



HAL
open science

Interaction cinématique sol-structure d'un massif renforcé par inclusions rigides sous séisme

Yuxiang Shen, Jesús Pérez-Herreros, Fahd Cuira, Jean-François Semblat,
Sébastien Burlon

► **To cite this version:**

Yuxiang Shen, Jesús Pérez-Herreros, Fahd Cuira, Jean-François Semblat, Sébastien Burlon. Interaction cinématique sol-structure d'un massif renforcé par inclusions rigides sous séisme. 11èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon [INSA Lyon], CFMS, CFMR, CFGI, Jun 2022, Lyon, France. hal-03719837

HAL Id: hal-03719837

<https://hal.science/hal-03719837v1>

Submitted on 11 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INTERACTION CINÉMATIQUE SOL-STRUCTURE D'UN MASSIF RENFORCÉ PAR INCLUSIONS RIGIDES SOUS SÉISME

KINEMATIC SOIL-STRUCTURE INTERACTION OF SOIL REINFORCED BY RIGID INCLUSIONS UNDER EARTHQUAKE

Yuxiang Shen^{1,2}, Jesús Pérez-Herreros¹, Fahd Cuirá¹, Jean-François Semblat², Sébastien Burlon¹

¹ Terrasol, Paris, France

² IMSIA (UMR 9219), CNRS, EDF, CEA, ENSTA Paris, Institut Polytechnique de Paris, Palaiseau, France

RÉSUMÉ – Le présent article s'intéresse aux effets d'interaction cinématique sous séisme d'un massif renforcé par inclusions rigides. Différentes configurations sont étudiées au moyen d'une analyse paramétrique. Les résultats sont aussi confrontés à ceux obtenus pour d'autres types de fondations. Les moments cinématiques sont calculés et comparés avec l'approche pseudo-statique.

ABSTRACT – This paper investigates the kinematic interaction effects under earthquake for soil reinforced by rigid inclusions. Different configurations are studied by means of a parametric analysis. The results are also compared with those obtained for shallow foundations and pile foundations. The kinematic moments are calculated and compared with the pseudo-static approach.

1. Introduction

La technique de renforcement des sols par inclusions rigides (cf. figure 1) est une solution de fondation qui présente des avantages techniques et économiques décisifs par rapport au concept conventionnel de fondation sur pieux. Cette technique a fait l'objet, durant les vingt dernières années, de plusieurs études et travaux de recherche qui ont permis d'aboutir à des recommandations pratiques telles que celles du projet national ASIRI (2012). Les études se sont intéressées principalement au comportement statique des fondations sur inclusions rigides. Le comportement sous chargement vibratoire et sismique n'a pas encore reçu la même attention. Cet article propose de quantifier les effets d'interaction cinématique sous séisme. Ce travail s'inscrit dans le cadre de la tâche 8 du Projet National ASIRI+ (<https://asiriplus.fr/>).

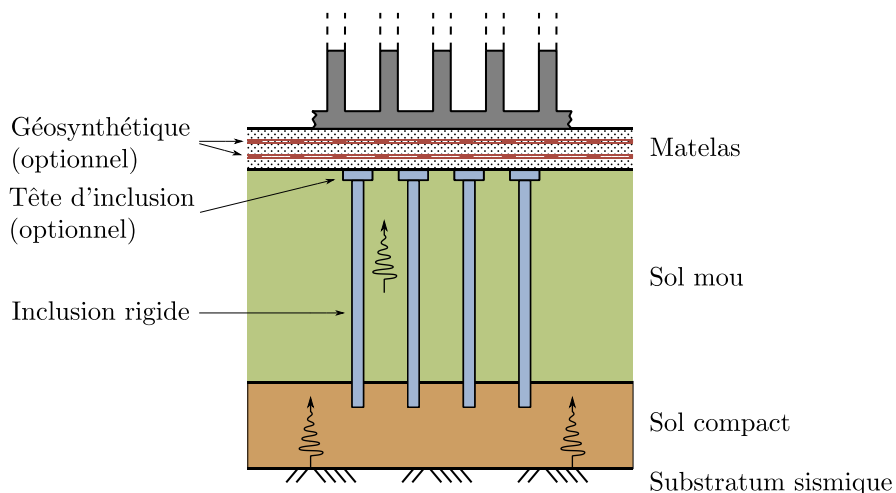


Figure 1. Schéma d'une fondation sur inclusions rigides sous séisme

Le phénomène d'interaction cinématique est un mécanisme d'interaction sol-structure lié au contraste de rigidité entre le sol et les éléments de fondation qui y sont incorporés. En particulier, dans le cas d'un renforcement par inclusions rigides, la présence de celles-ci peut être de nature à :

- Influencer sur la propagation des ondes sismiques et modifier l'action sismique incidente sur la structure portée (amplitude et contenu fréquentiel) ;
- Induire des sollicitations additionnelles (flexion, cisaillement) dans les inclusions rigides, en plus de celles liées à la vibration propre de la structure portée.

