

APPORTS DE L'INTERACTION SOL STRUCTURE DANS LE DIMENSIONNEMENT DES GROUPES DE PIEUX SOUS SEISME

BENEFITS OF SOIL STRUCTURE INTERACTION IN DESIGN OF PILES GROUP UNDER SEISMIC LOADING

Jesús PEREZ ^{1,2,3}, Fahd CUIRA ¹, Panagiotis KOTRONIS ², Sandra ESCOFFIER ³

¹ Terrasol (Groupe Setec), Paris, France

² Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), Ecole Centrale Nantes, Nantes, France

³ Séismes et Vibrations (GERS/SV), IFSTTAR, Nantes, France

RÉSUMÉ – Le présent article s'intéresse aux principales méthodes permettant de rendre de compte des effets d'interaction sol-structure (ISS) dans le dimensionnement des groupes de pieux sous chargement sismique. Ces approches font l'objet d'une comparaison illustrée par un cas d'application. Le concept du macroélément, permettant le traitement des effets non-linéaires dans l'interaction sol-structure, est ensuite présenté.

ABSTRACT – This article focuses on the main calculation methods used in France and abroad for the design of a piled foundation under seismic loading. An application case is studied to compare these approaches. The macroelement concept, which allows the treatment of nonlinear effects in the soil-structure interaction, is also presented.

1. Introduction

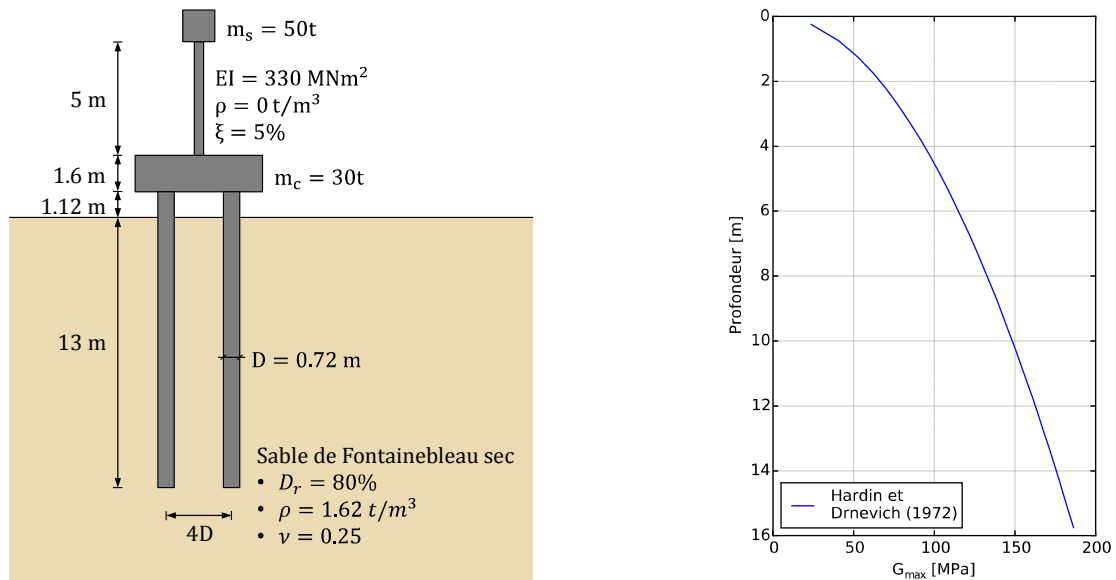
La réponse dynamique d'une structure supportée par des fondations profondes constitue un problème complexe d'Interaction Sol-Structure (ISS) nécessitant des méthodes de calcul adaptées. Traditionnellement, les études des phénomènes d'interaction se sont limitées au cas des problèmes linéaires avec un intérêt particulier pour les méthodes de sous-structures. Les approches purement non linéaires restent exceptionnelles et ce n'est que de manière récente, avec l'apparition de nouveaux codes comme l'Eurocode 8 (EN 1998) qui reconnaissent désormais l'effet de l'ISS et des mécanismes non linéaires de dissipation d'énergie (importantes dans le cas des forts séismes), qu'il y a un intérêt grandissant à développer de nouvelles approches permettant de prendre en compte ces phénomènes (Pecker et al. 2012). Une revue bibliographique des principales méthodes de calcul usuellement pratiquées, en France et à l'étranger, pour le dimensionnement d'un groupe de pieux sous sollicitations sismiques ainsi qu'une description de l'approche macroélément est effectuée dans Pérez et al. (2017).

