

ETUDE SUR MODELE PHYSIQUE DU FROTTEMENT SOL-INCLUSION EN SOIL-MIX SOUS CHARGEMENT MONOTONE ET CYCLIQUE

STUDY ON PHYSICAL MODEL THE SOIL-INCLUSION FRICTION IN SOIL-MIX UNDER MONOTONIC AND CYCLIC LOADINGS

Van Cuong LE¹, Jean-Claude DUPLA¹, Jean CANOU¹, Yu-Jun CUI¹, Anh Minh TANG¹, Hocine DELMI¹

¹ Ecole des Ponts ParisTech, U.R. Navier/CERMES, France

RÉSUMÉ – Le comportement cyclique de l'interface sol-colonne en soil-mix a été étudié à partir d'une modélisation physique au laboratoire. Différentes amplitudes du déplacement cyclique ont été considérées. Les résultats montrent à la fois une phase de dégradation et de renforcement lors du chargement cyclique, ainsi qu'une dégradation du frottement local lors du chargement monotone post-cyclique. Le taux de dégradation est gouverné par l'amplitude du chargement cyclique.

ABSTRACT – The cyclic behavior of the soil-column interface in soil-mix was investigated on a physical model in the laboratory. The amplitude of the cyclic displacement was considered. Results show both a phase of degradation and reinforcement during the cyclic loading, and a reduction in local friction during post-cyclic monotonic loading. The degradation rate is governed by the amplitude of the displacement during the cyclic loading.

1. Introduction

Parmi toutes les techniques actuelles, la technique de renforcement par des colonnes en « soil-mixing », développée dans les années soixante (Bruce, 1996), connaît aujourd'hui un essor important. Elle vise à introduire par malaxage avec le sol en place un liant de stabilisation. Elle permet donc de réaliser des colonnes de sol stabilisé sans excavation, et peut s'apparenter aux colonnes rigides ou semi-rigides. Cette technique présente un intérêt économique important, du fait de la réduction des rejets et de la rapidité de réalisation sur chantier.

Dans ce contexte, un projet de recherche a été initié en 2010 (RUFEX, Renforcement et réUtilisation des plates-formes ferroviaires et des fondations EXistantes) afin de développer cette technique. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre de ce projet, et plus particulièrement sur l'étude du comportement local de l'interface sol-colonne sous sollicitations cycliques (domaine ferroviaire).

Dans la littérature on trouve de nombreuses recherches à la fois sur le matériau soil-mix (Topolnicki 2004, Hernandez-Martinez et al. 2007) et le comportement de l'interface sol-colonne (Shen et al. 2003, Ishikura et al. 2007). Cependant, dans ce dernier cas d'études, il n'existe aucune étude qui porte sur le frottement local entre la colonne en soil-mix et le sol environnant. En ce qui concerne le dimensionnement des colonnes, on trouve également plusieurs travaux (Kasali and Taki 2003, Chen et al. 2008). Dans le cas de l'application ferroviaire, on peut citer l'étude de Schwarz and Raithe (2005) et le projet INNOTRACK (2009) qui a permis d'étudier en vraie grandeur l'applicabilité de cette méthode au domaine ferroviaire. Cependant, le comportement sous chargement cyclique reste mal connu, bien que ce soit la sollicitation prédominante dans ce domaine.

Notre étude porte donc à mieux comprendre les mécanismes de fonctionnement du système sol-colonne à partir d'une modélisation physique de type chambre d'étalonnage.

On met l'accent sur le cas des chargements cycliques. On présente tout d'abord les dispositifs d'essai développés pour cette étude, en particulier le tronçon de sol-mix instrumenté, puis des résultats typiques (monotone, cyclique et post-cyclique). Les résultats permettent de mettre en évidence une première phase de dégradation du frottement local suivie d'une phase de renforcement. Les chargements post-cycliques permettent d'évaluer l'influence du chargement cyclique sur le frottement statique initial. On présente finalement l'influence de l'amplitude du déplacement cyclique sur les résultats observés.

