

Développement d'un modèle réduit tridimensionnel du renforcement des sols par inclusions rigides

Development of a three-dimensional small scale model to simulate soil improvement by rigid piles

Houda M., Jenck O., Emeriault F.

Laboratoire 3SR (Université Joseph Fourier, Grenoble INP, CNRS), Saint-Martin d'Hères, France

Briançon L.

CNAM, Paris, France et Laboratoire 3SR, Saint-Martin d'Hères, France

Gotteland Ph.

Fédération Nationale des Travaux Publics, DTR Recherche, Paris, France

RÉSUMÉ: Un modèle réduit tridimensionnel à l'échelle 1/10 a été développé en laboratoire, simulant le renforcement des sols par inclusions rigides verticales, mettant éventuellement en œuvre un renforcement supplémentaire par géosynthétique. Des sollicitations monotones ou cycliques peuvent être appliquées en surface, via une membrane sous pression. Des campagnes expérimentales ont été entreprises sur ce modèle de laboratoire, portant sur l'analyse du comportement sous chargement cyclique et sur l'étude de l'impact d'un renforcement par géosynthétique en base du matelas granulaire. L'objectif de ces études préliminaires est la validation du dispositif expérimental. La modularité de ce modèle en termes de géométrie, de mise en œuvre de matériaux et d'instrumentation permettra l'étude d'autres problématiques géotechniques.

ABSTRACT: A three-dimensional model in 1/10th scale was developed in the laboratory, simulating the soil reinforcement by vertical rigid inclusions, with the possibility to add reinforcement by geosynthetic. Monotonic or cyclic loading can be applied on surface via a membrane under pressure. Experimental campaigns have been conducted on this model, studying the behaviour under cyclic loading and the impact of geosynthetic reinforcement in granular base of the mattress. The main objective of these studies was to validate the experimental device. The modularity of this model in terms of geometry, materials and instrumentation allow the study of other geotechnical problems.

MOTS-CLES: Modèle réduit de laboratoire, chargement cyclique, renforcement des sols, inclusions rigides, géosynthétique.

KEYWORDS: Laboratory Model, cyclic loading, soil reinforcement, rigid piles, geosynthetic.

1 INTRODUCTION.

L'étude du comportement des ouvrages renforcés par inclusions rigides est un sujet d'actualité en France : le projet national ASIRI a donné lieu en juillet 2012 à des recommandations de dimensionnement et de mise en œuvre (IREX 2012). Cependant ce projet a été limité en général à des cas de chargement statique (Chevalier *et al.* 2010) et ces recommandations ne traitent pas suffisamment des cas où la plateforme de transfert de charge est renforcée par des nappes géosynthétiques (Briançon et Simon 2011), applications cependant en plein essor.

Des modèles physiques en laboratoire ont été développés depuis les années 1970 pour étudier ce type d'ouvrages. Certains sont en deux dimensions (Hewlett et Randolph 1988, Low *et al.* 1994, Van Eekelen *et al.* 2003, Jenck *et al.* 2005, Chen *et al.* 2008) permettant de visualiser les phénomènes dans le sol. D'autres modèles sont en deux dimensions à symétrie axiale (Dinh *et al.* 2009). La plupart des modèles à trois dimensions (Demerdash 1996, Heitz *et al.* 2008, Van Eekelen *et al.* 2011) ne permettent pas la visualisation du champ de déplacements et contiennent un nombre d'inclusions rigides réduit, ce qui ne permet pas l'élimination des effets de bord.

Le comportement des sols compressibles renforcés par inclusions rigides verticales est également étudié par des expérimentations sur modèles centrifugés 3D à échelle réduite. Ces essais permettent d'appliquer des niveaux de contraintes du même ordre que dans les cas réels, cependant ils présentent d'autres limitations telles que la difficulté de représenter tous les matériaux explicitement (Baudoin *et al.* 2008).