Pour appréhender ce phénomène, la pratique actuelle des études d'ingénierie est basée sur les principes suivants :

- Pour les taux de substitution surfaciques usuels, la présence des inclusions exerce une influence limitée sur l'action sismique incidente et la rigidité au cisaillement du terrain renforcé ;
- Les sollicitations additionnelles sont obtenues de façon découplée à partir de modèles p-y pseudo-statiques dans lesquels l'effet cinématique est introduit comme une déformée libre du sol correspondant à son mode de vibration fondamental ;

La présente étude s'appuie sur une série de modélisations dynamiques couvrant différentes configurations (inspirées de projets réels) et visant à vérifier les capacités et limites des méthodes usuelles dans les études d'ingénierie.

2. Cadre de l'étude

2.1. Principe de modélisation

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour étudier le problème dynamique d'interaction sol-structure, telles que l'approche directe, l'approche de sous-structures, les approches de type Winkler ou macro-élément (Pérez-Herreros et al., 2017).

Lorsqu'un modèle linéaire équivalent peut être utilisé pour approcher le comportement viscoélastique du profil de sol, la méthode de sous-structures devient applicable. Elle permet de résoudre, sous l'hypothèse de linéarité, le problème de l'ISS en plusieurs étapes successives. La possibilité de simplifier ou de négliger certaines de ces étapes (sous certaines conditions) rend cette approche intéressante et explique en partie qu'elle soit largement adoptée dans les bureaux d'études.

Un exemple de ce type d'approche est le théorème de superposition de Kausel et al. (1978), qui permet de résoudre le problème d'interaction en trois étapes : 1) Calcul de l'interaction cinématique pour déterminer l'action sismique introduite à la base de la structure ; 2) Calcul des fonctions d'impédances dynamiques ; 3) Calcul de la réponse dynamique de la structure en considérant les effets d'ISS à sa base, comme illustré sur la figure 2. Cette approche est souvent combinée à des modèles de type Winkler pour la détermination des efforts d'origine cinématique et inertiel dans les éléments de fondation.

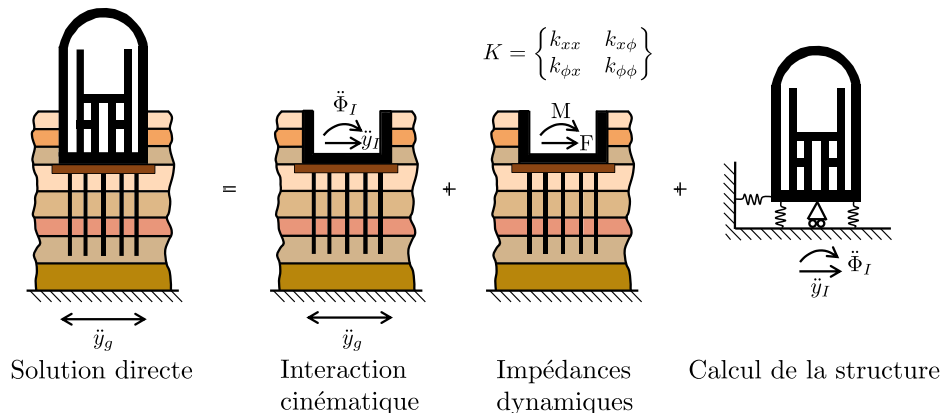


Figure 2. Approche de sous-structures appliqué à l'étude d'une structure sur inclusions rigides

Le travail présenté dans cet article s'inscrit dans le cadre de cette décomposition et se focalise sur la première étape. La résolution du problème est faite dans le domaine fréquentiel au moyen d'un modèle hybride BEM-FEM bâti sous le programme SASSI2010 (Ostadan et al., 2000), qui permet de tenir compte de manière appropriée de la propagation des ondes dans le sol et de l'interaction dynamique inclusion-sol-inclusion.