2. Dispositifs, matériaux et procédure d'essai

2.1. Dispositifs d'essai

La partie principale du dispositif est constituée d'un réservoir circulaire métallique, composé de deux modules, de 55 cm de diamètre intérieur et d'une hauteur totale de 73 cm. L'ensemble est placé sur un support métallique de 30 cm de hauteur. Un couvercle permet de fermer le dispositif à l'aide de tirants, et possède en son centre un trou où vient se placer un anneau de guidage. La Figure 1a montre une vue schématique d'ensemble du dispositif d'essai. Dans la cuve d'essai, rempli par le sol reconstitué, on vient fabriquer un tronçon de colonne en sol-mix de 20 cm de longueur (diamètre de 8 cm), instrumenté par deux capteurs de force (étendue de mesure de ± 20 kN). La longueur totale du module, comprenant les pièces métalliques en tête et en pointe, est d'environ 80 cm. On trouve en tête de la colonne une pièce nommée « cylindre d'appui supérieur », qui permet de transmettre la force appliquée par le vérin servo-hydraulique (à la tête du tronçon de sol-mix instrumenté) et qui supporte le capteur de force haut. Dans la partie inférieure, on trouve la seconde pièce métallique nommée « sabot inférieur », qui permet à la fois d'éloigner la pointe de la zone de mesure et de réduire la force en pointe (pointe ouverte). Cette pièce supporte le second capteur de force. La figure 1b présente une vue complète du dispositif placé sous le bâti quatre colonnes équipé du servovérin hydraulique MTS (capacité ± 100 kN de force et de ± 75 mm de course).

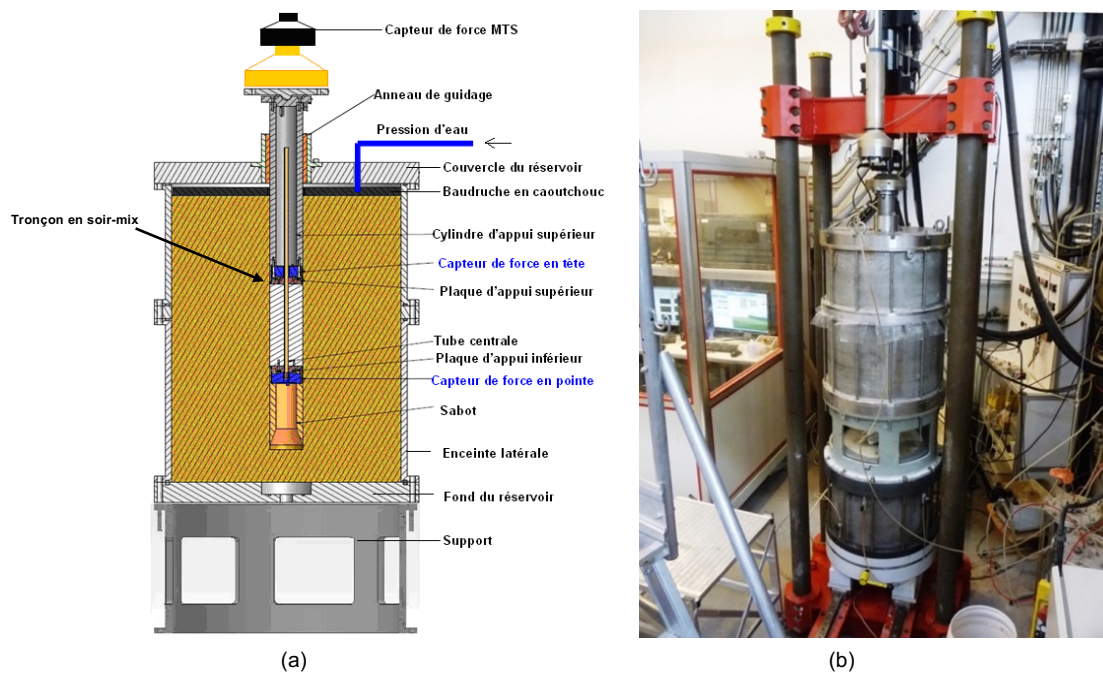


Figure 1. Schéma de principe et vue du dispositif d'essai.

