

ESSAIS D'EXTRACTION SUR UNE NAPPE D'ACCROCHE : INFLUENCE DU SOL DE RECOUVREMENT SUR LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT

PULL OUT TESTS OF A GEOSYNTHETIC COMPOSITE: INFLUENCE OF SOIL ON SHEAR RESISTANCE

Seyed-Hamid LAJEVARDI¹, Alain COURADIN¹, Daniel DIAS¹, Alain HERAULT²

¹ INSA de Lyon, Villeurbanne, France

² COLBOND Geosynthetics, Saint Denis

RÉSUMÉ – Des essais d'extraction ont été effectués et ont permis de quantifier la résistance au cisaillement interne d'une nappe d'accroche en présence de deux matériaux de recouvrement, une grave 0/31,5 et un sable 0/5. Les essais réalisés pour une contrainte normale de l'ordre de 7 kPa dans une cuve d'extraction de grandes dimensions montrent que la nappe d'accroche ne se déplace en queue qu'après un certain seuil de déplacement en tête. L'interprétation des essais permet d'aboutir à des valeurs de frottement interne de la nappe supérieures au frottement interne du sol. Une modélisation analytique des essais a conduit à une loi de comportement originale permettant de reproduire le caractère extensible du géocomposite.

Mots-clés : Nappe d'accroche – Effort/déplacement – Frottement interne – Matériau de recouvrement – Loi de comportement.

ABSTRACT – The pull out tests carried out at the Laboratory of Civil and Environmental Engineering at INSA Lyon aim to quantify and compare the shear internal stress for a geocomposite in the presence of two overburden materials, a gravel 0/31,5 and a sand 0/5 (for a normal stress of about 7 kPa). Tests are conducted on a tank and shown that the composite tail begins to move after a certain threshold of the head displacement. Analysis of the results lead to values of internal friction of the upper yarn layer compared to the internal friction of the soil. An analytical modelling led to a model allowing to reproduce the local and the global behaviour of the composite.

Keywords: Geocomposite – Tensile force/ displacement - internal friction - Material recovery - Law behaviour.

1. Introduction

Le projet de norme « Stabilisation d'une couche de sol mince sur pente » en cours de rédaction au sein du BNSR (Bureau de Normalisation Sols et Routes) s'attache à établir en conformité avec l'Eurocode 7, le calcul des Géosynthétiques assurant la stabilité de structures de recouvrement des Dispositifs d'Étanchéité par Géosynthétiques (DEG) sur pentes. Les ouvrages concernés par ces dispositifs sont par exemple les couvertures des Installations de Stockage de Déchets (ISD), les talus routiers ou ferroviaires étanchés, les bassins, les canaux, réservoirs et barrages. La fonction d'accroche d'un géosynthétique est assurée lorsque la résistance au cisaillement d'interface sol/géosynthétique permet de mobiliser la totalité de la résistance au cisaillement du sol.

Les essais d'extraction ont été largement utilisés pour étudier le comportement en ancrage d'éléments de renforcement dans le sol. Divers matériaux ont été étudiés dont notamment des renforcements métalliques, des géotextiles et des géogrilles (Alimi et al., 1977 ; Schwab et al., 1977 ; Juran et Chen, 1988 ; Lentz et Pyatt, 1988 ; Palmeira et Milligan, 1989). L'interprétation des résultats de ces essais demeure toutefois complexe en raison de leur dépendance à l'égard du type de sol, du niveau de contrainte, de l'extensibilité du matériau, de la géométrie de la nappe utilisée ainsi que d'autres facteurs.

Lorsqu'on s'intéresse à des matériaux composites 3D (géotextiles et monofilaments associés par exemple), le problème est encore plus ardu de par le fait que la résistance en traction est apportée par le géotextile alors que la résistance au cisaillement est assurée par les monofilaments et par leurs liaisons au géotextile. La performance globale des géocomposites dépend du sol et des caractéristiques des matériaux constitutifs du géocomposite (module d'élongation et résistance en traction du géotextile, résistance au cisaillement des monofilaments au contact du sol et du mode de jonction entre le géotextile et les monofilaments).

