

QUELLES REGLES DE SIMILITUDE POUR LE FROTTEMENT DANS LES MODELES REDUITS CENTRIFUGES DE SOL RENFORCE ?

FINDING SCALING LAWS FOR THE FRICTION IN CENTRIFUGE MODELING OF SOIL NAILING ?

Jean de Sauvage¹, Thierry Dubreucq¹

¹*Geotechnical Engineering, Environment, Natural Hazards and Earth Sciences Department, IFSTTAR, Université Gustave Eiffel, France*

RÉSUMÉ – L'étude d'ouvrages géotechniques à l'aide de modèles réduits centrifugés nécessite le respect de certaines règles de similitude. Concernant le frottement entre le sol et un renforcement, ces dernières ne sont pas établies définitivement. Afin de poursuivre les travaux antérieurs, de nouveaux essais d'arrachement d'inclusions modèles ont été réalisés et comparés à des simulations en éléments discrets.

ABSTRACT – The use of centrifuge physical modeling for the study of geotechnical structures implies the respect of some scaling laws. Concerning the friction between the soil and a reinforcement, these scaling laws are not established yet. Following former works on this subject, new mini pull-out tests have been carried out and compared to discrete element simulations.

1. Introduction

Le recours à des modèles réduits centrifugés est fréquent pour étudier des ouvrages géotechniques (Dubreucq, 1999 ; de Sauvage, 2018). Il permet d'une part d'observer leur comportement jusqu'à la rupture et d'autre part de mener des études paramétriques à coût réduit. Afin que les modèles réduits fournissent des informations pertinentes quant aux ouvrages prototypes correspondant, certaines règles de similitude doivent être respectées.

Le comportement des ouvrages en sol renforcé dépend fortement du frottement mobilisé à l'interface entre le sol et l'inclusion (armature, clou, ...). Si les résultats concernant la résistance au cisaillement de ces interfaces sont assez bien établis, les règles de similitude concernant le déplacement U_p mobilisant cette résistance ne sont pas encore bien connues (Garnier et al, 2007). A l'heure actuelle, la validation des modèles réduits centrifugés de sol renforcé nécessite de réaliser des essais d'arrachement ad hoc (de Sauvage, 2018). De tels essais ont été également réalisés par Milligan et Tei (1998) et tendent à conclure que U_p ne dépend pas du diamètre du clou mais de la rugosité.

Afin de déterminer l'influence sur les lois de frottement sol-inclusion de la taille des grains, de leur distribution granulométrique et de la rugosité de l'inclusion, des essais d'arrachement d'inclusions modèles ont été réalisés sous différentes contraintes de confinement à l'aide d'une boîte de cisaillement simple adaptée pour l'occasion. Ces essais ont été menés avec du sable d'Hostun HN38 et des inclusions de diamètres et de rugosités variables.

Cette étude expérimentale a été complétée par des simulations numériques en éléments discrets effectuées à l'aide de l'environnement Yade-DEM. Ces dernières

permettent d'une part d'étudier la mobilisation locale de la résistance au cisaillement le long de l'inclusion et d'autre part de comprendre les mécanismes micromécaniques à l'œuvre.

Les travaux présentés ici visent à mettre en place un cadre d'étude des lois de similitude régissant le frottement sol-inclusion.

2. Essais d'arrachement de petites tiges dans du sable

2.1. Boîte de cisaillement modifiée

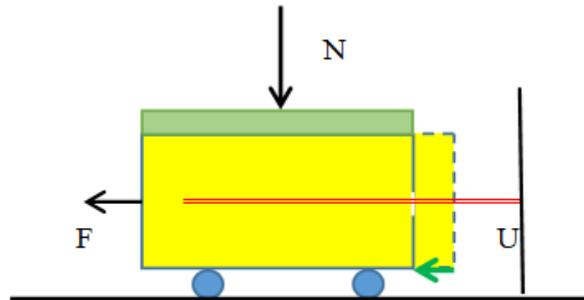


Figure 1 : Schéma de la boîte de cisaillement modifiée (U désigne le capteur de déplacement et F le capteur de force mesurant la force d'arrachement)

