

Champs cinématiques dans un sable lors de l'enfoncement d'un pieu par tomographie RX: comparaison des corrélations numérique continue et discrète

M. SILVA^a, J. DOREAU—MALIOCHE^{a&b}, G. COMBE^a

a. Université Grenoble Alpes, 3SR, F-38000, Grenoble, France, @3SR-grenoble.fr

b. Nationale des Travaux Publics de l'État, Lyon, France, @3SR-grenoble.fr

Résumé:

L'étude du champ cinématique granulaire inhérente à l'installation du pieu a été conduite en utilisant la tomographie à rayons X et des techniques de corrélation d'images numériques. Les expériences présentées ici portent sur l'enfoncement d'un mini-pieu modèle dans des échantillons de sable de granulométrie différente, sous confinement isotrope. Selon la taille des grains du sable testé, la corrélation a été réalisée de manière discrète, en suivant individuellement chaque grain, ou continue. L'utilisation de ces deux méthodes permet l'étude des effets d'échelle entre le diamètre du pieu et la taille des grains sur les mécanismes contrôlant le frottement latéral des pieux.

Abstract:

The kinematics behind the installation of a model pile has been studied by using X-ray computed tomography and Digital Image Correlation techniques. According to the sands' grain-size distributions, both discrete, i.e. particle tracking, or continuous correlation have been employed. The use of these techniques allow for the study of scale effects between pile diameter and mean grain size on the mechanisms controlling pile shaft friction.

Mots clefs : Tomographie RX – Corrélation numérique discrète/continue – Cinématique granulaire – Effets d'échelle

1 Introduction

La cinématique granulaire inhérente à la mise en place de pieu par vérinage dans du sable reste un domaine plein d'incertitudes. La majeure partie de la résistance au cisaillement d'un pieu réside dans une fine couche à l'interface entre le pieu et le sol. Plusieurs auteurs, [1], [2], [3], suggèrent même que

le comportement temporel de cette couche de sol, ajouté à des effets de voûte générés pendant l'installation du pieu, contrôlerait la résistance du pieu à long terme et les phénomènes de cicatrisation du frottement latéral. Il semble donc essentiel de comprendre l'interaction entre le sol et le pieu.

Dans le passé et en utilisant des radiographies, [4] ont montré que, pendant l'installation du pieu, une zone plus lâche se formait autour de celui-ci. Le sable à la surface du pieu est entraîné par le mouvement du pieu, avec un confinement constant du sol environnant, ce qui forme un arc autour du pieu. Ces phénomènes ont été confirmés par des mesures de densité en grande chambre de calibration, [5], et pour des petits échantillons de laboratoire par tomographie à rayons x, [6], [7], [8].

White & Bolton [9], employant la technique de Particle Image Velocimetry (PIV) en configuration de contraintes planes, ont suggéré qu'une zone très dense se développait autour du pieu quand ce dernier s'enfonçait à une profondeur plus élevée dans le sable. Leurs résultats montrent une diminution irrémédiable du volume sous la pointe du pieu résultant de l'écrasement des grains et du compactage du sol. Quand le pieu pénètre dans ce sable sur-consolidé, une zone de densité élevée se crée autour du fût. White & Bolton, [9], suggèrent que, pour un enfoncement continu du pieu, la cavité cylindrique de sable sur-consolidé va induisant une réduction des contraintes radiales et un effet de voûte similaire à celui évoqué par Robinsky & Morrison, [4].

Cet article présente les résultats préliminaires d'un programme expérimental dédié à l'analyse du champ cinématique, par des techniques de corrélation d'images numériques 3D, développé durant la mise en place d'un mini pieu modèle dans différents types de sable pendant un scan tomographique.

2 Étude expérimentale

2.1 Caractéristique des matériaux utilisés

Pour les essais ci présentés, trois types des sables siliceux ont été utilisés. Les propriétés mécaniques des sables sont présentées dans la Table 1. Les échantillons de sable ont un diamètre de 70mm et une hauteur de 124mm. La taille de l'échantillon et la taille moyenne des grains sont restreints par les conditions de radiographie du tomographe.

