

INSTRUMENTATION D'UNE PAROI CLOUEE EN CENTRIFUGEUSE

CENTRIFUGE MODELLING OF A SOIL NAILED WALL

Jean de SAUVAGE¹, Thierry DUBREUCQ², Matthieu BLANC², Jean-Pierre RAJOT¹

¹ Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, Bron, France

² Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, Nantes, France

RÉSUMÉ – Afin d'étudier le comportement d'un ouvrage en sol cloué, un modèle de paroi a été instrumenté dans la centrifugeuse de l'IFSTTAR. L'excavation est réalisée en vol et les efforts dans les clous sont mesurés à l'aide de fibres optiques solidaires des inclusions. Enfin les déplacements du sol sont suivis par l'utilisation d'un caisson à face transparente et de la technique d'imagerie appelée GeoPIV.

ABSTRACT – In order to study the behaviour of a nailed soil wall, a model has been monitored in the IFSTTAR centrifuge. The excavation takes place in flight and the stresses along the nails is measured through optic fibers tied to the inclusions. Soil displacements are evaluated through the transparent face of the container and with Particle Image Velocimetry method.

1. Introduction

Face à la difficulté et aux coûts que représente l'instrumentation d'ouvrages réels, les modèles réduits sont un outil puissant d'étude des ouvrages en sol cloué. Afin de conserver les contraintes et les déformations subies par le sol entre le modèle et le prototype, les modèles réduits doivent être centrifugés.

Le premier exemple de modélisation de mur en sol cloué sous macrogravité date de 1982 (Shen, 1982). La paroi clouée était réalisée à 1g (où g est l'accélération terrestre) avant d'être centrifugée et la gravité augmentée jusqu'à la rupture du mur. Aucun effort n'était mesuré mais les déplacements étaient reconstitués à l'aide de punaises enduites de graisse, plaquées sur la vitre d'observation et réputées suivre le mouvement du sol. Shen met en évidence une rupture selon une surface en accord avec ses prévisions. Des essais dynamiques en centrifugeuse (Tufenkjian et al, 1993) ont permis de mettre en évidence une bonne tenue de ce type d'ouvrages aux sollicitations sismiques.

De nombreux tests en centrifugeuse ont été réalisés à Cambridge (Tei, 1993) et leur apport principal est la prise en compte du phasage dans la modélisation. Le sol à excaver est remplacé par des poches de fluide vidangées en vol à l'aide d'une pompe.

Kundu et Viswanadham (2014) ont tracé un bilan des différents procédés utilisés pour réaliser l'excavation en vol. Elles se regroupent en trois types (robot excavateur, enroulement de géotextile et vidange de fluide) et toutes ont le défaut d'utiliser une paroi en place avant excavation. La paroi étant fichée, le déconfinement du sol est limité. L'étude du clouage sur modèles réduit rend de plus difficile la mesure des efforts le long des inclusions du fait des faibles dimensions de ces dernières. Cette difficulté est ici résolue par l'insertion de fibres optiques au cœur des clous. Enfin, les mouvements du sols sont suivis à l'aide de la technique d'imagerie intitulée GeoPIV (Stanier et al, 2015).

Le montage expérimental est ici décrit et les premiers résultats sont présentés à titre d'illustration.

2. Principe de la modélisation en centrifugeuse

Si l'étude de modèles réduits présente un intérêt pratique, le changement d'échelle ne garantit pas la similitude de comportement physique. En particulier le comportement des géomatériaux est très dépendant de leur granularité et ainsi le modèle réduit doit être réalisé avec le même matériau que le prototype.

La rhéologie des géomatériaux étant décrite par des lois de comportement reliant contraintes et déformations, on s'attache à conserver ces deux grandeurs. Ainsi une réduction des longueurs d'un facteur N implique une augmentation de la gravité du même facteur N . Les efforts mesurés seront quant à eux dans un rapport N^2 avec les efforts observables sur le prototype.

