

INTERACTION INERTIELLE SOL-STRUCTURE D'UN MASSIF RENFORCÉ PAR INCLUSIONS RIGIDES

INERTIAL SOIL-STRUCTURE INTERACTION OF SOIL REINFORCED BY RIGID INCLUSIONS

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 inertielle d'un massif renforcé par inclusions rigides. Différentes configurations sont étudiées au moyen d'une analyse paramétrique. Les réponses d'un radier sur IR sous chargement inertiel sont analysées de manière séparée pour chaque direction. Les questions de la modélisation du matelas et de l'effet de couplage sont aussi explorées dans ce travail.

ABSTRACT – This paper investigates the inertial interaction effects for soil reinforced by rigid inclusions. Different configurations are studied by means of a parametric study. The inertial behaviours of a foundation on rigid inclusions are analysed separately according to the directions. Several questions regarding the numerical modelling of the load transfer platform and the coupling effect are also explored in this work.

1. Introduction

L'amélioration des sols par inclusions rigides (cf. figure 1) est une solution intéressante pour augmenter la capacité portante statique, permettant d'utiliser les fondations superficielles sur des sols compressibles. Par rapport à la fondation sur pieux, cette technique constitue un bon compromis entre la réduction des tassements effectifs et la diminution des coûts de construction. Par conséquent, plusieurs études numériques et expérimentales ont porté, durant les vingt dernières années, sur la compréhension des mécanismes de fonctionnement de la technique de renforcement du sol avec des inclusions rigides sous chargement statique et cyclique (ex. le projet national ASIRI) et ont permis d'aboutir à des recommandations pratiques pour la profession.

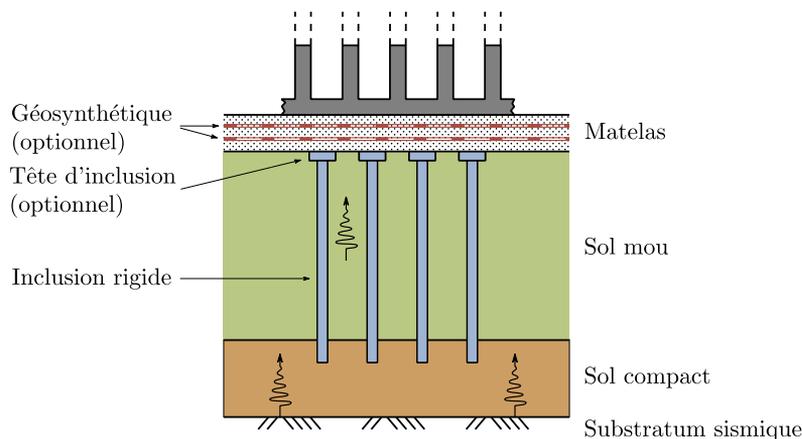


Figure 1. Schéma d'une fondation sur inclusions rigides sous charge sismique

La conception parasismique des structures nécessite de prendre en compte les effets dynamiques d'interaction sol-structure de manière rigoureuse. Cependant, le comportement

de ce type de fondation sous chargement sismique n'a pas encore été étudié de manière intensive (Shen, et al., 2021). Cet article propose donc de quantifier les effets d'interaction inertielle en termes d'impédance dynamique équivalente. Ce travail s'inscrit dans le cadre de la tâche 8 du Projet National ASIRI+ (<https://asiriplus.fr/>).

Le point de départ de ce travail est constitué par le grand nombre de travaux de recherche et observations déjà disponibles pour les fondations superficielles et profondes sous chargement inertiel (Kaynia, 1982 ; Gazetas, 1984 ; Gazetas, 1992). Ces travaux, complétés lorsque nécessaire par des simulations numériques ponctuelles, donnent aujourd'hui une connaissance précise et éclairée des effets dominant la réponse de ce type de fondations et permettent d'adapter les méthodes de calcul aux caractéristiques de l'ouvrage objet de l'étude (ex. ouvrage souple vs. ouvrage raide).