Dans ce modèle, le sol est modélisé par des couches horizontales avec un comportement viscoélastique et d'un substratum semi infini. Le radier est représenté par un réseau tridimensionnel de poutres rigides et non pesantes. Les inclusions sont modélisées par des éléments de poutre (désolidarisés du radier). La modélisation des inclusions par des éléments de poutre et non par des éléments volumiques a un faible impact sur la réponse dynamique des groupes d'inclusions (Mánica et al., 2016). Le sol et la fondation interagissent au droit des nœuds communs entre les deux matériaux, également appelés nœuds d'interaction. La plate-forme de transfert de charge est modélisée par des éléments volumiques hexaédriques à 8 nœuds. Un maillage suffisamment fin est utilisé afin de garantir la propagation correcte des ondes dynamiques sur la plage de fréquences d'intérêt (la plus grande dimension est inférieure à 1/8^e de la longueur d'onde la plus courte).

2.2. Configuration étudiée

La solution de renforcement par inclusions rigides est généralement recherchée pour augmenter la portance et réduire les tassements sous charge statique. Cela correspond souvent à des profils de sol identifiables comme classe D ou E selon l'EC8. Le profil de sol considéré dans cette étude est ainsi constitué de deux couches de sol et un substratum : une couche sol mou de 10 m d'épaisseur et une couche de sol plus compact de 5 m d'épaisseur reposant sur le substratum rocheux. Les propriétés mécaniques du modèle sont indiquées dans le tableau 1.

Tableau 1. Propriétés mécaniques du sol et de la fondation utilisées dans les analyses

| | Sol mou | Sol compact | Rocher | Matelas | Inclusions |
|--|---------|-------------|--------|---------|------------|
| Module de cisaillement G (MPa) | 45 | 320 | 2 500 | 125 | 12 500 |
| Vitesse des ondes de cisaillement Vs (m/s) | 150 | 400 | 1 000 | 250 | 2 236 |
| Coefficient de Poisson ν (-) | 0.45 | 0.45 | 0.45 | 0.35 | 0.2 |
| Masse volumique ρ (t/m ³) | 2.0 | 2.0 | 2.5 | 2.0 | 2.5 |
| Taux d'amortissement matériel ξ (-) | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0 |

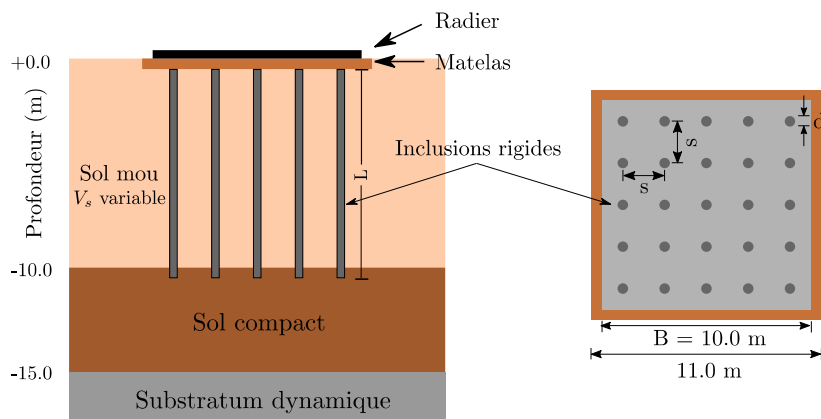


Figure 3. Schéma de la configuration de référence utilisée dans l'étude paramétrique

La configuration étudiée est présentée sur la figure 3. Elle est constituée d'un radier rigide carré de largeur 10 m installé sur une plate-forme de transfert d'une épaisseur de 0.5 m, avec un débord de 0.5 m. Les inclusions rigides sont de 0.42 m de diamètre, 10 m de longueur et sont encastées de 0.5 m dans le sol compact. L'entraxe des inclusions est

égal à 2 m. Il convient de noter que les inclusions rigides avec ce diamètre peuvent être considérées comme flexibles vis-à-vis de leur réponse transversale, autrement dit, la longueur totale est supérieure à 3 fois la longueur de transfert (Brûlé et Cuira, 2017).

