

EXPÉRIMENTATION EN VRAIE GRANDEUR : REMBLAIS TECHNIQUES RENFORCÉS PAR GÉOSYNTHÉTIQUE SUJETS À CAVITÉS POTENTIELLES

FULL-SCALE EXPERIMENT OF GEOSYNTHETIC-REINFORCED EMBANKMENTS PRONE TO SUBSIDENCE

Audrey HUCKERT^{1,2}, Laurent BRIANÇON^{2,3}, Pascal VILLARD², Patrick GARCIN¹, Philippe DELMAS³, Germain AURAY⁴

¹ EGIS Géotechnique, Seyssins, France

² Laboratoire 3SR : Sols, Solides Structures et Risques, UJF – INP - CNRS, Grenoble, France

³ Conservatoire national des arts et métiers, Paris, France

⁴ Texinov, La Tour-du-Pin, France

RÉSUMÉ – Le dimensionnement des remblais renforcés par géosynthétiques sur cavités est problématique dans la mesure où certains mécanismes de reports de charge restent mal connus, ou lorsque des matériaux non conventionnels comme les sols traités sont utilisés. Pour pallier aux lacunes actuelles quant au dimensionnement de ces structures, des expérimentations en vraie grandeur d'effondrements localisés ont été réalisées afin de tester un remblai purement frottant et une couche de sol traité renforcés. Les reports de charge et déformations au sein de la structure ont été mesurés. Dans le cas du remblai purement frottant une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats analytiques issus des méthodes de dimensionnement conventionnelles est proposée.

Mots-clés : Renforcement, cavités, expérimentation en vraie grandeur, dimensionnement analytique

ABSTRACT – Designing geotextile-reinforced embankments prone to subsidence remains quite difficult since some load transfer mechanisms are not well known. The use of unconventional materials like treated soils is another difficulty. To expand the current knowledge on the subject, several experimental installations were built to test both an embankment made of a frictional, non-cohesive material, and a layer of treated soil. These two structures were reinforced by geotextiles, and a specific instrumentation enabled to record the load transfers and the strains of the reinforced structure. Experimental results for the case of the frictional non-cohesive material are then compared to analytical predictions made thanks to the latest analytical design method.

Keywords: Reinforcement, sinkholes, full-scale experiment, analytical design

1. Introduction

L'aménagement de nouvelles infrastructures de transports routiers ou ferroviaires est contraint par la traversée de régions où les terrains présentent de relativement faibles caractéristiques mécaniques, des hétérogénéités, ou comme dans le cas de cette étude, un risque d'effondrements localisés. Les régions karstiques et d'anciennes exploitations minières sont particulièrement concernées.

Les techniques de renforcement permettant de réduire les risques associés à la remontée d'un fontis et de garantir au moins la traficabilité de la structure impactée à court terme sont variées. Parmi elles, la solution de renforcement géosynthétique est largement utilisée de par ses avantages économique, environnemental, par sa facilité de mise en œuvre et par le gain de temps que cette solution représente. Le dimensionnement du géosynthétique se doit cependant d'être bien adapté pour que la fonction de renforcement soit pleinement assurée.

1.1. Bilan synthétique des connaissances sur le sujet

Les premiers travaux effectués en France sur cette thématique dans le cadre du projet R.A.F.A.E.L (Gourc et al., 1999) (Renforcement des Assises Ferroviaires et Autoroutières contre les Effondrements Localisés) ont permis la définition d'une méthode de dimensionnement analytique simplifiée (Blivet et al., 2001 ; Villard et al., 2002). Une reformulation récente (Briançon et Villard, 2006 - 2008 ; Villard et Briançon, 2008) basée sur des expérimentations complémentaires (Nancey et al., 2004 ; Briançon et al., 2005) ont permis de prendre en considération des mécanismes complexes alors négligés comme les

déplacements et les déformations de la nappe géosynthétique dans les zones d'ancrage, ou l'augmentation des contraintes verticales au bord de la cavité.

Néanmoins, le dernier bilan des connaissances sur le dimensionnement des remblais sur cavités renforcés par géosynthétiques effectué dans le cadre des Rencontres Géosynthétiques (Villard et al., 2009a) souligne des lacunes importantes. Il est notamment fait état d'hypothèses fortes sur la répartition uniforme des contraintes sur la nappe au droit de la cavité ou en zone d'ancrage, sur les mécanismes d'effondrement ou de transferts de charge au sein du remblai, et sur la valeur de certains paramètres tel que le coefficient de foisonnement. De plus cette formulation ayant été développée pour les sols granulaires avec l'hypothèse d'un effondrement progressif du sol de remblai sur la nappe (Briançon et Villard 2008), elle peut difficilement s'appliquer aux sols traités où les ruptures sont brutales. Ce bilan conclut sur la nécessité de retours d'expérience et d'études complémentaires sur le sujet afin d'optimiser le dimensionnement des renforcements géosynthétiques.

Par ailleurs, de nombreux points restent à étudier, comme l'influence des cycles de chargement/déchargement lors de passages de véhicules, ou le comportement sur cavités des remblais cohésifs traités au liant hydraulique.

1.2. Contexte de l'étude expérimentale

Pour répondre à cette problématique, des études expérimentales ont été entreprises dans le cadre du projet FUI Géolnov (Conception de géosynthétiques hautes performances sous contraintes environnementales). Ce projet regroupe des partenaires issus de l'industrie et de la recherche : les entreprises Texinov, Afitec et Bihr, le bureau d'études Egis Géotechnique, l'IFTH (Institut Français du Textile et de l'Habillement), le laboratoire 3SR (Sols, Solides, Structures – Risques) et le Cnam (Conservatoire national des arts et métiers). Il est co-labellisé par les pôles de compétitivité Techtera et Fibres dans le cadre du 10^e appel à projets de la DGCIS (Direction Générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services).