Compte tenu les caractéristiques du système de fondation sur inclusions rigides, il semble raisonnable de considérer que des phénomènes similaires vont aussi se manifester dans le cas de ce type de fondation (ex. effet de groupe, variation de la raideur et amortissement apparentes avec la fréquence, etc.). Cependant, la vraisemblance entre la réponse des différents modes de fondation n'a pas encore été abordée de manière détaillée et les quelques études préliminaires disponibles dans la littérature traitant la réponse inertielle des fondations sur inclusions rigides se sont focalisés pour l'instant à des aspects particulières de la réponse, comme la souplesse de la fondation (Okuy et al., 2012 ; Messiod et al., 2016).

Aussi, la question de l'adaptation des modèles et hypothèses de calcul usuellement mises en œuvre dans les bureaux d'études (ex. modélisation explicite des éléments de fondation vs. approche par milieu homogène équivalent) n'a pas encore été abordée de manière détaillée.

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. 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, comme illustré sur la figure 2.

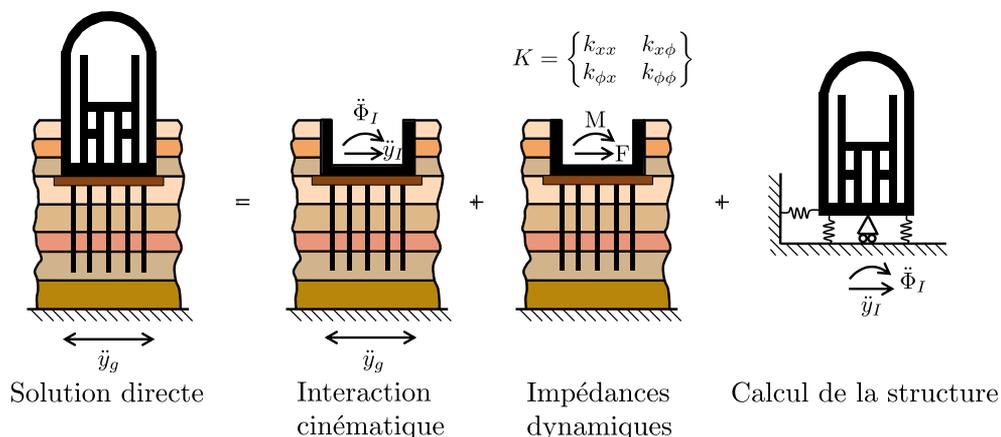


Figure 2. Approche de sous-structures appliqué à l'étude d'une structure sur inclusions rigides

Le travail présenté dans cet article s'inscrit dans le cadre de cette décomposition et se focalise sur la deuxième 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 sur un substratum semi infini. Le radier est représenté par un réseau tridimensionnel de poutres rigides et non pensantes. Les inclusions sont modélisées par des éléments de poutre (désolidarisés du radier). 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. 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

Le profil de sol considéré dans cette étude est constitué de deux couches de sol et un substratum : une couche de sol mou de 10 m d'épaisseur et une couche de sol plus compact de 5 m d'épaisseur reposant sur le substratum rocheux. Leurs propriétés 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

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).

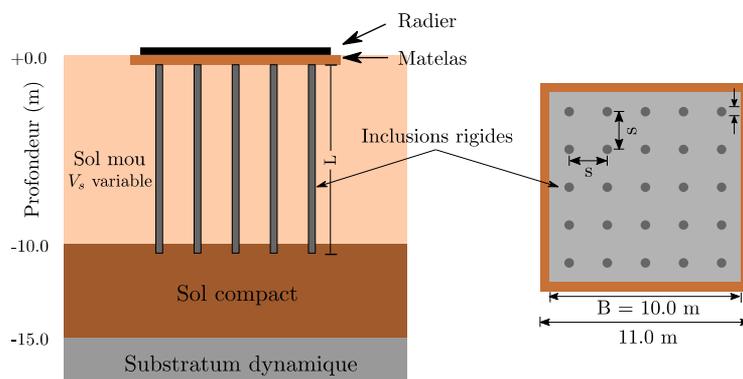


Figure 3 : Schéma de la configuration de référence utilisée dans l'étude paramétrique