On a modifié une boîte de cisaillement de type Casagrande en perçant un trou latéral pour permettre l'introduction d'une tige d'épreuve. La tête de la tige est serrée dans un mandrin solidaire d'un capteur de force lui-même fixé au bâti. Les dimensions intérieures de la boîte sont : largeur = 139 mm ; longueur = 145 mm et hauteur = 48,5 mm. Ce volume est rempli de sable que l'on soumet à un effort vertical N à l'aide d'un piston de surface $S = 175 \text{ cm}^2$. Au moyen d'une vis sans fin et d'un moteur électrique, la boîte est tirée latéralement en roulant sur le bâti sans frottement, arrachant de fait la tige du massif de sable sous l'effort F . Un capteur de déplacement mesure la sortie U de la tête de la tige. Un autre capteur mesure le mouvement vertical du piston.

2.2. Sable d'essai

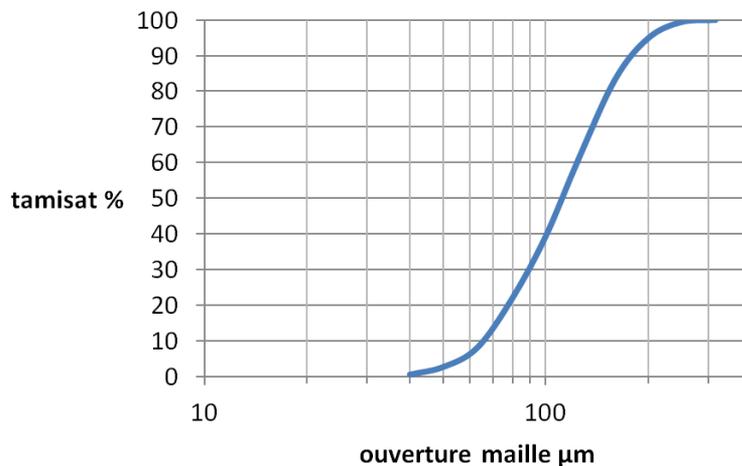


Figure 2 : Courbe granulométrique du sable d'Hostun HN38.

Le matériau de confinement autour de la tige est le sable fin d'Hostun HN38 dont les principales caractéristiques sont rappelées dans le tableau 2. Sa courbe granulométrique est représentée sur la figure 2.

Tableau 1. Caractéristiques du sable d'Hostun HN38

Poids volumique spécifique : γ_s (kN/m ³)	26,4
Poids volumique sec maximal : γ_d (kN/m ³)	15,24
Poids volumique sec minimal : γ_d (kN/m ³)	11,63
Diamètre moyen : D_{50}	109
Coefficient d'uniformité : C_u	1,97

2.3. Tiges d'épreuve

La tige qui traverse la boîte de cisaillement a une longueur de frottement : $L = 144$ mm. Trois rugosités de surface (R_n) de tiges ont été testées : la tige lisse (R_n quasi nul), la tige enduite pour simuler le bulbe de scellement et la tige filetée (R_n fort). Pour la tige enduite, on a utilisé une baguette de soudure à l'arc, composée d'une tige en acier recouverte d'un enduit frottant. Ce bulbe industriel est un cylindre parfait difficile à obtenir avec un collage de grains de sable ou avec du ciment. L'épaisseur de l'enduit est de l'ordre de 0,8 mm et il n'a pas été arraché après les essais. La rugosité normalisée R_n d'une tige est égale au rapport R_{max}/D_{50} (Ici $D_{50} = 109 \mu\text{m}$) où R_{max} est la hauteur maximale dans un profil, mesurée entre la crête la plus haute et le creux le plus bas (NF EN ISO 4287). Trois diamètres extérieurs de tiges lisses et filetées ont été retenus (tableau 2).

