

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Retro-analyse numérique du comportement d'un massif de sol renforcé par inclusions rigides sous chargement cyclique

Numerical back analysis of the behaviour of soft soil improved by rigid piles under cyclic loading

Moustafa Houda, Oriane Jenck, Fabrice Emeriault

3SR Laboratory, Grenoble Alps University, France, orianne.jenck@3sr-grenoble.fr

RÉSUMÉ : le comportement sous chargement cyclique des massifs de sols renforcés par inclusions rigides, en particulier en ce qui concerne les mécanismes de transfert de charge dans la plate-forme, pose toujours question et nécessite des travaux de recherche complémentaires. Une étude numérique avec une approche continue a été réalisée, sous chargement cyclique vertical en surface à basse fréquence (représentant le cas des cycles de remplissages et vidanges de réservoirs, des chargements et déchargements successifs de zones de stockage, etc.). Cette étude est développée à partir de données expérimentales préalablement obtenues sur un modèle réduit sous gravité normale, sous chargement monotone et diverses configurations de chargement cyclique, simulant le cas d'une plateforme de relativement faible épaisseur, placée au-dessus du sol renforcé par inclusions. Le comportement du sol compressible est modélisé par le modèle Cam-Clay et celui de la plateforme par le modèle élastoplastique CY-soil. Les résultats numériques sont confrontés aux résultats expérimentaux, sous chargement monotone et sous chargement cyclique, afin de conclure sur l'aptitude du modèle numérique développé à simuler le comportement observé de l'ouvrage.

ABSTRACT: The behaviour under cyclic conditions of soft soil improved using rigid piles, and in particular the load transfer mechanisms taking place in the platform, is still an open question and thus appeals to additional research works. A numerical study in a continuum has been performed, with low frequency cyclic surface loading (representing the case of filling and emptying of reservoirs, loading and unloading of storage areas, etc.). This study is developed based on experimental data obtained on a 1g laboratory small scale model, under monotonic and various cyclic loading configurations, simulating the case of a relatively thin granular load transfer platform, placed on top of the improved soil. The soft soil behaviour is simulated with the modified Cam-Clay model and the load transfer platform behaviour with the elastoplastic CY-soil model. The numerical results are compared to the experimental results, in order to conclude on the capacity of the developed numerical model to simulate the observed structure's behaviour.

MOTS-CLES: renforcement de sols, inclusions rigides, modélisation numérique en milieu continu, chargement cyclique.

1 INTRODUCTION

La technique du renforcement par inclusions rigides a été largement étudiée sous chargement monotone (IREX 2012), les études (*in situ*, en laboratoire et numériques) mettant en évidence les différents mécanismes d'interaction qui se développent entre le sol, les inclusions et le matelas de répartition. Cependant, le comportement sous chargement cyclique, en particulier la pérennité des mécanismes qui se développent dans la plate-forme de transfert de charge, pose toujours question et nécessite alors des travaux de recherche complémentaires.

Heitz *et al.* (2008), par une modélisation de laboratoire à échelle réduite plus spécifiquement axée sur la contribution d'un renforcement supplémentaire par géosynthétique, ont montré une réduction de la charge transmise aux inclusions au cours des cycles (appliqués à une fréquence de 1 Hz) pour le cas sans renforcement supplémentaire par géosynthétique. La rétro-analyse numérique (Heitz 2006) implémentant un modèle viscoplastique a montré une bonne concordance en termes de tassement mais une surestimation numérique de la charge transmise aux inclusions. Moormann *et al.* 2016, par une modélisation aux Eléments Finis utilisant un modèle de comportement hypoplastique, ont montré une réduction de la charge sur l'inclusion au cours des cycles lorsque la hauteur de remblai devient assez faible (pour un rapport entre la hauteur du remblai et la distance entre deux bords d'inclusions inférieur à 0,76).

Cette communication présente les premiers résultats d'une modélisation numérique en milieu continu sous chargements monotones et cycliques, et les compare à des résultats expérimentaux obtenus sur un modèle réduit de laboratoire 1g,

afin de pouvoir discuter la pertinence des outils numériques mis en œuvre pour la prise en compte du comportement sous chargement cyclique de l'ouvrage.