2.3. Impédance dynamique d'une fondation sur inclusions rigides

On étudie ici la notion d'impédance dynamique appliquée au cas d'une fondation sur inclusions rigides. L'impédance dynamique d'une fondation est définie comme le rapport entre la force (ou le moment) harmonique F et le déplacement (ou la rotation) harmonique

résultant en régime permanent U au centroïde de la fondation sans masse. Par définition, les impédances dynamiques sont exprimées comme $Z = F/U$.

En raison de la présence d'un certain amortissement, le déplacement résultant U est souvent déphasé par rapport à la force F appliquée. Les fonctions d'impédance sont donc définies en notation complexe sous la forme $Z(\omega) = K(\omega) + i\omega C(\omega)$ où $K(\omega)$ et $C(\omega)$ varient en fonction de la pulsation ω . La partie réelle K est communément appelée « raideur dynamique » et la partie imaginaire ωC reflète le cumul des amortissements radiatif (ou géométrique) et matériel (ou interne) générés dans le système de fondation.

A partir de la configuration de référence présentée au §2.2, on mènera une étude paramétrique en faisant varier plusieurs paramètres. Ainsi, les groupes des configurations B, C et D sont générés en faisant varier le rapport de rigidité inclusion-sol E_p/E_s , l'élanement d'inclusion L/d , le rapport entre l'espacement et le diamètre d'inclusion s/d , et le nombre d'inclusion, respectivement. Les caractéristiques principales des différentes configurations sont synthétisées dans le tableau 2 et la figure 4.

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

Groupe	Cas	f_1^* (Hz)	B/L	L/d	E_p/E_s	s/d
A	01	3.50	1.0	23.8	230	4.76
B	01	2.42	1.0	23.8	517	4.76
	02	4.43	"	"	129	4.76
C	01	3.50	1.0	31.3	230	6.25
	02	"	"	19.2	"	3.85
D	01	3.50	1.0	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.

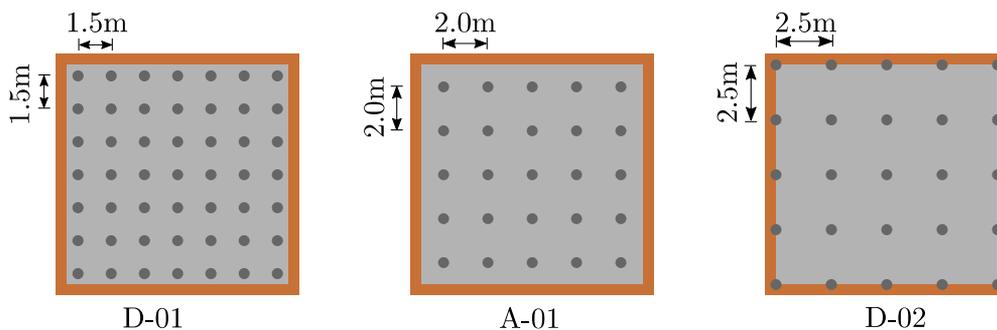


Figure 4. Plusieurs implémentations des inclusions rigides avec différents espacements

3. Etudes paramétriques

3.1. Impact de la modélisation de la plate-forme de transfert

A la différence d'une fondation sur pieux, les têtes des inclusions rigides ne sont pas structurellement liées à la structure portée. La mise en œuvre d'un matelas d'une épaisseur minimale servant comme couche de répartition assure le transfert de la descente des charges de l'ouvrage aux inclusions. Le matelas est globalement plus résistant et moins compressible que le sol à renforcer et est souvent représenté dans les modèles de calcul « statiques » sous la forme d'une nouvelle couche de sol. Cette simplification est raisonnable vis-à-vis de l'étude des charges statiques (verticales) du fait de l'extension limitée de la zone d'influence de la fondation. Cependant, ce raisonnement n'est pas applicable sous chargement dynamique et notamment vis-à-vis du mode de réponse horizontale (effet diaphragme). Par conséquent, il est intéressant d'étudier l'impact du choix de modélisation de la plate-forme de transfert de charge sur la réponse de la fondation (cf. figure 5).