Tableau 2. Diamètres des tiges et mesures de rugosité sur les tiges d'essais

Tiges	lisses			avec « bulbe »		filetées		
Diamètre \varnothing (mm)	1,98	3,01	3,97	3,42	4,05	1,89	2,86	3,83
Désignation	2 mm	3 mm	4 mm	3,5 mm	4 mm	2 mm	3 mm	4 mm
R_{max} (μm)	11,5			47,4		262	327	461
R_{sm} (μm)	111			404		400	500	700
R_n	0,11	0,11	0,11	0,43	0,43	2,40	3,00	4,23

La largeur moyenne de la rugosité dans le profil, notée R_{sm} selon la norme, a aussi été mesurée et reportée. Pour les tiges filetées, R_{sm} correspond au pas de vis. Les plus petits grains de sable, de l'ordre de 40 μm , parviendront tout juste à s'immiscer dans le profil de rugosité des tiges avec « bulbe ». Par simplicité d'écriture sur les graphes à suivre, les tiges seront appelées tiges de « 2 mm », « 3 mm », « 3,5 mm » ou « 4 mm ».

2.4. Modalités d'essais

Un même opérateur a réalisé les essais dont les modalités sont exposées ci-après. Pour une masse initiale de 1447 grammes, le sable est compacté dynamiquement dans le volume de la boîte de cisaillement à l'aide d'un maillet en caoutchouc jusqu'à atteindre le poids volumique de 1480 kg/m³, valeur constante pour tous les essais. Ce poids correspond à un indice de densité de 80%.

Trois contraintes verticales N/S ont été appliquées via le piston dans les séries d'essais présentées, à savoir : 51 kPa, 101 kPa et 153 kPa. Ces contraintes sont de

l'ordre de celles rencontrées dans un massif cloué en vraie grandeur et donc dans un modèle réduit centrifugé. La vitesse de déplacement imposée à la boîte est de 1 millimètre par minute pour tous les essais. Un bouchon de graisse bloque par ailleurs l'écoulement du sable par l'orifice latéral de la boîte précitée.

3. Résultats des essais et analyse

Le frottement latéral moyen est calculé en considérant la force de traction mesurée rapportée à la surface du cylindre extérieur qui épouse la tige : $F/(\pi\phi L)$. Le frottement latéral au pic est appelé le frottement latéral unitaire. Il est noté q_s . Le déplacement (U_p) correspondant sera appelé déplacement unitaire.

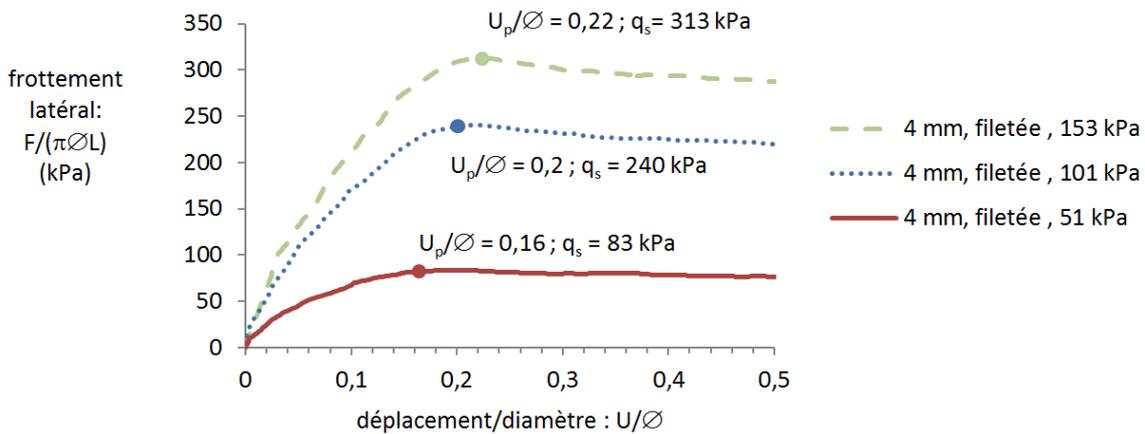


Figure 3 : Frottement latéral moyen le long de la tige filetée de 4 mm de diamètre en fonction du déplacement de la boîte rapporté au diamètre de la tige.

Sur la figure 3, on fournit un exemple typique de résultats d'essais d'arrachement pour la tige filetée de 4 mm de diamètre sous les trois contraintes verticales 51, 101 et 153 kPa. On a calculé le frottement latéral unitaire q_s et le déplacement réduit associé U_p/ϕ aux pics de frottement, peu marqués par ailleurs.

