

CONTRIBUTION AU DIMENSIONNEMENT DES PLATEFORMES RENFORCEES PAR GEOSYNTHETIQUE SUR CAVITES

NUMERICAL CONTRIBUTION TO THE DESIGN OF GEOSYNTHETIC REINFORCED EMBANKMENTS ABOVE CIRCULAR CAVITIES

Pascal VILLARD¹, Audrey HUCKERT², Laurent BRIANÇON³

¹ 3SR, Grenoble, France

² EGIS Géotechnique, Seyssins, France

³ LGCIE-INSA, Villeurbanne, France

RÉSUMÉ – Une étude numérique couplant les méthodes discrètes et continues a permis de mettre en évidence les mécanismes de transfert de charges au sein des plateformes granulaires renforcées par géosynthétique soumises à des effondrements localisés. Il a ainsi été établi que la géométrie de la distribution des charges agissant sur le géosynthétique n'est pas uniforme et dépend fortement du mode d'ouverture de la cavité.

ABSTRACT – A numerical study coupling the discrete and continuous methods has contributed to highlight the load transfer mechanisms within granular embankments reinforced by geosynthetic and subjected to localized sinkholes. It is thus established that the load distribution acting on the geosynthetic is not uniform and depends heavily on the open mode of the cavity.

1. Introduction

L'aménagement sans cesse croissant du territoire conduit à l'exploitation de zones, actuellement délaissées, car présentant des risques pour la sécurité des usagers. C'est notamment le cas des zones d'effondrements potentiels qui sont liées à la présence de cavités souterraines. Les techniques de reconnaissance de ces cavités ne permettent en général pas les détecter de manière exhaustive et les travaux de comblement sont souvent très onéreux sans pouvoir systématiquement apporter la garantie d'une solution pérenne. Parmi les diverses techniques de renforcement réduisant les risques lors de la remontée d'un fontis, la solution de renforcement géosynthétique est largement utilisée à la fois pour ses avantages économique et environnemental, que pour sa facilité et rapidité de mise en œuvre. Le dimensionnement du géosynthétique se doit cependant d'être bien adapté pour limiter temporairement les conséquences d'un effondrement localisé tout en répondant à la maîtrise des déformations autorisant la poursuite du trafic.

En France, les premières travaux de recherche sur cette thématique (Giraud, 1997 ; Gourc et al., 1999) ont été menés dans le cadre du projet RAFAEL (Renforcement des Assises Ferroviaires et Autoroutières contre les Effondrements Localisés). Ils ont permis la mise au point d'une méthode de dimensionnement analytique basée sur des hypothèses simplifiées (Villard et al., 2002). Des expérimentations complémentaires (Nancey et al., 2004) ont permis d'améliorer et d'optimiser la méthode de dimensionnement (Briançon et Villard, 2006, 2008) en prenant en compte des mécanismes complexes alors négligés comme la déformation et la mise en tension progressive du géosynthétique dans la zone d'ancrage. Malgré ces avancées, il persistait un certain nombre d'hypothèses fortes notamment quant à l'intensité des mécanismes de transfert de charge et quant à la géométrie de la répartition des contraintes sur la nappe au droit de la cavité ou en zone d'ancrage. Pour remédier à ces manquements, des

études complémentaires (Huckert, 2014) ont été récemment menées dans le cadre du projet FUI Geolnov (Conception de géosynthétiques hautes performances sous contraintes environnementales) comportant un volet expérimental et numérique.

2. Expérimentations servant de support à l'étude numérique

Les expérimentations en vraie grandeur ont permis de simuler l'ouverture d'une cavité circulaire sous un remblai granulaire en grave roulée 20/40 mm renforcé par une nappe géosynthétique (Huckert et al., 2016). Un dispositif d'ouverture composé d'une buse de grand diamètre en PVC et de chambres à air concentriques positionnées sous le remblai permet de simuler une ouverture progressive de la cavité à des diamètres de 0,75 m, 1,25 m et 2,2 m (Fig.1).

