

MODELISATION EN CENTRIFUGEUSE D'UN REMLAI CONSTRUIT SUR UN SOL LIQUEFIABLE : EFFET DE L'AMPLITUDE DU SEISME

CENTRIFUGE MODELLING OF AN EMBANKMENT BUILT ON LIQUEFIABLE SOIL: EFFECT OF EARTHQUAKE AMPLITUDE

Chedid SAADE, Zheng LI, Sandra ESCOFFIER, Luc THOREL

Département GERS, Centrifugeuses Géotechniques, Université Gustave Eiffel, France

RÉSUMÉ – L'étude vise à analyser le comportement des remblais construits sur des sols liquéfiables lors de séismes de différentes amplitudes. Deux modèles en centrifugeuse ont été construits pour reproduire un remblai sur un sol liquéfiable. Les modèles ont été soumis à des signaux sinusoïdaux de $0,1 \times g$ (faible secousse) et $0,2 \times g$ (forte secousse). L'impact de l'amplitude sur la liquéfaction du sol et le comportement du remblai ont été étudiés.

ABSTRACT – The study aims to study the behavior of embankments constructed on liquefiable soils during earthquakes with different amplitudes. Two centrifuge models were built to reproduce an embankment on liquefiable soil. The models were subjected to $0.1 g$ (weak input) sinusoidal signals and $0.2 g$ (strong input). The impact of the amplitude on soil liquefaction and the behavior of the embankment were investigated.

1. Introduction

Les tremblements de terre sont l'une des catastrophes les plus dévastatrices dans le monde, comme cela s'est récemment produit en 2023 au Maroc et en Turquie (Santini et al. 2023). Ils peuvent provoquer des dégâts importants et donner lieu à des phénomènes tels que la liquéfaction. La liquéfaction peut causer d'énormes dommages géotechniques tels que le tassement du sol et la rupture de grandes structures, comme cela a été le cas, par exemple, pour le remblai de la route Koseli en Turquie en 2023. Il est essentiel de comprendre l'impact de la liquéfaction sur la réponse des grandes structures. C'est pour cela, des simulations numériques (Boulanger et al., 2018 ; Rapti et al., 2018 ; Gu et al., 2021 ; Dinesh et al., 2022) et des modèles en centrifugeuse (Adalier et al, 1998 ; Adalier et Sharp, 2004 ; Fioravanti, 2021 ; Li et al. , 2021 ; Pramaditya et Fathani, 2021 ; Pourakbar et al. , 2022 ; Gu et al., 2022) ont été réalisés afin de mieux comprendre le comportement d'un remblai construit sur un sol liquéfiable et soumis à des séismes. Cependant, il existe un nombre limité de résultats expérimentaux en centrifugeuse faisant varier uniquement l'amplitude du signal.

Dans ce contexte, l'objectif de cet article est de mettre en évidence l'effet de l'amplitude du signal sur la liquéfaction et la réponse d'un remblai construit sur un sol liquéfiable. Dans le cadre de cette étude, des essais en centrifugeuses reproduisant un remblai construit sur un sol liquéfiable soumis à des chargements sismiques ont été menés en tenant compte de différentes amplitudes du signal d'entrée. Deux modèles réduits centrifugés construits avec du sable Hostun pur (HN31) ont été soumis à des signaux sinusoïdaux avec des amplitudes différentes. Deux amplitudes sont adoptées dans cette étude : $0.1 \times g$ pour les faibles secousses et $0.2 \times g$ pour les secousses fortes.

Les résultats expérimentaux obtenus de cette campagne ont été analysés en termes d'accélération, de pressions interstitielles pour évaluer les effets de l'amplitude sur la liquéfaction du sol de fondation et quantifier la zone liquéfiable. De plus, les effets de l'amplitude sur la réponse du remblai en surface ont également été examinés, notamment en termes de déplacements verticaux.

