
Renforcement de sols compressibles par inclusions rigides :

dispositif pour la modélisation en centrifugeuse d'une maille élémentaire

Gaëlle Baudouin, Luc Thorel, Gérard Rault, Jacques Garnier

Laboratoire des Ponts et Chaussées, Centre de Nantes
Route de Bouaye, BP 4129,
44341 Bouguenais cedex

gaelle.baudouin@lcpc.fr, luc.thorel@lcpc.fr, gerard.rault@lcpc.fr,
jacques.garnier@lcpc.fr

Supprimé : ¶

RÉSUMÉ. Le renforcement des sols compressibles par inclusions rigides verticales est une technique dont les mécanismes de fonctionnement ne sont pas encore bien compris. Par des expérimentations sur modèles réduits centrifugés instrumentés, le comportement d'une maille élémentaire va être étudié dans différentes configurations géométriques. On pourra simuler le comportement soit d'un remblai soit d'un dallage supporté par un sol renforcé par inclusions rigides verticales. On se propose de présenter ici le dispositif expérimental en cours de conception au LCPC.

ABSTRACT. The mechanisms of reinforced soft soils by stiff vertical piles are not yet well understood. By experiments on reduced scale centrifuged models, the behaviour of an elementary area will be studied for different geometrical configurations. We will simulate the behaviour either of embankments or floor slabs supported by reinforced soft soils. An original experimental device, which is developed at LCPC, is presented here.

MOTS-CLÉS : modèle réduit, sol compressible, inclusions rigides verticales, maille élémentaire.

KEYWORDS: reduced scale model, soft soil, stiff vertical piles, elementary area.

1. Introduction

Le renforcement des sols par inclusions rigides verticales est une technique de renforcement de plus en plus utilisée. Elle permet de réaliser des ouvrages tels que des remblais routiers ou ferroviaires, des dallages industriels sur des sols de qualité médiocre.

Un exemple fameux est le pont Rion-Antirion en Grèce dont les piles sont fondées sur un matelas de transfert de charge posé sur le fond marin lui-même renforcé par un réseau d'inclusions métalliques (Garnier & Pecker, 1999 ; Pecker, 2000 ; Rault et *al.*, 2006).

Mis en forme : Police :Italique

Dans le cadre du Projet National ASIRI (Amélioration des Sols par Inclusions RIgides verticales, www.irex-asiri.fr), une série d'expérimentations sur modèles centrifugés est mise en place. Elle vise d'abord à modéliser le comportement d'une maille élémentaire ensuite d'étudier le comportement du matelas granulaire notamment le développement de l'effet voûte (report de charge par cisaillement). Cette étude expérimentale en trois dimensions nous permettra d'identifier et de quantifier l'influence de différents paramètres géométriques comme la hauteur de matelas en rapport avec la longueur des inclusions, l'inter distance entre les inclusions ; paramètres physiques comme la granulométrie du matelas. Les phénomènes de report de charge seront évalués à l'aide de différents indicateurs.

Le comportement d'une maille élémentaire sera étudié à l'aide d'un dispositif expérimental capable de mesurer la répartition des efforts sur les inclusions ainsi que de quantifier les effets du tassement du sol compressible le long des inclusions. Une étude paramétrique sera menée pour évaluer l'influence de 3 paramètres : la nature du chargement (remblai ou dallage), l'épaisseur du matelas et l'inter distance entre inclusions.

2. Géométrie et évaluation du report de charge

2.1. Géométrie du problème

Les inclusions rigides sont mises en place selon un maillage qui peut être rectangulaire ou triangulaire. Dans notre cas, le maillage est carré et la maille élémentaire est constituée de 9 inclusions. Une cellule élémentaire est constituée d'une inclusion et du volume de sol situé autour. Le taux de couverture est défini comme le rapport entre l'aire d'une inclusion et l'aire totale de la cellule élémentaire.