2 MODELE REDUIT DE LABORATOIRE

2.1 Modèle réduit de laboratoire

Afin d'étudier les mécanismes sous chargement cyclique, un modèle réduit sous gravité normale et à l'échelle 1/10^{ème} sur les longueurs a été développé au laboratoire 3SR par Houda *et al.* (2016). Le dispositif consiste en une cuve rigide de section 1 m × 1m (Fig. 1).

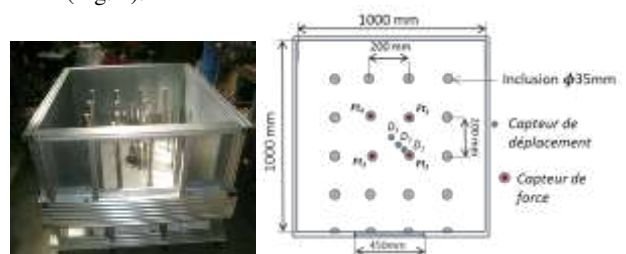


Figure 1. Modèle réduit de laboratoire (photographie avant mise en œuvre des matériaux et vue en plan schématique).

Il contient 16 inclusions en aluminium de diamètre 35 mm, espacées suivant un maillage carré de 200 mm (le taux de recouvrement, proportion de la surface couverte par les inclusions, est alors de 2,4 %). De plus 4 demi-inclusions disposées le long d'un bord de l'ouvrage, derrière une vitre permettent la prise d'images et l'application d'une méthode de corrélation d'images numériques (Combe et Richefeu 2013),

afin d’obtenir le champ de déplacement. Le dispositif est instrumenté en capteurs de force en tête des inclusions et capteurs de tassement en base de la plateforme granulaire. La Plateforme de Transfert de Charge (PTC) a une épaisseur de 100 mm dans cette partie de l’étude. Le chargement (monotone ou cyclique) est appliqué en surface via une membrane sous pression d’eau (P_m), permettant l’application d’une charge verticale uniforme sur toute la section du dispositif. Une dalle rigide peut être mise en place entre la surface de la plateforme et la membrane. Dans ce cas, un tassement uniforme est appliqué en surface.

2.2 Matériaux mis en œuvre

Le sol compressible est simulé par un mélange de billes de polystyrène expansé et de sable de Fontainebleau, dont le comportement en compressibilité a été caractérisé par des essais œdométriques effectués sur une cellule de 150 mm de diamètre, ce qui a permis d’identifier les paramètres pour la modélisation numérique. Le sol de la PTC est constitué de gravillons concassés de diamètres 2-5 mm, dont le comportement a été caractérisé par une campagne d’essais triaxiaux sous chargement monotone et chargement cyclique.

2.3 Campagnes expérimentales

Le principal objectif de l’étude expérimentale est d’analyser l’évolution des mécanismes, principalement dans la PTC, lors de l’application de cycles de chargement-déchargement, à basse fréquence (pas d’effets dynamiques). Les campagnes expérimentales réalisées sur ce modèle de laboratoire ont permis d’identifier l’influence de divers paramètres (Houda 2016) :

- épaisseur de la PTC : 50 ou 100 mm. Dans cette communication, seule une PTC de 100 mm est considérée,
- présence ou non d’une dalle rigide en surface, afin d’identifier l’influence des conditions limites en surface (chargement uniforme ou déplacement uniforme),
- chargement cyclique vertical en surface, par comparaison avec les résultats obtenus sous chargement monotone jusqu’à une pression P_m de 30 kPa. Des cycles (en général 50) ont été appliqués entre 0 et 10 kPa ou entre 10 et 20 kPa, avec ou sans préchargement du système jusqu’à $P_m = 30$ kPa.

Chaque configuration d’essai a été réalisée au moins deux fois, afin de vérifier la répétabilité des essais et ainsi augmenter la fiabilité des résultats expérimentaux. Tous ces essais (au total, dix configurations différentes) constituent une base de données expérimentale riche, afin de développer et valider des approches de modélisation numérique. Dans cette communication, quatre configurations différentes sont considérées pour la modélisation numérique : avec et sans dalle en surface, chargement monotone et chargement cyclique de pression dans la membrane P_m entre 10 et 20 kPa (sans préchargement préalable).