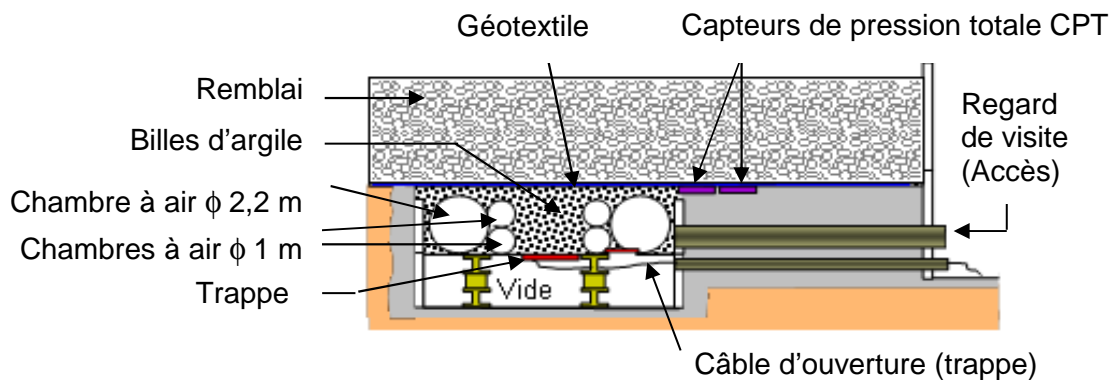


Figure 1. Vue d'ensemble du dispositif expérimental

Une instrumentation spécifique a été mise en œuvre pour déterminer les déplacements de la nappe et au sein du remblai, les tensions dans la nappe et les mécanismes de report de charge. Les déformations des géotextiles sont mesurées par fibres optiques (réseaux de Bragg – système GéodéTECT©) et par le passage en surface d'un Géoradar détectant un réseau de réflecteurs métalliques positionnés au préalable sur la nappe.

Une mesure de la déflexion de la nappe a été effectuée après ouverture de la cavité à 2,2 m de diamètre grâce à un dispositif comprenant un distance-mètre laser coulissant sur un rail introduit sous la nappe depuis le regard de visite. Les tassements de surface sont mesurés lors des ouvertures successives de cavité par topographie et par des mesures manuelles effectuées au droit des déflexions de surface.

Les reports de charge sont estimés par le biais de capteurs de pression totale CPT positionnés respectivement à 20 cm et 60 cm du bord de la cavité.

Les déplacements au sein du remblai sont obtenus grâce à un réseau de réflecteurs métalliques répartis au sein du remblai et dont la position est repérée par Géoradar.

3. Modélisation numérique des mécanismes de transferts de charge

Lors de la formation d'un vide sous un remblai renforcé, une partie du poids du cylindre de sol subjacent à la cavité est reporté via des mécanismes de transfert de charge vers le pourtour de la cavité, alors que l'autre partie est directement transmise à la nappe géosynthétique qui s'incurve pour reprendre par traction les efforts verticaux qui lui sont appliqués. Les mécanismes de transfert de charge sont liés à une modification progressive des orientations et intensités des forces d'interaction entre les grains du matériau granulaire. Il se crée ainsi des chaînes de force qui viennent s'arc-bouter au

voisinage des bords de la cavité et qui permettent un report des efforts verticaux de la zone effondrée vers les zones stables. Pour appréhender ces mécanismes complexes nous avons utilisé une modélisation 3D qui permet de rendre compte du comportement des matériaux granulaires par le biais d'une modélisation discrète et du comportement en traction et en membrane du géosynthétique par l'intermédiaire d'une modélisation continue (Villard et al., 2016). Des effondrements sous un remblai renforcé de 1 m d'épaisseur ont été simulés en considérant des formes de cavités circulaires. Par raison de symétrie et pour limiter la durée des calculs la cavité a été positionnée dans l'un des coins du modèle (Fig. 2).

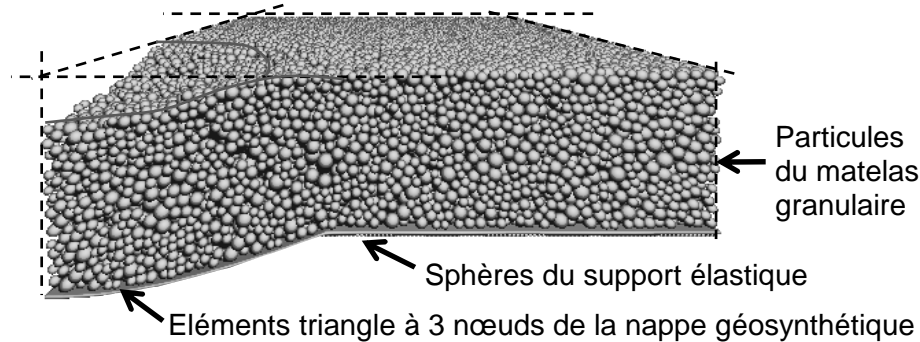


Figure 2. Modèle numérique permettant de simuler un effondrement de sol sous un remblai renforcé.

