

SIMULATIONS PAR ÉLÉMENTS DISCRETS D'EXPÉRIMENTATIONS DE FONÇAGE DE PIEUX EN CENTRIFUGEUSE

DISCRETE-ELEMENT SIMULATIONS OF CENTRIFUGE PILE JACKING EXPERIMENTS

A. Ezzeddine¹, B. Cazacliu¹, P. Richard¹, L. Thorel², R. Artoni¹

¹Univ Gustave Eiffel, MAST-GPEM, F-44344 Bouguenais, France

²Univ Gustave Eiffel, GERS-CG, F-44344 Bouguenais, France

RÉSUMÉ – La méthode des éléments discrets (DEM) est utilisée pour simuler des essais en centrifugeuse afin d'étudier l'influence de la méthode et la vitesse d'installation sur le comportement des fondations de pieux. Une simplification quasi-bidimensionnelle d'un pieu permet d'étudier l'impact de différentes méthodes de fonçage - continue et par passes - sur la résistance du pieu et vérifier la fiabilité du modèle.

ABSTRACT – This work aims to simulate centrifuge experiments using discrete element method (DEM) in an effort to investigate the effect of installation method and velocity on the behavior of pile foundations. A quasi two-dimensional simplification of a pile foundation allows to study the impact of different jacking methods - monotonic and by a series of strokes - on the pile resistance and check the reliability of the DEM model used.

1. Introduction

L'interaction sol-structure est un aspect fondamental de l'ingénierie géotechnique qui influence la conception, la construction et la durabilité des infrastructures. Cette interaction se réfère à la manière dont les charges appliquées à une structure sont transférées au sol environnant, ainsi qu'à la manière dont le sol réagit en retour aux contraintes induites par la structure. Dans le domaine des fondations de pieux, cette interaction revêt une importance particulière, car elle influe sur la stabilité, la capacité portante et la réponse dynamique des fondations. La compréhension et la modélisation de l'interaction sol-structure sont essentielles pour garantir des conceptions efficaces et durables dans divers contextes, tels que la construction de structures géotechniques.

Les éoliennes, l'une des nombreuses applications géotechniques des interactions sol-structure, ont gagné beaucoup d'attention ces dernières années en raison de leur rôle crucial dans la transition vers les énergies renouvelables. Comprendre cette interaction est essentiel pour assurer la durabilité et l'efficacité des éoliennes, ainsi que pour minimiser les risques géotechniques associés à leur installation et à leur exploitation. Le fonçage de pieux est une technique fréquemment utilisée pour installer les fondations de ses structures.

El Haffar et al. (2017) et Blanc et al. (2019) ont mené des recherches sur différentes méthodes de fonçage de pieux à l'aide d'essais en centrifugeuse à échelle réduite. Dans un sable très dense l'installation des pieux de manière cyclique, par une série de passes, diffère de l'approche continue traditionnelle où le pieu est enfoncé de manière continue jusqu'à atteindre la profondeur finale. L'installation "cyclique" implique un processus par lequel le pieu est enfoncé sur une distance constante, puis arrêté jusqu'à ce que la force d'enfoncement atteigne zéro. Le processus est ensuite répété avec une série de passes égaux jusqu'à ce que la profondeur cible soit atteinte. Des résultats ont révélé une différence significative entre les pieux installés à 1g et ceux installés à 100g. Des différences ont été aussi observées entre les pieux installés de manière continue et ceux installés de manière cyclique. La capacité de la pointe en compression a diminué, tandis que la capacité d'arrachement des pieux a montré une tendance à augmenter avec le

nombre croissant de passes d'installation. Cette augmentation observée avec la méthode d'installation cyclique dans le sable dense pourrait être attribuée à la densification du sable autour du pieu et à la dilatation du sol, renforçant ainsi la résistance au frottement et la capacité de traction du pieu.