Un modèle réduit tridimensionnel sous gravité normale a ainsi été développé au laboratoire 3SR de Grenoble, sur la base d'un modèle préliminaire initialement développé au Cnam de Paris et simulant le renforcement des sols par inclusions rigides

verticales, sous chargement monotone et également cyclique, mettant éventuellement en œuvre un renforcement supplémentaire par géosynthétique. Ce modèle comporte 16 à 20 inclusions rigides verticales. Une nappe de géosynthétique peut être placée en surface du sol renforcé. Des sollicitations sont appliquées en surface du massif par une membrane sous pression. Une instrumentation permet d'analyser le comportement du système. L'objectif de ce modèle n'est pas de simuler quantitativement le comportement d'un ouvrage réel (les règles de similitude n'étant pas toutes strictement respectées), mais vise à mieux comprendre les mécanismes qui se développent au sein du massif et plus précisément dans le matelas granulaire de transfert de charge, d'analyser l'effet du renforcement par géosynthétique et de mieux appréhender les mécanismes d'interaction entre ces diverses parties de l'ouvrage.

2 MODELE REDUIT

2.1 Dispositif expérimental

Le modèle réduit a été développé pour étudier les mécanismes qui se produisent plus spécifiquement dans la plate-forme de transfert de charge et dans le géosynthétique sous des charges monotones mais également cycliques. Il se compose d'une cuve de section carrée de dimension interne 1m x 1m, constituée de châssis en acier. La hauteur de la cuve peut être ajustée en ajoutant ou en supprimant des cadres, tandis qu'un espace vide en fond de cuve de 20 cm de hauteur est alloué à l'instrumentation (Fig. 1 et 2). Le modèle comporte seize inclusions en aluminium de 35 mm de diamètre et de hauteur 60 cm avec un espacement entre elles de 20 cm comme le montrent les figures 3 et 4. Le taux de recouvrement (proportion de la surface couverte par les inclusions) est ainsi de 2,4%.

Quatre demi-inclusions peuvent être utilisées près de la fenêtre transparente visant à visualiser les champs de déplacement du sol.

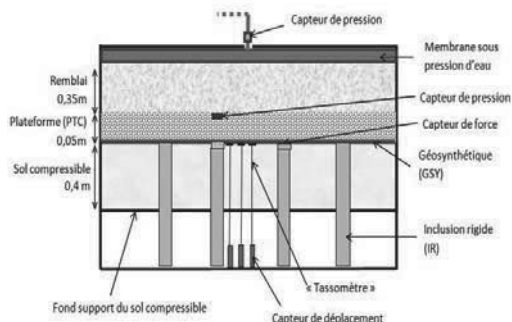


Figure 1. Coupe schématique du modèle réduit (coupe A-A de la figure 4)



Figure 2. Cadres empilables composant le modèle réduit



Figure 3. Photographie de l'intérieur de la cuve contenant les inclusions

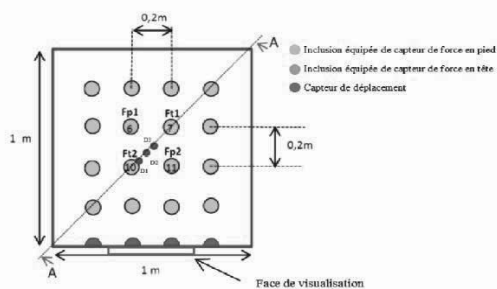


Figure 4. Vue en plan schématique du modèle réduit.

2.2 Règles de similitude

Les modèles physiques à échelle réduite présentent de nombreux avantages, comme la mise en évidence des mécanismes, l'obtention de résultats expérimentaux pour caler des modèles numériques, la conduite possible des essais jusqu'à la rupture. Une des difficultés majeures est cependant de satisfaire aux règles de similitude, afin d'appliquer les résultats observés sur le modèle réduit au problème en grandeur réelle. Ces règles sont établies à partir des équations générales de la mécanique, de l'équation de conservation de la masse et des lois de comportement des matériaux.

Dans un modèle avec une réduction d'échelle de n (ici $n = 10$) sous gravité normale, l'établissement des règles de similitude conduit au tableau 1.

Tableau 1. Facteur d'échelle pour un modèle sous gravité terrestre.

