

ÉTUDE NUMÉRIQUE DES MÉCANISMES DE TRANSFERT DE CHARGE DANS UNE PLATEFORME GRANULAIRE RENFORCÉE PAR GÉOSYNTHÉTIQUE ET SUJETTE A UN EFFONDREMENT LOCALISÉ

NUMERICAL STUDY OF LOAD TRANSFER MECHANISMS IN A GRANULAR EMBANKMENT REINFORCED BY GEOSYNTHETIC AND SUBJECTED TO CAVITY OPENING

Caroline Chalak¹, Laurent Briançon¹, Pascal Villard²

¹ INSA Lyon, GEOMAS, Lyon, France

² Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, 38000 Grenoble, France

RÉSUMÉ – Un modèle numérique (FEM-DEM) est utilisé pour reproduire des essais de laboratoire simulant des plateformes renforcées par géosynthétiques sur cavité circulaire avec différentes géométries, et deux modes d'ouverture de la cavité. Le tassement du sol du sol et la déflection du géotextile ainsi que le coefficient de foisonnement du sol sont déterminés et comparés aux valeurs expérimentales.

ABSTRACT – A numerical model based on FEM-DEM coupling is used to reproduce laboratory experiments simulating circular cavity opening. The geotextile's deflection and the soil surface settlement are investigated for various geometries and two cavity opening modes, and compared to the results of laboratory tests. The expansion factor was also evaluated and compared to the experimental values.

1. Introduction

Le risque d'effondrement potentiel des remblais ferroviaires ou autoroutiers lié à la présence de cavités souterraines représente un enjeu majeur pour la sécurité des biens et des personnes. Différentes méthodes de renforcement peuvent être utilisées, notamment le renforcement par géosynthétiques qui est particulièrement intéressant pour des raisons économiques et environnementales. Lorsqu'une cavité se forme sous la plateforme granulaire renforcée, le géosynthétique s'incurve par effet membrane et assure, grâce aux efforts de traction ainsi mobilisés, la stabilité de la plateforme. La forme, la taille et l'évolution de ces cavités sont très variables ce qui complexifie la compréhension des mécanismes physiques liés à ces structures. Les méthodes de dimensionnement existantes sont basées sur des hypothèses qui nécessitent des améliorations pour prendre en compte les mécanismes réels complexes développés dans la plateforme renforcée par géosynthétique.

Ce travail reproduit numériquement des essais de laboratoires qui simulent des effondrements sous une plateforme granulaire renforcée par géosynthétiques. Les simulations permettent de comparer les déformations du sol et du géosynthétique aux données expérimentales et d'analyser finement le foisonnement du sol au droit de la cavité.

Ce travail de recherche est mené, en partenariat avec le laboratoire 3SR, dans le cadre du LabCom PITAGOR (Plateforme d'Innovations Technologiques Appliquées aux

Géosynthétiques des Ouvrages Renforcés), associant le laboratoire GEOMAS de l'INSA de Lyon et la société TEXINOV. Ce LabCom est financé par l'ARN sur une période de trois ans.

2. Description des expérimentations et du modèle numérique

Les modélisations numériques reproduisent les essais expérimentaux réalisés par Pham et al. (2017) qui simulent l'effondrement d'une cavité circulaire de diamètre $D= 0,5$ m (figure 1) pour trois épaisseurs de plateforme possible ($H=0,25$ m, $H=0,5$ m et $H=0,75$ m). Plusieurs types de géosynthétique ont été testés mais seuls les résultats relatifs au géosynthétique tissé (W) seront présentés ici. La particularité de cet appareillage expérimental est de pouvoir simuler deux modes d'ouverture :

- Une plaque circulaire rigide associée à un vérin permettant de simuler un effondrement vertical (ouverture « trappe »),
- Un cône rempli de sable, dont la vidange permet de simuler une ouverture concentrique de la cavité sous la nappe géosynthétique (ouverture « progressive »).