2. Modèles réduits centrifugés

Deux essais en centrifugeuse ont été réalisés à l'Université Gustave Eiffel - Campus de Nantes pour étudier l'effet de l'amplitude du signal sur la réponse à la liquéfaction et le comportement d'un remblai. Les modèles en centrifugeuse ont été excités sous 60 g à l'aide d'une table vibrante 1D intégrée dans la centrifugeuse (Chazelas et al., 2008). Dans cette section, la géométrie, la préparation et la procédure des essais en centrifugeuse sont présentées.

2.1. Géométrie du modèle

La figure 1 illustre la géométrie et les dimensions du modèle réduit (échelle 1/60). Le modèle réduit reproduit, selon les règles de similitude (Garnier et al., 2007), à l'échelle du prototype un remblai de 6 mètres de hauteur, avec une pente de 1/1.5, construit sur une couche de sol liquéfiable de 9 mètres.

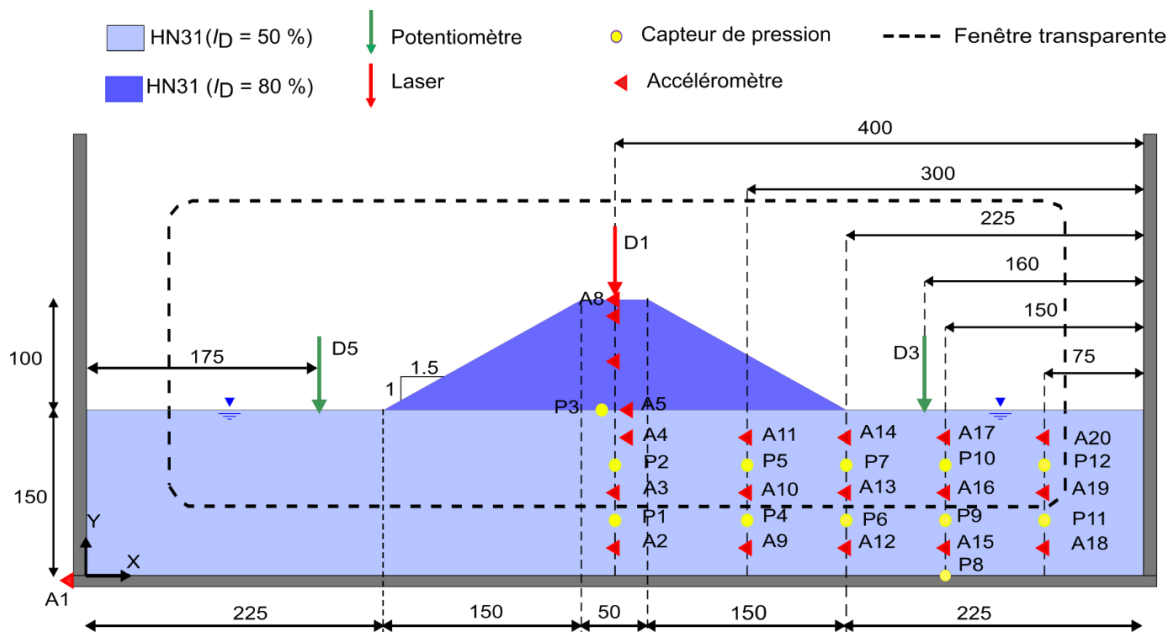


Figure 1. Modèle en centrifugeuse à l'échelle 1/60 (Dimensions en mm à l'échelle modèle)

2.2. Préparation du modèle

Le modèle réduit a été construit dans un conteneur rigide ayant une face transparente en suivant des étapes spécifiques. Les étapes suivies ainsi que les effets des bords du conteneur rigide ont été détaillés dans les travaux de Saade et al. (2022, 2023a, 2023b). Tout d'abord, le sol liquéfiable, caractérisé par une densité relative de $50\% \pm 2\%$, a été préparé avec du sable propre Hostun HN31 (Tableau 1) en utilisant la méthode de damage humide (Ladd, 1974). Le remblai, de densité relative $D_r=80\% \pm 1.5\%$, est construit par pluviation à sec : une couche est premièrement préparée au-dessus de la couche compactée et ensuite arasée pour obtenir la géométrie voulue.