1.3. Objectif du renforcement géosynthétique

Le mode de fonctionnement d'un géosynthétique de renforcement sur cavité potentielle sous un remblai granulaire peut être résumé comme suit : en cas d'effondrement localisé, l'évolution de la cavité est bloquée ou ralentie lors de sa remontée en surface par la présence en base du remblai d'une nappe géosynthétique qui empêche la chute des matériaux dans le vide sous-jacent (figure 1). Le poids du sol au dessus de la cavité est en partie reporté par effet de voûte de part et d'autre de la cavité et pour partie repris par le géosynthétique qui se met en tension par effet membrane. Le bon dimensionnement du procédé réside dans la définition d'une raideur adéquate du renfort géosynthétique qui puisse minimiser les tassements de surface à des valeurs acceptables, permettant d'assurer pour un temps la traficabilité. La valeur du coefficient de foisonnement du sol conditionne directement le rapport entre la flèche du géosynthétique f et les tassements de surface s .

2. Description des expérimentations en vraie grandeur

2.1. Mise en œuvre

Le principe des expérimentations consiste à simuler l'ouverture progressive d'une cavité circulaire sous un remblai dont la base est renforcée par un géosynthétique. Pour ce faire, des buses de 1 m de hauteur et 2,2 m de diamètre ont été implantées sous les remblais à tester. Ces buses, munies d'une trappe de vidange, sont initialement comblées par des chambres à air de différents diamètres et de billes d'argile expansée (figure 2). Chaque buse est reliée à un regard de visite permettant l'ouverture de la trappe de vidange, le dégonflage des chambres à air et la mise en place d'une instrumentation spécifique. Une fois le plot expérimental construit, il est possible grâce au dispositif mis en œuvre d'ouvrir progressivement la cavité sous le géosynthétique à des diamètres approchant les 0,5 m, 1 m et 2,2 m.

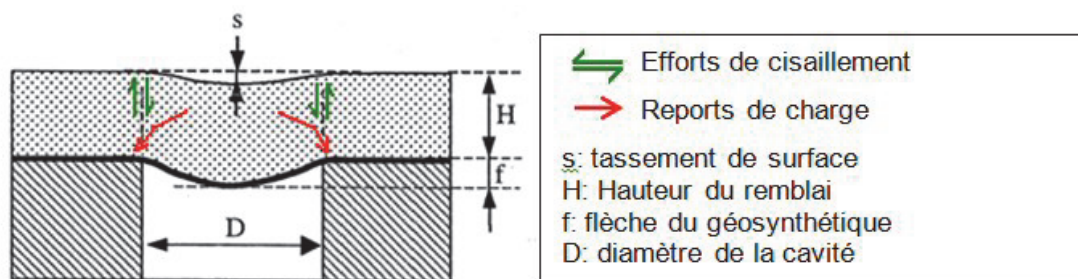


Figure 1. Principe de fonctionnement d'un géosynthétique de renforcement sur cavité

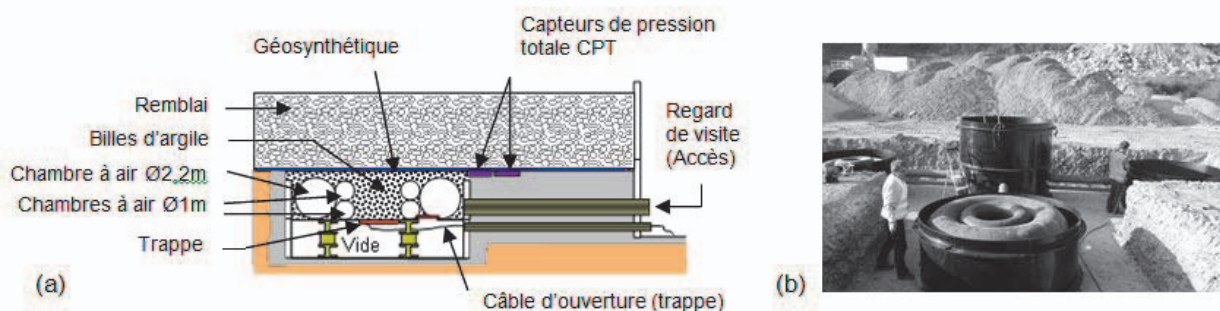


Figure 2. Dispositif expérimental : vue en coupe (a) et installation (b)

Parmi les expérimentations réalisées, trois plots expérimentaux ont été mis en œuvre à des fins comparatives (tableau 1). Deux géosynthétiques de renforcement de rigidités voisines (dans le sens longitudinal), dont l'un est adapté aux milieux basiques, ainsi que deux remblais de géométrie et de caractéristiques mécaniques différentes, ont été utilisés :

- un remblai d'environ 1 m de hauteur constitué d'une grave roulée et lavée 20/40 mm mise en place par déversement. Ce remblai est considéré comme purement frottant ;
- une couche de 35 cm constituée d'une grave 0/40 mm traitée à 2% de chaux compactée.

Ces expérimentations ont été volontairement sous dimensionnées pour que des mesures significatives de tassement et de déformation de la nappe puissent être observées. Après vidange des cavités, une surcharge est appliquée par circulation d'une pelle mécanique de 2 t sur les plots en grave 20/40 mm, soit une force de 1 t centrée sur la cavité. Pour la couche de sol traité, un effort ponctuel est directement appliqué sur une plaque métallique circulaire de 50 cm de diamètre positionnée au droit de la cavité par l'intermédiaire d'une pelle mécanique. Un peson permet de mesurer la charge appliquée (figure 3). Chaque étape d'ouverture ou de chargement fait l'objet de mesures permettant d'appréhender les déformations du remblai et de la nappe, ainsi que les reports de charge dans le remblai.