3. Facteur d'interaction cinématique d'une fondation sur inclusions rigides

On étudie ici la notion de facteur d'interaction cinématique I appliquée au cas d'une fondation sur inclusions rigides. Ce facteur est défini conventionnellement comme le rapport entre le déplacement maximal au centre de la fondation sur inclusions rigides, noté u_p , et celui que l'on obtiendrait en champ libre, noté u_0 . L'étude est réalisée dans le domaine fréquentiel. La variation du facteur d'interaction cinématique est ensuite représentée en fonction de la fréquence adimensionnelle F définie selon le formalisme proposé par Gazetas (1984) pour les groupes de pieux :

$$F = \frac{f}{f_1} \left(\frac{L}{d}\right)^{-0.35} \left(\frac{E_p}{E_s}\right)^{0.5} \left(\frac{s}{d}\right)^{0.2} \quad (1)$$

Où f est la fréquence de calcul, f_1 la fréquence propre de la colonne de sol, E_p/E_s le rapport entre le module de l'inclusion et celui du sol, L/d le rapport entre la longueur de l'inclusion et son diamètre, et s/d le rapport entre l'entraxe et le diamètre des inclusions.

A partir de la configuration de référence présentée au §2.2, on mène une étude paramétrique en faisant varier la rigidité du sol mou, le diamètre des inclusions ainsi que leur entraxe. Les paramètres des différentes configurations sont donnés dans le tableau 2 et sur la figure 4.

Tableau 2. Principales caractéristiques des configurations utilisées dans l'étude paramétrique

| Groupe | Cas | f_1^* (Hz) | L/d | E_p/E_s | s/d |
|--------|-----|--------------|------|-----------|------|
| A | 01 | 3.50 | 23.8 | 230 | 4.76 |
| B | 01 | 2.42 | 23.8 | 517 | 4.76 |
| | 02 | 4.43 | " | 129 | 4.76 |
| C | 01 | 3.50 | 31.3 | 230 | 6.25 |
| | 02 | " | 19.2 | " | 3.85 |
| D | 01 | 3.50 | 23.8 | 230 | 3.57 |
| | 02 | " | " | " | 5.95 |

* fréquence propre de la colonne de sol tenant compte des couches de sol mou et de sol compact sur un substratum infiniment rigide.

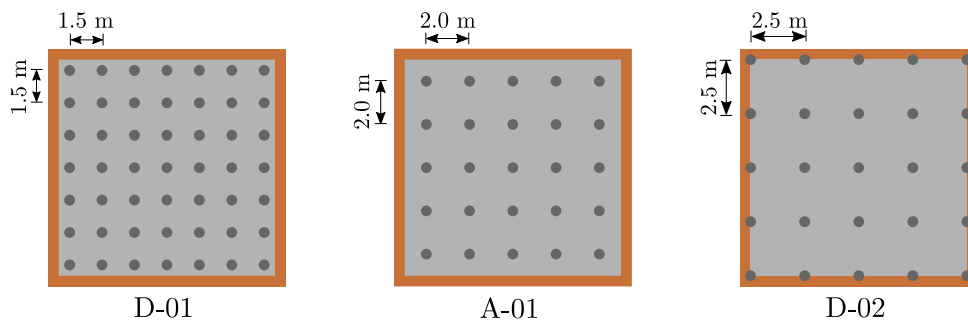


Figure 4. Plusieurs implantations des inclusions rigides avec différents espacements

Les résultats sont présentés sur la figure 5. L'ensemble des résultats met en évidence une diminution de l'amplitude de la sollicitation au-delà d'une certaine fréquence. Cela montre que la présence des inclusions peut jouer le rôle d'un filtre hautes-fréquences qui impacterait le signal arrivant à la base de l'ouvrage, ce qui aura un effet a priori bénéfique sur la réponse de la structure. Cette observation est dans la continuité de celles disponibles dans la littérature pour les fondations profondes (Kaynia et Kausel, 1982). La diminution

maximale de l'amplitude du signal à haute fréquence atteint 20% pour la configuration C-02.