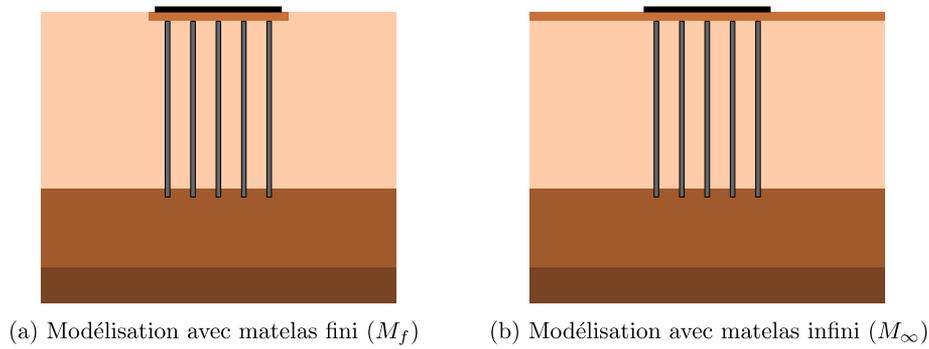


Figure 5. Fondation sur IR avec deux types de modélisation du matelas : (a) modélisation explicite et (b) modélisation sous la forme d'une couche de sol de largeur infinie

Une série d'études est réalisée en faisant varier le rapport de vitesse de propagation des ondes de cisaillement entre le matelas et le sol mou, V_m/V_{sm} . Les résultats sont présentés sur la figure 6 en termes du rapport des raideurs dynamiques obtenues avec les deux modélisations K_{M_f}/K_{M_∞} et en fonction de la fréquence normalisée f/f_1 .

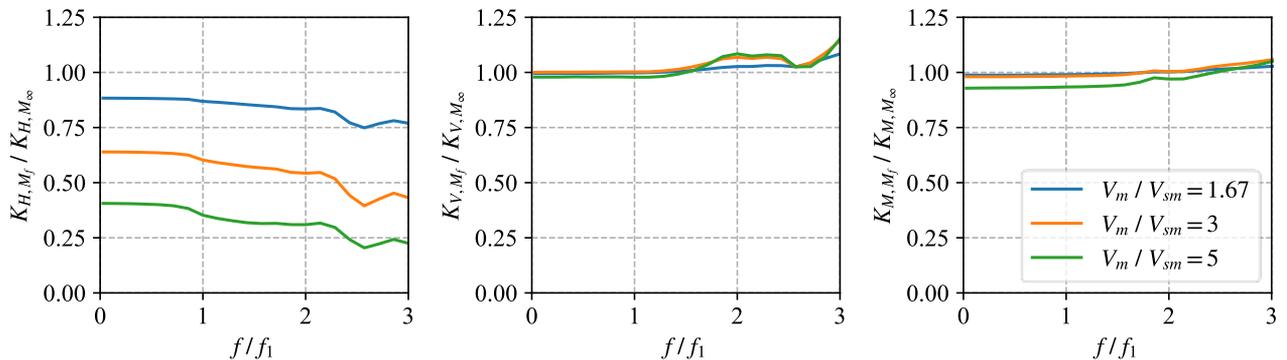


Figure 6. Rapport des raideurs dynamiques entre deux modélisations

Il est intéressant de constater que les raideurs verticale et rotationnelle sont peu impactées par le type de modélisation. Cependant, une différence significative est observée en termes de raideur horizontale et qui augmente lorsque le contraste de raideur entre le matelas et le sol en place augmente. Cette différence est expliquée par le développement d'un effet de diaphragme lorsque le matelas est représenté par une couche de sol de largeur infinie au lieu d'une modélisation explicite. Assimiler le matelas à une couche de sol infinie peut donc être de nature à surestimer la raideur dynamique horizontale dans un rapport de 1.5 à 2.0.