La similitude entre prototype et modèle a tout de même des limites. En particulier la taille des grains doit être très inférieure à la plus petite dimension caractéristique du modèle (ici le diamètre des inclusions) afin de s'assurer de l'existence d'un volume élémentaire représentatif. De plus, le comportement de l'interface entre le clou et le sol n'est pas nécessairement conservé lors de la réduction d'échelle. Cette interface est donc caractérisée à l'aide d'essais d'arrachement réalisés à l'aide d'une boîte de cisaillement adaptée. Ces derniers se révèlent répétables et permettent de mettre en évidence une valeur du coefficient de frottement latéral q_s constante pour une contrainte verticale supérieure à 30 kPa.

3. Réalisation du modèle

3.1. Choix du mode d'excavation

Le comportement des ouvrages en sol cloué dépendant fortement du phasage de leur réalisation, il est impossible d'arrêter le vol pour les phases d'excavation car cela impliquerait un déconfinement des terres sans proportions avec le déconfinement naturel observé lors d'une excavation. Si la reprise du vol aurait tendance à annuler ce déconfinement artificiel, l'évolution de l'état du sol ne serait pas pour autant réversible.

Il est donc choisi de réaliser l'excavation en vol. En l'état actuel des connaissances, les solutions envisageables sont la vidange d'un fluide, l'utilisation d'un robot excavateur ou les feuillets de géotextile.

La vidange d'un fluide consiste à remplacer le sol à excaver par des poches en caoutchouc remplie d'un fluide de poids volumique proche de celui du sol (chlorure de sodium ou chlorure de zinc en solution par exemple). Ces poches sont ensuite progressivement vidangées, simulant ainsi l'excavation. La limitation principale de cette méthode est la pression hydrostatique : le fluide ne peut simuler que des sols dont le rapport K_0 entre contraintes verticale et horizontale au repos vaut 1. De plus, le système de pompage induit une perturbation du sol sous le fond de fouille, zone où peuvent se développer les mécanismes les plus instables.

En substitution du robot excavateur non disponible, la technique retenue a été celle des feuillets. Pour l'excaver aisément, le sol est enroulé dans un géotextile fixé à l'arbre d'un moteur comme l'indique la figure 1. Le principal problème posé par cette méthode est le renforcement du sol par la présence des nappes de géotextile. Dans le but de se rapprocher autant que possible de l'état naturel, le géotextile doit être posé de manière lâche. Cette méthode est plus adaptée aux sols cohérents qu'aux sols pulvérulents mais afin d'éviter que le sable ne se déverse sur le côté, les feuillets sont munis de faces latérales et nous parlerons donc de paniers dans la suite.