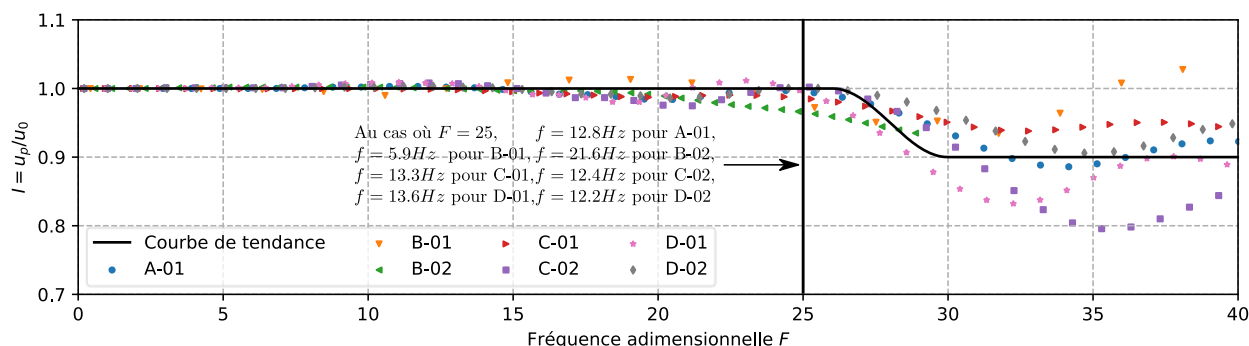


Figure 5. Facteur d'interaction cinématique en fonction de la fréquence adimensionnelle F

4. Etude de la réponse sismique d'une fondation sur inclusions rigides

4.1. Action sismique

On étudie ici l'effet d'interaction cinématique pour une fondation sur inclusions rigides soumise à un mouvement sismique. L'action sismique est caractérisée à partir du spectre de réponse élastique défini dans l'Eurocode 8 pour une zone de sismicité IV, un ouvrage de catégorie d'importance III et un profil de sol de type E. On génère ensuite cinq accélérogrammes artificiels compatibles avec ledit spectre avec une durée de la phase forte de 20 secondes en utilisant la formulation proposée par Vanmarcke et al. (1976), ce qui permet d'établir une relation entre le spectre cible et la densité spectrale de puissance.

La figure 6 présente les spectres de réponse à 5% d'amortissement pour chacun des accélérogrammes calculés (courbes pointillées), le spectre moyen des cinq accélérogrammes (courbe en rouge) ainsi que le spectre cible (courbe en noir).

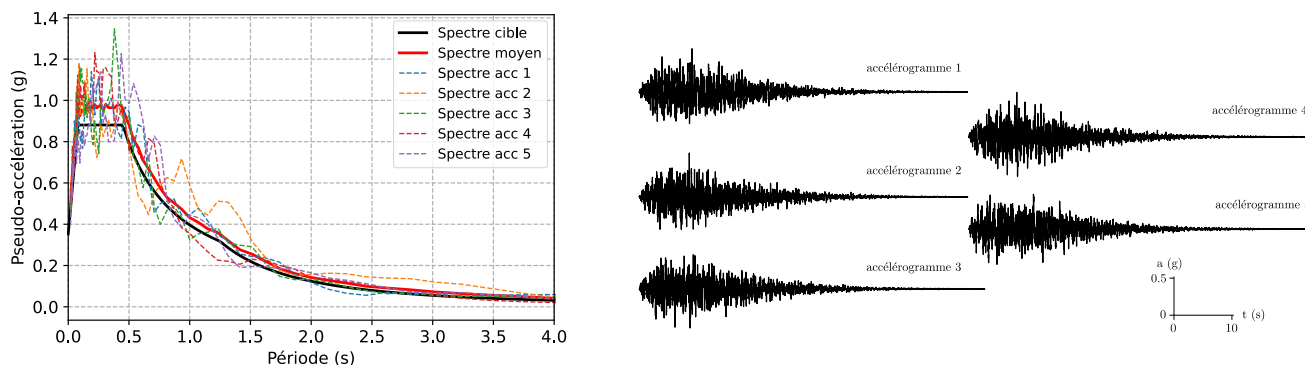


Figure 6. Comparaison du spectre moyen à 5% des accélérogrammes calculés et spectre cible

4.2. Modification du signal à la base de la structure

Les résultats présentés au §3 ont montré que pour des valeurs de F élevées (correspondant par exemple à des sollicitations rapides, un taux de substitution élevé, des inclusions de grand diamètre, ou un sol mou), la présence des inclusions rigides est susceptible de modifier le mouvement sismique arrivant à la base de la structure par rapport au champ libre. Dans cette section, on s'intéresse à la façon dont ce mouvement est modifié dans le cas spécifique d'une sollicitation sismique. L'étude réalisée compare la réponse cinématique de trois types de fondation : fondation sur inclusions rigides, fondation superficielle et fondation sur pieux, pour la configuration A-01 et afférents (cf. figure 7(a)).

La réponse cinématique de chaque configuration est établie en termes d'accélération en fonction du temps que l'on traduit ensuite en spectres de réponse en pseudo-accélération. Ces spectres de réponse sont normalisés par ceux obtenus en surface de la colonne de sol en champ libre permettant ainsi de définir un facteur d'interaction cinématique sous séisme. Dans la figure 7(b) la réponse moyenne obtenue à partir des cinq accélérogrammes est indiquée par les courbes continues, avec en couleur l'enveloppe des réponses individuelles.