3 MODELE NUMERIQUE

3.1 Modèle numérique et stratégie de simulation

Les campagnes expérimentales sur le modèle réduit servent de référence pour développer et valider une approche de modélisation en milieu continu, avec le logiciel Flac3D (v 4.00.32) basé sur la méthode des différences finies. De par les conditions de symétrie du modèle physique, seule une cellule élémentaire est modélisée (Fig. 2) dont les limites verticales respectent les conditions de symétrie (blocage des nœuds dans la direction normale au plan). Les nœuds du plan constituant la limite inférieure du modèle sont bloqués verticalement. Des interfaces sont créées entre les différents éléments du système (inclusions, sol compressible et PTC) afin

de permettre les déplacements relatifs entre ceux-ci. Le modèle numérique comporte 5 300 zones (Fig. 2). Les séquences de modélisation reproduisent les étapes suivies expérimentalement : équilibre du massif de sol compressible et inclusion sous poids propre, activation de la première couche de PTC de 50 mm et équilibre du système sous poids propre, idem pour la seconde couche de 50 mm ; pour le cas sans dallage : application progressive d’une contrainte uniforme en surface ; pour le cas dallage : application d’un déplacement vertical uniforme sur les nœuds de la surface du modèle (à une vitesse suffisamment faible afin de garantir un état d’équilibre quasi-statique), tout en contrôlant la contrainte verticale équivalente totale afin d’atteindre la valeur souhaitée (valeur de P_m).

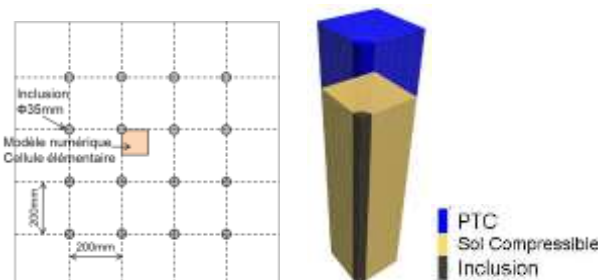


Figure 2. Modèle numérique

3.2 Modélisation du comportement des matériaux

Le comportement du sol compressible est représenté par le modèle Cam Clay modifié, implanté dans le logiciel et dont les paramètres importants pour cette modélisation sont identifiés à partir des résultats des essais œdométriques (tableau 1). C’est en effet la compressibilité de cette partie du système qui entre en jeu.

Tableau 1. Paramètres du modèle Cam-Clay modifié

Pente de la droite de consolidation normale dans le plan $\ln p - v$	λ	0,8
Pente de la droite de déchargement dans le plan $\ln p - v$	κ	0,01
Pression de référence	p_1 (kPa)	1
Pente de la droite d’état critique dans le plan $p - q$	M	1,3
Module de cisaillement	G (MPa)	10
Volume spécifique pour la pression de référence ($v = 1 + e$)	v_λ	10
Pression de préconsolidation	p_{c0} (kPa)	3

Le comportement du sol constituant la PTC est modélisé par le modèle CY-soil. Il s’agit d’un modèle élastoplastique non linéaire à deux mécanismes à écrouissage isotrope, un mécanisme en cisaillement et un mécanisme en compression (Detournay *et al.* 2014). Les paramètres du modèle ont été identifiés à partir de résultats d’essais triaxiaux monotones et cycliques effectués au CERMES de l’Institut Navier sur des éprouvettes de sol de la PTC et sont donnés dans le tableau 2. Dans cette étude, seul le mécanisme en cisaillement est considéré. Le modèle CY-soil, bien que d’une complexité largement supérieure au modèle « classique » élastique-parfaitement plastique avec critère de rupture de Mohr-Coulomb, n’est *a priori* pas complètement indiqué pour prendre en compte le comportement sous chargement cyclique du matériau granulaire, de par le mécanisme en cisaillement à écrouissage isotrope. En revanche, les non-linéarités du modèle permettent de prendre en compte certains aspects liés à

l'application des cycles, comme illustré plus loin. Le choix de ce modèle a été fait, dans un premier temps, car il est implanté dans le logiciel et que l'utilisation de modèle plus complexes dédiés au comportement cyclique nécessite des développements supplémentaires.