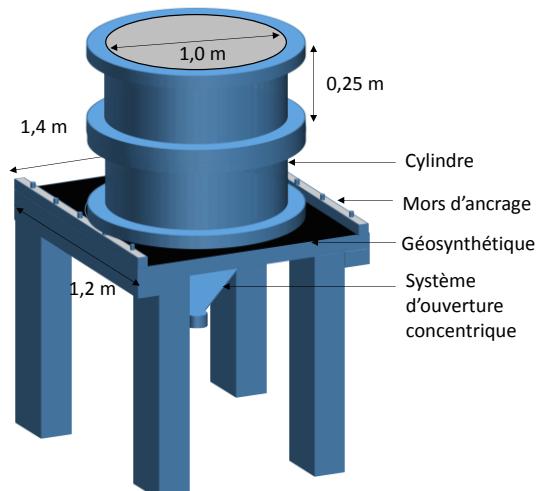


Figure 1. Dispositif expérimental.

Le code de calcul utilisé (SDEC) est basé sur un couplage DEM-FEM proposé par Le Hello (2007) et Villard et al. (2009). Le géotextile est, dans cette approche, modélisé par des éléments finis triangulaires de faible épaisseur et le remblai granulaire par un ensemble de particules discrètes en interaction. Par raison de symétrie et pour optimiser les temps de calculs, seul un quart de la cuve a été modélisé.

Des murs sans frottement sont utilisés sur le pourtour du modèle pour reproduire les conditions limites et la symétrie du modèle. Pour contrôler la mise en place de l'échantillon numérique à une densité donnée, une procédure spécifique (méthode ERDF, Salot et al., 2009) basée sur l'Expansion des Rayons des particules et la Diminution du Frottement a été utilisée. Pour approcher au mieux le comportement du matériau granulaire (angle de frottement au pic et dilatance) nous considérons (figure 2) des assemblages de particules constitués soit par deux sphères insécables juxtaposées pour simuler des grains très allongés (modèle C1), soit par deux sphères insécables imbriquées (imbrication d'une distance égale au rayon des particules ; modèle C2) pour simuler des grains d'élancement plus faible. Plusieurs échantillons avec différentes porosités numériques initiales ou formes de grains ont été testés.

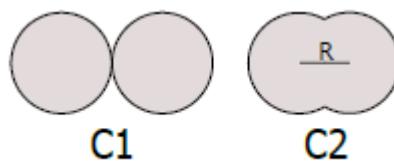


Figure 2. Illustration de la forme des grains utilisés lors des simulations numériques.

Les paramètres du modèle numérique sont calibrés de sorte que le modèle numérique reproduise les caractéristiques de frottement au pic déterminées lors des essais triaxiaux en laboratoire sur le sable utilisé lors des expérimentations. Les échantillons numériques diffèrent donc par leur capacité à foisonner lors de l'ouverture de la cavité (fonction de la densité initiale et de la forme des grains). On fera remarquer qu'à l'heure actuelle il n'existe pas d'essais normalisés qui permettent de caractériser le foisonnement d'un sol. Les paramètres d'interface sol-géotextile ont été déterminés par des essais en laboratoire sur plan incliné : $\Phi = 36,5^\circ$ pour le sable et $\delta = 25,4^\circ$ pour l'interface sol-géosynthétique dans le cas du géotextile tissé. De même, les valeurs des raideurs du géotextile dans les sens production et transverse ont été déterminées par des essais de traction au laboratoire : $K=160 \text{ kN/m}$ dans les deux directions de renforcement.

L'ouverture de la cavité est simulée par le déplacement progressif des sphères positionnées initialement sous le géotextile. Dans le cas du mode d'ouverture de type « trappe », les sphères positionnées au niveau de la cavité sont déplacées simultanément vers le bas. Dans le cas d'une ouverture progressive par augmentation du diamètre de la cavité, les sphères sont progressivement supprimées à partir du centre de la cavité vers sa périphérie. Trois valeurs différentes de $H/D = 0,5, 1$ et $1,5$ ont été retenues. Le diamètre de la cavité étant de 50 cm, ces valeurs correspondent à des hauteurs de remblai de 25, 50 ou 75 cm. Le nombre de particules (assemblage de deux sphères : C1 ou C2) utilisés dans les simulations est de 30000, 60000 et 90000 pour $H = 25, 50$ et 75 cm respectivement.

3. Comparaison numérique expérimentale.

3.1. Déflexion du géotextile et tassement en surface

Afin de valider le modèle numérique, la déflection (ou le déplacement vertical) du géotextile (dg) et le tassement en surface (ds) sont déterminés pour diverses configurations et comparés aux valeurs expérimentales. Les tests sont nommés comme suit : Mode d'ouverture (T pour trappe et P pour l'ouverture progressive par augmentation du diamètre de la cavité), le type de géosynthétique (W pour tissé), H suivi de la valeur de la hauteur du remblai en cm, C suivi du type de grains (1 ou 2) et P suivi de la valeur de la porosité initiale du matériau numérique donnée en pourcentage.