Les échantillons ont été préparés par pluviation manuelle de couches consécutives de 25mm d'épaisseur. Pour certains essais, le sable a été directement moulé autour du pieu déjà enfoncé de 4mm dans la cellule. Un confinement isotrope constant de 100 à 250 kPa a été appliqué pendant l'enfoncement du pieu et le scanner.

	e_{\min}	e_{\max}	D_{50} (mm)
NE34	0.51	0.90	0,21
Hostun RF	0.56	0,80	1,5
Hostun RF	0.55	0,80	2,2

Table1. Propriétés des matériaux testés

2.2 Dispositif expérimental

Pour des raisons pratiques, le pieu modèle, lisse et en aluminium et à base fermée, a été installé par le bas de la cellule. Selon la taille des grains, deux diamètres de pieu ont été employés : 5 et 14 mm. Plusieurs radios ont été obtenues après des incréments de déplacement du pieu allant de 0,5mm à 5mm à un ratio de 0,06mm/s. La charge en tête du pieu a été gardée constante pendant les différentes étapes. Le dispositif expérimental global est présenté dans la Figure 1.

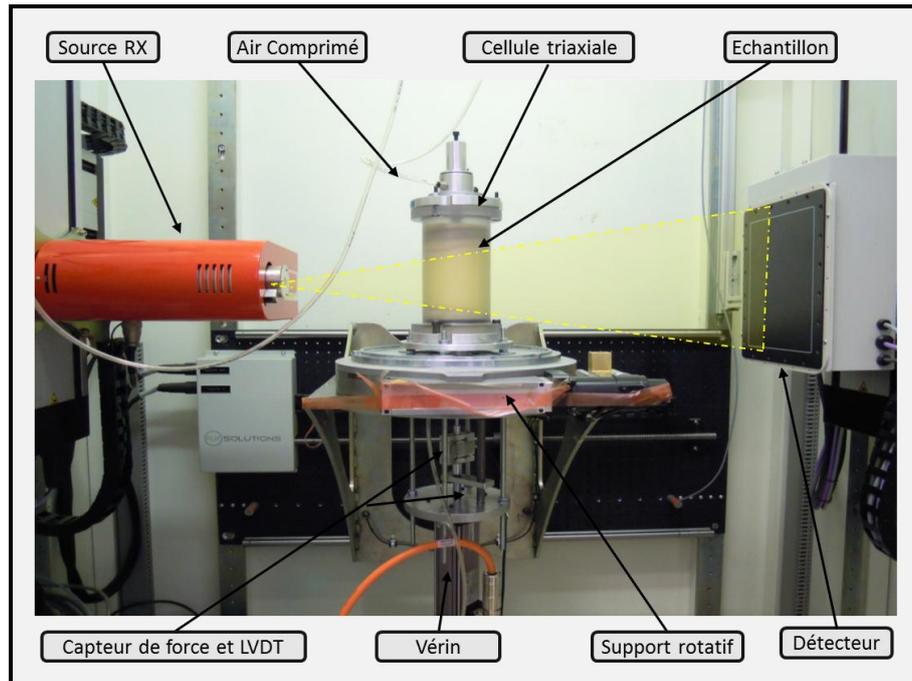


Figure 1- Dispositif expérimental

Pour l'acquisition des radios, la source RX a été réglée sur une tension de 150kV (quantité d'énergie) et un ampérage de 200 μ A (nombre de photons), soit une puissance de 30W. La résolution des images ainsi atteinte est d'environ 40 μ m/voxel. 1024 radios de l'échantillon de sable ont été prises pour permettre la reconstruction du volume entier. Un exemple du volume reconstruit est présenté dans la Figure 2.