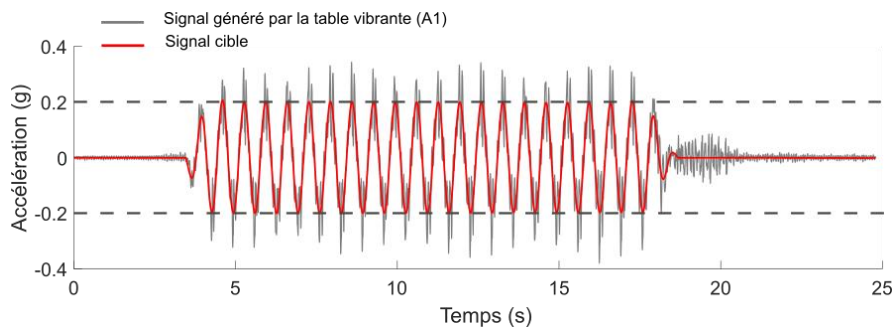
Ensuite, le sol liquéfiable a été saturé sous-vide à $1 \times g$ à l'aide d'un fluide visqueux. Le fluide visqueux utilisé avait une viscosité 60 fois supérieure à celle de l'eau et a été préparé par un mélange d'eau et d'HydroPropyl MethylCellulose (HPMC) (Escoffier et Audrain, 2020). Durant la construction, le modèle a été instrumenté, comme présenté dans Figure 1, par différents types de capteurs: accéléromètres, capteurs de pressions laser et potentiomètres.

Tableau 1. Caractéristiques du sable d'Hostun HN31 (Benahmed et al.,2015 ; Gobbi et al.,2022)

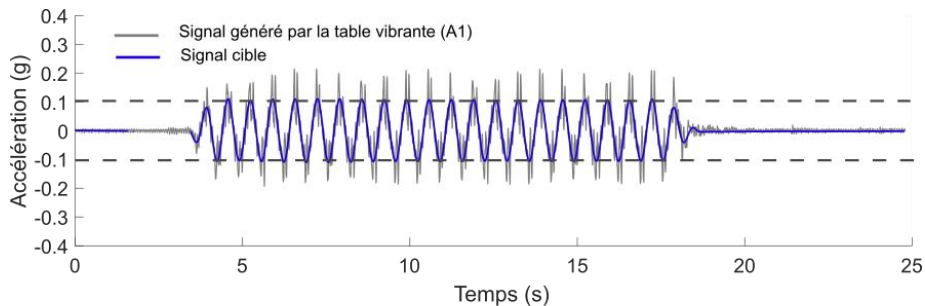
Sol	D ₅₀ (mm)	e _{min} (-)	e _{max} (-)	G _s (g/cm ³)	ρ _{dmin} (g/cm ³)	ρ _{dmax} (g/cm ³)
Hostun HN31	0,35	0,656	1,049	2,65	1,33	1,6

2.3. Programme expérimental

Après la préparation, le modèle est transféré dans la centrifugeuse. Ensuite, la centrifugeuse est mise en rotation jusqu'à atteindre le niveau de 60×g. À ce niveau, le modèle a été soumis à une excitation sismique caractérisée par un signal sinusoïdal, comme illustré dans Figure 2. Le signal d'entrée est caractérisé par une fréquence prédominante équivalente à 1,5 Hz à l'échelle du prototype. Pour chaque essai, une amplitude cible spécifique (a_{max}) a été adoptée : 0,2×g à l'échelle du prototype pour reproduire une secousse forte (Figure 2(a)) et 0,1×g à l'échelle du prototype pour une faible secousse (Figure 2(b)).