Grandeur	Notation	Unité SI	Facteur d'échelle
Longueur	L^*	m	$1/n$
Pesanteur	g^*	m/s^2	1
Contrainte	σ^*	Pa	$1/n^2$
Déformation	ε^*	---	1
Masse volumique	ρ^*	kg/m^3	1
Angle de frottement	Φ^*	---	1
Module Young	E^*	Pa	$1/n$

Dans notre cas, toutes les règles de similitude ne sont pas strictement respectées (E^* et σ^*). En revanche, l'utilisation de matériaux présentant des angles de frottement équivalents à ceux des matériaux réels, notamment pour le matelas de transfert de charge et le remblai, où les mécanismes sont principalement des mécanismes en cisaillement, apparaît ici justifiée et indispensable.

Le facteur d'échelle sur les contraintes est $\sigma^* = 1/10$, ce qui indique que les contraintes appliquées dans le modèle devraient correspondre à des contraintes 10 fois plus élevées dans le prototype. Ceci n'est pas strictement respecté en tout point du modèle, mais l'application de la surcharge en surface est dimensionnée afin d'obtenir un niveau de chargement réaliste, voire surdimensionné afin de mettre clairement en évidence le fonctionnement de l'ouvrage.

2.3 Matériaux mis en œuvre

Les matériaux utilisés dans les essais sont le sol compressible, la plate-forme granulaire de transfert de charge, le sol du remblai et des géosynthétiques de renforcement. En ce qui concerne le sol compressible le paramètre principal est la compressibilité. Il a été simulé par un mélange de billes de polystyrène, de sable de Fontainebleau et une teneur en eau de 10% pour éviter la ségrégation. Ce matériau a des caractéristiques de compressibilité d'un sol compressible tout en étant relativement facile à mettre en œuvre. Dans notre étude, une couche de 5cm de gravier 2/4 mm ($\phi = 55^\circ$ au pic, $\phi = 37^\circ$ au palier et $c = 0kPa$) est utilisée comme plate-forme de transfert de charge (PTC). Concernant le matériau du remblai, il est constitué de sable gris. Deux types de géosynthétiques (GSY) de renforcement bidirectionnel ont été utilisés : l'un (S1) de raideur à 5% d'élongation de 170 et 220 kN/m dans chacune des deux directions ; l'autre (S2), de raideur à 5% d'élongation de 316 et 400 kN/m dans chacune des directions. Les résultats d'essais avec géosynthétiques ne seront cependant pas détaillés dans ce document.

2.4 Instrumentation

L'analyse complexe des interactions sol-structure qui se développent dans ce modèle nécessite une instrumentation idoine. Pour ce modèle préliminaire, les paramètres suivants ont été mesurés dans la maille centrale :

- Tassement du sol compressible en trois points : D1, D2 et D3 (3 capteurs de déplacement potentiométriques 50 mm),
- Force en tête de deux inclusions : Ft1 et Ft2 et force en pied de deux autres inclusions (4 capteurs de force 10 kN)
- Contrainte à 5 cm au-dessus d'une inclusion, au niveau de l'interface entre la PTC et le remblai : Pptc (capteur de pression 500 kPa, de diamètre 30 mm)
- Pression appliquée en surface : Pm (capteur de pression dans la membrane 0-200 kPa).

A partir des capteurs de déplacement, des dispositifs de mesure du tassement en surface du sol compressible ont été confectionnés, par un système de tiges traversant le massif de sol compressible.

Les capteurs de force et de pression permettent d'estimer les reports de charge qui s'opèrent dans le matelas vers les inclusions et qui sont susceptibles d'évoluer au cours d'un

chargement cyclique en surface. Les capteurs de déplacement mesurent le tassement en surface du sol compressible (voir plus loin) et renseignent sur le niveau de déformation global dans le massif renforcé ou non par inclusions rigides, et permettent d'évaluer les performances de réduction de tassement.

En fonction des premiers résultats, l'instrumentation sera adaptée et étoffée.

