

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.

Etude expérimentale sur modèle réduit d'un remblai sur sol renforcé par inclusions rigides verticales

Experimental small scale analysis of a piled embankment

O. Jenck, D. Dias & R. Kastner

URGC Géotechnique, INSA de Lyon, Villeurbanne, France

RÉSUMÉ

Le renforcement des sols par inclusions rigides verticales est une technique alternative qui permet de réduire et d'homogénéiser les tassements sous les fondations de voies ferrées, de remblais routiers et de bâtiments industriels. Les inclusions, ancrées dans un horizon plus rigide, reprennent les charges appliquées en surface par l'intermédiaire d'un matelas granulaire dans lequel se développent des voûtes. Cette communication présente quelques résultats obtenus sur un modèle réduit bidimensionnel. Le sol granulaire constituant le matelas de transfert de charge est modélisé par le sol analogique bidimensionnel de Schneebeli, le sol compressible est modélisé par de la mousse et les inclusions par des éléments métalliques. Une instrumentation permet d'évaluer le report de charge et une méthode de corrélation d'images permet d'obtenir le champ de déplacement au sein du massif. L'analyse paramétrique présentée ici porte sur l'influence de la hauteur de matelas et de la proportion de la surface couverte par les inclusions sur les mécanismes de report de charge et la réduction des tassements.

ABSTRACT

Soft soil improvement by vertical rigid piles is an alternative technique which permits reduction and homogenization of the settlements under railways, roadways and industrial buildings. The rigid piles, anchored in a substratum, transfer the load applied on surface through a granular earth platform in which arching occurs. This paper presents some results obtained on a physical small scale two-dimensional model. The granular material constituting the earth platform is modelled by the Schneebeli analogical material, soft soil is modelled by foam and rigid piles by metallic elements. Load cells permits evaluation of the load transfer and an image correlation method permits to obtain the field displacements. The parametric study focuses first on the mat height and the covered by piles area influence on the load transfer mechanisms and the settlement reduction.

1 INTRODUCTION

Le renforcement par inclusions rigides verticales est une solution particulièrement intéressante pour les fondations sur sol compressible. Cette méthode connaît un grand essor, notamment pour le renforcement d'ouvrages tels que les voies ferrées, les remblais routiers et les dallages industriels. L'objectif de ce procédé est de réduire et d'homogénéiser les tassements sous la structure, afin d'en assurer la pérennité.

Le principe du renforcement est schématisé sur la figure 1. Les inclusions sont mises en place à travers la couche de sol compressible jusqu'à un substratum rigide et les charges appliquées en surface sont transférées aux inclusions, puis au substratum, par l'intermédiaire d'un matelas granulaire érigé sur la couche de sol renforcé. Ce matelas est constitué de gravales, de ballast ou de sol grossier. Il peut éventuellement être constitué de sol traité à la chaux ou au ciment, afin d'en améliorer les propriétés mécaniques (Dano et al., 2004). Les tassements différentiels à la base du remblai entre les inclusions et le sol compressible induisent des efforts de cisaillement dans le matelas, permettant la formation de voûtes entre les inclusions, et donc un report de la charge. L'angle de frottement du sol du matelas est un des paramètres conditionnant la formation des voûtes (Rathmayer, 1975). Les inclusions peuvent être coiffées de dallettes afin d'augmenter la surface couverte par les inclusions. Un renforcement géosynthétique peut être disposé à la base du remblai, permettant d'augmenter le report de charge sur les inclusions par effet membrane. Le frottement le long des inclusions est également impliqué dans ce problème d'interaction sol-structure (Combarieu, 1988). Les inclusions sont préfabriquées ou construites *in situ*. Une liste de types d'inclusions et de techniques de mises en place est donnée par Briançon et al. (2004).

Les mécanismes de transfert de charge dans le remblai et le long des inclusions restent encore mal compris. Plusieurs méthodes de dimensionnement existent (BS 8006, 1995; EGBEO, 2004), mais aucune ne prend véritablement en compte le comportement complexe de ce type de structure. Il n'existe pas en France de recommandations pour le dimensionnement de ces fondations. Ainsi, afin de palier ce manque, un Projet National démarre suite à l'état de l'art établi par Briançon (2002).

