

# Etude numérique et expérimentale d'une plateforme granulaire renforcée par géosynthétique et soumise à un effondrement localisé

## **NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF A GRANULAR EMBANKMENT REINFORCED BY GEOSYNTHETIC AND SUBJECTED TO CAVITY COLLAPSE**

Caroline Chalak<sup>1</sup>, Laurent Briançon<sup>2</sup>, Pascal Villard<sup>3</sup>, Daniel Dias<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Arcadis ESG, Villeurbanne, France

<sup>2</sup> INSA LYON, GEOMAS

<sup>3</sup> Université Grenoble Alpes, 3SR

**RÉSUMÉ** – Deux modèles numériques sont développés et comparés à des résultats d'essais de laboratoire simulant une plateforme granulaire renforcée par géosynthétique sur cavité. Les limitations de chaque modèle sont discutées. Les déplacements verticaux du géosynthétique et du sol sont déterminés et comparés aux valeurs expérimentales. Les mécanismes de transfert de charge et de foisonnement du sol sont également étudiés.

**ABSTRACT** – Two numerical models are developed and compared with results of laboratory tests simulating a geosynthetic-reinforced granular platform above a circular cavity. The limitations of each model are discussed. Vertical displacements of the geosynthetic and soil are determined and compared with experimental values. The load transfer and soil expansion mechanisms are also studied.

### 1. Introduction

La présence des cavités souterraines ou des horizons de sol décomprimés peuvent aboutir à un effondrement localisé en surface des remblais ferroviaires et routiers. Parmi les nombreuses techniques de renforcement proposées, les géosynthétiques sont couramment utilisés pour des raisons environnementales, techniques (facilité et rapidité de pose) et économiques. La forme, la taille et l'évolution des fontis sont très variables ce qui complique la compréhension des mécanismes physiques liés au comportement du sol et de la plateforme granulaire sus-jacente.

Les méthodes de dimensionnement actuelles sont basées sur diverses hypothèses qui n'ont pas été entièrement validées et qui nécessitent des améliorations afin de prendre en compte des mécanismes complexes développés dans la plateforme granulaire renforcée.

Ce travail compare deux modèles numériques qui visent à reproduire les résultats d'essais de laboratoire simulant des effondrements circulaires sous une plateforme granulaire renforcée par géosynthétique : un modèle basé sur la méthode des éléments finis (FEM) réalisé sur Plaxis et un modèle couplant la méthode des éléments finis et des éléments discrets (DEM-FEM). Les mécanismes de transfert de charge et de foisonnement sont également étudiés.

### 2. Le dispositif expérimental

Les essais de laboratoires sont réalisés sur un dispositif expérimental développé par Pham et al. (2019). Il consiste en une table rectangulaire (1,2m x 1,4m) percée en son centre par une cavité de diamètre  $D = 0,5\text{m}$  (Figure 1). La hauteur de la plateforme varie en utilisant un, deux ou trois cylindres métalliques de 1m de diamètre intérieur et d'une hauteur  $H=0,25\text{m}$  chacun. La nappe géosynthétique (de raideur  $J=160\text{kN/m}$  dans les deux directions de renforcement), légèrement mise en tension, est fixée sur la table. Le sol est

progressivement mis en place dans les cylindres en veillant à obtenir une densité uniforme.

Deux dispositifs spécifiques peuvent être installés sous la base rigide afin de simuler l'apparition d'une cavité :

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

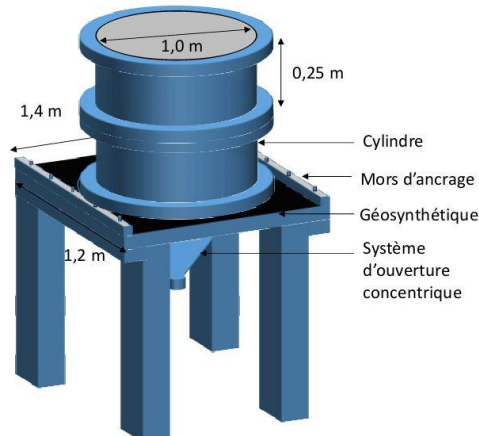


Figure 1. Dispositif expérimental (mode B).