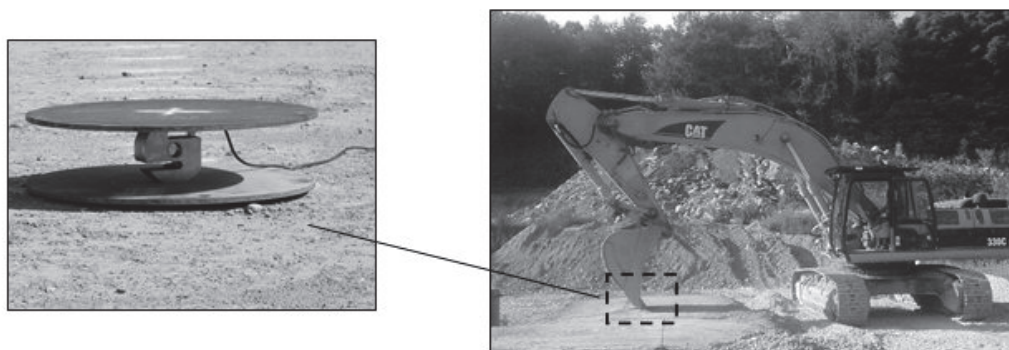


Figure 3. Dispositif d'application de la surcharge pour les plots en sol traité

Un soin particulier a été apporté à la caractérisation des matériaux utilisés pour les expérimentations. Notamment, des essais de cisaillement et de frottement à la grande boîte (0,3 m x 0,3 m) ont ainsi

permis de caractériser les sols et les interfaces sol/géosynthétique. Le tableau 1 présente une synthèse des résultats obtenus.

Tableau 1. Caractéristiques des plots expérimentaux mis en œuvre

| Plot | Remblai | | | | Renforcement géosynthétique | | | |
|------|------------------------------------------|----------------------------------|------------|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| | Nature | γ (kN/m ³) | c (kPa) | φ_{SOL} (deg) | Dénomination | Raideur à $\varepsilon=3\%$ (kN/m) | Angle de frottement $\delta_{\text{REMB/GTX}}^*$ (deg) | Angle de frottement $\delta_{\text{PF/GTX}}^*$ (deg) |
| GR1 | Grave roulée lavée 20/40mm | 15,5 | 0 | 36 | GEOTER FPET350 | 2988 | 23 | 40 |
| GT1 | Grave 0/40mm traitée à 2% de chaux | 18,0 | 40 | 33 | GEOTER FPET350 | 2988 | 32 | 40 |
| GT2 | | | | | GEOTER FPP200 | 3746 | 30 | 38 |

* $\delta_{\text{REMB/GTX}}$ et $\delta_{\text{PF/GTX}}$: angles de frottement des interfaces remblai/géosynthétique et plateforme/géosynthétique

2.2. Instrumentation

Le dispositif instrumental mis en place permet de remplir les objectifs de mesure de déformations et de reports de charge au sein de l'ouvrage renforcé.

Ainsi, une campagne de mesures topographiques a permis de mesurer les tassements de surface à l'ouverture des cavités. Pour les remblais en grave 20/40 mm, une mesure manuelle de la déflexion de surface lors de l'ouverture de la cavité à 2,2 m de diamètre a également été effectuée, par l'intermédiaire d'une règle graduée, dans les sens production et sens travers du renforcement.

La déflexion du géosynthétique a été déterminée à l'aide de mesures au radar géologique selon deux fréquences d'émission : 500 MHz et 800 MHz. Une fois la topographie de surface connue, l'utilisation du radar géologique permet d'avoir un aperçu des déplacements verticaux au sein du remblai. En effet, cet outil permet de repérer sans destruction de l'ouvrage la position de la nappe géosynthétique et des réflecteurs métalliques mis en place ponctuellement au droit des cavités dans le corps du remblai. A l'analyse des enregistrements effectués, le contraste des vitesses de propagation des ondes dans les matériaux situés au-dessus et en-dessous de la nappe géosynthétique permet de positionner le renforcement lors des différentes étapes d'ouverture de la cavité. Dans le corps du remblai, c'est la nature métallique des réflecteurs installés à 30 cm et à 60 cm de hauteur de remblai qui permet de les repérer sans effectuer de fouille tout au long de l'expérimentation. Le remblai en grave roulée 20/40 mm étant équipé de deux niveaux de réflecteurs, les données du radar géologique permettent de visualiser les déplacements au sein du remblai et les mécanismes de foisonnement.

Les mesures de déflexion sont complétées 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 (figure 1). Sur les plots GR1 et GT2, les déformations de la nappe ont également été mesurées par fibres optiques (réseaux de Bragg – système Géodéfect®) placées au droit de la cavité, permettant une mesure des déformations du géosynthétique de renforcement tous les 50 cm. Une fibre est centrée sur la cavité et l'autre s'en écarte de 20 cm. Ces fibres optiques sont placées au sein d'un lé qui leur est propre, lui-même disposé sous le géosynthétique étudié. Compte tenu de la faible rigidité du lé sur lequel est implanté les fibres optiques, on peut supposer que les déformations du géosynthétique sont les mêmes que celles des fibres optiques. Toutefois, un léger glissement du lé ou des ondulations du lé ou de la nappe qui perturberaient les mesures ne sont pas à exclure. Enfin les reports de charge sont mesurés à l'aide de capteurs de pression totale (CPT) positionnés de part et d'autre de la cavité, sous le renforcement géosynthétique.

3. Résultats expérimentaux obtenus dans le cas du remblai de grave roulée lavée 20/40 mm

3.1. Mesures des déformations du géosynthétique et déplacements au sein de l'ouvrage GR1

Les tassements de surface observés juste après ouverture de la cavité de 2,2m de diamètre sont présentés sur la figure 4. On y constate un tassement de surface de 14 cm environ sur le plot GR1. Les tassements de surface pour les étapes d'ouverture intermédiaires de la cavité de 50 cm et 1 m de diamètre, non présentés, sont de l'ordre de 3 cm et 5,4 cm respectivement.

