

# Modélisation physique et numérique du comportement d'un remblai construit sur un sol liquéfiable soumis à un séisme

Chedid SAADE

*Département GERS, Laboratoire Centrifugeuses Géotechniques, Université Gustave Eiffel, France*

**RESUME** Modélisations physique et numérique sont combinées pour étudier le comportement d'un remblai homogène construit sur un sol liquéfiable, préparé par du sable Hostun avec la méthode de damage humide. La modélisation physique en centrifugeuse met en évidence directement la réponse du modèle en termes de surpressions interstitielles, accélérations et déplacements. En parallèle, une simulation numérique utilisant la méthode des éléments finis (FEM) a été réalisée avec une loi de comportement avancée, PM4Sand, pour simuler la liquéfaction du sol de fondation. La performance du modèle numérique est ensuite vérifiée par rapport aux résultats des essais en centrifugeuses en termes de surpressions interstitielles, accélérations et déformations.

**Mots-clefs** Modélisation physique, Simulation numérique, Remblai, Liquéfaction du sol

## I. INTRODUCTION

La liquéfaction du sol induite par les séismes peut causer des dommages importants, y compris la rupture des remblais, comme cela a été observé durant le séisme de Turquie en 2023 pour le remblai de la route Koseli. Pour garantir la sécurité de ces structures, il est nécessaire de comprendre leur comportement suite à la liquéfaction du sol de fondation. Pour cela, des modélisations physiques et des simulations numériques ont été effectuées pour étudier le comportement d'un remblai construit sur un sol liquéfiable et soumis à des sollicitations sismiques.

Précédemment, des modèles réduits centrifugés ont été réalisés par [Adalier et Sharp \(2004\)](#), [Pramaditya et Fathani \(2021\)](#), ainsi que par [Pourakbar et al. \(2022\)](#), afin d'étudier le comportement du remblai suite à la liquéfaction du sol de fondation. Ces études ont révélé que la liquéfaction se produit généralement sous la surface libre du sol de fondation près du pied du remblai, tandis que le sol sous le remblai est moins susceptible à la liquéfaction. D'autre part, [Okamura et Matsuo \(2002\)](#), [Tiznado et al. \(2020\)](#) et [Li et al. \(2021\)](#) ont mis en évidence les effets de la remédiation de la liquéfaction sur la réponse du remblai, en tenant compte de différents types de renforcement contre la liquéfaction.

En parallèle, des simulations numériques ont été effectuées en utilisant l'approche basée sur la méthode des éléments finis (FEM) ou la méthode des différences finies (FDM) afin de prédire le comportement du remblai suite à la liquéfaction du sol de fondation. [Bhatnagar et al. \(2016\)](#), [Kassas \(2021\)](#) et [Dinesh et al. \(2022\)](#) ont essayé de reproduire les modèles en centrifugeuse afin de simuler la liquéfaction du sol et la réponse de différentes structures telles que des remblais ou des