3.2. Comportement horizontal des fondations sur inclusions rigides

La disposition des inclusions présente une anisotropie mécanique dans le sol renforcé. Cela justifie dans la pratique le recours à des analyses séparées des comportements horizontal, vertical et rotationnel. Pour les taux de substitution habituels (de l'ordre de 2 à 5% pour les cas courants), la présence des inclusions exerce une influence négligeable sur la rigidité au cisaillement du massif renforcé et il apparaît légitime d'estimer l'impédance dynamique horizontale en négligeant la contribution des inclusions. Les raideurs horizontales d'un radier fondé sur inclusions rigides ($K_{H,IR}$) sont donc comparées avec celles obtenues pour la même configuration sans inclusions rigides ($K_{H,FS}$). Les deux systèmes de fondation sont illustrés sur la figure 7.

Selon la figure 8, pour des fréquences n'excédant pas 2 fois la fréquence propre du terrain ($f/f_1 < 2$) et pour toutes les configurations testées, l'impédance dynamique horizontale d'un radier sur sol renforcé par inclusions est quasi-identique à celle d'un radier sur sol non

renforcé. Pour des fréquences d'ISS élevées (cas d'une structure très rigide par exemple), des écarts apparaissent mais n'excèdent pas 10 à 20%.

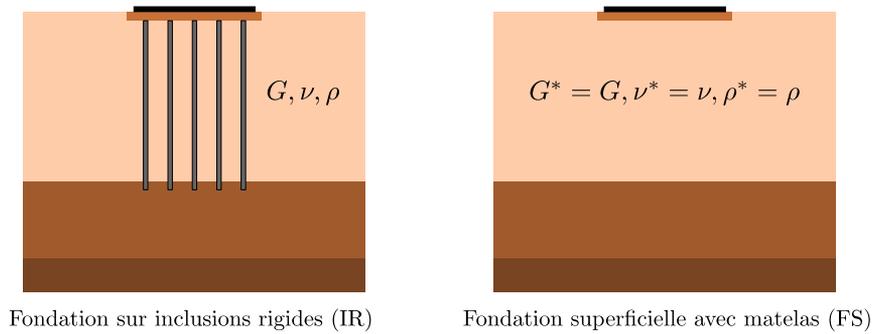


Figure 7. Fondation sur inclusions rigides (IR) et fondation superficielle sur matelas (FS)

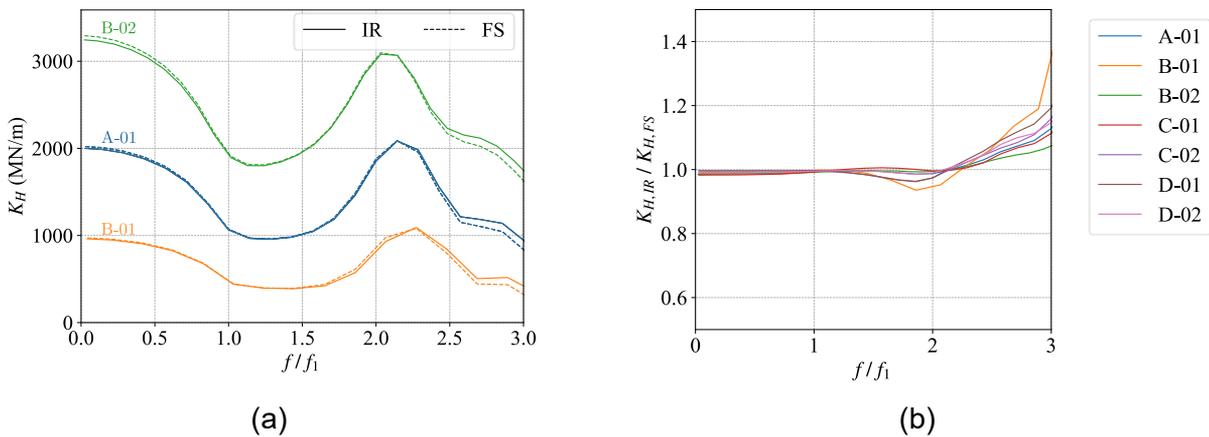


Figure 8. Comparaison de la raideur horizontale d'une fondation sur inclusions rigides (IR) à celle d'une fondation superficielle sur matelas (FS) : (a) évolution de la raideur et (b) du rapport