Le présent article s'intéresse à l'étude d'un cas d'application pratique en utilisant plusieurs de ces méthodes. Les principales caractéristiques ou hypothèses derrière ces approches sont commentées. Enfin, les résultats obtenus par les différentes méthodes sont comparés et un exemple d'étude paramétrique facilité par le macroélément est présenté.

2. Cas d'application

2.1. Problème étudié

Le problème étudié consiste en un groupe de deux pieux en béton armé de 0.75 m de diamètre et de 13 m de longueur, implantés dans un profil de sable de Fontainebleau

Figure 1. Problème étudié (gauche) et profil de $G_{\max}$ (droite)

dense ($D_r = 80\%$). L'espacement entre les axes des pieux est de 4 diamètres. Un chevêtre rigide relie les deux pieux en tête. La superstructure est modélisée à l'aide d'un pendule inversé dont la fréquence sur base encastrée est fixée à 2 Hz. Un amortissement de 5% lui est attribué. Le modèle est représentatif de la fondation et superstructure d'un équipement industriel tel qui peut être trouvé dans l'industrie pétrochimique.

Le comportement des pieux, du chevêtre et de la superstructure est supposé élastique. La figure 1 présente le problème étudié ainsi que le profil du module de cisaillement maximal ($G_{\max}$), calculé à partir de Hardin et Drnevich (1972).

2.2. Chargement sismique

Un séisme réel large bande est utilisé dans cette étude : Landers 1992 (Lucern Valley station). Le signal a été filtré avec un filtre passe-bande entre 0.4 et 6 Hz et a été mis à l'échelle pour avoir une accélération maximale de 0.1g (figure 2). Ce chargement est appliqué au niveau du *bedrock*, qui est placé à une profondeur de 16 m pour le calcul de propagation d'ondes 1D.

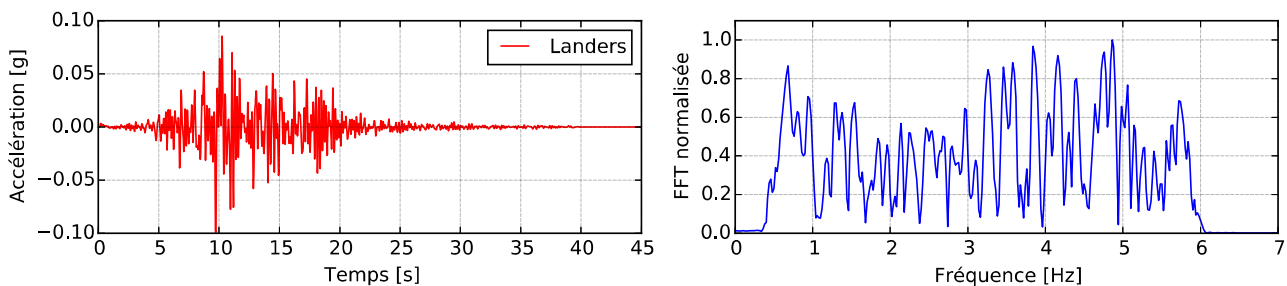


Figure 2. Représentation temporelle et fréquentielle du séisme utilisé

3. Résolution du problème

Quatre approches de calcul sont utilisées dans la résolution de ce problème : deux approches linéaires équivalentes et deux approches non-linéaires. Elles sont présentées ci-dessous.

Un point commun à toutes les approches linéaires équivalentes est la nécessité de définir des propriétés de sol compatibles avec le niveau de distorsion (module de cisaillement G et amortissement matériel β). Pour cela, des calculs de propagation

d'ondes 1D sont effectuées avec une méthode itérative permettant de retrouver les paramètres élastiques équivalents. Le comportement non-linéaire du sol est pris en compte par l'utilisation de courbes de dégradation du module de cisaillement, $G/G_{\max}(\gamma)$, et de l'amortissement matériel avec le niveau de distorsion, $\beta(\gamma)$. Les courbes proposées par Li et al. (2013) pour le sable de Fontainebleau NE34 sont utilisées dans cet étude.

Autre que le profil de propriétés compatibles, le calcul de propagation permet de calculer l'accélérogramme en surface libre qui est utilisé dans l'approche par sous-structuration et avec macroélément pour l'analyse dynamique du système. L'accélérogramme obtenu en surface a un PGA de 0.41g.