Les figures 3 et 4 présentent les résultats relatifs à la déflection du géosynthétique et au tassement en surface pour les différents types de sol dans le cas de l'ouverture de type « trappe », pour le géotextile tissé et un rapport $H/D = 0,5$.

Pour la hauteur de remblai considérée, le matériau numérique qui permet de mieux restituer les résultats expérimentaux (notamment le tassement en surface qui dépend fortement du foisonnement du sol) est vraisemblablement le matériau constitué de grains de type C2 ayant une porosité numérique de 36%. Ces paramètres de sol sont ensuite utilisés pour les autres simulations numériques pour valider le modèle avec différents rapports H/D et différents modes d'ouverture de la cavité.

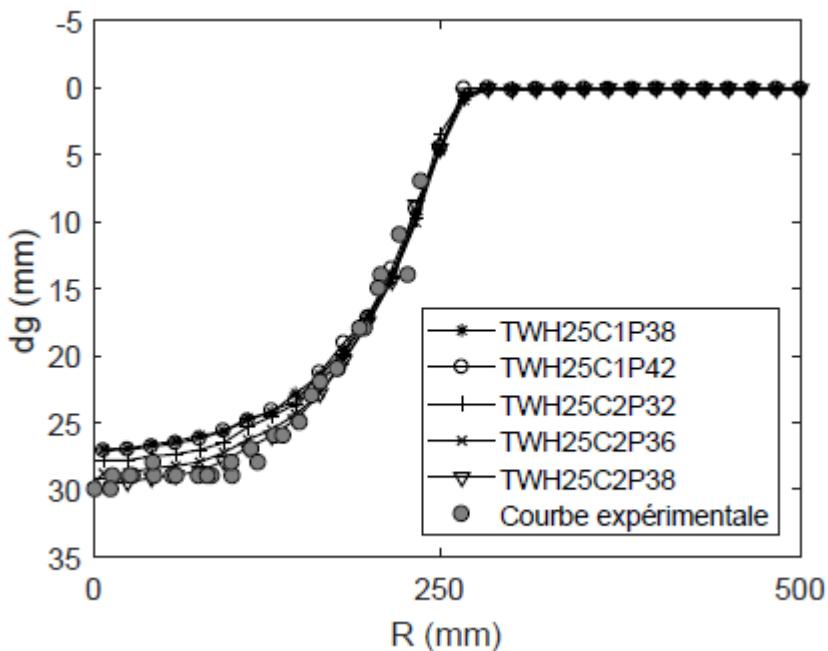


Figure 3. Déflections du géotextile tissé pour $H/D = 0,5$ et différents types de sols numériques.

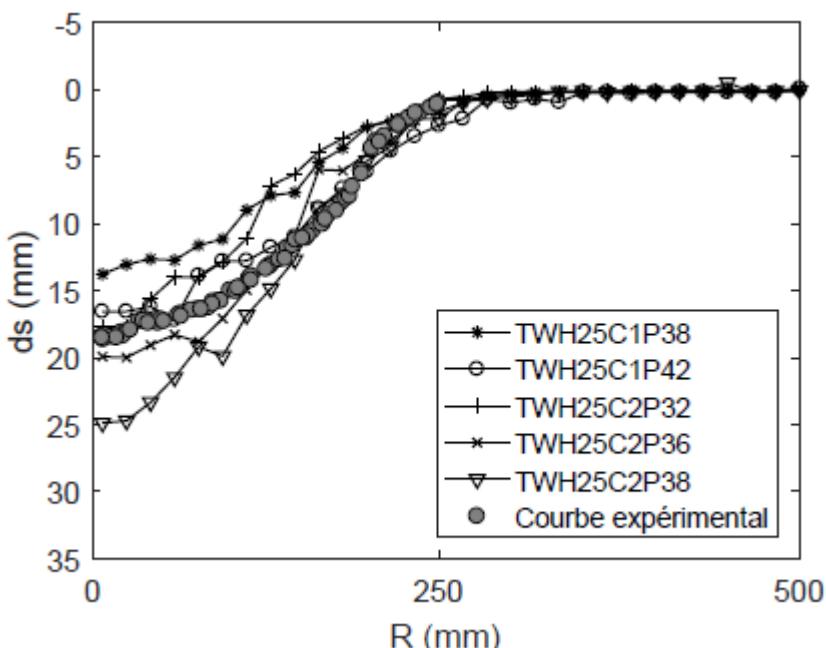


Figure 4. Tassements du sol en surface pour $H/D=0,5$ et différents types de sols numériques.

