

ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES REMBLAIS COHESIFS RENFORCÉS PAR GÉOSYNTHÉTIQUE : EXPÉRIENCES ET MODÉLISATION.

STUDY OF THE BEHAVIOR OF COHESIVE EMBANKMENT REINFORCED BY GEOSYNTHETICS: EXPERIMENT AND MODELLING.

Maria DELLI CARPINI¹, , Fabrice EMERIAULT¹, Laurent BRIANÇON², Pascal VILLARD¹, Emmanuel MENGUE³, Gwenael LEGUERNEVEL³,.

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, 38000 Grenoble, France.

² INSA de Lyon, Laboratoire GEOMAS, 69621 Villeurbanne.

³ Afitexinov, 38110 Saint Didier de la Tour.

RÉSUMÉ – Pour mieux comprendre le comportement des remblais cohésifs renforcés par géosynthétique sur cavité localisée, des expérimentations in situ en vraie grandeur ont été réalisées en 2019 dans le cadre du projet REGIC. Des cavités circulaires de 1 et 2 m de diamètre ont été simulées sous des remblais de 0,5 et 0,75 m d'épaisseur. En parallèle, un modèle numérique couplé DEM-FEM a été utilisé pour rendre compte des mécanismes d'effondrement en blocs du sol cohésif sur la nappe de renforcement et pour faire une rétro analyse des résultats expérimentaux.

ABSTRACT – To better understand the behavior of cohesive embankments reinforced by geosynthetics on localized cavities, full-scale in situ experiments have been carried out in 2019 as part of the REGIC project. Circular cavities of 1 and 2 m in diameter have been simulated under embankments of 0.5 and 0.75 m thick. In parallel, a coupled DEM-FEM numerical model has been used to study the collapse mechanisms of the cohesive soil blocks on the reinforcement sheet and to make a back-analysis of the experimental results.

1. Introduction

La remontée de cavités souterraines dans un massif de sol représente une source importante de risque de rupture d'infrastructures en surface et potentiellement de pertes en vies humaines. Une cavité peut résulter d'activités humaines (construction de galeries souterraines, présence de catiches, etc.) ou être d'origine naturelle (érosion ou dissolution du sol). Quelle que soit la nature de la cavité, il faut trouver une solution pour limiter le risque. Dans la pratique, on favorise souvent une solution préventive. Dans le cas de cette communication, on s'intéressera aux techniques de renforcement des sols par nappes géosynthétiques.

Placé à la base des remblais et lorsqu'un vide sous-jacent se forme, le géosynthétique soutient le sol au-dessus de la cavité et transfère la charge verticale qu'il supporte vers les bords de la cavité, zones stables les plus proches. En raison de ce mécanisme, le tassement en surface va diminuer. Par conséquent, les dommages aux infrastructures sont réduits et, dans le cas de diamètres d'ouverture faibles, l'utilisation des

infrastructures est possible jusqu'à ce que des actions de traitement ou de confortement soient engagées.

Ces dernières années, la recherche sur le renforcement de sol par géosynthétique s'est focalisée principalement sur les remblais granulaires. Plus récemment, de nouvelles études ont été développées pour prendre en compte le cas des sols cohésifs. Une formulation analytique a été proposée (Huckert et al., 2016) et, plus récemment, validée par une campagne expérimentale sur un dispositif de laboratoire de petite taille (Essais à la trappe, Hassoun, 2019).

Dans ce contexte, un programme de recherche, financé par l'ADEME, intitulé REGIC (Renforcement par géosynthétique intelligent sur cavité), est initié en 2017. Il a été engagé entre deux organismes de recherche (INERIS et le Laboratoire 3SR) et l'entreprise AfiteXinov. L'objectif du projet est de développer un nouveau géosynthétique intégrant un système de détection adapté au renforcement des remblais cohésifs de faible épaisseur situés au-dessus de cavités sous une couverture de faible épaisseur.

