

EFFET DES INCLUSIONS RIGIDES SUR LA REPONSE D'UN SYSTEME SOL-STRUCTURE RIGIDE SOUS SOLLECITATIONS SISMQUES

EFFECT OF RIGID INCLUSIONS ON THE RESPONSE OF A SOIL – RIGID STRUCTURE SYSTEM UNDER DYNAMIC LOADS

Charbel NOHRA¹, Cristian SORIANO-CAMELO¹, Sandra ESCOFFIER¹, Zheng LI¹, Luc THOREL¹

¹ Univ Gustave Eiffel, GERS-CG, F-44344 Bouguenais, France

RÉSUMÉ – Dans cette étude, deux essais en centrifugeuses dynamiques ont été réalisés à l'Université Gustave Eiffel, Nantes, pour analyser l'effet des inclusions rigides sur la réponse d'un massif de sol supportant une structure élancée soumise à une séquence de mouvements de terrain. Les résultats montrent que les inclusions rigides font diminuer l'amplification du signal à la surface du sol ainsi qu'à la tête de la structure.

ABSTRACT – In this study, two dynamic centrifuge tests were conducted at Gustave Eiffel University, Nantes, to analyze the effect of rigid inclusions on the response of a soil mass supporting a slender structure subjected to a sequence of ground motions. The results indicate that the rigid inclusions reduce signal amplification both at the soil surface and at the head of the structure.

1. Introduction

Le système de renforcement par inclusions rigides (IR) implique l'installation d'inclusion verticales dans la couche faible du sol et le plus souvent jusqu'à une couche de sol sous-jacente plus résistante. Ce type de renforcement diffère du système de fondations sur pieux par la présence d'une couche granulaire, appelée plateforme de transfert de charge (PTC), interposée entre la tête de l'inclusion et la structure ou la fondation. Contrairement aux fondations sur pieux où la charge totale de la structure est transférée à travers les pieux, les systèmes d'IR transfèrent la charge à la fois aux inclusions rigides et au sol. De cette manière, une partie moindre des charges est supportée par les inclusions rigides, conduisant à une demande réduite et à une conception économique (Projet National ASIRI, 2012). Le renforcement par IR a été mis en œuvre dans divers ouvrages, tels que le pont Rion-Antirion (Pecker, 2004)

L'Interaction Sol-Structure-Inclusion (ISSI) sous sollicitations dynamiques a été étudiée dans le cadre des fondations profondes non connectées en tête, avec ou sans PTC par des modélisations physiques (Loli et al., 2015 ; Ha et al., 2019 ; Ko et al., 2019) ou numériques (Jimenez et al., 2022). Yang et al. (2023) ainsi que Li et al. (2024) ont étudiés les effets de la nature et de l'épaisseur de la PTC sur ses capacités de dissipation d'énergie. Manica-Malcom et al. (2016) ont étudié l'effet de la longueur et du type de connexion en tête des IR ainsi que le type de structure.

Dans le cadre de ces travaux de recherche l'effet de la présence des IR sur la réponse d'un système de sol supportant une structure élancée soumise à une séquence de séismes est analysé. Dans ce cadre, trois essais en centrifugeuse ont été réalisés sur un massif de sol avec et sans structure élancée. Les essais sur modèles réduits ont été réalisés sous macrogravité (50g) avec la centrifugeuse de l'Université Gustave Eiffel. Les deux configurations ont été soumises à une séquence similaire de séismes.

2. Préparation du modèle

Pour les trois essais le massif de sol est formé de trois couches : une couche de sable dense de 80 mm (4m prototype) supportant une couche argileuse de 180 mm (9 m prototype) et enfin, la PTC de 20 mm (1m prototype). Une représentation schématique de la configuration des deux essais est présentée sur la Figure 1. L'essai sans IR est dénoté C-S et celui avec les IR est dénoté C-S-IR. Cette partie résume le protocole expérimental suivi pour la préparation des conteneurs à échelle réduite. Le troisième essai correspond à un essai en champ libre C-FF (sans bâtiment et IR) dont les résultats sont considérés comme références.

