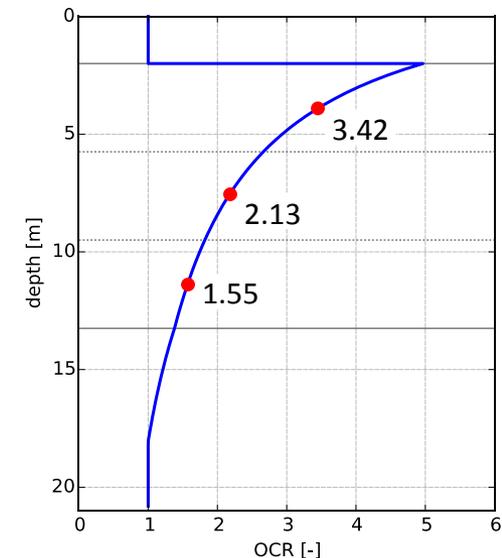
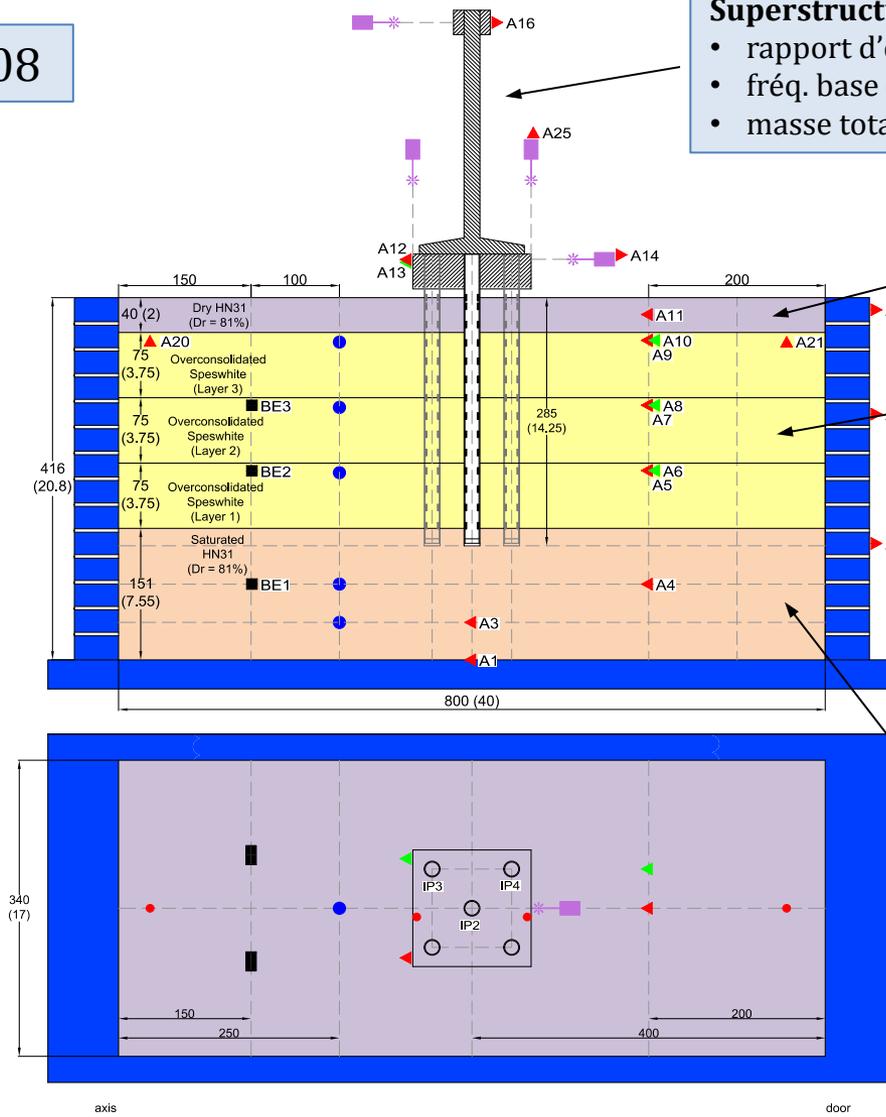
- pluviation ($I_D = 81\%$)

