

Modélisation numérique d’effondrement de cavités dans un sol granulaire renforcé par géosynthétique

Claire Silvani¹, Pascal Villard², Laurent Briançon¹

¹ Univ Lyon, INSA Lyon, GEOMAS, F-69621 Villeurbanne

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

RESUME Afin d’évaluer la pertinence des techniques de renforcement de sol granulaire par géotextile, les mécanismes de transfert de charge à l’œuvre lors de la formation d’une cavité sont étudiés. Les travaux sont issus de simulations numériques basées sur un couplage entre des méthodes aux éléments finis et aux éléments discrets. Le sol (assemblage granulaire sans cohésion) est modélisé par éléments discrets, et le renforcement (nappe géosynthétique) par éléments finis. Les résultats mettent en évidence l’influence des caractéristiques géométriques de l’essai ainsi que du mode d’ouverture de la cavité sur la formation, l’évolution et l’intensité du phénomène de transfert de charge.

Mots-clefs géosynthétique; matériau granulaire; couplage éléments finis-éléments discrets

I. INTRODUCTION

L’aménagement du territoire conduit les acteurs du génie civil à évoluer sur des terrains de caractéristiques physiques et mécaniques médiocres qui peuvent avoir une certaine propension à l’affaissement. Pour éviter une ruine totale de l’ouvrage, les assises ferroviaires et autoroutières construites sur ces sols, peuvent nécessiter un renforcement spécifique contre les effondrements localisés. Les géosynthétiques représentent une solution efficace, économe et facilement applicable pour renforcer la base de ces remblais et ainsi pallier les risques d’effondrement du sol. Selon l’importance de la cavité et la taille de la structure supportée, un tel renforcement évite tout désordre trop important en surface. La mise en tension du géosynthétique à l’apparition d’un vide génère des mécanismes de transferts de charge et un comportement en membrane de la nappe. Les transferts de charge permettent un report d’une partie des charges d’exploitation et du poids propre du remblai vers les bords de la cavité. Les mécanismes de transfert de charge qui apparaissent lors de la formation d’une cavité sous des sols renforcés ont été étudiées expérimentalement (Zhu et al., 2012, Huckert et al., 2016, Pham et al., 2018). Les résultats de la littérature (Villard et al., 2016) pointent l’influence du mode d’effondrement, des caractéristiques du matériau de remblai et des propriétés de la nappe sur le phénomène de transferts de charge. Ce travail présente une étude numérique d’un effondrement localisé de sol, basé sur un couplage

éléments finis/éléments discrets, afin de mieux comprendre les mécanismes de transferts de charge dans le cas d'ouvertures de cavités sous des sols granulaires renforcés par géosynthétique.

II. MODELE NUMERIQUE ET RESULTATS

A. Méthode numérique utilisée : couplage éléments finis-éléments discrets

Les résultats présentés sont issus du code de calcul SDEC (Spherical Discrete Elements Code), où un couplage éléments finis/éléments discrets y a été introduit, pour traiter des problématiques de renforcement de sol par géosynthétique. En effet, afin de simuler le comportement du sol granulaire constituant le remblai, un modèle en éléments discrets est plus pertinent dans le sens où il autorise des comportements de réarrangement des particules de remblai, ce qui est crucial dans la bonne simulation des mécanismes de transfert de charge. Cependant, afin de prendre en compte le comportement anisotrope du géosynthétique et son interaction avec le sol, l'approche de type éléments finis a été privilégiée car plus adéquate (Le Hello, 2007). En effet, discrétiser la nappe géosynthétique par un ensemble de sphères induirait une rugosité arbitraire entre le sol et la nappe et des difficultés pour rendre compte, par le biais de simples lois de contact entre les sphères, du comportement réel du géosynthétique.