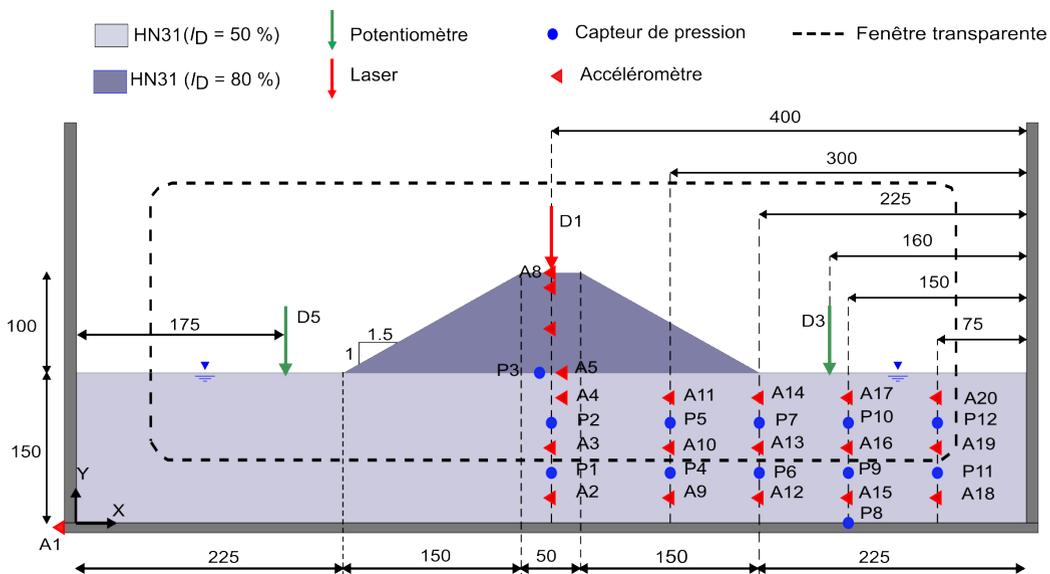
fondations superficielles. En général, les études ont démontré que les modèles numériques construits étaient capables de reproduire correctement les réponses en termes d'accélération. Cependant, aux zones situées au-dessous du remblai, il existait des divergences en termes de surpressions interstitielles et de déformations verticales.

Bien que l'objectif général de l'étude est d'évaluer les effets des fines sur la liquéfaction des sols et ainsi sur le comportement du remblai construit sur un sol liquéfiable, on se concentre ici uniquement sur le cas de sable propre.

## II. CONSTRUCTION DES MODELES PHYSIQUE ET NUMERIQUE

### A. Modèle réduit centrifugés

Un essai en centrifugeuse a été réalisé à l'Université Gustave Eiffel - Campus de Nantes pour étudier le comportement d'un remblai construit sur un sol liquéfiable. La géométrie, la préparation du modèle et le protocole expérimental ont été détaillées dans [Saade et al. \(2023a, 2023b\)](#). Le modèle réduit a été construit dans un conteneur rigide prenant en considération l'accélération centrifuge appliquée (60g) et les règles de similitude ([Garnier et al., 2007](#)). Ce modèle ([FIGURE 1](#) et [TABLEAU 1](#)) reproduit à l'échelle du prototype un remblai de 6 mètres de hauteur construit sur un sol liquéfiable de 9 mètres d'épaisseur.



**FIGURE 1.** Géométrie du modèle physique (Dimensions en mm à l'échelle modèle)

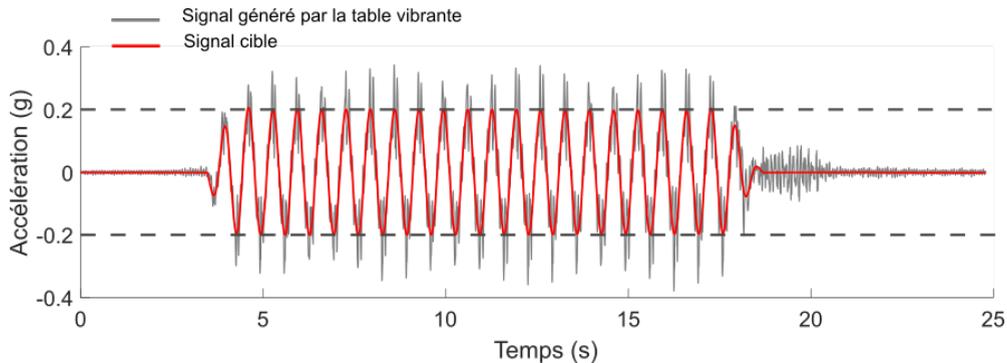
Le modèle réduit a été préparé en différentes étapes. Premièrement, une couche de sol liquéfiable est construite par damage humide ([Ladd, 1974](#)) en utilisant du sable Hostun pur (HN31) et pour une densité relative cible  $50\% \pm 2\%$ . Au-dessus de cette couche compactée, une couche de densité relative cible  $80\% \pm 1.5\%$  est construite par pluviage à sec en utilisant le même sable (HN31). Cette dernière couche est arasée pour obtenir la géométrie présentée dans [FIGURE 1](#).