Les courbes présentées sur les figures 3 et 4 montrent que les tassements en surface dépendent fortement du type de sol modélisé alors que les déflections du géosynthétique semblent moins affectées. Pour une même forme de grains, plus la porosité numérique est élevée, plus la valeur du tassement de surface est élevée. Logiquement, plus le matériau est dense, plus la dilatance du matériau est élevée d'où des tassements de surface (ds) moins importants. De plus, lorsque la densité est élevée, l'efficacité du transfert de charge vers les bords de la cavité est augmentée ce qui conduit à une déflection du géotextile (dg) moins importante.

La forme des grains a également une influence sur les tassements de surface ; l'échantillon avec les grains les plus allongés (C1) est plus dilatant ce qui conduit

naturellement à un tassement en surface et une déflexion de géotextile moins importants.

Les valeurs des déflections maximales du géotextile et des tassements de surface pour les autres simulations effectuées (épaisseurs de sol différentes) sont présentées dans le tableau 1.

Comme on peut le constater, le modèle numérique (avec le type de matériau granulaire retenu) permet d'approcher les valeurs expérimentales avec une précision de $\pm 1,5$ mm pour le tassement en surface et ± 2 mm pour la déflexion du géotextile, ce qui reste inférieur aux précisions expérimentales.

Tableau 1. Comparaison des valeurs numériques et expérimentales des déflections maximales du géotextile et des tassements de sol en surface.

Test	dg (expérimental) (mm)	dg (numérique) (mm)	ds (expérimental) (mm)	ds (numérique) (mm)
TWH50C2P36	31	30	13	13,7
TWH75C2P36	27	26	6	6
PWH25C2P36	45	44	38	36,7

3.2. Coefficient de foisonnement

Les valeurs du coefficient de foisonnement global sur la cavité sont également comparées avec les valeurs obtenues expérimentalement. Le coefficient de foisonnement global peut être défini comme le rapport du volume de sol foisonné sur le volume initial au droit de la cavité.

$$C_e = \frac{V_f}{V_i} \quad (1)$$

Le volume du remblai numérique est calculé en discrétilisant l'échantillon de sol au droit de la cavité en volumes élémentaires de petite taille et en délimitant les positions extrêmes des grains sur les limites supérieures et inférieures du modèle. Cette méthode dépend quelque peu de la taille des volumes élémentaires (comparativement à la taille des particules de sol). Pour la discrétilisation retenue, l'erreur sur le volume a été estimée à environ 2%.

Le tableau 2 présente les valeurs des coefficients de foisonnement global obtenues au laboratoire C_{eexp} (Pham et al., 2017), et les valeurs obtenues numériquement C_e . On remarque que le modèle de sol numérique retenu est capable d'approcher correctement le coefficient de foisonnement global du volume de sable situé au droit de la cavité avec une erreur inférieure à 2%.

L'influence de la densité du sol numérique sur le coefficient de foisonnement global est étudiée dans le cas du mode d'ouverture en trappe et pour un rapport $H/D=0,5$. On remarque (tableau 2) que C_e augmente lorsque la densité numérique du sol augmente.

Tableau 2. Comparaison des valeurs numériques et expérimentales du coefficient du foisonnement moyen.

Test	C_{eexp}	C_e
TWH25C2P36	1,026	1,032
TWH50C2P36	1,024	1,021
TWH75C2P36	1,020	1,017
PWH25C2P36	1,033	1,049
TWH25C2P32	--	1,026
TWH25C2P38	--	1,045

En complément, le coefficient de foisonnement et la porosité du sol numérique sont calculés localement puis moyennés par couches horizontales. La figure 5 montre que la répartition du coefficient de foisonnement Ce n'est pas uniforme dans le remblai et qu'elle diminue en moyenne linéairement avec la profondeur du remblai (pour tous les essais simulés) et ce compte tenu du fait que les particules du sol en profondeur sont plus constraintes et moins aptes à se déplacer.