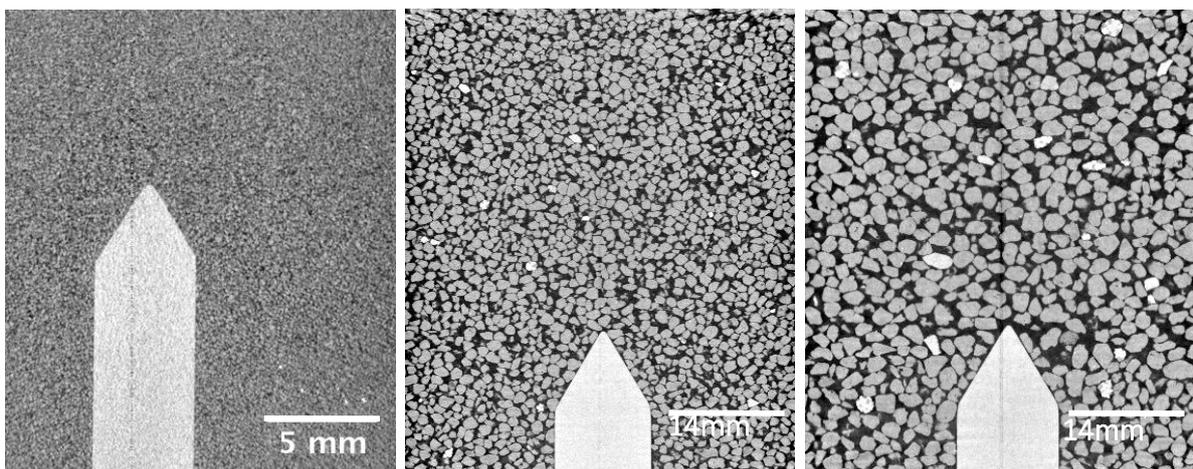


Figure 2- Radio de l'échantillon pour les différents types de sable : NE34 $D_{50}=0.21$ mm - Hostun RF $D_{50}=1,5$ mm – Hostun RF $D_{50}=2$ mm

Pour le sable plus fin, NE34, les déplacements incrémentaux entre deux radios ont été cartographiés et analysés en utilisant la corrélation d'image continue qui compare une texture entre le volume initial et le volume après déformation. Pour le sable plus grossier, sable d'Hostun RF, le déplacement de chaque grain a été suivi individuellement pour chaque étape d'enfoncement du pieu.

3. Résultats préliminaires

La déformation spatiale entre deux tomographies à rayons X consécutives a été obtenue et analysée en appliquant une corrélation d'images numériques en 3D: en utilisant le code TomoWarp 3D-DIC [10] pour les mesures continues, et un analyse discrète selon un méthode de identification de grains [11].

Les résultats de la corrélation continue mettent en évidence deux zones distinctes de mouvement des grains de sable. La première, qui concentre la majorité des déplacements, est observée sous la pointe du pieu. Les grains suivent le mouvement du pieu dans la direction verticale et se dispersent perpendiculairement à la tête du pieu dans la direction horizontale. La plupart des déplacements sont concentrés dans une région située à une distance d'environ une fois le diamètre du pieu depuis son extrémité.

La deuxième, avec des déplacements plus faibles, est localisée en amont de la pointe du pieu. Dans cette zone, une fine couche de sable suit le mouvement vertical du pieu alors que le sol autour connaît une recirculation des grains.