2.2. Matériaux

Il est difficilement envisageable, dans le cas des massifs de grande taille, d'utiliser un sol naturel (homogénéité des éprouvettes, remaniement et reproductibilité des prélèvements). Il est donc nécessaire de reconstituer le massif de sol au laboratoire à partir de matériau broyé. Le sol de référence choisi dans le cadre du projet est le limon de Jossigny, qui a fait l'objet de nombreuses études dans le passé (Le Runigo, 2008). On a donc cherché à reconstituer un massif de sol « artificiel » qui se rapproche le plus possible des caractéristiques du sol de référence (limon de Jossigny). Ce choix nous a permis d'assurer la facilité d'approvisionnement des matériaux et de la répétabilité de la procédure de préparation, tout en restant le plus proche possible du sol de référence en termes de granulométrie et de caractéristiques mécaniques.

On a choisi d'utiliser la kaolinite Speswhite et le sable broyé Millisil C10 de Sibelco afin de reconstituer un matériau artificiel proche du limon de Jossigny. Le mélange « artificiel » retenu est composé de 30% d'argile et de 70% de sable broyé (nommé C10Kao). Les courbes granulométriques et les caractéristiques de ces matériaux sont données sur la figure 2.

La procédure de préparation du sol « artificiel » consiste à mélanger à sec la kaolinite et le sable broyé dans un malaxeur, puis d'ajouter l'eau progressivement à ce mélange. Le teneur en eau de référence est de 16%, et correspond à une valeur proche de l'optimum Proctor normal. Les limites d'Atterberg obtenues pour le sol « artificiel » (Le, 2014) sont très proches de celles du limon de Jossigny (Le Runigo, 2008). Ce mélange C10Kao est classé dans les argiles peu plastiques (Ap), comme le limon de Jossigny.

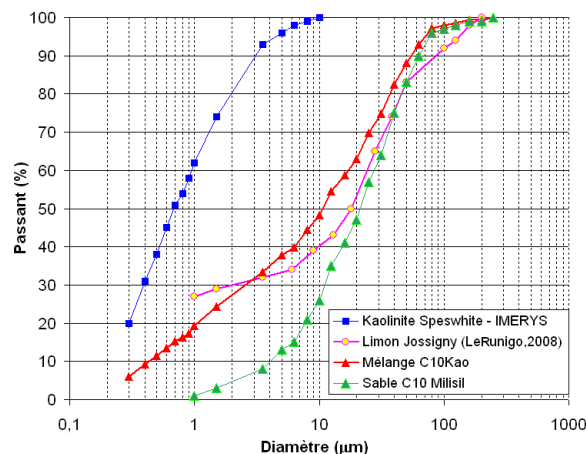


Figure 2. Courbes granulométriques des différents matériaux utilisés

Il faut également noter qu'il est le principal constituant des colonnes de soil-mixing. Dans le cadre de cette étude, le ciment retenu est le CEM III/C 32,5 N CE PM-ES NF fabriqué par le Groupe Calcia. En laboratoire, on simplifie la procédure de fabrication du matériau soir-mix par rapport à la méthode de réalisation *in situ*. En effet, pour assurer une bonne représentativité, ainsi que la répétabilité de la procédure de fabrication d'une colonne en soir-mix, on a choisi de couler le soir-mix prémélangé à l'extérieur dans le forage préalablement réalisé avec une tarière à main. Il a donc été nécessaire d'établir un protocole de fabrication du matériau soir-mix en laboratoire. La procédure consiste donc à mélanger à sec les trois composants (kaolinite, sable broyé et ciment), puis d'introduire l'eau nécessaire. Les valeurs retenues des paramètres pour le mélange soil-mix sont : $w_n=48$ % (teneur en eau initiale), 300 kg/m^3 de ciment et un C/E de 0,36.

2.3. Procédure d'essai

La procédure globale de mise en œuvre d'une colonne en soil-mix instrumentée dans la cuve d'essai comporte les opérations successives suivantes :