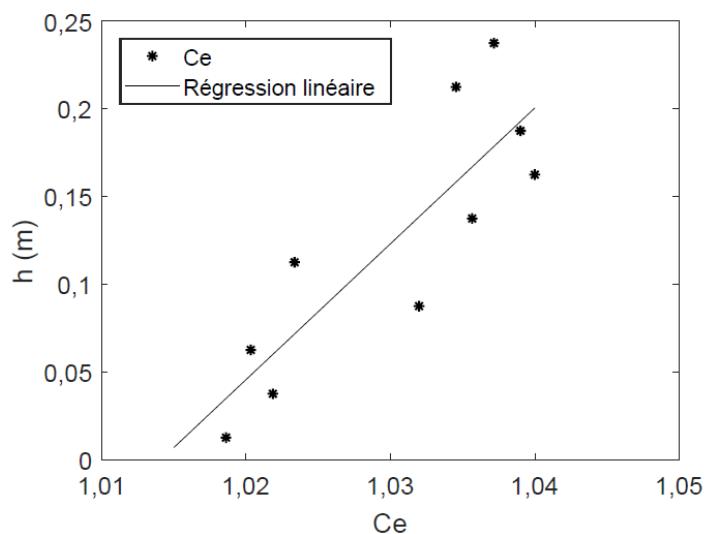


Figure 5. Evolution du coefficient de foisonnement local avec la profondeur du remblai.

De même, la courbe de porosité numérique obtenue après ouverture de la cavité et moyennée sur des couches horizontales présente la même tendance (figure 6). La porosité initiale est relativement uniforme à l'intérieur du remblai alors qu'à la fin du processus d'ouverture, la valeur moyenne de la porosité augmente consécutivement au cisaillement du sol au droit de la cavité et au foisonnement du sol en surface ou immédiatement au-dessus du renfort géosynthétique. L'augmentation plus importante de la porosité en partie haute du remblai est en accord avec les résultats numériques de Villard et al., (2016) qui montrent que le sol est principalement cisaillé sur les bords de la cavité et fortement décompacté en surface.

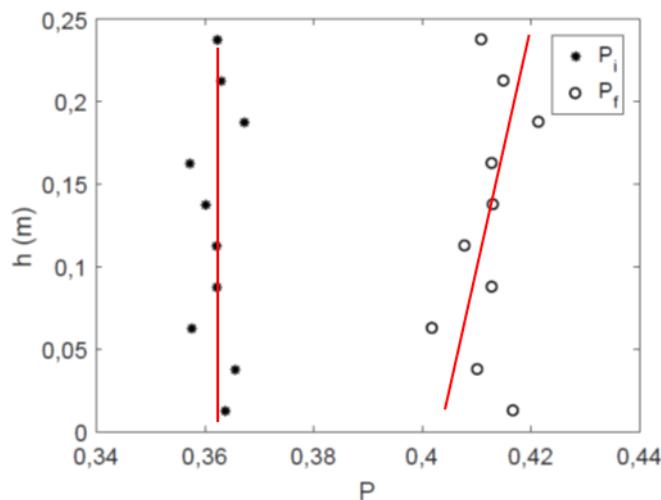


Figure 6. Evolution des porosités initiale (P_i) et finale (P_f) avec la profondeur du remblai.

4. Mécanismes de transfert de charge : distribution de contraintes sur le géotextile

Les variations de contraintes verticales agissant sur le géotextile ($\Delta\sigma_v/\sigma_0$) lors de l'ouverture de la cavité, sont présentées dans cette section pour les deux modes d'ouverture (figure 7). Les contraintes sont déterminées sur des zones annulaires centrées sur la cavité.

Nous remarquons que le processus d'ouverture de type « trappe » conduit à une répartition des contraintes dite inversée (relativement constante au centre de la cavité et plus forte sur les bords de la cavité) alors qu'une répartition dite conique est obtenue dans le cas d'une ouverture progressive de la cavité par augmentation de son rayon (chargement maximal au centre de la cavité). On peut dans les deux cas observer une augmentation très forte de la contrainte aux bords de la cavité et moins importante dans la zone d'ancrage qui témoigne des mécanismes de report de charge.

Ces résultats sont en accord avec les résultats numériques présentés par Villard et al. (2016) qui décrivent dans les deux cas les mécanismes de transfert de charge impliqués.