Tableau 2. Paramètres du modèle CY-soil

Module de cisaillement de référence	G_{ref} (MPa)	400
Coefficient de Poisson	ν	0,4
Pression de référence	P_{ref} (kPa)	50
Exposant pour le calcul du module	m	1
Angle de frottement ultime	Φ_r (deg.)	45
Angle de frottement mobilisé	Φ_m (deg.)	table
Cohésion	c (kPa)	0
Angle de dilataance ultime	Ψ_r (deg.)	10
Angle de dilataance mobilisé	Ψ_m (deg.)	table
Ratio de rupture	R_f	0,95
Facteur de calibration	β	0,35

4 RESULTATS NUMERIQUES ET CONFRONTATION AUX RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les résultats numériques et expérimentaux sont principalement confrontés en termes d'efficacité et de tassement en base du matelas. L'efficacité est définie comme la proportion de la charge totale en base de la PTC qui est transmise vers les inclusions. Expérimentalement, la charge transmise sur une inclusion est la moyenne des quatre valeurs mesurées en tête des inclusions centrales, instrumentées de capteurs de force (cf. Fig. 1). La charge totale correspond au poids du matelas, de la dalle et de la charge due à la pression dans la membrane. Les tassements en base de la PTC sont mesurés par les capteurs de déplacement D1 à D3. Le capteur D3 est localisé au centre du modèle, à égale distance des quatre inclusions centrales.

4.1 Résultats sous chargement monotone

Sous chargement monotone mené jusqu'à une pression en surface $P_m = 30$ kPa, le modèle numérique représente correctement l'efficacité du système en termes d'efforts transmis aux inclusions à partir de $P_m = 10$ kPa (Fig. 3). L'efficacité augmente avec la pression en surface puis se stabilise. Elle atteint 55 % sans dalle en surface et 80 % avec dalle en surface. En effet, la dalle joue un rôle essentiel dans la répartition des charges lorsque l'épaisseur du matelas est inférieure à l'épaisseur critique définie dans ASIRI (IREX 2012). Dans ce cas, il y a un développement d'efforts de flexion dans la dalle. La hauteur de matelas de 100 mm est ici effectivement inférieure à cette hauteur critique, qui correspond à la hauteur nécessaire pour atteindre un plan d'iso-tassement dans le matelas, déterminée égale à 175 mm dans cette étude.

En termes de tassement en base de la PTC (NB : seule la part du tassement dû à l'application de la pression en surface P_m est représentée), la figure 4 montre une très bonne adéquation des résultats numériques et expérimentaux, en chargement et en déchargement.

La figure 5 compare le champ de déplacement vertical obtenu par application de la DIC à travers la fenêtre de visualisation latérale (Fig. 1) avec celui obtenu par le modèle numérique, dû à une pression en surface $P_m = 20$ kPa, pour le cas d'une dalle en surface. Les échelles de représentation des déplacements sont identiques sur les deux représentations. Cette

figure montre que dans les deux modélisations, physique et numérique, la réduction des tassements est principalement localisée au-dessus des têtes d'inclusion. Sur un axe vertical situé à mi-distance des inclusions, l'on voit également, dans les deux modélisations, que le tassement en base de la PTC est quasiment identique à celui de la dalle en surface, avec une valeur moyenne similaire dans les deux modélisations (22 mm dans le modèle numérique, autour de 22 et 24 mm dans le modèle réduit, certains grains connaissant une valeur ponctuellement plus grande ou plus faible).

Sous chargement monotone, le modèle numérique ainsi développé, dont les paramètres de comportement des matériaux sont calibrés uniquement à partir d'essais de laboratoire de référence (œdométrique et triaxiaux), permet de prendre en compte le comportement observé expérimentalement de manière très satisfaisante.