### 3. Modèles numériques adoptés

#### 3.1. Modèle en milieu continu de type éléments finis (FEM)

Les calculs numériques ont été effectués à l'aide du code d'éléments finis PLAXIS (PLAXIS, 2016). En raison de la symétrie du modèle, une configuration axisymétrique bidimensionnelle (2D) en conditions drainées a été choisie pour modéliser les essais expérimentaux. Le maillage est constitué d'éléments triangulaires à 15 nœuds et comporte environ 10000 nœuds. Le maillage est affiné à proximité de la zone de la cavité et est réactualisé au début de chaque phase de calcul pour tenir compte de la déformation du modèle. Les mouvements horizontaux sont bloqués le long des limites verticales. Le fond du modèle numérique est fixé dans les directions horizontale et verticale.

La nappe géosynthétique située entre le sol sus-jacent et le corps du cadre rigide est modélisée à l'aide d'un élément géogrille d'une raideur  $J=125 \text{ kN/m}$  obtenue par calage du modèle FEM par rapport à la valeur expérimentale de la déflexion du géosynthétique. Son comportement est supposé élastique linéaire.

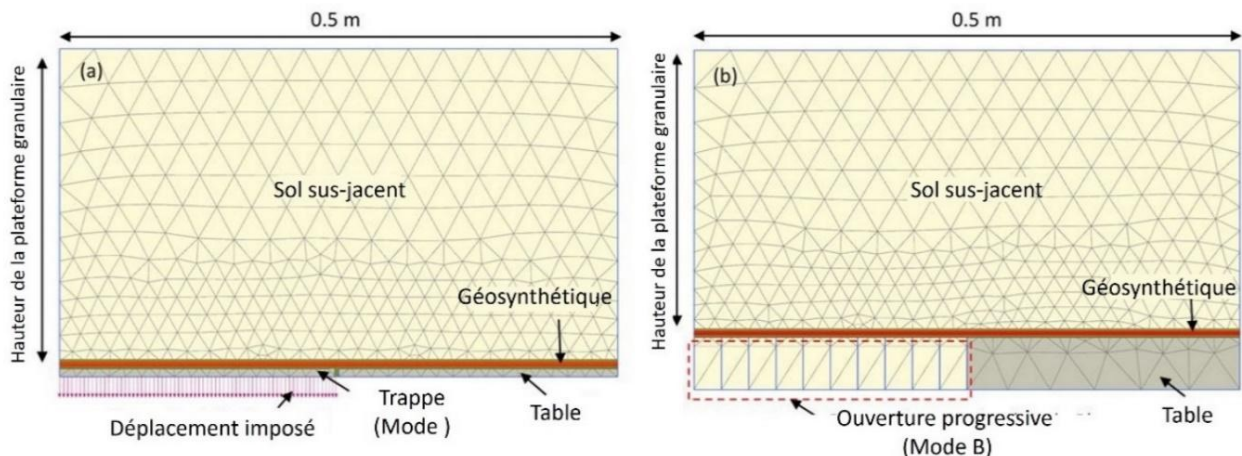


Figure 2. Configuration géométrique du modèle FEM.

Pour le mode d'ouverture de la cavité de mode A, la trappe est modélisée comme une plaque métallique placée sous la nappe géosynthétique. Afin de reproduire les mouvements descendants de la trappe, un déplacement vertical est appliqué à la trappe. Une interface est établie entre la trappe et le sol, elle permet au remblai granulaire de se déformer librement.

En ce qui concerne le mode B, le mode d'ouverture concentrique est modélisé par dix polygones de sol de même dimension. L'ouverture est ensuite modélisée en plusieurs étapes, chaque polygone étant désactivé à fur et à mesure (les zones proches du centre de la cavité sont désactivées en premier).