(a) Secousse forte ($a_{max}=0.2\times g$)



(b) Secousse faible ($a_{max}=0.1\times g$)

Figure 2. Profil du signal d'entrée pour (a) la secousse forte et (b) la secousse faible

3. Effets de l'amplitude sur la liquéfaction du sol

L'influence de l'amplitude du signal d'entrée sur la liquéfaction du sol est présentée dans cette section. Les effets ont été examinés à travers les accélérations et les pressions interstitielles enregistrées durant les essais en macrogravité.

3.1. Accélérations

Une analyse temps-fréquence a été adoptée pour étudier l'effet de l'amplitude en utilisant les spectrogrammes de Stockwell (Kramer et al., 2016). La figure 3 les représente pour les accélérations enregistrées sous la surface libre du sol de fondation et sous le remblai durant les deux secousses : faible (0,1×g) et forte (0.2×g). Cette représentation permet d'identifier les zones liquéfiées caractérisées par un changement dans le contenu

fréquentiel et la non-transmission du signal. Durant les deux secousses, la liquéfaction n'est pas observée sous le remblai. Cependant, sous la surface libre du sol de fondation, une perte de la fréquence dominante du signal est observée notamment à la surface (A20). Donc, la liquéfaction est observée sous la surface libre du sol de fondation durant les deux différentes secousses.

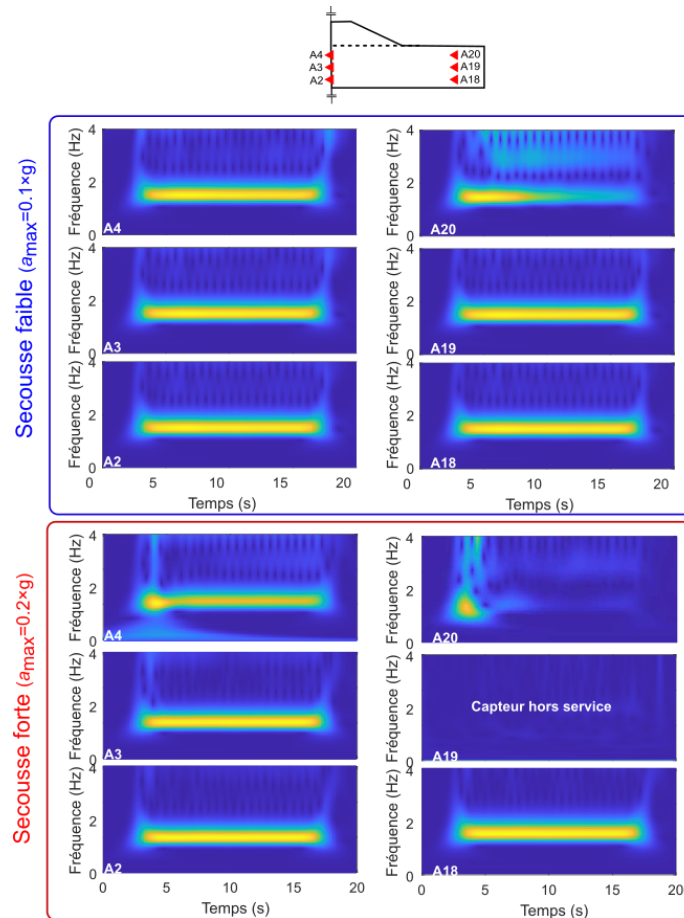


Figure 3. Représentation de Stockwell des accélérations enregistrées sous la surface libre du sol et sous le remblai durant les deux secousses : faible ($0,1g$) et forte ($0,2g$).

La représentation de stockwell permet aussi l'évaluation de l'initiation de la liquéfaction en identifiant le moment auquel elle s'est produite (Özener et al., 2020 ; Manandhar et al., 2021). En surface (A20) et dans le cas du modèle soumis à une forte secousse, l'analyse temps-fréquence révèle que la liquéfaction s'est produite après environ 5 s lorsque la fréquence prédominante a disparu. En revanche, lors de la faible secousse, la liquéfaction a pris plus de temps pour être initiée et a été déclenchée après environ 8 s. Ces observations révèlent que l'amplitude du signal affecte le temps nécessaire pour déclencher la liquéfaction dans la couche de sol.