2.5 Protocole expérimental

Les inclusions rigides sont installées dans la cuve, en contrôlant leur verticalité et espacement. Le mélange de sable, polystyrène et eau est versé dans la cuve, puis arasé au niveau de la surface des inclusions. Les tests avec géosynthétiques sont effectués en fixant celui-ci directement au-dessus du massif de sol compressible renforcé par inclusions. La PTC de 5 cm est placée en deux couches, légèrement compactées et le capteur P_{ptc} est placé grâce à un gabarit. Le remblai de sable gris est mis en place par couches successives de 5 cm. La hauteur finale de la PTC + remblai est de 40 cm, mais elle pourra varier lors d'études ultérieures grâce à la modularité géométrique du dispositif développé. La membrane d'application de la charge en surface est disposée sur le massif, puis le dispositif est fermé par un couvercle, afin de mettre en pression la membrane et d'appliquer une charge verticale et homogène en surface.

2.6 Application du chargement

Le chargement appliqué sur le sol compressible (en base du matelas) est composé de deux phases successives : monotone puis cyclique.

Le chargement monotone se compose du poids propre du massif et de la première mise en pression de la membrane jusqu'à $P_m = 20$ kPa.

Le chargement cyclique (quasi-statique) est appliqué sous la forme présentée dans la figure 5 : une centaine de cycles d'amplitude 10 kPa est appliqué pendant une quinzaine d'heures, soit avec une période de 10 min environ.

L'application de ce chargement est pilotée par ordinateur, ce qui permet ainsi de la faire varier au besoin en termes de valeur de pression, d'amplitude et de fréquence.

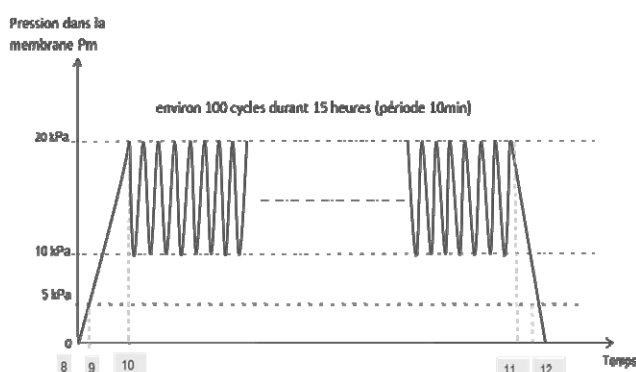


Figure 5. Application du chargement cyclique

3 CAMPAGNE D'ESSAIS PRÉLIMINAIRE

3.1 Essais réalisés et objectifs

Des essais ont été réalisés dans le cadre d'une campagne préliminaire de faisabilité et de validation du dispositif expérimental développé, sous chargement cyclique, avec ou sans géosynthétique, avec ou sans PTC (voir Tableau 2).

Les principaux objectifs de cette campagne de faisabilité ne sont cependant pas d'exploiter les études paramétriques mais plutôt :

- d'analyser le comportement global de l'ouvrage (par une analyse fine des mesures données par les capteurs),
- d'analyser la répétabilité des essais (en effectuant des essais à configuration identique),
- de détecter ainsi les améliorations à apporter au protocole expérimental et à l'instrumentation,
- d'aider à définir les configurations d'essais à effectuer lors de la campagne suivante.

Tableau 2. Configurations d'essais effectués.

Configuration	IR	GSY	PTC	Remblai
A	Oui	---	5cm	35 cm
B	Oui	---	---	40 cm
C	Oui	S1	5cm	35 cm
D	Oui	S2	5 cm	35 cm
E	Non	---	5cm	35 cm

3.2 Quelques résultats d'essais préliminaires

Pour illustrer l'étude du comportement du modèle et de la répétabilité des essais, la figure 6 indique l'évolution des deux capteurs qui instrumentent la base des inclusions pour deux essais correspondant à la configuration A. Cette figure montre que les valeurs des deux capteurs $Fp1$ et $Fp2$ sont proches pour un même essai et que la répétabilité est bonne jusqu'à une valeur de contrainte moyenne en base de la PTC de 17 kPa, soit une pression appliquée en surface (P_m) d'environ 10 kPa. Au-delà, les valeurs de capteurs $Fp1$ et $Fp2$ divergent lors d'un même essai. Le protocole d'application de la pression en surface sera alors amélioré et, de plus, lors de la campagne d'essai suivante, la valeur de P_m sera limitée à une valeur plus faible afin de s'approcher d'un niveau de chargement plus réaliste.

