

1 ***Étude du comportement de l'interface sable-***  
2 ***pieu sous chargement axial monotone et***  
3 ***cyclique à l'échelle granulaire***

4 ***Grain-scale study of sand-pile interface under***  
5 ***monotonic and cyclic axial loading***

6 **Jeanne Doreau-Malioche** – [jeanne.doreau@developpement-durable.gouv.fr](mailto:jeanne.doreau@developpement-durable.gouv.fr) – Univ.  
7 Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, F-38000, Grenoble, France.

8 **Gaël Combe** – Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, F-38000, Grenoble, France.

9 **Gioacchino Viggiani** – Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, F-38000, Grenoble,  
10 France.

## 11 **Résumé**

12 De nombreuses études expérimentales sont conduites pour analyser quantitativement la  
13 cinématique et l'écrasement des grains à l'interface sable-pieu sous chargement axial.  
14 Néanmoins, les résultats sont obtenus soit post-mortem, soit en déformations planes, et  
15 principalement pendant l'installation du pieu. L'article présente une approche innovante  
16 associant la tomographie à rayons X et l'analyse d'images en 3D et permettant d'extraire des  
17 informations à l'échelle granulaire, pendant le chargement monotone et cyclique du pieu.

18  
19 Les tests sont réalisés sur un pieu instrumenté installé par fonçage monotone dans un  
20 échantillon dense de sable. Après son installation, le pieu est soumis à un grand nombre de  
21 cycles axiaux contrôlés en déplacement à contrainte radiale constante. Ces essais sont conduits  
22 dans une mini-chambre de calibration qui permet d'acquérir des tomographies à rayons X à  
23 haute résolution après différentes étapes de chargement.

24  
25 La réponse macroscopique de l'interface montre une évolution du frottement à l'interface  
26 pendant les cycles en deux phases, avec une augmentation non négligeable de la résistance de  
27 frottement dans la seconde phase. Pour ces deux phases, la mesure de la cinématique révèle un  
28 comportement du sable différent associé à une densification importante à l'interface. D'abord,  
29 le sol se contracte radialement dans une zone de  $4 D_{50}$  d'épaisseur. Ensuite, les grains de sable  
30 se déplacent difficilement et la densité à l'interface atteint un seuil pour lequel le frottement sur  
31 le pieu augmente de manière significative.

## 32 **Abstract**

33 The mechanisms controlling the macroscopic behavior of sand-pile interface during pile  
34 installation and axial cyclic loading are complex and are difficult to fully understand from field  
35 observations or from external measurements on laboratory-scale models. Numerous  
36 experimental investigations have been reported on related topics of sand kinematics, grain  
37 crushing, local porosity changes, local effective stress changes and the macroscopic interface  
38 behavior the observations were conducted either post-mortem or in plane strain and mainly  
39 during pile installation.

40 The present work focuses on the sand grains behavior in the vicinity of the pile during pile  
41 installation and subsequent axial loading cycles. The tests were performed in a mini-calibration  
42 chamber installed in an x-ray scanner. The pile was installed by monotonic jacking and  
43 submitted to 1500 displacement-controlled cycles under constant radial stress.

44 The results show different phases in the evolution of shaft resistance during cyclic loading, with  
45 a non-negligible increase of shaft resistance in the latter phase. For these two phases, the  
46 measurement of grain kinematics reveals a different behavior of the sand mass associated with  
47 a significant densification at the interface. First, the sand mass contracts radially within a region  
48 of thickness  $4 D_{50}$ . Then, sand grains hardly move and the sand mass reaches a threshold density  
49 for which the friction on the shaft resistance increases significantly.

## 50 **Mots-clefs**

51 Interaction sol/structure ; cycles ; échelle granulaire ; tomographie  
52 Soil/structure interaction; cycles; grain-scale; tomography

## 53 **Notations**

$C_u$	Coefficient d'uniformité
$D_{50}$	Diamètre moyen des grains
$e_{\min}$	Indice des vides minimal
$e_{\max}$	Indice des vides maximal
$G_s$	Gravité spécifique
$h$	Profondeur dans l'échantillon de sable
$r$	Distance radiale à l'axe du pieu
$r_p$	Rayon du pieu
$v_{\max}$	Vecteur propre maximal du tenseur d'inertie d'un grain de sable
$v_{\text{med}}$	Vecteur propre moyen du tenseur d'inertie d'un grain de sable
$v_{\min}$	Vecteur propre minimal du tenseur d'inertie d'un grain de sable
$z$	Axe du pieu
$\delta'$	Angle de frottement résiduel à l'interface sable-pieu
$\varphi'$	Angle de frottement de pic du sable
$\theta$	Angle entre le vecteur $v_{\min}$ et $z$ définissant l'orientation d'un grain

54

55

56

57

## 58 **Introduction**

59 Les mécanismes contrôlant le comportement macroscopique de l'interface sable pieu sous  
60 chargement axial monotone et cyclique sont complexes et difficiles à comprendre à partir  
61 d'observations in situ ou de mesures macroscopiques réalisées sur des modèles physiques à  
62 échelle réduite.

63  
64 De récentes contributions, telles que les travaux de Jiang et al., 2006; Lobo-Guerrero & Vallejo,  
65 2007; Butlanska et al., 2014 ; Ciantia et al., 2019, proposent une analyse micromécanique du  
66 comportement de l'interface sable-pieu grâce à la modélisation par éléments discrets (DEM). A  
67 la connaissance des auteurs, aucune étude expérimentale équivalente n'existe à ce jour. Divers  
68 travaux de recherche traitant de la cinématique du sol, des variations de densité locales et de  
69 l'évolution des contraintes effectives à l'interface sable-pieu sont disponibles (White & Bolton,  
70 2002; Yang et al., 2010; Tsuha et al., 2012; Silva et al., 2013; Arshad et al., 2014). Bien que les  
71 résultats de ces études aient grandement participé à la compréhension des mécanismes de  
72 déformation contrôlant la réponse macroscopique de l'interface sable-pieu sous chargement  
73 axial, les observations ont été conduites soit post-mortem, soit en déformations planes, et  
74 principalement pendant la phase de fonçage du pieu.

75  
76 La présente étude se concentre sur le comportement des grains au voisinage du pieu pendant  
77 l'installation du pieu et les chargements cycliques suivants. Une série de tests est réalisée sur un  
78 pieu modèle instrumenté à pointe conique installé par fonçage monotone dans un échantillon  
79 de sable calcaire dense. Après son installation, le pieu est soumis à un grand nombre de cycles  
80 axiaux contrôlés en déplacements (jusqu'à 1500 cycles), à contraintes radiales constantes. Ces  
81 essais sont conduits dans une mini-chambre de calibration montée au sein du tomographe à  
82 rayons X du Laboratoire 3SR de Grenoble, France. Des images à haute résolution sont acquises  
83 après différentes étapes de chargement.

84  
85 Il est admis que le dispositif expérimental n'est pas représentatif de pieux de fondation réels  
86 soumis à de nombreux cycles contrôlés en charge liés à leur environnement (houle, vent, charges  
87 d'exploitation, etc.). Par ailleurs, les dimensions de l'échantillon par rapport à celles du pieu et  
88 à la granulométrie du sable testés sont bien inférieures à celles recommandées dans la littérature  
89 afin de limiter les effets d'échelle. Par conséquent, les résultats obtenus dans ce travail ne  
90 peuvent, et ne doivent, pas être directement extrapolés pour le design de pieux réels. Cependant,  
91 un tel dispositif permet de reproduire qualitativement des tendances similaires à celles  
92 observées à l'échelle macroscopique sur des essais à grande échelle. L'analyse quantitative du  
93 comportement individuel des grains situés au voisinage du pieu fournit une collection de  
94 données 3D qui pourrait être utilisée pour la validation de modèles numériques ou théoriques.