Les paramètres d'interface pris en compte dans cette étude sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Les paramètres d'interface du modèle FEM

Eléments d'interface	Sol/GSY	GSY/Métal	Métal/Métal**
Loi de comportement	Mohr-Coulomb		Elastique Linéaire
Module d'Young, E (MPa)	10	$10 \times 10^{-3}$	$10 \times 10^{-3}$
Angle de frottement, $\phi'$ (°)	25	10*	-
Cohésion, c'(kPa)	0	0	-
Coefficient de Poisson, $\nu$	0,3	0,3	0,3

\*la valeur de l'angle de frottement GSY/Métal a été déterminée par des essais à la boîte de cisaillement (van der Peet, 2014),

\*\*une interface élastique linéaire Métal/Métal est définie afin de permettre le mouvement entre la table métallique et la trappe.

Les paramètres numériques du sol ont été déterminés par calage en se basant sur les résultats d'essais de laboratoire. L'angle de dilatance  $\Psi$  est considéré comme égal à  $\phi' - 30^\circ$ . Les paramètres du sol retenus sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2. Les paramètres retenus pour le sol

Paramètre	Unité	Hardening soil
Poids volumique du sol, $\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	14,0
Indice des vides, $e_0$	-	0,89
Module d'Young, $E_i$	MPa	10
Module oedométrique, $E_{oed}$	MPa	10
Module de déchargement, $E_{ur}$	MPa	10
Angle de frottement, $\phi'$	°	36,5
Angle de dilatance, $\psi$	°	6,5
Cohésion, c'	kPa	0
Coefficient de Poisson, $\nu$	-	0,3

### 3.2. Le modèle DEM-FEM

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 de taille diverse en interaction.

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),

des assemblages de particules constitués par deux sphères insécables imbriquées d'une distance égale au rayon des particules ont été créés. Des sphères régulièrement agencées sous le géotextile permettent de simuler les différents modes d'ouverture de la cavité.

Les paramètres du modèle numérique sont calibrés pour que le modèle numérique reproduise les caractéristiques de frottement au pic du sable utilisé lors des expérimentations ( $\varphi' = 36,5^\circ$ ). Les échantillons numériques ont, suivant le type d'assemblage granulaire utilisé, des capacités à foisonner lors de l'ouverture de la cavité qui leurs sont propres (fonction de la densité initiale et de la forme des grains). Une porosité de 36% est choisie pour simuler le comportement du sol utilisé. Les paramètres d'interface sol-géotextile ont été déterminés par des essais en laboratoire sur plan incliné ( $\delta = 25,4^\circ$ ). Les raideurs du géotextile dans les sens production et transverse ont été déterminées par des essais de traction au laboratoire (160 kN/m dans les deux directions de renforcement).

L'ouverture de la cavité est simulée par le déplacement progressif des sphères positionnées sous le géotextile. Dans le cas du mode d'ouverture A, les sphères positionnées au niveau de la cavité sont déplacées simultanément vers le bas. Dans le cas d'une ouverture progressive (mode B) par augmentation du diamètre de la cavité, les sphères sont progressivement supprimées à partir du centre de la cavité vers sa périphérie. Le nombre de particules utilisées dans les simulations est de 30000, 60000 et 90000 pour  $H/D = 0,5, 1$  et  $1,5$  respectivement.

#### 4. Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux

##### 4.1. Déplacements du sol et du géosynthétique

La déflexion du géotextile ( $d_g$ ) et le tassement en surface ( $d_s$ ) sont déterminés numériquement pour diverses configurations (rapport  $H/D$  et mode d'ouverture) et comparés aux valeurs expérimentales. Les résultats sont présentés dans la figure 3.

Les paramètres retenus dans les deux modèles numériques sont calés pour le cas d'une ouverture en trappe (mode A) et pour un rapport  $H/D = 0,5$ , puis employés pour simuler le reste des configurations.

La figure 3 montre que les déplacements du géosynthétique et du sol sont fortement influencés par le mode d'ouverture de la cavité. Les tassements en surface dépendent également du rapport  $H/D$  alors que les valeurs de  $d_g$  semblent être moins affectées.