Dans ce cadre, des expériences en vraie grandeur ont été réalisées entre février et juillet 2019 par AfiteXinov et le laboratoire GEOMAS de l'INSA de Lyon. Des renforcements géosynthétiques permettant de détecter la présence de cavités par un système de mesure par fibre optique ont été positionnés à la base des remblais cohésifs. En parallèle, un modèle numérique permettant de considérer successivement la phase d'ouverture de la cavité et la phase de chargement jusqu'à la rupture du remblai cohésif, a été mis en œuvre. L'analyse conjointe des résultats expérimentaux et numériques encore en cours permettra de faire des propositions quant au dimensionnement de ce type de renforcement.

2. Expérimentations en vraie grandeur

Les expériences d'ouverture de cavité en vraie grandeur ont été réalisées à Saint Didier de la Tour, sur un site proche de l'entreprise AfiteXinov, en collaboration avec le laboratoire GEOMAS de l'INSA de Lyon. Trois planches d'essais ont été mises en place pour analyser diverses configurations. Chaque essai consiste à créer une cavité de 1 m puis de 2 m de diamètre, sous un remblai de sol cohésif de faible épaisseur, renforcé par une nappe géosynthétique. Chaque planche est constituée de 3 cavités, deux hauteurs de remblai (0,5 et 0,75 m) et deux sols différents ont été considérés. Plusieurs géosynthétiques ont pu être testés.

Dans le cas où le sol ne s'est pas rompu lors de l'ouverture de la cavité, celui-ci est chargé progressivement en surface (au droit du centre de la cavité) jusqu'à la rupture.

2.1. Les matériaux

Pour la réalisation des remblais, deux sols ont été utilisés: un sable chaulé et un sol naturel. Le premier matériau est constitué d'un sable 0/4 traité à 1% de chaux. Le deuxième est un sol limoneux naturel mais qui peut présenter de gros éléments. Ce sol était disponible sur le site en quantité suffisante. Il a été prélevé, remanié et mis en place par compactage sans modifier sa teneur en eau d'origine. Les deux sols ont été caractérisés par les laboratoires 3SR et GEOMAS. Pour obtenir les caractéristiques de résistance de ces sols cohésifs lors d'une application de surcharge rapide provoquant la rupture, des essais triaxiaux UU ont été réalisés sur des échantillons reconstitués et compactés en laboratoire (conditions non saturées). Ces essais ont permis de déterminer un angle de frottement φ_{uu} et une cohésion C_{uu} respectivement de 35° et 19 kPa pour le sable chaulé et 30° et 12 kPa pour le sol limoneux. Des essais de flexion 4-points sur des éprouvettes 7cm X 7 cm X 28 cm ont permis de déterminer la résistance en traction qui joue un rôle déterminant dans le mécanisme de rupture de la couche de sol. Diverses

répétitions des essais de flexion sur des échantillons intacts prélevés sur site mais aussi reconstitués et compactés en laboratoire ont été faites pour le sable chaulé pour comprendre l'effet de la chaux avec le temps, de son exposition aux conditions atmosphériques et les différentes modalités de compactage.

Les deux géosynthétiques utilisés sont différents par leurs raideurs en traction.

2.2. Dispositif d'ouverture et procédure de mise en œuvre

Différents mécanismes d'ouverture de cavités ont été présentés par différents auteurs. Certains auteurs ont procédé à la vidange des matériaux de remplissage de la cavité par aspiration du sable dans le cas des expériences de Bridle and Jenner, 1997) ou de billes d'argile dans les essais exécutés pour le projet RAFAEL (Villard, Gourc and Blivet, 2002). Dans d'autres cas, la cavité a été simulée par le dégonflement des chambres à air (Huckert et al., 2016) couplé à la vidange de billes d'argile. Dans les expériences menées ici, la cavité a été remplie de matériaux granulaires. Deux espaces ont été aménagés en partie haute et basse d'une buse en béton. Ils sont délimités par une plaque en acier. La plaque est munie d'un dispositif de trappes qui permet de vidanger les granulats de la partie supérieure de la cuve vers la partie inférieure. Afin d'obtenir une ouverture de 1 m tout d'abord puis de 2 m, la trappe centrale est d'abord ouverte pour obtenir une cavité de 1 m de diamètre, le cylindre, situé dans le compartiment supérieur, est descendu dans le compartiment inférieur au même temps que l'ouverture des quatre trappes externes assurant une ouverture de 2 m. (Figure 1).