La figure 5a présente un radar-gramme effectué avec une fréquence d'émissions de 500 MHz sur le plot GR1 après ouverture de la cavité à 2,2m de diamètre. La figure 5b présente l'évolution de la position des réflecteurs métalliques dans le remblai avant et après ouverture de la cavité.

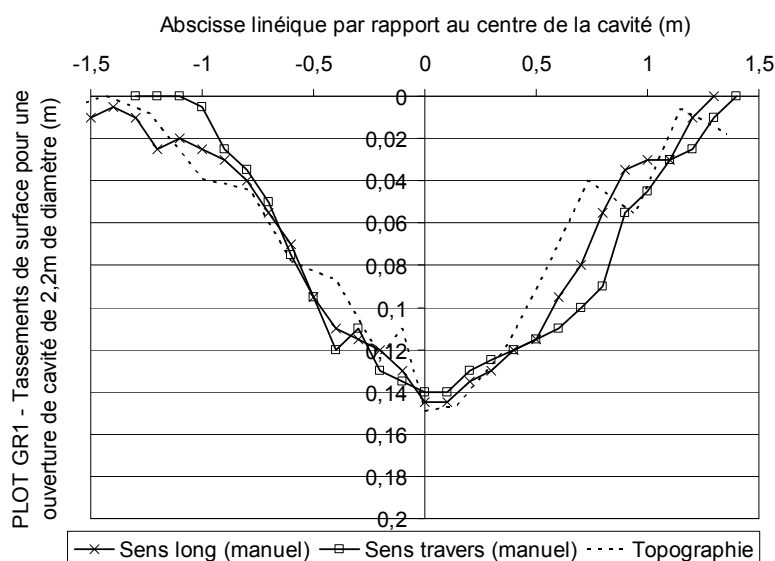


Figure 4. Tassements de surface lors de l'ouverture de la cavité à 2,2m de diamètre (Plot GR1)

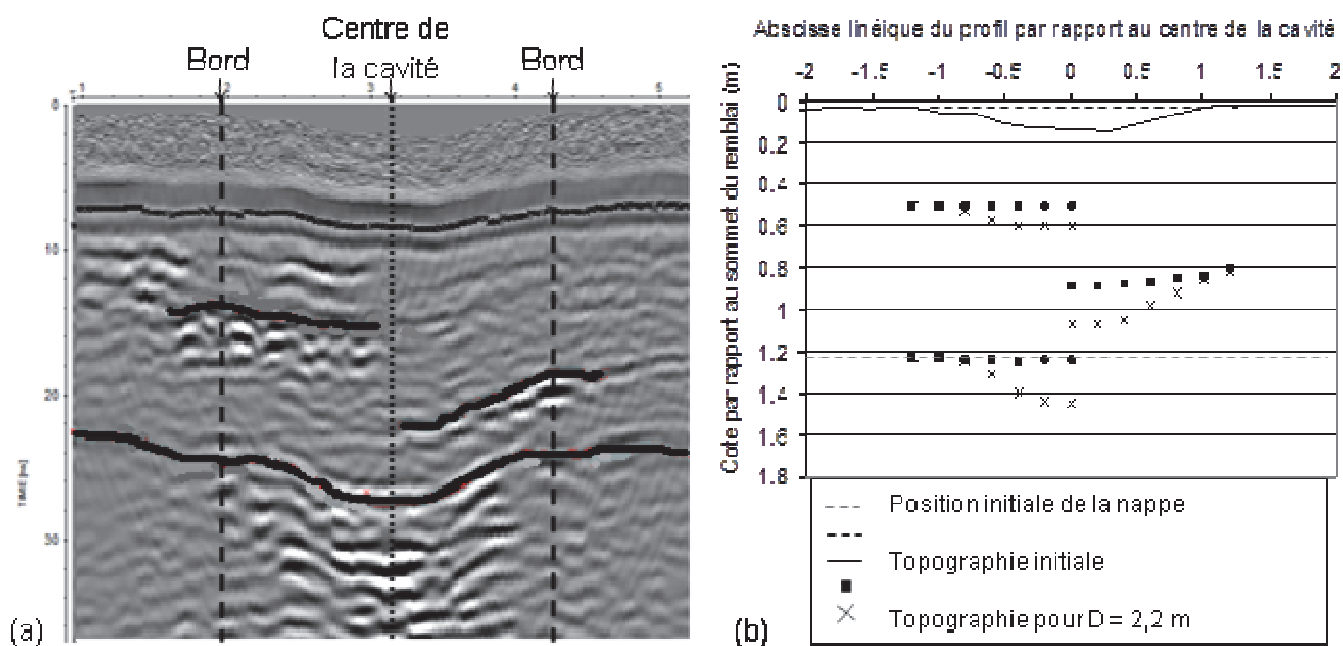


Figure 5. Déplacements au sein du remblai, plot GR1 - Cavité de 2,2m de diamètre : analyse au radar géologique (a) et position des réflecteurs avant et après ouverture de la cavité (b)

On constate sur la figure 5 une évolution significative des déplacements au sein du remblai du plot GR1 lors de l'ouverture de la cavité à 2,2m de diamètre. On remarque également que les mesures de tassement manuelles et topographiques se corrént assez bien entre elles. Les résultats géophysiques montrent par ailleurs une hauteur de remblai effective de 1,22 m environ sur le plot GR1.