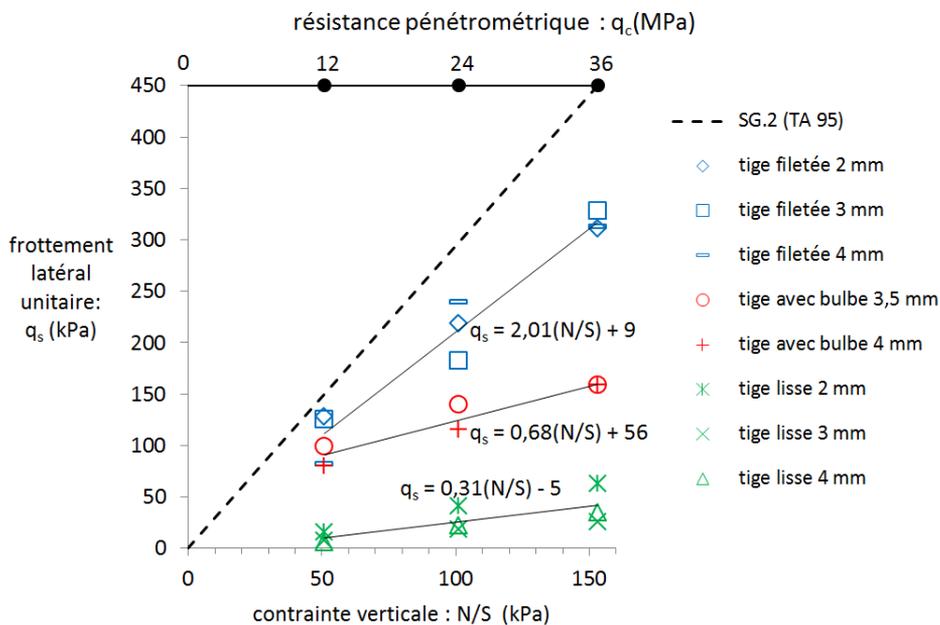


Figure 4 : Frottement latéral unitaire q_s en fonction de la contrainte verticale $\sigma_v = N/S$ et de la résistance au pénétromètre estimée q_c

Schiavon (2016) a procédé à des essais pénétrométriques en centrifugeuse dans un massif de sable HN38 à un indice de densité proche de 99 %. A partir de ces essais, la résistance en pointe q_c pénétrométrique a été estimée selon la contrainte verticale σ_v selon la relation : $q_c \text{ (MPa)} = 0,23 \cdot \sigma_v \text{ (kPa)}$ pour un indice de densité de 80%. Pour les trois contraintes, il vient ainsi : $q_c(51 \text{ kPa}) = 12 \text{ MPa}$; $q_c(101 \text{ kPa}) = 24 \text{ MPa}$ et $q_c(153 \text{ kPa}) = 36 \text{ MPa}$. Sur la même figure, on a reporté la courbe de référence SG2 relative à l'injection gravitaire unitaire tirée du guide sur les tirants d'ancrage TA2020 (CFMS, 2020), à savoir : $q_s \text{ (kPa)} = 12,5 q_c \text{ (MPa)}$. Cette courbe de référence est a priori la plus représentative du mode de mise en œuvre des tiges dans la boîte de cisaillement. On constate que les q_s issus des boîtes s'approchent d'autant mieux par valeur inférieure des q_s du TA2020 que la rugosité des tiges est forte.

Par ailleurs, le diamètre des tiges rugueuses a une influence relativement faible sur la valeur de q_s . A l'inverse, pour les tiges lisses, q_s est presque doublé lorsque le diamètre diminue de 4 mm à 2 mm, sous la contrainte maximale de 153 kPa. Enfin, sous chacune des contraintes verticales, la résistance au cisaillement est divisée par dix environ pour les tiges lisses par rapport aux tiges rugueuses.