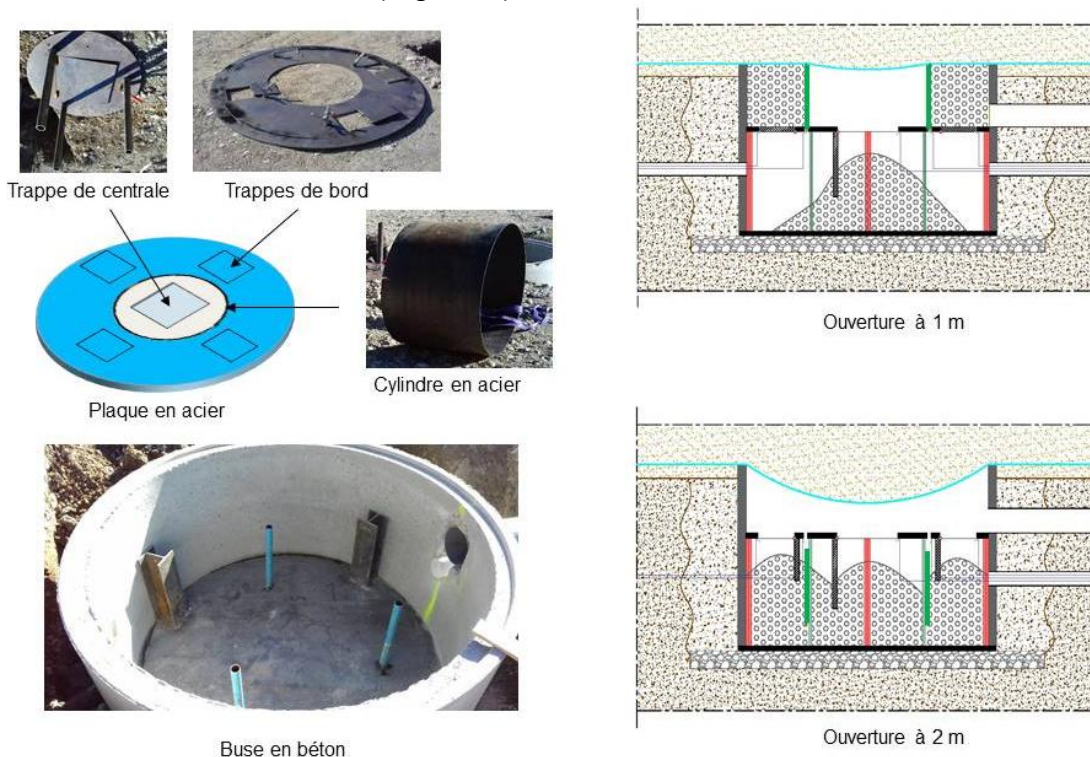


Figure 1- Eléments du dispositif d'ouverture des cavités.

Une fois que les buses sont remplies de gravier roulé propre, le géosynthétique est installé et le sol de remblai mis en place. Il est compacté en couches de 25 cm d'épaisseur.

Avant l'ouverture chaque cavité, une mesure de l'état de surface du sol est faite à l'aide d'un capteur laser et le compactage du remblai est contrôlé à l'aide d'un pénétromètre dynamique léger. Dans le cas où le sol ne s'effondre pas suite à la vidange complète de la cavité, le remblai est chargé à l'aide de plaques métalliques (80 kg chacune) posées

progressivement sur un cube métallique (0,5m de côté et d'une masse de 38 kg) jusqu'à rupture.

2.3. Instrumentation et présentation des mesures

La plateforme a été équipée avec des cellules de pression totale CPT pour évaluer la répartition des charges sur le sol en bordure de cavité, des capteurs à fibres optiques insérés dans le géosynthétique pour la mesure de la déformation, un capteur de déplacement laser pour la mesure du tassement en surface et de la déflexion du géosynthétique dans la cavité.