A noter que les méthodes linéaires équivalentes ne sont applicables que dans la gamme de faibles distorsions, avec des valeurs comprises entre 10^{-6} et 10^{-4} .

3.1. Approche par sous-structuration

Actuellement, la méthode de sous-structure, est la méthode d'analyse la plus répandue et utilisée par les bureaux d'études. Sous l'hypothèse d'élasticité, le principe de superposition peut être appliqué pour résoudre le problème d'interaction en plusieurs étapes successives, chacune d'entre elles étant plus simple à résoudre que le problème global. Le théorème de superposition de Kausel et al. (1978) permet de résoudre le problème d'ISS en trois étapes : interaction cinématique, calcul d'impédances dynamiques et calcul de la structure avec prise en compte d'ISS.

La méthode de sous-structuration devient très intéressante dès lors qu'il est possible de résoudre de manière analytique ou par le biais de méthodes simplifiées certaines étapes de calcul. Des hypothèses simplificatrices sont souvent adoptées. Le schéma donné en figure 3 détaille les pas suivis dans le présent article pour résoudre le problème avec la méthode de sous-structuration.

Le calcul des impédances dynamiques est conduit dans le domaine fréquentiel avec le logiciel SASSI et les propriétés de sol compatibles avec le niveau de distorsion. La comparaison des courbes d'impédance obtenues pour le groupe de pieux avec celles

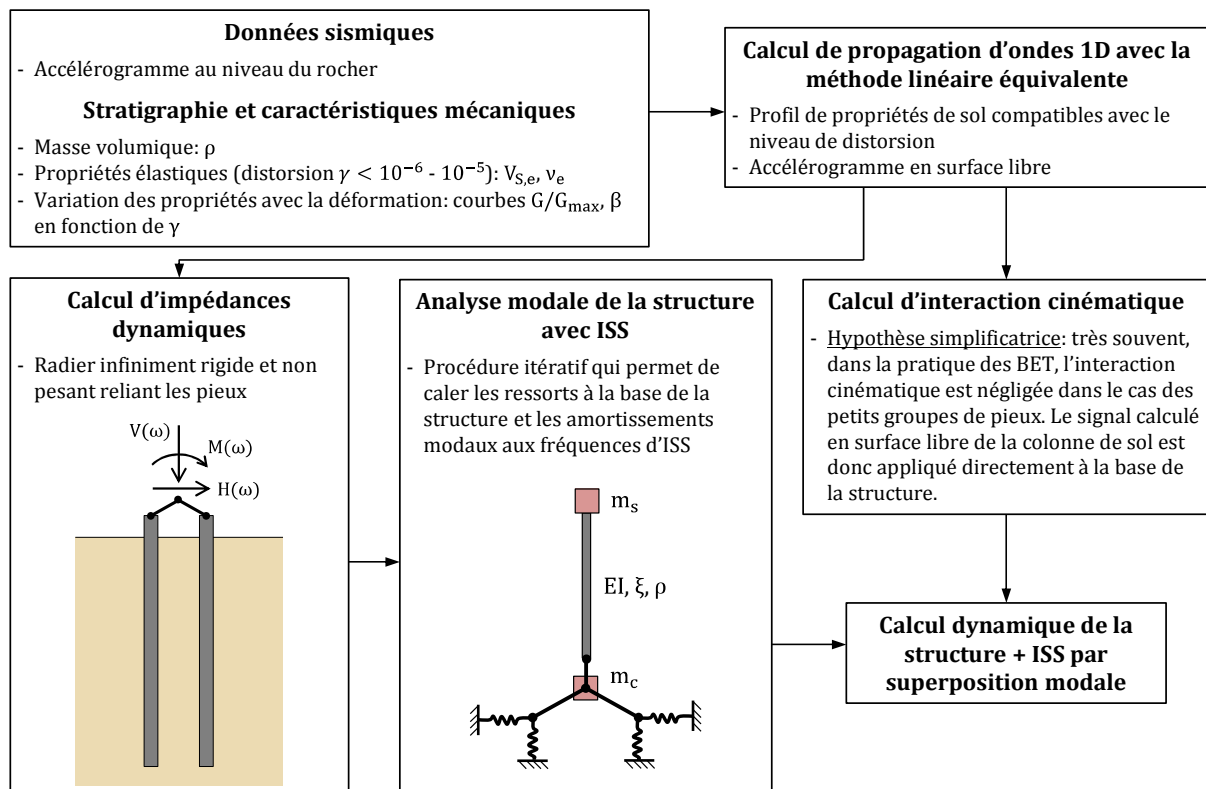


Figure 3. Calcul des propriétés de sol linéaires équivalentes et résolution par sous-structuration