- Réalisation du massif de sol environnant : le massif est préparé par compactage de sept couches de 10 cm de hauteur, après avoir lubrifié la paroi latérale afin de limiter les frottements parasites. On place ensuite la baudruche sur la dernière couche, puis la cellule est fermée.
- Forage du trou : On utilise un dispositif composé d'un trépied et d'une tarière à main. Le forage est réalisé progressivement jusqu'à une profondeur de 60 cm.
- Fabrication du mélange de soil-mix ;
- Réalisation de la colonne de soil-mix instrumentée : On assemble, dans un premier temps, les différentes pièces (ancrage, tube et capteur) qui composent les parties haute (appui supérieur) et basse (sabot) du tronçon de soil-mix. On positionne dans le forage le sabot inférieur, et l'on coule la quantité de coulis estimée. On utilise une pompe avec un tube plongeur pour assurer une bonne homogénéité de la colonne sur toute sa hauteur. Finalement, le guidage supérieur est descendu dans le forage. Des chevilles placées aux extrémités du sabot inférieur et du guidage supérieur assurent l'ancrage avec le tronçon en soil-mix.
- Mise en place de l'ensemble du dispositif sous le dispositif de chargement. On applique ensuite la contrainte verticale de confinement en augmentant la pression d'eau dans la baudruche jusqu'à la valeur choisie. Cette étape étant réalisée, il faut attendre la prise du mélange (temps de cure), qu'on a fixé dans les essais présentés à 7 jours.
- Réalisation des chargements : les essais suivent deux protocoles. Le premier consiste à réaliser un chargement monotone à déplacement contrôlé afin de déterminer les caractéristiques de rupture des colonnes. Le second consiste à réaliser un chargement cyclique à déplacement contrôlé non alterné à grand nombre de cycles, puis un chargement monotone final.
- Démontage de l'essai : On réalise les opérations inverses. On récupère la colonne de soil-mix pour observations et mesures de ses dimensions.

3. Essais typiques

3.1. Chargement monotone

La figure 3 présente le frottement latéral unitaire typique autour du tronçon de soil-mix lors d'un chargement monotone à 100 kPa de contrainte verticale et à une vitesse de déplacement de 100 $\mu\text{m}/\text{min}$ (massif SM8). Le frottement unitaire est calculé à partir de la différence entre les valeurs mesurées par les deux capteurs de force (haut et bas) et de la surface latérale de la colonne, mesurée précisément après le démontage du massif. Le comportement de l'interface (frottement unitaire) se compose de trois phases distinctes. On observe une phase quasi-linéaire initiale, suivie d'une seconde où l'on observe une non linéarité croissante, rendant compte d'une irréversibilité, et finalement une troisième phase correspondant à la stabilisation à la rupture. Le frottement à la rupture est d'environ 80 kPa. Cette valeur est cohérente avec des mesures in situ (Le, 2014).

3.2. Chargement cyclique

En vue d'étudier la dégradation de l'interface, les essais cycliques sont réalisés à déplacement contrôlé. Le chargement cyclique consiste à réaliser 100 000 cycles à déplacement contrôlé non-alterné d'amplitude fixée et à une fréquence de 5 Hz. Après cette phase cyclique, on réalise un chargement post-cyclique (cf. section 2.3), selon le même protocole que celui décrit dans la section 2.1.

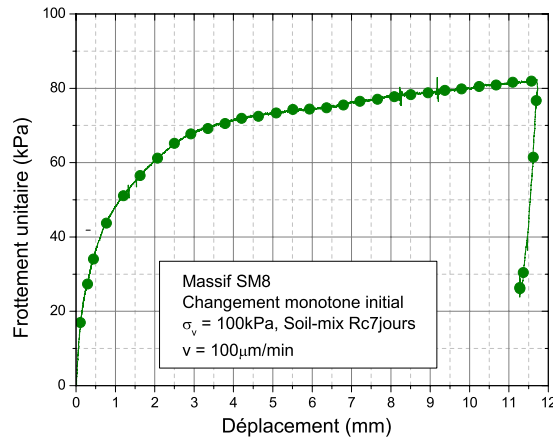


Figure 3. Résultat typique obtenu en terme de frottement unitaire sous chargement monotone initial (massif SM8).