Lorsque la cavité atteint un diamètre de 2,2 m, les tassements de surface sont de l'ordre de 14 cm pour une flèche du géosynthétique de 23 cm et un diamètre de la déflexion de surface n'excédant pas 2,2 m, ce qui valide le mécanisme proposé figure 1. Le matériau de remblai s'effondre donc au-dessus de la cavité selon une géométrie cylindrique. Si l'on assimile le volume de surface et le volume effondré à des paraboloïdes de révolution on en déduit la valeur du coefficient de foisonnement à approximativement 1,04. Cette valeur, relativement faible, est liée au fait que le matériau granulaire est roulé et peu dense compte tenu du mode de mise en œuvre utilisé.

Pour des ouvertures de cavité de 50 cm et 1 m de diamètre, les mesures de déformations maximales de la nappe géosynthétique obtenues par fibre optique sont d'environ 0,4 et 0,8 % (figure 6) sur le plot GR1. Après ouverture totale de la cavité à 2,2 m de diamètre, cette déformation maximale est de 1,04% au droit de la cavité.

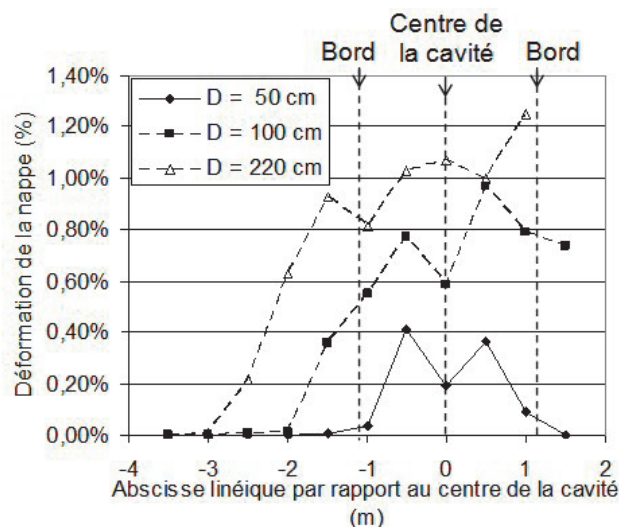


Figure 6. Plot GR1 - Déformations de la nappe géosynthétique au cours de l'ouverture de la cavité

On constate sur la figure 6 une évolution croissante des déformations du géosynthétique en fonction de l'ouverture de la cavité. Comme attendu, les déformations sont maximales au dessus de la cavité et diminuent dans les zones d'ancrage situées de part et d'autre de la cavité. A chaque augmentation de diamètre de la cavité on constate que les longueurs d'ancrage où sont mobilisés les efforts de frottement augmentent elles aussi.

3.2. Contraintes à la base du remblai

Les mesures de pression totale effectuées au bord de la cavité du plot GR1 mettent en évidence l'existence d'un mécanisme de transfert de charge au sein du remblai granulaire. Ainsi, dès l'ouverture de la cavité, une légère augmentation de la contrainte est enregistrée sur les capteurs de pression totale positionnés au bord de la cavité. En fait, l'effondrement du cylindre de sol au dessus de la cavité va générer par cisaillement un transfert d'effort sur le pourtour de la cavité. Compte tenu que ces reports de charge peuvent être très localisés et que la surface des capteurs est relativement grande (0,4 x 0,4 m) la mesure obtenue est à considérer qualitativement.

3.3. Analyse des résultats expérimentaux obtenus

La figure 7 permet une comparaison des déformations mesurées par fibres optiques et flèches de la nappe géosynthétique obtenues sur le plot GR1 avec les résultats des formules analytiques proposées par Villard et Briançon (2008) qui supposent un mécanisme d'effondrement tel que présenté sur la figure 1. Pour l'établissement de cette formule analytique, la charge sur la nappe au droit de la cavité est supposée uniforme. Son intensité est déduite de la formulation de Terzaghi qui suppose un effondrement cylindrique du sol au droit de la cavité. Ce cylindre de sol, dont la base est de même diamètre que la cavité, est équilibré simultanément par l'action du renforcement géosynthétique et par les efforts de frottement agissant sur sa face latérale et qui donnent lieu à des reports de charge au sein du remblai. Ce mécanisme d'effondrement, s'il paraît légitime pour des rapports H/D peu élevés, n'est probablement plus adapté pour des petits diamètres de cavité (rapports H/D importants). Les paramètres utilisés pour l'établissement des formules analytiques (raideur du géosynthétique et paramètres d'interfaces) sont ceux du tableau 1 pour une hauteur de remblai de 1,2 m.

Sur le plan des déformations de la nappe géosynthétique (figure 7a), on constate que les mesures expérimentales obtenues lors de l'ouverture de la cavité sont, dans l'ensemble, assez proches des prédictions analytiques obtenues pour des diamètres de cavités supposés de 0,5 m, 1 m et 2,2 m. De part et d'autre de la cavité, on retrouve analytiquement et expérimentalement une chute progressive des déformations dans la nappe du fait d'une mobilisation progressive des efforts de frottement à l'interface.

