

MODELE REDUIT D'UN MASSIF DE SOL RENFORCE PAR INCLUSIONS RIGIDES SOUS CHARGEMENT CYCLIQUE

SMALL SCALE MODEL OF SOIL IMPROVEMENT USING RIGID PILES UNDER CYCLIC LOADING

Moustafa HOUDA^{1,2,3}, Oriane JENCK^{1,2}, Fabrice EMERIAULT^{1,2}

¹ Université Grenoble Alpes, 3SR, Grenoble, France

² CNRS, 3SR, Grenoble, France

³ LOCIE, Université Savoie Mont Blanc, Le Bourget du Lac, France

RÉSUMÉ – Un modèle réduit de laboratoire sous gravité normale permet l'analyse des mécanismes qui se développent dans une plate-forme de transfert de charge constituée d'un matériau granulaire, érigée sur un horizon de sol compressible renforcé par inclusions rigides verticales, lors de l'application d'un chargement cyclique en surface. Des essais sont réalisés avec 2 conditions limites de chargement en surface de la plateforme.

ABSTRACT – A laboratory small scale model under normal gravity permits the study of the mechanisms developing in a granular load transfer platform, built on a soft soil layer improved by vertical rigid piles, when a cyclic loading is applied on surface. Tests are performed with 2 boundary conditions for the loading on top of the platform.

1. Introduction

La technique du renforcement des sols par inclusions rigides verticales (Fig. 1) a été largement étudiée sous chargement monotone et a fait l'objet de recommandations pour le contexte français (IREX, 2012) suite au Projet National ASIRI. Cette technique diffère des pieux classiques dans la mesure où les inclusions ne sont pas liées à la structure en surface : une plateforme de transfert de charge (PTC) est intercalée entre le sol compressible renforcé et l'ouvrage en surface. Dans cette étude, le cas d'une PTC d'épaisseur limitée associée avec un dallage en surface est plus particulièrement étudié.

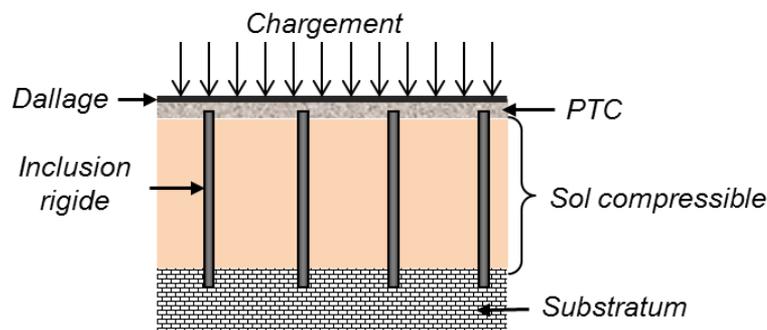


Figure 1. Coupe schématique qu'un massif de sol renforcé par inclusions rigides – cas dallage.

Des situations de chargement cyclique en surface se rencontrent par exemple lors de la vidange et du remplissage de réservoirs, des chargements et déchargements

successifs de zones de stockage... pour ne citer que les cas de chargement cyclique lent, quasi-statique, auxquels s'intéresse en premier lieu cette étude. Cependant, le comportement de l'ouvrage sous ce type de chargement est encore très peu appréhendé, et appelle donc à des travaux de recherche supplémentaires.

L'approche par modélisation physique a déjà été mise en œuvre pour mieux comprendre le comportement de ce type d'ouvrage sous sollicitation monotone, sous gravité normale (van Eekelen *et al.*, 2012) ou en centrifugeuse (Blanc *et al.*, 2013 ; Okyay *et al.*, 2013). Heitz et Kempfert (2007) ont étudié l'influence d'un chargement cyclique de type trafic routier (fréquence de chargement entre 3 et 5 Hz) sur un modèle réduit 1g.