Cet article présente le comportement en extraction d'un géocomposite placé dans deux types de sol. Les essais de traction instrumentés sur les géocomposites ont été effectués dans un modèle physique tridimensionnel. Ce type d'essai permet de reproduire le comportement global du géocomposite ainsi que l'influence des différents paramètres tels que la dilatance du sol qui joue un rôle important dans le mécanisme de fonctionnement de la nappe dans le sol.

Une modélisation analytique permettant de déterminer les paramètres de la loi locale de frottement, supposée identique sur toute la longueur de la nappe, à partir de la relation globale qui relie la force au déplacement de la tête du géocomposite et des mesures locales de déplacement est ensuite appliquée aux essais. Le mécanisme d'extension retardée est pris en compte dans la modélisation et l'impact de la différence de comportement entre les deux matériaux de recouvrement est mis en évidence.

2. Matériau, matériel et méthode

2.1 Géocomposite étudié

Le Géocomposite mis en œuvre est constitué de l'assemblage par couture d'un géotextile tissé en polyester (PET) avec un géomatelas de monofilaments en polyamide (PA) thermosoudés aux points de contacts. Plusieurs lignes de couture sont présentes sur la nappe géocomposite et sont espacées de 10 cm. Les points de coutures sont placés tous les 3,5 cm sur toute la longueur (Fig. 1).

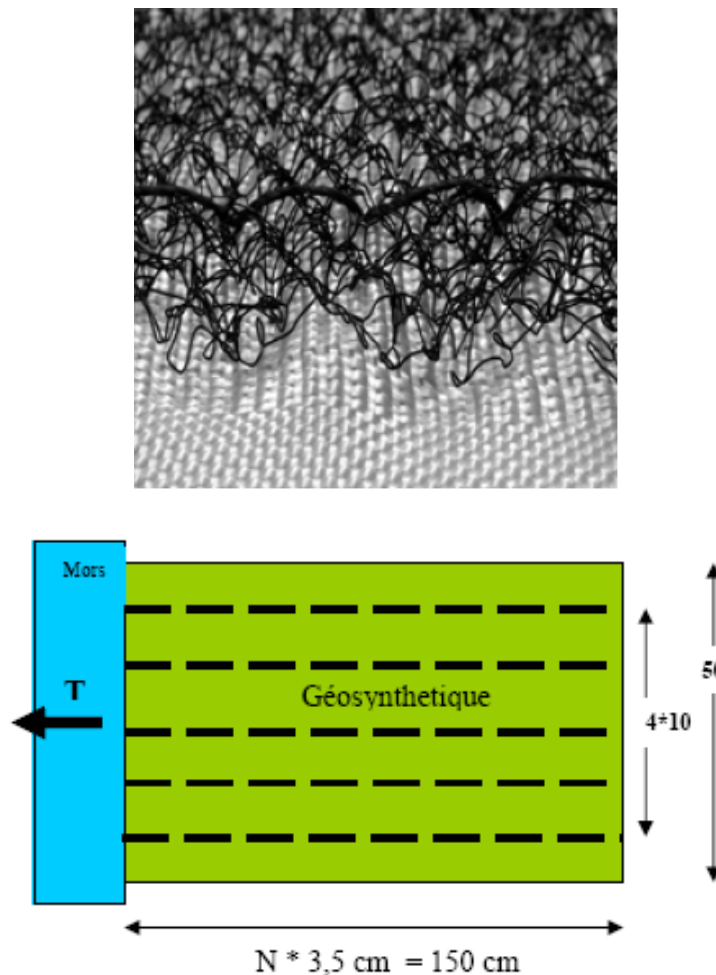


Figure 1. Nappe Enkamat® d'accroche.

Lors de ces essais, une nappe géocomposite de 1,50 m de longueur et 0,50 m de large est ancrée dans la cuve. Les géocomposites (Enkamat®) testés sont développés par COLBOND. Leurs propriétés sont présentées dans le tableau I.

Tableau I. Caractéristiques techniques de l'Enkamat® 7010W/5/200.50 PET.