## 95 **Matériau testé**

96 Le matériau utilisé est le sable Glageon dont les caractéristiques principales sont résumées dans  
97 le Tableau 1. Le sable Glageon est un sable calcaire dérivé d'une roche calcaire concassée dans la  
98 carrière de Bocahut, France, avec un  $D_{50}=1.125$  mm et une granulométrie relativement uniforme  
99 (fraction granulaire conservée entre 1.00 mm et 1.25 mm). La taille des grains est suffisante pour  
100 les suivre individuellement d'une image à l'autre (voir la section "Tomographie à rayons X et  
101 analyse d'images"). Le sable Glageon a été sélectionné pour la nature, l'angularité et la forme  
102 allongée de ses grains qui les rendent facilement broyables.

103

104 Les échantillons testés sont cylindriques avec un diamètre de 70 mm et une hauteur de 128 mm.  
 105 Les échantillons sont secs et constitués par dépôt homogène avec une densité relative initiale  
 106 allant de 80 % à 110 %. L'angle de frottement interne de la fraction granulaire utilisée a été  
 107 déterminé par des essais de compression triaxiale réalisés avec une densité relative initiale de  
 108 94% et une pression de confinement de 100 et 200 kPa. Les résultats de ces essais donnent  $\varphi' =$   
 109  $48^\circ$ .

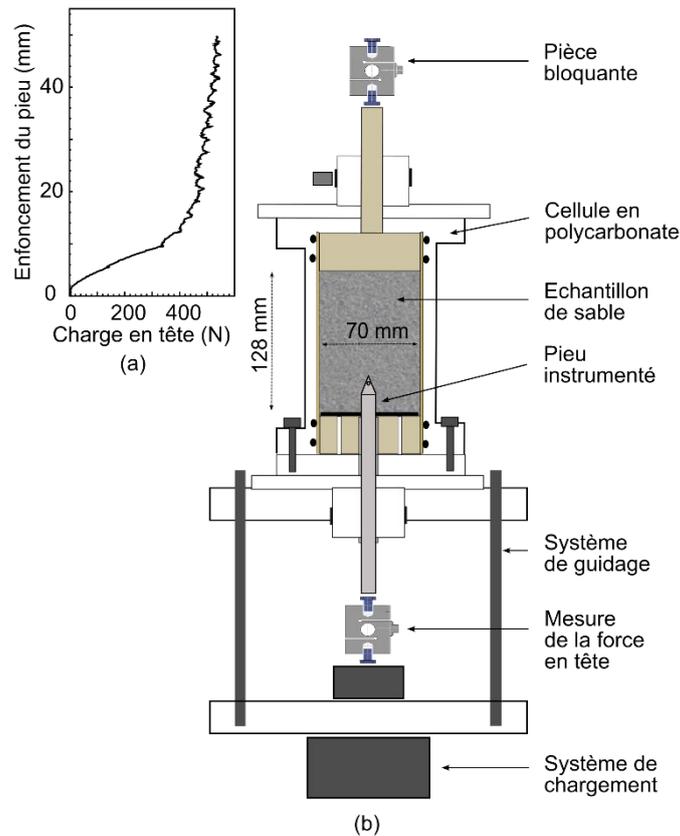
Gravité spécifique ( $G_s$ )	Coefficient d'uniformité ( $C_u$ )	Diamètre moyen ( $D_{50}$ : mm)	$e_{max}$	$e_{min}$
2.65	1.25	1.125	1.070	0.839

111 Tableau 1 Caractéristiques principales du sable Glageon – Glageon sand index properties

## 112 *Modèle physique*

113 Les essais ont été réalisés au sein du tomographe à rayons X du laboratoire 3SR, dans la mini-  
 114 chambre de calibration développée par Silva (2014) et adaptée pour la présente étude. La mini-  
 115 chambre de calibration est constituée d'une cellule cylindrique en polycarbonate, matériau dont  
 116 le coefficient d'absorption des rayons X est faible. La cellule permet d'appliquer différents  
 117 niveaux de contraintes de confinement uniformes via de l'air comprimé. Un schéma du montage  
 118 expérimental incluant la mini-chambre de calibration, le pieu modèle, le système de chargement  
 119 et les différents capteurs de forces est présenté sur la Figure 1.

120



121  
 122  
 123  
 124

Figure 1 (a) Evolution typique de la charge en tête pendant l'installation du pieu et (b) dispositif expérimental (d'après Doreau-Malioche et al., 2018) – (a) Typical head load profile and (b) experimental equipment (after Doreau-Malioche et al., 2018)

125 Le système de chargement est constitué d'un vérin qui impose un déplacement au pieu modèle  
126 à une vitesse de  $25 \mu\text{m/s}$  assurant ainsi un chargement quasi-statique. Le déplacement du pieu  
127 est mesuré grâce à un LVDT avec une précision de  $5 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ . L'utilisation de la mini-chambre  
128 de calibration au sein du tomographe implique une configuration particulière du dispositif  
129 expérimental. Aucun n'objet ne devant interférer avec le faisceau de rayons X, le système de  
130 chargement a été suspendu sous le plateau rotatif, ce qui signifie que le pieu est inséré du bas  
131 vers le haut, depuis la base de la cellule.

132  
133 Le pieu modèle est constitué d'un tube en aluminium de 7 mm de rayon (noté  $r_p$ ) afin de limiter  
134 l'absorption des rayons X. La pointe conique ( $60^\circ$ ) est instrumentée avec une jauge de  
135 déformation enregistrant la charge en pointe avec une précision de  $\pm 4.6 \text{ N}$ . Un capteur de force  
136 fixé à la tête du pieu mesure la charge totale s'exerçant sur le pieu (ou charge en tête) avec une  
137 précision de  $\pm 5.0 \text{ N}$ . La résistance de frottement est estimée en soustrayant la charge de pointe  
138 à la charge totale. Le pieu modèle a une surface lisse d'une rugosité d'environ  $0.7 \mu\text{m}$ . La rugosité  
139 de l'interface sable-pieu est connue comme étant l'un des paramètres majeurs affectant la  
140 résistance de frottement (Fioravante, 2002 ; Hebler *et al.*, 2015 ; Tehrani *et al.*, 2016). Ainsi, dans  
141 la présente étude, le frottement mobilisé par le fût est plus faible que celui mesuré sur pieux  
142 réels. Des essais de cisaillement d'interface sable-aluminium ont donné  $\delta'$  égal à  $15^\circ$  alors que sur  
143 le terrain, les pieux ont une rugosité donnant une valeur type  $\delta'$  d'environ  $30^\circ$ .

## 144 ***Effets d'échelle***

145 L'effet principal à considérer pour des chambres de calibration de taille réduite, à 1g, est celui  
146 des bords de la chambre. En effet, excepté dans le cas particulier de conditions aux limites  
147 'actives' (*i.e.*, sous rigidité normale imposée), le comportement du pieu est fortement influencé  
148 par le ratio entre le diamètre de la chambre et le diamètre du pieu. (Parkin & Lunne, 1982; Been  
149 *et al.*, 1986; Boulon & Foray, 1986; Foray, 1991). Schnaid & Houlsby (1991) ont montré que ce ratio  
150 devait être supérieur à 50 pour des échantillons de sable denses. Plus tard, Salgado *et al.* (1998)  
151 ont suggéré que des valeurs plus élevées ( $> 100$ ) pourraient être nécessaires pour atteindre une  
152 similitude complète avec les essais terrain.