3.3. Comportement vertical et rotationnel des fondations sur inclusions rigides

Ce paragraphe s'intéresse aux réponses verticale et rotationnelle des fondations sur inclusions rigides. On compare pour cela l'impédance obtenue par un modèle explicitant le sol et les inclusions avec une modélisation simplifiée dans laquelle le sol renforcé est représenté par une couche élastique homogène de module équivalent E^* (cf. figure 9(a)). Le module équivalent E^* est obtenu au préalable à l'aide d'un modèle de cellule élémentaire (cf. figure 9(b)) mené à l'aide du programme Taspie+ développé par Terrasol, basé sur une généralisation du modèle t-z (Cuira et Simon, 2009 ; Cuira et Simon, 2013 ; Alzate et al., 2022). La figure 10 présente le résultat de cette comparaison.

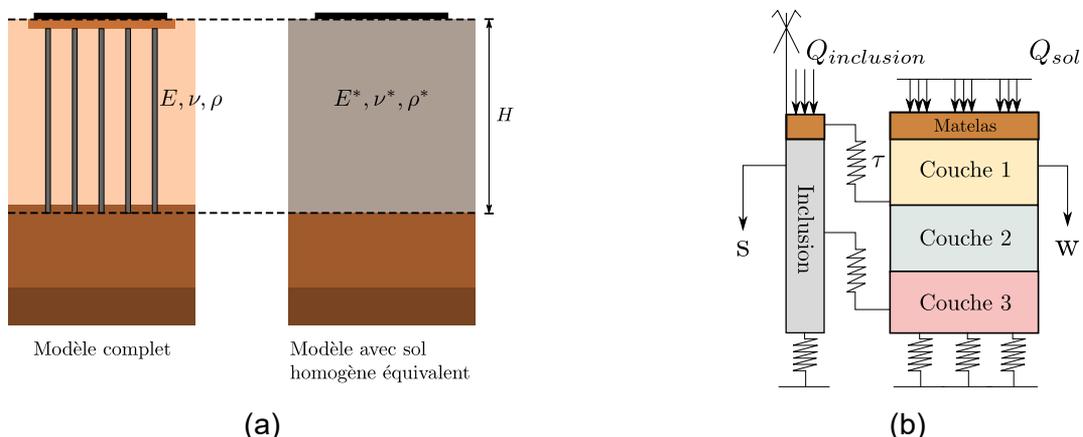


Figure 9. Modèle de calcul de la réponse verticale et à rotation d'une fondation sur IR : (a) modèle complet et modèle avec sol homogène équivalent et (b) cellule élémentaire sol-inclusion

La figure 10 montre que, pour des fréquences d'ISS allant jusqu'à 2 fois la fréquence propre du sol, les impédances (verticale et rotationnelle) calculées par le modèle complet est voisine de celle issu d'un modèle sur sol homogène équivalent, avec un écart qui n'excèdent pas 10%. Pour des fréquences d'ISS plus élevées, les effets dynamiques sont plus marquants et l'écart entre les deux approches peut devenir significatif (particulièrement pour le mode vertical).