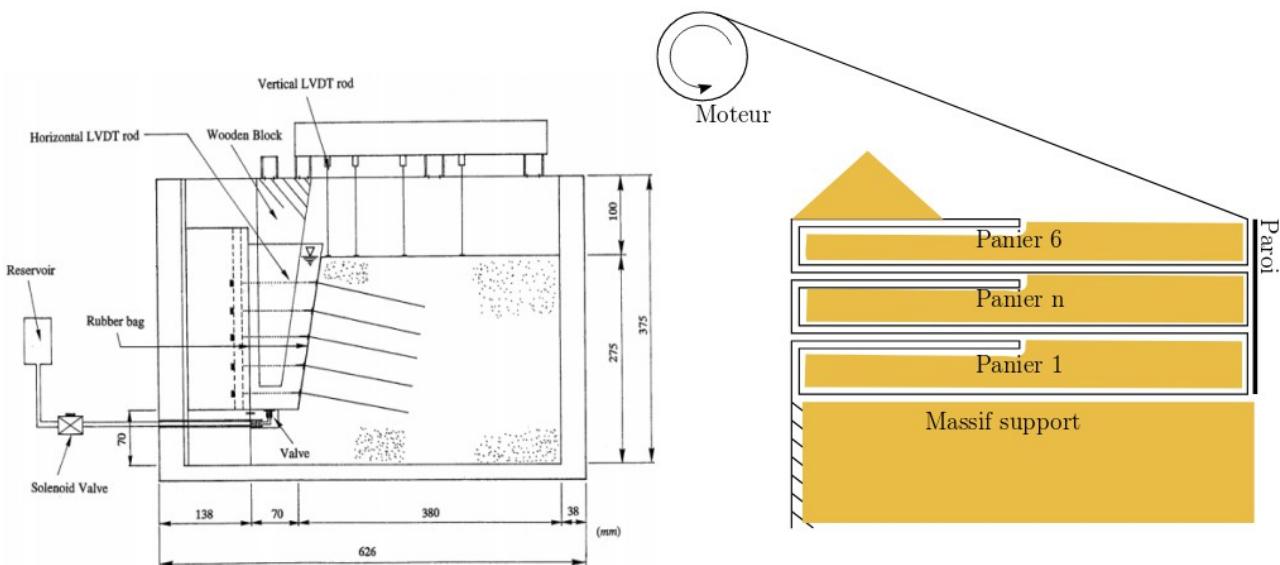


Figure 1. Procédés d'excavation par vidange (à gauche, Tei, 1993) et par feuillets (à droite).

3.2. Dimensions du modèle

L'IFSTTAR possède sur son site de Nantes une centrifugeuse géotechnique mise en service en 1985 dont le rayon est de 5,50 m. Elle est équipée d'une nacelle de dimensions 1200x800x360 mm³. Le poids maximal du modèle est de 2 tonnes et l'accélération maximale imposable de 100g.

Le fond de la nacelle est équipé d'une plaque martyre sur laquelle sont fixés les caissons destinés à accueillir le modèle ainsi que les instruments de mesure. Le caisson utilisé ici possède une face transparente et ses dimensions internes sont 800x400x360 mm³. Le procédé d'excavation utilisé a obligé cependant à limiter la largeur du modèle à 220 mm (voir 3.1).

Afin de laisser se développer le mécanisme, il est souhaitable de laisser sous la paroi une hauteur de sol égale à 2/3 de la hauteur de la paroi. Ainsi, nous avons choisi une paroi de 18 cm de haut et le fond de fouille est à l'altitude de 12 cm. Afin de pouvoir modéliser un prototype de 9 m de haut (6 passes de 1m50), l'accélération a été fixée à 50g.

La longueur du déversoir (destiné à recueillir le sol excavé) doit être au moins égale à la longueur de l'excavation. Afin de laisser se développer le mécanisme de rupture, on disposera d'une longueur de 1,3 H en aval. Les longueurs retenues sont donc les suivantes :

- déversoir : 24 cm (*i.e* 12 m sur le prototype)
- aval : 24 cm (*i.e* 12 m sur le prototype)
- amont : 32 cm (*i.e* 16 m sur le prototype)

3.3. Réalisation et mise en place du parement

La paroi est mise en place dans le sol avant l'excavation et cette limitation devra être prise en considération lors de la comparaison au prototype. La paroi est donc suspendue à l'aide de fils de couture pendant la pluviation (voir 3.4).

La présence des clous dans le sol représente un défaut peu important puisqu'ils ne sont effectivement mobilisés qu'après excavation. Le parement, quant à lui, est fiché dans le modèle, imposant un déplacement nul en pied, alors qu'il est libre sur le prototype. Afin de ne pas imposer également une rotation nulle en pied, la paroi est articulée entre chaque passe. Sur le prototype, cette articulation correspond à la faiblesse mécanique induite par les reprises de bétonnage sur l'ouvrage réel.

Le parement est donc réalisé à l'aide d'écailles d'aluminium collées sur un géotextile. Afin de créer des cellules de garde permettant de s'affranchir des effets de bords, les écailles ne sont pas continues sur la largeur du modèle mais des articulations verticales sont réalisées comme indiqué sur la figure 2.