Le remblai granulaire (4 m x 4 m x 1 m) est modélisé par 32 000 particules de différentes tailles dont l'élançement et la granulométrie se rapprochent de celles des matériaux ayant servi lors de l'expérimentation. Les paramètres d'interaction entre particules (raideurs tangentielles, raideurs normales et frottement micromécanique) ont été calibrés de manière à rendre compte du comportement d'un sol granulaire peu dense ayant un angle de frottement au pic de $36,5^\circ$, un angle de frottement au palier de 31° et un module d'Young de 19 MPa.

La nappe géosynthétique, positionnée à la base du remblai, est constituée de 12800 éléments triangles à 3 nœuds. Le comportement anisotrope du géosynthétique est pris en considération via des raideurs en traction différentes dans la direction de renforcement ($J_x = 3000$ kN/m) et dans la direction perpendiculaire ($J_y = 250$ kN/m).

Le comportement d'interface entre les éléments du remblai et les éléments de la nappe géosynthétique est restitué par une loi de contact de type Coulomb. Des angles de frottement de 23° et 40° ont été considérés pour les interfaces supérieures et inférieures respectivement.

Des parois non frictionnelles sur le pourtour du modèle et des conditions en déplacements sur X et Y des nœuds situés à la périphérie de la nappe géosynthétique, sont utilisées pour assurer la condition de symétrie du problème.

Le sol support, situé sous la nappe géosynthétique, est pris en considération via un ensemble de sphères régulièrement agencées dont le déplacement progressif permet de simuler l'ouverture de la cavité. Deux mécanismes d'ouverture ont été étudiés : une ouverture progressive de la cavité par augmentation de son diamètre (jusqu'à l'obtention d'un diamètre nominal de 4 m, Process A) et un abaissement progressif de l'ensemble des sphères du sol support positionnées au-dessus de la cavité de diamètre fixé ($D = 2,2$ m, Process B).

Une fois le modèle numérique établi, le remblai granulaire est soumis à la gravité puis au test d'effondrement. Les résultats obtenus sont les déplacements des particules du matelas granulaire, les déformations et tensions dans la nappe géosynthétique ainsi que les forces d'interaction au sein du remblai granulaire et aux interfaces sol/géosynthétique.

On déduit des forces de contact sur la nappe l'efficacité du transfert de charge E au sein du remblai granulaire [Eq. 1] et la géométrie de la distribution de charge agissant sur la nappe.

$$E = (W_s - F_g) / W_s \quad (1)$$

Avec : W_s le poids du cylindre de sol situé au-dessus de la cavité, et F_g la résultante des efforts d'interaction entre les particules du matelas granulaires et la portion de nappe située au-dessus de la cavité.

Les résultats comparatifs des tests d'effondrement sont donnés, pour un même diamètre de cavité ($D = 2,2$ m), dans le tableau 1. On constate que globalement les efficacités du transfert de charge sont assez similaires d'un cas à l'autre bien que les flèches maximales du géosynthétique et les tassements de surface soient assez différents. De même le coefficient de foisonnement du matériau de remblai au dessus de la cavité est sensible au mode d'ouverture de la cavité et est légèrement plus élevé lors d'une ouverture de la cavité par augmentation de son diamètre (Process A).

Tableau 1. Comparaison entre les deux modes d'effondrement pour un diamètre de cavité D de 2,2 m.

	Process A	Process B
Efficacité du transfert de charge (%)	51,4	45,5 - 54,6
Flèche maximale du géosynthétique (m)	0,207	0,13
Tassement de surface (m)	0,126	0,086
Coefficient de foisonnement	1,048	1,036

Si l'on s'intéresse à l'évolution de l'efficacité du transfert de charge en fonction du diamètre d'ouverture de la cavité (Fig.3) on constate que les transferts de charge diminuent fortement avec le diamètre d'ouverture de la cavité : environ 90 % pour les petits diamètres ($D = 0,5$ m) contre 30 % pour les diamètres élevés ($D = 4$ m).