H_M : hauteur du matelas

Taux de couverture $\alpha = A_p / A$

A : Aire d'une cellule élémentaire.

s : entre-axe entre 2 inclusions adjacentes

A_p : Aire de la tête d'inclusion (dallette). a : longueur caractéristique de la dallette

A_s : Aire du sol compressible, $A_s = A - A_p$

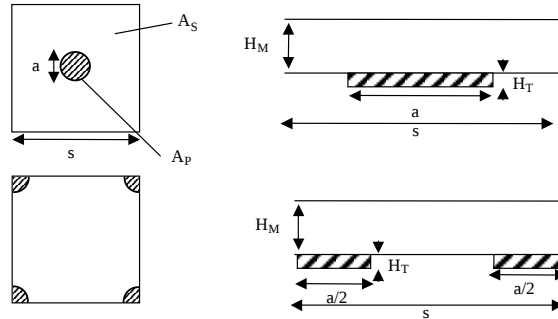


Figure 1. Définitions géométriques

2.2. Problème sans inclusion

Il s'agit dans ce cas de définir les chargements générés par la mise en place du matelas et du chargement (remblai ou dallage) sur le sol compressible. Ils nous permettront ensuite d'identifier puis de quantifier l'effet des inclusions sur le sol.

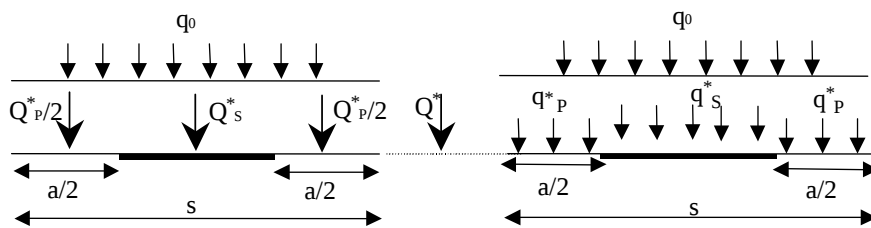


Figure 2. Définition du chargement

q_0 : surcharge appliquée par le remblai

q^* : contrainte verticale s'exerçant sur le sol compressible non renforcé $q^* = q_0 + \gamma H_M$

q_s^* : contrainte appliquée sur le sol compressible

q_p^* : contrainte appliquée à l'emplacement où se trouverait la tête d'inclusion si elle était en place.

$$q^* = q_s^* = q_p^*$$

Les forces reprises respectivement par la surface totale, l'aire de la tête d'inclusion et l'aire du sol compressible sont respectivement :

$$Q^* = (\gamma H_M + q_0) A = q^* \cdot A, \quad Q_p^* = (\gamma H_M + q_0) A_p = q_p^* \cdot A_p, \quad Q_s^* = (\gamma H_M + q_0) A_s = q_s^* \cdot A_s$$

Le ratio des efforts exercés sur l'inclusion et sur le sol se réduit à un rapport de surface : $Q_p^* / Q_s^* = A_p / A_s = \alpha / (1 - \alpha)$; Ainsi que le rapport entre les efforts

repris par la surface totale et ceux repris par le sol compressible :

$$Q^*/Q_s^* = A/As = 1/(1-\alpha)$$

2.3. Problème avec inclusions

Dans ce cas, on définit les efforts supportés d'une part par les inclusions : $Qp^+ = q_p^+ . Ap$ et d'autre part ceux repris par le sol compressible : $Qs^+ = q_s^+ . As$; avec q_p^+ qui est la contrainte reprise par les inclusions et q_s^+ qui est la contrainte reprise par le sol compressible.

2.4. Evaluation du report de charge

Pour un massif identique constitué du même matelas qui supporte le même chargement. On peut écrire des relations entre la situation sans inclusion et celle du massif renforcé. Le principal indicateur de report de charge est l'efficacité E , proportion de la charge totale reprise par l'inclusion, $E = Qp^+ / Q^*$ (Hewlett et Randolph, 1988).

3. Modélisation en centrifugeuse

La modélisation en centrifugeuse permet de respecter des relations de similitude entre le modèle réduit placé en macro gravité et le prototype. Cette méthode présente l'avantage de respecter les états de contrainte et de déformation entre deux points homologues du modèle réduit et du prototype. On peut réaliser sur ces modèles physiques des études paramétriques qui sont exploitées en comparaison aux ouvrages réels ou encore peuvent contribuer au calage de modèles numériques. Le renforcement des sols compressibles par inclusions rigides verticales a déjà été étudié en centrifugeuse (Van Eekelen et al., 2003, Barchard, 2002) mais seules des structures 2D ont été modélisées. On peut citer cependant d'autres approches expérimentales comme des essais en vraie grandeur ou des modèles réduits 2D ou 3D avec sol analogique (Jenck, 2004, Low, 1994).