L'étude présentée dans cette communication consiste donc en une approche par modélisation physique à échelle réduite et sous gravité normale pour le cas d'une PTC d'épaisseur relativement faible (à la différence du cas « remblai »). L'objectif est de contribuer à la compréhension du comportement de cette dernière sous chargement cyclique lent (sans développement d'effets dynamiques).

2. Présentation du modèle réduit et des essais réalisés

2.1. Dispositif expérimental, instrumentation et matériaux

Un modèle réduit de laboratoire, sous gravité normale, a été développé avec un facteur d'échelle de 1/10 sur les longueurs. L'objectif de cette modélisation physique est d'étudier le comportement du système lorsqu'il est soumis à un chargement cyclique vertical, uniforme et quasi statique, par la réalisation d'études paramétriques : influence du chargement cyclique et de la séquence de chargement, influence de la présence d'un dallage en surface.

Le dispositif expérimental (Fig. 2 et 3) consiste en une cuve rigide de section carrée de 1m x 1m contenant 16 inclusions en aluminium de 35mm de diamètre, disposées suivant un maillage carré avec un espacement de 200mm. Le taux de recouvrement, défini comme étant la proportion de la surface totale couverte par les inclusions, est alors de 2,4%. 4 demi-inclusions ont été positionnées le long d'un des bords de la cuve, équipé d'une fenêtre de visualisation (Fig. 3), afin de suivre les déplacements dans le massif et de les mesurer par l'utilisation d'une technique de corrélation d'images numériques.

L'instrumentation du modèle est localisée dans la zone centrale du modèle : les têtes des quatre inclusions centrales sont équipées de capteur de force et trois capteurs de déplacement prolongés par des tiges à travers la couche de sol compressible permettent de mesurer le tassement en base de la PTC (Fig. 2). Les capteurs de force en tête des inclusions permettent notamment de mesurer la proportion de la charge globale appliquée (charge en surface, poids propre de la dalle et de la PTC) qui est transmise vers les inclusions. Cette proportion est couramment appelée « efficacité ». Un capteur de pression relié à un coffret régulateur permet de mesurer puis d'ajuster la pression d'eau appliquée dans la membrane de chargement en surface du modèle, afin de piloter la charge verticale, notée P_m , appliquée en surface du modèle.

L'horizon de sol compressible, d'une épaisseur de 400mm dans le modèle réduit, en réalité constitué de sol argileux ou limoneux, est modélisé ici par un mélange de sable de Fontainebleau et de billes de polystyrène expansé (sans déformation différée due à un réel phénomène de consolidation). De l'eau ($w = 10\%$) est ajoutée afin d'éviter la ségrégation du mélange lors de la mise en place (Dinh, 2010). Le poids volumique en place de ce matériau est de $4,5\text{kN/m}^3$ et les propriétés de compressibilité ont été déterminées par une campagne d'essais œdométriques ($C_c = 1,8$, $e_0 = 7$ en considérant le polystyrène comme du vide).

La PTC de 100mm d'épaisseur est constituée de graviers concassés 2-6mm. Cette valeur est inférieure à la valeur de 174mm qui serait nécessaire pour obtenir un plan d'égal tassement dans la plateforme, d'après les recommandations ASIRI (IREX, 2012). Après mise en œuvre dans le modèle, le poids volumique est de $14,8\text{kN/m}^3$ et l'indice de densité $I_D = 0,75$. Une campagne d'essais triaxiaux sous chargements monotones et cycliques a été réalisée au laboratoire CERMES dans l'objectif de caler des paramètres de modélisation numérique. Le sol est sans cohésion et l'angle de frottement est de 45° .