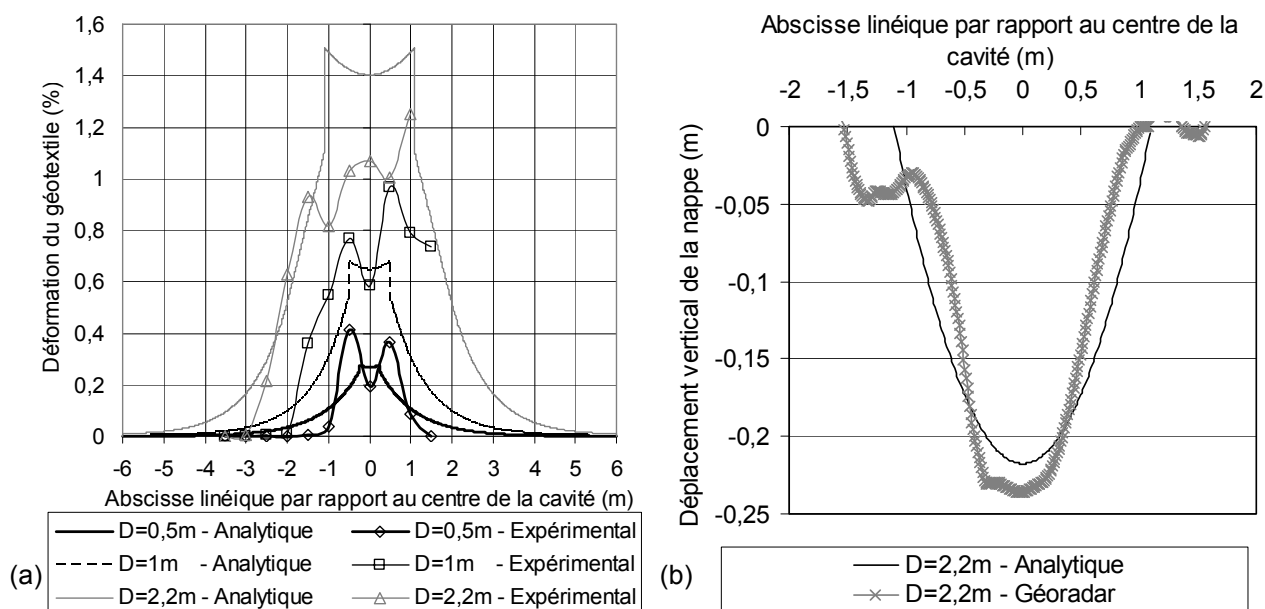


Figure 7. Comparaison analytique des résultats expérimentaux du plot GR1 – Déformations (a) et déflexion (b) de la nappe géosynthétique

La comparaison des mesures au radar géologique avec les résultats analytiques des déplacements du géosynthétique juste après ouverture de la cavité à 2,2 m de diamètre est présentée sur la figure 7b. On constate là aussi une bonne concordance entre les résultats même si des différences de forme subsistent.

Les comparaisons entre résultats analytiques et expérimentaux confirment ainsi que le dimensionnement analytique, utilisant la formulation de Terzaghi, donne des résultats qui ne sont pas parfaitement en concordance avec les résultats expérimentaux sans être aberrants pour autant pour le cas des remblais granulaires. Les écarts s'expliqueraient par des conditions d'essais mal maîtrisées (plissement de la nappe par exemple), ou par le manque de pertinence de certaines hypothèses de calcul telles que : l'uniformité de la contrainte verticale sur la nappe géosynthétique dans la zone d'ancrage ou aux bords de la cavité, ou l'évaluation des reports de charge par la formulation de Terzaghi. Les expérimentations et instrumentations ayant été mises en oeuvre dans des conditions proches de celles d'une application réelle, des incertitudes sur les mesures effectuées ne sont également pas à exclure.

Au final, la méthode analytique et la formulation de Terzaghi ne sont pas aberrantes, mais peuvent être améliorées. Dans cette optique, des études numériques basées sur des modélisations discrètes (Villard et al., 2009b) permettant de décrire les mécanismes de transfert de charge au sein du remblai granulaire sont mises en oeuvre en parallèle à l'étude expérimentale à des fins comparatives.

4. Résultats expérimentaux obtenus avec la couche de grave 0/40 mm traitée à 2% de chaux

4.1. Principe de fonctionnement d'un géosynthétique de renforcement sur cavités pour des remblais traités

Pour ce matériau, les mesures topographiques ont mis en évidence un tassement extrêmement faible (inférieur au centimètre) de la couche de sol traité lors de l'ouverture des cavités à un diamètre de 2,2 m. A ce stade de l'expérimentation, la mesure de déformation de la nappe fait état d'un décollement

de la nappe géosynthétique de plusieurs centimètres sur les plots GT1 et GT2. On peut en conclure que tant qu'aucune surcharge n'est appliquée, la couche de sol traité renforcée se comporte comme une dalle en flexion. Son maintien est assuré par la cohésion du matériau.

Les premiers déplacements significatifs au sein de l'ouvrage apparaissent lors des essais de chargement. Lorsque la valeur de la surcharge appliquée au centre de la cavité atteint une valeur limite (environ 1,7 t pour les plots GT1 et GT2) la couche de sol traité se rompt. Un bloc de sol de géométrie approximativement tronconique (figure 8) chute alors sur la nappe géosynthétique qui se déforme en membrane sur le pourtour de la cavité. On note donc, par rapport au cas du remblai en grave 20/40 mm, une différence essentielle de comportement au niveau de la déflexion du géosynthétique (aplatie dans le cas du sol traité) liée à l'effondrement en blocs du sol traité sur la nappe. Après effondrement un tassement de surface d'environ 9 cm (figure 8b) a pu être observé sur le plot GT1.

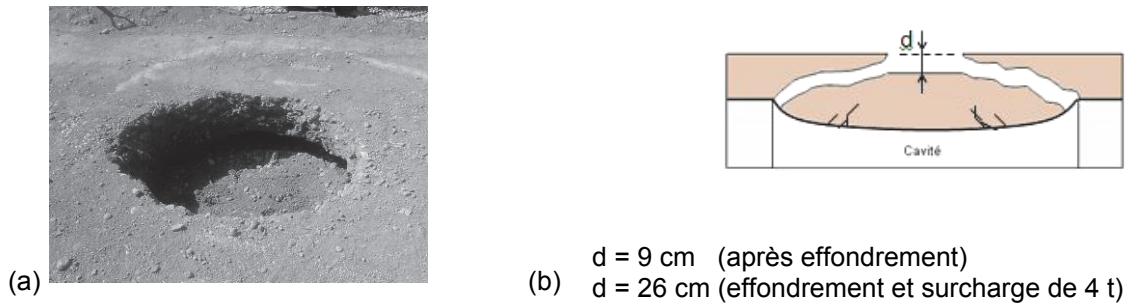


Figure 8. Géométrie de la rupture de la couche de sol traité (plots GT1 et GT2) – Effondrement de surface (a), coupe type sur le plot GT1 (b)