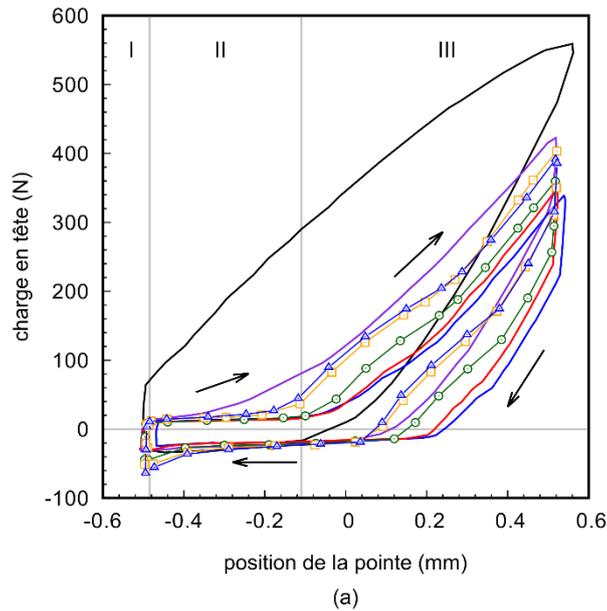
153 Une seconde source majeure d'effets d'échelle pour des essais sur pieu modèle est le ratio entre  
154 le diamètre du pieu et le diamètre moyen des grains. Pour du sable grossier, la couche cisailée  
155 de grains autour du pieu devient trop épaisse, ce qui peut conduire à des contraintes normales  
156 effectives excessives affectant directement la résistance de frottement (Lee *et al.*, 2011). Selon  
157 Peterson (1988), pour minimiser cet effet, le diamètre du pieu devrait être au moins égal à 80  
158 fois le diamètre moyen des grains.

159 Dans cette étude, le ratio entre le diamètre de la chambre et celui du pieu et le ratio entre le  
160 diamètre du pieu et le diamètre moyen des grains sont respectivement 5 et 14. Ces valeurs sont  
161 en-deçà des limites recommandées dans la littérature et ne sont pas représentatives des  
162 conditions rencontrées sur le terrain. Le dispositif expérimental a été conçu pour accéder à de  
163 nouvelles données à l'échelle des grains et son développement a été contraint par les outils  
164 d'imagerie employés.

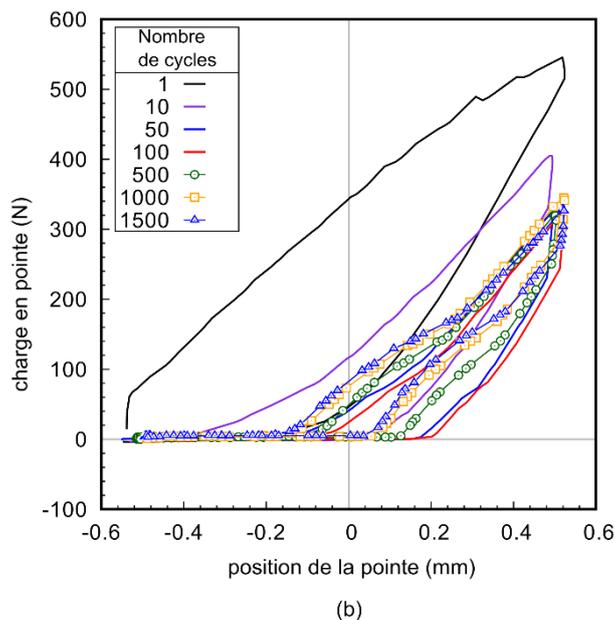
## 165 ***Réponse macroscopique de l'interface***

166 Le pieu modèle est foncé à une vitesse constante de  $25 \mu\text{m/s}$  jusqu'à une profondeur de 50 mm  
167 sous pression de confinement constante égale à 100 kPa. L'évolution typique de la charge en tête

168 est montrée sur la Figure 1. Après l'installation, le pieu modèle est soumis à un millier de cycles  
 169 contrôlés en déplacement. Les cycles sont conduits à la même vitesse de chargement que  
 170 l'installation avec une amplitude  $\pm 0.5$  mm, cycles alternés, autour de la position de référence du  
 171 pieu (position de la pointe à la fin du fonçage).



172



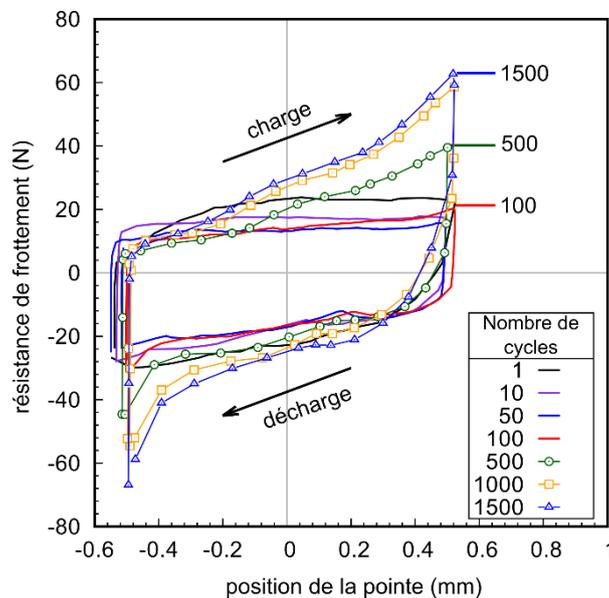
173

174 **Figure 2 Evolution (a) de la charge en tête (d'après Doreau-Malioche et al., 2018) (b) et de la résistance en pointe**  
 175 **pendant les cycles. Les flèches indiquent le sens de chargement. Les phases I, II et III sont données pour le cycle 500. –**  
 176 **Evolution (a) of head load (after Doreau-Malioche et al., 2018) and (b) tip resistance during cycles. Arrows show the**  
 177 **loading path. Phases I, II and III are given for cycle 500.**

178 La Figure 2a montre l'évolution de la charge totale appliquée sur le pieu pendant les cycles. Trois  
 179 phases se distinguent dans le chargement. Dans la phase I, la réponse du pieu est très rigide, ce  
 180 qui est cohérent avec l'inversion de la direction de chargement. Une variation significative de la  
 181 pente est observée en phase II et devient plus marquée après 50 cycles. Puis, la charge augmente  
 182 de nouveau en phase III, dès que la pointe revient dans sa position de référence. La Figure 2b,  
 183 montre que pendant les phases I et II, aucune charge ne s'applique sur la pointe après le 10<sup>ème</sup>  
 184 cycle. Ce phénomène indique que pendant la phase I, la charge totale est uniquement due au

185 frottement latéral sur le fût. Une fois que le frottement est mobilisé, la charge totale varie peu  
186 (phase II) jusqu'à ce que la pointe soit de nouveau en contact avec les grains.

187 L'évolution de la résistance de frottement pendant les cycles est présentée sur la Figure 3. Deux  
188 phases distinctes peuvent être identifiées. Pour les premiers 50 à 100 cycles, la résistance de  
189 frottement décroît légèrement (d'environ 15 N), alors qu'elle augmente de manière continue  
190 pour les cycles suivants. Lorsque la position de la pointe atteint  $\pm 0,5$  mm, la résistance de  
191 frottement atteint un pic de plus en plus marqué avec le nombre croissant de cycles. Dans le  
192 cadre du projet national SOLlicitations CYcliques sur Pieux de fondation (SOLCYP), Silva (2014)  
193 et Bekki *et al.* (2016) ont également observé une phase de radoucissement suivie d'une phase de  
194 renforcement dans l'évolution de la résistance de frottement au cours d'essais cycliques  
195 contrôlés en déplacement et effectués sur un pieu foncé dans un échantillon de sable siliceux de  
196 grande taille. Les auteurs ont constaté une transition entre les deux phases après environ 3000  
197 et 300 cycles respectivement, pour des cycles alternés de  $\pm 0,5$  mm. La différence dans le nombre  
198 de cycles requis pour observer le renforcement de la résistance de frottement pourrait être liée  
199 aux effets d'échelle commentés dans la section 'Effets d'échelle'.