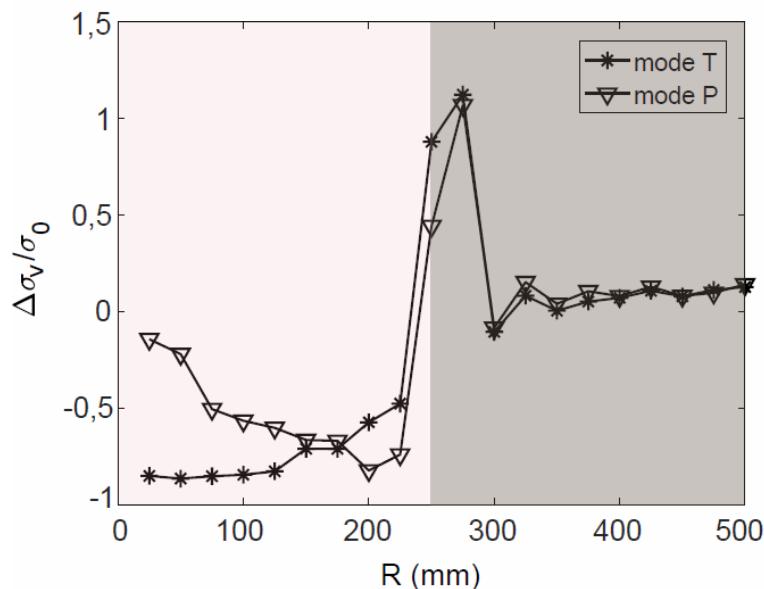


Figure 7. Variations des contraintes verticales sur le géotextile pour les deux modes d'ouverture.

5. Conclusions

Un modèle numérique basé sur le couplage des méthodes des éléments discrets et des éléments finis est utilisé pour simuler l'ouverture d'une cavité sous un remblai granulaire renforcé par géosynthétique. Les simulations reproduisent les essais de laboratoire de Pham et al., (2017).

Le modèle numérique a été validé en comparant le tassement de surface du remblai, la déflection du géosynthétique et le coefficient de foisonnement global au droit de la cavité avec les valeurs expérimentales. Les résultats numériques reflètent correctement le comportement de l'ensemble sol-géosynthétique et les valeurs obtenues expérimentalement.

Les influences du mode d'ouverture, de la hauteur du remblai et de sa densité sont aussi étudiées. Les résultats sont en accord avec les observations expérimentales de Pham et al. (2017) et les résultats numériques présentés par Villard et al. (2016).

Des investigations complémentaires montrent que la porosité n'est pas uniforme sur la hauteur du remblai au droit de la cavité. De même, le coefficient de foisonnement n'est pas uniforme, il diminue avec la profondeur, ce qui n'est pas pris en compte dans les méthodes de dimensionnement actuelles.

Les variations de contraintes sur la nappe géosynthétique sont aussi présentées. Les résultats obtenus démontrent l'importance du mode d'ouverture sur les mécanismes de transfert de charge.

Enfin, d'autres investigations sont nécessaires pour mieux comprendre les mécanismes de transfert de charge et améliorer les méthodes de dimensionnement. Des simulations numériques complémentaires pourraient être réalisées pour corrélérer le coefficient de foisonnement au mode d'ouverture, au rapport H/D et aux propriétés et caractéristiques du sol (densité, répartition granulométrique, angle de frottement, ...).

6. Références bibliographiques

- Le Hello, B. (2007). Renforcement par géosynthétiques des remblais sur inclusions rigides, étude expérimentale en vraie grandeur et analyse numérique (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I).
- Pham, M. T., Briançon, L., Dias, D., & Abdelouhab A. (2017), A. Etude expérimentale des mécanismes de déformation développés dans les plateformes granulaires renforcées par géosynthétiques sur cavités, Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017.
- Salot, C., Gotteland, Ph., & Villard, P. (2009), Influence of relative density on granular materials behavior: DEM simulations of triaxial tests, Granular Matter; vol. 11, n° 4, pp. 221-236.
- Villard, P., Huckert, A., & Briançon, L. (2016). Load transfer mechanisms in geotextile-reinforced embankments overlying voids: Numerical approach and design. Geotextiles and Geomembranes, vol. 44 n°3, pp. 381-395.
- Villard, P., Chevalier, B., Le Hello, B., & Combe, G. (2009). Coupling between finite and discrete element methods for the modelling of earth structures reinforced by geosynthetic. Computers and Geotechnics, vol. 36, n°5, pp. 709-717.