Pour une fondation superficielle (A-02, courbe bleue), le spectre de réponse est quasi-identique à celui en champ libre et il est légitime (comme il est d'usage) de négliger les effets d'interaction cinématique. Pour une fondation sur pieux (A-03, courbe verte), la présence des pieux peut atténuer de façon notable (jusqu'à -25% à hautes fréquences) le spectre de réponse par rapport à celui en champ libre. Pour une fondation sur inclusions rigides (A-01, courbe noire), la modification du spectre de réponse est faible (moins de 10%) et n'apparaît que pour des fréquences d'ISS supérieures à 3 fois la fréquence fondamentale de la colonne de sol. Ces résultats corroborent ceux établis dans une étude précédente en considérant un chargement purement sinusoïdal (Shen et al., 2021). Dans la plupart des cas, négliger les effets d'interaction cinématique relève d'une démarche sécuritaire.

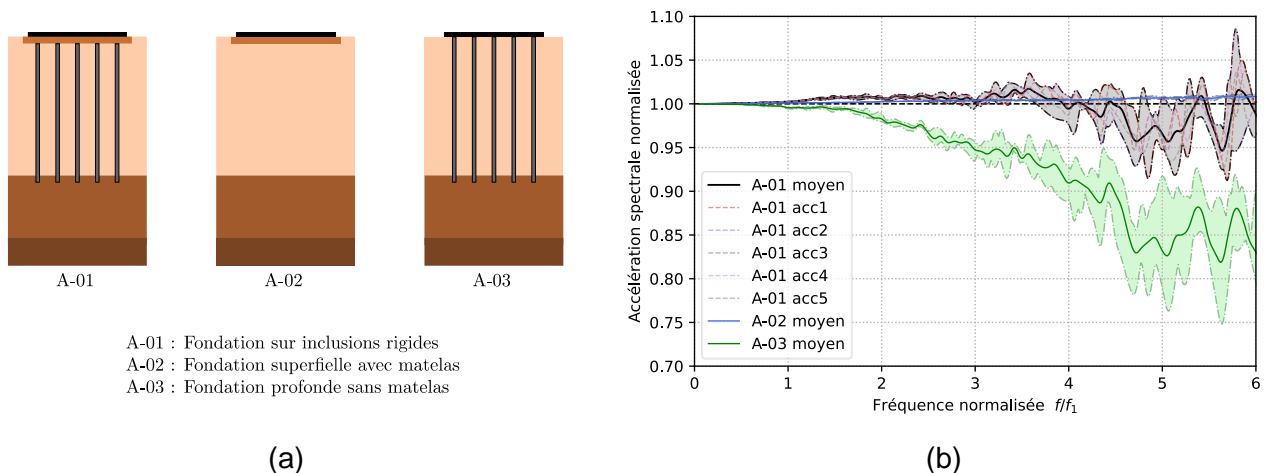


Figure 7. (a) Schémas des différentes fondations étudiées et (b) spectre de réponse en pseudo-accélération normalisé à la surface

4.3. Sollicitations d'origine cinématique dans les inclusions rigides

4.3.1. Déformée cinématique en champ libre

Dans les études courantes d'interaction sol-structure sous séisme, les sollicitations d'origine cinématique pour les pieux et les inclusions rigides sont usuellement estimées par un modèle de Winkler pseudo-statique (modèle de type p-y). Dans ce modèle, le mouvement cinématique du sol est introduit comme un déplacement libre noté $g(z)$ que l'on impose aux extrémités d'un modèle discret constitué de ressorts d'interaction sol-inclusion (et non pas à l'inclusion). Ce déplacement $g(z)$ est pris dans la pratique égal à la déformée du mode fondamental de la colonne de sol en champ libre. Il existe diverses approches pour déterminer ce mode fondamental faisant intervenir des approximations plus ou moins justifiées. Une approche directe (et sans itérations) consiste à discrétiser la colonne de sol en une série d'oscillateurs équivalents (masses, ressorts, amortisseurs) à partir desquels on constitue une matrice de rigidité et une matrice de masse (cf. figure 8). Il suffit ensuite de rechercher les valeurs et vecteurs propres de ce système matriciel pour déterminer les pulsations propres de la colonne de sol et les déformées propres associées. Le mode fondamental correspond par définition à la plus petite des fréquences propres ainsi obtenues.