De nombreuses études ont utilisé des simulations par la méthode des éléments discrets (DEM) (Cundall et Strack, 1979) pour étudier les phénomènes à l'échelle du grain au-delà des limites des approches expérimentales classiques. Aboul Hosn et al. (2017) ont examiné le potentiel d'un modèle linéaire comprenant des sphères et un moment résistant au roulement pour simuler un chargement triaxial monotone sur du sable de Camargue lâche. Jiang et al. (2019) ainsi que Zorzi et al. (2017) ont étudié le comportement de sables modèles lors d'une charge triaxiale cyclique à l'aide de la DEM. De plus, des travaux de recherche ont souligné la capacité de la DEM à modéliser les interactions sol-structure (Ciantia et al., 2019 ; Arroyo et al., 2011), permettant une compréhension plus approfondie des complexités inhérentes aux systèmes géotechniques. En outre, Zhang et Wang (2015) ont utilisé la DEM pour simuler le fonçage de pieux sous une accélération accrue, facilitant ainsi les comparaisons avec les données expérimentales obtenues à partir d'essais géotechniques en centrifugeuse.

Des recherches plus approfondies doivent étudier la capacité et les limites de la DEM dans la simulation des problèmes d'interface entre le sol et la structure. À cette fin, ce travail porte sur l'effet de la taille de l'échantillon et des particules ainsi que de la vitesse d'installation sur la réponse d'une fondation de pieux simplifiée quasi-bidimensionnelle installée de manière continue et cyclique sous accélération centrifuge. Une fois le modèle établi, une comparaison des résultats numériques avec les expériences en centrifugeuse géotechnique sera effectuée pour confirmer la validité du modèle DEM.

2. Configuration expérimentale

Le dispositif expérimental du modèle centrifugé, qui sert de référence pour les simulations, est détaillé dans la Figure 1. Le dispositif comprend un conteneur de dimensions 800x450x200mm avec une face transparente en plexiglas permettant l'observation du sol pendant l'installation suivie d'une analyse PIV. Le mur utilisé comme "pieu bidimensionnel" est fabriqué en aluminium 5083 et possède une largeur de 16mm et une profondeur de 224mm. Du sable de Fontainebleau NE34 sec est déposé dans le conteneur par pluviation à l'air, dans le but d'atteindre une densité relative (D_r) de 68% jusqu'à une profondeur de 400mm. Les propriétés matérielles du NE34 sont documentées dans (Beroya-Eitner et al., 2022).

Pendant les essais, une accélération centrifuge de 25 fois la gravité est appliquée. Le mur est installé à une vitesse de 0,1 mm/s par 28 passes pour atteindre la profondeur d'encastrement. Chaque passe consiste à enfoncer le mur à une profondeur de 8 mm dans le sable, puis à s'arrêter jusqu'à ce que la force atteigne zéro. Le mur et le sol sont équipés de capteurs pour mesurer les contraintes totales exercées dans le système pendant le test. Les résultats sont à analyser par PIV et à comparer avec les essais précédents d'installation continue du mur sur toute la profondeur (Balachowski et al., 2024).

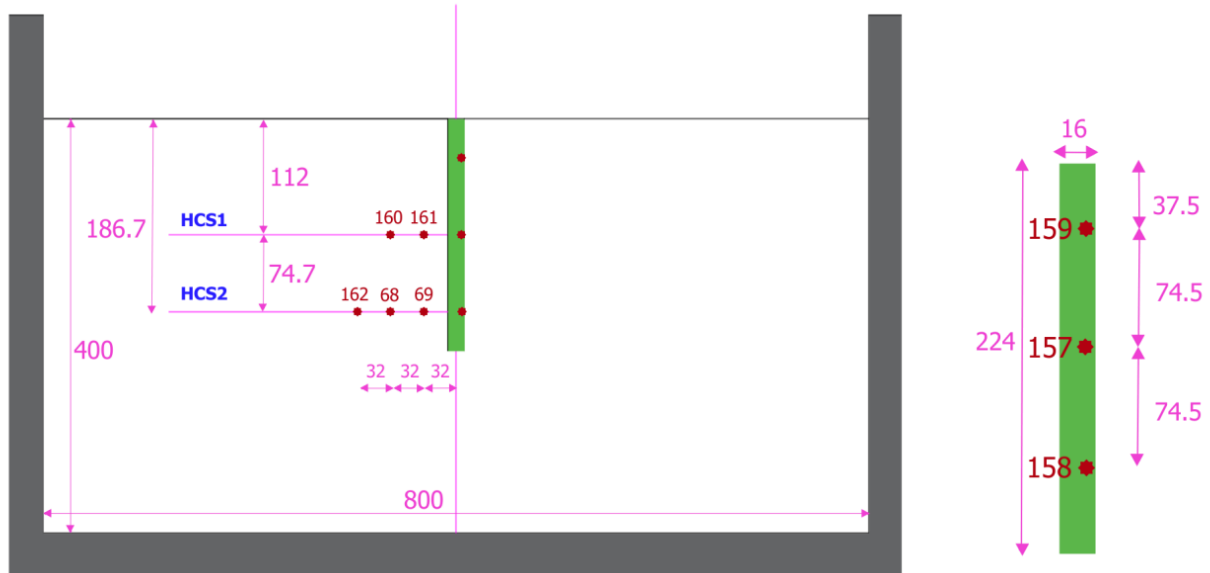


Figure 1. Coupe schématique du dispositif expérimental.