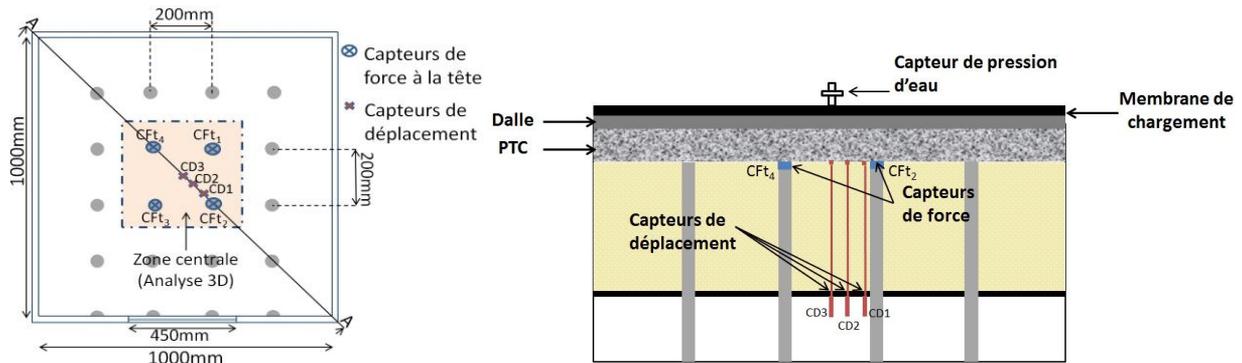


Figure 2. Vue en plan (gauche) et coupe schématique du modèle réduit de laboratoire (droite)

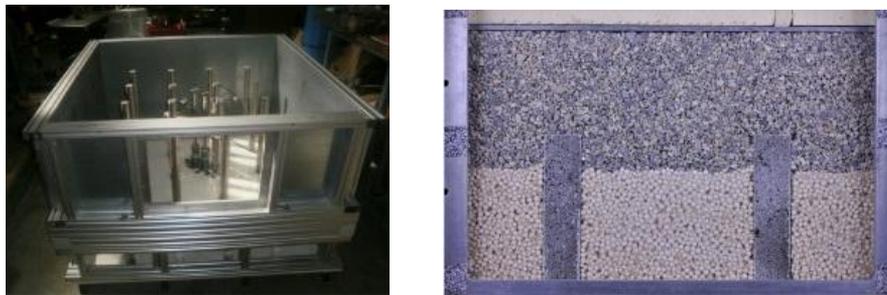


Figure 3. Photographie du dispositif expérimental (gauche) et photographie prise à travers la fenêtre latérale de visualisation (droite)

2.2. Protocole expérimental

Les bords intérieurs de la cuve sont graissés et recouverts d'un film polyane, afin de limiter les effets de bord. Après positionnement des inclusions et des capteurs dans la cuve, celle-ci est remplie des 180kg de matériau compressible, par couches successives sur une épaisseur de 400mm, jusqu'au niveau des têtes d'inclusion. Un film de polyane de très faible raideur et percé de trous au niveau des inclusions permet la séparation entre le sol compressible et la PTC. La PTC de 100mm est mise en place en 4 couches de 25mm (masse totale de 150kg), compactée avec un compacteur manuel, suivant un protocole précis. Une plaque d'acier de même section que la cuve est positionnée en surface de la PTC (dalle rigide), sur laquelle on place le vérin-membrane souple, également de même section que la cuve. La cuve est enfin fermée par un couvercle rigide. 12 heures plus tard commence la phase de chargement en surface, par mise en pression du vérin-membrane.

2.3. Technique de corrélation d'images numériques

L'analyse par imagerie s'avère être un outil intéressant pour analyser le comportement de ce type d'ouvrage en termes de champ de déplacement (Jenck *et al.*, 2007 ; Eskisar *et al.*, 2012). Cette technique est également mise en œuvre dans la présente étude.

Le champ de déplacements au niveau de la fenêtre de visualisation est mesuré par une technique de corrélation d'images, appliquée sur des photographies numériques prises à différentes étapes du chargement (Fig. 3). La résolution des photographies est de 24 Mpixels, alors 1 pixel équivaut à 75 μ m. Une technique de corrélation d'images particulière a été mise en œuvre, la technique *Particle Image Tracking*, implantée dans le code Tracker développé au laboratoire 3SR par (Combe et Richefeu, 2013). Cette technique permet le suivi individuel de chaque grain en 2D (Houda *et al.*, 2014).