Durant la préparation, le modèle est instrumenté par différents types de capteurs ([FIGURE 1](#)). Après la préparation, le modèle est saturé sous-vide à 1g en utilisant un fluide visqueux ayant

une viscosité 60 fois la viscosité de l'eau. Ensuite, une accélération centrifugeuse 60g est appliquée sur le modèle qui est soumis à une excitation sismique générée par une table vibrante 1D implantée dans la centrifugeuse. L'excitation appliquée (FIGURE 2) est un signal sinusoïdal constitué de 20 cycles, de fréquence dominante 1.5 Hz (prototype) et d'amplitude maximale égale à 0.2g (prototype).

**TABLEAU 1.** Caractéristiques du modèle

Paramètre	Facteur d'échelle (Modèle/Prototype)	Dimension	
		Prototype	Modèle
Hauteur du remblai	1/N	6 m	100 mm
Pente du remblai	1	1/1.5	1/1.5
Épaisseur de la couche liquéfiable	1/N	9 m	150 mm
Viscosité du fluide utilisé	N	1 cSt	60 cSt



**FIGURE 2.** Profil du signal d'entrée

### B. Modèle numérique

Le modèle numérique 2D a été construit en utilisant la plateforme OpenSees afin de reproduire les essais en centrifugeuse. Le modèle numérique développé par Saade, et al. (2023a) est brièvement présentée dans cette partie. Le maillage par éléments finis (FEM) est réalisé (FIGURE 3) à l'aide d'éléments quadrilatéraux à 4 nœuds SSPQuandUP. Le remblai est constitué de 756 éléments, tandis que le sol liquéfiable est constitué de 1728 éléments. Les conditions aux limites du modèle numérique reproduisent les conditions réelles du conteneur rigide utilisé dans l'essai en centrifugeuse. Les nœuds à la base sont fixés dans les directions X et Y, et les nœuds sur les bords latéraux sont fixés dans la direction X. Des conditions drainées sont pour la surface libre du sol liquéfiable et la surface du remblai, tandis que des conditions non drainées sont adoptées pour la base et les bords latéraux du modèle.