Kaolinite Speswhite surconsolidée

- préchargement 160 kPa sous 1g

Sable d'Hostun HN31 saturé

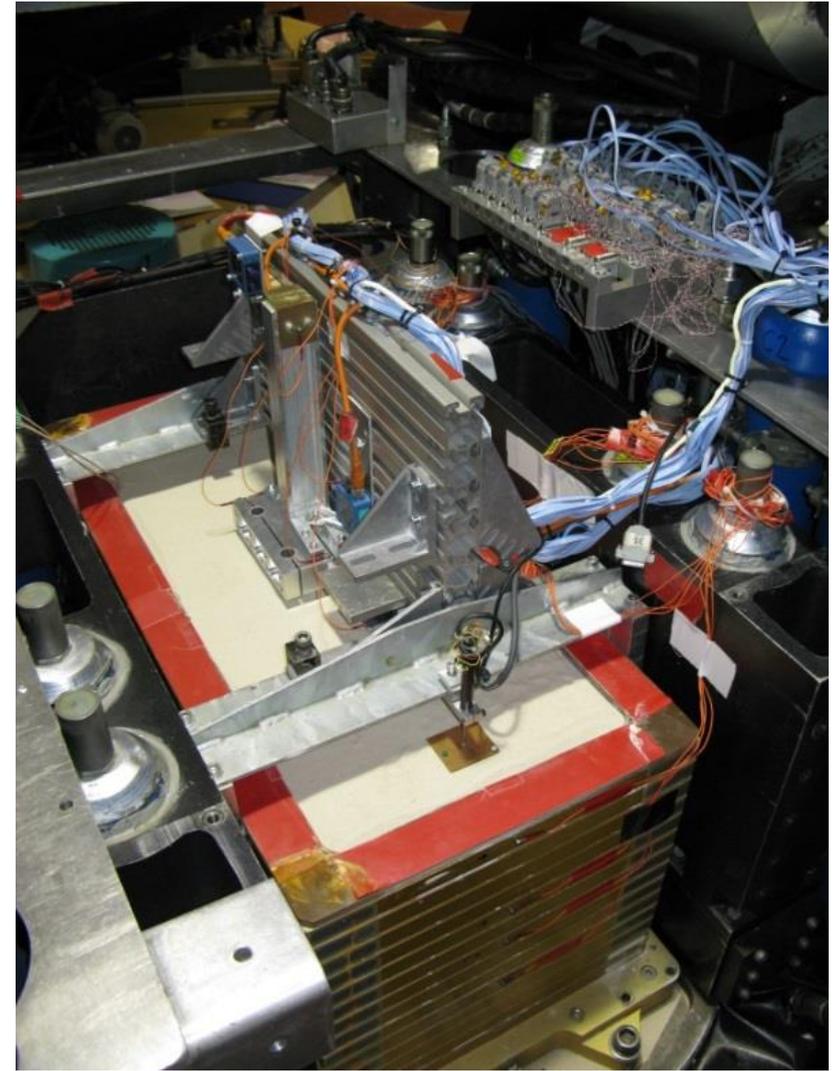
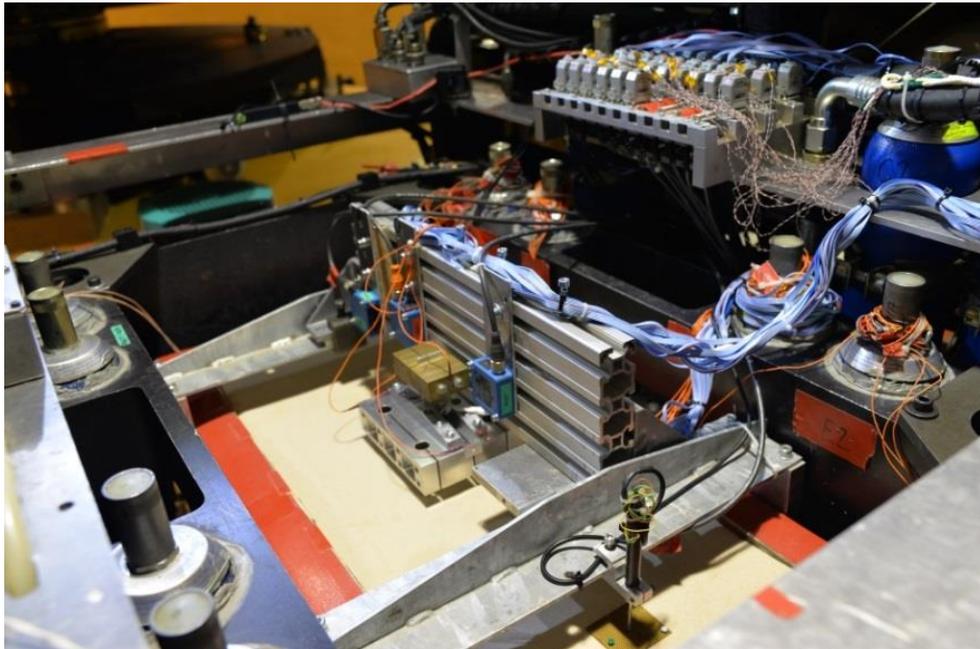
- pluviation ($I_D = 81\%$)
- saturation à l'eau sous vide



Photos montage essais dynamiques

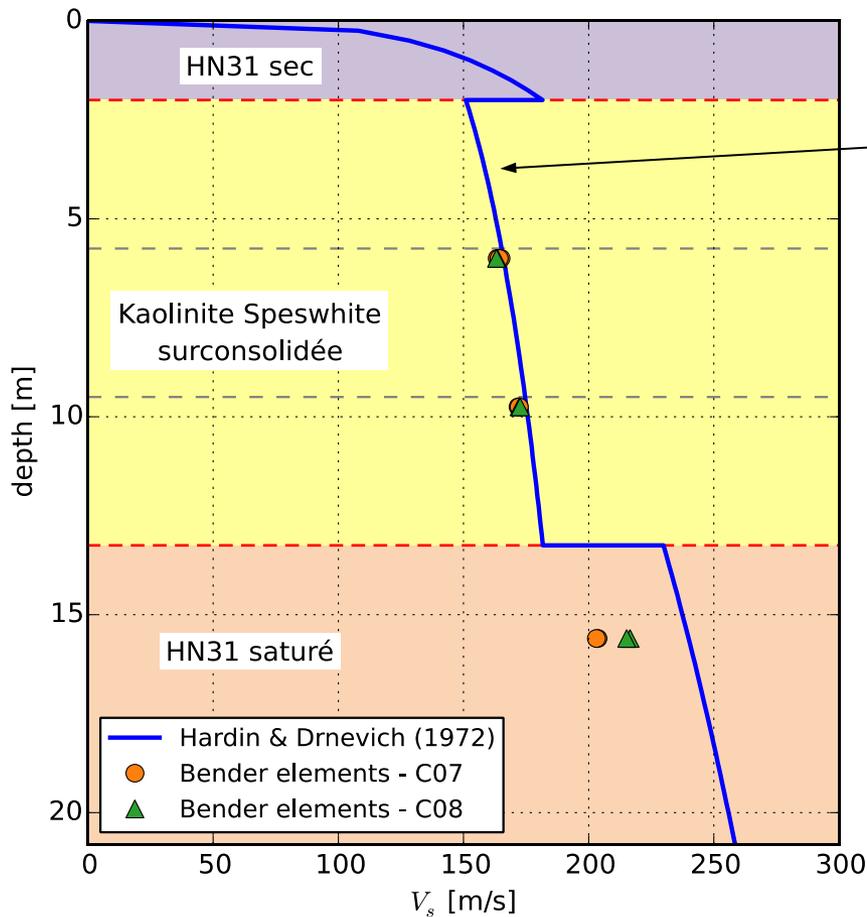


Photos montage essais dynamiques



Reproductibilité des profils de sol

- Mesures bender avant le premier tir → valeurs de V_s avec « *First arrival method* » → identification visuelle (Mitaritonna *et al.* 2010)