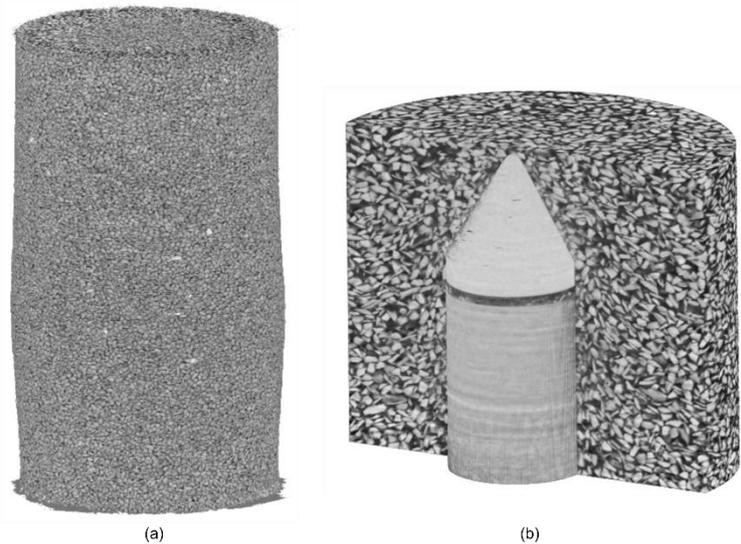
200

201 **Figure 3 Evolution de la résistance de frottement pendant les cycles (d'après Doreau-Malioche et al., 2018) –**  
202 **Evolution of shaft resistance during cycles (after Doreau-Malioche et al., 2018)**

### 203 ***Tomographie à rayons X et analyse d'images***

204 Des images 3D ont été acquises pendant l'installation du pieu et pendant le chargement cyclique,  
205 après un nombre de cycles donné : 1, 50, 100, 500 et 1000. Afin de caractériser l'échantillon au  
206 cours d'un essai, des images ont été enregistrées en tomographie 'globale', *i.e.*, avec un champ  
207 de vision contenant l'intégralité de l'échantillon, avec une taille de voxel de 70  $\mu\text{m}$  (ce qui signifie  
208 qu'un grain contient environ 14 voxels diamétralement). Cependant, les analyses à l'échelle des  
209 grains ont été réalisées en enregistrant des images en tomographie 'locale', *i.e.*, avec un champ  
210 de vision focalisé sur la pointe et le fût du pieu modèle, avec une taille de voxel de 40  $\mu\text{m}$  (ce qui  
211 signifie qu'un grain contient environ 25 voxels diamétralement). La Figure 4 montre un exemple  
212 de rendu 3D de l'interface sable-pieu acquis en tomographie 'globale' et 'locale' pendant le  
213 fonçage du pieu.

214 L'analyse du champ de porosité 3D est extraite des images acquises en tomographie 'globale'. La  
215 mesure de la porosité est basée sur la binarisation des images en échelle de gris. Un seuil a été  
216 défini pour que les voxels ayant une intensité supérieure à ce seuil soient considérés comme  
217 appartenant à la phase solide et ceux ayant une intensité inférieure au seuil comme appartenant  
218 aux vides. La porosité locale a été estimée au sein d'un sous-volume cubique de  $50 \text{ pixel}^3$   
219 (contenant environ 15 grains) et sélectionné comme étant le meilleur compromis pour obtenir  
220 un volume élémentaire représentatif.



221

222 **Figure 4** Volume 3D reconstruit après le fonçage du pieu en tomographie (a) globale avec une taille de voxel de 70  
223  $\mu\text{m}$  et (b) locale avec une taille de voxel de 40  $\mu\text{m}$  (d'après Doreau-Malioche et al., 2018) – 3D reconstructed volume  
224 after pile installation (a) in global and (b) in local tomography (after Doreau-Malioche et al., 2018)

225 Les champs de déplacements ont été obtenus grâce à la corrélation d'images numériques 3D,  
226 outil permettant d'évaluer la transformation spatiale entre deux images numériques, ici  
227 tomographies. Dans cette étude, une version discrète de l'algorithme de corrélation TomoWarp2  
228 (Tudisco *et al.*, 2017), développée au Laboratoire 3SR, a été utilisée. La différence principale avec  
229 les méthodes classiques de corrélation continue est que la fenêtre de corrélation est remplacée  
230 par des sous-volumes centrés sur les grains qui suivent la forme réelle des grains et qui ne  
231 contiennent qu'un seul grain. La corrélation d'images numériques discrète permet de mesurer  
232 la cinématique de chaque grain individuel de l'échantillon de sable et de prendre en compte les  
233 discontinuités éventuelles de déplacement entre grains.

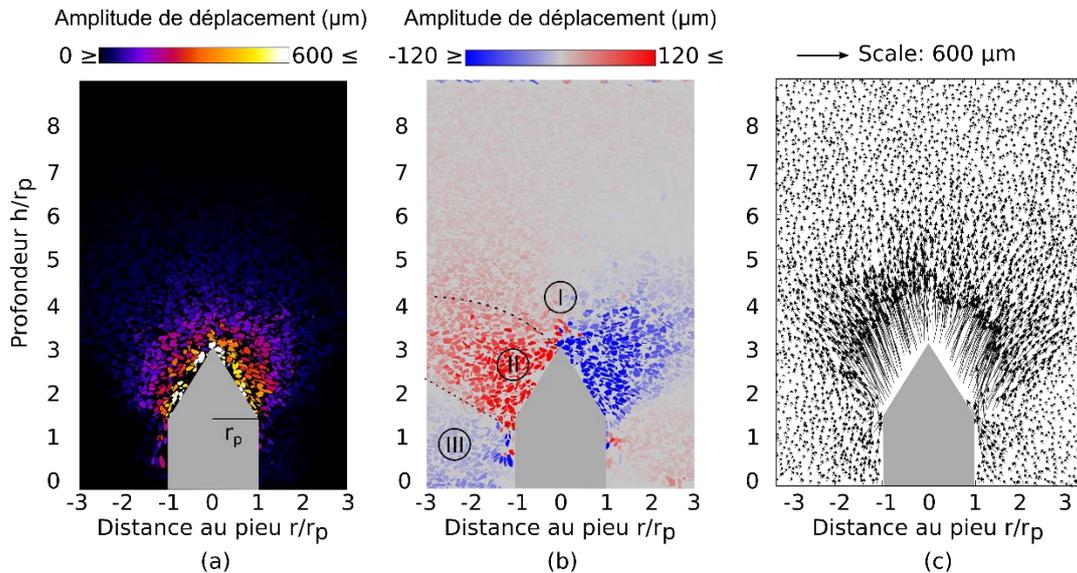
## 234 ***Sélection de résultats à l'échelle granulaire***

### 235 **Cinématique des grains**

236 Etant donné la symétrie des champs 3D mesurés (porosité, déplacements), les résultats sont  
237 généralement présentés sur des coupes verticales 2D prises dans le champ 3D et représentatives  
238 de la réponse du sol.

239 Les Figure 5a,b montrent le déplacement individuel de chaque grain obtenu par corrélation  
240 d'images discrète, représenté dans un plan vertical passant par l'axe du pieu, entre deux  
241 incréments de charge pendant le fonçage du pieu. Trois zones où se concentrent les  
242 déplacements sont identifiées. Dans la région I, qui s'étend à deux rayons de pieu de la pointe,  
243 la composante verticale du déplacement domine. Dans la région II, en dessous de la pointe, les