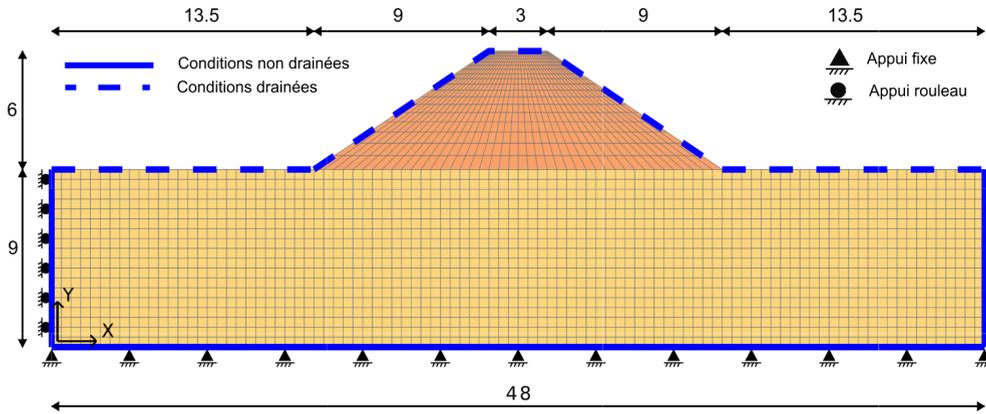


FIGURE 3. Géométrie du modèle numérique

Le sol liquéfiable est modélisé en utilisant une loi de comportement avancée PM4Sand (Boulanger et Ziotopoulou, 2015), qui décrit la plasticité du sable contrôlée par le rapport de contrainte lié à la surface limite et l'état critique (Dafalias et Manzari, 2004). La calibration de la loi de comportement PM4Sand nécessite la définition de 27 paramètres, parmi lesquels 6 sont primaires (densité relative, coefficient de module de cisaillement, rapport de contraction, pression atmosphérique et deux autres paramètres "flag"), ainsi que 21 paramètres secondaires. La calibration, effectuée par la simulation numérique des essais cycliques de cisaillement non drainés, est présentée dans la FIGURE 4 et détaillée dans Saade et al. (2023a). Le remblai est modélisé avec le critère de rupture de Drucker-Prager en utilisant un angle de frottement de 38 degrés et une cohésion de 65 kPa (Saade et al., 2023a). La cohésion a été recalculée afin d'ajuster les tassements de la crête avec ceux obtenus lors de l'essai en centrifugeuse. Le modèle numérique a été réalisé en trois étapes différentes : la consolidation, l'excitation dynamique et la phase de dissipation. Le modèle numérique est excité en utilisant le signal généré par la table vibrante (FIGURE 2) durant l'essai en centrifugeuse. Pendant l'excitation dynamique et la phase de dissipation, une perméabilité variable dépendante des surpressions interstitielles, telle que proposée par Shahir, et al. (2014) et présentée par Saade et al. (2023a), est adoptée.

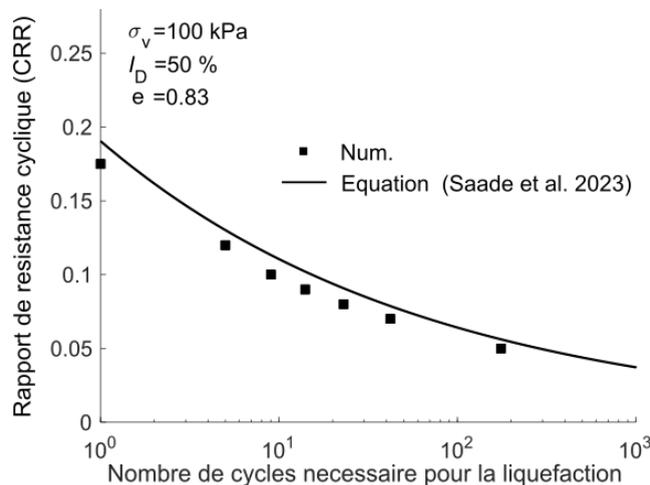


FIGURE 4. Calibration de la loi de comportement PM4Sand : Les courbes de rapports des résistances cycliques en fonction du nombre de cycles nécessaire pour la liquéfaction

### III. RESULTATS EXPERIMENTAUX

#### A. Liquéfaction du sol de fondation

La liquéfaction du sol de fondation est étudiée en termes de surpressions interstitielles (FIGURE 5) et d'accélération (FIGURE 6) enregistrées durant l'essai.

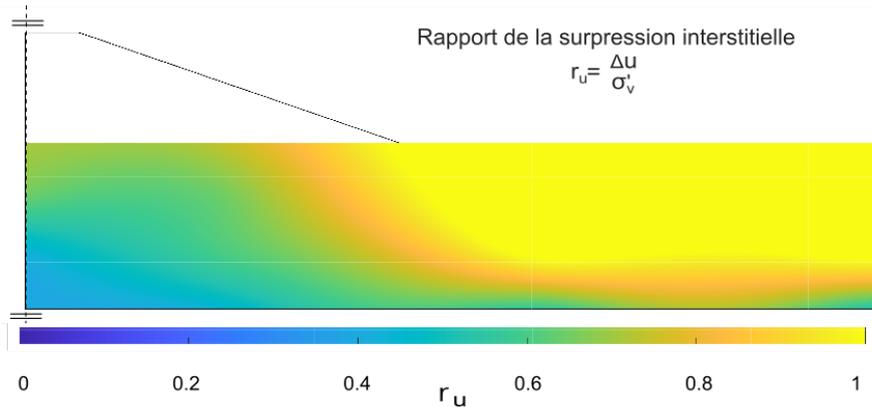


FIGURE 5. Distribution des rapports maximaux des surpressions interstitielles

La FIGURE 5 illustre la distribution des rapports maximaux des surpressions interstitielles ( $r_u$ ) dans le modèle durant l'essai. La liquéfaction ne se produit pas sous le remblai où les surpressions interstitielles n'excèdent pas 50% de la contrainte effective verticale initiale. Cependant, la liquéfaction est observée sous la surface libre du sol de fondation où les surpressions interstitielles atteignent 100% de la contrainte effective verticale initiale. Ces zones liquéfiées s'étendent à 6 m de profondeur et sous le pied du remblai.