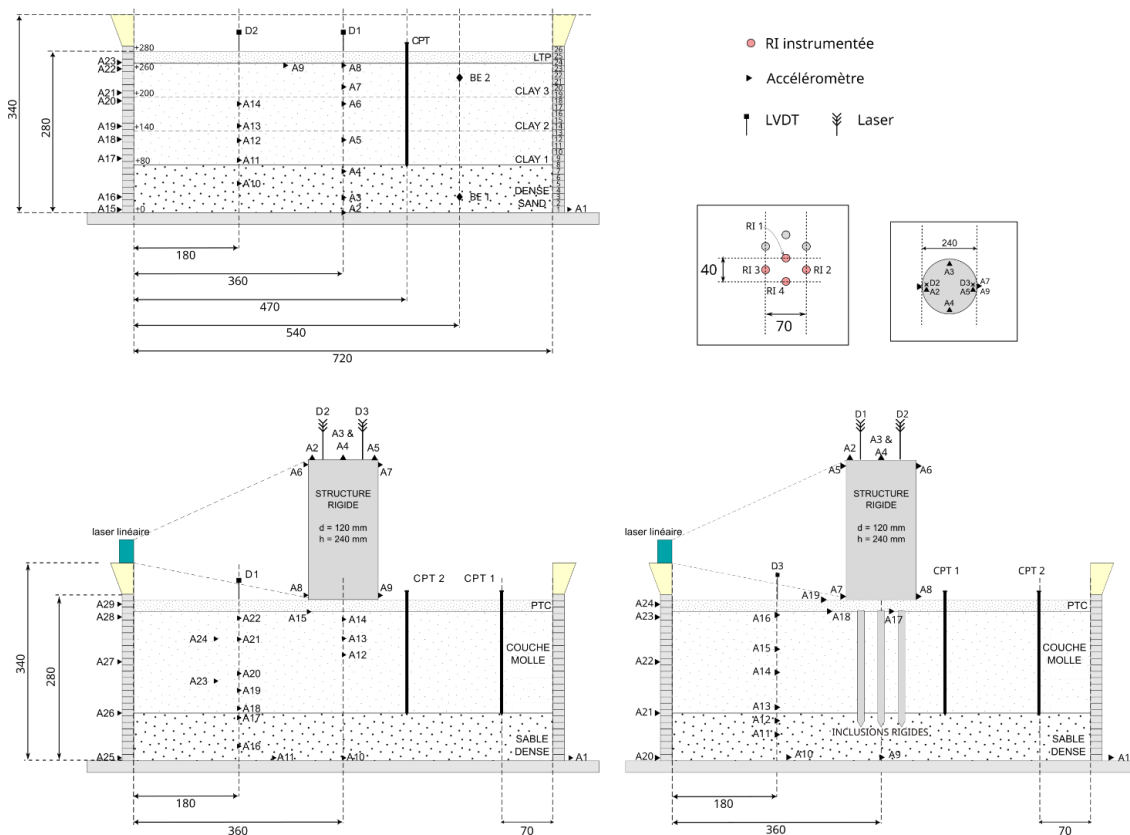


Figure 1. Schéma des modèles : C-S et C-S-IR

2.1. Massif de sol

La couche de sable dense est constituée de sable Hostun (HN31), d'une densité relative de 80% préparé par pluviation à l'air. Les propriétés physiques du sable de la couche de base sont présentées dans le Tableau 1 (Benahmed, 2001). Après la pluviation, le sable est saturé à l'eau selon la procédure proposée par Kutter (2013) avec laquelle le degré de saturation peut être estimé à environ 99,6% (Saade et al., 2023). Le choix d'une couche dense saturée à l'eau permet de minimiser les risques de liquéfaction l'objectif étant d'obtenir une couche de résistance élevée dans le cadre d'inclusions rigides travaillant en pointe.