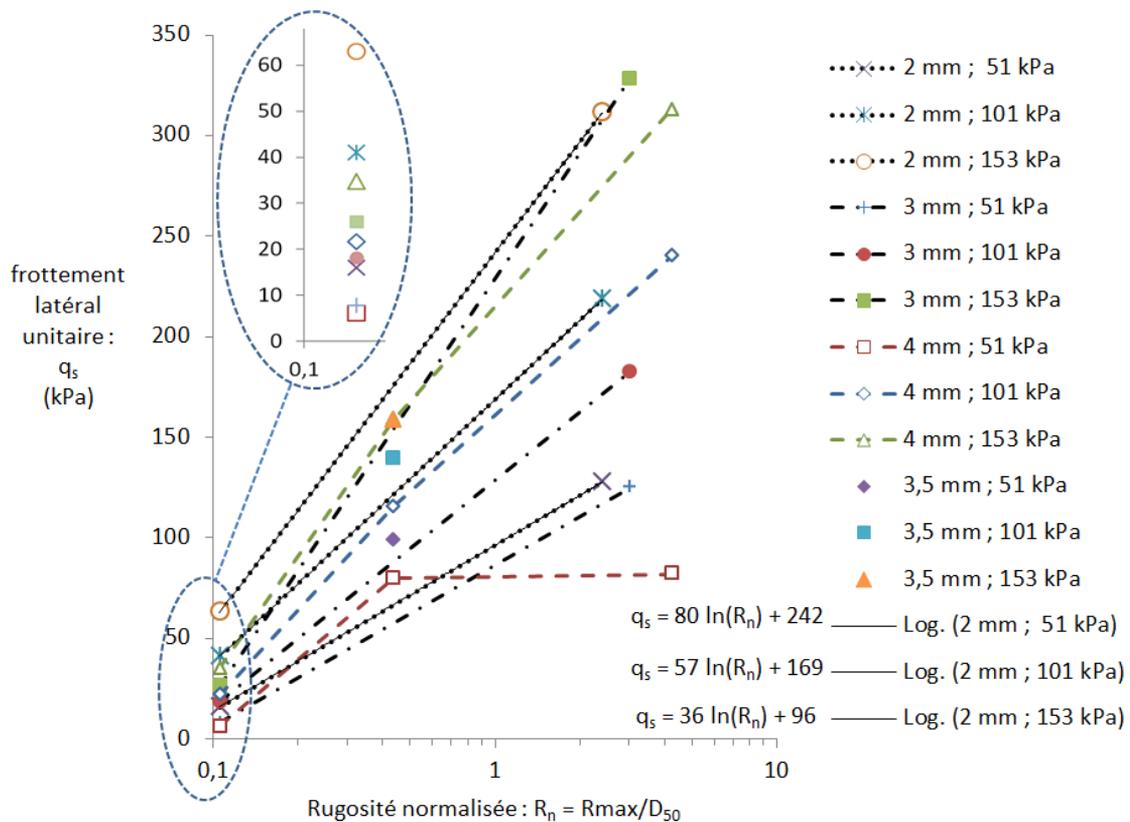


Figure 5 : Frottement latéral unitaire en fonction de la rugosité normalisée

On trace sur la figure 5 le frottement latéral unitaire en fonction de la rugosité normalisée pour l'ensemble des essais réalisés. On remarque que le paramètre le plus significatif est la rugosité puisque q_s augmente linéairement avec le logarithme de la rugosité normalisée. De plus, la pente de cette droite est proportionnelle à la contrainte verticale appliquée. Pour les tiges de 2 mm, cette pente est ainsi égale à $2,3\sigma_v - 32$ avec un coefficient de régression R^2 de 0,99.

Sur la figure 6, on reporte le déplacement unitaire réduit (u_p) en tête de la tige, rapporté à son diamètre, en fonction de la contrainte verticale, mesuré au pic de frottement, en lien avec le frottement latéral unitaire q_s . Ce déplacement est aussi corrigé de l'allongement élastique U_e de l'acier des tiges. Pour les tiges rugueuses ou à

bulbe, u_p augmente légèrement avec la contrainte verticale imposée. L'augmentation ne dépend pas du diamètre de ces tiges. Pour les tiges lisses, u_p dépend peu de la contrainte verticale.