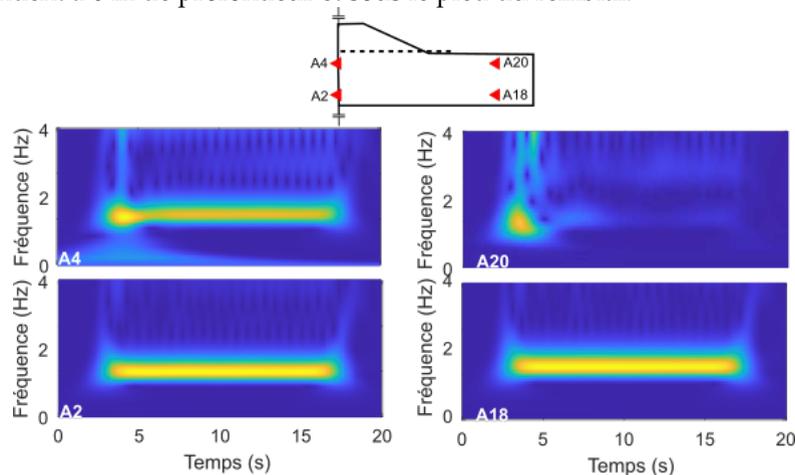


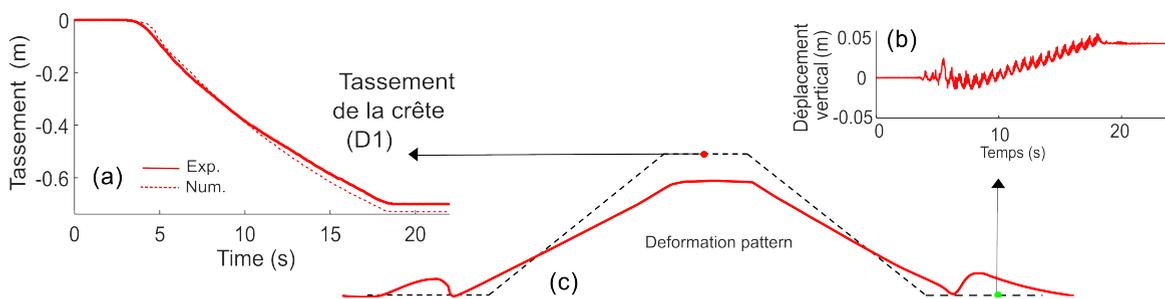
FIGURE 6. Représentation de Stockwell des accélérations sous le remblai et la surface libre du sol

La liquéfaction du sol de fondation est étudiée aussi par des analyses temps-fréquence des accélérations enregistrées durant l'essai. La représentation de Stockwell (Kramer et al., 2016) est présentée dans la FIGURE 6 pour les accélérations sous le remblai et sous la surface libre du sol de fondation. Cette représentation permet d'identifier les zones liquéfiées et d'évaluer l'initiation de la liquéfaction en identifiant le moment auquel elle s'est produite (Özener et al., 2020). Sous la

surface libre du sol de fondation, une disparition de la fréquence dominante du signal est observée après environ 5s à la position superficielle (A20). Par contre, sous le remblai, aucune perte du contenu fréquentiel est observée. Ces observations affirment que la liquéfaction a eu lieu après 5s sous la surface libre du sol de fondation.