		Valeur moyenne	Tolérance
Masse surfacique	g/m ²	730	-10
Épaisseur	mm	10	-0,6
Résistance à la traction, sens longitudinal	kN/m	200	-20
Résistance à la traction, sens transversal	kN/m	55	-5
Allongement à l'effort maximal – sens longitudinal	%	12	-6, +3
Allongement à l'effort maximal – sens transversal	%	11	-6, +3
Résistance au poinçonnement statique	kN	2	-0,6
Résistance à la perforation dynamique	mm	15	3

2.2 Matériau de recouvrement

Les matériaux utilisés dans les deux essais sont :

- une grave 0/31,5. Les principales caractéristiques de la grave sont sa granulométrie 0,08-35 (mm), sa densité 1,91-2,05, sa cohésion 61 kPa et son angle de frottement 36 degrés.
- un sable standard référencé sous l'appellation de Hostun RF et dont les principales caractéristiques sont: sa granulométrie 0,16-0,63 (mm), sa densité 1,32 - 1,59 et son angle de frottement 38 degrés.

2.3 Cuve d'extraction

Les dimensions intérieures de la cuve (Fig. 2) sont une largeur de 1,10 m, une hauteur de 1,10 m et une longueur 2 m. À l'avant de la cuve est placé le dispositif de traction pour l'extraction, alors qu'à l'arrière est fixé le support pour les capteurs de déplacement. D'autre part, le système complet est composé d'une cuve de stockage (géomatériau naturel granulaire), d'un dispositif de pluviation et d'un système informatique d'acquisition de données.



Figure 2. Cuve d'extraction (INSA de Lyon, LGCIE, Coulomb 3).

2.4 Instrumentation

Pour contrôler le niveau de contrainte verticale appliquée (engendré par la mise en œuvre du matériau granulaire, manuelle pour la grave, par pluviation pour le sable), un capteur de contrainte est placé sous la nappe, un capteur de contrainte latérale est également placé sur la paroi interne de la cuve, à la hauteur de la nappe pour mesurer l'évolution de la contrainte horizontale.

Pour ces essais, huit capteurs de déplacements à fil de 250 mm de course ont été utilisés. Ces capteurs fonctionnent à l'horizontale et leur support est directement fixé au bâti de la cuve d'extraction. Des câbles en acier de diamètre 1 mm ont été reliés aux capteurs de déplacement. Ces câbles sont

ensuite glissés dans des gaines en téflon pour éviter tout effet de frottement avec le sol lors de leur déplacement dans la cuve (Fig. 3).

Pour mesurer l'effort de traction en tête, un capteur de force annulaire est placé au bout du vérin d'extraction, entre la tête du vérin et le dispositif d'extraction. Toutes les mesures sont effectuées par l'intermédiaire d'un système d'acquisition.