Hardin & Drnevich (1972)

$$G_{\max} = 625 \frac{OCR^k}{0.3 + 0.7e^2} \sqrt{p_a \sigma'_m}$$

$$V_s = \sqrt{G_{\max} / \rho}$$

C07 vs C08

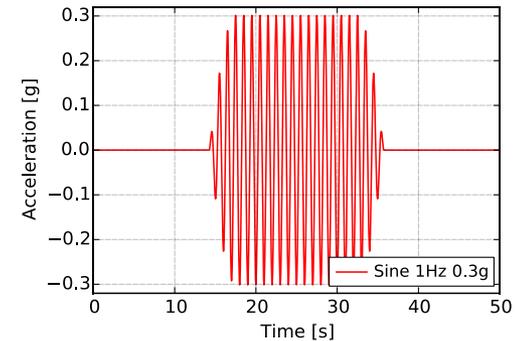
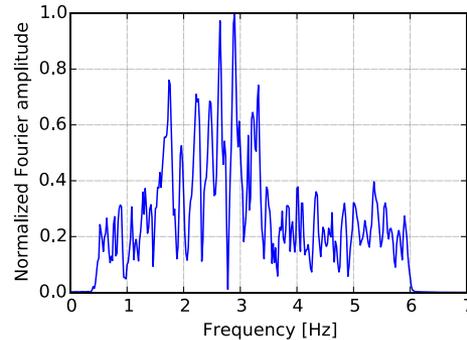
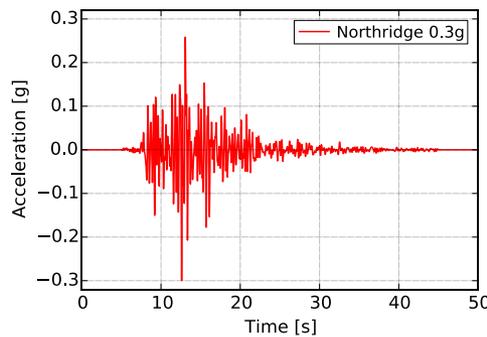
- Clay: 0.6%
- HN31: 6.2%



reproductibilité satisfaisante du profil de sol

Signaux appliqués

- Deux types:
 - séismes réels large spectre (Landers 1992, Northridge 1994)
 - sinus 1, 1.8, 2.4 et 3.2 Hz

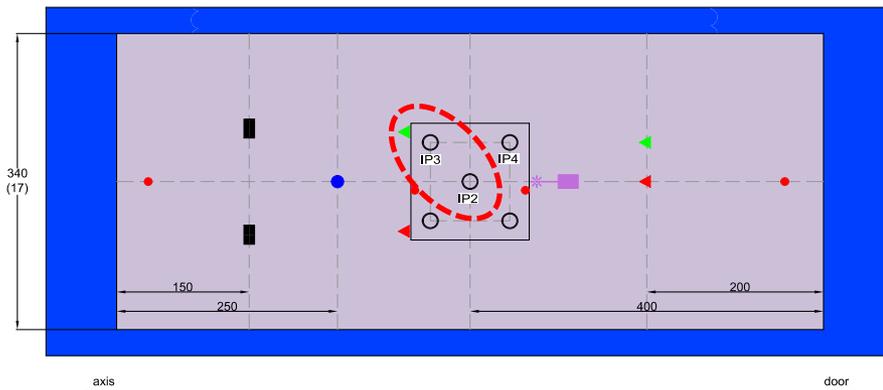
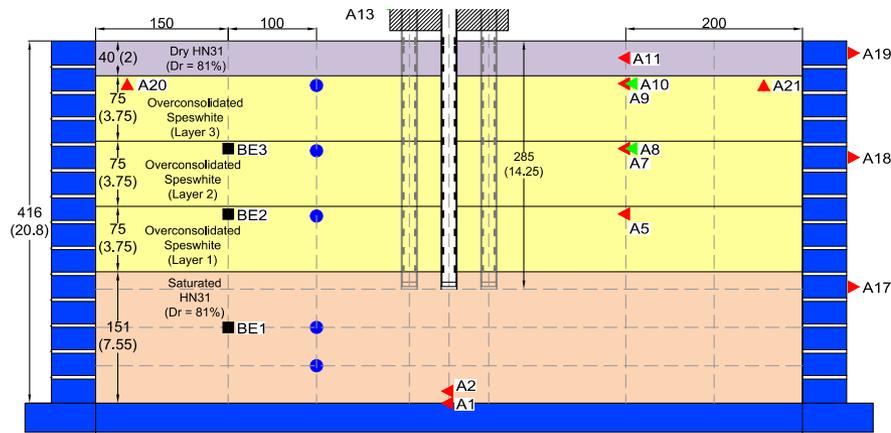