3.2. Suppressions

La figure 4 montre la distribution du rapport maximal des surpressions interstitielles obtenu dans les essais durant les deux secousses : faible et forte. Cette représentation permet de mettre en évidence les zones liquéfiées. Durant les deux différentes secousses, la liquéfaction n'a pas eu lieu sous le remblai, où la surpression interstitielle n'excède pas 50% de la contrainte effective verticale initiale.

Cependant, la liquéfaction s'est produite sous la surface libre du sol de fondation où le rapport des surpressions interstitielles atteint 100 % de la contrainte effective verticale initiale (zones jaunes dans Figure 4). Ces observations confirment que la liquéfaction s'est

produite sous la surface libre du sol, ce qui a également été observé avec les accélérations enregistrées.

Ces représentations permettent également de comparer l'étendue des zones liquéfiées lors des différentes secousses. Lors de la secousse faible, la zone liquéfiée atteint une profondeur allant jusqu'à 3 m, tandis qu'en cas de forte secousse, la zone liquéfiée s'est développée de manière plus importante, atteignant jusqu'à 6 m de profondeur, et touchant la position sous les pieds du remblai. Par conséquent, l'amplitude du signal affecte également l'étendue des zones liquéfiées. Ces observations sont cohérentes avec ce qui a été rapporté par Mehrzad et al. (2018).

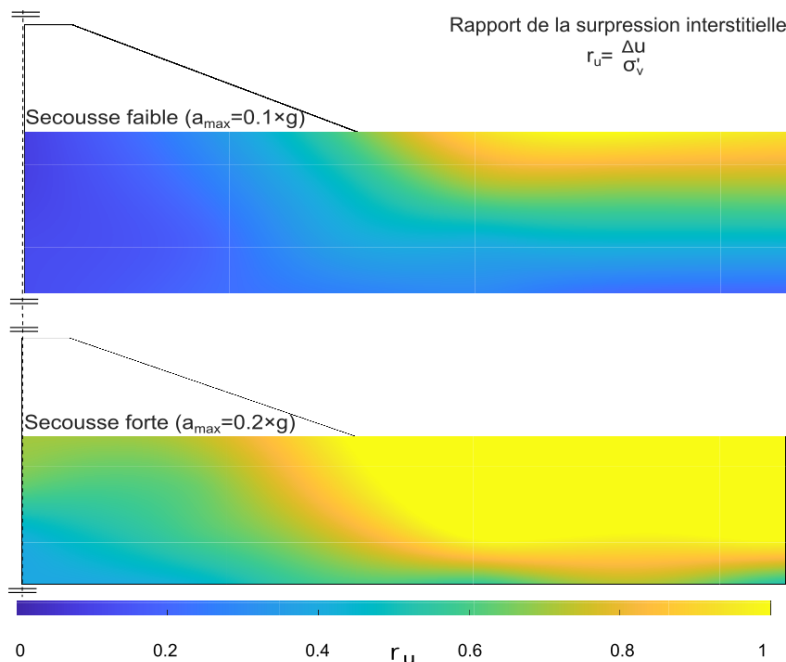


Figure 4. Distribution du rapport maximal des surpressions interstitielles durant les deux secousses : faible ($0.1 \times g$) et forte ($0.2 \times g$)

4. Effets de l'amplitude sur le comportement du remblai

L'influence de l'amplitude du signal d'entrée sur la réponse du remblai est étudiée dans cette section à travers les déformations et les déplacements verticaux enregistrés lors des différentes secousses, comme présenté par Saade et al. (2023a) et illustré dans les figures 5(a) et 5(b). Durant la secousse forte, le remblai subi un tassement important au niveau de la crête suivi des déplacements latéraux aux pieds qui peuvent entraîner un soulèvement de la surface libre du sol de fondation.