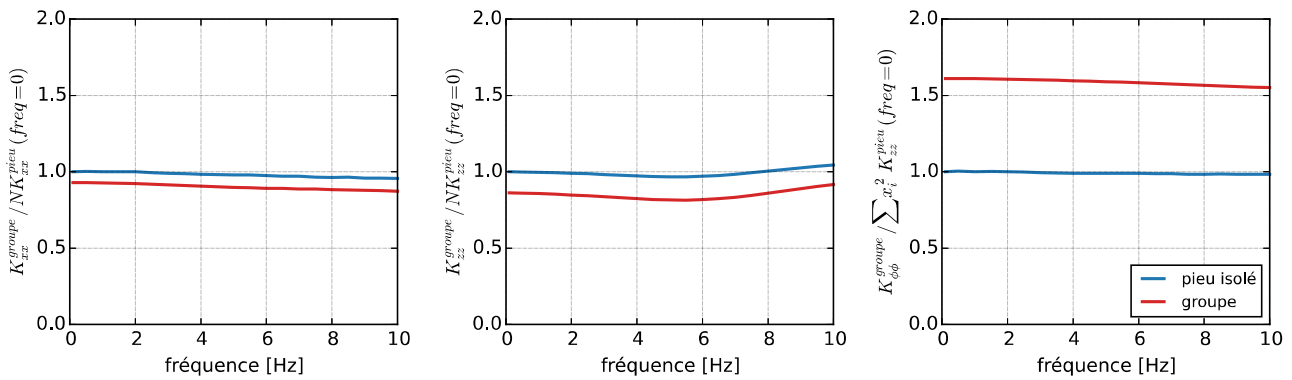


Figure 4. Fonctions d'impédance

obtenues pour un pieu isolé (figure 4) permettent de constater qu'un effet de groupe est présent mais que, pour ce cas en particulier, il semble être complètement indépendant de la fréquence. Il doit à ce titre être précisé que l'effet de groupe est souvent fortement dépendant de la fréquence et cela même pour des petits groupes de pieux (Kaynia et Kausel, 1982).

3.2. Approche directe avec comportement élastique linéaire équivalent

L'analyse du système complet est effectuée en une seule étape avec un modèle en éléments finis (figure 5a). Le sol et les pieux sont modélisés avec des éléments volumiques. Le radier est modélisé avec des barres rigides, qui relient les pieux à la superstructure qui est modélisée à l'aide d'une poutre de Bernoulli.

Un comportement élastique linéaire est attribué aux éléments de sol avec les caractéristiques mécaniques calculées avec le modèle de propagation d'ondes. Le chargement est directement imposé à la base du modèle sous forme d'accélération.

Une étude préalable a été effectuée de manière à placer les frontières du modèle suffisamment éloignées pour éviter les effets de bord. Des frontières absorbantes ont été également introduites dans le modèle de manière à assurer le départ des ondes vers l'infini.

3.3. Approche directe avec comportement non-linéaire

Le même modèle EF est utilisé dans cette analyse dans laquelle une loi de comportement non-linéaire est retenue pour reproduire le comportement du sol. Cette loi, de type hypoplastique a été développée par von Wolffersdorff (1996) pour des sables. Les paramètres de ce modèle ont été déterminés pour ce type de sable à partir d'essais triaxiaux (Li, 2014) et, sont utilisés dans le présent article sans aucune modification.

Le principal désavantage de cette approche est son coût numérique élevé. Souvent oubliée, une calibration correcte des paramètres des modèles de comportement non-linéaires constitue une étape fondamentale de l'analyse. Des essais en laboratoire sont donc nécessaires pour connaître la réponse du sol à des chargements complexes.

3.4. Approche macroélément

Le macroélément est un élément discret de liaison à comportement non-linéaire, placé à la base de la superstructure (figure 5b) et qui permet de substituer en totalité, ou en partie, le sol et la fondation. Il dispose d'une loi de comportement non-linéaire, décrite en termes de forces et de déplacements généralisés, établissant à l'échelle macroscopique les couplages dynamiques (linéaires et non linéaires) dans plusieurs directions entre la superstructure, le sol et la fondation. La prise en compte des non linéarités et du couplage entre les degrés de liberté constitue l'apport principal de cette approche adaptée au dimensionnement en déplacement.