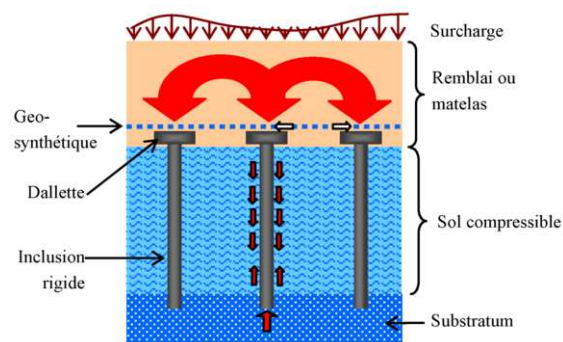


Figure 1. Principe du renforcement par inclusions rigides verticales

Notre contribution à l'étude des mécanismes se développant dans le matelas consiste en une modélisation physique bidimensionnelle de taille réduite. Le sol du matelas est simulé par un sol analogique bidimensionnel, composé de rouleaux d'acier, le sol compressible est simulé par des blocs de mousse et les inclusions sont représentées par des éléments métalliques. L'instrumentation en capteurs d'effort permet l'analyse du transfert de charge aux inclusions et une méthode de

corrélation d'images permet d'accéder au champ de déplacement dans le massif. L'étude paramétrique porte sur l'influence du taux de recouvrement (proportion de la surface à traiter couverte par les têtes d'inclusion) et de la hauteur de matelas sur le transfert de charge et la réduction de tassement.

2 MODÈLE RÉDUIT

2.1 Modèles réduits existants

Des expérimentations en laboratoire sur modèle réduit ont préalablement été menées afin de comprendre les mécanismes de transfert de charge dans le matelas. Hewlett et Randolph (1988), Low et al. (1994) et Van Eekelen et al. (2003) ont effectué des modélisations bidimensionnelles et Demerdash (1996) une modélisation tridimensionnelle.

Hewlett et Randolph (1988) ont placé des bandes de sable de couleurs différentes sur un système mousse caoutchouc - blocs de bois et ont observé la formation de voûtes. Ils ont développé un modèle analytique de détermination du transfert de charge basé sur un modèle de voûtes en forme de dômes semi cylindriques reposant sur les inclusions.

Low et al. (1994) ont observé une augmentation de la proportion du poids du remblai supportée par les inclusions avec l'augmentation de leur nombre. La contrainte sur le matériau compressible diminue lorsque les inclusions sont plus proches. Ces expérimentations ont permis d'apporter une modification à la méthode développée par Hewlett et Randolph (1988).

Van Eekelen et al. (2003) ont simulé la consolidation du sol compressible et ont observé la formation de voûtes dans le remblai de sable lors de cette phase. L'instrumentation en capteurs donne des résultats inconsistants avec ceux déterminés par la méthode BS 8006 et permet de caler des paramètres pour l'utilisation de la méthode de Carlsson (1987).

Demerdash (1996) a représenté une maille carrée d'inclusions. Une trappe amovible simule le cas le plus défavorable où le sol compressible n'est pas sollicité, et une nappe géosynthétique est alors incorporée à la base du remblai de sable. L'expérimentation montre que les tassements en surface sont réduits lorsque la hauteur du remblai augmente. L'auteur a ensuite confronté ses résultats à deux méthodes de dimensionnement : celle donnée par la Swedish Road Board (1974) et BS 8006 (1995). Des disparités entre les résultats expérimentaux et ces méthodes sont mises en évidence.

Certaines de ces expérimentations ont permis le développement de méthodes analytiques, d'autres sont comparées à des méthodes de dimensionnement, mais dans l'ensemble, il apparaît une divergence des résultats. De plus, l'analyse de ces essais en laboratoire reste délicate, comme le soulignent Briançon et al. (2004), parce que la modélisation n'est pas toujours très représentative : modélisation du sol compressible par une trappe amovible, modélisation du remblai par du sable, ce qui n'est pas très représentatif des sols mis en oeuvre dans les ouvrages réels.