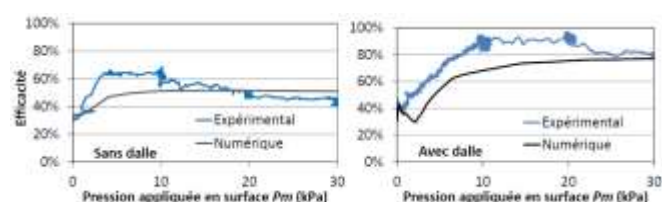


Figure 3. Efficacité sous chargement monotone

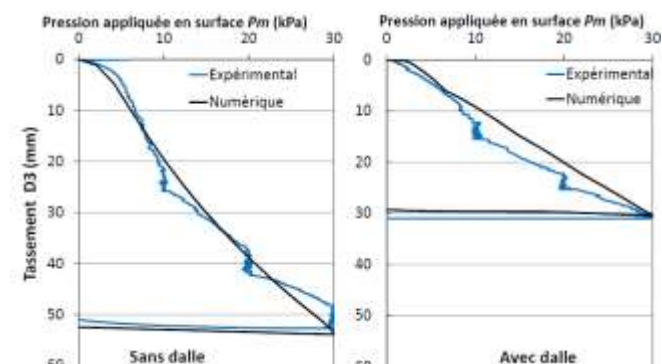
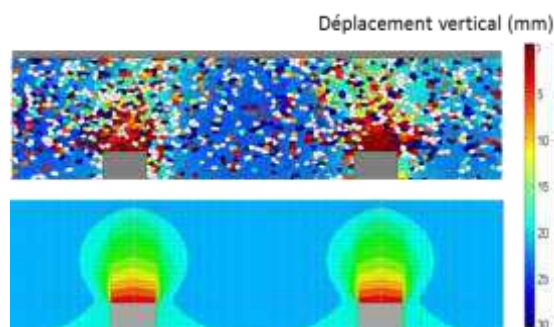


Figure 4. Tassements en base de la PTC sous chargement monotone


 Figure 5. Champs de déplacements verticaux pour $P_m = 20$ kPa obtenus par la DIC (haut) et par la modélisation numérique (bas), pour le cas d'une dalle en surface.

4.2 Résultats sous chargement cyclique

La figure 6 présente l'efficacité obtenue au cours des cycles (valeurs reportées pour $P_m = 20$ kPa). Pour le cas sans dallage en surface, les résultats expérimentaux ont montré une légère diminution de cette efficacité au cours des cycles, que le modèle numérique permet de représenter (efficacité égale à 45% avant les cycles et entre 35 et 37% après 50 cycles). En termes de tassements en base de la PTC (Fig. 7 - gauche), une accumulation a été mesurée dans le modèle réduit, plus particulièrement lors des premiers cycles. Le modèle numérique

montre également une accumulation de ce tassement au cours des cycles. Ceci est attribué à la redistribution des contraintes dans la PTC due à la présence de l'inclusion, associée à la non-linéarité du comportement du modèle CY-Soil. En revanche, lors du chargement post-cyclique en surface (P_m de 20 à 30kPa), les résultats expérimentaux montrent une rigidification du système que le modèle numérique ne permet pas de prendre en compte (tassements obtenus par le modèle numérique plus importants que dans le modèle réduit), car les modèles CY-Soil et Cam-Clay ne le permettent pas.

Pour ce qui concerne le cas d'un dallage en surface, Les résultats en termes d'efficacité divergent davantage entre les modèles physique et numérique (Fig. 6). L'efficacité est maintenue au cours des cycles dans le modèle réduit, alors que le modèle numérique conduit à une diminution relativement importante au cours des cycles (de 72% avant les cycles, elle n'est plus que de 57% après 20 cycles, puis se stabilise). En revanche, l'accumulation des tassements au cours des cycles est relativement bien représentée (Fig. 7). A nouveau, le tassement post-cyclique est surestimé par le modèle numérique pour les raisons évoquées ci-dessus.

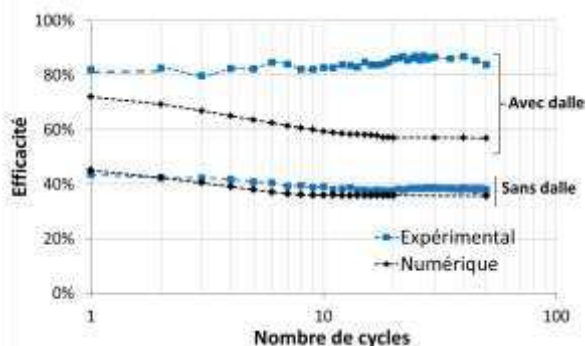


Figure 6. Evolution de l'efficacité (valeurs pour $P_m = 20\text{kPa}$) au cours des cycles