Tableau 1. Propriétés physiques du sable d'Hostun HN31 (Benahmed, 2001).

| D_{50} (mm) | e_{min} (-) | e_{max} (-) | G_s (-) | $\rho_{d, min}$ (g/cm ³) | $\rho_{d, max}$ (g/cm ³) |
|---------------|------------------|------------------|--------------|---|---|
| 0.35 | 0.656 | 1.049 | 2.65 | 1.33 | 1.66 |

La couche molle de 180 mm a été préparée en trois sous-couches surconsolidées à l'aide d'un piston hydraulique. Chacune était constituée d'un mélange de 80% d'argile Speswhite Kaolinite et de 20% de sable de Fontainebleau. L'utilisation du Speswhite Kaolinite est privilégiée car cette argile présente une perméabilité relativement plus élevée que d'autres argiles, ce qui réduit le temps de consolidation (Pérez-Herreros, 2020). Les propriétés de la kaolinite sont présentées dans le Tableau 2 (Thorel et *al.*, 2011).

Tableau 2. Propriétés du Speswhite Kaolinite

| γ_s (kN/m ³) | w_p (%) | w_L (%) | I_p (%) | C_c (-) | C_s (-) |
|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 26,5 | 30 | 55 | 25 | 0,269 | 0,048 |

La PTC est reconstituée d'un mélange de la même masse de quatre sables (HN31, HN34, HN38 et HN0.4-0.63) de granulométrie différente pour avoir un sable à granulométrie étalée et un diamètre maximal des grains à l'échelle prototype de 31,5 mm. Cette couche, de 20 mm d'épaisseur, est installée par compactage manuel avec une teneur en eau de 5% pour la compaction.

2.2. Instrumentation

Le sol est instrumenté à l'aide de trois (essais C-S) ou deux (essai C-S-IR) colonnes verticales d'accéléromètres horizontaux afin d'étudier la réponse de la colonne de sol (Figure 1). Des capteurs de pression interstitielle sont disposés dans la couche de sable dense et dans la couche d'argile. La vitesse des ondes de cisaillement est déterminée à l'aide de paires de *bender elements*.

2.3. Inclusions rigides

Les IR modèles sont constituées de tubes d'aluminium de 200 mm de longueur et 12 mm de diamètre externe. Leur rigidité à la flexion est de 39 N.m² pour une rigidité à la compression de 2,56 MN. Les sept IR, dont quatre instrumentées, sont mises en place par fonçage (0,1 mm/s) après la reconstitution de la couche d'argile selon la configuration indiquée sur la Figure 1. Les IR sont instrumentés par des jauges de déformations, calibrées pour obtenir les moments et les forces axiales développées dans les IR.

2.4. Accélérations d'entrée

Une séquence similaire de 20 séismes et sinus a été appliquée sur les deux modèles à l'aide du simulateur de séisme de l'Université Gustave Eiffel. Une durée de cinq minutes modèle sépare chacun des tirs. La Figure 2 représente la séquence complète des signaux avec l'ordre d'application. La séquence est constituée de deux signaux de faibles amplitudes qui servent à analyser la réponse du système sous faibles sollicitations, trois groupes de sinus à fréquences et amplitudes différentes qui servent à étudier l'effet de la

fréquence et de l'amplitude d'entrée et finalement des séismes à amplitudes différentes pour vérifier la performance des IR sous sollicitations réelles. Après chaque groupe de sinus et à la fin de l'essai, un séisme Landers de 0.05g est appliqué pour regarder la variation de la réponse après le groupe de sinus et à la fin de l'essai.