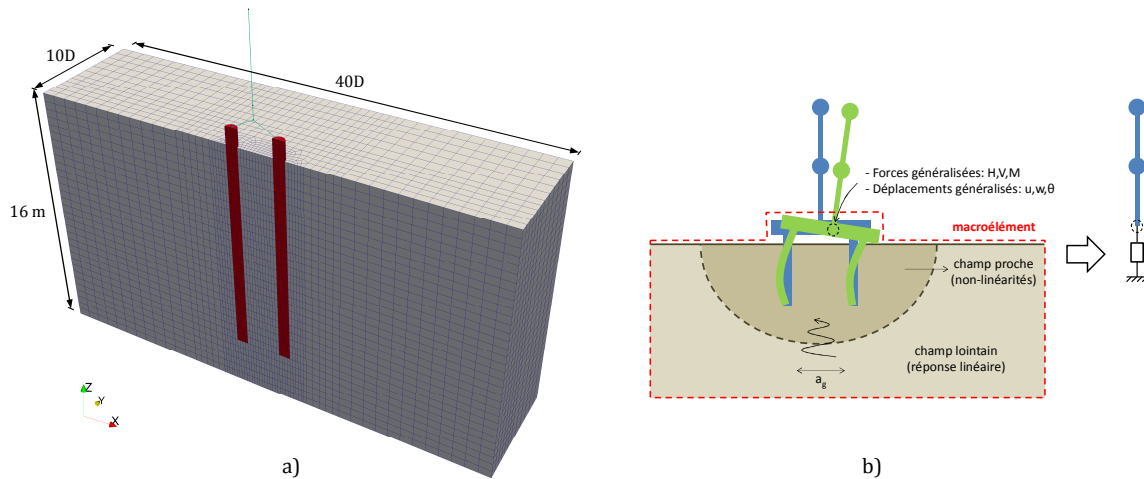


Figure 5. Modèle éléments finis (a) et concept macroélément (b)

Les développements de cet outil heuristique ont concerné à l'origine les fondations superficielles (Crémer et al. 2001, Chatzigogos 2007, Grange 2009). L'extension du concept au cas des fondations profondes est très récente (Correia 2011, Li 2014, Li et al. 2016) et se limite, pour l'instant, au cas d'un pieu isolé ou d'un groupe de deux pieux dans un profil de sol simple. Il convient de remarquer que tout macroélément doit être construit et calibré pour un cas bien précis. C'est une de ses principales limitations. Cependant, une fois calibré et les limites du domaine d'application bien définies, il peut être utilisé de manière intensive à un coût numérique réduit.

Le macroélément développé par Li est utilisé dans cette application numérique. Il comporte 13 paramètres qui peuvent être regroupés, en fonction du phénomène qu'ils contrôlent, comme suit :

- réponse à faible déformation avec des raideurs élastiques : k_v , k_{hh} , k_{mm} et k_{hm} ;
- le critère de rupture qui est défini de manière analytique à partir de la capacité portante d'un pieu isolé : H_0 , M_0 et V_0 ;
- l'évolution de la surface de rupture avec le paramètre de durcissement : κ ;
- et le comportement cyclique du modèle qui est contrôlé par un jeu de 5 paramètres : m_R , m_T , R , β^r et χ .

Ce modèle ne traite pas directement la question de l'effet de groupe et de sa dépendance avec la fréquence. En revanche un facteur constant, μ , est proposé pour traiter le cas avec un groupe de pieux. Compte tenu de la configuration étudiée l'effet de groupe ne dépend pas de la fréquence (figure 4), ce facteur d'interaction constant se traduit dans les faits par un facteur de groupe « statique ». Cette particularité, qui n'est plus présente dans le cas des groupes de pieux plus importants, permet donc d'appliquer ce macroélément en toute rigueur à ce cas d'étude. Des développements sont actuellement en cours pour intégrer l'effet de la fréquence et de groupe dans l'approche macroélément.

Le chargement sismique est appliqué sous forme d'accélération à la base du macroélément. Le signal calculé en surface libre avec le calcul de propagation d'ondes 1D est utilisé.