2.4. Campagne expérimentale réalisée

Une vaste campagne expérimentale a été réalisée (Houda, 2016) afin d'évaluer l'effet des cycles appliqués à très basse fréquence sur le comportement du système. Les deux types de conditions limites en surface sont abordés : avec et sans dalle rigide en surface. Pour le cas dallage, un déplacement uniforme est appliqué en surface de la PTC alors que pour le cas sans dallage, une pression uniforme est appliquée en surface via la membrane de chargement souple. Tous les essais présentés dans cette communication ont été réalisés sur une PTC de 100mm d'épaisseur. Trois configurations de chargement ont été étudiées (Fig. 4) : un chargement monotone (M) et deux chargements cycliques avec une pression en surface entre 10 et 20kPa (C1 et C2). Pour le cas cyclique C2, un préchargement du système en surface jusqu'à 30kPa est appliqué avant la réalisation des cycles. Chaque essai a été réalisé au moins deux fois afin de s'assurer de la bonne répétabilité des résultats, dans un objectif de validation du dispositif expérimental (Houda *et al.*, 2014). Les niveaux de chargement de la PTC entre 10 et 20kPa correspondraient à un chargement de 100 à 200kPa dans le prototype, soit une charge statique de 100kPa et une amplitude des cycles de 100kPa, soit 10m d'eau.

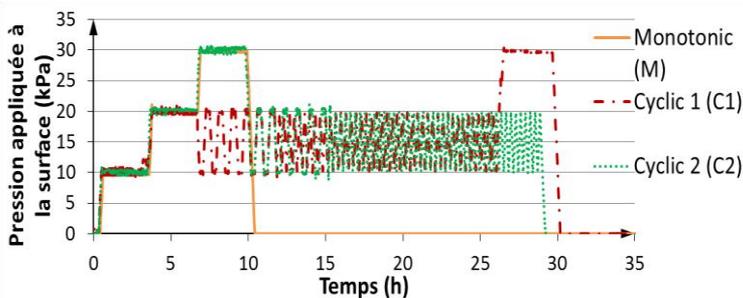


Figure 4. Pression appliquée en surface (P_m) pour les 3 configurations d'essai

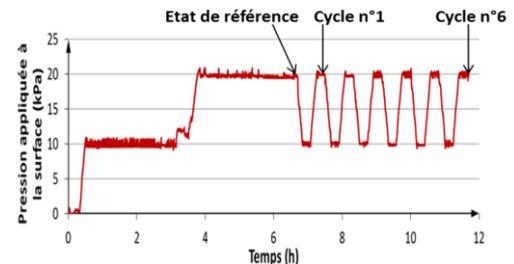


Figure 5. Six premiers cycles de l'essai C1 où l'analyse par imagerie a été réalisée

3. Analyse des résultats

Lors de chaque essai, la force en tête des quatre inclusions centrales est mesurée et une répartition homogène de la charge appliquée en surface a été obtenue, à 10% près (Houda, 2016). Seule la valeur moyenne de la force en tête des inclusions est alors présentée, et l'efficacité est calculée à partir de cette force moyenne et de la charge totale

appliquée sur la zone d'influence des quatre inclusions centrales (l'efficacité est le rapport de ces deux valeurs).

3.1. Influence du chargement cyclique (en présence d'une dalle rigide en surface)

La figure 6 montre que la force en tête des inclusions n'évolue que faiblement lors de l'application des cycles (elle a tendance à légèrement augmenter). Ce maintien d'un report de charge efficace vers les inclusions est bien probablement dû à la présence d'une dalle rigide en surface, associée à une PTC de relativement faible épaisseur. On observe également que la force moyenne mesurée pour un chargement en surface de 30kPa est identique pour le cas du chargement monotone et pour le chargement cyclique : l'application des cycles ne change pas la force en tête des inclusions – et donc les mécanismes de transfert de charge - lors d'un chargement ultérieur plus important.