- Ordre d'application

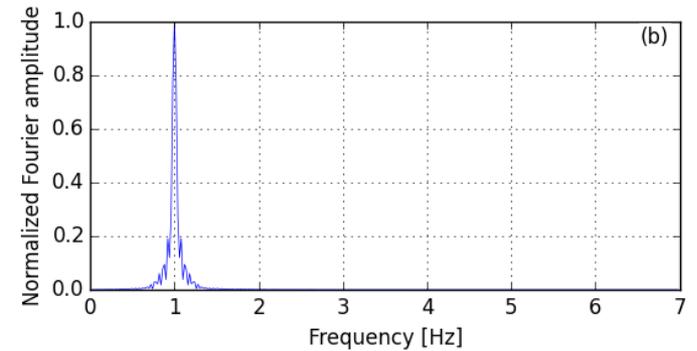
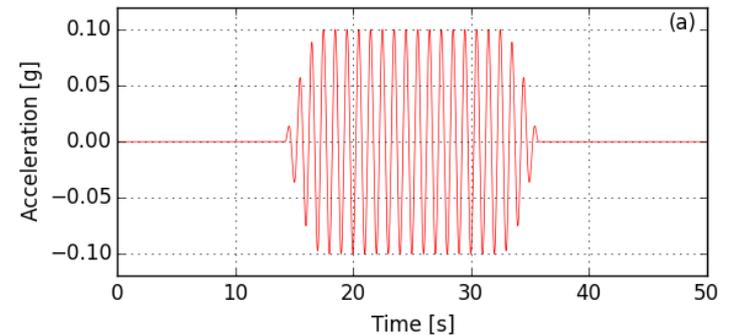


	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	Arias Intensity (m/s)
Northridge	0.05	3.66	0.463	0.025
Landers	0.05	5.097	1.062	0.031
Northridge	0.3	21.958	2.777	0.897
Landers	0.3	30.582	6.37	1.109
Sine 1Hz	0.1	15.663	2.851	1.417
Sine 3.2Hz	0.1	4.873	0.277	0.443
Sine 1.8Hz	0.1	8.692	0.879	0.787
Sine 2.4Hz	0.1	6.499	0.493	0.588
Sine 1Hz	0.3	46.989	8.553	12.76
Sine 3.2Hz	0.3	14.618	0.832	3.986
Sine 1.8Hz	0.3	26.076	2.637	7.087
Sine 2.4Hz	0.3	19.496	1.479	5.295
Northridge	0.05	3.66	0.463	0.025
Landers	0.05	5.097	1.062	0.031

Evolution du profil des moments avec le temps: Sinus 1Hz, 0.1g



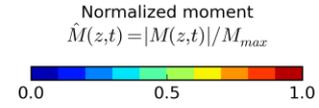
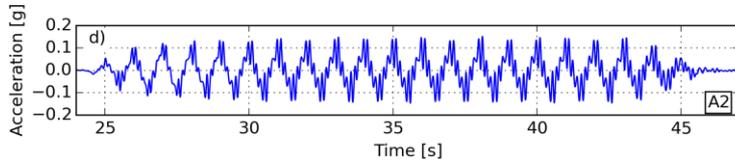
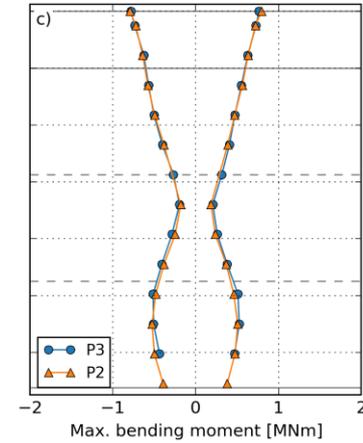
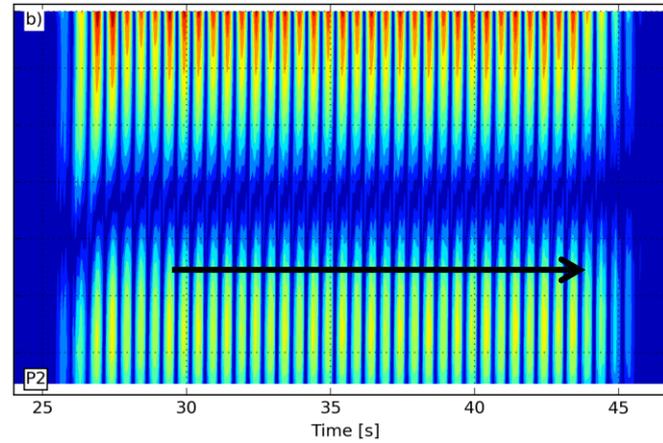
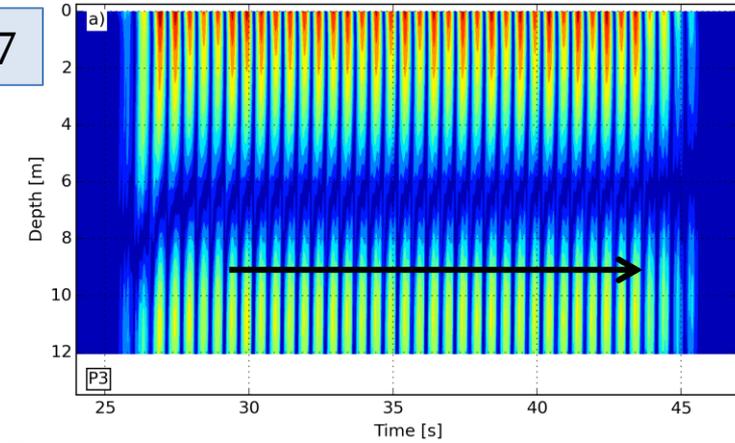
Sinus 1Hz, 0.1g