Pour toutes les configurations, les deux modèles numériques donnent des approximations pertinentes de la déflexion maximale du géosynthétique  $d_g$  et du tassement maximal  $d_s$  en surface. Les modèles sont capables de simuler la diminution maximale du tassement à la surface avec l'augmentation du rapport  $H/D$  mettant en évidence l'effet de voûte.

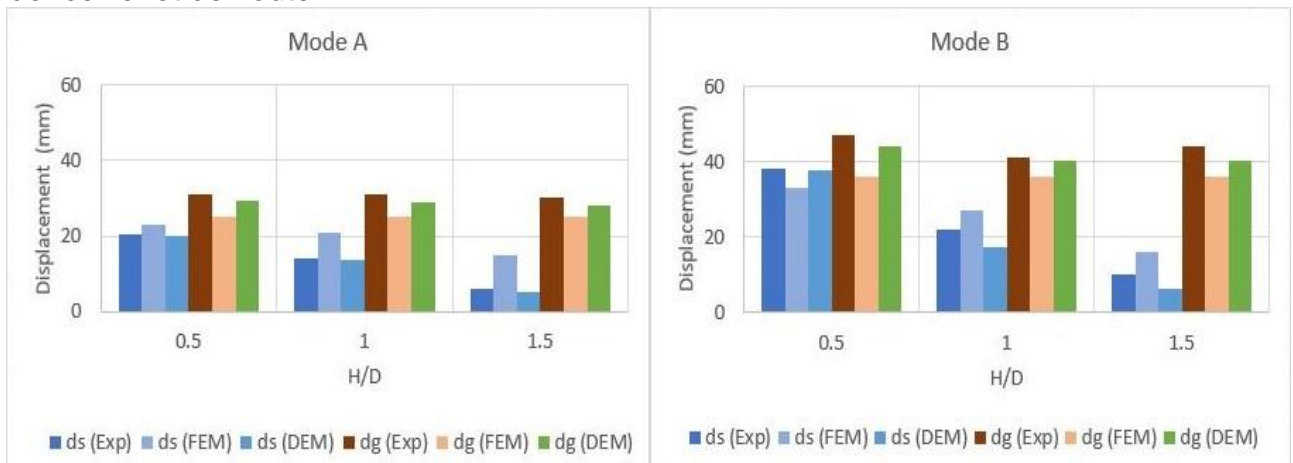


Figure 3. Les valeurs des déplacements verticaux (dg et ds) numériques et expérimentales.

En comparant les résultats des modes A et B, la figure 3 montre que la FEM et la DEM sont également capables de simuler correctement l'influence du mode d'ouverture de la cavité sur les déplacements verticaux ds et dg.

En termes de précision, les simulations DEM donnent une meilleure estimation des déplacements verticaux. Dans le cas de l'ouverture en Trappe (mode A), le modèle DEM permet d'approcher les valeurs expérimentales avec une précision de  $\pm 1,5$  mm pour le tassement en surface et  $\pm 2$  mm pour la déflexion du géotextile ce qui reste inférieur aux précisions expérimentales (en comparaison avec  $\pm 9$  mm pour ds et  $\pm 6$  mm pour dg dans le cas de la FEM). La précision des deux modèles diminue dans le cas d'ouverture concentrique (mode B) mais l'erreur reste inférieure ou égale à 5 mm dans le cas de la DEM et à 10 mm dans le cas de la FEM.

#### 4.2. Efficacité

Les mécanismes de transfert de charge au sein du remblai granulaire peuvent être caractérisés par l'efficacité E, qui peut être définie par le rapport entre la charge transmise sur le pourtour de la cavité et le poids du cylindre de sol situé au-dessus de la cavité. Expérimentalement, l'efficacité a été mesurée à l'aide d'un capteur de pression tactile de petite taille (0,32m x 0,16m) positionnée sur la nappe et situé suivant les essais soit au bord de la cavité, soit en partie centrale (Pham et al., 2018).