B. Simulations réalisées

Les simulations numériques ont été menées sur un cylindrique de sol de rayon R renforcé à sa base par un géosynthétique (voir figure 1, simulations d'un quart de cylindre étant donné la symétrie). Ce massif de sol est soumis à un effondrement localisé sous sa base. La taille maximale de la cavité simulée a un rayon de $R/2$. Deux types d'effondrement sont simulés : un effondrement brutal (mode 'trappe') et un effondrement par augmentation progressive du diamètre de la cavité (mode 'progressif'). Pour le mode 'trappe' toutes les particules situées sous le géosynthétique à l'emplacement de la cavité de rayon $R/2$ sont déplacées simultanément vers le bas, alors que pour le mode 'progressif', les particules situées à l'emplacement de la cavité sont déplacées progressivement vers le bas en commençant par celles situées dans l'axe de la cavité puis celles situées vers l'extérieur. Trois hauteurs H de sol de remblai sont testées ($H=0,25, 0,5$ et $0,75m$) pour $R=0,5m$. Les simulations comptent de 30000 à 90000 particules selon la hauteur du remblai. Les particules de sols simulés sont des « clumps », deux sphères collées l'une à l'autre, afin de simuler une certaine élongation et angularité afin de représenter un sol qui se rapproche plus de la réalité qu'un sol composé uniquement de sphères.

C. Quelques résultats

L'apparition d'un vide sous la nappe perturbe l'équilibre de la couche de sol sus-jacente et engendre des mécanismes de transfert de charge qui modifie la répartition des contraintes normales induites par le sol sur la face supérieure de la nappe ; entre autre une diminution des contraintes au-dessus de la cavité et une augmentation des contraintes sur le pourtour et dans les zones adjacentes à la cavité. La figure 2 montre les profils des variations de contraintes normales (valeurs relatives par rapport à l'état initial) après ouverture complète de la cavité pour les trois géométries et deux modes d'ouverture. Remarquons que les profils présentés par les simulations

au ratio $H/R = 1$ ou $1,5$ sont similaires, et ce pour les deux modes d'ouverture : baisse de la contrainte normale sur l'emprise de la nappe et report sur la partie stable. En revanche, le profil de contrainte normale pour les simulations $H/R = 0,5$ diffère. En effet, le report de contrainte s'effectue de manière inégale sur la partie stable, avec un pic plus prononcé sur le pourtour de la cavité.

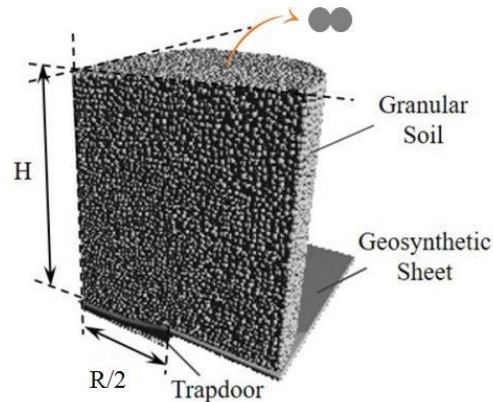


FIGURE 1. Massif de sol cylindrique renforcé par géosynthétique soumis à un effondrement. Ici l'essai met en œuvre 90 000 particules placées sur une hauteur $H=0,75$ m et pour un rayon $R=0,5$ m.

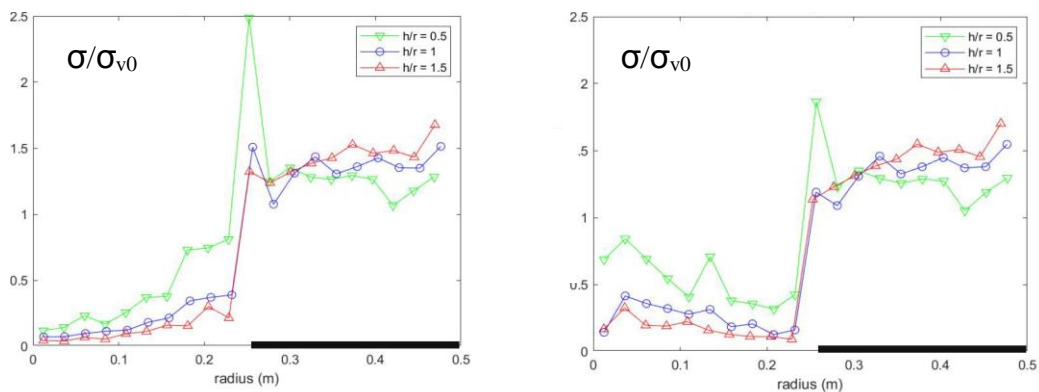


FIGURE 2. Evolution des contraintes normales induites par le sol sur la face supérieure de la nappe au pas de temps final selon H/R , ouvertures trappe (gauche) et progressive (droite).