2.2 Description du modèle

Un modèle bidimensionnel a été conçu afin d'explorer l'influence de différents paramètres sur les mécanismes se développant dans le matelas. Le sol du matelas est simulé par un sol analogique bidimensionnel de Schneebeli (1956), composé de rouleaux d'acier de 3, 4 et 5 mm de diamètre et de 60mm de long. Ce matériau est purement frottant et fortement dilatatant. L'angle de frottement a été déterminé égal à 22 degrés et l'angle de dilataance égal à 4 degrés (Dolzhenko, 2002). L'angle de frottement est plus faible que celui usuellement rencontré pour les sols de remblai, variant entre 30 et 40 degrés, ce qui implique une forte limitation de la modélisation. Cependant, ce sol présente d'autres aspects permettant de se

rapprocher du comportement des sols réellement mis en jeu : dilataance dès le début du cisaillement, ce qui simule un sol dense, variation du module en fonction de la contrainte, comme c'est le cas pour les graves (Paute et al., 1994). De plus, ce sol est plus lourd qu'un sol classique, son poids volumique étant de 62 kN/m³, ce qui limite la distorsion de similitude entre modèle et prototype pour une simulation à 1g, car le niveau de contrainte est plus ou moins maintenu pour une réduction d'échelle de 3. Ce sol ne nécessite pas de support facial car il s'agit d'un empilement de rouleaux, ce qui supprime le frottement entre le sol et le support qui est inévitable lorsque l'on utilise du sable. Enfin, ce sol permet d'accéder au champ de déplacement grâce à l'utilisation de l'imagerie numérique.

Le sol compressible est modélisé par des blocs de mousse et les inclusions par des éléments métalliques de section rectangulaire. Un schéma du modèle est donné sur la figure 2. Les limites verticales du modèle sont recouvertes de Téflon afin de limiter le frottement, on les considère alors comme des plans de symétrie. Une instrumentation en capteurs de force permet de déterminer la répartition des charges à la base du matelas. La figure 3 montre comment les résultats donnés par les capteurs sont exploités. Les charges F_{p1} , F_{p2} et F_b sont directement mesurées par les capteurs et W est le poids d'une tranche de matelas de longueur s . La charge appliquée sur la mousse (F_s) et le frottement le long de l'inclusion (F_{fr}) sont alors déterminés.

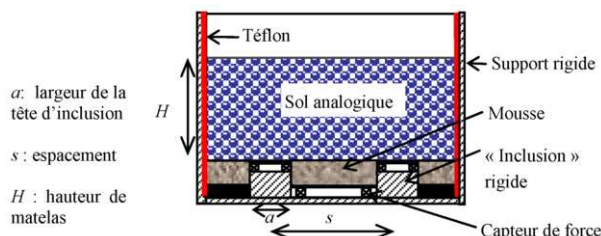


Figure 2. Modèle physique bidimensionnel

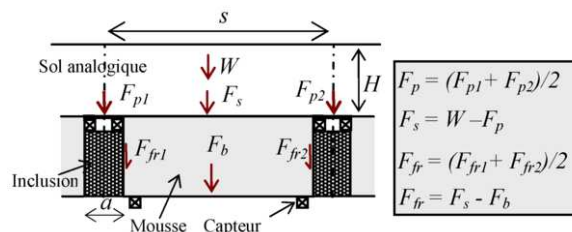


Figure 3. Bilan des forces dans le modèle

L'étude paramétrique porte sur le taux de recouvrement α , égale au rapport a/s , et sur la hauteur de matelas H . Les paramètres géométriques des trois configurations étudiées sont indiqués dans le tableau 1.

Tableau 1. Paramètres géométriques

a (m)	s (m)	$\alpha=a/s$
0.1	0.32	31%
0.1	0.45	22%
0.1	0.65	15%

Le matelas est mis en place par couches de 0,1 m jusqu'à une hauteur de 0,44 ou 0,7 m, puis une surcharge de 4,3 kPa est placée en surface du matelas. À la fin du chargement, le fluage de la mousse, simulant qualitativement la consolidation du sol compressible, est observé durant 80 minutes. Des clichés sont pris à chaque phase et une technique de corrélation d'image donne accès au champ de déplacement dans le massif (Mgui-Touchal et al., 1996).

3 RESULTATS DES EXPERIMENTATIONS

3.1 Massif non renforcé

Un essai de référence sans inclusions est réalisé afin de mettre en évidence l'apport du renforcement. Le tassement à la base du matelas est uniforme et est donné en fonction de la hauteur sur la figure 4. La surcharge est équivalente à 0,07 m de sol. Le tassement de 5 mm à hauteur constante correspond à la phase de fluage.