La figure 4 compare les simulations numériques calibrées aux essais expérimentaux pour les trois rapports H/D et les deux modes d'ouverture de la cavité. Les résultats des deux modèles numériques sont en bon accord mais diffèrent sensiblement des résultats expérimentaux. Cependant, les tendances observées expérimentalement sont aussi observées avec les simulations numériques. Pour justifier la divergence entre les résultats numériques et expérimentaux, on peut noter que la détermination de la distribution des contraintes agissant sur le géosynthétique avec le capteur de pression tactile manque de précision car un seul capteur a été utilisé et de nombreux tests sont nécessaires pour reconstituer complètement la cartographie expérimentale des contraintes.

Un autre élément qui atteste que les contraintes expérimentales agissant sur le géosynthétique sont probablement sous-estimées est le bon accord obtenu pour les valeurs expérimentales et numériques des déplacements verticaux du géosynthétique qui résultent de la quantité de charge appliquée sur ce dernier au-dessus de la cavité.

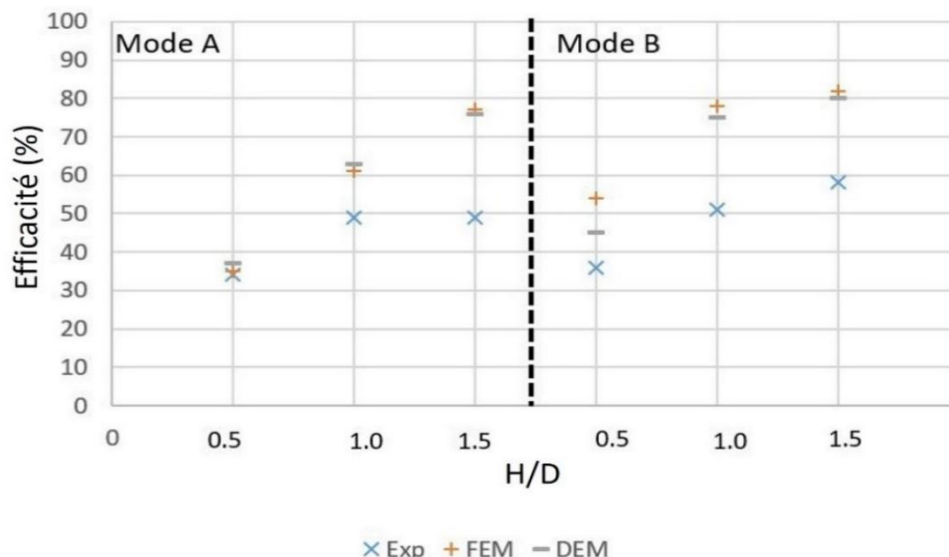


Figure 4. Comparaison entre valeurs numériques et expérimentales en termes d'efficacité.

### 4.3. Distribution des contraintes sur le géotextile

Les variations de contraintes verticales agissant sur le géotextile lors de l'ouverture de la cavité sont présentées pour les deux modes d'ouverture et pour un rapport H/D=0,5m (Figure 5). Expérimentalement, les contraintes sont mesurées à l'aide d'un tapis tactile. En DEM, les contraintes sont déterminées sur des zones annulaires centrées sur la cavité.

Les deux modèles numériques donnent des résultats proches de l'expérimentation. En particulier, la tendance de la distribution de charge sur la cavité pour les modes d'ouverture est clairement mise en évidence et confirme les résultats présentés par Villard et al. (2016) : une répartition inversée, relativement constante au centre de la cavité et plus forte sur les bords de la cavité pour le mode A et une répartition conique pour le mode B.

Pour les deux modes d'ouverture, le transfert de charge sur les zones d'ancrage est localisé près du bord de la cavité avec une forte augmentation de la contrainte aux bords de la cavité sur une bande de 5cm de largeur. Cette forte augmentation de contrainte au bord de la cavité est mieux détectée dans le modèle des éléments discrets.