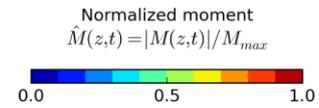
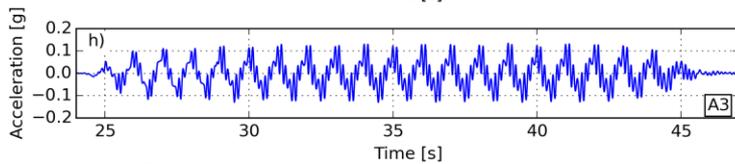
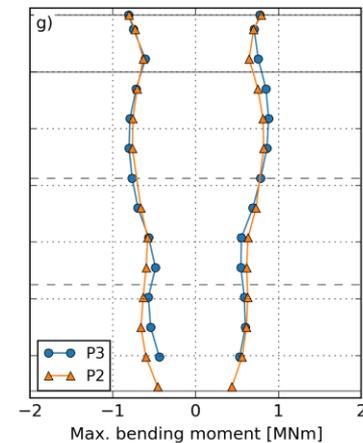
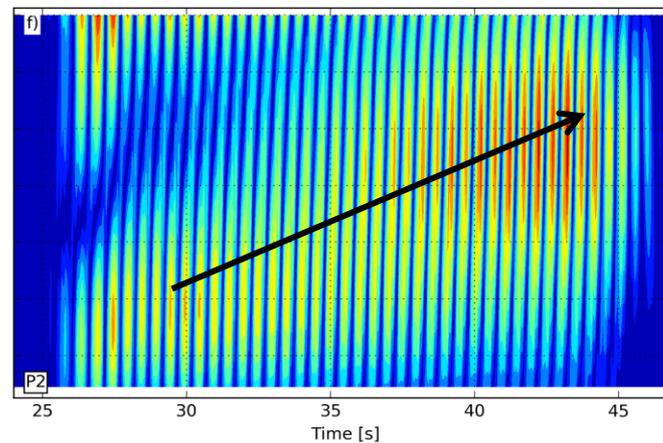
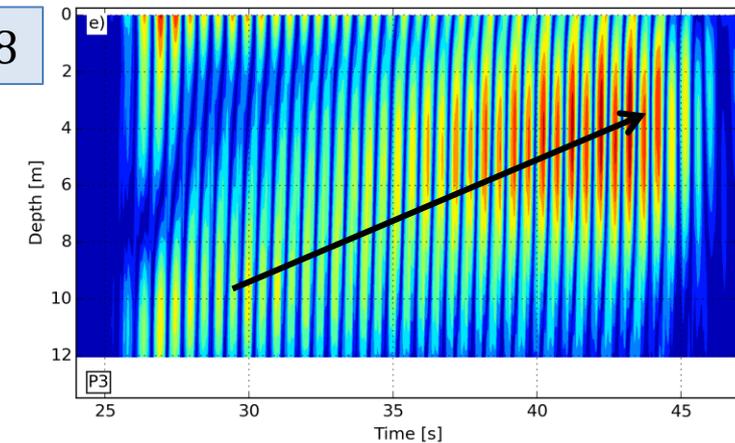
[Vidéo de l'évolution temporelle du profil des moments](#)

Evolution du profil des moments avec le temps: Sinus 1Hz, 0.1g

C07

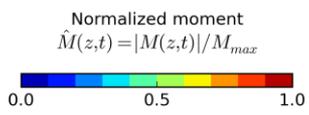
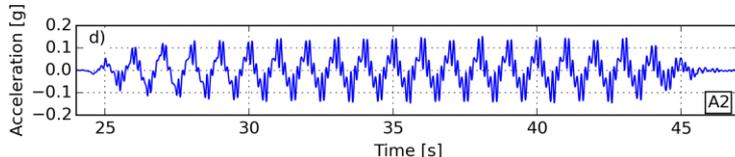
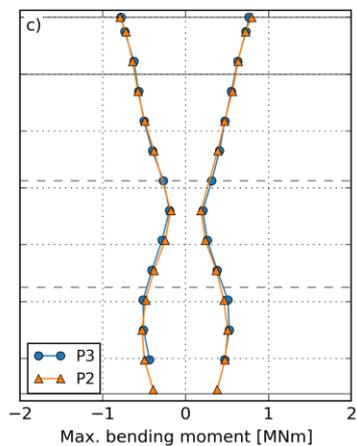
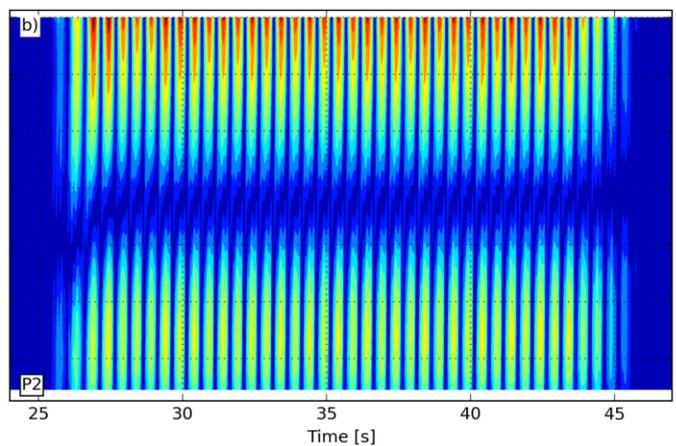
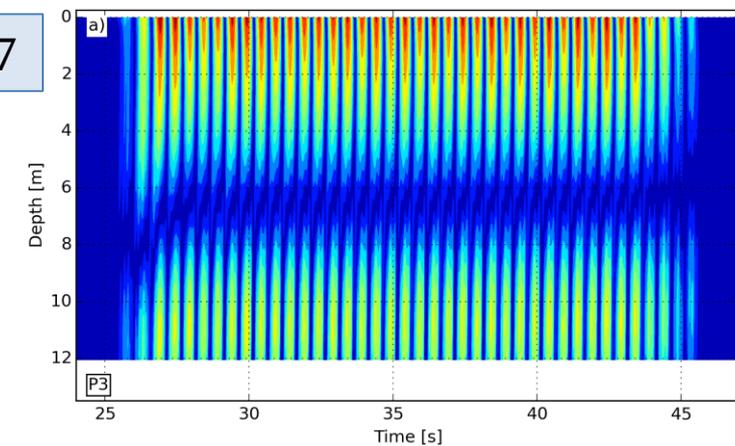