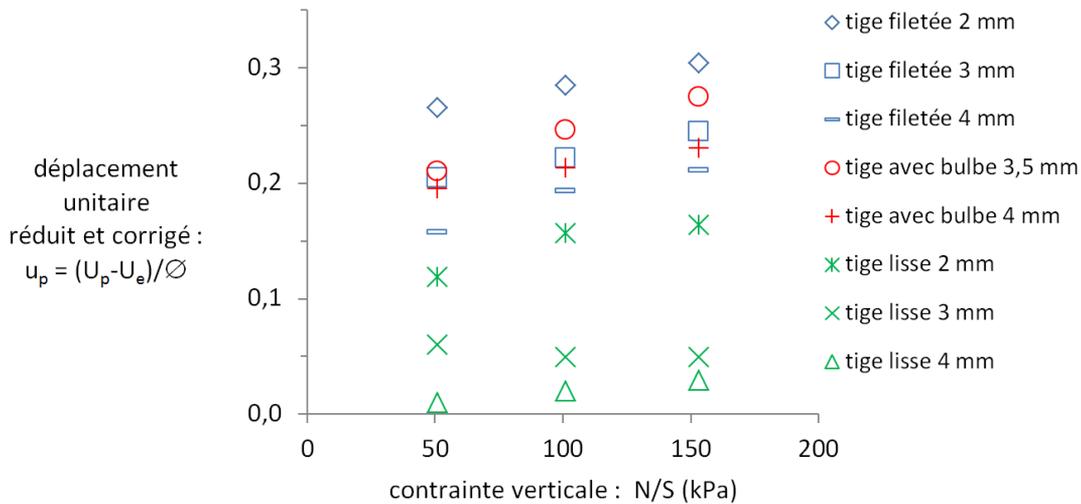


Figure 6 : Déplacement réduit unitaire et corrigé, en fonction de la contrainte verticale pour l'ensemble des tiges.

Sous une contrainte verticale donnée, u_p augmente lorsque le diamètre diminue. Par exemple, pour une tige filetée sous 101 kPa, il passe de 0,19 ($\varnothing=4$ mm) à 0,28 ($\varnothing=2$ mm), soit un déplacement absolu entre 0,56 mm et 0,76 mm. Pour les tiges lisses, l'influence du diamètre est plus importante : u_p passe de 0,02 ($\varnothing=4$ mm) à 0,16 ($\varnothing=2$ mm), soit un déplacement absolu entre 0,08 mm et 0,32 mm. La figure 6 montre également que le déplacement absolu du pic n'est pas constant comme dans les expériences menées par Milligan et Tei (1998). Par ailleurs, le déplacement vertical mesuré au centre du piston est très faible, de l'ordre de 0,05 mm pour les tiges rugueuses, et de 0,01 mm pour les tiges lisses, au pic de frottement.