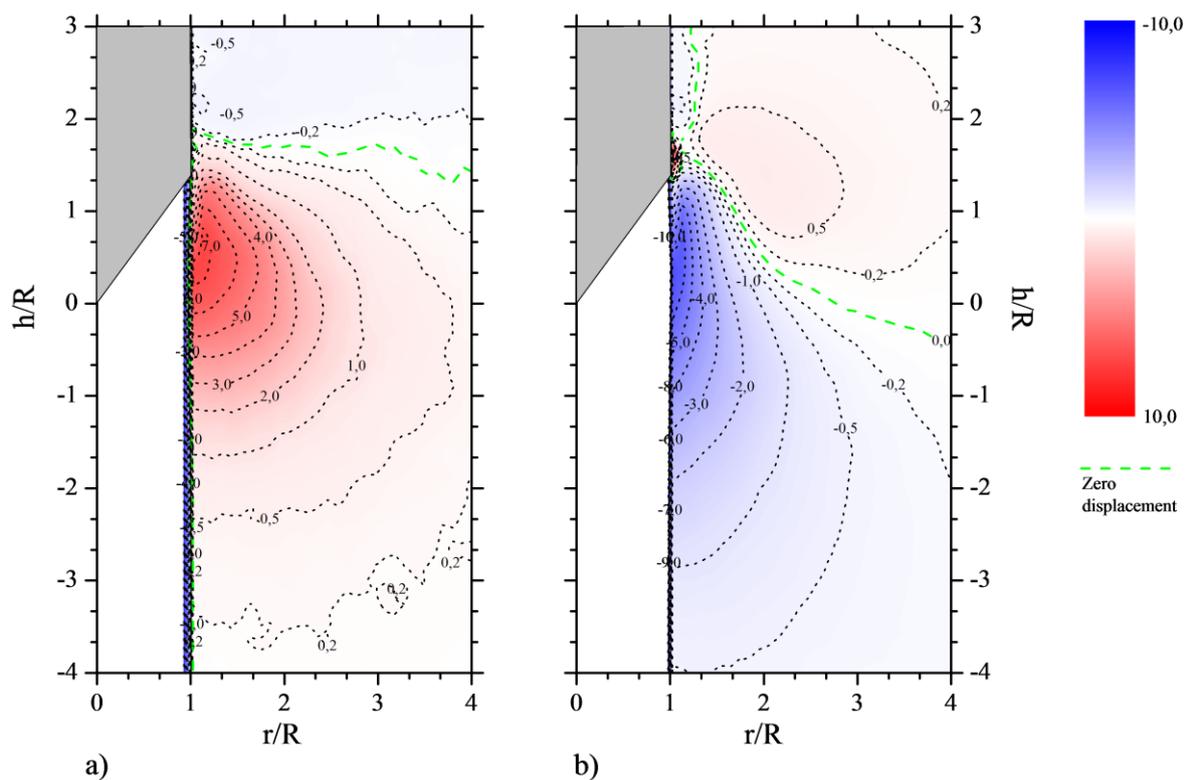


Figure 3- Déplacements incrémentaux normés par le rayon du pieu selon l'analyse continue, valeurs en pixels, sable NE34 : a) radiaux et b) verticaux.

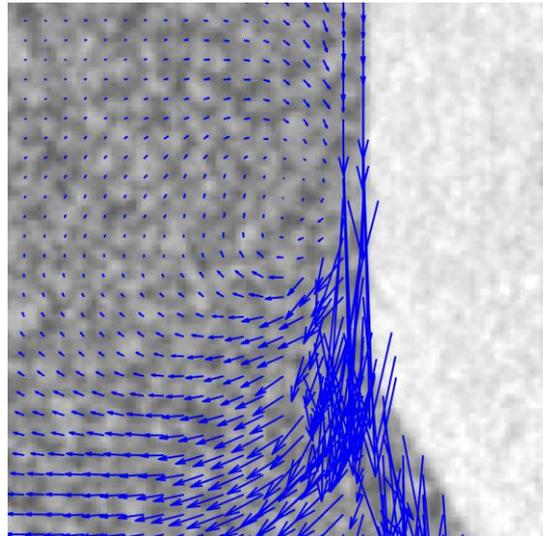


Figure 4- Vecteurs déplacement 2D autour du pieu après 2mm d'avancement de la tête du pieu continue. Les vecteurs sont amplifiés par un facteur 10 (Sable NE34).

Les premiers résultats de corrélation discrète réalisée pour le sable plus grossier semblent mettre en évidence les mêmes phénomènes, Figure4 et Figure5. Une étude comparée entre les résultats issus des deux méthodes de corrélation plus approfondie permettra d'évaluer les éventuels effets d'échelle selon la taille des grains de sable et du pieu utilisé ainsi que l'effet du confinement et du mode de mise en place du pieu (vériné ou moulé).