A partir des observations directes et des données enregistrées (Figure 5(e)) durant les essais, un tassement de crête et un déplacement vertical du pied sont observés quelle que soit l'intensité de la secousse.

Les figures 5(c) et 5(d) montrent la comparaison entre les différentes secousses en termes de tassements de crête et de déplacements verticaux de la surface libre du sol de fondation enregistrés. Un tassement important de la crête d'environ 0,7 m a été observé lors de la secousse forte comparé à un tassement moins important durant la faible secousse. L'amplitude du signal affecte considérablement le tassement en crête. Le remblai tasse de 12% de sa hauteur avec une amplitude de $0,2 \times g$ et d'environ 2% de sa hauteur avec une amplitude de $0,1 \times g$. Les déplacements verticaux observés à la surface libre du sol, et précisément les soulèvements observés donnent des indications sur les déplacements latéraux des pieds du remblai. Un soulèvement de 0,04 m a été observé à la

surface libre avec forte secousse, tandis qu'un léger tassement a été enregistré durant la faible secousse. Ces observations indiquent que les déplacements latéraux des pieds du remblai sont également limités avec une faible secousse.

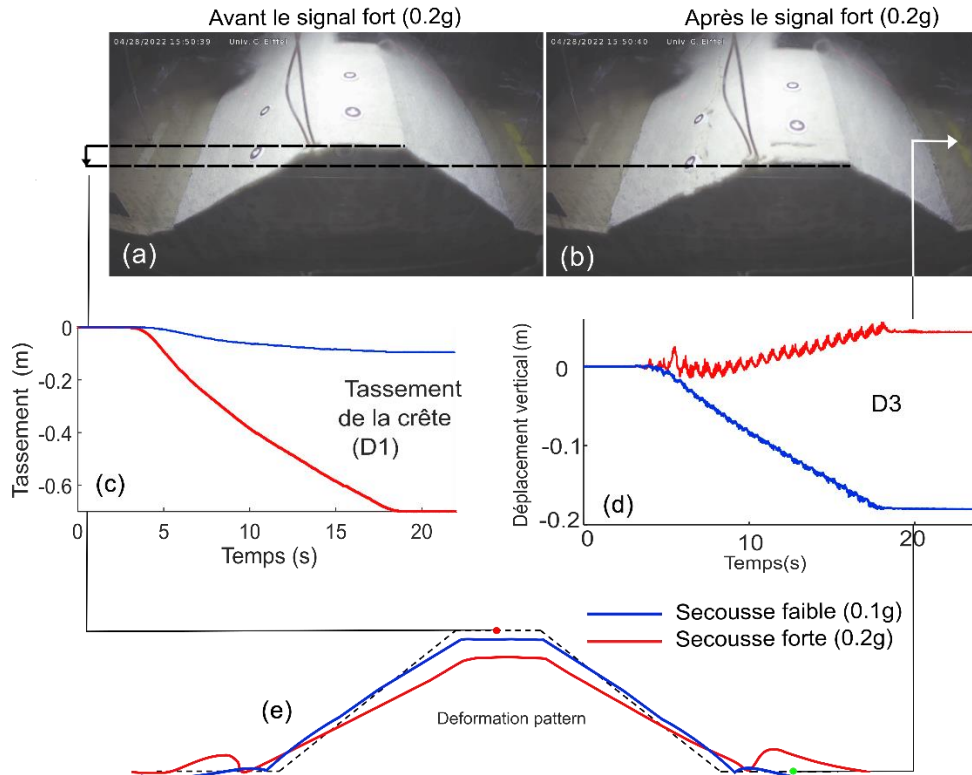


Figure 5. Comportement du remblai durant les différentes secousses (faible et forte) : Photos (a) avant et (b) après la secousse forte, (b) tassement de la crête, (c) déplacement vertical de la surface libre du sol de fondation et (e) modèle de déformation du remblai.