Sur la figure 7, on observe une accumulation du tassement au centre du modèle, en base de la PTC (D3 est mesuré par le capteur CD3, cf. Fig. 2) lors de l'application des cycles. A chaque cycle, l'accumulation de tassement s'effectue en fin de phase de rechargement, pour P_m entre 17 et 20kPa. L'accumulation de tassement est plus grande lors des premiers cycles, puis elle se réduit au cours des cycles, sans toutefois disparaître. Le tassement supplémentaire mesuré lors de la phase de chargement P_m de 20 à 30kPa est plus faible dans le cas du chargement cyclique préalable (3mm contre 8mm pour l'essai M_D).

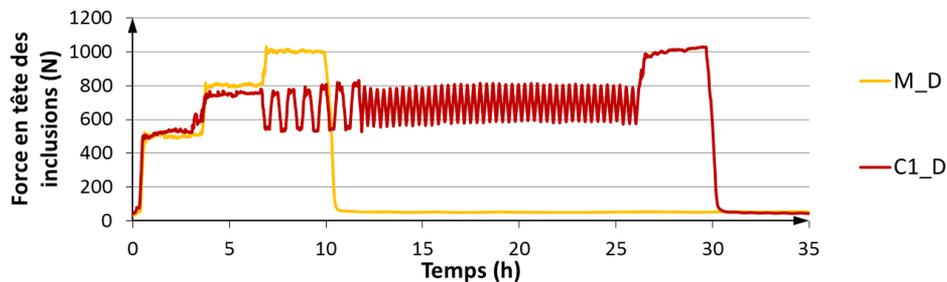


Figure 6. Force moyenne en tête des inclusions pour les essais monotone (M_D) et cyclique (C_D) avec dalle.

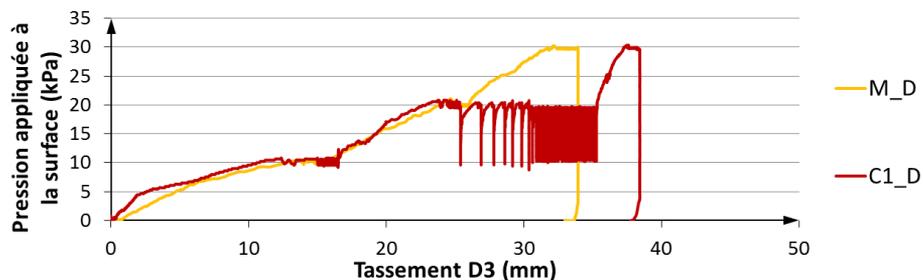


Figure 7. Tassement en base de la PTC pour les essais monotone et cyclique

La corrélation d'image a été appliquée sur les six premiers cycles (Fig. 5). L'état de référence correspond à la fin de la phase de chargement monotone $P_m = 20$ kPa. Chaque image de la figure 8 correspond au champ de déplacement obtenu à $P_m = 20$ kPa, après n cycles. Chaque polygone de couleur correspond à un grain visible dont le déplacement a pu être mesuré par la technique. La figure 8 met en évidence l'accumulation des déplacements au cours des cycles, notamment à la base de la PTC, entre les inclusions. On voit clairement une zone de tassement quasiment nul au-dessus des inclusions, tout

au long du chargement cyclique, mais cette zone n'atteint pas le niveau de la dalle. La technique a également permis de vérifier les déplacements homogènes de la dalle en surface (hypothèse de la dalle rigide).