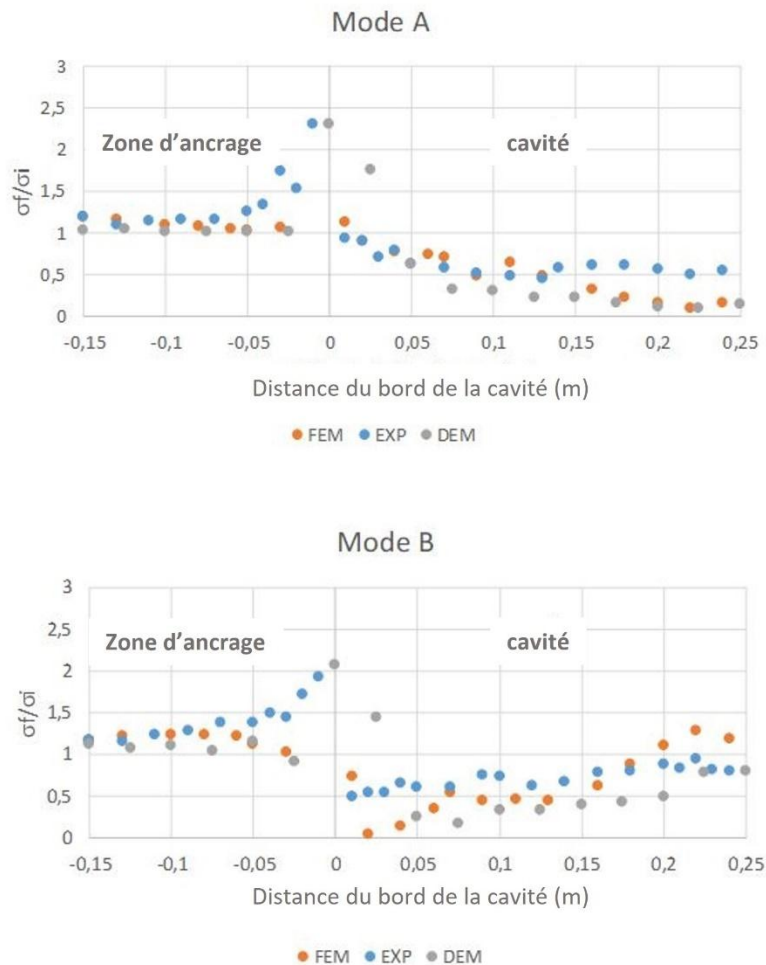


Figure 5. Comparaison entre les valeurs numériques et expérimentales du rapport des contraintes verticales-  $\sigma_i$  et  $\sigma_f$  étant respectivement les contraintes avant et après l'ouverture de la cavité

### 4.4. Coefficient de foisonnement

La figure 6 présente la comparaison entre les valeurs numériques et expérimentales (valeurs moyennes sur le cylindre de sol situé au-dessus de la cavité) du coefficient de foisonnement ( $C_e$ ).

Les modèles de sol retenus dans les modèles FEM et DEM sont capables d'approcher correctement le coefficient de foisonnement global. Néanmoins, on constate que la tendance de la variation de  $C_e$  obtenue numériquement et expérimentalement n'est pas similaire dans le cas du modèle en élément finis. Alors que dans les essais de laboratoire, la valeur de  $C_e$  semble diminuer avec l'augmentation du rapport H/D, les résultats numériques FEM montrent une tendance inverse. Cela peut être expliqué par les différences des tendances des déplacements verticaux  $d_g$  et  $d_s$ .