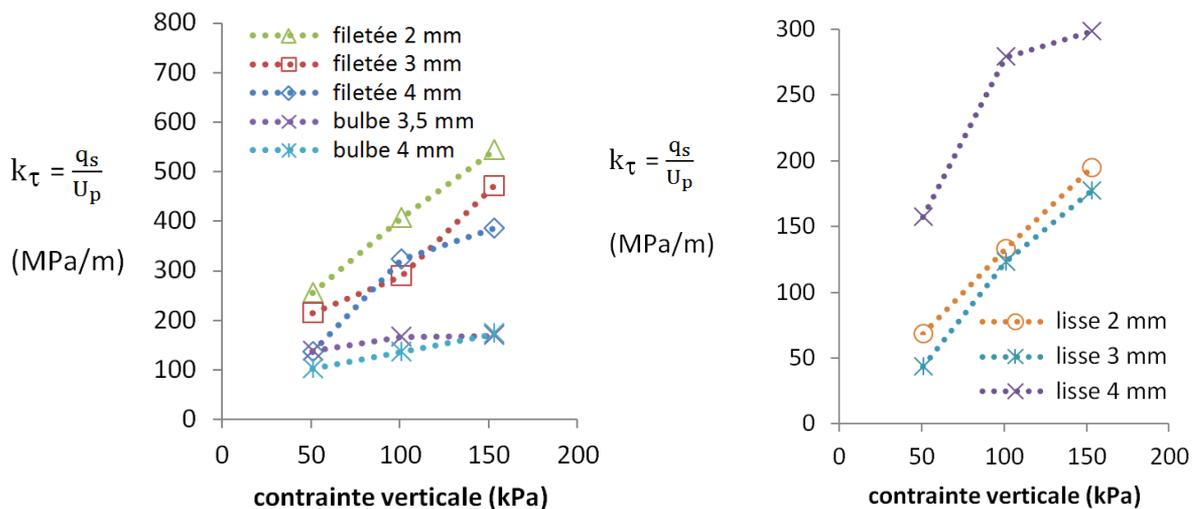


Figure 7 : Coefficient de réaction en cisaillement en fonction de la contrainte verticale pour les tiges rugueuses (à gauche) et lisses (à droite).

La figure 7 montre l'évolution du rapport du frottement latéral sur le déplacement en fonction de la contrainte verticale, pour les tiges rugueuses et lisses. Pour les tiges rugueuses, à contrainte verticale fixée, ce coefficient de réaction en cisaillement augmente quand le diamètre diminue. A rugosité constante, il augmente avec la

contrainte verticale, mais l'augmentation est moins prononcée quand la rugosité diminue. Pour les tiges lisses, l'effet du diamètre est plus incertain. La loi de Franck-Zhao semble s'appliquer pleinement ici lorsque la rugosité est maximale : le coefficient de réaction au cisaillement k_τ augmente avec la contrainte verticale (en lien avec le module du sol), et diminue quand le diamètre de la tige augmente.

4. Simulations en éléments discrets

Afin de compléter l'étude expérimentale et comprendre les processus micromécaniques impliqués, une modélisation en éléments discrets, DEM (Cundall et Strack, 1979) a été réalisée en utilisant l'environnement Yade-DEM (Šmilauer et al 2015). Le premier modèle a été réalisé avec des sphères frottantes élastoplastiques. Le module de Young des grains est de 80 GPa et leur angle de friction de 30° .

La mise en place des grains est un élément critique de toute simulation DEM. Ici il a été choisi de former une boîte aux facettes rigides (dimensions 1cm x 1cm x 1cm) et l'inclusion a été modélisée avec des éléments de type *Pfacet* permettant de définir géométriquement une rugosité. Les grains ont ensuite été mis en place par une approche de type REFD (Chareyre et Villard 2002). Ce mode de mise en place ne reflète pas le mode usuel de reconstitution des massifs en centrifugeuse, la pluviation, mais est une des meilleures manières de créer un assemblage aléatoire compact de grains.

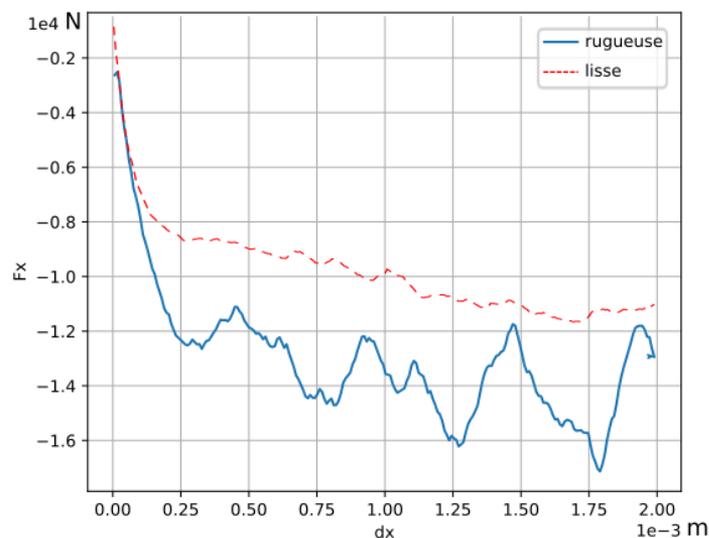


Figure 8 : Force d'arrachement en fonction du déplacement du clou obtenue pour une tige rugueuse et pour une tige lisse.