L'amplitude de cette déformée cinématique est prise égale au déplacement maximal du sol en champ libre, noté d_{\max} . Celui-ci peut être obtenu en examinant l'asymptote à $f \sim 0$ du

spectre de réponse en déplacement (PGD). Pour les spectres de réponse de l'Eurocode 8, cette asymptote correspond par construction à $d_{max} = 0.025a_{max}T_C T_D$ où a_{max} désigne l'accélération maximale en surface (PGA) et T_C et T_D sont des paramètres directement spécifiés par les arrêtés nationaux. Pour un sol de classe E et une zone de sismicité comprise entre 1 et 4, on a $T_C T_D = 0,56s^2$.

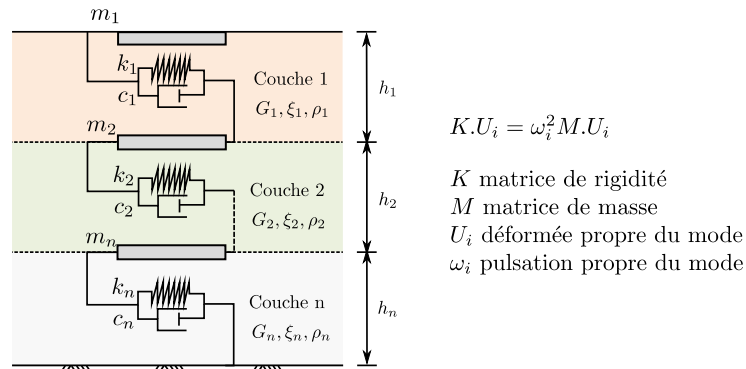


Figure 8. Modèle discret pour la réponse dynamique d'une colonne de sol (Brûlé et Cuira, 2017)

4.3.2. Sollicitations d'origine cinématique

On compare dans ce paragraphe le moment fléchissant obtenu par l'approche pseudo-statique usuelle (modèle p-y pour inclusion isolée libre en tête soumise à la déformée cinématique $g(z)$ présentée sur la figure 9(a)) à celui issu d'un calcul 3D temporel mené sous SASSI2010 où la base du modèle est soumise à l'application d'un signal sismique correspondant aux accélérogrammes présentés dans §4.1. Les principes des modèles utilisés sont schématisés sur la figure 9(a). Pour l'approche pseudo-statique, le déplacement maximal à la surface d_{max} est défini directement à partir du PGD des spectres de réponse en déplacement associés aux accélérogrammes utilisés. La raideur K_f des ressorts d'interaction sol/inclusion (module de réaction frontal) est estimée par corrélation avec le module de cisaillement du terrain $K_f = 2,4(1+\nu) G$ (Gazetas et al. 1993). Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 9(b). Le moment fléchissant obtenu y est normalisé par $E_p I_p / d$. Pour l'approche dynamique, les inclusions sont modélisées par des éléments de poutre et peuvent reproduire la rigidité de flexion et interagir avec le sol environnant de manière adéquate (Mánica et al., 2016).