C08



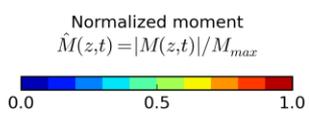
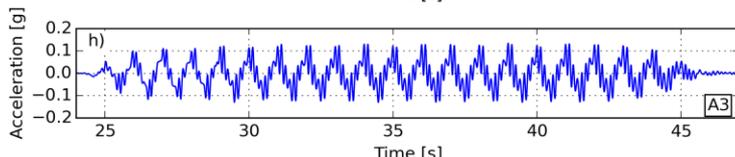
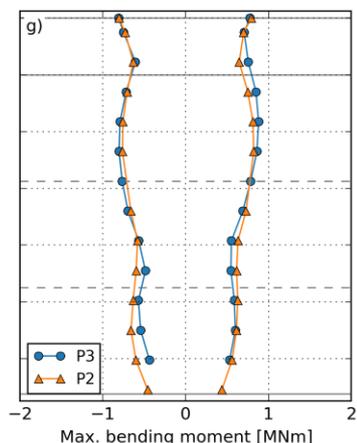
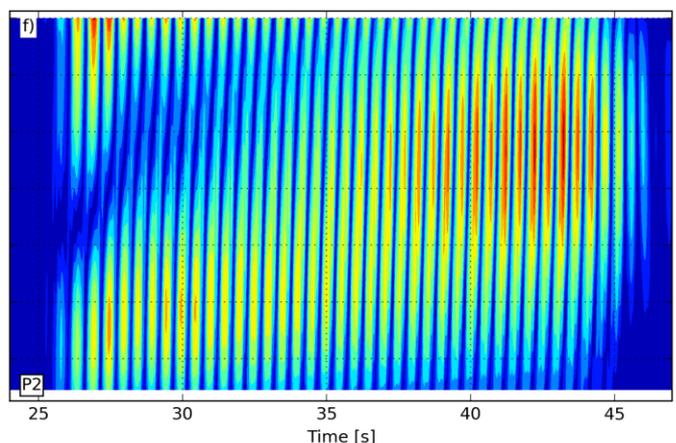
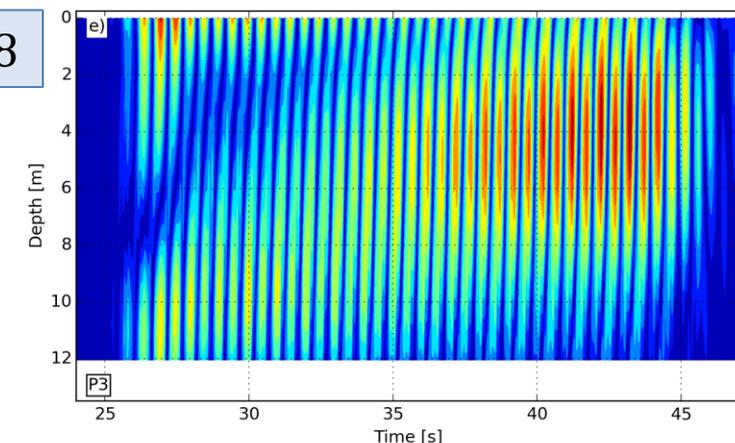
Evolution du profil des moments avec le temps: Sinus 1Hz, 0.1g