Sur la figure 3, les forces de contact entre les particules de sol sont représentées pour $H/R=0,5$ pour les deux modes d'ouverture (la largeur du trait est proportionnelle à l'intensité de la force de contact, seules les forces les plus grandes sont présentées pour plus de lisibilité). Sur la figure de gauche, apparaissent distinctement des réseaux de forces en forme d'arcs centrés sur l'axe de symétrie du cylindre. Pour $H/R=0,5$ et 1 , les arcs atteignent le haut du remblai ; en revanche, pour $H/R=1,5$, les arcs sont difficilement perceptibles au-dessus de $H=0,5$ m. Enfin, les structures en arc prennent appui, pour $H/R=0,5$, sur une zone restreinte localisée au pourtour de la cavité, ce qui pourrait expliquer le pic de la figure 2. Il est important de noter que lesdites structures apparaissent immédiatement après ouverture de la cavité (mode 'trappe') et se renforcent au cours du temps. Au contraire, la figure de droite, correspondant au mode d'ouverture par

augmentation progressive du diamètre de la cavité (la cavité ayant atteint un rayon d'ouverture de 0,1 m), illustre un phénomène différent. La formation de la cavité étant progressive, les chaînes de force ont du mal à se développer en continu et se forment puis s'écroulent en fonction du temps. Ce n'est qu'après ouverture complète de la cavité que la structure finale apparaît.

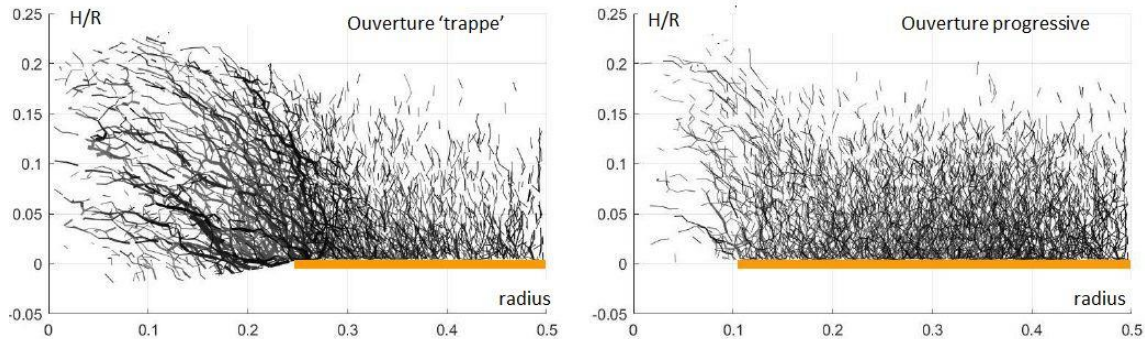


FIGURE 3. Forces de contact entre grains (au cours de l'essai, même temps) pour le ratio $H/R=0,5$.

III. CONCLUSION

Pour tous les essais analysés, un mécanisme de transfert de charge se met en place pour compenser l'effondrement du sol sous le géotextile. Il se caractérise principalement par une augmentation des forces exercées par les particules de sol sur la nappe géotextile (au droit de la limite d'effondrement). Nous avons également mis en évidence l'influence des caractéristiques géométriques de l'essai ainsi que du mode de d'ouverture de la cavité sur la formation, l'évolution et l'intensité du phénomène de transfert de charge et taux de chargement de la nappe. De plus, d'autres indicateurs de réorganisation sont affectés également au cours des essais, tels que le nombre de coordination, la rotation moyenne des particules et la porosité globale. Des essais expérimentaux ont été menés en parallèle et ont permis de valider les modélisations.

REFERENCES

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. (2018). Investigation of load transfer mechanisms in granular platforms reinforced by geosynthetics above cavities. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(5), 611-624. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.04.015>

Villard, P., Huckert, A., & Briançon, L. (2016). Load transfer mechanisms in geotextile-reinforced embankments overlying voids: numerical approach and design. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(3), 381-395. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.01.007>

Zhu, B., Gao, D., Li, J. C., & Chen, Y. M. (2012). Model tests on interaction between soil and geosynthetics subjected to localized subsidence in landfills. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 13(6), 433-444.