Dans la présente communication, seules les mesures obtenues sur une des cavités et pour un des deux sols (le sable chaulé en l'occurrence) seront présentées : le remblai a une épaisseur de 0,5 m, le géotextile a une raideur en traction de 1695 kN/m, obtenue par des câblés en PVA assemblés sur un géotextile non tissé de 17g/m². Les mesures obtenues sont présentées pour 3 phases majeures de l'expérimentation : avant ouverture de la cavité, après l'ouverture de la cavité de 2 m de diamètre et à la rupture. Le Tableau 1 synthétise les résultats obtenus en termes de contraintes verticales dans le sol (σ_{CPT}), de déformation maximale dans le géosynthétique (ϵ_{max}) et de tassement en surface (d). La rupture de la couche de sol est enregistrée pour une charge appliquée en surface de 438 kg: 38 kg (cube en acier) et 5 plaques métalliques de 80 kg chacune.

Une limite des expériences réalisées est de ne pas avoir la possibilité de faire des mesures des tassements de surface (d) après l'effondrement du sol. En ce sens, la modélisation numérique peut s'avérer un outil complémentaire très utile.

Tableau 1- Résultats de l'expérimentation sur la cavité étudiée

	d (mm)	ϵ_{max} (%)	σ_{CPT} bord (kPa)	σ_{CPT} à 50 cm (kPa)
Avant ouverture	0	0	13,75	18,75
Après ouverture 2 m	6	0,14	16,88	15,62
Rupture	--	1,46	13,44	21,87

3. Modèle numérique

Le modèle numérique est un code couplé DEMxFEM capable de représenter le caractère discret du sol granulaire et la nature fibreuse de la nappe de renforcement (Villard et al., 2009). Il est particulièrement adapté pour rendre compte de la rupture en blocs du sol de remblai sur la nappe.

3.1. La géométrie

Le remblai cohésif est modélisé par un ensemble de 100 000 sphères de différents diamètres mises en place dans un volume de 6 m x 6 m x 0.5 m, correspondant à un quart du modèle, par raison de symétrie. Cette largeur de 6 m a été retenue car les conditions limites du modèle ont alors un impact minimum sur le comportement du remblai au voisinage de la cavité. Les sphères de la couche granulaire sont générées par la méthode d'expansion radiale, en même temps que l'angle de frottement diminue (Salot, et al., 2009).

La nappe géosynthétique est modélisée par 3721 éléments finis. Le sol support situé sous la nappe est constitué de 14 400 sphères avec un diamètre constant de 0,05 m. Le

rôle principal du support est de simuler l'ouverture de la cavité : pour créer le vide, certaines sphères vont être déplacées vers le bas avec une vitesse constante.

Une fois l'ouverture de la cavité achevée, une procédure de chargement est utilisée. Elle consiste en la mise en contact d'une dalle de chargement positionnée à la surface du remblai, puis en l'essai de chargement proprement dit. La dalle présente une géométrie carrée (0,5 m x 0,5 m) comme le cube métallique utilisé pour les essais en vraie grandeur. Elle est constituée de deux couches de sphères de diamètre constant égal à 0,025 m. Les micro paramètres utilisés au niveau des contacts entre les sphères donnent un comportement complètement rigide à cette dalle de chargement. Le plan et la géométrie du modèle sont donnés à la Figure 2.