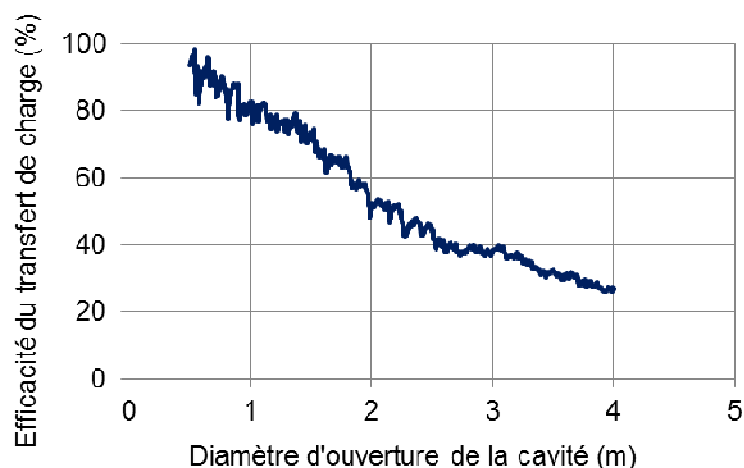


Figure 3. Evolution de l'efficacité du transfert de charge en fonction du diamètre d'ouverture de la cavité dans le cas du Process A.

Lorsque l'ouverture de la cavité se fait à diamètre donné (Process B), on constate (Fig.4) que les mécanismes de transfert de charge sont effectifs et maximal pour de très faibles déformations du matelas granulaire. Lors de l'effondrement du sol de remblai sur

la nappe l'efficacité du transfert de charge diminue progressivement pour atteindre une valeur résiduelle sensiblement plus faible que le report de charge optimal.

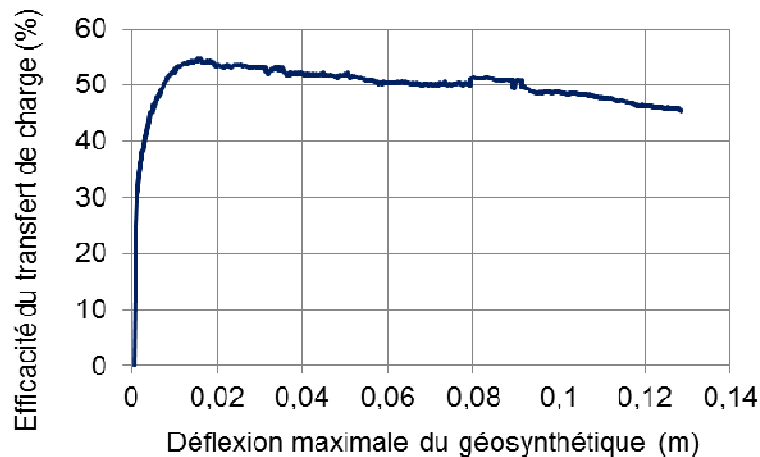


Figure 4. Evolution de l'efficacité du transfert de charge lors de l'ouverture de la cavité à un diamètre $D=2,2$ m dans le cas du Process B.

Pour expliquer les différences de comportement entre les deux modes d'ouverture de la cavité on présente sur la figure 5 les géométries des distributions de contraintes sur la nappe géosynthétique. On constate sur cette figure, une très nette différence entre les résultats à savoir : une répartition tronconique pour le Process A (avec des concentrations de charge au centre de la cavité) et une distribution de charge plutôt constante voire inversée pour le Process B (avec une concentration d'effort plus importante sur le pourtour intérieur de la cavité). Ceci est lié au fait que les transferts de charge vers les bords de la cavité sont systématiquement remis en cause par l'augmentation progressive du diamètre de la cavité (Process A) alors qu'ils sont peu perturbés tout au long du Process B. De même l'ouverture progressive du diamètre de la cavité engendre une zone de sol cisailée plus important et donc un coefficient de foisonnement plus élevé.