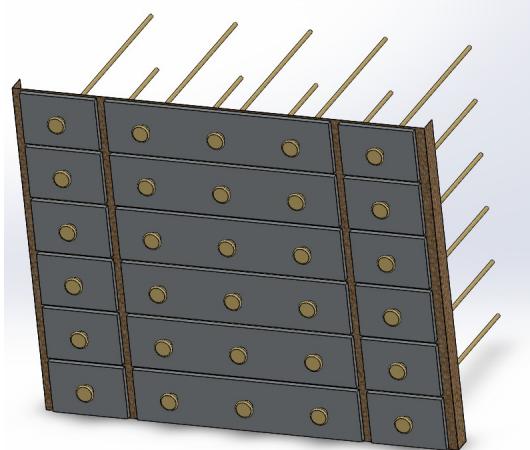


Figure 2. Paroi modèle articulée.

Les clous sont réalisés à l'aide de tiges métalliques de 2 mm de diamètre et sont liés au parement par une liaison de type rotule. Ils sont encollés et recouverts d'une fine couche de ciment afin de fixer la loi de frottement sol-inclusion. 3 longueurs de clous sont testées : 80, 120 et 180 mm.

3.4. Reconstitution du sol

Les limitations de similitude incitent *a priori* à utiliser un sol aux particules les plus petites possibles, en prenant toutefois garde à la prédominance des forces gravitaires et de contact sur les forces électriques. On a ainsi eu recours au sable HN38 (extrait dans la carrière d'Hostun). Ce sable a été caractérisé (Schiavon, 2016). Il présente une granularité peu disperse (coefficient d'uniformité : $C_u = 1,97$) et son diamètre médian est de 120 µm.

La densité du sol dans le modèle physique peut être imposée par le principe de pluviation. Pour les sols pulvérulents, cette pluviation se fait dans l'air. Une trémie se déplace au-dessus d'un conteneur de manière à en couvrir toute la surface de manière homogène. La trémie étant automatisée, on obtient un sol homogène et l'expérience est répétable aisément. En l'état actuel des connaissances, le réglage de la densité par les paramètres de la trémie (vitesse de chute, hauteur de chute, ouverture de trémie) se fait de manière empirique.

La pluviation est également perturbée par la paroi et par le dispositif permettant de la retenir. La variation de densité en résultant a été évaluée à 1% (Gaudin, 2002) et sera donc négligée. La présence des clous lors de la pluviation induit aussi une variation de densité. L'indice des vides du sol autour des clous a donc été évalué par injection d'agar-agar dans les vides. Pour un diamètre de 2 mm, l'écart relatif à l'idéal est inférieur à 5%.

Enfin, la chute du sable entraîne l'air et au voisinage de la paroi, un effet Venturi a tendance à l'écartier de la verticale. La paroi doit donc être retenue contre les paniers à l'aide de rubans adhésifs.

4. Mesure des efforts dans les inclusions

4.1. Principe de la mesure

Les dimensions des clous du modèle ne permettent pas d'envisager la mesure des efforts par jauge de déformation. Afin de déterminer la répartition des efforts le long des

inclusions, il a donc été choisi de les équiper de fibres optiques sur le profil central. La société LGS (Light Guide Solution) a fourni des capillaires métalliques de diamètre 2 mm dont le cœur est formé par une fibre optique dans laquelle sont inscrits des réseaux de Bragg espacés de 5 mm (25 mm sur le prototype). Ces fibres sont équipées d'un connecteur permettant de les relier à un interrogateur capable d'envoyer un signal lumineux et d'analyser le signal retour.

Un réseau de Bragg dans une fibre est une structure périodique formée par une modulation de l'indice de réfraction du cœur. Cette structure est quasiment transparente : elle réfléchit une unique fréquence lumineuse que nous appellerons sa fréquence propre par la suite. Cette fréquence propre varie avec la déformation de la fibre. En effet, une déformation longitudinale diminue le diamètre de la fibre et donc son indice optique. De plus, elle modifie la période du réseau de Bragg. En définitive la déformation de la fibre est reliée à la variation relative de fréquence propre par un facteur de proportionnalité.

La fibre étant solidaire du capillaire métallique, sa déformation est égale à celle du clou et, connaissant le module d'Young de l'acier permet d'accéder à l'effort de traction dans le clou. De plus, les éventuels efforts de flexion ne perturbent pas la mesure car la fibre optique est située sur l'axe du clou.