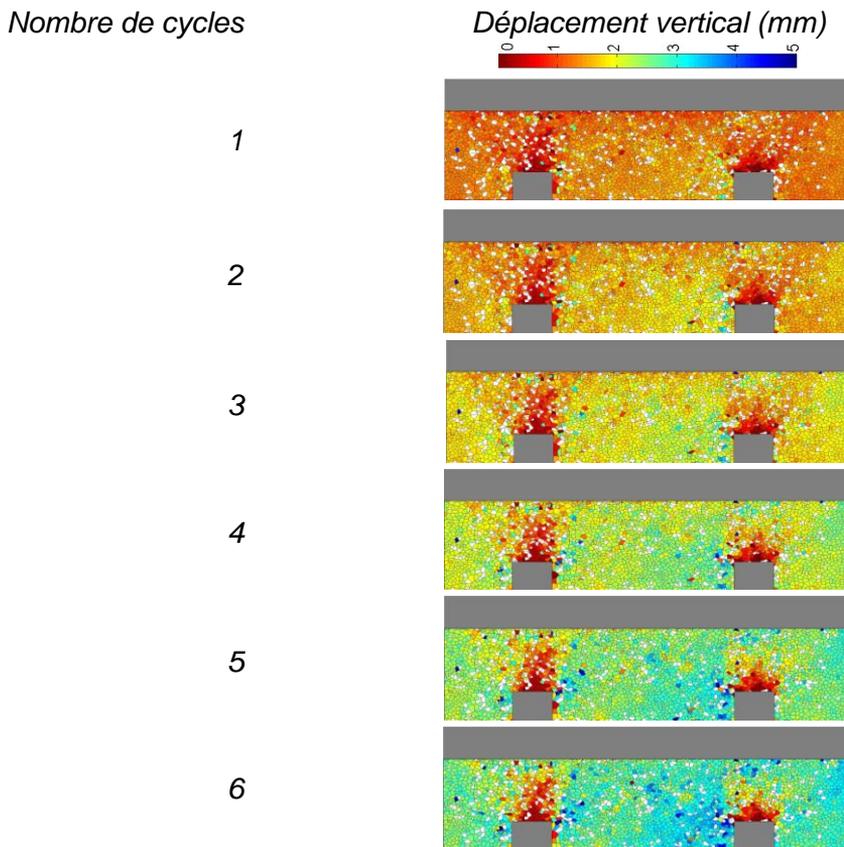


Figure 8. Champ de déplacement vertical à la fin de chacun des six premiers cycles

3.2. Influence d'un préchargement du massif avant l'application des cycles

La Figure 9 présente le tassement D3 et l'efficacité du système avant et après l'application des cycles, pour les essais C1, non préchargé, et C2, préchargé à $P_m = 30\text{kPa}$ avant application des cycles. Cette figure illustre l'influence du préchargement du système lors d'un chargement cyclique : l'accumulation des tassements au cours des cycles est moindre alors qu'il n'y a pas d'influence sur l'efficacité. Cependant, les tassements obtenus avant l'application des cycles sont plus faibles pour l'essai non préchargé (25mm contre 35mm pour C2) et donc, malgré une accumulation cyclique plus importante, le tassement final après les cycles est équivalent pour les deux essais.

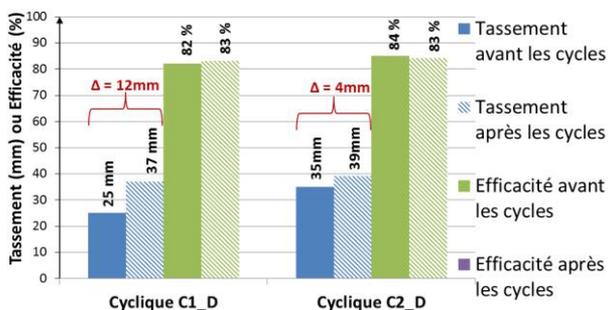


Figure 9. Influence du préchargement du massif sur les tassements et sur l'efficacité.

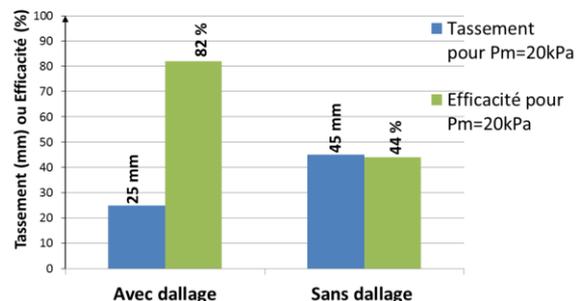


Figure 10. Influence de la présence de la dalle rigide sous chargement monotone.