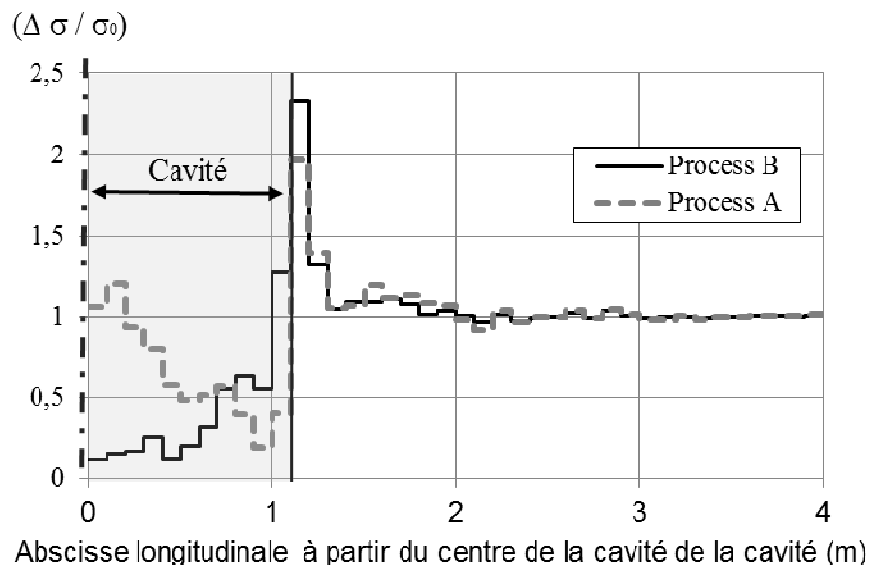


Figure 5. Comparaison des distributions de contraintes verticales sur la nappe géosynthétique pour les Process A et B.

4. Confrontation du modèle numérique avec les mesures expérimentales

Les résultats du modèle numérique sont confrontés figures 6 et 7 aux valeurs expérimentales des tassements de surface, des déplacements verticaux et des déformations de la nappe géosynthétique, et ce pour un diamètre de la cavité de 2,2 m et pour les deux modes d'ouverture de la cavité. Comme on peut le constater sur ces figures les résultats numériques qui sont les plus en adéquation avec les résultats expérimentaux sont logiquement ceux obtenus avec le Process A.

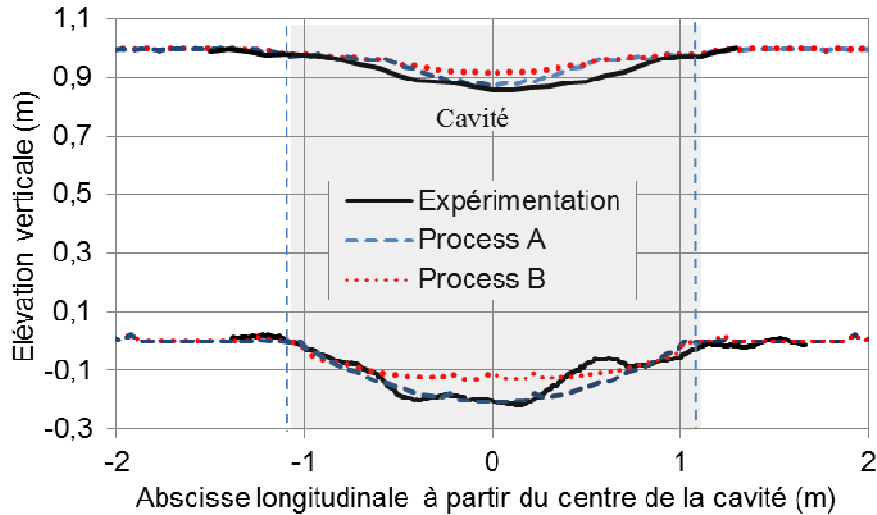


Figure 6. Comparaison des tassements de surface et déflexion du géosynthétique.

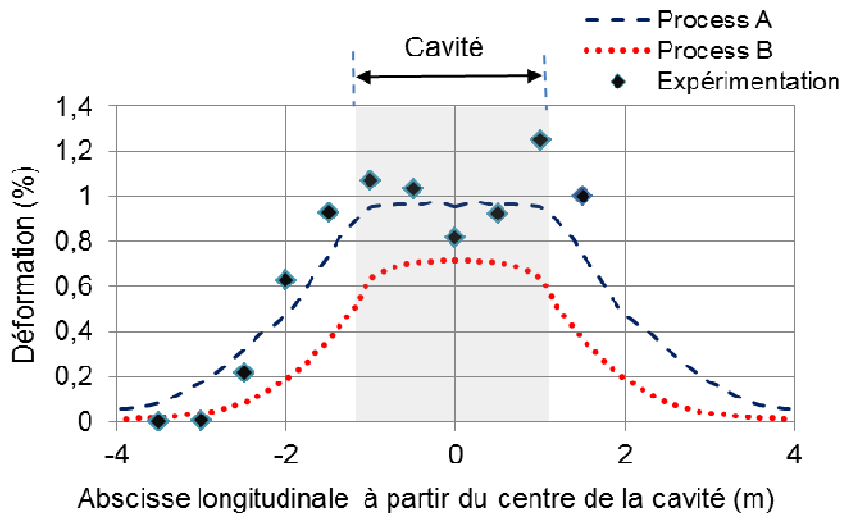


Figure 7. Comparaison des déformations du géosynthétique.