5. Conclusion

Dans cette étude, deux essais en centrifugeuse ont été réalisés pour étudier l'effet de l'amplitude du signal d'entrée sur la liquéfaction et la réponse d'un remblai construit sur un sol liquéfiable. Deux signaux de différentes amplitudes ont été adoptés : une amplitude "élevée" pour une "forte" secousse et une "faible" amplitude pour une secousse "faible". En se basant sur les résultats expérimentaux, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Pendant les secousses faible et forte, la liquéfaction s'est produite sous la surface libre du sol de fondation, et aucune liquéfaction n'a été observée à des positions sous le remblai.
- La liquéfaction a pris plus de temps pour débuter lors de la secousse faible par rapport au modèle soumis à une forte secousse.
- Les zones liquéfiées sont limitées à des positions superficielles lors d'une secousse faible. En revanche, lors d'une secousse forte, ces zones se sont largement étendues, se propageant vers des positions plus profondes et sous les pieds du remblai.
- La déformation du remblai est caractérisée par un tassement de la crête suivie d'un déplacement latéral des pieds. L'amplitude du signal d'entrée affecte l'intensité de déformation : les signaux de faible amplitude entraînent moins de tassement de la crête et de déplacement latéral des pieds du remblai.

6. Remerciement

Les auteurs tiennent à remercier l'Université Gustave Eiffel et la Région Pays de la Loire pour le financement des travaux.

7. Références bibliographiques

- Adalier, K., Elgamal, A.-W. et Martin, G. R. (1998). Foundation Liquefaction Countermeasures for Earth Embankments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 124, n°6, pp. 500–517.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:6\(500](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:6(500)
- Adalier, K. et Sharp, M. K. (2004). Dynamic behavior of embankment dam on liquefiable foundation subject to moderate earthquake loading. In *13th World Conference on Earthquake Engineering* (No. 1025)
- Benahmed, N., Nguyen, T. K., Hicher, P. Y. et Nicolas, M. (2015). An experimental investigation into the effects of low plastic fines content on the behaviour of sand/silt mixtures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 19, n° 1, pp. 109–128. <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.939304>
- Boulanger, R. W., Khosravi, M., Khosravi, A. et Wilson, D. W. (2018). Remediation of liquefaction effects for an embankment using soil-cement walls: Centrifuge and numerical modeling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 114, pp. 38–50.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.07.001>
- Chazelas, J.L., Escoffier, S., Garnier, J, Thorel, L. et Rault, G. (2008). Original technologies for proven performances for the new LCPC earthquake simulator. *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 6, pp. 723–728.
<https://doi.org/10.1007/s10518-008-9096-z>
- Dinesh, N., Banerjee, S., et Rajagopal, K. (2022). Performance evaluation of PM4Sand model for simulation of the liquefaction remedial measures for embankment. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 152, pp. 107042.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.107042>
- Escoffier, S. et Audrain, P. (2020). LEAP-UCD-2017 Centrifuge Test at IFSTTAR. In *Model Tests and Numerical Simulations of Liquefaction and Lateral Spreading*, Kutter B. L., Manzari, M. T. et Zeghal, M. (Eds.), pp. 293–313. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22818-7_15
- Fioravante, V., Giretti, D., Airoldi, S. and Moglie, J. (2021). Effects of seismic input, fine crust and existing structure on liquefaction from centrifuge model tests. *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 19, pp. 3807–3833.
<https://doi.org/10.1007/s10518-021-01139-4>
- Garnier, J., Gaudin, C., Springman, S. M., Culligan, P. J., Goodings, D., König, D., Kutter, B., Phillips, R., Randolph, M.F. et Thorel, L. (2007). Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, vol. 7, n°3, pp. 01-23.
<https://doi.org/10.1680/ijpmg.2007.070301>
- Gobbi, S., Santisi d'Avila, M. P., Lenti, L., Semblat, J.-F., et Reiffsteck, P. (2022). Liquefaction assessment of silty sands: Experimental characterization and numerical calibration. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 159, pp. 107349.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107349>
- Gu, L., Wang, Z., Zhu, W., Jang, B., Ling, X. et Zhang, F. (2021). Numerical analysis of earth embankments in liquefiable soil and ground improvement mitigation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 146, pp. 106739.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106739>
- Gu, L., Zheng, W., Zhu, W., Wang, Z., Ling, X. et Zhang, F. (2022). Liquefaction-induced damage evaluation of earth embankment and corresponding countermeasure. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 16, pp. 1183–1195.
<https://doi.org/10.1007/s11709-022-0848-7>
- Kramer, S. L., Sideras, S. S. et Greenfield, M. W. (2016). The timing of liquefaction and its utility in liquefaction hazard evaluation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 91: 133–146. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.07.025>