Afin de mettre en évidence la dégradation de l'interface du tronçon de «soir-mix» sous le chargement cyclique, on utilise le coefficient d'évolution $C_{e,f}$ qui a été introduit par Tali (2011), qui permet d'évaluer le comportement à l'interface au cours du chargement cyclique. En effet, ce coefficient est défini comme le rapport entre les amplitudes cycliques d'un cycle i et du premier cycle.

$$C_{e,f} = \frac{f_{s,max(i)} - f_{s,min(i)}}{f_{s,max(1)} - f_{s,min(1)}} \quad (1)$$

avec $C_{e,f}$: Coefficients d'évolution du frottement latéral ; $f_{s,max(i)}$ et $f_{s,min(i)}$: Frottement latéral maximal et minimal au cycle i ; $f_{s,max(1)}$ et $f_{s,min(1)}$: Frottement latéral maximal et minimal au cycle 1

Les courbes donnant les coefficients d'évolution du frottement latéral et la force du vérin MTS sont présentées sur la figure 5 dans le cas du massif SM10 ($\sigma'_c=100$ kPa, 7 jours, 400 μm , 5Hz). Dans cet essai, l'amplitude du déplacement est équivalente à 0,5% du diamètre de la colonne (d_c). Le coefficient d'évolution relatif à la force du vérin MTS est défini de la même façon. On observe une dégradation jusqu'au cycle 5000, puis une phase de renforcement jusqu'à la fin de l'essai. En terme de coefficient d'évolution maximum obtenu dans la phase de dégradation, on obtient une valeur de dégradation de 0,34. Cette valeur est proche de celles mesurées par Tali (2011) pour un chargement cyclique à une amplitude cyclique totale de 500 μm dans un sable.

3.3. Chargement monotone post-cyclique

Pour évaluer l'influence des chargements cycliques sur le comportement post-cyclique de l'interface, après 100 000 cycles de chargement, on réalise une séquence de chargement monotone finale, suivant le même protocole que celui utilisé lors des essais de

chargement monotone initiaux. La figure 5 présente les deux courbes de frottement latéral obtenues. Le résultat montre que, par rapport au comportement monotone initial de référence (massif SM8), après un chargement cyclique non-alterné de 400 μm (massif SM10), les parties initiales, jusqu'à 2 mm de déplacement, sont similaires. Par contre, en terme de frottement à la rupture, l'interface post-cyclique présente une résistance nettement inférieure par rapport celle de l'interface initiale. Ce résultat montre une dégradation, comme on pouvait s'y attendre à partir des résultats de l'essai cyclique, de l'interface de la colonne après le chargement cyclique.

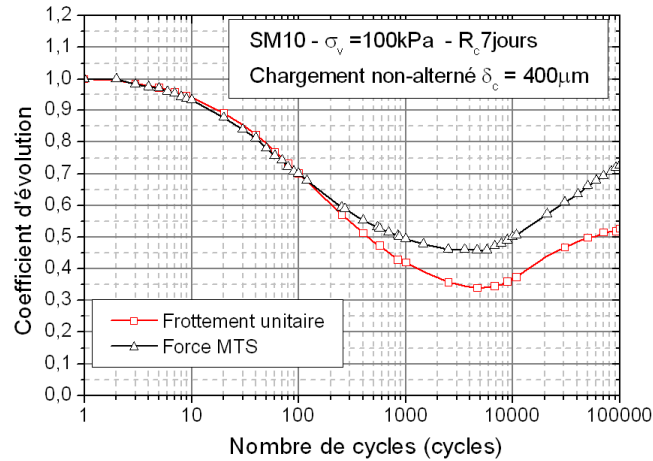


Figure 4. Résultats typiques obtenus en terme de coefficient d'évolution sous chargement cyclique (massif SM10)

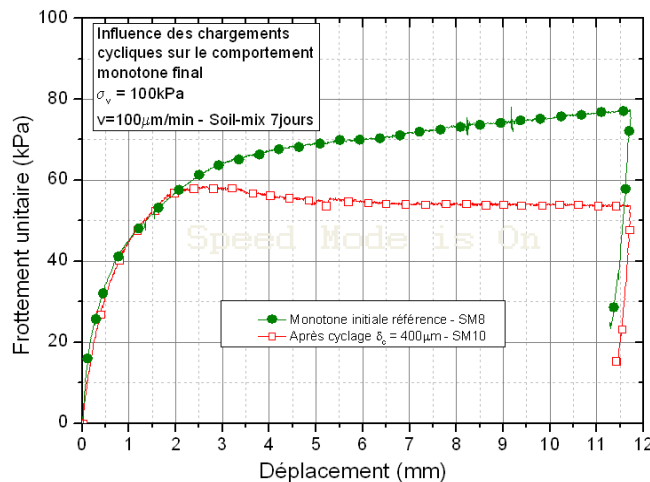


Figure 5. Influence du chargement cyclique sur le comportement monotone de l'interface (massif SM10)