4.2. Mesures des déformations et déplacements au sein des ouvrages GT1 et GT2

Les accroissements de déplacement de la nappe dus au chargement ont été mesurés grâce au distance-mètre laser positionné dans le regard de visite après vidanges complètes des cavités. Ces mesures, initialisées à zéro après l'ouverture de la cavité à 2,2 m de diamètre, intègrent les déplacements liés au décollement de la nappe sous la plateforme lors de la formation de la cavité. Des profils complets de la déflexion de la nappe ont été obtenus à différentes étapes du processus de chargement sur les plots GT1 et GT2 (figure 9a). Après l'effondrement de la couche de sol traité sur la nappe, un accroissement de la déflexion de la nappe de 6 à 7 cm environ est enregistré (figure 9a). En intégrant à cette mesure le décollement de la nappe lors de l'ouverture de la cavité, le déplacement de la nappe diffère peu de celui observé en surface (environ 9 cm), ce qui tend à confirmer que le sol traité s'est effondré sur la nappe sans foisonner.

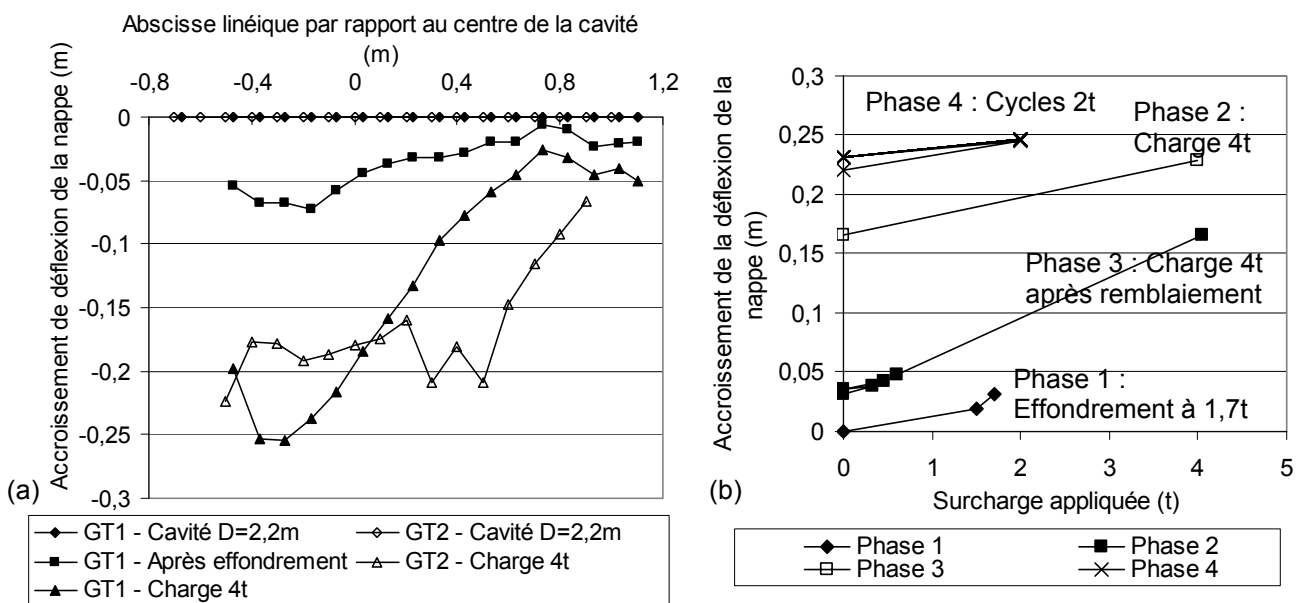


Figure 9. Profils laser sur les plots GT1 et GT2 (a) et évolution de la flèche au centre de la cavité sur le plot GT1 (b) lors des essais de chargement

Après effondrement du sol sur le renfort géosynthétique (fin de phase 1), une surcharge de 4 t est appliquée (phase 2) donnant des tassements de surface de 26 cm sur le plot GT1, pour des accroissements de déflexion de la nappe d'environ 25 à 20 cm respectivement sur les plots GT1 et GT2 (figure 9a). Là encore, en tenant compte du décollement de la nappe après ouverture de la cavité, on conclut que la couche de sol traité n'a pas foisonné. On remarquera également que les déplacements de la nappe sont plus faibles sur le plot GT2 pour lequel la raideur du géosynthétique est plus importante.

Les profils de déflexion sont complétés par une mesure continue de la flèche du géotextile au centre de la cavité lors des étapes de chargement. Pour ce faire, le distance-mètre laser est placé au centre de la cavité lors de l'application des surcharges successives. La figure 9b illustre ainsi l'évolution de l'accroissement de flèche au centre de la cavité sur le plot GT1 pour les différentes étapes de chargement. Après la 2^e phase de chargement, ce plot est déchargé, et la déflexion de surface est remblayée par un matériau de type tout-venant (soit une surcharge supplémentaire estimée de 0,58 t). A ce stade de l'expérimentation nous n'avons pas constaté de retour élastique de la nappe compte tenu : de l'effondrement en blocs du remblai sur la nappe, de la surcharge supplémentaire appliquée et des glissements irréversibles qui ont pu se produire à l'interface sol/géosynthétique. La phase 3 consiste alors à appliquer un cycle de chargement/déchargement de 4 t qui engendre également des déplacements irréversibles de la nappe. Enfin, la phase 4 consiste en 10 cycles de chargement/déchargement à 2 t. Dans ce cas, la nappe déjà affectée par le chargement de 4 t précédent, adopte un comportement élastique.