Tableau 1. Paramètres calibrés de la loi de contact.

E (MPa)	α	φ (°)	α_r	η_r	Densité (kg/m ³)
500	0,3	24	0,1	0,4	2650

E est un module d'élasticité utilisé pour définir la rigidité des particules.

α relie la rigidité tangentielle à la rigidité normale.

φ est un angle de frottement interparticulaire.

α_r et η_r sont respectivement le coefficient et la limite de roulement.

3. Modèle DEM

Un modèle de pieu 2D est installé dans un matériau qui est calibré pour reproduire le comportement du sable NE34 en utilisant YADE, un logiciel open-source développé par Kozicki et Donze (2009). Une loi de contact linéaire classique est employée avec une surface de plasticité de Mohr-Coulomb et un moment qui résiste au roulement. Comme des sphères sont utilisées dans le modèle, l'introduction de ce moment permet de prendre en compte la forme réelle des grains et leur résistance au roulement. Par conséquent, en intégrant ce paramètre, nous pouvons obtenir des résultats plus fidèles aux comportements observés dans les conditions expérimentales. La description du modèle et le processus de calibration se trouvent dans Ezzeddine et al. (2023), tandis que les paramètres utilisés sont présentés dans le Tableau 1.

L'échantillon est généré avec des conditions aux limites périodiques sur les directions horizontales et un mur pour soutenir le matériau est placé au fond de l'échantillon. Pour améliorer l'efficacité des calculs, la distribution granulométrique du sable NE34 est multipliée par un facteur d'échelle appelé "F". Les particules sont initialement générées dans une boîte confinée et on les laisse se déposer sous l'influence de la gravité (g). Une fois qu'elles se sont déposées et que les forces se sont stabilisées, un échantillon de dimensions L, w et h est préparé comme le montre la Figure 2. Afin d'obtenir des échantillons avec différentes valeurs de porosité initiale, l'angle de frottement

interparticulaire ϕ défini dans YADE est diminué au cours du processus de préparation pour obtenir des échantillons plus denses.