4.2. Mise en place des clous fibrés

Les fibres optiques doivent être connectées à l'interrogateur et sont donc prolongées au-delà du clou. Une première solution consiste à les faire sortir par la queue du clou, à travers le massif. Cette solution présente toutefois l'inconvénient de renforcer le massif amont et les phénomènes alors observés sont difficilement transposables au prototype.

Les fibres sortent donc des clous par leur tête puis au milieu des paniers servant à réaliser l'excavation. Afin de protéger les fibres optiques elles sont insérées dans une double plaque gravée. Pour limiter le risque d'entraînement de la structure par les paniers, elle est réalisée en nylon 6-6 et lubrifiée. La figure 3 présente l'installation.

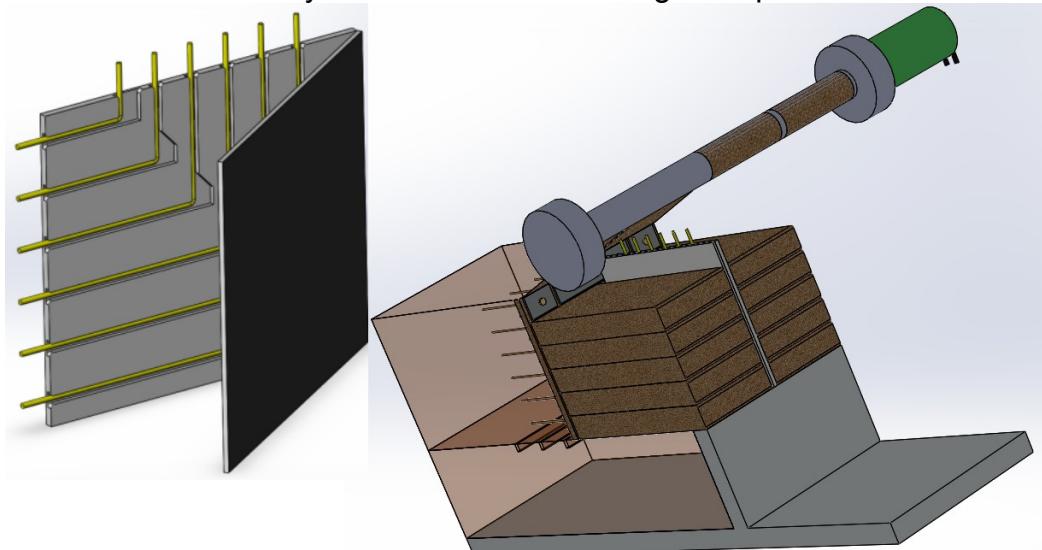


Figure 3. Principe de protection des fibres optiques.

4.3. Profil des efforts

La figure 4 présente un exemple de résultats qualitatifs de mesures d'efforts. Les mesures de traction sont complétées par des mesures de pression réalisées à l'aide de capteurs placés sous la base du massif.

Le profil des tractions fait apparaître une ligne de traction maximale similaire à celle mise en évidence dans le projet National Clouterre (Schlosser et al, 1993). De part et

d'autre de cette ligne de rupture, le frottement des inclusions le long du sol diminue l'effort normal.

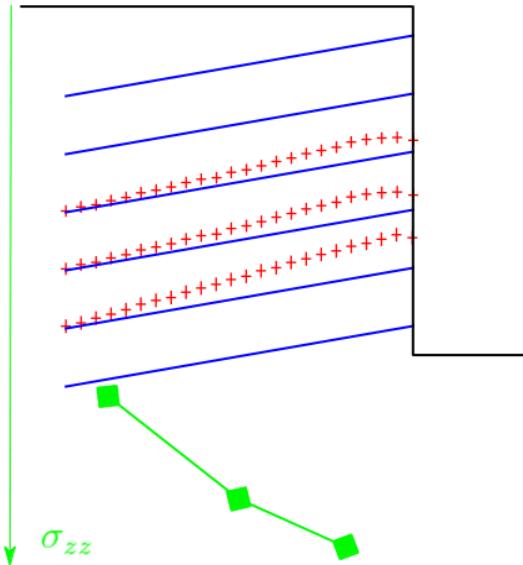


Figure 4. Profils des efforts de traction le long des clous (croix rouges) et des différences de pression à la base du massif (losanges verts).