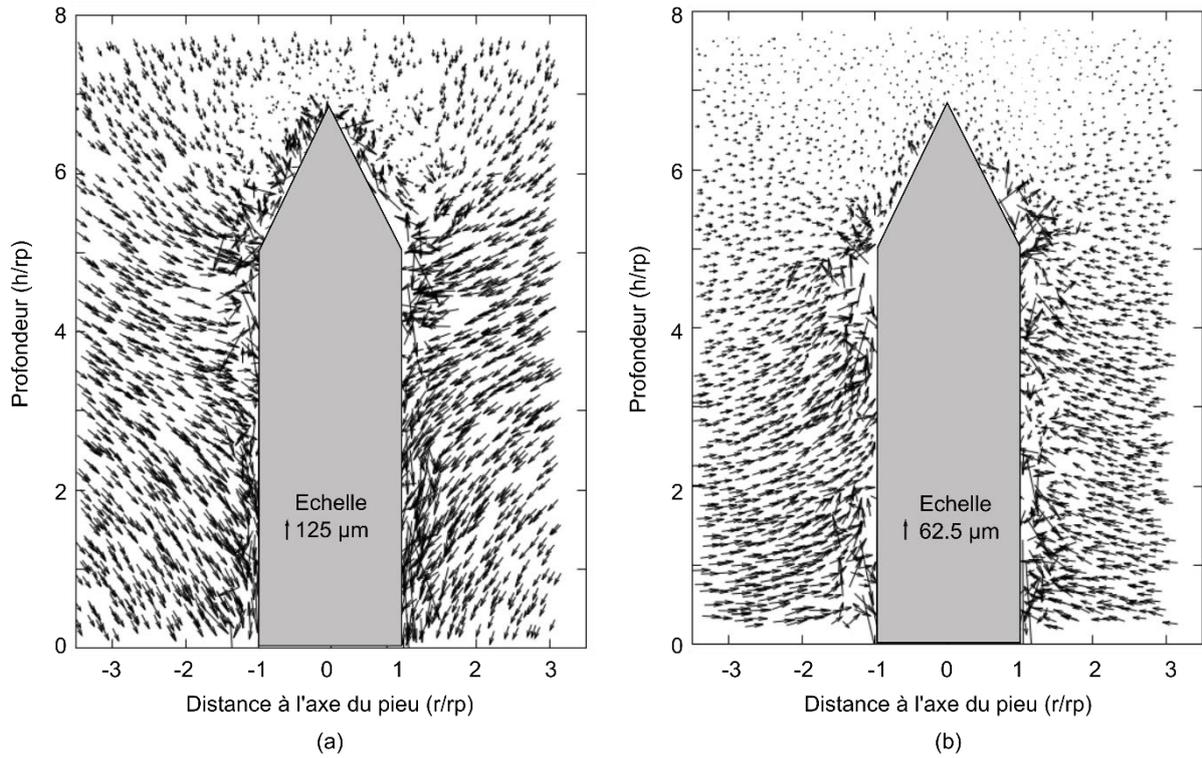
244 grains s'éloignent radialement de la trajectoire du pieu. A l'inverse, dans la région III, les grains  
 245 se rapprochent radialement du pieu. Ce comportement différent, mis en évidence par le champ  
 246 de vecteurs déplacement de la Figure 5c, indique une réorganisation des grains. Ces résultats  
 247 sont accord avec ceux obtenus par corrélation d'images continue par White & Bolton (2004),  
 248 Arshad *et al.*, (2014) et Silva & Combe (2014). La zone où la pointe n'est en contact avec aucun  
 249 grain correspond à la zone où le broyage des grains se produit. Les grains qui n'ont pas pu être  
 250 suivis avec la corrélation d'images ont certainement été broyés pendant l'étape de chargement  
 251 (l'usure et le broyage modifient la forme des grains conduisant à une faible corrélation).



252

253 **Figure 5 Déplacements individuels des grains obtenus par corrélation d'images numériques discrète, tracé dans un**  
 254 **plan vertical passant par l'axe du pieu, pour un déplacement incrémental de la pointe de 1 mm : (a) déplacements**  
 255 **verticaux, (b) déplacements horizontaux et (c) vecteurs de déplacement pour la même étape de chargement - Typical**  
 256 **individual grain displacements from discrete Digital Image Correlation (DIC), plotted in a vertical plane passing through**  
 257 **the pile axis, for an incremental pile displacement of 1 mm: (a) vertical displacements; (b) horizontal displacements; (c)**  
 258 **individual displacement vectors for the same loading increment**

259 Pour l'étude des cycles, deux paires d'images 3D sont analysées, une de 10 à 50 cycles et une de  
 260 500 à 1000 cycles. On note que ces deux étapes de chargement sont respectivement incluses dans  
 261 les phases I et II de l'évolution de la résistance de frottement décrite à la section 'Réponse  
 262 macroscopique de l'interface'. Les vecteurs de déplacement de chaque grain sont tracés sur la  
 263 Figure 6. Devant la pointe, les vecteurs sont presque verticaux et de faible amplitude alors  
 264 qu'autour du fût les vecteurs ont une composante radiale beaucoup plus élevée (environ 20 fois  
 265 supérieure). Globalement, les grains se déplacent radialement vers le pieu. Les 50 premiers cycles  
 266 (phase I), provoquent d'importants déplacements des grains dans une zone relativement  
 267 étendue (supérieure à un diamètre de pieu) alors qu'après 500 cycles (phase II) le mouvement  
 268 des grains semble fortement contraint (amplitude de déplacement environ divisée par 3). Le fait  
 269 que les grains se déplacent vers le bas pendant la phase I peut être associé à la diminution des  
 270 contraintes orthoradiales et à l'effet voûte qui se sont développés pendant le fonçage du pieu.  
 271 Cet effet n'apparaît plus lors de la phase II.

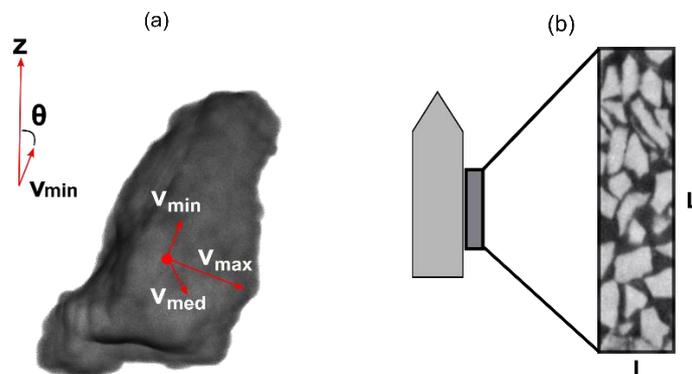


272

273 **Figure 6 Vecteurs de déplacement des grains obtenus par corrélation d'images numériques discrète (a) entre les**  
 274 **cycles 10 et 50 et (b) entre les cycles 500 et 1000. L'échelle utilisée est différente pour les deux graphiques (d'après**  
 275 **Doreau-Malioche et al., 2018) – Individual displacement vectors obtained by discrete DIC (a) between Cycle 10 and Cycle**  
 276 **50 and (b) between Cycle 500 and Cycle 1000. Note that the scale is not the same for a and b (after Doreau-Malioche et**  
 277 **al., 2018)**

278 **Orientation des grains**

279 Les images binaires sont également utilisées pour déterminer le centre de masse et le tenseur  
 280 d'inertie de chaque grain suivant la méthode décrite par Wiebicke et al. (2015). Le vecteur propre  
 281 mineur du tenseur d'inertie, associée à la valeur propre la plus faible, pointe dans la direction de  
 282 la plus grande dimension du grain depuis le centre de masse (cela représente l'axe autour duquel  
 283 la rotation du grain nécessite le moins d'énergie). Etant donné la forme allongée des grains, le  
 284 vecteur propre mineur ( $\mathbf{v}_{\min}$ ) est sélectionné comme indicateur représentatif de l'orientation des  
 285 grains après le fonçage du pieu. Ainsi, l'orientation d'un grain  $\theta$  est définie par l'angle entre  $\mathbf{v}_{\min}$   
 286 et l'axe vertical qui correspond également à l'axe du pieu noté  $\mathbf{z}$  (Fig. Figure 7).