4.3. Contraintes en base du remblai

Comme pour le cas d'un remblai granulaire, les mesures des capteurs de pression totale CPT en base du remblai autour de la cavité enregistrent une très légère augmentation des contraintes verticales au cours de l'ouverture de la cavité à 2,2 m de diamètre. Cette augmentation est toutefois très limitée du fait de la faible épaisseur de remblai mis en œuvre et reste proche de la valeur de précision du capteur.

4.4. Analyse des résultats expérimentaux obtenus

Pour appréhender les mécanismes d'effondrement obtenus dans le cas du remblai traité, on se propose de comparer les résultats expérimentaux à ceux obtenus par l'application des formules analytiques du comportement en membrane (Villard al., 2002) établies sur la base d'une répartition uniforme des charges sur la nappe. L'application de cette formule analytique à la couche de sol traité de 17,9 cm d'épaisseur (volume effondré estimé de 0,88 m³) impliquerait des déformations de la nappe de 1,5% et une flèche maximale de 21 cm. Les résultats expérimentaux obtenus sont tout autre (déformation maximale mesurée de 0,04% sur le plot GT2 et déplacement de la nappe estimé à 9 cm sur le plot GT1). En fait, la couche de sol traité se comporte comme un bloc rigide qui prend appui vers les bords de la cavité. Il en résulte une diminution du déplacement maximal de la nappe géosynthétique et par voie de conséquence des déplacements de surface.

Si l'on applique cette même analyse à la première surcharge de 4 t appliquée au droit de la cavité, on constate que l'accroissement de la flèche mesuré expérimentalement est d'environ 25 cm sur le plot GT1 et 19 cm sur le plot GT2 pour une prédiction analytique de 21,6 cm. On en conclue que les formulations analytiques proposées pour des répartitions uniformes de la charge sur la nappe au droit de la cavité ne sont pas non plus adaptées pour les surcharges localisées. Des développements complémentaires, analytiques ou numériques, semblent nécessaires afin de mieux appréhender le comportement à la rupture des couches de sol traité.

5. Conclusions et perspectives

Trois plots expérimentaux ont été réalisés afin de compléter les connaissances actuelles en matière de renforcements géosynthétiques sur cavités. Ainsi les comportements d'un remblai granulaire purement frottant et d'une couche de sol traités renforcés par géosynthétiques ont été évalués lors de l'ouverture progressive d'une cavité sous-jacente et lors d'essais de chargement statiques et cycliques. L'instrumentation mise en œuvre a permis de suivre la déformation du remblai et les déplacements du

géosynthétique tout au long de l'expérimentation. Les résultats obtenus ont permis de tester et de comparer entre eux différents dispositifs de mesures dans des conditions proches de celles du chantier.

L'étude expérimentale montre un bon comportement des renforcements géosynthétiques mis en place, qui ont parfaitement joué leur rôle. Intégré à un remblai granulaire, le géosynthétique participe au mécanisme d'effondrement et permet de maîtriser les tassements de surface même pour une cavité de grand diamètre. Pour le sol traité, le renforcement permet d'éviter un accident potentiel lié à une rupture brutale de la couche sous trafic.

L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus constitue une base de données appréciable qu'il convient d'analyser plus en profondeur. Des résultats originaux ont ainsi été obtenus sur l'évolution des mécanismes de transfert de charge lors des cycles de chargement et lors des ouvertures progressives de la cavité. Il ressort de cette étude que certaines hypothèses relatives au dimensionnement des remblais granulaires telles que la répartition uniforme de la charge appliquée sur la nappe en zone d'ancrage et au droit de la cavité ne sont pas toujours pertinentes. Dans le cas du sol traité, il est montré clairement que les méthodes analytiques existantes ne sont pas applicables.

Des développements supplémentaires en matière d'exploitation des résultats, de développements analytiques, et de modélisations numériques sont en cours afin de parvenir à une nouvelle proposition pour le dimensionnement des renforts sur cavités notamment pour les remblais traités.

6. Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier les pôles de compétitivité Techtera et Fibres, les enseignants-chercheurs Fayçal Rejiba et Albane Saintenoy des universités Paris 6 et Paris 11 pour les mesures et l'analyse des données du Géo-radar, la société de terrassement Carrey TP pour l'aide apportée à la réalisation des expérimentations, l'IUT de Grenoble pour le prêt du matériel topographique, ainsi que la société Texinov, pilote du projet Géolnov, pour la conception et la caractérisation des géosynthétiques testés.

7. Références bibliographiques

- Blivet J.C., Khay M., Gourc J.P., Giraud H. (2001). Design considerations of geosynthetic for reinforced embankments subjected to localized subsidence. *Proceedings of the Geosynthetics'2001 Conference*, February 12-14, 2001, Portland, Oregon, USA, 741-754.
- Briançon L., Nancey A., Villard P. (2005). Development of Geodetect: a new warning system for the survey of reinforced earth constructions. *Studia Geotechnica et Mechanica*, XXVII (1-2), 23-32.
- 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*, Volume 26, 5: 416-428.
- 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, 2: 833-846.
- 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, 9p.
- 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*, 99 : 23-34.
- Villard P., Briançon L. (2008). Design of geosynthetic reinforcements of platforms subjected to localized sinkholes. *Canadian Geotechnical Journal*, volume 45, 2: 196-209.
- Villard P., Briançon L., Delmas Ph. (2009a). Dimensionnement des remblais renforcés par géosynthétique en zone sujettes à effondrement – Bilan des connaissances. *7^{ème} Colloque francophone sur les Géosynthétiques*, Nantes, France, 1-3 avril 2009, 109-116.
- Villard P., Chevalier B., Le Hello B., Combe G. (2009b). Coupling between finite and discrete element methods for the modelling of earth structures reinforced by geosynthetics. *Computers and Geotechnics* (36), 709-717.