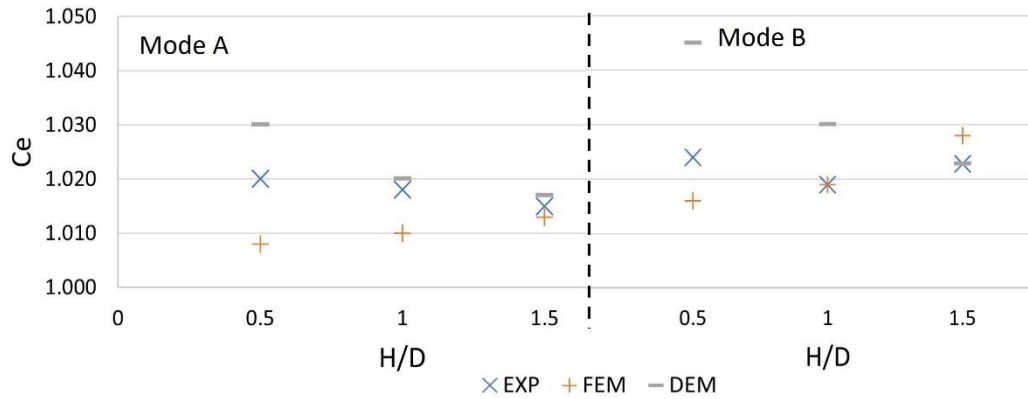


Figure 6. Comparaison entre les valeurs numériques et expérimentales du coefficient de foisonnement.

Pour mieux comprendre le phénomène de foisonnement au sein de la plateforme granulaire, le coefficient de foisonnement local est calculé exclusivement avec le modèle DEM du fait qu'il est assez complexe d'extraire ces paramètres locaux dans le modèle FEM. Le coefficient de foisonnement local est calculé puis moyenné sur des couches horizontales de 25 mm d'épaisseur à différentes hauteurs de cylindre de sol au-dessus de la cavité. L'évolution du coefficient de foisonnement dans la plateforme est assez complexe, et les tendances sont différentes pour les différents rapports H/D.

La figure 7a montre l'évolution du coefficient de foisonnement moyen de la couche de sol calculé en considérant l'ensemble du cylindre de sol situé au-dessus du vide. Pour les deux modes d'ouverture,  $C_e$  diminue avec l'augmentation du rapport H/D et les courbes tendent vers une valeur asymptotique unique égale à 1,012 indépendamment du mode d'ouverture.

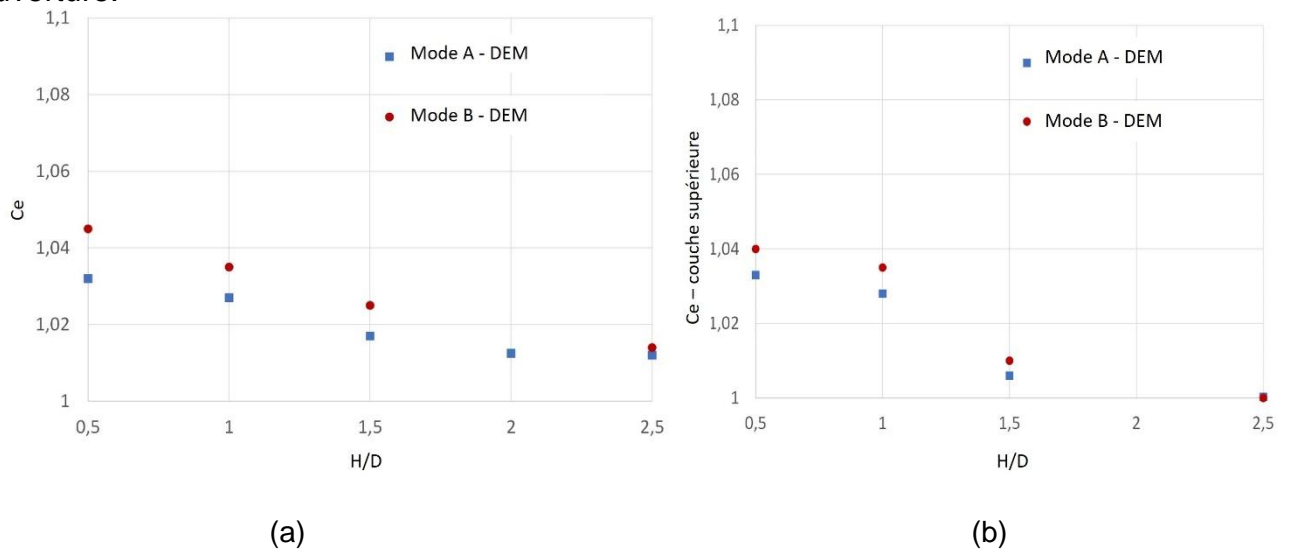


Figure 7. L'évolution du coefficient de foisonnement moyen et local avec H/D.