La figure 7 indique l'évolution d'un des efforts mesurés dans le modèle (en tête d'une inclusion). Seuls les premiers cycles sont présentés sur cette figure. L'évolution sous chargement cyclique montre une légère réduction des valeurs maximum et minimum de la force lors des premiers cycles puis les valeurs deviennent constantes d'un cycle à l'autre. Lors de certains essais, une chute plus marquée de la valeur des efforts sur les inclusions a été observée lors des tout premiers cycles.

La figure 8 décrit l'évolution du tassement en surface du massif de sol compressible lors du chargement monotone puis lors des premiers cycles de chargement cyclique pour le même essai que précédemment. Le tassement augmente lors des premiers cycles puis tend à se stabiliser.

Ces résultats préliminaires montrent donc que la campagne suivante peut se focaliser sur l'observation des mécanismes lors des 10 à 20 premiers cycles et que l'application d'une centaine de cycles n'est pas nécessaire.

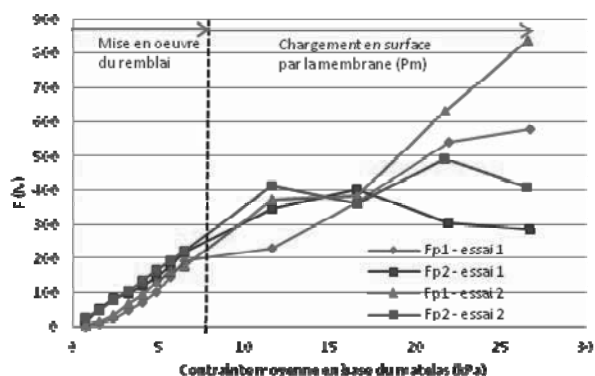


Figure 6. Analyse de la répétabilité sous chargement monotone (configuration A)

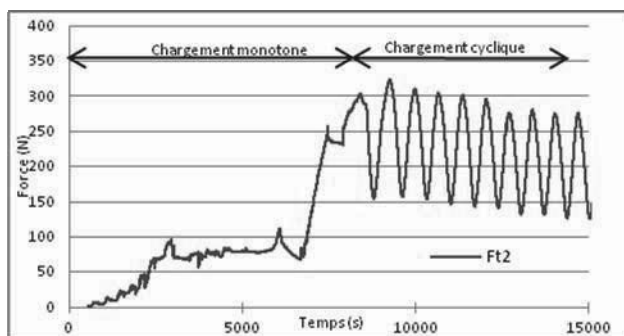


Figure 7. Evolution de la force en tête d'inclusion (configuration B)

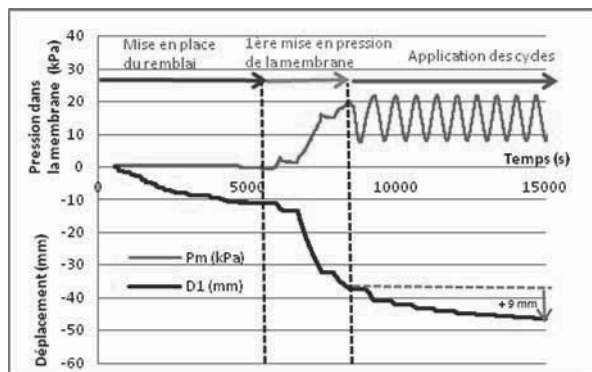


Figure 8. Tassement en surface du sol compressible (configuration B).

4 CONCLUSION

Un nouveau dispositif expérimental tridimensionnel a été développé en laboratoire afin d'étudier différents types de problèmes géotechniques dont, pour l'étude présentée ici, les mécanismes de transfert de charge dans les massifs de fondation renforcés par inclusions rigides, éventuellement renforcés par nappe géosynthétique, soumis à des charges monotones et cycliques en surface.

Des résultats préliminaires prometteurs ont été obtenus. L'analyse du comportement sous chargement cyclique montre que les efforts sur les inclusions diminuent et que les tassements augmentent au cours des 10 premiers cycles pour se stabiliser ensuite.