3.1. Reconstitution d'une maille élémentaire

Le dispositif expérimental est constitué d'un conteneur cylindrique de 900 mm de diamètre (fig.3). La hauteur totale du dispositif est de 1500 mm. Le fond du conteneur est perforé de sorte à pouvoir placer deux mailles élémentaires de neuf inclusions rigides. Chaque inclusion sera fixée rigidement au fond du conteneur, permettant le passage des fils de l'instrumentation par le fond. Sur chaque maille, trois inclusions (inclusion centrale, inclusion de bord et inclusion de coin) sont instrumentées. Elle comporte chacune quatre capteurs de force placés en tête, en pied et deux à des cotes intermédiaires pour mesurer une composante verticale de

compression et estimer le frottement latéral du sol compressible sur le pieux lors du chargement mécanique. Enfin, une zone dans le conteneur est réservée à la reconnaissance pour caractériser le massif de sol compressible.

3.2. Echelle du modèle réduit

D'après une étude bibliographique (Briançon, 2002), nous avons déterminé les dimensions des éléments qui constituent le prototype que nous souhaitons modéliser. A partir de ces valeurs et en tenant compte de l'espace disponible dans le conteneur, nous avons déterminé une géométrie pour chaque maille de façon à faire varier l'inter distance et à minimiser les effets de bord.

	prototype	modèle
Diamètre de l'inclusion	0,50 m	18 mm
Distance entre inclusions	$2 < s < 2,50$ m	$72 < s < 90$ mm
Longueur de l'inclusion	$10 < L < 15$ m	$360 < L < 540$ mm
Hauteur du matelas	$0,5 < H_M < 2$ m	$18 < H_M < 72$ mm
Hauteur de la surcharge (remblai)	$5 < H_R < 10$ m	$180 < H_R < 360$ mm

Tableau 1. Echelle du modèle

Supprimé : .

Nous avons donc choisi un niveau d'accélération de 27,8 G qui correspond à l'échelle de réduction 1/27.8^{ème}.

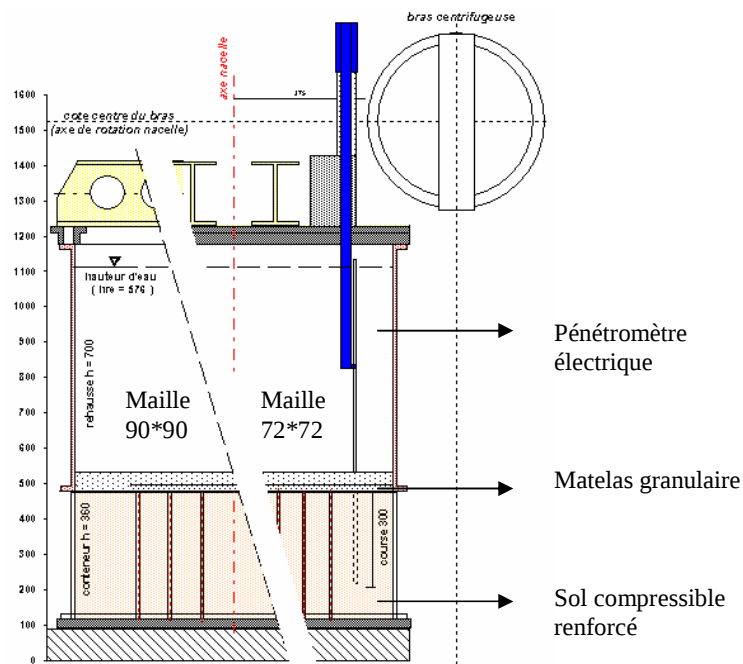


Figure 3. Vue en coupe d'un conteneur

Supprimé : .