### B. Comportement du remblai

La réponse du remblai est étudiée à travers les déformations et les déplacements verticaux enregistrés lors de l'essai, comme présenté dans la **FIGURE 7**. Un tassement important de 0.7m au niveau de la crête du remblai (12% de la hauteur du remblai) est enregistré durant l'essai (**FIGURE 7(a)**). De plus, un soulèvement de 0.04m de la surface libre du sol de fondation est aussi observé (**FIGURE 7(b)**). Ce soulèvement est expliqué par un déplacement latéral au niveau du pied du remblai. A partir des observations directes et des déplacements enregistrés durant les essais, le modèle de déformation du remblai est caractérisé par un tassement de crête et un déplacement vertical du pied (**FIGURE 7(c)**).



**FIGURE 7.** Déformations et déplacements du remblai lors de l'essai : (a) Tassement de la crête, (b) déplacement vertical de la surface libre et (c) modèle de déformation du remblai

## IV. VERIFICATION DU MODELE NUMERIQUE

### A. Prédiction des accélérations

La vérification de la performance du modèle numérique a été évaluée en termes d'accélérations en utilisant les critères d'Anderson ([Anderson, 2004](#)). À chaque position d'accélération, un score entre 0 et 10 a été calculé afin de classer l'ajustement entre les résultats expérimentaux et numériques de faible (Poor) à excellent (Excellent). Ces scores évaluent la correspondance entre les résultats numériques et expérimentaux en termes de différents paramètres tels que l'accélération maximale (PGA), la vitesse maximale (PGV), le déplacement maximal (PGD) et d'autres paramètres. La **FIGURE 8** présente la distribution des scores d'Anderson dans le modèle durant l'essai. Globalement, les accélérations sont classées comme un bon ajustement, en particulier au niveau des zones liquéfiées sous la surface libre du sol de fondation. Cependant, des faibles scores sont observés au niveau du remblai et des zones proches du remblai. Ces faibles scores sont liés à l'état du remblai caractérisé par son état humide non homogène durant l'essai en centrifugeuse.

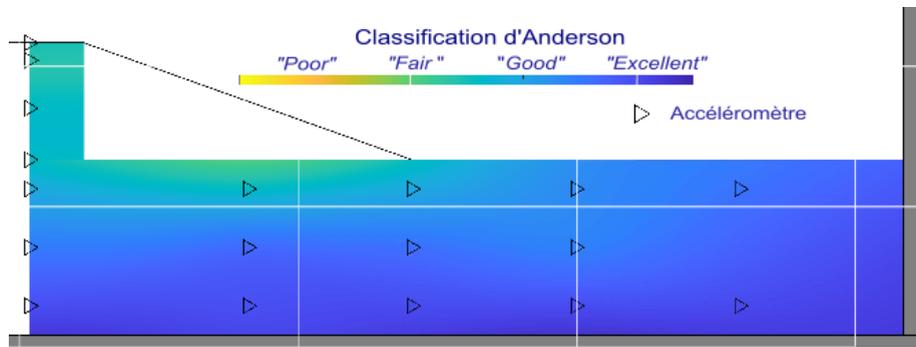


FIGURE 8. Distribution des scores d'Anderson dans le modèle

### B. Prédiction des surpressions interstitielles

La prédiction des surpressions interstitielles est également évaluée en comparant les surpressions maximales atteintes expérimentalement à celles calculées à partir du modèle numérique. La FIGURE 9 illustre la distribution de cette différence calculée dans le sol de fondation. En général, la différence ne dépasse pas 30%, surtout sous la surface libre du sol liquéfiable où la liquéfaction s'est produite. Cependant, les différences les plus élevées sont observées à la surface entre le remblai et le sol liquéfiable. Par conséquent, le modèle numérique aide à prédire la génération des surpressions interstitielles et la liquéfaction observée sous la surface libre du sol de fondation. Cependant, des divergences sont observées sous le remblai et sont liées à l'état humide et non homogène du remblai durant l'essai.