3.3. Influence de la présence d'une dalle rigide en surface

Sous chargement monotone, les tassements sont plus faibles et l'efficacité est plus importante en présence du dallage en surface (Fig. 10). Cette différence en termes d'efficacité illustre bien le rôle bénéfique de la dalle rigide dans le report de charge vers les inclusions évoqué au §3.1. Des résultats similaires ont été obtenus en centrifugeuse (Okyay *et al.*, 2013). Sous chargement cyclique, l'accumulation de tassement au cours des cycles est plus importante en présence d'une dalle rigide en surface (Fig. 11). Cependant, le tassement final dû à la charge en surface P_m est toujours plus faible pour le cas d'une dalle en surface. Sans dalle rigide en surface, l'efficacité diminue légèrement au cours des cycles.

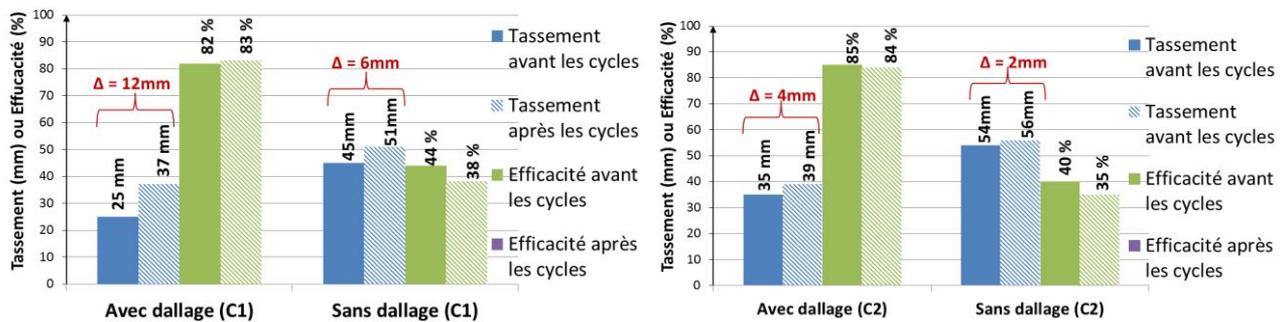


Figure 11. Influence de la présence de la dalle rigide sous chargement cyclique C1 (gauche) et sous chargement cyclique C2 (droite)

4. Conclusions

Une campagne expérimentale a été réalisée sur un modèle réduit 1g tridimensionnel de laboratoire simulant un massif de sol renforcé par inclusions rigides verticales et une plateforme de transfert de charge de relativement faible épaisseur. Le modèle est instrumenté de capteurs de force et de déplacement et une fenêtre latérale permet l'application d'une méthode de corrélations d'images numériques. L'objectif de la modélisation est l'étude de l'influence d'un chargement cyclique lent appliqué en surface, pour une plateforme de transfert de charge de faible épaisseur, sous un dallage. Afin d'analyser l'influence de ce dernier élément, des essais sans dalle en surface ont également été réalisés.

Les essais réalisés sous chargement cyclique montrent une accumulation des tassements dans la plateforme, en particulier lors des 10 premiers cycles, où se produit 50% de l'accumulation totale de tassement. Les résultats donnés par les capteurs de déplacement et par l'imagerie numérique sont en bonne concordance et montrent que l'accumulation de tassement s'effectue, à chaque cycle, pour le chargement proche de la valeur maximum. L'efficacité du système est très peu affectée par le chargement cyclique.

Un comportement très différent en fonction de la présence ou non d'une dalle rigide en surface a été observé, montrant l'influence des conditions aux limites en surface de la plateforme de transfert de charge sur le comportement global de l'ouvrage.