4. Comparaison des résultats

L'accélération horizontale calculée au niveau de la masse en tête de la superstructure est présentée en figure 6 pour chaque méthode. Le tableau 1 compare, en plus de l'accélération maximale, les déplacements maximaux et résiduels calculés à ce même

endroit. Le premier constat est que les accélérations maximales obtenues par les différentes méthodes restent dans le même ordre de grandeur. Ce résultat est cohérent avec ce qui était attendu de cet exercice et, vient confirmer l'applicabilité des méthodes traditionnelles à des problèmes avec niveaux de distorsion faibles (Brûlé et Cuira, 2017).

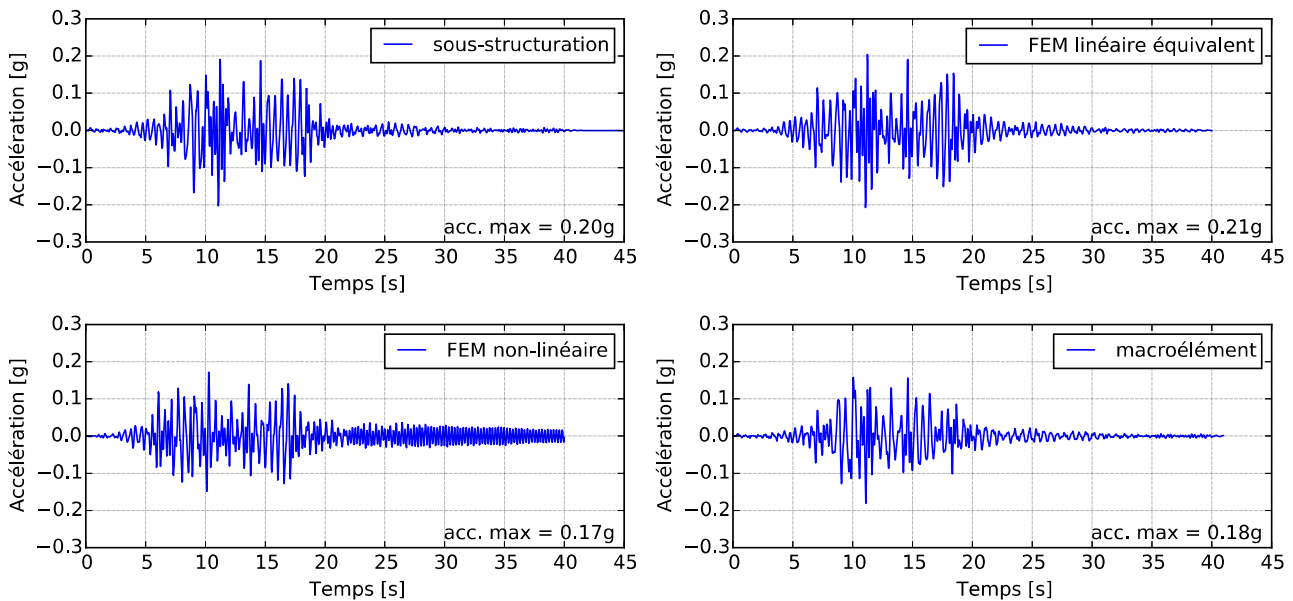


Figure 6. Accélération au niveau de la masse en tête de la superstructure

Les déplacements maximaux obtenus avec les méthodes non-linéaires sont plus importants que ceux issus des méthodes linéaires équivalents. Avec l'approche par sous-structuration le déplacement maximal augmente de 22.5% par rapport au même résultat avec FEM linéaire. Cet écart est probablement lié à une légère sous-estimation de la raideur dans la première approche et la prise en compte de l'interaction cinématique dans la deuxième approche.

La vibration en partie finale du résultat obtenu avec le modèle non-linéaire avec loi hypoplastique indique un problème d'amortissement. En effet, l'amortissement dit matériel, qui est présent même pour des niveaux très faibles de la distorsion ne semble pas être correctement pris en compte, ceci permettant d'expliquer la faible dissipation des oscillations après l'évènement sismique. Une perte d'amortissement du système de l'ordre de 4%, qui a un impact direct sur l'amplitude des oscillations, est constatée. Une manière de restituer cet amortissement dans le système est d'ajouter de l'amortissement numérique dans le schéma d'intégration. Toutefois cela constitue une tâche délicate.