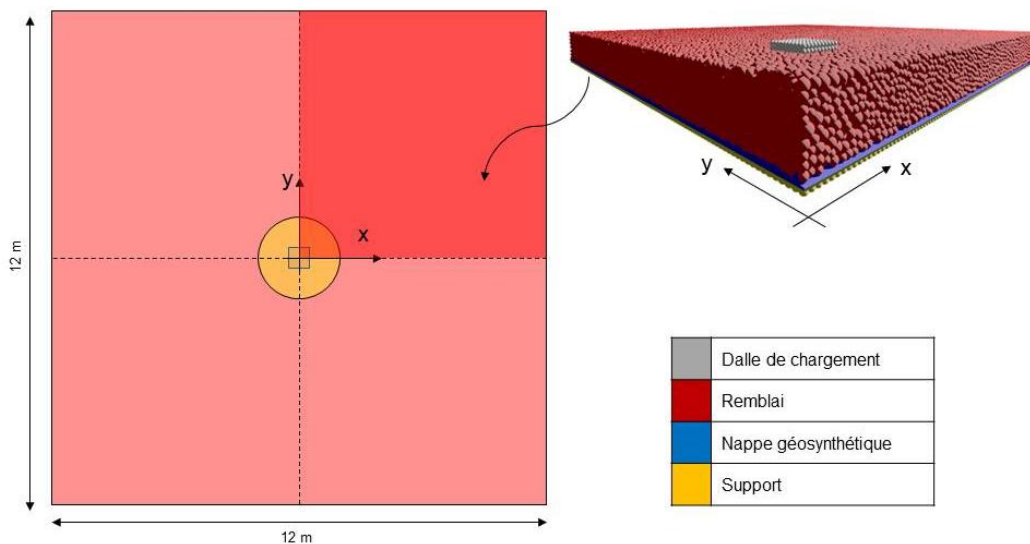


Figure 2- Modèle numérique

3.2. Les matériaux

Pour rendre compte du comportement du sol cohésif, des lois de contact microscopique de type Mohr Coulomb sont utilisées entre les sphères de l'assemblage granulaire. Elles confèrent à l'assemblage des particules un comportement élastique-plastique fragile caractéristique des sols cohésifs. Les forces de contact normales et tangentielles entre les particules sont définies par :

$$|f_t| \leq c_t S_{co} + f_n \tan(\phi_{co}) \quad (1)$$

$$f_n \geq -c_n S_{co} \quad (2)$$

f_n et f_t sont les composantes normale et tangentielle de la force de contact. c_n et c_t représentent les adhésions microscopiques normales et tangentielles, et S_{co} la surface moyenne de contact entre les sphères, définie en fonction de leurs rayons. Les paramètres micro mécaniques retenus ont été calibrés afin de reproduire plus particulièrement le comportement en traction du sol réel : $c_t = c_n = 60$ kPa et $\phi_{co} = 40^\circ$. Ces valeurs ont été considérées comme les plus appropriées pour reproduire le comportement mécanique global observé lors des essais en laboratoire (cf. les valeurs de ϕ_{uu} et C_{uu} et données au 2.1).

Le comportement mécanique de la nappe est de type «monomodule», c'est à dire que la nappe présente une raideur en traction forte dans le sens production et une raideur plus faible dans le sens transverse. La valeur retenue pour la raideur en traction dans le

sens production est de 1695 kN/m ce qui correspond aux caractéristiques mécaniques du produit utilisé dans les essais en vraie grandeur ($T_{\max} = 150$ kN/m et $\varepsilon_{\max} = 8.85\%$). Une raideur en traction dans le sens perpendiculaire de 30 kN/m est prise en compte. Un angle de frottement de 30° entre le sol cohésif et la nappe géosynthétique a été utilisé.

4. Résultats et comparaison avec les expériences

Les résultats numériques concernent le remblai de sable chaulé de 0.5m renforcé par un géosynthétique (de résistance maximale à la traction de 150 kN/m). La cavité a été ouverte à 2 m de diamètre sans qu'il n'y ait rupture. Le chargement numérique, appliqué sur la dalle rigide, est augmenté progressivement même après la rupture de la couche du sol. Une première analyse concerne l'évolution de la déflexion maximum de la nappe géosynthétique avec la valeur de charge appliquée en surface (Figure 3). Sur cette figure les déplacements de la couche de sol cohésive sont illustrés pour les différentes phases du chargement : l'ouverture de la cavité de 2m (point A), l'application de la charge qui génère la première fracture dans la couche de remblai (point B), l'application de la charge qui détermine la rupture complète de la couche du sol (point C).

Comme on peut le constater sur la Figure 3, l'ouverture de la cavité s'accompagne d'un déplacement de la nappe géosynthétique et d'un tassement de surface de l'ordre de quelques centimètres. Ensuite, l'application d'une surcharge de 4 kN induit une légère déformation de surface (~ 1 cm) tant que la rupture de la couche n'est pas atteinte. Après effondrement, l'augmentation du chargement induit un accroissement du déplacement au centre de la nappe géosynthétique qui s'incurve pour reprendre les efforts qui lui sont appliqués.