- Ladd, R. S. (1974). Specimen Preparation and Liquefaction of Sands. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, vol. 100, n°10, pp. 1180–1184. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.000011>
- Li, Y., Kitazume, M., Takahashi, A., Harada, K. et Ohbayashi, J. (2021). Centrifuge study on the effect of the SCP improvement geometry on the mitigation of liquefaction-induced embankment settlement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 148, pp. 106852. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106852>
- Manandhar, S., Kim, S.-N., Ha, J.-G., Ko, K.-W., Lee, M.-G. et Kim, D.-S. (2021). Liquefaction evaluation using frequency characteristics of acceleration records in KAIST centrifuge tests for LEAP. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 140, pp. 106332. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106332>
- Mehrzad, B., Jafarian, Y., Lee, C. J. et Haddad, A. H. (2018). Centrifuge study into the effect of liquefaction extent on permanent settlement and seismic response of shallow foundations. *Soils and Foundations*, vol. 58, n°1, pp. 228-240. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.12.006>
- Özener, P. T., Greenfield, M. W., Sideras, S. S. et Kramer, S. L. (2020). Identification of time of liquefaction triggering. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 128, pp. 105895. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105895>
- Pourakbar, M., Khosravi, M., Soroush, A., Hung, W.-Y., Hoang, K. K. et Nabizadeh, A. (2022). Dynamic Centrifuge Tests to Evaluate the Seismic Performance of an Embankment Resting on Liquefiable Ground Improved by Unreinforced and Reinforced Soil–Cement Columns. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 148, n°12, pp. 04022106. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002891](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002891)
- Pramaditya, A. et Fathani, T. (2021). Physical Modelling of Earthquake-induced Liquefaction on Uniform Soil Deposit and Earth Structures Settlement. *Journal of the Civil Engineering Forum*, vol. 7, n°1, pp. 85-96. <https://doi.org/10.22146/jcef.59467>
- Rapti, I., Lopez-Caballero, F., Modaressi-Farahmand-Razavi, A., Foucault, A. et Voltaire, F. (2018). Liquefaction analysis and damage evaluation of embankment-type structures. *Acta Geotechnica*, vol. 13, pp. 1041–1059. <https://doi.org/10.1007/s11440-018-0631-z>
- Saade, Chedid, Li, Zheng, Escoffier, Sandra et Thorel, L. (2022). Etude des effets de bord dans les essais centrifuges sous chargement sismique par modélisation numérique, 11èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, LYON, FRANCE, 2022-06-28. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03719820>
- Saade, C., Li, Z., Escoffier, S. et Thorel, L. (2023a). Centrifuge and numerical modeling of the behavior of homogeneous embankment on liquefiable soil subjected to dynamic excitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 172, pp. 107999. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107999>
- Saade, C., Li, Z., Escoffier, S. et Thorel, L. (2023b). Centrifuge data of a homogeneous embankment model resting on liquefiable soil subjected to a strong dynamic excitation - Experimental Database. *Recherche Data Gouv*, V2. <https://doi.org/10.57745/LDNZR9>
- Santini, M., Necmioglu, O., Abad Perez, J. et al. (2023). M7.8 and M7.5 Earthquakes in Türkiye and Syria. JRC scientific analysis, Update#3. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/90505>