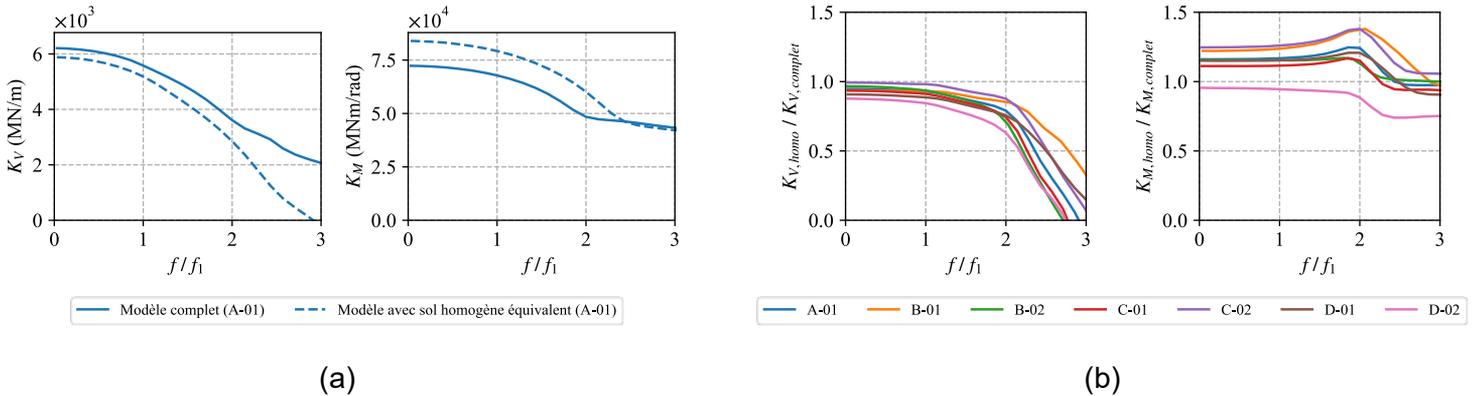


Figure 10. (a) Comparaison des impédances verticales et à rotation et (b) rapport entre les impédances calculées avec un modèle avec sol homogène équivalent et un modèle complet

3.4. Impact des termes de couplages

La réponse d'une fondation (rigide) sur sol renforcé par inclusions rigides peut être représentée théoriquement par une matrice de souplesse 6×6 $S(\omega)$ reliant, en écriture complexe, les forces appliquées $F(\omega)$ aux déplacements $U(\omega)$. L'inversion de cette matrice $S(\omega)$ permet d'établir la matrice d'impédance : $Z(\omega) = [S(\omega)]^{-1}$. En toute rigueur, cette matrice n'est pas diagonale. Les termes non-diagonaux reflètent les effets de couplage qui subsistent entre les mouvements translationnels et rotationnels. Pour une fondation superficielle, on peut négliger avec une approximation suffisante ces effets de couplage (et donc les termes non diagonaux). Pour une fondation sur pieux, négliger ces effets peut fausser les résultats dans des proportions significatives. Pour une fondation sur inclusions, la question mérite d'être traitée. C'est l'objet du présent paragraphe.

On désigne par $Z^{app}(\omega)$ la matrice d'impédances diagonale obtenue en négligeant les termes non diagonaux de la matrice de souplesse $S(\omega)$. La comparaison de $Z^{app}(\omega)$ et $Z(\omega)$ permet d'évaluer l'importance des effets de couplage. Les comparaisons pour le cas A-01, C-01 et C-02 sont présentées dans la figure 11. Les résultats obtenus témoignent d'un comportement similaire à celui d'une fondation superficielle pour laquelle les effets de couplage jouent un rôle limité.