Outre les résultats des calculs, d'autres observations peuvent être effectuées comme le temps de calcul très réduit dans le cas de l'approche par décomposition et du macroélément (inférieure à la minute) et la robustesse des méthodes linéaires équivalentes (absence de problème de convergence de la solution du fait de l'élasticité).

5. Etude paramétrique avec macroélément

Le macroélément précédemment présenté ayant été validé à l'aide de calculs non-linéaires en éléments finis pour des sollicitations fortement non-linéaires (Li 2014),

Tableau 1. Accélération et déplacement au niveau de la masse en tête de la superstructure

	sous-structuration	FEM linéaire équivalent	FEM non-linéaire	macroélément
accélération max. (g)	0.2	0.21	0.17	0.18
déplacement max. (cm)	1.25	1.02	1.60	1.53
déplacement résiduel (cm)	-	-	0.10	0.07

l'application suivante s'intéresse au calcul du déplacement latéral de la superstructure (maximal et résiduel après séisme) et du moment de basculement au niveau inférieur du chevet (point A sur la figure 7) en fonction du PGA du signal en surface libre.

Pour ce faire, l'amplitude du signal obtenu en surface libre lors du calcul de propagation d'ondes est modifiée de manière à obtenir les valeurs du PGA souhaitées. En parallèle, plusieurs simulations sont effectuées suivant l'approche par sous-structuration indiqué en figure 3 pour différents niveaux de la sollicitation. Les résultats sont présentés en figure 7.

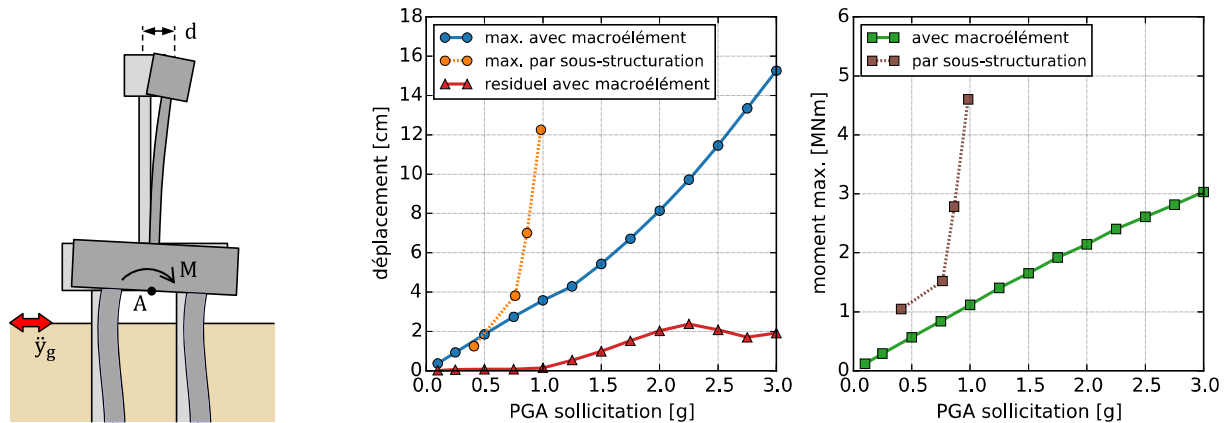


Figure 7. Etude paramétrique avec macroélément et par sous-structuration

L'analyse des résultats en termes du déplacement et du moment maximal montre des écarts importants entre les deux approches pour des valeurs de PGA supérieures à 0.5g. Au-delà de cette valeur l'approche par sous-structuration surestime fortement la réponse du système par rapport à la résolution non-linéaire effectuée avec le macroélément qui donne une évolution quasi-linéaire du déplacement et du moment maximal. L'approche linéaire équivalente par sous-structuration ne permet donc de reproduire la réponse du système à des fortes sollicitations (seul le calcul effectué pour un PGA inférieur à 0.5g respecte les limites de validité de l'approche linéaire équivalente avec une valeur de la distorsion maximale égale à $2 \cdot 10^{-4}$).

Dans le cas du déplacement résiduel, celui-ci est négligeable pour un PGA inférieur à 1g. Au-delà sa valeur évolue quasi linéairement jusqu'à une valeur de PGA de 2g à partir de laquelle le déplacement résiduel reste quasiment linéaire pour la plage de PGA étudiée.