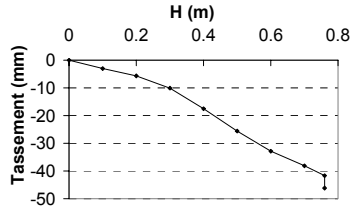


Figure 4. Tassement de la mousse sans renforcement par inclusions

3.2 Influence du taux de recouvrement et de la hauteur de matelas

Les trois essais avec un taux de recouvrement variant entre 15% et 31% sont réalisés avec une hauteur atteignant 0,7 m pour $\alpha=15\%$ et 22%, et 0,44 m pour $\alpha=31\%$.

3.2.1 Réduction du tassement à la base du matelas

Lors du chargement, le tassement maximum à la base du matelas est atteint à mi-portée entre les inclusions. Il est comparé au tassement obtenu sans inclusions sur la figure 5, en fonction du rapport H/s . Plus le taux de recouvrement est grand, plus le tassement de la mousse est réduit. La réduction de tassement est significative entre 15 et 22%, le gain est moins intéressant entre 22 et 31%.

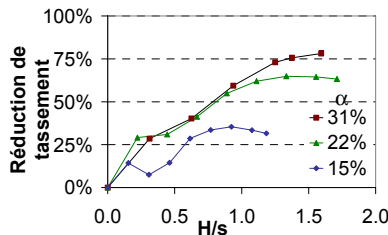


Figure 5. Réduction de tassement à la base du matelas

3.2.2 Transfert de charge

Dans la littérature, on trouve généralement trois facteurs pour quantifier le transfert de charge sur les inclusions. L'efficacité (E) est la proportion de la charge totale (poids du matelas+surcharges) reprise par les inclusions, la capacité (C) est le rapport entre la charge supportée par une inclusion (F_p) et le poids d'une colonne de matelas de même section, c' est aussi l'efficacité normalisée par le taux de recouvrement :

$$C = \frac{F_p}{(H \cdot \gamma + q_0) \cdot A_p} = \frac{E}{\alpha} \quad (1)$$

où γ est le poids spécifique du sol, A_p la section de l'inclusion et q_0 est la surcharge éventuelle en surface.

Le taux de réduction de contrainte (SRR pour *Stress Reduction Ratio*) est le rapport entre la contrainte verticale s'appliquant sur le sol compressible (q_s) et la contrainte verticale moyenne à la base du matelas. Il s'exprime en fonction de E et du taux de recouvrement α :

$$SRR = \frac{q_s}{\gamma \cdot H + q_0} = \frac{1-E}{1-\alpha} \quad (2)$$

Dans la pratique, ces quantités sont utiles pour le dimensionnement des inclusions, mais elles ne donnent aucune indication sur les tassements.

La figure 6 montre l'évolution de E en fonction de H/s . En l'absence de transfert de charge, $E = \alpha$. L'efficacité augmente avec la hauteur de matelas pour atteindre un palier pour H/s entre 1 et 1,5. Beaucoup d'auteurs (Hewlett et Randolph, 1988 ; Low et al, 1994 ; Demerdash, 1996) ont ainsi observé l'atteinte d'une valeur palier, pour des hauteurs de matelas variables selon les expérimentations et les taux de recouvrement examinés. Evidemment, plus α est grand, plus E est grand.

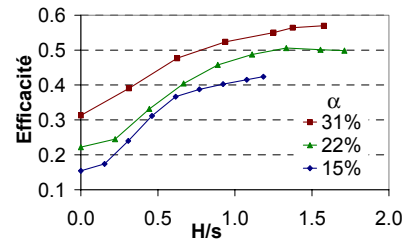


Figure 6. Efficacité en fonction de H/s

La figure 7 montre l'évolution de C en fonction de H/s . Sans transfert de charge, $C = 1$. Plus les inclusions sont éloignées, plus la capacité est grande.

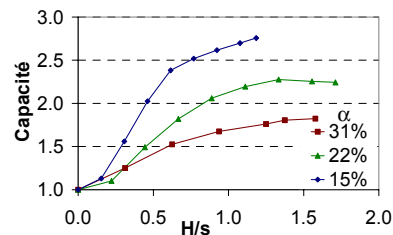


Figure 7. Capacité en fonction de H/s

La figure 8 montre l'évolution du taux SRR en fonction de H/s . Sans transfert de charge, $SRR = 1$. SRR diminue lorsque H augmente : le sol compressible est déchargé. Dans notre expérimentation, SRR est indépendant du taux de recouvrement, alors qu'on aurait pu attendre une valeur de SRR plus faible pour un taux de recouvrement plus élevé (comme l'ont observé Low et al., 1994).