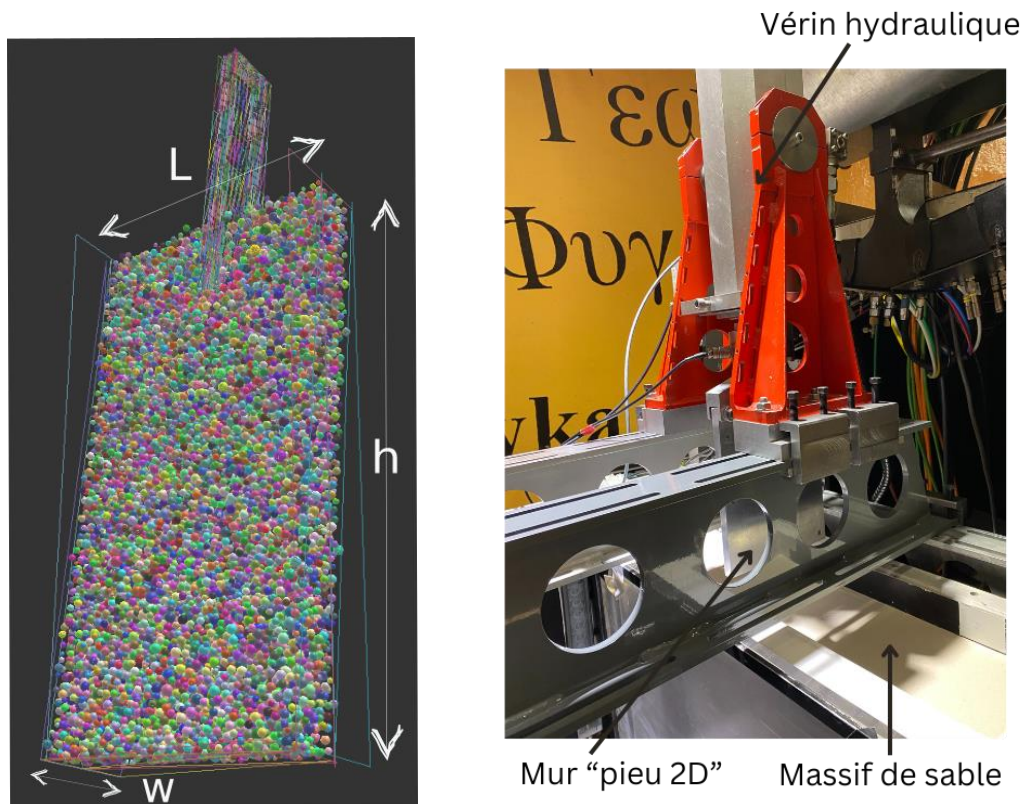


Figure 2. a) Dimensions et limites de l'échantillon numérique b) Dispositif expérimental.

4. Simulations de fonçage de pieux

Afin d'établir des limites d'échantillon qui atténuent efficacement tout effet de taille finie, une étude systématique est réalisée, examinant l'influence des dimensions de l'échantillon et de la taille des particules.

Des échantillons avec L et F variables sont générés à une constante $\phi = 10^\circ$ pendant la préparation. ϕ est ensuite modifié à sa valeur calibrée dans le Tableau 1. La porosité moyenne résultante de l'échantillon est maintenue à 0,44. Le mur modèle a une largeur de 16mm, une profondeur de 100 mm et est infini sur la direction w, dont la valeur est fixée dans tous les essais $10d_{50}$ (où $F = 10$ est multiplié par la distribution granulométrique du sable NE34 pour obtenir une distribution avec $d_{50} = 2,1$ mm). Il est ensuite installé à une vitesse v_p telle que le rapport des forces d'inertie sur les forces de confinement est $I < 10^{-2}$ pour des conditions quasi-statiques (Janda et Ooi, 2016), sous une accélération de 100g, simulant effectivement des conditions similaires à celles d'une expérience en centrifugeuse. Les résultats sont comparés en termes de résistance unitaire totale (pointe et fût) pour évaluer l'influence de chaque variable. Les résultats sont présentés à l'échelle du prototype. La force totale est normalisée par la surface de la pointe pour obtenir la résistance unitaire.

4.1. Effet de la dimension L

Quatre valeurs de L sont comparées : $L/d_{50} = 27,6, 47,6, 87,6, 107,6$, où des particules avec $F = 10$ et $d_{50} = 2,1$ mm sont utilisées. Les résultats d'installation continue à une vitesse $v_p = 1$ m/s sont présentés dans la Figure 3. a). Pour l'échantillon ayant la plus petite dimension L, la distance entre les parois à l'intérieur de l'échantillon périodique est insuffisante pour éviter leur interaction, ce qui entraîne des fluctuations notables dans les résultats. À mesure que L augmente, ces fluctuations diminuent. De plus, on peut observer que l'effet de L sur la résistance du pieu est plus prononcé à plus grande profondeur, du fait que la zone

d'influence du pieu s'étend avec l'augmentation de la profondeur. Le test avec $L/d_{50} = 87,6$ semble éviter tout effet de bord significatif tout en maintenant un temps de calcul raisonnable. Notons cette valeur de L par « L_1 » dans une analyse plus approfondie.

4.2. Effet de F

Des tests supplémentaires d'installation continue à une vitesse $v_p = 1$ m/s sont effectués en conservant L_1 et en faisant varier $F = 5, 7, 10, 20$ pour étudier l'influence de la taille des grains sur la réponse du pieu. De fortes fluctuations sont observées pour $F = 10, 20$. Avec la diminution de F de 10 à 7, une variation du rapport entre le «pieu» et la taille des grains montre une influence claire sur le comportement. En diminuant encore F jusqu'à 5, aucun effet n'est observé.