Sous gravité normale, toutes les règles de similitude entre modèle réduit et prototype ne peuvent pas être strictement respectées. De plus, des matériaux analogiques ont été mis en œuvre. Ainsi les résultats obtenus ne peuvent pas être directement transposables à un cas réel. Cependant, ce modèle de laboratoire permet d'améliorer la compréhension des mécanismes qui se développent dans le massif sous chargement cyclique et permet la mise en évidence des paramètres influents. De plus, les résultats expérimentaux obtenus sur ce modèle de laboratoire servent de base de données physiques pour le

développement et la validation d'une approche de modélisation numérique afin de prendre en compte le comportement sous chargement cyclique de ce type d'ouvrage. Cette modélisation numérique a pour objectif final la prédiction du comportement d'ouvrages à échelle réelle, mais est également mise en œuvre afin d'apporter un éclairage supplémentaire pour la compréhension fine des mécanismes qui se développent dans l'ouvrage au cours des cycles.

5. Remerciement

Les auteurs remercient la Direction Technique et de la Recherche de la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP) pour le soutien apporté à cette étude, J. Canou (ENPC) pour son accueil pour la réalisation d'essais de caractérisation, L. Thorel (IFSTTAR), J. Canou (ENPC), Ph. Gotteland (FNTP), S. Brûlé (Menard) et L. Briançon (INSA Lyon) pour leurs conseils sur ce travail, G. Combe pour l'aide apportée pour la mise en œuvre de la corrélation d'images, J.B. Toni et G. Vian pour l'aide technique pour la réalisation des essais.

6. Références bibliographiques

- Blanc M., Rault G., Thorel L., Almeida M. (2013). Centrifuge investigation of load transfer mechanisms in a granular mattress above a rigid inclusions network. *Geotextiles and Geomembranes*, vol 36, pp 92-105.
- Briançon L., Dias D., Simon S. (2015). Monitoring and numerical investigation of a rigid inclusions– reinforced industrial building. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 52
- Combe G. Richefeu V. (2013). Tracker: a Particle Image Tracking (PIT) technique dedicated to nonsmooth motions involved in granular packings. *Powders and Grains, July 8-12, Sydney, Australia*.
- Dinh A.Q. (2010). *Etude sur modèle physique des mécanismes de transfert de charge dans les sols renforcés par inclusions rigides*. Application au dimensionnement. Thèse de doctorat de l'Ecole des Ponts, Paris.
- Eskisar T., Otani J., Hironaka J. (2012). Visualization of soil arching on reinforced embankment with rigid pile foundation using X-ray CT. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 32, pp. 44–54.
- Heitz C., Kempfert H.G. (2007). Bewehrte Erdkörper über Pfählen unter ruhender und nichtruhender Belastung. *Bauingenieur*, Issue 9, pp. 380-387. En allemand.
- Houda M., Jenck O., Emeriault F. (2014). Physical evidence of the effect of vertical cyclic loading on soil improvement by rigid piles: a small-scale laboratory experiment using Digital Image Correlation. *Acta Geotechnica*, doi 10.1007/s11440-014-0350-z.
- Houda M. (2016). *Comportement sous chargement cyclique des massifs de sol renforcés par inclusions rigides : expérimentation en laboratoire et modélisation numérique*. Thèse de doctorat de l'Université Grenoble Alpes, France.
- IREX (2012). Recommandations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration : Projet National ASIRI. Presses des Ponts, Paris.
- Jenck O., Dias D., Kastner R. (2007). Two-dimensional physical and numerical modeling of a pile-supported earth platform over soft soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 133, pp. 295–305.
- Okyay U.S., Dias D, Thorel L, Rault G. (2013). Centrifuge modeling of a pile-supported granular earth-platform. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Van Eekelen S.J.M, Bezuijen A., Van Tol A.F. (2012). Model experiments on piled embankments. Part I. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 32, pp. 82–94.