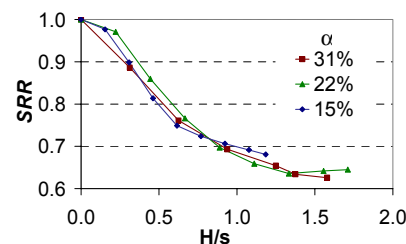


Figure 8. Valeurs du taux SRR en fonction de H/s

Ce résultat a conduit à prendre en compte la part de la charge transmise aux inclusions par frottement entre la mousse et les inclusions. On a donc défini le terme SRR_m qui est le rapport entre la contrainte verticale qui s'exerce à la base de la mousse (charge directement mesurée par les capteurs) et la contrainte verticale moyenne. La figure 9 montre la variation de SRR_m en fonction de H/s pour les trois essais : plus α est grand, plus SRR_m est faible. On a effectivement mesuré une

proportion du poids du remblai reprise par frottement (F_b/W) qui augmente avec le taux de recouvrement : cette proportion est en moyenne de 10% pour $\alpha=15\%$, 15% pour $\alpha=22\%$, et 22% pour $\alpha=31\%$.

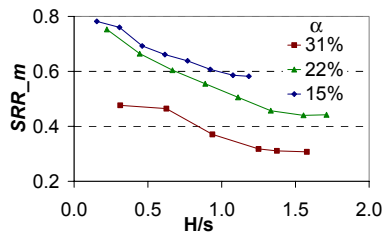


Figure 9. SRR_m en fonction de H/s

3.2.3 Formation de voûte pendant la phase de fluage

Afin d'examiner l'influence de la hauteur de matelas sur la formation des voûtes, le cas $\alpha=22\%$ est étudié pour deux hauteurs de matelas : $H=0,44$ m et $H=0,7$ m, correspondant à respectivement 1s et 1,6s. Pour chacun des deux essais, le modèle est chargé jusqu'à la hauteur mentionnée, la surcharge est positionnée en surface et le fluage est observé durant 80 minutes.

La figure 10 montre le champ de déplacement vertical déterminé à partir de la corrélation entre le cliché pris au début de la phase de « consolidation », et celui pris après 80 minutes. Pour $H=1,6s$ il s'est formé une voûte et les tassements en surface sont uniformes, alors que pour $H=1s$ les plans de cisaillement se prolongent jusqu'à la surface induisant des tassements différentiels. Il y a une réelle différence de comportement entre ces deux configurations : par exemple, à une distance à la base du matelas de 0,25 m, on observe des tassements différentiels très importants dans le cas $H=1s$ alors que les tassements sont déjà homogénéisés pour $H=1,6s$. La formation de la voûte dans le cas $H=1,6s$, pourrait éventuellement s'expliquer par le fait que les tassements de la mousse sont initialement plus importants dans ce cas que pour $H=1s$, car le poids du matelas y est plus important. Ainsi, le tassement différentiel existant déjà à la base du matelas pourrait conditionner la formation des voûtes.

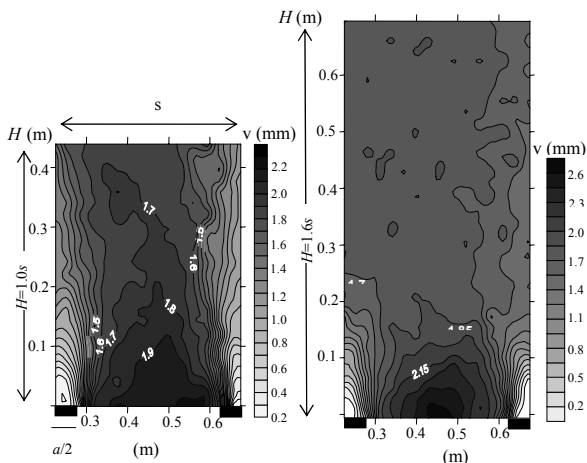


Figure 10. Tassements lors de la « consolidation » pour $\alpha=22\%$

4 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Un modèle physique bidimensionnel a permis d'étudier les mécanismes de transfert de charge qui se développent au sein du matelas granulaire. Les conditions de similitudes entre le modèle et le prototype n'étant pas strictement respectées, les résultats sont plus qualitatifs que quantitatifs.