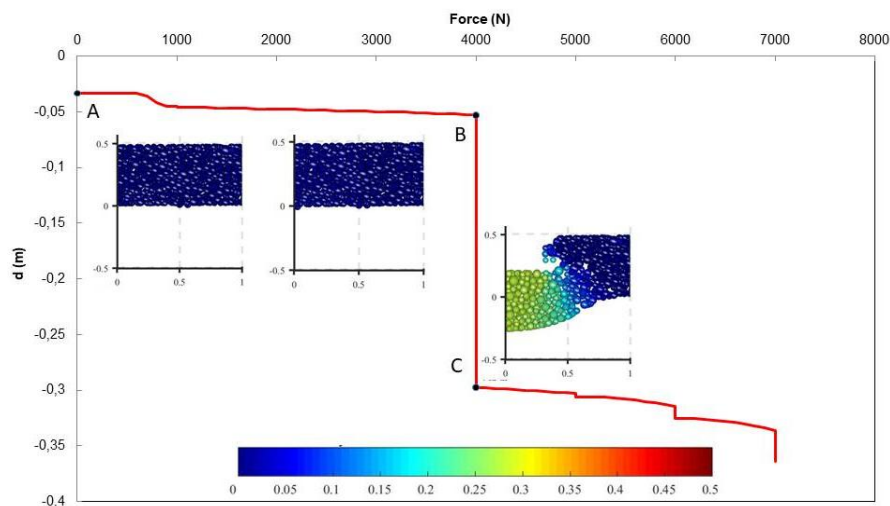


Figure 3- Chargement vs déplacement de la nappe géosynthétique

Ce premier résultat donne la possibilité de valider le modèle numérique en comparaison avec les expériences en vraie grandeur. Le sol modélisé arrive à la rupture pour une valeur de chargement de 4000 N (~ 400 kg) très proche de la valeur expérimentale (438 kg).

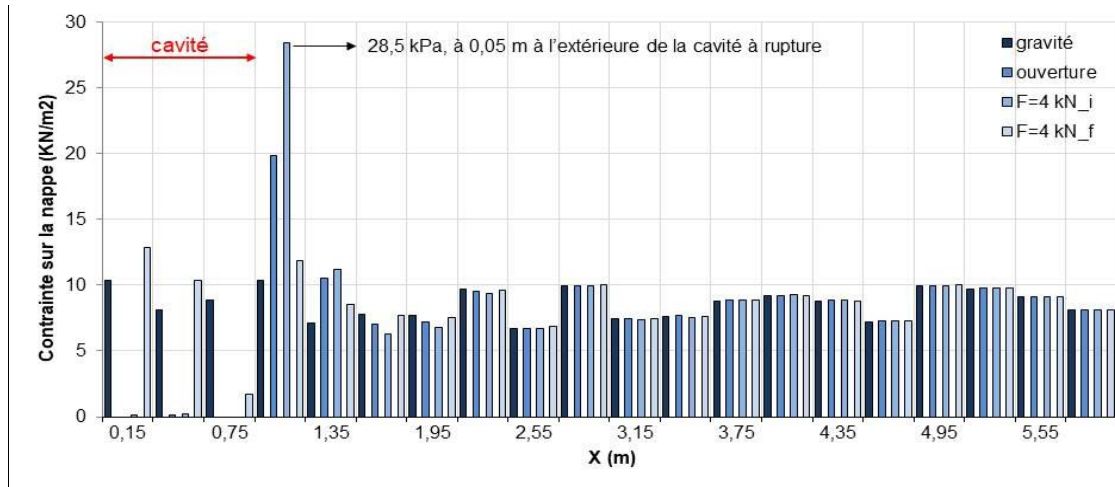


Figure 4- Contraintes verticales sur la nappe géosynthétique

Un autre élément de validation est l'analyse des contraintes verticales induites par l'effondrement du sol sur la nappe (Figure 4). Avec un poids volumique sec de $18,85 \text{ kN/m}^3$, on attend une contrainte initiale théorique uniforme sur la nappe de 9.43 kPa . Expérimentalement, les capteurs de pression situés proches de la future cavité fournissent des valeurs du même ordre de grandeur que la valeur théorique. Numériquement, la valeur calculée suite à l'application de la gravité est non seulement très proche de la valeur théorique mais aussi relativement uniforme (Figure 4).

Les différences entre contraintes verticales expérimentales et numériques sont probablement dues en grande partie aux limites techniques rencontrées dans l'installation des capteurs de pression sur le site sous un remblai compacté. Cependant, si on compare l'évolution de la contrainte à partir du début de l'essai jusqu'à la rupture, on observe une augmentation des valeurs dans les deux cas (la valeur passe de $18,75 \text{ kPa}$ à $21,87 \text{ kPa}$ expérimentalement, de $10,4 \text{ kPa}$ à $28,5 \text{ kPa}$ numériquement).