Cependant, l'objectif principal de cette étude est la validation du dispositif expérimental et l'obtention de recommandations pour la poursuite des essais. Le modèle nécessite effectivement quelques améliorations et compléments sur l'instrumentation et sur le protocole expérimental, dont les limitations ont été mises en évidence lors de cette campagne.

L'originalité de ce modèle réside d'une part dans sa modularité en termes de géométrie, de matériaux utilisés, d'application de chargement (étude sur la durée de vie de

l'ouvrage). Le modèle permettra donc facilement l'étude d'autres types de problèmes géotechniques. Le modèle conçu permet également d'obtenir un champ de déplacement dans le massif par la prise de photographies au niveau de la fenêtre de visualisation et l'application de méthodes de corrélation d'images.

Bien que ce modèle réduit ne satisfait pas strictement aux conditions de similitudes et ne permet donc pas d'extrapoler les résultats à un ouvrage réel de manière quantitative, il a néanmoins pour objectif de contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes de transfert de charge dans les massifs, notamment sous chargement cyclique. Il servira de base à la validation de modélisations numériques en milieu continu ou par éléments discrets.

5 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Direction Technique et de la Recherche de la Fédération Nationale des Travaux Publics (France) pour l'aide financière apportée à cette étude, Cléber Da Silva Pinto pour l'aide à la réalisation des essais, et son encadrant Pr. Márcio Almeida de l'Université de Rio de Janeiro.

6 REFERENCES

Antoine, P.-C. 2010. Etude de dalles sur sols renforcés au moyen d'inclusions rigides ou non. *Thèse de l'Université Libre de Bruxelles*.

Baudoin G., Thorel L., Raul G., Garnier J. 2008. Centrifuge modeling of 3D load transfer in reinforced soft soil. *Foundations: Proceedings of the Second BGA International Conference on Foundations*

Briançon L. et Simon B. 2011. Performance of Pile-Supported Embankment over Soft Soil: Full-scale experiment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138 (4), 551 – 561.

Chen Y., Cao W., Chen R. 2008. An experimental investigation of soil arching within basal reinforced and unreinforced piled embankments. *Geotextiles and Geomembranes*, 26 (2), 164-174.

Chevalier B., Briançon L., Villard P., Combe G. 2010. Prediction of Load Transfers in Granular Layers Used in Rigid Inclusions Technique - Experimental and Discrete Element Method Analysis. *GeoFlorida 2010*.

Demerdash M.A. 1996. An experimental study of piled embankments incorporating geosynthetic basal reinforcement. *Thèse de doctorat. University of Newcastle-upon-Tyne*.

Dinh A.Q., Canou J., Dupla J.-C. 2009. Essais de chargement à pression contrôlée sur le modèle physique 1g – Étude paramétrique *Rapport n°3.09.3.12 du PN ASIRI*.

Heitz C., Lükling J., Kempfert H.-G. 2008. Geosynthetic reinforced and pile supported embankments under static and cyclic Loading. *Proceedings of the 4th European Geosynthetics Conference EuroGeo4, paper n°215, 8p*. Edinburgh, UK.

Hewlett W. J. and Randolph M. F. 1998. Analysis of piled embankment. *Ground Engineering*, 21(3), 12-18.

IREX. 2012. Recommandations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides. Presses des Ponts. 384p.

Jenck O., Dias D., Kastner R. 2005. Soft ground improvement by vertical rigid piles – Two dimensional physical modeling and comparison with current design methods. *Soils & Foundations*, 45 (6), 15-30.

Low B. K., Tang S. K., Choa V. (1994). Arching in piled embankments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 120, n° 11, pp. 1917-1938.

Van Eekelen D. J. M., Bezuijen A., Oung O. 2003. Arching in piled embankments; experiment and design calculation. *Int. Conf. on Foundations: Innovations, observations, design and practice*, 2-5 September 2003, 889-894. Dundee, Scotland.

Van Eekelen S.J.M., Bezuijen A., Lodder H.J., Van Tol A.F. 2011. Model experiments on piled embankments. Part I. *Geotextiles and Geomembranes*, doi:10.1016/j.geotextmem.2011.11.002