C07



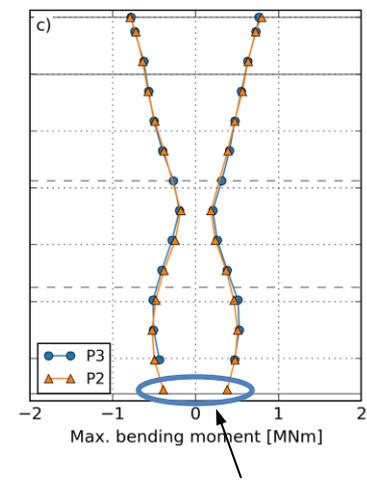
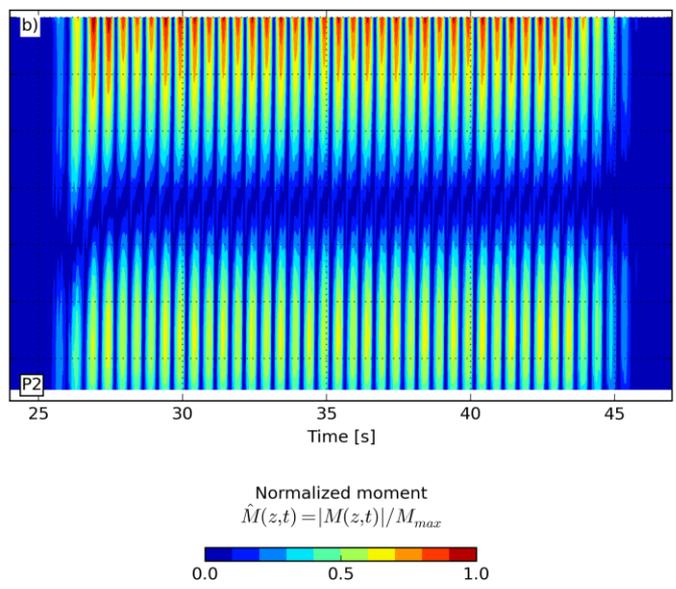
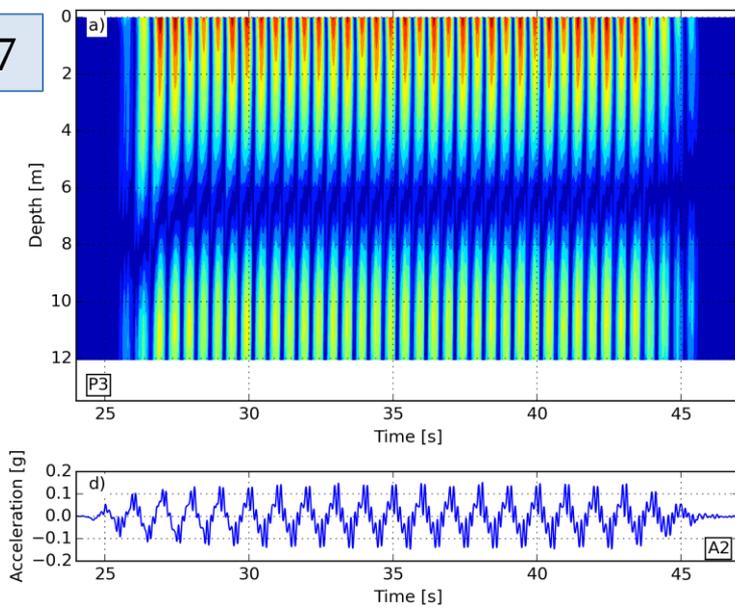
Réponse P2 et P3 très proche dans les deux essais

C08

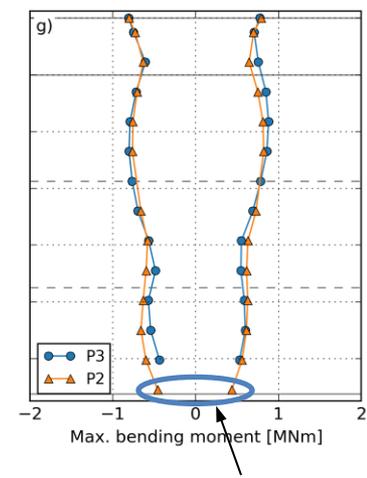
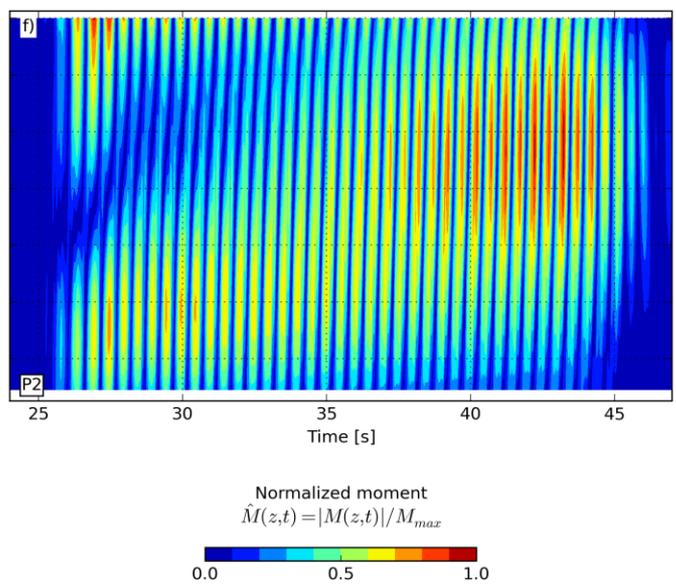
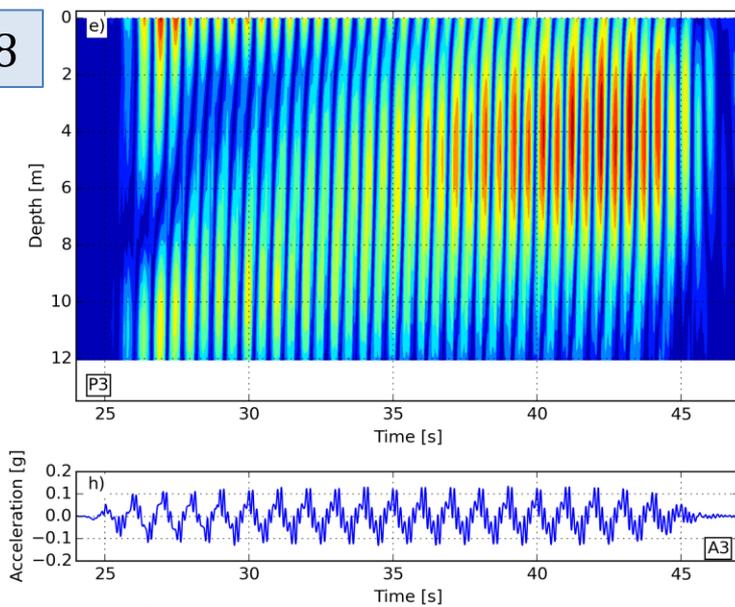