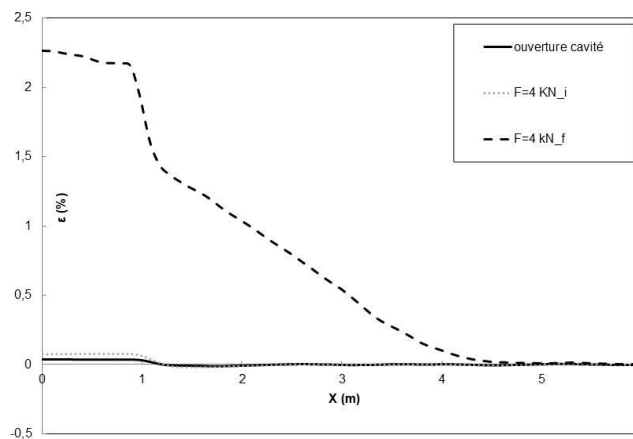


Figure 5- Déformations de la nappe géosynthétique

Les déformations de la nappe géosynthétique calculées à l'aide du modèle numérique sont illustrées sur la Figure 5. Les déformations sont très faibles avant l'effondrement de la couche cohésive ($0,04\%$) alors qu'après rupture des valeurs atteignant plus de 2% sont enregistrées. Au bord du modèle ($x=6\text{m}$), des valeurs nulles de déformation sont

enregistrées, on observe donc bien dans cette zone l'ancrage de la nappe. L'ordre de grandeur des valeurs numériques est comparable avec celui des valeurs expérimentales (1.46%, Tableau 1). Malencontreusement, au cours du chargement juste avant la rupture, les mesures de déformation après l'effondrement de la couche du sol n'ont pas été enregistrées car la fibre optique servant à la mesure de la déformation a été endommagée lors de l'effondrement du sol sur la nappe.

5. Conclusions

L'ouverture de cavités souterraines représente une source de désordres pour les structures et infrastructures de surface ainsi que de pertes en vies humaines. Une des solutions pour limiter ces risques est de renforcer le sol avec des nappes géosynthétiques. Le programme de recherche REGIC a permis de tester l'efficacité d'un tel renforcement muni d'un système d'alerte basé sur des mesures de déformation par fibres optiques. Dans ce contexte, une série d'expériences en vraie grandeur a été réalisée dont quelques résultats préliminaires ont été donnés ici. Un modèle numérique DEMxFEM du même problème a été mis en œuvre et validé par comparaison avec les mesures expérimentales, notamment en ce qui concerne la charge de rupture. Le modèle numérique peut désormais être utilisée pour avoir accès à des informations supplémentaires (contrainte sur la nappe, déformation, etc..) permettant de mieux comprendre les mécanismes. Il permettra également d'effectuer une étude paramétrique du problème et in fine de proposer des modèles analytiques simplifiés utilisables pour un dimensionnement de tels renforcements.

6. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tous les collaborateurs qui ont participé au projet, mais surtout l'Ademe qui soutient financièrement le projet REGIC.

7. Références bibliographiques

- Bridle R. J. and Jenner C. G. (1997) 'Polymer Geogrids for Bridging Mining Voids', *Geosynthetics International*. ICE Publishing, Vol. 4(1), pp. 33–50.
- Hassoun, M. (2019) *Modélisation physique du renforcement par géosynthétique des remblais granulaires et cohésifs sur cavités*.
- Huckert A., Briançon L., Villard P. and Garcin P. (2016). (2015) *Load transfer mechanism in geotextile- reinforced embankments overlying voids: experimental and analytical approaches*. *Geotextile and Geomembrane*. Vol. 44 (3), pp. 44-456.
- Salot C., Gotteland P. and Villard, P. (2009) 'Influence of relative density on granular materials behavior: DEM simulations of triaxial tests', *Granular Matter*, Vol. 11(4), pp. 221–236
- 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., Gourc J.-P. and 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', *Rev. Fr. Geotech.*, (Vol. 99), pp. 23–34.