La figure 8 présente un exemple de tracé de la force exercée pour arracher un clou en fonction du déplacement de la tige (rugueuse). Les valeurs ne peuvent être comparées à celles obtenues expérimentalement, en partie à cause des hypothèses simplistes faites sur la forme et la distribution des grains ainsi que sur les conditions aux limites. Cependant les tendances observées lors de la campagne expérimentale sont confirmées et le déplacement au pic augmente légèrement avec la rugosité.

La figure 9 présente deux simulations réalisées avec une tige lisse et une tige rugueuse. La couleur des grains indique leur rotation depuis l'état initial, en rouge lorsque cette rotation est importante. Cette visualisation suggère que la tige rugueuse mobilise un volume de sol plus important et cela pourrait être à l'origine des différences observées dans les déplacements au pic.

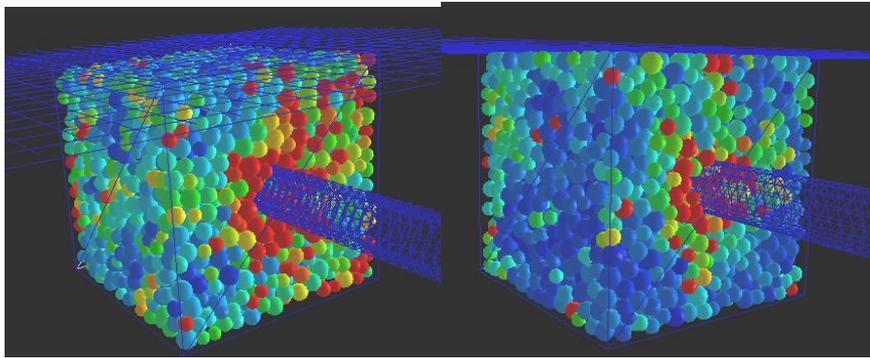


Figure 9 : Visualisation des particules en rotation (en rouge) pour une tige rugueuse (à gauche) et pour une tige lisse (à droite).

5. Conclusions

Les tests d'arrachements présentés ici permettent de définir un cadre d'étude des lois de similitude régissant le frottement sol-inclusion. Ils pointent en particulier l'importance fondamentale de la rugosité de l'interface. Des essais complémentaires seront toutefois nécessaires pour établir les lois de similitude. Enfin, les simulations en éléments discrets permettent de mettre en lumière les mécanismes générant les lois de frottement et montrent un potentiel d'explication important.

6. Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Christophe Roppert et Minh-Tan Do du département MAST de l'IFSTTAR, Université Gustave Eiffel pour la réalisation des mesures de rugosité.

7. Références bibliographiques

- CFMS 2020. Guide Technique « Tirants d'ancrage », TA 2020, Règles professionnelles relatives à la conception, au calcul, à l'exécution, au contrôle et à la surveillance, février 2020, 144 pages
- Chareyre, B. and Villard, P. 2002. Discrete element modeling of curved geosynthetic anchorages with known macro-properties. In Proceedings of the First International PFC Symposium, pp 197-203.
- Cundall, P. A. and Strack, O. D. L. 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique* 29(1) : 47-65.
- Dubreucq, T. 1999. Renforcement des fondations superficielles par inclusions planes horizontales extensibles quelques effets de taille dans le frottement sable-inclusion. PhD thesis, École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Garnier, J. et al 2007. Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 7(3) : 01-23.
- Milligan, G. W. E. and Tei K. 1998. The pull-out resistance of model soil nails. *Soils and Foundations*, 38(2) : 179-190.
- de Sauvage, J. 2018. Étude du comportement des murs de soutènement par clouage des sols en place : application au dimensionnement du parement. PhD thesis, ENTPE.
- Schiavon, J.A. 2016. Behaviour of helical anchors subjected to cyclic loadings. PhD thesis. École centrale de Nantes, Universidade de São Paulo.
- Šmilauer, V. et al, 2015. Yade documentation 2nd ed (The Yade Project), [http:// yade-dem.org/doc/](http://yade-dem.org/doc/)