Sur la figure 6 on constate que le modèle numérique permet de décrire très correctement le comportement en membrane de la nappe géosynthétique et conduit à des déplacements de surface très comparables à ceux des mesures expérimentales. On fera remarquer également que la géométrie de la zone de sol impliquée dans l'effondrement est localisée principalement au-dessus de la cavité et ce quel que soit le mode d'ouverture envisagé. Si l'on compare (Fig. 7) les valeurs numériques des déformations de la nappe géosynthétique aux valeurs expérimentales données par les fibres optiques, on constate là encore, au regard du niveau de précision pouvant être atteint in situ, une assez bonne adéquation entre les résultats.

5. Prise en compte du mode d'ouverture de la cavité dans la méthode analytique

Après validation expérimentale, l'outil numérique permet une détermination précise des efforts agissant sur la nappe géosynthétique au-dessus et sur le pourtour de la cavité. Il a ainsi été montré que l'intensité de la charge agissant sur le géosynthétique peut être estimée à partir de la formule classique de Terzaghi mais en considérant que le ratio entre les contraintes horizontales et verticales au droit des bords de la cavité est de 1,3 (pour le matériau granulaire testé). La géométrie de la distribution de contrainte sur le géosynthétique au-dessus de la cavité n'est pas uniforme et dépend du mode d'ouverture de la cavité. Pour le Process A (Fig. 8), la distribution de charge sur la nappe est plutôt de forme tronconique avec une contrainte verticale plus élevée au centre de la cavité. Pour le Process B (Fig. 8) la distribution des contraintes verticales sur la nappe est plutôt de forme parabolique inversée, avec une contrainte plus élevée en bord de cavité. Dans les deux cas, et ce pour la géométrie testée et le matériau granulaire utilisé (grave roulée 20/40 mm), le ratio q_1/q_2 (Fig. 8) obtenu numériquement est de 4.

En termes de dimensionnement analytique, il est possible de tenir compte de ces résultats en intégrant une forme de distribution de contrainte tronconique ou parabolique inversée dans les méthodes usuelles (Villard et Briançon, 2008). La comparaison et les écarts important obtenus entre les résultats des simulations numériques et analytiques des Process A et B confirment l'intérêt et l'importance de la prise en compte de la forme de la distribution de contrainte dans le dimensionnement analytique du renforcement géosynthétique sur cavités (Fig. 8).