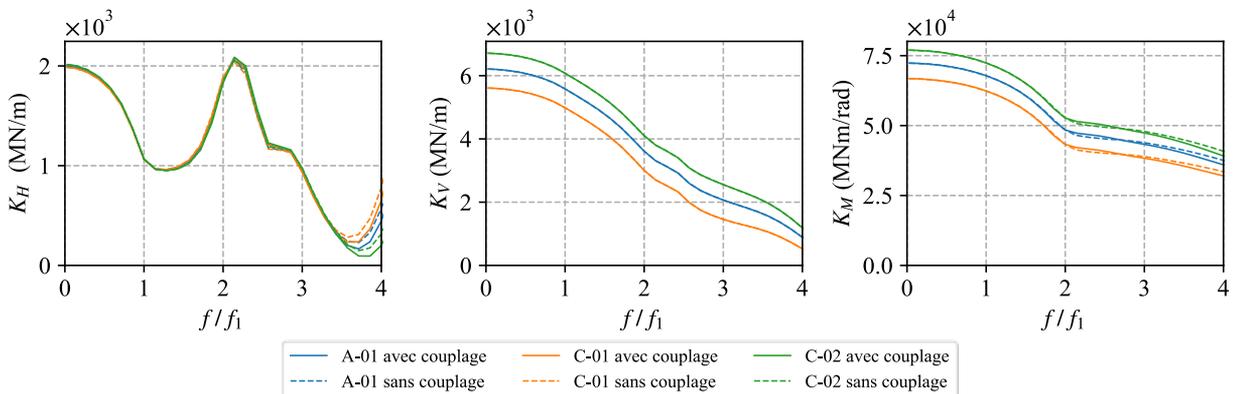


Figure 11. Comparisons des raideurs dynamiques avec/sans effet de couplage pour le groupe C

4. Conclusions

Une étude numérique a été présentée afin d'identifier les effets d'interaction inertielle d'un massif renforcé par inclusions rigides. Il a pu être observé que le comportement inertiel est fortement dépendant de la fréquence, pouvant subir des diminutions ou amplifications en raison de l'effet d'interaction dynamique.

Pour le mode horizontal, le comportement observé est très proche de celui d'un radier fondé sur sol non renforcé. Cela implique que les inclusions rigides n'impactent pas la rigidité horizontale de la fondation (pour les taux de substitution usuels). Il a par ailleurs été constaté que la modélisation du matelas sous la forme d'une couche de sol de largeur infinie peut être de nature à surestimer de façon notable l'impédance de la fondation.

Pour les modes vertical et rotationnel, les résultats d'un modèle complet ont été comparés à ceux d'une modélisation simplifiée sur sol homogène équivalent. Les résultats mettent évidence la capacité des modèles simplifiés à rendre compte du comportement dynamique pour des fréquences d'ISS allant jusqu'à 2 fois la fréquence propre du terrain. Cette simplification semble cependant être mise en défaut pour des fréquences d'ISS plus élevées.

Enfin, il a été observé que les effets de couplage entre les modes translationnels et rotationnels sont négligeables pour les fondations sur inclusions rigides.

5. Références bibliographiques

- Alzate A.M., Frattini N., Cuira F., Simon B. (2022). Quelques considérations pratiques autour du calcul des semelles et radiers sur inclusions rigides. Proceedings, 11th JNGG.
- Brûlé S., Cuira F. (2018). Pratique de l'interaction sol-structure sous séisme. AFNOR, Paris.
- Cuira F., Simon B. (2009). Deux outils simples pour traiter des interactions complexes d'un massif renforcé par inclusions rigides. Proceedings, 17th ICSMGE. pp.1550-1553.
- Cuira F., Simon B. (2013). Prise en compte des effets de bord dans un massif renforcé par inclusions rigides. Proceedings, 18th ICSMGE. pp.1955-1958.
- Gazetas G. (1984). Seismic response of end-bearing single piles. International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol.3, no°2, pp.82-93.
- Gazetas G. (1991). Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations. Journal of geotechnical engineering, vol.117, no°9, pp.1363-1381.
- 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. (1982). Dynamic stiffness and seismic response of pile groups. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, January 1982.
- Messioud S., Okyay U. S., Sbartai B., Dias D. (2016). Dynamic response of pile reinforced soils and piled foundations. Geotechnical and Geological En., vol.34, no°3, pp.789-805.
- Okyay U. S., Dias D., Billion P., Vandeputte D., Courtois A. (2012). Impedance functions of slab foundations with rigid piles. Geotechnical and Geological En., vol.30, no°4, pp.1013-1024.
- 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 ICSMGE. 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 WCEE.