287

288 **Figure 7 Schéma illustrant (a) l'orientation d'un grain Glageon extrait du volume 3D reconstruit et (b) la section**  
 289 **définissant le sous domaine sur lequel la distribution des orientations est déterminée – Schematic of (a) the orientation**

290 of a Glageon grain extracted from the 3D reconstructed volume and (b) of the cross-section defining the subdomain over  
291 which the orientations are studied

292 La symétrie autour de  $z$  permet de représenter la distribution des orientations par la fonction de  
293 densité de probabilité de  $\cos(\theta)=x$ , notée  $p(x)$ , avec  $0 \leq \theta \leq \pi$  (voir Eq. 1). Par construction,  $p$  est  
294 une fonction paire, constante pour un système isotrope. Une telle fonction peut être développée  
295 en une série de polynômes de Legendre, avec uniquement des termes d'ordre pair, tronquée au  
296 4<sup>ème</sup> ordre

$$297 \quad p(x) = 1 + A(3x^2 - 1) + B(35x^3 - 30x^2 + 3)$$

298 **Équation 1**

299 pour laquelle les coefficients  $A$  et  $B$  sont fonction des moments de la distribution

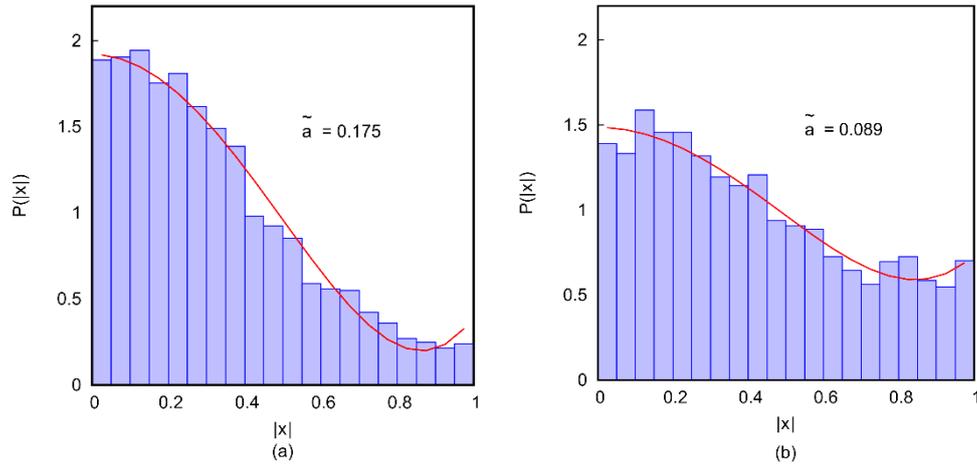
$$300 \quad A = \frac{15}{4} \left( \langle x^2 \rangle - \frac{1}{3} \right)$$

301

$$302 \quad B = \frac{9}{64} (35\langle x^4 \rangle - 30\langle x^2 \rangle + 3)$$

303 Le coefficient 'A' peut être utilisé pour décrire l'anisotropie de la distribution puisqu'il est  
304 proportionnel à la différence entre le moment du second ordre et sa valeur isotrope (on note  
305  $\tilde{a} = \langle x^2 \rangle - \frac{1}{3}$ ). Cette méthode a été employée dans plusieurs études numériques pour analyser  
306 l'anisotropie des contacts entre grains dans un assemblage d'éléments discrets (*e.g.*, Emam et  
307 al., 2006 ; Khalili et al., 2017). La Figure 8 montre la distribution normalisée de l'orientation des  
308 grains dans un sous domaine obtenu par révolution de la section rectangulaire illustrée en Figure  
309 7 avant et après l'installation du pieu (avec  $l=5D_{50}$ ,  $L=9D_{50}$  à une distance de l'axe du pieu  
310  $r=2.15r_p$ ). Les résultats montrent que le développement en série de Legendre tronquée au 4<sup>ème</sup>  
311 ordre de  $|x|$  est ajusté à la distribution ( $P(|x|)=2p(x)$ ).

312 Initialement, l'échantillon est plutôt anisotrope avec  $\tilde{a}=0.088$ . Les grains sont majoritairement  
313 orientés horizontalement ( $\cos(\theta)$  proche de 0), ce qui peut s'expliquer par la procédure de  
314 préparation de l'échantillon. Après le fonçage du pieu, le nombre de grains avec  $\cos \theta$  proche de  
315 0 diminue alors que le nombre de grains avec  $\cos(\theta)$  proche de 1 (orientation verticale)  
316 augmente,  $\tilde{a}=0.045$ .



317

318

319

320

**Figure 8 Distribution normalisée des orientations et la représentation associée en série de polynômes de Legendre tronquée au 4<sup>ème</sup> ordre (a) avant et (b) après fonçage du pieu – Distribution of grains orientations and its representation using Legendre polynomials expansion truncated at the 4th order (a) prior to and (b) after pile installation**

321

322

323

324

325

326

327

328

La valeur de  $\tilde{a}$  est mesurée globalement, sur l'ensemble de l'échantillon, avant l'installation du pieu et sert de valeur de référence initiale pour suivre l'évolution du niveau d'anisotropie :  $\tilde{a}_{\text{initial}}=0.190$ . Ensuite, le niveau d'anisotropie est mesuré dans des sous domaines définis par  $l=1D_{50}$ ,  $L=21D_{50}$  et  $r$  (distance à l'axe du pieu) compris entre 1 et  $3.5 r_p$  (Fig.Figure 7). Le rapport entre  $\tilde{a}$  et  $\tilde{a}_{\text{initial}}$  est représenté en fonction de la distance à l'axe du pieu sur la Figure 9. Les résultats montrent que le rapport entre  $\tilde{a}$  et  $\tilde{a}_{\text{initial}}$  le plus élevé est atteint à  $2.5 r_p$  de l'axe du pieu ( $\tilde{a}/\tilde{a}_{\text{initial}} = 35\%$ ). Proche du pieu, le rapport est plus élevé et atteint 60%. A une distance supérieure à  $2.5 r_p$ , le rapport augmente continuellement jusqu'à atteindre presque 100% à  $3.5 r_p$ .

329

330

331

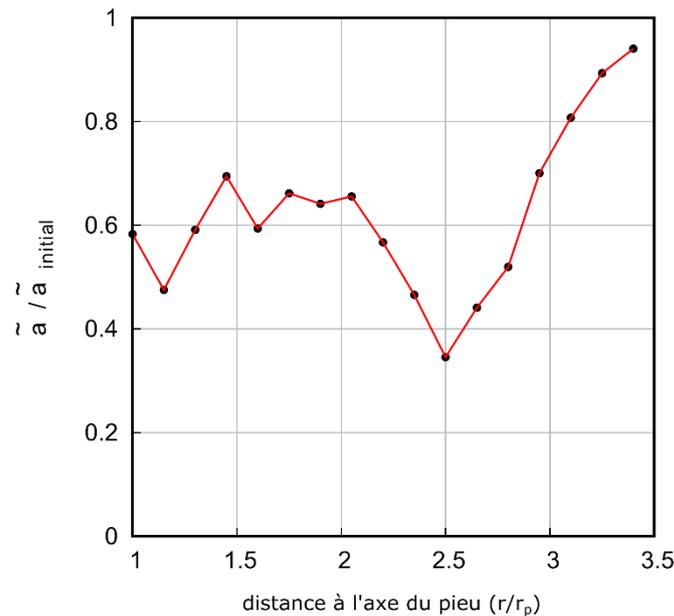
332

333

334

335

Ces résultats sont en accord avec la cinématique des grains précédemment décrite. Les déplacements qui se produisent au niveau de la pointe entraînent un réarrangement et une réorientation des grains. A mesure que le pieu avance, les grains situés devant la pointe sont déplacés en dehors de la trajectoire du pieu, radialement vers les bords de l'échantillon. Les grains les plus proches de la pointe s'alignent sur la surface du cône. Dès que le fût arrive à leur hauteur, les grains se déplacent dans la direction opposée (vers le pieu) et se réorientent en s'alignant verticalement le long du pieu.