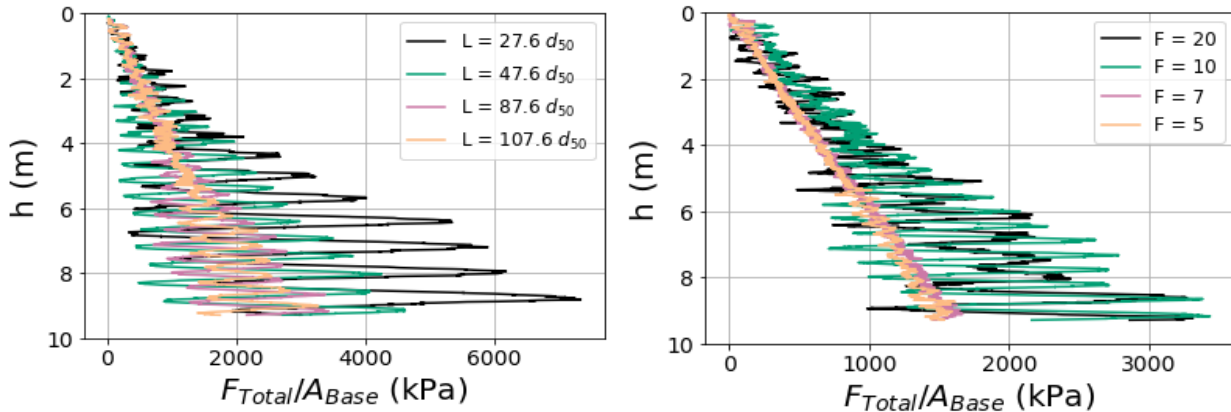


Figure 3. Enfoncement en fonction de la force totale normalisée sur le mur en faisant varier a) la longueur normalisée L/d_{50} b) le facteur F .

4.3. Effet v_p : installation continue et par passes

L'échantillon avec L_1 et $F = 7$, composé de 249254 sphères est choisi comme configuration de référence pour les essais suivants. Trois valeurs de vitesse de fonçage ($v_p = 0,1$ m/s, $0,5$ m/s et 1 m/s) sont comparées pour deux cas : installation continue et par passes de 10 mm (échelle prototype de 1 m). L'effet de la vitesse dans le cas continue n'est évident qu'au point de départ mais semble significatif pour l'installation par passes. Les fortes fluctuations observées pour $v_p = 1$ m/s, en particulier à des profondeurs plus élevées, baissent mais restent visibles à $v_p = 0,5$ m/s, et diminuent à $v_p = 0,1$ m/s. Cela suggère qu'en cas de fonçage cyclique, des conditions plus restrictives peuvent être imposées au critère de choix de la vitesse qu'en cas d'installation continue, étant donné que le fonçage par passes successives peut induire d'importantes fluctuations de force.

5. Conclusions

Dans cette étude, l'installation des fondations de pieux est examinée au travers de simulations d'essais en centrifugeuse utilisant la méthode des éléments discrets. Une représentation simplifiée en 2D d'un pieu est modélisée, et l'effet de la taille du modèle et des particules sur le comportement du pieu pendant l'installation est exploré. Après avoir décidé des dimensions appropriées du modèle, l'effet de la vitesse de fonçage sur la résistance du pieu s'est avéré plus contraignant pour le fonçage cyclique que pour le fonçage continu. Ce travail vise à explorer l'effet de divers paramètres sur la capacité de la DEM à simuler des interactions géotechniques complexes entre le sol et la structure. Des simulations numériques du fonçage et de l'arrachement du pieu modèle, avec les paramètres identifiés dans ce travail, seront réalisées et comparées aux essais correspondants du modèle en centrifugeuse.