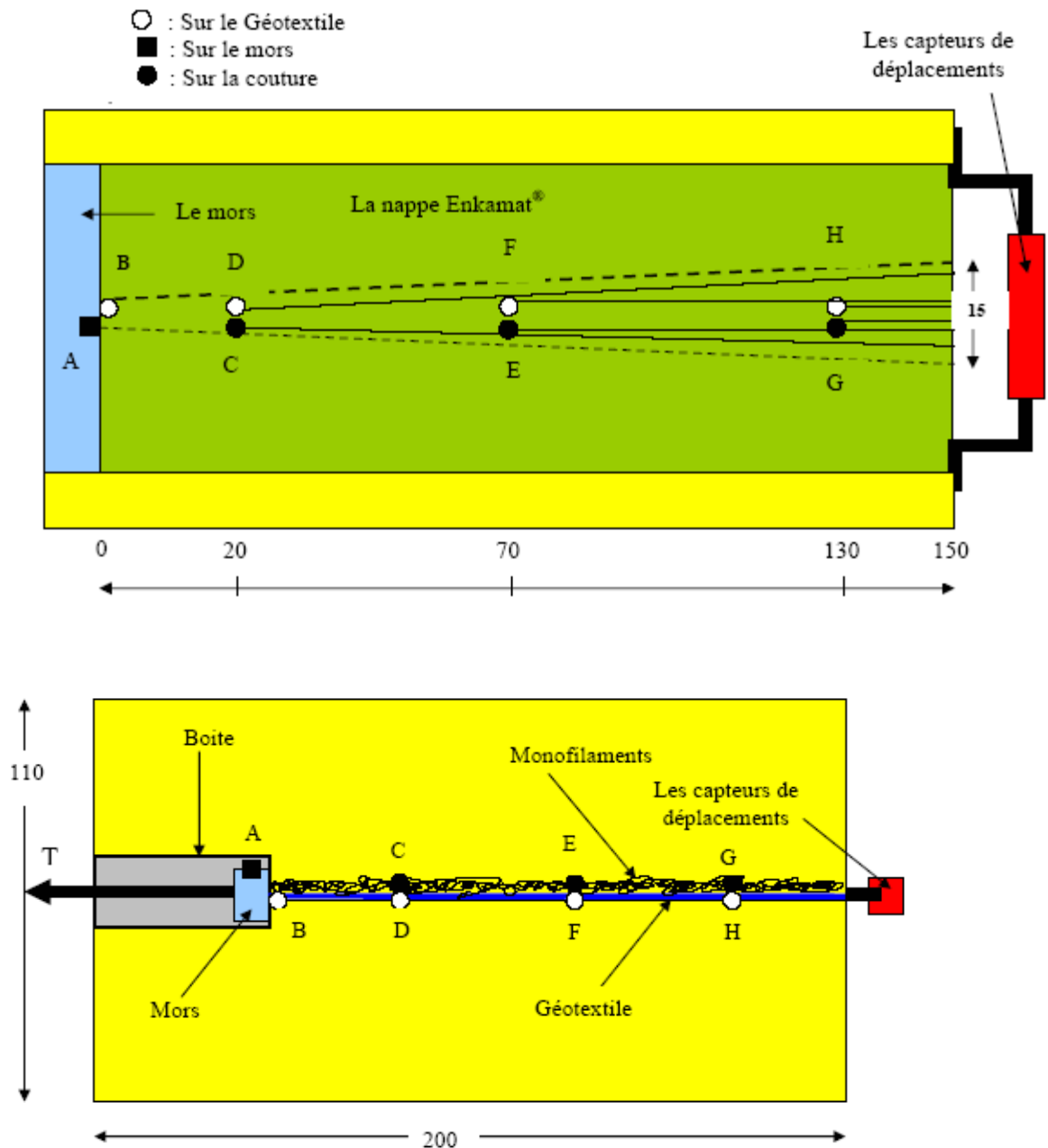


Figure 3. Disposition des capteurs de déplacements sur la nappe et dimensions de la nappe (150 * 50 cm).

2.5 Procédure d'essai

La préparation et la réalisation d'un essai s'envisagent en plusieurs étapes. Dans la cuve vide, huit couches de plaque polyfoam (60*600*1250 mm) sont déposées jusqu'à atteindre la position de la boîte de guidage. Ensuite, un capteur de contrainte verticale est placé sur les plaques Polyfoam et la boîte de guidage est placée dans la cuve. Une couche de sable est mise en place sur une épaisseur d'environ 4 cm sur les plaques Polyfoam et le capteur de contrainte verticale est positionné. Le niveau de sable est contrôlé pour s'assurer que la surface est bien plane. Sur le sable, une plaque PVC imprégnée de graisse est mise en place. Un film plastique est ensuite placé de manière à protéger le géotextile (fig. 5).

La nappe, équipée au préalable des dispositifs nécessaires aux mesures (câbles en acier fixés sur la nappe, gaines), est disposée après avoir pris le soin d'aplanir la surface du sol.

Pour le premier essai, une couche de grave et pour le deuxième essai, une couche de sable est placée au-dessus de la nappe géocomposite équivalent à une surcharge d'environ 7 kPa.

L'extraction de la nappe se fait à une vitesse de 1 mm/min par le vérin placé à l'avant de la cuve.