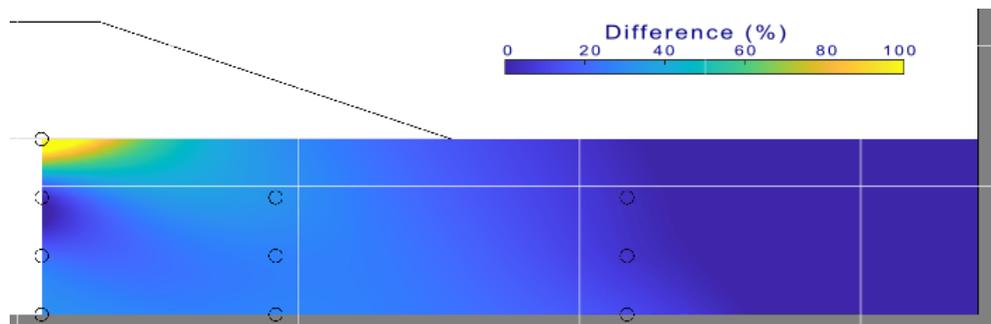
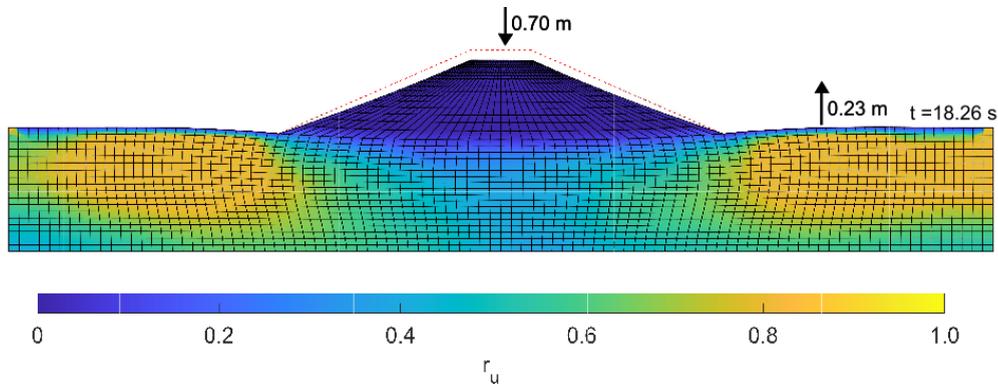


FIGURE 9. Distribution de la différence des surpressions interstitielles dans le modèle

### C. Prédiction du modèle de déformation

L'évaluation de la déformation du modèle et des déplacements verticaux a également été réalisée en comparant les résultats numériques et expérimentaux. Comme le montre les FIGURES 7 et 10, le modèle numérique prédit bien le schéma de déformation du remblai caractérisé par un tassement important au niveau de la crête suivi d'un déplacement latéral des pieds du remblai. Le modèle numérique est capable de prédire également le soulèvement de la surface libre du sol de fondation créée par le déplacement latéral du pieds de remblai.



**FIGURE 10.** Déformation et distribution du rapport des surpressions interstitielles ( $r_u$ ) dans le modèle

## V. CONCLUSION

Dans cette étude, un modèle réduit centrifugé a été construit pour étudier la réponse d'un remblai construit sur un sol liquéfiable. En parallèle, une simulation numérique directe du modèle réduit a été effectuée. En se basant sur les deux approches (expérimentale et numérique), les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- La liquéfaction, observée par les surpressions superficielles et les accélérations enregistrées durant l'essai, se produit sous la surface libre du sol de fondation. Cependant, le phénomène de liquéfaction ne se produit dans les positions profondes et sous le remblai. Les zones liquéfiées sont limitées à des positions peu profondes et sous les pieds du remblai.
- La déformation du remblai est caractérisée par un tassement de la crête suivi d'un déplacement latéral des pieds. Ce déplacement latéral peut entraîner un soulèvement au niveau de la surface libre du sol de fondation.
- Le modèle numérique construit peut bien prédire la réponse en accélération, en particulier dans le sol liquéfiable où la liquéfaction a été observée. Le modèle numérique peut également prédire la surpression interstitielle générée dans le sol liquéfiable, en particulier sous la surface libre du sol de fondation. Le schéma de déformation du remblai caractérisé par le tassement de la crête et le déplacement latéral des pieds du remblai est également reproduit par le modèle numérique

## REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier le financement apporté à ces travaux par l'Université Gustave Eiffel et la Région Pays de la Loire. De plus, des remerciements sont adressés à l'équipe de la centrifugeuse (chercheur-ses et techniciens), ainsi qu'un remerciement particulier à l'équipe d'encadrement de thèse.