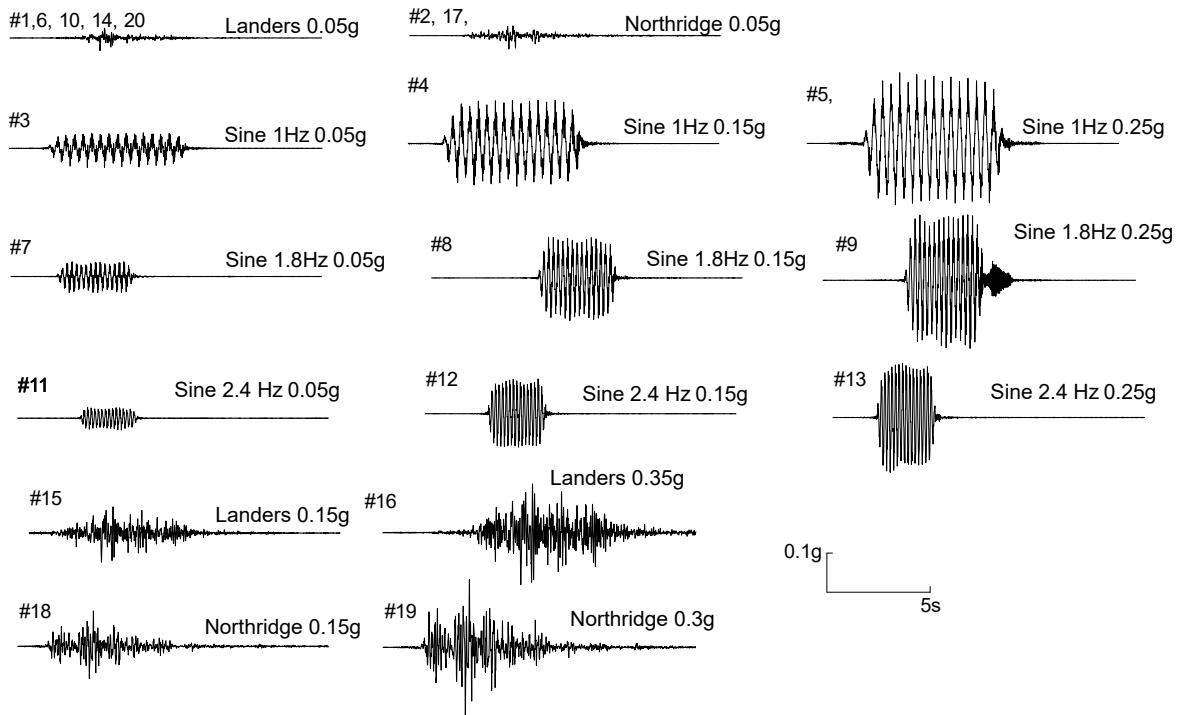


Figure 2. Accélérations d'entrées enregistrées à la base du conteneur (accéléromètre A1) :Landers, Northridge, Sinal sinusoïdal (*sine*).

2.5. Structure rigide

La structure modèle est formée d'un cylindre de 240 mm de hauteur et 120 mm de diamètre, de masse 1300 g. Son centre de gravité est positionné à une hauteur de 180 mm par rapport à sa base, d'où un facteur d'élançement de 1,5. Elle est instrumentée par des accéléromètres horizontaux installés sur son fut et verticaux sur sa tête. Deux lasers ponctuels verticaux sont installés sur sa tête pour suivre la rotation et le tassement pendant les tirs. Un essai au marteau a été réalisé à 1 g pour mesurer la fréquence naturelle de la structure sur support rigide. Le résultat montre que la fréquence naturelle de 7,8 Hz est élevée comparée au contenu fréquentiel des signaux d'entrées : la superstructure peut donc être considérée comme rigide dans le cadre de ces essais.

3. Résultats

Dans ce qui suit, sauf indications contraires, les grandeurs sont présentées à l'échelle réelle. La réponse du système est largement influencée par l'interaction Sol-Inclusions-Structure. La présence des inclusions rigides modifie la réponse au niveau de la surface de la couche d'argile ainsi que la réponse de la structure. Dans ce qui suit l'effet de la présence des inclusions rigides sur les accélérations mesurées ainsi que les fonctions de transfert de la colonne de sol mais aussi entre la surface du sol et la superstructure sont présentés.