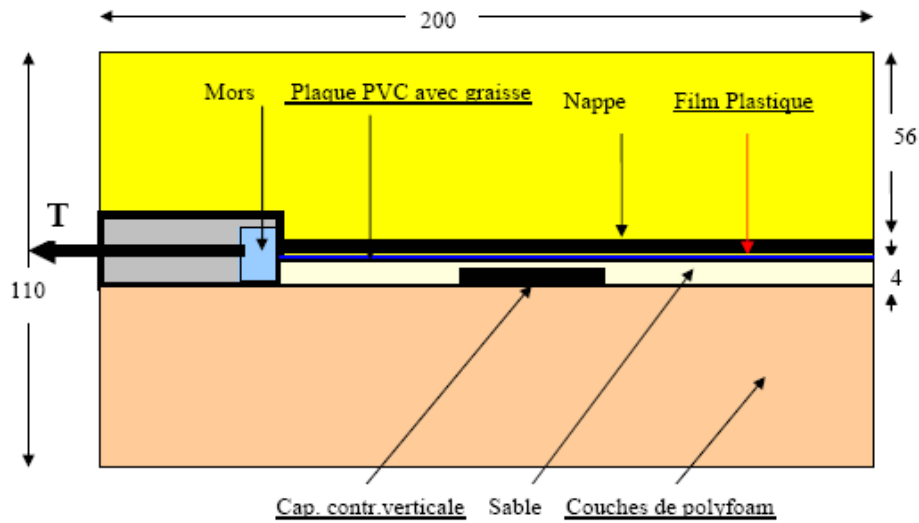


Figure 5. Schéma du remplissage de la cuve d'extraction.

3. Analyse et exploitation

Les essais ont permis de déterminer l'effort de traction, la contrainte tangentielle de cisaillement, la déformation maximale et globale du géosynthétique, l'angle de frottement mobilisé ainsi que les déplacements en plusieurs points de la nappe géocomposite.

Tableau II. Synthèse des résultats.

Essai	1 Grave	2 Sable
Densité	2	1,5
Contrainte verticale (kPa)	7,4	6,2
Angle de frottement (degrés)	64	59
Angle de frottement (degrés) avec prise en compte de l'influence de la dilatance	53	52
Effort maximum de traction (kN)	11	8
Retard Queue / Tête (mm)	50	75
Augmentation de la contrainte verticale	1,51	1,55
Déformation maximale $\Delta L/L$ (%) pour 150 mm U_t *	10	5,7
Déformation globale $\Delta L/L$ (%) pour 150 mm U_t *	4,6	2
Contrainte tangentielle maximale de cisaillement (kPa) pour 150 mm U_t *	13,6	9,6

U_t *: Déplacement en tête.

Le tableau II présente la synthèse des résultats des essais obtenus sur la nappe géocomposite pour la grave et le sable. Ces résultats indiquent que, au cours de ces deux essais, l'angle de frottement et l'effort maximum de traction avec la grave sont plus élevés que ceux avec le sable. Ce résultat se retrouve pour la déformation maximale et globale et pour la contrainte tangentielle maximale de cisaillement. En outre, le tableau II montre que le phénomène de dilatance est plus important avec le sable. L'augmentation de la contrainte dans le sens vertical pour le sable est de 1,55 fois la valeur de la contrainte initiale, et est de 1,51 fois pour la grave.

La figure 6 montre l'évolution de l'angle de frottement en fonction du déplacement en tête avec et sans influence de la dilatance. Pour une faible surcharge, le phénomène de la dilatance diminue la valeur de l'angle de frottement. Pour la grave cette diminution est de l'ordre de 18 % et pour le sable de 12 %.