4. Influence de l'amplitude de déplacement cyclique

Des chargements cycliques à déplacement contrôlé ont été réalisés à différents niveaux d'amplitude cyclique. On présente sur la figure 6 les coefficients d'évolution correspondant aux trois niveaux d'amplitude cyclique non-alternée testés : 200 μm (SM9 : 0,25 % d_c), 400 μm (SM10 : 0,5% d_c) et 800 μm (SM11 : 1% d_c).

On peut observer que le renforcement initial du frottement apparaît uniquement pour la plus faible amplitude (200 μm), mais celui-ci reste à un niveau assez faible. Pour les deux

autres amplitudes de chargement (400 et 800 μm), on observe une dégradation dès le début de l'essai, avec un taux d'autant plus important que l'amplitude est grande. Pour l'amplitude de 200 μm , la phase de dégradation est relativement limitée. En ce qui concerne le niveau de dégradation finale, on constate que plus l'amplitude du déplacement cyclique est élevée, et plus l'interface se dégrade vite. Pour le cas des faibles amplitudes cycliques (200 μm), la dégradation est faible ($C_{e,f} = 0,90$ à 60 000 cycles). Par contre, pour l'amplitude la plus élevée (800 μm), le coefficient d'évolution $C_{e,f}$ diminue jusqu'à une valeur de 0,10 après 30 000 cycles.

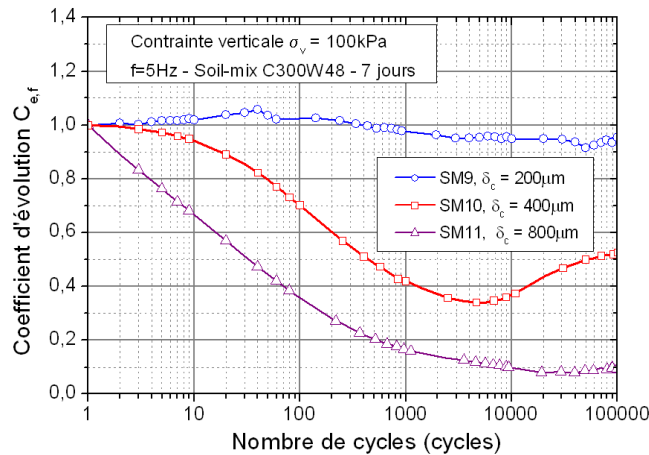


Figure 6. Influence de l'amplitude de déplacement cyclique sur le coefficient d'efficacité $C_{e,f}$

En ce qui concerne les chargements monotones post-cycliques, les résultats sont présentés sur la figure 7. On peut voir, pour tous les essais, que le frottement post-cyclique est toujours inférieur à celui mesuré lors du chargement initial. Pour le niveau d'amplitude cyclique le plus faible (200 μm), le frottement à la rupture est moins dégradé que pour les deux autres amplitudes. Il présente une faible différence par rapport à la courbe de chargement initiale de référence. Pour l'amplitude de 800 μm , on peut constater que le frottement est très dégradé, ce qui est cohérent avec un coefficient d'évolution de 0,1 après 100 000 cycles. Pour l'amplitude intermédiaire de 400 μm , on a un résultat intermédiaire aux deux autres.

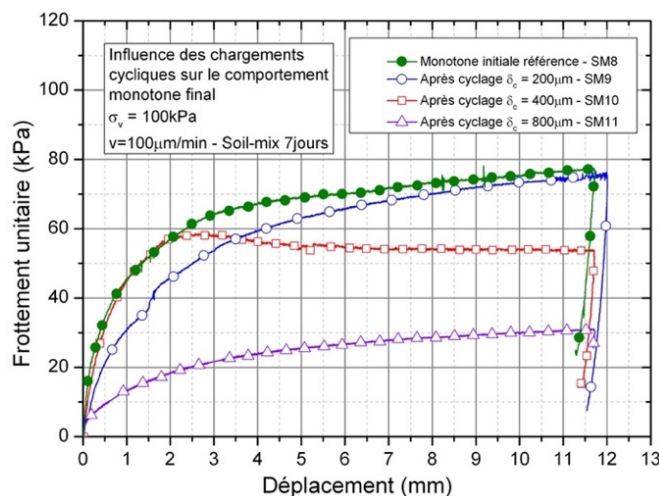


Figure 7. Influence de l'amplitude de déplacement cyclique sur le comportement monotone de l'interface