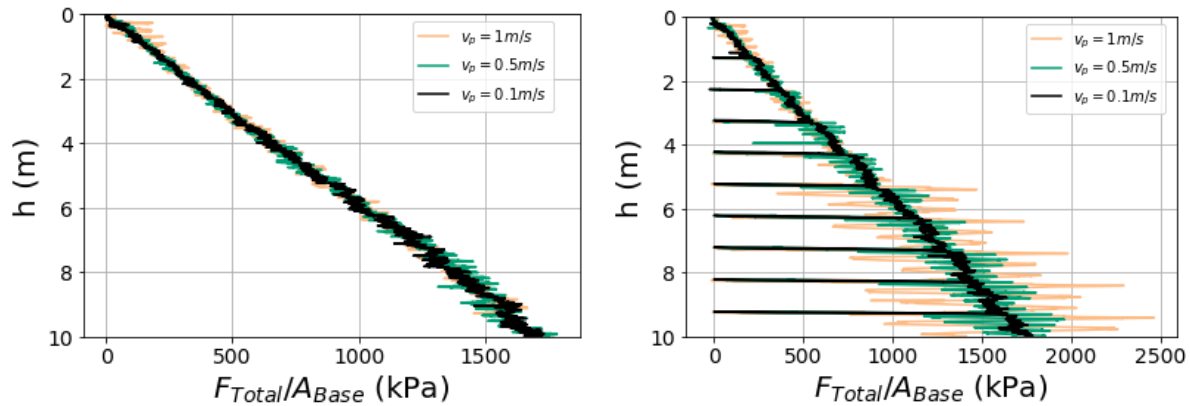


Figure 4. Enfoncement en fonction de la force totale normalisée sur le mur en faisant varier la vitesse d'installation pour un cas a) continue b) cyclique.

6. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Centre de Calcul Haute Performance des Pays de la Loire (CCIPL) et le projet européen Horizon 2020 GEOLAB (Grant Agreement No. 101006512) pour leur précieux soutien au cours de cette recherche. Ils remercient également l'Université Gustave Eiffel et la Région Pays de la Loire pour leur soutien financier sous forme de bourses de thèse.

7. Références bibliographiques

- Aboul Hosn, R., Sibille, L., Benahmed, N., Chareyre, B. (2017). Discrete numerical modeling of loose soil with spherical particles and interparticle rolling friction, *Granular matter*, 19 (1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0687-0>
- Arroyo, M., Butlanska, J., Gens, A., Calvetti, F., Jamiolkowski, M. (2011). Cone penetration tests in a virtual calibration chamber, *Géotechnique*, 61(6), 525–531. <https://doi.org/10.1680/geot.9.P.067>
- Balachowski L., Firomsa Kabeta W., Thorel L., Blanc M., Dubreucq Th. (2024). Centrifuge modelling of tapered wall jacked into dense sand. XVIII ECSMGE24, Lisbonne.
- Beroya-Eitner M.A., Macháček J., Viggiani G., Dastider A.G, Thorel L., Korre E., Agalianos A., Jafarian Y., Zwanenburg C., Lenart S., Wang H., Zachert H., Stanier S. (2022). GEOLAB Material Properties Database (1.0) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7462287>
- Blanc, M., El Haffar, I., Thorel, L. (2019). Centrifuge modelling of the impact of the installation method on the lateral response of the pile, In: ECSMGE 2019, 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Reykjavik, Iceland, 8-p. <https://dx.doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-0256>
- Ciantia, M., O'Sullivan, C., Jardine, R. J. (2019). Pile penetration in crushable soils: Insights from micromechanical modelling, In: ECSMGE 2019, 17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Reykjavik, Iceland, 298-317. <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-1111>
- Cundall, P. A., and Strack, O. D. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique*, 29(1): 47–65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
- El Haffar, I., Blanc, M., Thorel, L. (2017). Impact of pile installation method on the axial capacity in sand, *Géotechnique Letters*, 7(3), 260–265. <https://doi.org/10.1680/jgele.17.00036>
- Ezzeddine, A., Cazacliu, B., Richard, P., Thorel, L., Artoni, R. (2023). Discrete numerical analysis of cyclic loading on a model sand, In: NUMGE 2023, 10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering. London, UK. <https://doi.org/10.53243/NUMGE2023-218>

- Janda, A., Ooi, J., (2016). DEM modeling of cone penetration and unconfined compression in cohesive solids, *Powder Technology*, 293, 60–8. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.05.034>
- Jiang, M., Zhang, A., Li, T. (2019). Distinct element analysis of the microstructure evolution in granular soils under cyclic loading, *Granular Matter*, 21, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10035-019-0892-8>
- Kozicki, J., and Donze, F. V. (2009). YADE-OPEN DEM: An open-source software using a discrete element method to simulate granular material, *Engineering Computations*, 26(7), 786-805. <https://doi.org/10.1108/02644400910985170>
- Zhang, Z., and Wang, Y.-H. (2015). Three-dimensional dem simulations of monotonic jacking in sand, *Granular Matter*, 17, 359–376. <http://dx.doi.org/10.1007%2Fs10035-015-0562-4>
- Zorzi, G., Kirsch, F., Gabrieli, F., and Rackwitz, F. (2017). Long-term cyclic triaxial tests with DEM simulations, In *PARTICLES V: proceedings of the V International Conference on Particle-Based Methods: fundamentals and applications*, Barcelona, Spain, 273–2.