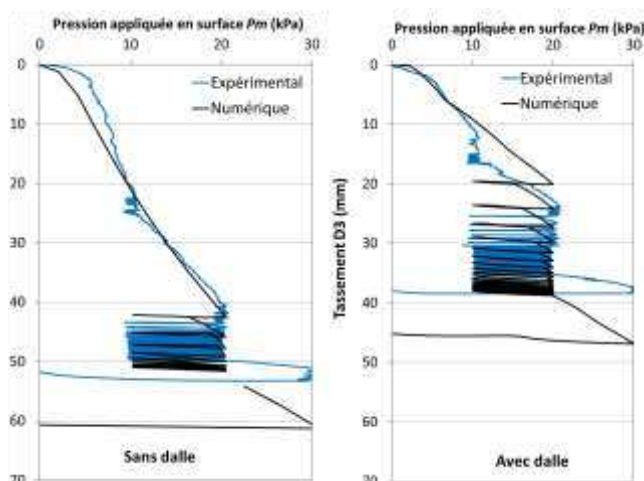


Figure 7. Tassement en base de la PTC pour un chargement cyclique

5 CONCLUSIONS

Une rétro-analyse numérique (en milieu continu) du comportement observé sur un modèle réduit de laboratoire d'un massif de sol renforcé par inclusions rigides, sous chargement monotone et chargement cyclique à basse fréquence (pas d'effets dynamiques), a été effectuée. Des modèles de comportement élastoplastiques ont été utilisés, dont les paramètres ont été calibrés à partir d'essais de laboratoire de

référence effectués sur le sol compressible et le sol de la plateforme.

La confrontation des résultats expérimentaux et numériques sous chargement monotone montre une très bonne concordance en termes d'efforts transmis aux inclusions et de tassement dans la plateforme. Sous chargement cyclique, l'accumulation des tassements mesurée dans le modèle réduit au cours des cycles est également obtenue dans le modèle numérique ; en revanche, la rigidification post-cyclique du massif de sol obtenue dans le modèle réduit ne peut pas être modélisée. En termes d'évolution de l'efficacité au cours des cycles, les résultats sont concordants pour le cas sans dallage en surface et divergent lorsqu'une dalle rigide est positionnée en surface. Ceci peut être partiellement dû au fait que le modèle numérique ne prend pas explicitement en compte cette dalle, mais simule sa présence par l'imposition d'un déplacement en surface.

Cette première rétro-analyse numérique, utilisant les modèles Cam Clay et CY-Soil, a montré des résultats encourageants pour la modélisation du comportement observé de l'ouvrage. Une analyse plus précise des mécanismes conduisant à une accumulation des déplacements dans le modèle numérique doit maintenant être effectuée, et une amélioration de la modélisation doit être envisagée pour la meilleure prise en compte du comportement sous dallage.

5 REMERCIEMENTS

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), L. Thorel (IFSTTAR), Ph. Gotteland (FNTP), S. Brûlé (Menard) et L. Briançon (INSA Lyon) pour leurs conseils sur ce travail. Les auteurs remercient J. Canou pour son accueil pour la réalisation de la campagne d'essais triaxiaux.

6 REFERENCES

- Combe G. et Richefeu V. 2013. Tracker: a Particle Image Tracking (PIT) technique dedicated to nonsmooth motions involved in granular packings. *Powders and Grains 2013*, July 8-12, UNSW, Sydney, Australie.
- Detournay C., Lucarelliand A. et Varun. 2014. Back-analysis of an embankment constructed in soft soil using the Cysoil model *Numerical methods in geotechnical engineering*, CRC Press, pp. 597-602.
- Han J. et Bhandari A. 2009. Evaluation of geogrid-reinforced pile-supported embankments under cyclic loading using Discrete Element Method. *Advances in Ground Improvement: Research to Practice in the United States and China*, pp. 73-82
- Heitz C. 2006. *Bodengewölbe unter ruhender und nichtruhender Belastung bei Berücksichtigung von Bewehrungseinlagen aus Geogittern*. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel. Heft 19. Kassel University Press GmbH. 197p. En allemand.
- Heitz C., Luking J. et Kempfert H.G. 2008. Geosynthetic reinforced and pile supported embankments under static and cyclic Loading. *4th European Geosynthetics*, Edinburgh, UK, paper no 215.
- Houda M., Jenck O. et Emeriault F. 2016. 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* 11(2), 325-346.
- Houda M. 2016. *Comportement sous chargement cyclique des massifs de sol renforcés par inclusions rigides : expérimentations 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 des sols de fondation par inclusions rigides*. Presse des Ponts, 383p.
- Moormann C., Lehn J. et Aschrafi J. 2016. Design of reinforced piles earth structures under static and variable loads. *3rd Pan-American Conf. On Geosynthetics*, 10-13 avril 2016, Miami Beach, USA, 14p.