3.1. Réponse à l'état vierge

La réponse du système à l'état vierge est analysé durant la phase de bruit qui précède le premier séisme. La Figure 3a représente, pour les 3 configurations étudiées, l'amplitude de la fonction de transfert (FT) calculée entre la base du conteneur (accélération d'entrée) et la surface du sol sous l'emplacement du bâtiment. La FT est déterminée comme le rapport des transformée de Fourier de ces deux accélérations. La fréquence naturelle de la colonne de sol (renforcée ou non) correspond à la fréquence du premier pic de l'amplitude de la FT. Le résultat montre qu'à l'état vierge le modèle a une fréquence naturelle de 2,3 Hz et cela pour les trois configurations. Cependant, une différence au niveau de l'amplitude de la FT est observée: au point correspondant à la fréquence naturelle, la configuration C-S admet l'amplification la plus forte (facteur d'environ 6) suivie du cas en champs libre (C-FF avec un facteur de 4) puis la configuration C-S-IR. Ce constat montre que l'ISSI modifie la transmission d'énergie de la base à la surface : le bâtiment (dans le cas C-S) exerce un chargement additionnel sur le sol, induisant une amplification du signal, alors que les IR sous le bâtiment peuvent s'opposer au déplacement latéral du sol, induisant une plus faible accélération entre les IR.

La FT entre la surface du sol (considérant l'accélération sur le conteneur laminaire) et la tête de la structure permet l'analyse de l'effet de l'ISSI sur la fréquence de réponse du bâtiment. La fonction de transfert avant le tir #1 (Figure 3b) montre pour les deux systèmes C-S et C-S-IR, une amplification correspondant à une fréquence de 1,6 Hz. Ainsi pour les configurations étudiées l'ISSI diminue la fréquence naturelle de la structure par rapport à sa fréquence naturelle sur base rigide. Dans le cas d'une configuration avec IR la diminution de fréquence sous faible sollicitation n'influe pas sur le rapport d'amplitude entre la surface du sol et le haut du bâtiment.

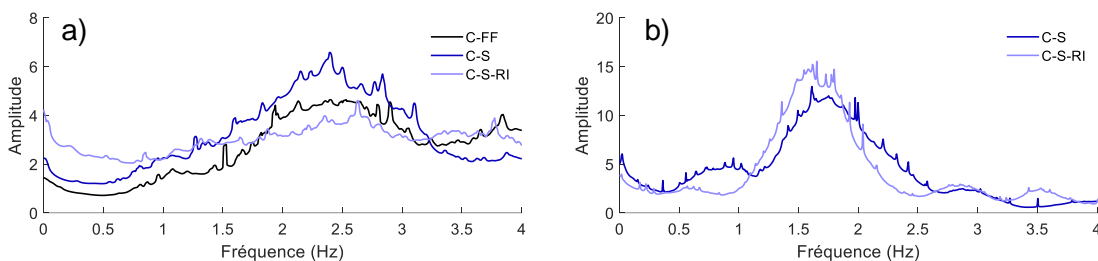


Figure 3. Fonction de Transfert du bruit: a) Surface - Base et b) Bâtiment - Surface

3.2. Effet des sollicitations sinusoïdales

Ce paragraphe se focalise sur l'effet de la fréquence et de l'amplitude des sinus appliqués vis-à-vis de la réponse à la tête de la structure. La Figure 4 représente respectivement les accélérations, vitesses et déplacements maximaux enregistrés par l'accéléromètre positionné à la tête de la structure en fonction de PSA, PSV et PSD respectivement. Les vitesses et déplacements sont obtenus en intégrant l'accélération par rapport au temps une fois et deux fois respectivement. Ces derniers sont installés sur le conteneur LSB donc loin de la structure et des IR. Une analyse sur les effets de bords a montré que la réponse du système est globalement gérée par le sol et non par le conteneur : ainsi les effets de bords sont négligés dans le cadre de cette étude. Globalement, il est observé que pour les trois grandeurs, les sinus avec fréquence de 1 Hz sont ceux qui génèrent a_{\max} , v_{\max} et u_{\max} les plus élevés. De même, en comparant les trois grandeurs, il est notable que pour a_{\max} , les