En examinant de plus près l'évolution du coefficient de foisonnement moyen dans la couche horizontale supérieure de l'échantillon (Figure 7b), les mêmes tendances sont observées. Le coefficient de foisonnement local de cette couche tend vers 1 pour un rapport H/D égal à 2,5, alors que sa valeur moyenne dans le remblai pour les deux modes d'ouverture est supérieure à 1. Le sol est principalement perturbé à la base de la couche de sol et l'influence de l'ouverture de la cavité diminue avec l'augmentation de H/D. Lorsque H/D = 2,5 est atteint, la couche supérieure de l'échantillon n'est pas affectée par l'ouverture de la cavité et le coefficient de foisonnement local reste égal à 1. Cette hauteur correspond au plan d'égal tassement.

## 5. Conclusions

Pour mieux comprendre les mécanismes développés à l'intérieur des plateformes granulaires renforcées sur cavité, deux modèles numériques ont été développés : avec un logiciel commercial d'ingénierie FEM (PLAXIS) et un code de recherche basé sur un couplage DEM-FEM. Les résultats des simulations numériques ont été comparés aux résultats expérimentaux de Pham (2019).

Les résultats montrent que les deux méthodes numériques sont capables de simuler correctement le comportement de l'ensemble sol-géosynthétique et les valeurs obtenues expérimentalement pour les deux modes d'ouverture de la cavité. Le transfert de charge sur le bord de la cavité et sur le géosynthétique est également bien simulé. En particulier, les différentes formes de la distribution des contraintes sur le géosynthétique en fonction du mode d'ouverture sont bien mises en évidence.

Le modèle DEM montre une meilleure précision pour l'estimation des résultats expérimentaux (en termes de déplacements, variation de contraintes et coefficient de foisonnement) et permet d'accéder à des paramètres locaux mais les temps de calculs sont plus importants que dans le cas du modèle FEM (10 minutes environ pour le modèle FEM contre quelques heures à quelques jours pour le modèle DEM) et dépend de la taille de l'échantillon.

Finalement des simulations numériques complémentaires avec le modèle DEM ont permis de définir la hauteur à partir de laquelle le sol n'est plus désorganisé suite à l'ouverture de la cavité soit (H/D=2,5) pour l'exemple traité. Cette valeur est indépendante du mode d'ouverture de la cavité.

## Références bibliographiques

- Le Hello, B. (2007). Renforcement par géosynthétiques des remblais sur inclusions rigides, étude expérimentale en vraie grandeur et analyse numérique. Ph.D. thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- Pham, M.-T., Briançon, L., Dias, D., Abdelouhab, A. (2018). Investigation of load transfer mechanisms in granular platforms reinforced by geosynthetics above cavities. *Geotextiles and geomembranes* (2018) 46, pp. 611-624.
- Pham, M.-T. (2019). Granular platform reinforced by geosynthetics above cavities: Laboratory experiments and numerical modeling of load transfer mechanisms. PhD Thesis. University of Grenoble-Alpes.
- PLAXIS, 2016. PLAXIS 2-D Manuals. ISBN-13: 978-90-76016-20-7, Netherlands.
- Salot, C., Gotteland, P., Villard, P. (2009). Influence of relative density on granular materials behavior: Dem simulations of triaxial tests. *Granular matter* 11 (4), pp. 221-236.
- Van der Peet, T. (2014), Arching in basal reinforced piled embankments, numerical validation of the concentric arches model, MSc Thesis in Geo-Engineering, Delft University of Technology, pp. 163.

- 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* 36 (5), pp. 709-717.
- Villard, P., Huckert, A., Briançon, L. (2016). Load transfer mechanisms in geotextile-reinforced embankments overlying voids: Numerical approach and design. *Geotext. Geomembranes* 44, pp. 381–395.