5. Conclusions

Ce travail a permis d'évaluer le comportement de l'interface sol-inclusion en soil-mix sous chargement monotone et cyclique.

Une première étape a nécessité le développement d'un modèle physique pour reconstituer un tronçon de colonne en soil-mix instrumentée dans un massif environnant et de protocoles d'essais adaptés.

Concernant le chargement monotone, on a pu déterminer le frottement unitaire limite du tronçon de soil-mix. Et les résultats sont cohérents avec des mesures in situ (INNOTRRAK, 2009). Quant aux chargements cycliques à grand nombre de cycles, on a étudié l'influence de l'amplitude du déplacement cyclique sur l'évolution du frottement latéral par l'intermédiaire du coefficient d'évolution $C_{e,f}$ (Tali, 2011). Les évolutions de ce coefficient sont en bon accord avec celles observées dans la littérature dans les matériaux granulaires : phase de dégradation initiale suivie par une phase de renforcement. On a montré que plus l'amplitude du déplacement cyclique est grande et plus la dégradation est importante. Les résultats des essais de chargement monotone post-cyclique ont montré une très bonne cohérence avec les évolutions observées lors des chargements cycliques.

6. Références bibliographiques

- Bruce, D.A. 1996. The return of deep soil-mixing, *Civil Engineering, ASCE*, 44-46.
- Chen, R.-P., Chen, Y.-M. and Xu, Z.Z. 2008. A theoretical solution for pile-supported embankment on soft soil under one-dimensional compression, *Canadian Geotechnical Journal*, 45, 611-623
- Hernandez-Martinez, F.G., Osman, A.A.M. and Al-Tabbaa, A. 2007. Wet soil mix improvement of soft clays and organic soils : Laboratory investigation, Proceedings of the XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid, Vol. 3, 1329-1334
- Ishikura, R., *et al.* 2007. Estimation of the settlement of improved ground with floating-type cement-treated columns *Soft Soil Engineering - Chan & Law (eds)*, 625-635.
- INNOTRACK 2009. Rapport du projet - D.2.2.5 - Subgrade reinforcement with columns Part 1 Vertical columns, Part 2 Inclined columns, *INNOTRACK D2.2.5*.
- Kasali, G. and Taki, O. 2003. Design and Construction Aspects of Soil Cement Columns as Foundation Elements. Proceedings of 3rd International Specialty Conference on Grouting and Ground Treatment, 540-551
- Le, V.C. 2014. Etude sur modèle physique du renforcement des sols par colonnes en « soil-mix ». Application aux plates-formes ferroviaires. Thèse de doctorat, *Université Paris Est*.
- Le Runigo, B. 2008. Durabilité du limon de Jossigny traité à la chaux et soumis à différentes sollicitations hydriques : Comportements hydraulique, microstructural et mécanique. Thèse de doctorat, Université de Nantes.
- Schwarz, W. and Raithel, M. 2005. Stabilization of soft organic soils with cement columns using the Mixed-in-Place technique (MIP) for a railway embankment. International Conference on Deep Mixing, Stockholm, Sweden, 289-296.
- Shen, S.-L., Miura, N. and Koga, H. 2003. Interaction mechanism between deep mixing column and surrounding clay during installation, *Can. Geotech. J.*, 40, 293-307.
- Tali, B. 2011. Comportement de l'interface sol-structure sous sollicitations cycliques. Application au calcul des fondations profondes. Thèse de doctorat, *Université Paris Est*.
- Topolnicki, M. 2004. Chapter 9: In situ soil mixing. In M.P.M.K. Kirsch (Ed.), *Ground Improvement* (pp. 331–423). Abingdon, UK: Spon Press