points correspondant à C-S sont majoritairement sous la ligne 1 :1, ce qui veut dire qu'il y a une atténuation, contrairement au cas C-S-IR pour lequel les points sont au-dessus de la ligne 1 :1, impliquant une amplification. Cela montre que le sol renforcé entraîne une amplification au niveau du bâtiment en termes d'accélération. En revanche, pour les vitesses et accélérations, durant les sinus de 1,8 Hz et 2,4 Hz, la réponse est similaire entre C-S et C-S-IR avec des points qui ont une tendance linéaire croissante au-dessus de la ligne 1 :1. Ainsi, les IR ont un effet sur la réponse en termes d'accélération mais moins notable pour les vitesses et les déplacements.

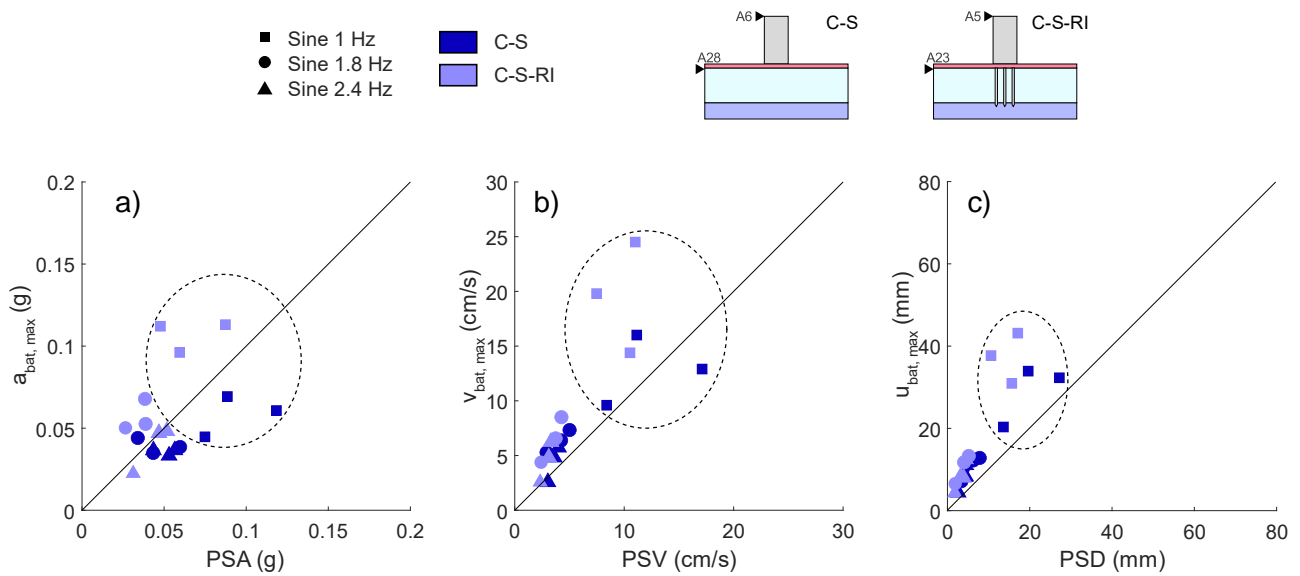


Figure 4. Accélérations, vitesses et déplacements maximaux sur la tête de la structure en fonction de ceux à la surface du sol durant tous les sinus (signaux #3, #4, #5, #7, #8, #9, #11, #12 et #13).