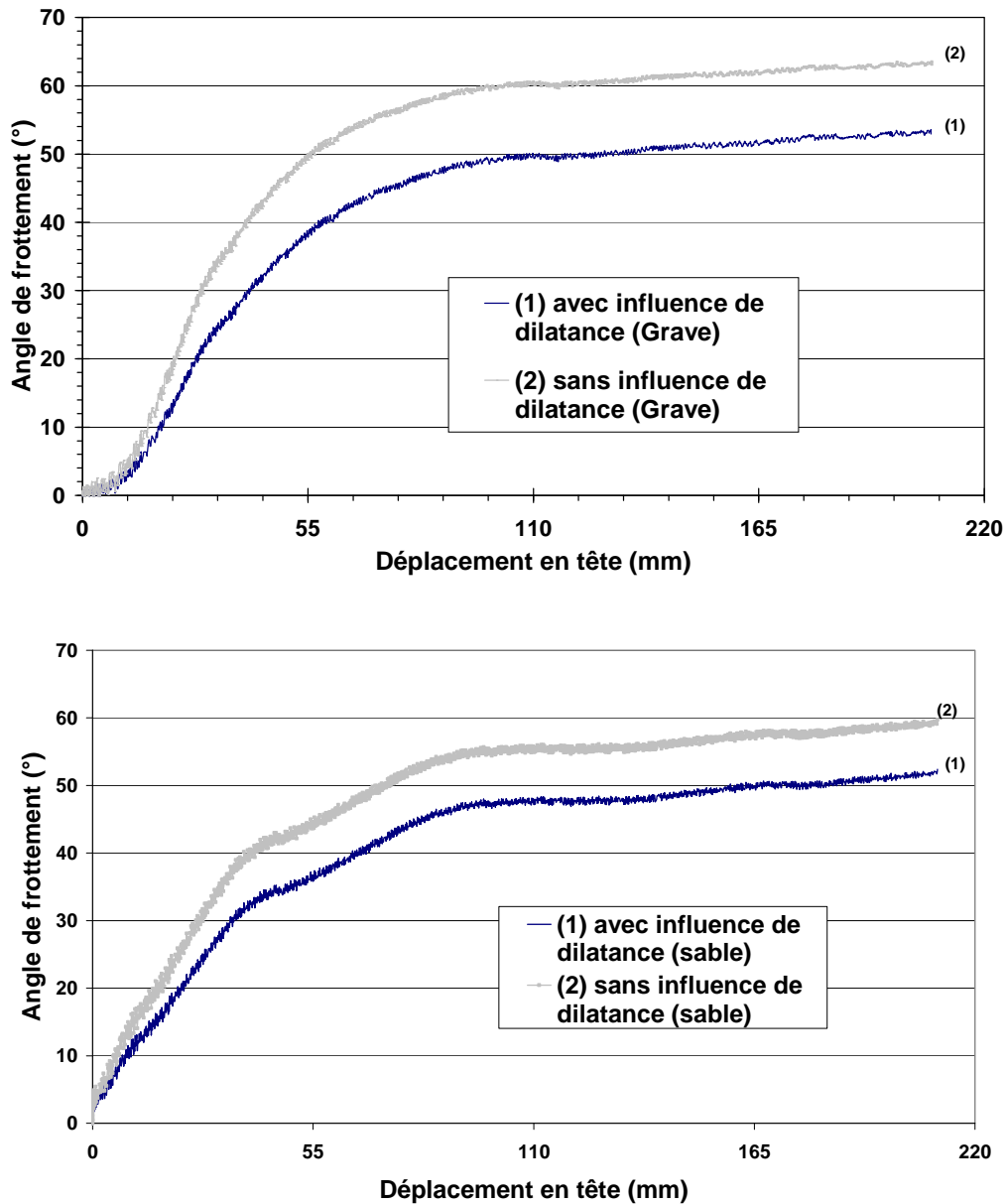


Figure 6. Influence de la dilatance.

L'analyse du comportement du renforcement avec ces deux types de sol révèle que la nappe de géocomposite se déplace en queue qu'après avoir mobilisé un certain déplacement en tête. Le retard est plus important avec le sable (Figure 7).

La figure 8 montre que l'effort de traction dans la nappe est progressivement mobilisé avec l'augmentation du déplacement en tête. Ainsi, le frottement est mobilisé progressivement le long de la nappe.

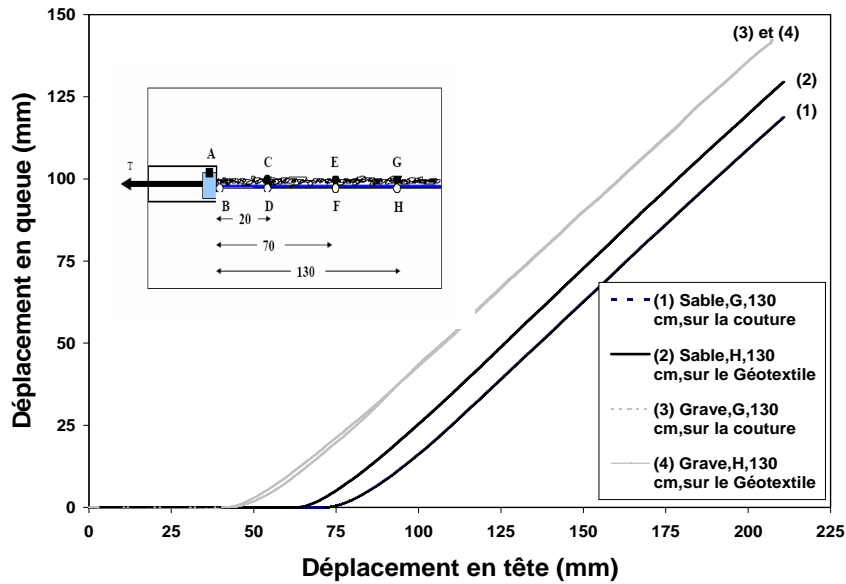


Figure 7. Déplacement des points situés à 130 cm de longueur de la nappe Géocomposite.