Les mesures de pression sous le massif indiquent un basculement vers l'aval en cohérence avec le mécanisme de rupture mis en évidence par Simon (Simon, 2008).

5. Observation des déplacements

Un ensemble de 5 LASER permet de mesurer avec précision certains déplacements. 2 LASER horizontaux sont dirigés vers des cibles fixées en tête de la paroi et permettent donc de connaître l'évolution au cours du temps du déplacement en tête. Les 3 autres sont dirigés vers la surface du sol et permettent de mesurer les tassements au cours du chargement. Le tassement est mesuré à 3 et 9 cm de la paroi sur le profil central. Une mesure complémentaire est faite sur un profil situé dans la cellule de garde au voisinage de la face transparente afin d'évaluer l'ampleur des effets de bord. L'écart entre le profil central et le profil latéral est inférieur à 10%.

Les déplacements de l'ensemble du massif sont également observés au travers de la face transparente et analysés à l'aide de la technique d'imagerie GeoPIV (Stanier et al, 2015). Cette technique consiste à comparer deux photos successives prises au cours du chargement et à évaluer le déplacement de mailles de sol entre les clichés. La qualité de l'analyse est conditionnée par le contraste de l'image.

Dans le cas de cette étude, la couleur homogène du sable ainsi que sa granularité fine le rendent peu contrasté. Afin de corriger ce problème, 10% du sable utilisé est préalablement coloré au bleu de méthylène et chauffé durant 48h à 70°C avant d'être mélangé au sable naturel. Cette proportion de sable coloré suffit à assurer un fort contraste sans pour autant modifier significativement les propriétés mécaniques du sol.

Afin de s'abstraire au maximum des effets de bord, la vitre du conteneur est lubrifiée. Malgré cela, les déplacements ainsi obtenus ont une valeur principalement qualitative et ne peuvent prétendre à la précision des mesures par LASER. Ils permettent toutefois d'observer le mouvement du sol et d'observer les mécanismes de rupture.

Le chargement à rupture est réalisé en augmentant, après excavation de la dernière passe, la vitesse de rotation de la centrifugeuse et donc la gravité. Le massif est ainsi déstabilisé sans que l'opérateur n'ait privilégié aucun mode de rupture.

Un tel exemple est présenté sur la figure 5. Une zone de rupture matérialisée par les grandes flèches apparaît nettement. Elle est cependant plus large que celle mise en évidence dans les expériences de Clouterre (Schlosser et al, 1993). L'exemple ici présenté est réalisé avec du sable de couleur homogène et l'on peut observer des déplacements aberrants pour certaines mailles. Ces mailles sont souvent à proximité de petites rayures de la vitre qui rendent plus critiques l'absence de contraste dans le sol.