3.3. Réponse pendant les séismes

L'application de séismes réels sur le modèle réduit représente le cas le plus proche de la réalité. Le but de cette partie est d'étudier la réponse du système sous des sollicitations multifréquentielles de différentes amplitudes. La Figure 5 représente les valeurs des PSA, PSV et PSD au niveau de la surface de la couche argileuse sous le bâtiment en fonction des PGA, PGV et PGDobtenus à la base de la colonne de sol pour les séismes appliqués en fin de test (i.e. #15, #16, #17, #18 et #19). Les résultats montrent une différence notable entre les trois grandeurs : le PSA évolue linéairement avec PGA selon une pente inférieure à la ligne 1 :1, et qui est similaire entre les trois configurations. Cela montre que l'ISSI n'a pas d'effet sur l'amplification en termes d'accélération. Par contre, l'évolution du PSV et PSD montre une différence entre les trois configurations : la configuration C-S montre une évolution proche de la ligne 1 :1 et plus élevée que pour C-FF, et d'autant plus importante quant au PSD. Sachant que le passage de l'accélération à la vitesse et au déplacement filtre les hautes fréquences, les tendances de PSV et PSD du C-S sont dûs à l'amplification de basses fréquences. Cela montre que le bâtiment augmente l'amplification des basses fréquences dans le sol. En revanche, la tendance de C-S-IR montre une évolution bien au-dessous de la ligne 1 :1 et beaucoup plus faible que C-S et C-FF. Ainsi les IR induisent également une atténuation de l'énergie du signal aux basses fréquences.

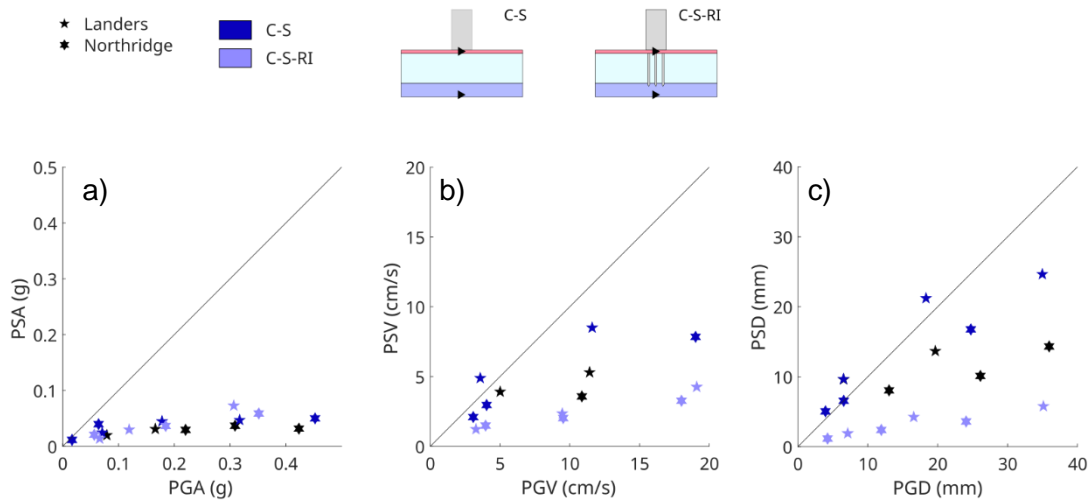


Figure 5. Accélérations, vitesses et déplacements maximaux à la surface du sol en fonction de ceux à la base durant tous les derniers séismes (signaux #15, #16, #17, #18 et #19).

4. Conclusion

Trois essais dynamiques en centrifugeuse ont été réalisés afin d'étudier l'effet de l'interaction sol-structure-inclusion d'un système de sol mou renforcé supportant une structure rigide élancée. Les différentes configurations ont été soumises à une même séquence de sollicitations successives. Les principaux résultats obtenus montrent que:

- l'ISSI diminue la fréquence naturelle de la structure par rapport à sa fréquence naturelle sur base rigide, sans influencer le rapport d'amplitude entre la surface du sol et le haut du bâtiment.
- les IR augmentent a_{\max} à la tête du bâtiment mais n'ont pas d'effet sur les vitesses et les déplacements
- l'ISSI a un effet sur les PSV et PSD, avec le bâtiment seul amplifiant les basses fréquences et les IR atténuant l'énergie du signal à ces fréquences