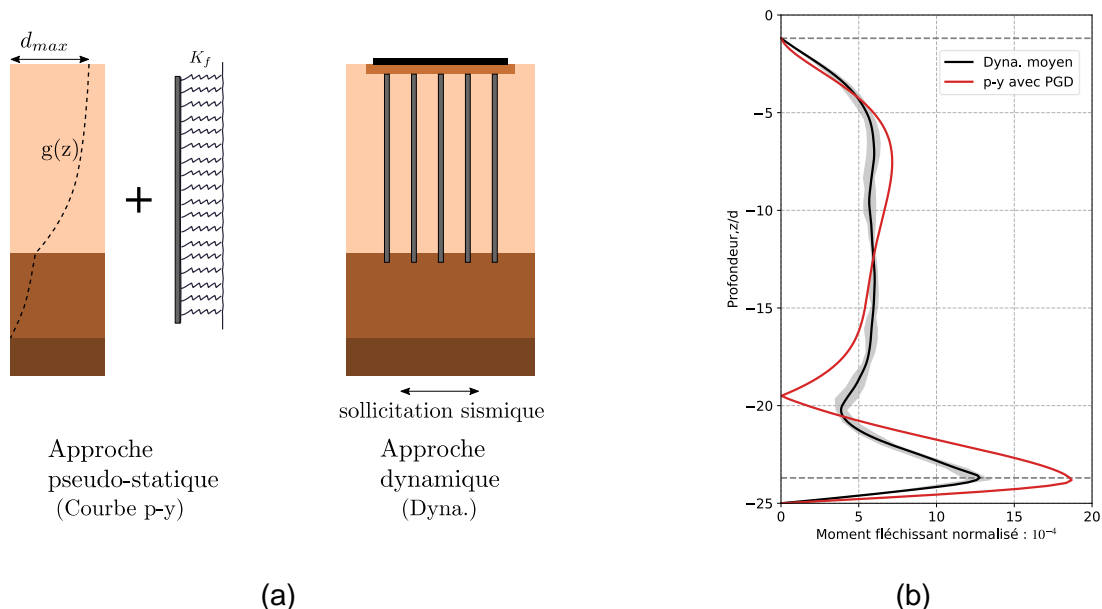


Figure 9. (a) Modèles de calcul utilisés et (b) profil de moment fléchissant normalisé

La comparaison témoigne de la capacité de l'approche pseudo-statique à capter la position où l'amplitude maximale du moment fléchissant se développe : à l'interface entre le sol mou et le sol compact porteur. Cependant, une surestimation du moment fléchissant maximal d'environ 50% est observée avec l'approche pseudo-statique dans le cas présent.

5. Conclusions

Une étude numérique a été présentée afin d'évaluer les effets d'interaction cinématique d'un massif renforcé par inclusions rigides sous le passage d'ondes sismiques. Les calculs ont été conduits à l'aide d'un modèle hybride BEM-FEM 3D et un modèle de type « p-y ».

Des facteurs d'interaction cinématique ont été calculés pour toutes les configurations étudiées. Ils ont permis de constater une diminution de l'amplitude du signal à haute fréquence du fait de la présence des inclusions et du matelas, pouvant aller jusqu'à -20%.

Un jeu de cinq accélérogrammes artificiels est utilisé ensuite pour étudier la variation du signal arrivant à la base de la structure par rapport à la réponse de la colonne de sol en surface libre. De manière générale, une tendance similaire à celle constatée pour les fondations profondes est observée, cependant l'amplitude de la variation est beaucoup moins importante dans le cas des IR, avec une variation inférieure à 5% sur toute la gamme des fréquences d'intérêt.

Enfin, l'étude a également mis en évidence la capacité de l'approche pseudo-statique à capter la position où l'amplitude maximale des moments fléchissants d'origine cinématique se développe : à l'interface entre le sol mou et le sol compact porteur, en comparaison avec un traitement dynamique temporel. L'étude se poursuit en examinant d'autres conditions d'encastrement et de stratigraphie, en particulier en présence d'une couche raide en partie supérieure des inclusions.

6. Références bibliographiques

- Brûlé S., Cuira F. (2018). Pratique de l'interaction sol-structure sous séisme. AFNOR, Paris.
- Gazetas G. (1984). Seismic response of end-bearing single piles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 3, n°2, pp. 82-93.
- Gazetas, G., Fan, K., Kaynia, A. (1993). Dynamic response of pile groups with different configurations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol.12, n°4, pp. 239-257.
- Kausel E., Whitman R.V., Morray J.P., Elsabee F. (1978). The spring method for embedded foundations. *Nuclear Engineering and design*, vol. 48, no°2-3, pp. 377-392.
- Kaynia A.M., Kausel E. (1982). Dynamic behavior of pile groupes. *Proceedings, Second International Conference on Numerical Method in Offshore Piling*, pp. 24.
- Mánica Malcom MÁ, Ovando-Shelley E, Botero Jaramillo E (2016). Numerical study of the seismic behavior of rigid inclusions in soft Mexico City clay. *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 20, n°3, pp. 447-475.
- Nikolaou S., Mylonakis G., Gazetas G., Tazoh T. (2001). Kinematic pile bending during earthquakes: analysis and field measurements. *Geotechnique*, vol. 51, n°5, pp. 425-440.
- Ostadan F., Chen C., Lysmer J. (2000). SASSI2000: A system for analysis of soil-structure interaction. University of California, Berkeley, CA, USA.
- Pérez-Herreros 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 sismiques. *Proceedings, 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. pp. 1573-1576.
- Shen Y., Pérez-Herreros J., Cuira F., Semblat J.F., Burlon S. (2021). Dynamic response of shallow foundations on reinforced soil with rigid inclusions. *Proceedings, 17th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Vanmarcke EH, Gasparini DA (1976). Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra. SIMQKE User's manual and documentation. MIT Report R76-4.