## REFERENCES

- Adalier, K., & Sharp., M. K. (2004). Dynamic behavior of embankment dam on liquefiable foundation subject to moderate earthquake loading. *13th World Conference on Earthquake Engineering* (No. 1025)
- Anderson, J. G. (2004). Quantitative measure of the goodness-of-fit of synthetic seismograms. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, 243.
- Bhatnagar, S., Kumari, S., & V. A. Sawant. (2016). Numerical Analysis of Earth Embankment Resting on Liquefiable Soil and Remedial Measures. *International Journal of Geomechanics*, 16(1), 04015029. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000501](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000501)
- Boulanger, R. W., & Ziotopoulou, K. (2015). PM4Sand Version 3 : A sand plasticity model for earthquake engineering applications. Centre for Geotechnical Modeling. <https://ucdavis.box.com/s/zawzrqpdw3qqu9gsaad3y88egjen4crw>
- Dafalias, Y., & Manzari , M. T. (2004). Simple Plasticity Sand Model Accounting for Fabric Change Effects. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2004\)130:6\(622\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:6(622)).
- Dinesh, N., Banerjee, S., & Rajagopal, K. (2022). Performance evaluation of PM4Sand model for simulation of the liquefaction remedial measures for embankment. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 152, 107042. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.107042>
- Garnier, J., Gaudin, C., Springman, S. M., Culligan, P. J., Goodings, D., Konig, D., Kutter, B., Phillips, R., Randolph, M. F., & Thorel, L. (2007). Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 7(3), 01–23. <https://doi.org/10.1680/ijpmg.2007.070301>
- Kassas, K. (2021). Structure-Soil-Structure Interaction (SSSI) of adjacent buildings founded on liquefiable soil [Doctoral Thesis, ETH Zurich]. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000511100>
- Kramer , S. L., Sideras , S. S., & 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*, 100(10), 1180–1184. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000117>
- Li, Y., Kitazume, M., Takahashi, A., Harada, K., & 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*, 148, 106852. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106852>
- Okamura, M., & Matsuo, O. (2002). Effects of remedial measures for mitigating embankment settlement due to foundation liquefaction. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2(2), 01–12. <https://doi.org/10.1680/ijpmg.2002.020201>
- Özener, P. T., Greenfield, M. W., Sideras, S. S., & Kramer, S. L. (2020). Identification of time of liquefaction triggering. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 128, 105895. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105895>

Pramaditya, A., & Fathani, T. (2021). Physical Modelling of Earthquake-induced Liquefaction on Uniform Soil Deposit and Earth Structures Settlement. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 7(1), 85-96. <https://doi.org/10.22146/jcef.59467>

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*, 148(12), 04022106. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002891](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002891)

Shahir, H., Pak, A., Taiebat, M., & Jeremić, B. (2012). Evaluation of variation of permeability in liquefiable soil under earthquake loading. *Computers and Geotechnics*, 40, 74–88. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.10.003>

Tiznado, J. C., Dashti, S., Ledezma, C., Wham, B. P., & Mahir Badanagki. (2020). Performance of Embankments on Liquefiable Soils Improved with Dense Granular Columns: Observations from Case Histories and Centrifuge Experiments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(9), 04020073. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002309](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002309)

Saade, C., Li, Z., Escoffier, S., & 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*, 172, 107999. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107999>

Saade, C., Li, Z., Escoffier, S., & Thorel, L. (2023b). Centrifuge data of a homogeneous embankment model resting on liquefiable soil subjected to a strong dynamic excitation - Experimental Database (Version V2). *Recherche Data Gouv.* <https://doi.org/10.57745/LDNZR9>