5. Acronymes

PGA, PGV, PGD Accélération, Vitesse ou Déplacement maximale à la base
 PSA, PSV, PSD Accélération, Vitesse ou Déplacement maximale à la surface du sol sous la PTC

6. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) pour le financement du projet ASIRIplus_SDS (ANR-19-C22-0015), ainsi que la région Pays de la Loire et l'Université Gustave Eiffel pour la bourse de doctorat. Des remerciements spéciaux sont également adressés à l'équipe technique du laboratoire GERS-CG.

7. Références bibliographiques

ASIRI National Project (2012). Recommendations for the Design, Construction and Control of Rigid Inclusion Ground Improvements. Presses des Ponts, Paris, 385 pages.

- Benahmed, N. (2001). Comportement mécanique d'un sable sous cisaillement monotone et cyclique: application aux phénomènes de liquéfaction et mobilité cyclique. Doctoral dissertation, Marne-la-vallée, ENPC.
- Ha, J. G., Ko, K. W., Jo, S. B., Park, H. J., & Kim, D. S. (2019). Investigation of seismic performances of unconnected pile foundations using dynamic centrifuge tests. *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 17, pp. 2433-2458. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-00530-y>
- Jiménez, G. A. L., & Dias, D. (2022). Dynamic soil–structure interaction effects in buildings founded on vertical reinforcement elements. *CivilEng*, vol. 3 n°3, pp. 573–593. <https://doi.org/10.3390/civileng3030034>
- Ko, K. W., Ha, J. G., Park, H. J., & Kim, D. S. (2019). Centrifuge modeling of improved design for rocking foundation using short piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 145 n°8, article id. 04019031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002064](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002064)
- Kutter, B. L. (2013). Effects of capillary number, Bond number, and gas solubility on water saturation of sand specimens. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 50 n°2, <https://doi.org/10.1139/cgj-2011-0250>
- Li, Z., El Naggar, M. H., Dai, G., Liu, H., Luan, Y., & Gong, W. (2024). Seismic isolation effect of unconnected piles-caisson foundation: Large-scale shake table tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol 176, article id. 108304. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108304>
- Loli, M., Knappett, J. A., Brown, M. J., Anastasopoulos, I., & Gazetas, G. (2015). Centrifuge testing of a bridge pier on a rocking isolated foundation supported on unconnected piles. *Proceedings, 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, p. 362.
- Mánica-Malcom, M. Á., 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. <https://doi.org/10.1080/13632469.2015.1085462>
- Pecker, A. (2004). Design and Construction of the Rion Antirion Bridge. *Geotechnical Special Publication*, pp. 216-240. [https://doi.org/10.1061/40744\(154\)7](https://doi.org/10.1061/40744(154)7)
- Pérez-Herreros, J. (2020). Dynamic soil-structure interaction of pile foundations: experimental and numerical study. Doctoral dissertation, École centrale de Nantes.
- Saade, C., Li, Z., Escoffier, S., & Thorel, L. (2023). Centrifuge and numerical modeling of the behavior of homogeneous embankment on liquefiable soil subjected to dynamic excitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 172, article id. 107999. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107999>
- Thorel, L., Ferber, V., Caicedo, B., & Khokhar, I. M. (2011). Physical modelling of wetting-induced collapse in embankment base. *Géotechnique*, vol. 61 n°5, pp. 409-420. <https://doi.org/10.1680/geot.10.P.029>
- Yang, Y., Fan, H., Cheng, Y. P., Gong, W., Dai, G., Liang, F., & Jia, Y. (2022). Seismic response of nuclear power station with disconnected pile-raft foundation using dynamic centrifuge tests. *Journal of Cleaner Production*, vol. 379, article id. 134572. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134572>