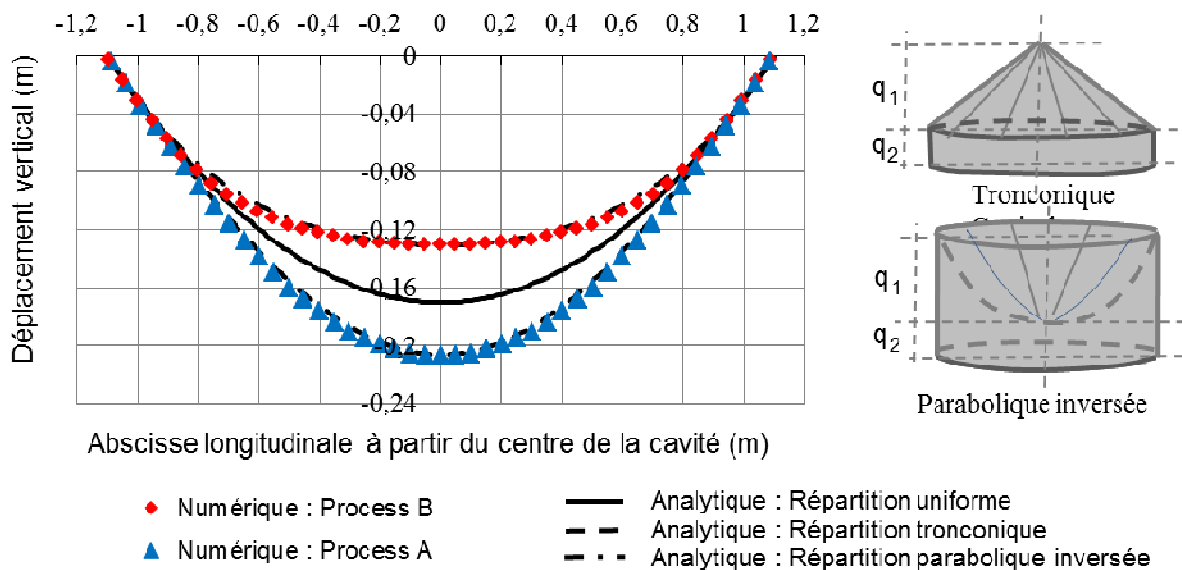


Figure 8. Influence de la forme de la distribution de contrainte sur les déplacements verticaux de la nappe géosynthétique.

6. Conclusion

L'étude numérique réalisée a permis de compléter les connaissances actuelles sur les mécanismes de transfert de charges au sein des remblais granulaires renforcés par géosynthétique sur cavités potentielles. Après validation expérimentale du modèle, deux modes d'ouverture de la cavité (par augmentation progressive du diamètre ou par

effondrement à un diamètre de cavité donné) et leur influence sur les mécanismes de transfert de charges ont été étudiés.

Ainsi, une ouverture de cavité circulaire par augmentation progressive de son diamètre (Process A) a donné lieu à une distribution de contrainte sur le géosynthétique au droit de la cavité de forme tronconique. Une ouverture à diamètre constant (Process B) a donné lieu à une forme parabolique inversée de cette distribution de contrainte. L'implémentation de ces formes de distribution de contrainte dans la méthode analytique et l'adéquation des résultats analytiques et numériques ont ensuite permis de vérifier leur pertinence.

Ces développements sont toutefois limités aux cas de remblais granulaires renforcés non cohésifs et ne concernent pas le sol traité. Par ailleurs, l'influence du foisonnement sur l'intensité et la cinématique des mécanismes de transfert de charge est encore peu connue et constitue encore une perspective d'étude.

7. Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'ensemble des partenaires du projet Geolnov ainsi que les pôles de compétitivité Techtera et Fibres pour leurs aides technique et financière à la réalisation de ces travaux.

8. Références bibliographiques

- Briançon L., Villard P. (2006) Dimensionnement des renforcements géosynthétiques de plates-formes sur cavités. *Revue Française de Géotechnique*, n° 117, 4^e trimestre 2006, pp. 51-62.
- Briançon L., Villard P. (2008) Design of geosynthetic reinforcements of platforms subjected to localised sinkholes. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 26, n°5: pp. 416-428.
- Giraud H. (1997) Renforcement des zones d'effondrement localisé – Modélisation physique et numérique. *Thèse de l'Université Joseph Fourier de Grenoble I, France*, 291 pages.
- Gourc J.P., Villard P., Giraud H., Blivet J.C., Khay M., Imbert B., Morbois A., Delmas Ph. (1999) Sinkholes beneath a reinforced earthfill – A large scale motorway and railway experiment. *In proceedings of Geosynthetics' 99, Boston, Massachusetts, USA, 28-30 April 1999, vol. 2: pp. 833-846.*
- Huckert A. (2014) Approches expérimentale et numérique du dimensionnement de renforcements géosynthétiques sur cavités et inclusions rigides. *Thèse de l'Université de Grenoble, France*, 224 pages.
- Huckert A., Briançon L., Villard P., Garcin P. (2016) Load transfer mechanisms in geotextile-reinforced embankments overlying voids: experimental and analytical approaches. *Geotextiles and Geomembranes. In Press.*
- Nancey A., Briançon L., Villard P. (2004) The first intelligent geosynthetic for measurements of strain soil and the survey of reinforced earth construction. *Proc. of Railway Engineering, London, UK, 6-7 July 2004.*
- Villard P., Gourc J.P., Blivet J.C. (2002) Prévention des risques d'effondrement de surface liés à la présence de cavités souterraines : une solution de renforcement par géosynthétique des remblais routiers et ferroviaires. *Revue Française de Géotechnique*, n°99 : pp. 23-34.
- Villard P., Huckert A., Briançon L. (2016) Load transfer mechanisms in geotextile-reinforced embankments overlying voids: numerical approach and design. *Geotextiles and Geomembranes. In Press.*