Evolution du profil des moments avec le temps: Sinus 1Hz, 0.1g

C07

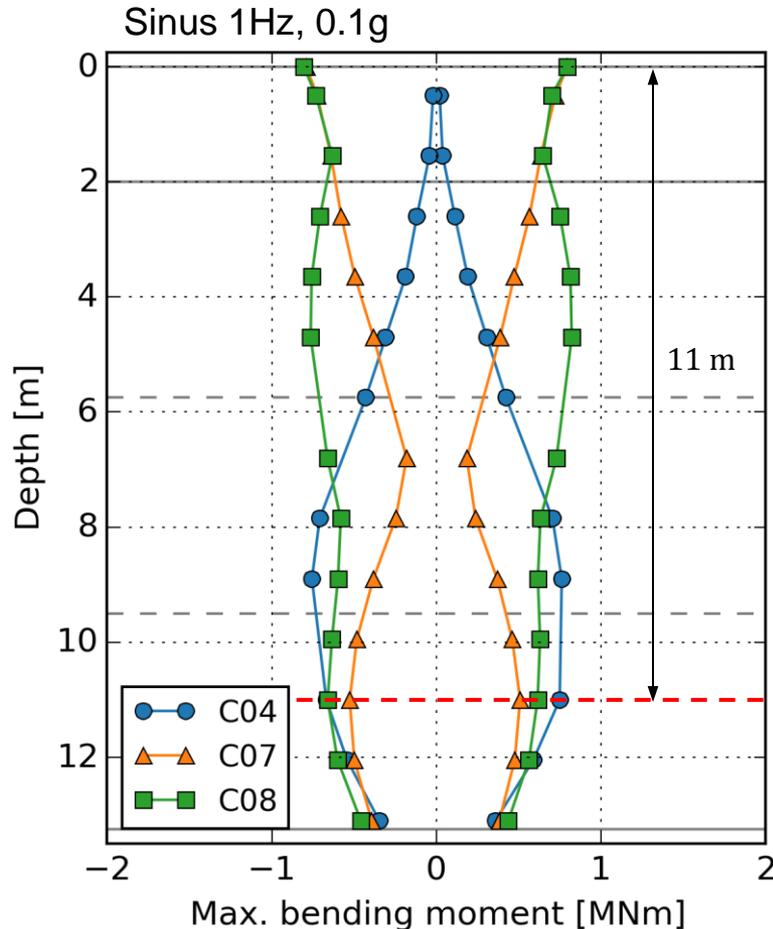


C08



Effets cinématiques vs effets inertiels

- Comparaison entre les courbes enveloppes des profils des moments:
 - pieu central dans groupe de 5 pieux: tests C07 et C08
 - pieu isolé sans masse en tête: test C04 (Pérez-Herreros *et al.* 2017)



- L'interaction inertielle joue un rôle important sur les premiers 11 m
- C08: effets cinématiques et inertiels → peuvent interagir → évolution complexe de la réponse du système avec le temps

Conclusions

- Reproductibilité satisfaisante du profil de sol (différences en termes de V_s inférieures à 6.4%) malgré la complexité de fabrication;
- Les moments dus à l'encastrement des pieux en pointe ne sont pas négligeables;
- Les moments maximaux enregistrés sur les différentes parties des pieux ne sont pas atteints simultanément au cours du chargement;
- Les effets de type cinématique et inertiel peuvent interagir entre eux et donner lieu à des évolutions complexes de la réponse du système avec le temps.

Références

- Banerjee, S. 2009. Centrifuge and numerical modelling of soft clay-pile-raft foundations subjected to seismic shaking. Ph.D. thesis, National University of Singapore.
- Boulanger, R.W., Curras, C.J., Kutter, B.L., Wilson, D.W. & Abghari, A. 1999. Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125, 750-759.
- Correia, A., Pecker, A., Kramer, S. & Pinho, R. 2012. Nonlinear pile-head macro-element model: SSI effects on the seismic response of a monoshaft-supported bridge. 15 WCEE, Lisboa.
- Garnier, J. 2001. Modèles physiques en géotechnique: Etat des connaissances et avancées récentes. Première Conférence Coulomb.
- Li, Z., Kotronis, P., Escoffier, S. & Tamagnini, C. 2016. A hypoplastic macroelement for single vertical piles in sand subject to three-dimensional loading conditions. *Acta Geotechnica*, 11, 373-390.
- Meymand, P. J. 1998. Shaking table scale model tests of non-linear soil-pile-superstructure interaction in soft clay. Ph.D. University of California, Berkeley.
- Mitaritonna, G., Amorosi, A. & Cotecchia, F. 2010. Multidirectional bender element measurements in the triaxial cell: equipment set-up and signal interpretation. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 44, 50-69.
- Pérez-Herreros, J., Escoffier, S., Kotronis, P. & Cuira, F. 2018. Kinematic interaction of piles under seismic loading. 9th ICPMG, London.
- Schofield, A.N. 1981. Dynamic and earthquake centrifuge modelling. *Proc. of international conference on advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics*, pp. 1081-1100.
- Schofield, A.N. & Steedman, R.S. 1988. Recent development of dynamic model testing in geotechnical engineering. *Proc. 9th World Conf. Earthquake Engng, Tokyo-Kyoto*.
- Taghavi, A., Muraleetharan, K.K. & Miller, G.A. 2017. Nonlinear seismic behavior of pile groups in cement-improved soft clay. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 99, 189-202.
- Wang, S., Kutter, B.L., Chacko, M.J., Wilson, D.W., Boulanger, R.W. & Abghari, A. 1998. Nonlinear Seismic Soil-Pile Structure Interaction. *Earthquake Spectra*, 14, 377-396.
- Wilson, D.W. 1998. Soil-pile-superstructure interaction in liquefying sand and soft clay. Ph.D. thesis, University of California, Davis.
- Zhang, L., Goh, S.H. & Yi, J. 2017. A centrifuge study of the seismic response of pile - raft systems embedded in soft clay. *Géotechnique*, 67, 479-490.