336

337 **Figure 9 Evolution radiale du rapport  $\tilde{a}/\tilde{a}_{initial}$  montrant l'évolution de l'anisotropie avant et après fonçage du pieu**  
 338 **( $\tilde{a}_{initial}$  a été mesuré sur l'ensemble des grains à l'état initial et sa valeur est 0.190) – Radial evolution of the ratio  $\tilde{a}/\tilde{a}_{initial}$**   
 339 **showing the change in anisotropy prior to and after pile installation ( $\tilde{a}_{initial}$  was obtained over all grains at the initial state**  
 340 **and its value is 0.190)**

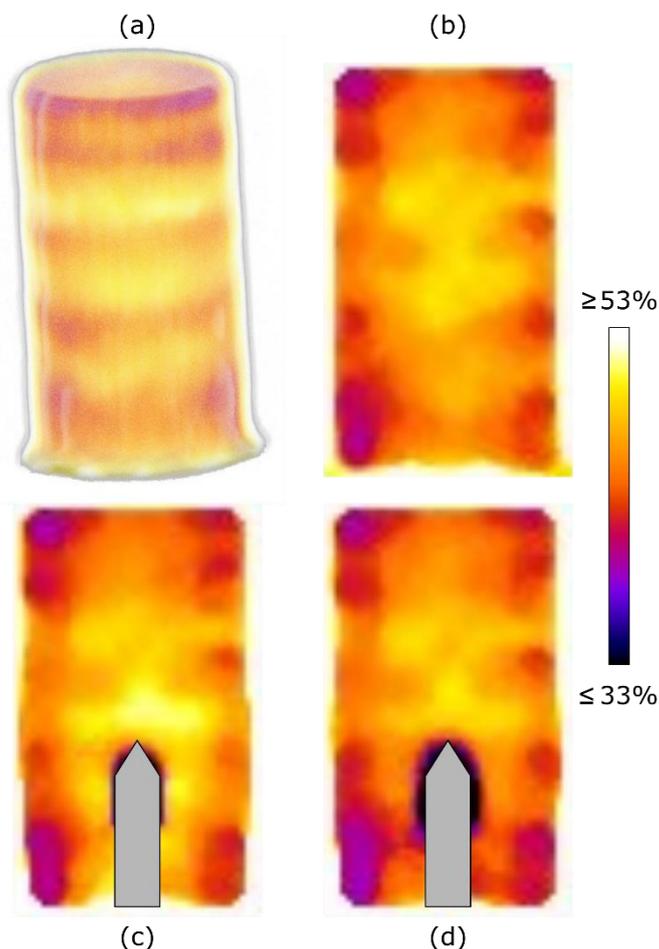
### 341 Déformations volumiques

342 La Figure 10a montre le champ de porosité 3D à l'état initial, c'est-à-dire avant le fonçage du pieu.  
 343 Différentes couches de porosité plus faible, environ 40% sont identifiées. Ces couches sont  
 344 associées à la méthode de dépôt du sable lors de la préparation de l'échantillon (couche par  
 345 couche avec une légère compaction). Des coupes verticales prises dans l'axe de l'échantillon à  
 346 différents stades de l'essai montrent des valeurs plus faibles de porosité au bord de l'échantillon.  
 347 Le durcissement du faisceau de rayons X (beam hardening) produit des voxels plus clairs sur les  
 348 bords de l'objet scanné (niveau de gris proche de celui des grains) et donc une porosité plus  
 349 faible. Cette différence de porosité sur les bords de l'échantillon peut également être due à une  
 350 interaction entre les grains et la membrane. La forme allongée des grains peut induire un  
 351 alignement préférentiel des grains le long de la membrane lors de la préparation de l'échantillon.

352 La Figure 10b montre que l'échantillon est initialement relativement uniforme avec une porosité  
 353 comprise entre 44 et 49%, ce qui est cohérent avec la porosité globale de 45% mesurée  
 354 macroscopiquement pendant la préparation de l'échantillon. Après le fonçage du pieu (Fig. 10c),  
 355 une zone autour de la pointe du pieu présente une porosité plus élevée d'environ 50%, indiquant  
 356 une dilatation du sable comme observée par Chong (1988) et Silva & Combe (2014). Une fine  
 357 couche de faible porosité d'une épaisseur équivalente à  $2D_{50}$  (porosité inférieure à 33%) se forme  
 358 à l'interface. Cette couche est associée à la présence de fines produites par broyage des grains  
 359 pendant le fonçage et à une densification locale du sable pendant les cycles. Après 500 cycles,  
 360 cette couche devient plus large (environ  $4 D_{50}$ ) et s'étend le long du fût (Fig. 10d). Une analyse  
 361 plus détaillée de ce phénomène de densification est présentée dans Doreau-Malioche et al.,  
 362 (2018).

363 En comparant les déformations volumiques à l'orientation des grains, on note que dans les zones  
 364 où le sable se contracte, les grains ont une orientation préférentielle. Dans les zones où le sable  
 365 se dilate, les grains subissent des déplacements plus élevés et leur orientation est relativement

366 aléatoire. Des résultats similaires ont été obtenus par Paniagua et al. (2018) pour des essais de  
 367 pénétration de cône (CPT) dans un sol argileux. Les Auteurs ont montré que les zones de  
 368 compression et de dilatation étaient corrélées avec deux types de fabriques (induites par la forme  
 369 plate et allongée des grains) : une « fabrique ouverte » où les grains ont une orientation aléatoire,  
 370 créant ainsi de larges pores connectés entre eux et une « fabrique fermée » où les grains  
 371 s'alignent selon une orientation bien définie formant une structure plus compacte.



372  
 373 **Figure 10 (a) Champ de porosité 3D à l'état initial. Coupes verticales du champ 3D (b) avant (c) après fonçage du pieu**  
 374 **et (d) après 500 cycle – (a) 3D field of porosity prior to testing. Vertical slices taken through the 3D field of porosity (b)**  
 375 **prior to testing, (c) after pile installation and (d) after 500 cycles**

## 376 ***Conclusions et perspectives***

377 La tomographie à rayons X et l'analyse d'images 3D ont été utilisées pour explorer le  
 378 comportement de l'interface sable-pieu sous chargement axial monotone et cyclique, à l'échelle  
 379 granulaire, au sein d'une mini-chambre de calibration. La corrélation d'images numériques  
 380 discrète 3D permet d'identifier et de caractériser quantitativement différentes zones où se  
 381 concentrent les déplacements des grains pendant le fonçage du pieu. Au cours des cycles, deux  
 382 cinématiques granulaires différentes sont observées et correspondent aux deux phases  
 383 identifiées dans l'évolution de la résistance de frottement. Les mesures de porosité révèlent une  
 384 dilatation significative autour du pieu pendant la phase de fonçage, suivie d'une densification  
 385 continue à l'interface pendant les cycles. Ces mesures sont cohérentes avec la réorientation des  
 386 grains observée au voisinage du pieu. Cette analyse préliminaire de l'évolution de la fabrique au

387 cours du fonçage du pieu pourrait être complétée par une étude de l'orientation des grains au  
388 sein d'un cycle de charge.

389 Il semblerait que deux mécanismes coexistent pendant les cycles : une réduction des contraintes  
390 orthoradiales, c'est-à-dire une réduction de l'effet voûte créé par le fonçage du pieu, et une  
391 densification locale à l'interface. Dans la phase de radoucissement de la résistance de frottement,  
392 le mécanisme dominant serait la réduction des contraintes orthoradiales, menant à une  
393 réduction des contraintes radiales et donc de la résistance de frottement. Dans la seconde phase,  
394 la densification à l'interface devient le mécanisme dominant, entraînant une augmentation des  
395 contraintes radiales et de la résistance de frottement.

396 Bien que cette étude expérimentale ne soit pas représentative des conditions appliquées sur  
397 pieux réels, la réponse macroscopique mesurée est cohérente avec celle obtenue dans des essais  
398 conduits dans des chambres de calibration grande échelle. Ces résultats indiquent que les effets  
399 d'échelles n'affectent pas les principaux mécanismes de déformation qui se produisent à l'échelle  
400 granulaire et qui contrôlent la réponse macroscopique de l'interface. La méthode expérimentale  
401 décrite offre de nouvelles possibilités en termes d'analyse quantitative pouvant servir à la  
402 validation de modèles numériques construits à l'échelle des grains.

## 403 **Remerciements**

404 Les auteurs remercient Jean-Benoît Toni, Pascal Charrier et Edward Andò pour leur  
405 contribution. Les auteurs remercient également les deux relecteurs pour leurs remarques  
406 intéressantes et constructives. Le Laboratoire 3SR fait partie du LabEx Tec 21 (Investissements  
407 d'Avenir – ANR-11-LABX-0030).