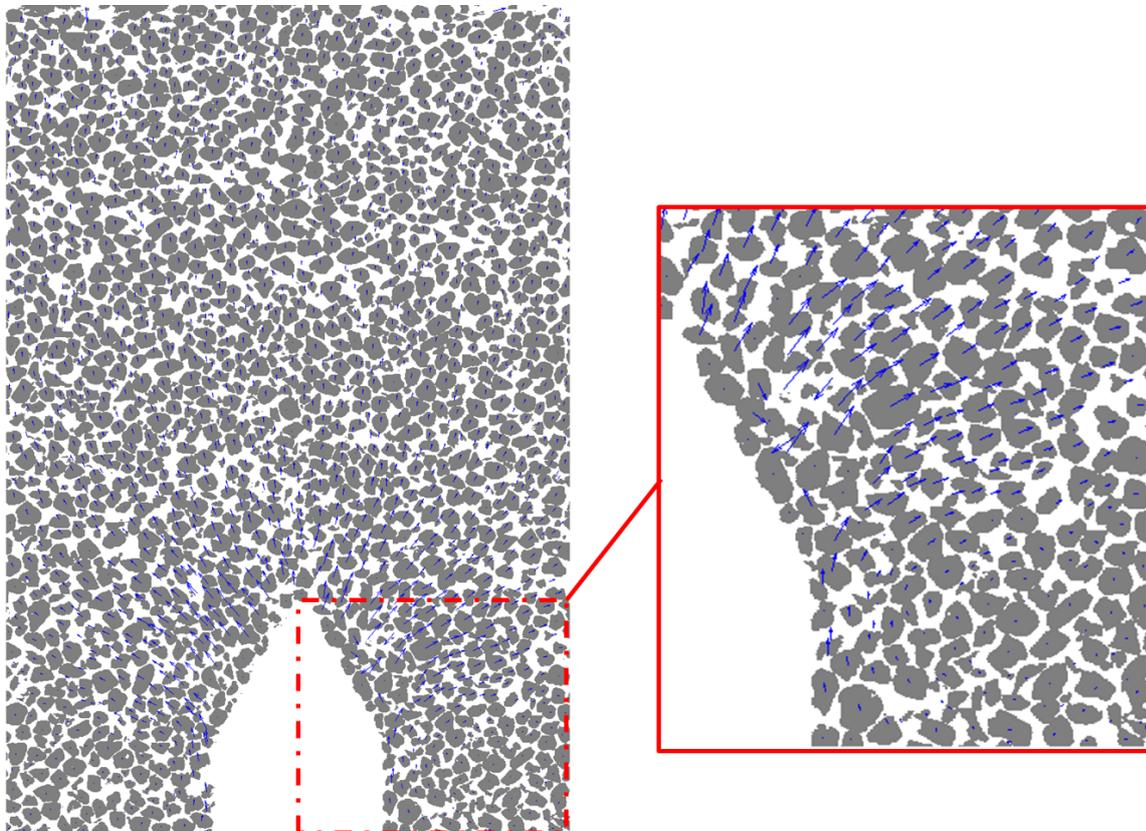


Figure 5- Vecteurs déplacement 2D autour du pieu après 2mm d'avancement de la tête du pieu discrète. Les vecteurs ne sont pas amplifiés (Hostun RF $D_{50}=1,5mm$)

Références

- [1] Åstedt, B., Weiner, L., & Holm, G. (1992). Increase in bearing capacity with time for friction piles in silt and sand. Proceedings of Nordic Geotechnical Meeting.
- [2] Chow, F. C., Jardine, R. J., Brucy, F., & Nauroy, J. F. (1998). Effects of Time on Capacity of Pipe Piles in Dense Marine Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(3), 254-264.
- [3] Axelsson, G. (2000). Long-Term Set-Up of Driven Piles in Sand. Royal Institute of Technology.
- [4] Robinsky, E. I., & Morrison, C. (1964). Sand displacement and compaction around model friction piles. *Canadian Geotechnical Journal*, 1(2), 81–93.
- [5] Chong, M. K. (1988). Density changes of sand on cone penetration resistance. *Penetration Testing 1988*, Vol. 2, pp. 707–714, Balkema, Rotterdam.
- [6] Van Nes, J. H. . (2004). Application of computerized tomography to investigate strain fields caused by cone penetration in sand. (Master's thesis). Delft University of Technology.
- [7] Ngan-Tillard, D., Cheng, X. H., Van Ness, J., & Zitha, P. L. J. (2005). Application of x-ray computed tomography to cone penetration tests in sands. *Proceedings of the Geo-Frontiers, Site Characterization and Modeling*, 1–12.
- [8] Morita, K., Otani, J., Mukunoki, T., Hironaka, J., & Pham, K. D. (2007). Evaluation of vertical and lateral bearing capacity mechanisms of pile foundations using X-ray CT. *Advances in Deep Foundations: International Workshop on Recent Advances of Deep Foundations*, 217–223.
- [9] White, D. J., & Bolton, M. D. (2004). Displacement and strain paths during plane-strain model pile installation in sand. *Géotechnique*, 54(6), 375–397.
- [10] Hall, S. A. A methodology for 7D warping and deformation monitoring using time-lapse seismic data. *Geophysics* 71.4 (2006), O21–O31.
- [11] Ando, E., Hall, S. A., Viggiani, G., Desrues, J., & Bésuelle, P. (2012a). Grain-scale experimental investigation of localised deformation in sand: a discrete particle tracking approach. *Acta Geotechnica*, 7(1), 1-13.