3.3 Chargement mécanique

Le chargement mécanique est appliqué sur le matelas par l'intermédiaire d'un réservoir d'eau à fond souple ou rigide pour simuler soit un remblai soit un dallage. Il est constitué d'une boudruche en caoutchouc qui est plaquée sur les parois du conteneur de sorte que son contour n'est jamais situé à moins d'une inter distance (s) d'une inclusion.

3.4 Matériaux utilisés

Des massifs de sols argileux ont déjà été réalisés en centrifugeuse. L'argile utilisée est de type kaolin « speswhite clay » et conduit à des profils de cohésion non drainée compris entre 1,2 kPa/m et 1,8 kPa/m. Pour notre expérimentation, on souhaite obtenir un profil de cohésion constant de 25 à 50 kPa. C'est difficile à obtenir en centrifugeuse car c'est instable dans le temps. En effet la cohésion non drainée d'une argile saturée dépend de l'état de contrainte et du coefficient de surconsolidation OCR, lequel change entre les conditions de préparation des massifs au laboratoire (chargement de type oedométrique) et les expérimentations en centrifugeuse (état de contrainte géostatique à l'équilibre). La résistance du sol au niveau des premières couches se réduit inévitablement. Une solution envisagée est d'introduire une faible quantité de sable afin de rendre le massif plus résistant.

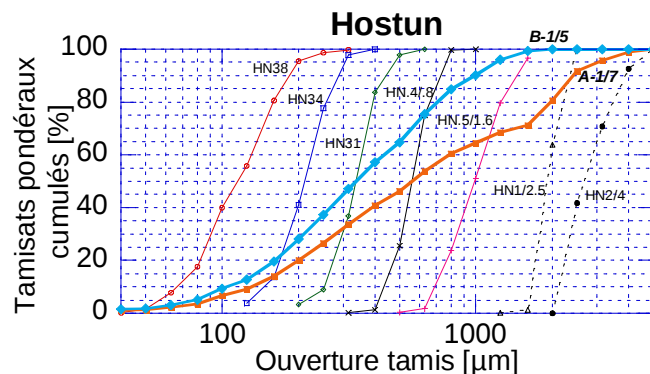


Figure 4. Granulométries du sable d'Hostun (données fournisseur)

Supprimé : .

Mis en forme : Centré

Pour le matelas granulaire, une grave B3 est généralement utilisée in situ. Ses propriétés sont $d_{\max} < 50$ mm, tamisat à 80 μm < 12 %, tamisat à 2 mm < 70 % et une valeur au bleu : $0,1 < \text{VBS} < 0,2$ (Thorel, 2006). Dans la pratique, un $d_{\max} = 31,5$ mm est souvent retenu. Pour notre modèle, on s'attachera à respecter un $d_{\max}$ semblable (soit 1,13 mm à 27,8 G). On choisit un sable d'Hostun dont l'angularité des grains devrait favoriser l'effet voûte. La figure 4 présente plusieurs fuseaux granulométriques du sable de Hostun, ainsi que 2 mélanges de 5 ou 7 fractions permettant d'obtenir une granulométrie étalée.

4 Plan d'expérience

Grâce au dispositif expérimental mis en place, on peut réaliser une étude paramétrique du sol compressible renforcé par inclusions rigides. On étudie pour chaque conteneur deux mailles élémentaires de dimensions différentes : ce sont des mailles carrées d'inter distance prototype $s = 2.50$ m pour la maille 1 et $s = 2$ m pour la maille 2. Ensuite, on fera évoluer la hauteur du matelas pour vérifier son influence sur le report de charge ($H1=0.5$ m, $H2=1$ m, $H3=2$ m). Enfin, pour chaque expérimentation, un remplissage progressif de la boudruche nous permettra d'effectuer des mesures pour différents niveaux de chargement.