L'étude paramétrique porte sur le taux de recouvrement et la hauteur de matelas. Les résultats sont analysés en terme de champ de déplacement et de répartition des charges à la base du matelas. Les résultats montrent que la mousse est déchargée lorsque l'on augmente la hauteur de matelas et/ou le taux de recouvrement : les tassements de la mousse et les contraintes verticales s'y exerçant sont effectivement réduits. Lorsque l'on éloigne les inclusions, la charge appliquée sur leur tête augmente mais la proportion du poids total du matelas qu'elles reprennent diminue. Pour $\alpha=22\%$, une hauteur de matelas de 1,6s conduit à une voûte complète et donc à des tassements uniformes en surface, alors qu'une hauteur de 1s conduit à des tassements différentiels en surface.

Des confrontations avec les modèles théoriques existants, en terme de répartition de charge à la base du matelas, montrent que la méthode proposée par Low et al. (1994) donnent des résultats proches des résultats expérimentaux, alors que la méthode BS 8006 (1995) semble la moins appropriée.

Les investigations futures porteront sur l'apport d'une nappe géosynthétique à la base du matelas, sur l'influence de la compressibilité de la mousse et sur le comportement du système en présence d'une charge ponctuelle en surface.

RÉFÉRENCES

- Briançon, L. 2002. *Renforcement des sols par inclusions rigides - Etat de l'art en France et à l'étranger*. IREX, Paris, 185p.
- Briançon, L., Kastner, R., Simon, B. et Dias, D. 2004. Etat des connaissances : Amélioration des sols par inclusions rigides. *Int. Symp. on Ground Improvement ASEP-GI 2004*, Paris, 15-43.
- BS 8006. 1995. *Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills*, Section 8, British Standard Institution.
- Carlsson, B. 1987. *Reinforced soil, principles for calculation*. Terratec AB, Linköping (en suédois).
- Combarieu, O. 1988. Amélioration des sols par inclusions rigides verticales. Application à l'édification de remblais sur sols médiocres. *Revue Française de Géotechnique*, 44, 57-79.
- Dano, C., Hicher, P.-Y. et Taillez, S. 2004. Engineering properties of grouted sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130, n° 3, 328-338.
- Demerdash, M.A. 1996. *An experimental study of piled embankments incorporating geosynthetic basal reinforcement*. Thesis, University of Newcastle-upon-Tyne.
- Dolzhenko, N. 2002. *Etude expérimentale et numérique de modèle réduit bidimensionnel du creusement d'un tunnel*. Thèse de doctorat, INSA de Lyon.
- EGBEO. 2004. *Bewehrte Erdkörper auf punkt- und linienförmigen Traggliedern, Entwurf Kapitel 6.9, version du 05/16/2004*, non publié (en allemand).
- Hewlett, W.J. et Randolph, M.F. 1988. Analysis of piled embankment. *Ground Engineering*, 21, n°3, 12-18.
- Low, B.K., Tang, S.K. et Choa, V. 1994. Arching in piled embankments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 120, n°11, 1917-1938.
- Mguil-Touchal, S., Morestin, F. et Brunet, M. 1996. Mesure de champs de déplacements et de déformations par corrélation d'images numériques. *Mécamat'96*, Aussois, 179-182.
- Paute, J.-L., Hornych, P. et Benaben, J.-P. 1994. Comportement mécanique des graves non-traitées. *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées*, 190, 27-38.
- Rathmayer, H. 1975. Piled embankment supported by single pile caps. *Conf. on Soil Mechanics and Foundation*, Istanbul, Vol. 1, 283-290.
- Schneebeil, G. 1956. Une mécanique pour les terres sans cohésion. *Compte rendus des séances de l'Académie des Sciences*, Tome 243, 2647-2673.
- Swedish Road Board. 1974. *Embankment piles*, Report N°TV121.
- Van Eekelen, S.J.M., Bezuijen, A. et Uung, O. 2003. Arching in piled embankments; experiments and design calculations. *Foundations: Innovations, observations, design and practice*, Dundee, 885-894.