## 408 **Références**

409 Arshad M I, Tehrani F S, Prezzi M, Salgado R, 2014. Experimental study of cone penetration in  
410 silica sand using digital image correlation. *Géotechnique* 64, No. 7, pp. 551–569

411 Bekki H, Tali B, Canou J, Dupla J C, Bouafia A, 2016. Influence of the cyclic loading of very large  
412 number of cycles on the pile capacity. *J. Appl. Eng. Sci. Technol.* 2, No. 2, pp. 51–55

413 Been K, Crooks J, Becker D, Jefferies M, 1986. The cone penetration state parameter test in sands:  
414 part I, interpretation. *Géotechnique* 36, No. 2, pp. 239–249

415 Boulon M, Foray P, 1986. Physical and numerical simulation of lateral shaft friction along  
416 offshore piles in sand. In *Proceedings of the 3rd international conference on numerical methods*  
417 *in offshore piling*, pp. 127–147. Paris, France: Technip

418 Butlanska J, Arroyo M, Gens A, OSullivan C, 2014. Multi-scale analysis of cone penetration test  
419 (CPT) in a virtual calibration chamber. *Can. Geotech. J.* 51, No. 1, 5166

420 Chong M, 1988. Density changes of sand on cone penetration resistance. In *Proceedings of the*  
421 *first international symposium on penetration testing ISOPT-1*. Orlando, pp. 707–714.

422 Ciantia M O, O'Sullivan C, Jardine R J, 2019. Pile penetration in crushable soils: Insights from  
423 micromechanical modelling. In *Proceedings of the XVII ECSMGE-2019: Geotechnical*

- 424 Engineering foundation of the future International Society for Soil Mechanics and Geotechnical  
425 Engineering. <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-1111>
- 426 Doreau-Malioche J, Combe G, Viggiani C, Toni J B, 2018. Shaft friction changes for cyclically  
427 loaded displacement piles: an X-ray investigation. *Géotech. Lett.* 8, No. 1, pp. 66–72,  
428 <https://doi.org/10.1680/jgele.17.00141>
- 429 Emam S, Canou J, Corfdir A, Dupla J C, Roux J, 2006. “Elaboration et comportement mécanique  
430 de matériaux granulaires solides modèles: expériences et simulations numériques.” In: *Rhéologie  
431 des pâtes et des matériaux granulaires*, volume SI12 of *Etudes et Recherches des Laboratoires des  
432 Ponts et Chaussées*. Ed. by B. Cazacliu and J. R. (Eds.) Paris: Presses du Laboratoire Central des  
433 Ponts et Chaussées
- 434 Fioravante V, 2002. On the shaft friction modelling of nondisplacement piles in sand. *Soils  
435 Found.* 42, No. 2, pp. 23–33
- 436 Foray P, 1991. Scale and boundary effects on calibration chamber pile tests. In *Proceedings of the  
437 1st international symposium on calibration chamber testing*, Potsdam, NY, USA (ed. A. B.  
438 Huang), pp. 147–160. New York, NY, USA: Elsevier
- 439 Hebeler G L, Martinez A, Frost J D, 2015. Shear zone evolution of granular soils in contact with  
440 conventional and textured CPT friction sleeves. *KSCE J. Civil Engng* 20, No. 4, pp. 1267–1282
- 441 Jiang M J, Yu H S, Harris D, 2006. Discrete element modelling of deep penetration in granular  
442 soils. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 30, No. 4, pp. 335–361
- 443 Khalili M, Roux J, Pereira J, Brisard S, Bornert M, 2017. “Numerical study of one-dimensional  
444 compression of granular materials. I. Stress-strain behavior, microstructure, and irreversibility”.  
445 In: *Phys. Rev. E* 95 (3), p. 032907
- 446 Lee J, Prezzi M, Salgado R, 2011. Experimental investigation of the combined load response of  
447 model piles driven in sand. *Geotech. Test. J.* 34, No. 6, pp. 653–667
- 448 Lobo-Guerrero S, Vallejo L E, 2007. Influence of pile shape and pile interaction on the crushable  
449 behavior of granular materials around driven piles: DEM analyses. *Granular Matter* 9, No. 3–4,  
450 pp. 241–250
- 451 Parkin, A. & Lunne, T. (1982). Boundary effects in the laboratory calibration of a cone  
452 penetrometer in sand. In *Proceedings of the 2nd European symposium on penetration testing*,  
453 Amsterdam, the Netherlands, vol. 2, pp. 761–768. Rotterdam, the Netherlands: CRC Press  
454
- 455 Paniagua P, Fonseca J, Gylland A, Nordal S, 2018. “Investigation of the change in soil fabric during  
456 cone penetration in silt using 2D measurements”. In: *Acta Geotechnica* 13.1, pp. 135–148  
457
- 458 Peterson R W, 1988. Laboratory investigation of the penetration resistance of fine cohesionless  
459 materials. In *Proceedings of the 1st international symposium on penetration testing*, Orlando,  
460 FL, USA, pp. 875–880. Rotterdam, the Netherlands: Balkema  
461
- 462 Salgado R, Mitchel J K, Jamiolkowski M, 1998. Calibration chamber size effects on penetration  
463 resistance in sand. *J. Geotech. Geoenviron. Engng* 124, No. 9, pp. 878–888  
464
- 465 Schnaid F, Houlsby G, 1991. An assessment of chamber size effects in the calibration of in situ  
466 tests in sand. *Géotechnique* 41, No. 3, pp. 437–445

467  
468 Silva M, 2014. Experimental study of ageing and axial cyclic loading effect on shaft friction along  
469 driven piles in sand. PhD thesis, Université de Grenoble, Grenoble, France  
470  
471 Silva M, Combe G, 2014. Sand displacement field analysis during pile installation using X-ray  
472 tomography and digital image correlation. In Proceedings of the international symposium on  
473 geomechanics from micro to macro, Cambridge, UK, vol. 1, pp. 1599–1603. Leiden, the  
474 Netherlands: CRC Press  
475  
476 Silva M, Combe G, Foray P Y, Flin F, Lesaffre B, 2013. Postmortem analysis of sand grain crushing  
477 from pile interface using X-ray tomography. In Proceedings of the powders and grains 2013, vol.  
478 1542, p. 297. Sydney, Australia: UNSW  
479  
480 Tehrani F S, Han F, Salgado R, Prezzi M, Tovar R D, Castro A G, 2016. Effect of surface roughness  
481 on the shaft resistance of non-displacement piles embedded in sand. *Géotechnique* 66, No. 5,  
482 pp. 386–400  
483  
484 Tsuha C H C, Foray P Y, Jardine R J, Yang Z X, Silva M, Rimoy S, 2012. Behaviour of displacement  
485 piles in sand under cyclic axial loading. *Soils Found.* 52, No. 3, pp. 393–410  
486  
487 Tudisco E, Andò E, Cailletaud R, Hall S A, 2017. A local digital volume correlation code.  
488 *SoftwareXC* 6, pp. 267–270  
489  
490 White D J, Bolton M D, 2002. Observing friction fatigue on a jacked pile. In *Constitutive and*  
491 *Centrifuge Modeling: Two Extremes* (ed. S. M. Springman), pp. 347–354. Rotterdam, the  
492 Netherlands: Balkema  
493  
494 White D J, Bolton M D, 2004. Displacement and strain paths during plane-strain model pile  
495 installation in sand. *Géotechnique* 54, No. 6, pp. 375–397  
496  
497 Wiebicke M, Andò E, Viggiani G, Herle I, 2015. Towards the measurement of fabric in granular  
498 materials with x-ray tomography. In *Proceedings of the 6th International Symposium on*  
499 *Deformation Characteristics of Geomaterials*. Buenos Aires, Argentine.  
500  
501 Yang Z X, Jardine R, Zhu B, Foray P, Tsuha C, 2010. Sand grain crushing and interface shearing  
502 during displacement pile installation in sand. *Géotechnique* 60, No. 6, pp. 469–482