Le recours aux macroéléments permet d'effectuer de manière rapide des études paramétriques permettant un dimensionnement plus sophistiqué des fondations, avec la possibilité de vérifier le respect, ou non, de critères définis en déplacement à un coût réduit. Pour une étude sur un cas réel l'analyse nécessite l'utilisation d'un nombre plus grand d'accélérogrammes mais le principe demeure inchangé.

6. Conclusions et perspectives

L'étude d'un cas d'application portant sur l'interaction sol-structure d'une fondation profonde sous sollicitation sismique a été présentée. Quatre approches de calcul ont été appliquées et commentées. Les résultats en termes d'accélération au niveau de la masse de la superstructure mettent en évidence la validité des approches linéaires équivalentes lorsque les calculs sont effectués dans leur plage de validité (plage de faibles distorsions).

Une étude paramétrique est effectuée avec le macroélément afin de connaître l'évolution de la réponse du système (déplacement, moment) avec la valeur du PGA de la sollicitation sismique. Les résultats montrent l'intérêt de l'approche macroélément, qui permet de relier les méthodes traditionnelles basées sur l'élasticité linéaire équivalente et

la résolution des problèmes avec des fortes non-linéarités. L'ingénieur géotechnicien dispose désormais d'un outil lui permettant d'estimer les déplacements et les forces engendrées par la sollicitation sismique à un coût de calcul réduit et ainsi de vérifier que les critères de dimensionnements sont respectés.

Cependant, la question de l'effet de groupe et sa dépendance avec la fréquence reste, à ce jour, une limitation importante de l'approche macroélément. Des travaux de recherche visant à introduire ces phénomènes dans l'approche macroélément pour les fondations profondes sont actuellement en cours.

7. Références bibliographiques

- Brûlé S. et Cuira F. (2017). Bases de l'interaction sol-structure sous séisme - Principes généraux et effets inertiels. Techniques de l'Ingénieur
- Chatzigogos C.T. (2007). Comportement sismique des fondations superficielles: vers la prose en compte d'un critère de performance dans la conception. Thèse de l'Ecole Doctorale Polytechnique.
- Correia A.A. (2011). A pile-head macro-element approach to seismic design of monoshaft-supported bridges. PhD Thesis, ROSE School, IUSS Pavia, Italy.
- Crémer C., Pecker A., Davenne L. (2002). Modelling of nonlinear dynamic behavior of a shallow strip foundation with macroelement. Journal of Earthquake Engineering, Vol. 6, Issue 2, pp. 175-211
- Grange S., Kotronis P., Mazars J. (2009). A macro-element to simulate dynamic Soil-Structure Interaction. Engineering Structures, Vol. 31, pp. 3034-3046.
- Hardin B.O., Drnevich V.P. (1972). Shear modulus and damping in soils: design equations and curves. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 98, 667-692
- Kausel E., Whitman R.V., Morray J.P., Elsabee F. (1978). The spring method for embedded foundations. Nuclear Engineering and Design, 48, 377-392
- Kaynia A.M., Kausel E. (1982). Dynamic behavior of pile groups, 24
- Li Z. (2014). Etude expérimentale et numérique de fondations profondes sous sollicitations sismiques. Pieux verticaux et pieux inclinés. Thèse de Doctorat. Ecole Centrale de Nantes.
- Li Z.; Escoffier S., Kotronis P. (2013). Using centrifuge tests data to identify the dynamic soil properties: application to Fontainebleau sand. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 52, 77-87
- Li Z., Kotronis P., Escoffier S., Tamagnini C. (2016). A hypoplastic macroelement for single vertical piles in sand subject to threedimensional loading conditions. Acta Geotechnica, 11(2), 373-390.
- Ostadan F., Deng N. (2012). SASSI2010 – A System for Analysis of Soil-Structure Interaction – Geotechnical Engineering Division, Civil Engineering Department, University of California, Berkeley
- Pecker A., Paolucci R., Chatzigogos C., Correia A.A., Figini R. (2012). The role of non-linear dynamic soil-foundation interaction on the seismic response of structures. II International Conference on Performance Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering.
- Pérez J., Cuira F., Kotronis P., Escoffier S. (2017). Etat de l'art sur les méthodes de calcul d'un pieu et d'un groupe de pieux sous chargement sismique. 19th ICSMGE, Séoul.
- von Wolffersdorff P.A. (1996). A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface. Mechanics of Cohesive-frictional Materials, 1, 251-271