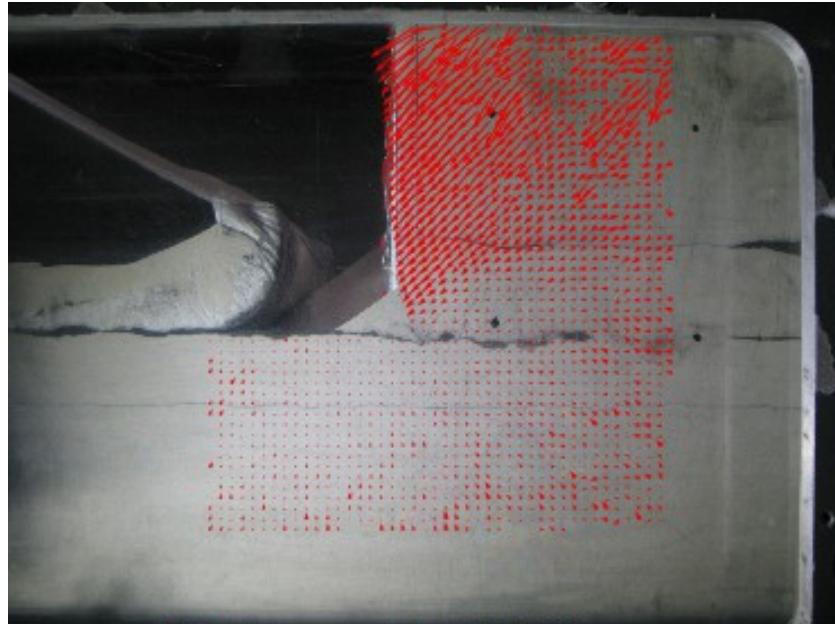


Figure 5. Observation des déplacements au sein du massif cloué par GeoPIV

6. Conclusion et perspectives

Un protocole expérimental permettant une étude du clouage en centrifugeuse a été présenté ici. Il permet d'une part de réaliser l'excavation en vol et donc de perturber aussi peu que possible le phasage de l'exécution de l'ouvrage.

L'utilisation de fibre optique a permis de mesurer les efforts dans le long des inclusions avec une précision spatiale inaccessible aux jauge de déformation. Enfin, l'observation des déplacements par PIV a permis d'observer le mode de rupture des premiers modèles d'ouvrages cloués.

Les règles de similitudes sont préservées et si le rapport entre diamètre des clous et taille des grains est faible, une loi de frottement observée à répétitions a été mise en évidence.

Des premiers résultats ont été présentés mais demandent à être appuyés par un plus ample programme d'essais.

7. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'équipe technique responsable de la centrifugeuse de l'IFSTTAR (en particulier Patrick Gaudicheau, Alain Néel, Stéphane Lerat et Jean-Pierre David) sans qui ces essais n'auraient pu être réalisés ainsi que l'équipe technique du laboratoire RRO de l'IFSTTAR-Bron (en particulier Christophe Pruvost et Patrick Joffrin) pour leur aide dans la réalisation du modèle. Un grand remerciement est également adressé à Xavier Chapeleau pour la mise à disposition d'un interrogateur optique ainsi que pour l'aide apportée dans son utilisation. Nous tenons aussi à remercier Fernando Saboya pour son aide dans le traitement de la PIV.

Enfin nous remercions le Ministère français de la Transition Ecologique et Solidaire pour le financement de la thèse de doctorat dans le cadre de laquelle ces travaux ont été rendus possibles.

8. Références bibliographiques

- Gaudin C. (2002). Modélisation physique et numérique d'un écran de soutènement autostable. Application à l'étude de l'interaction écran-fondation. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Nantes.
- Kundu S. et Viswanadham B.V.S. (2014). Centrifuge model tests on the performance of soil-nailed shoring system. Proceedings of International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Gaudin & White Eds, pp 1119-1124
- Schiavon J. (2016). Behaviour of helical anchors subjected to cyclic loadings. Thèse de doctorat. University of Sao Paulo.
- Schlosser F. et al (1993). Recommandations Clouterre 1991, French national research project, Presses de l'ENPC (traduction anglaise).
- Simon B. (2008). Yield design applied to earth retaining structures. Zemin Mekanigi ve Temel Muhendisligi Onikinci Ulusal Kongresi. Selcuk Universitesi, Konya.
- ShenC.K. (1982). Centrifuge modelling of lateral earth support. Journal of the Geotechnical Engineering Division 108.9, pp 1150-1164.
- Stanier, S.A., Blaber, J., Take, W.A., White, D.J. (2015). Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications. Canadian Geotechnical Journal 53,5, pp 725-739
- Tei K. (1993). A study of soil nailing in sand. Thèse de doctorat. University of Oxford
- Tufenkjian, M., Vucetic M., Doroudian M. (1993). Dynamic testing of soil-nailed excavations. Geotechnical Testing Journal, Vol. 16, No. 2, pp. 172-187.