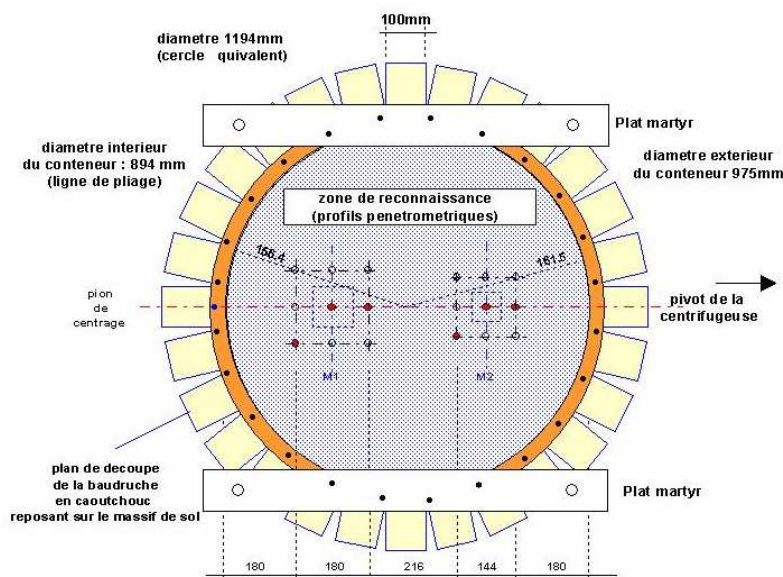


Figure 5. Vue dispositif expérimental

On réalisera pour la 1^{ère} série de mesures une maille non renforcée pour connaître le comportement du massif de sol (matelas + sol compressible) et apprécier l'effet des inclusions rigides. Un total de 7 conteneurs, soit 14 essais, sont programmés.

5. Conclusions

Le comportement d'une maille élémentaire carrée de 9 inclusions d'un sol compressible renforcé par inclusions rigides verticales va être étudié sur modèle réduit centrifugé. Pour ce faire un dispositif d'essai instrumenté est en cours de réalisation. Les expérimentations, tridimensionnelles, permettront d'évaluer les reports de charge sur les inclusions en faisant varier la nature du chargement (remblai ou dallage), le taux de couverture et la hauteur du matelas. Dans une phase

ultérieure, un matelas doté de cohésion pourra également être étudié, ainsi qu'un renforcement du matelas par géogrid.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les partenaires du Projet National ASIRI, pour le soutien financier permettant la réalisation de ces expérimentations.

Références

- Barchard J., Centrifuge modelling of piled embankments on soft soils. Master of Science of Engineering Thesis, Univ. New Brunswick, 2002, 221 p.
- Briançon L., Renforcement des sols par inclusions rigides. Etat de l'art en France et à l'étranger. Rapport de l'IREX, 2002, 171 p.
- Garnier J., Pecker A., « Use of centrifuge tests for the validation of innovative concepts in foundation engineering », 2nd Int. Int. Conference on Earthquake geotechnical Engineering, Lisbon, juin 1999, 7 p.
- Han J.. "Design and construction of embankments on geosynthetic reinforced platforms supported by piles", 1 ASCE/PaDOT Geotechnical Seminar in Hersey, PA, USA, 14-16 April 1999.
- Hewlett W.J., Randolph M.F., « Analysis of piled embankments », *Ground Engineering*, avril 1988, pp 12-18.
- Jenck O., Kastner R., « Analyse du fonctionnement d'un massif de fondation renforcé par inclusions rigides verticales. Modélisation physique », *Actes du colloque international de géotechnique*, 2004, Beyrouth.
- Low B.K, Tang S.K, Choa V., « Arching in piled embankments », *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 120, n°11, 1994, pp 1917-1938.
- Pecker A., *Pont Rion-Antirion : fiabilité et conception parasismique des fondations. La sécurité des grands ouvrages*, Presses ENPC, 2000, pp 21-51.
- Rault G., Thorel L., Garnier J., « Modélisation physique de fondations et d'ouvrages maritimes », *Mécanique et Industries*, 2006, ISSN 1296-2139. vol.7, pp 223-230.
- Thorel L., ASIRI thème 3, Cahier des charges des essais en centrifugeuse, Rapport LCPC, 2006, RMS/MS : 2005-3-26-1/1-a, 15 p.
- Van Eekelen S.J.M., Bezuijen A., Oung A., *Arching in piled embankments; experiments and design calculations*, Foundations : Innovations, observations, design and practice, Thomas Telford, London, 2003. 885-894.