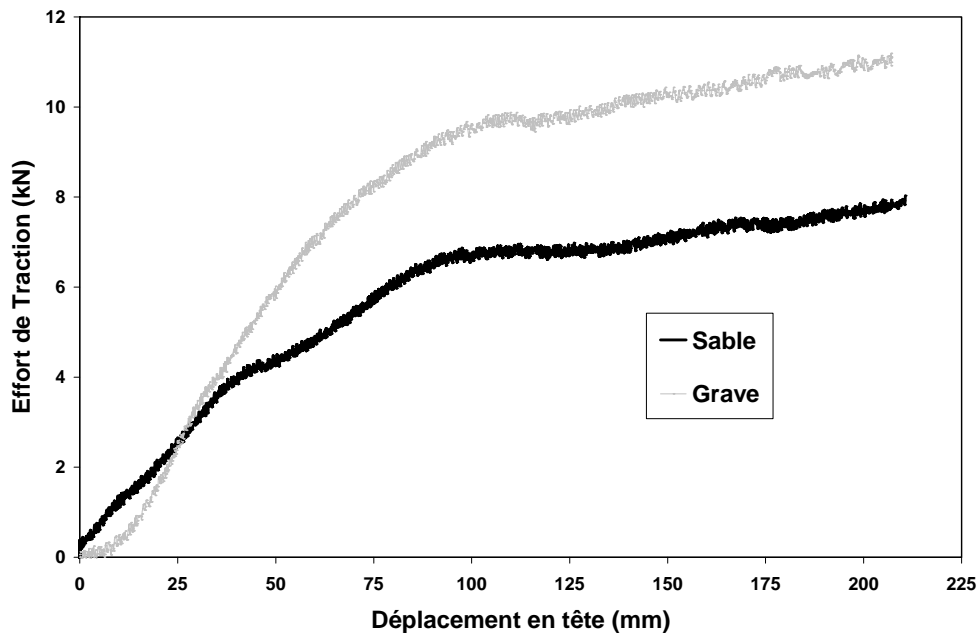


Figure 8. Effort de traction (kN) / déplacement en tête (mm) sous une surcharge faible ~7 kPa.

4. Modélisation analytique

4.1 Principe

La modélisation du comportement d'une nappe ancrée dans le sol et soumise à un effort de traction en tête, nécessite la connaissance de deux lois :

- une loi de traction de l'armature $T-\varepsilon$; elle permet de prendre en compte le comportement de la nappe en reliant l'effort de traction T à la déformation ε par l'intermédiaire du module d'élongation $J=ES$. L'introduction d'un ε_0 (Figure 9) permet de prendre en compte l'extension retardée dans la modélisation analytique ;
- une loi de frottement local $f - U$ entre le sol et le géosynthétique ; elle permet de relier l'effort de frottement au déplacement relatif U et ces paramètres sont le frottement limite f^* et le déplacement U^* . Dans notre cas, la loi prise en compte est de type trilineaire (Figure 10).

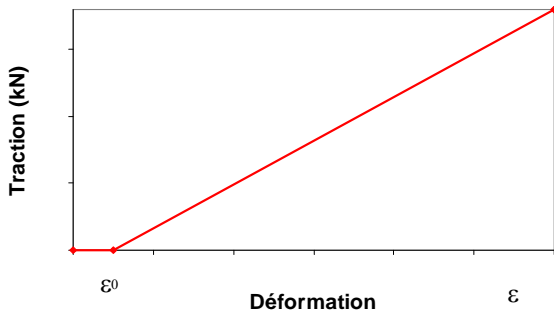


Figure 9. Loi de traction

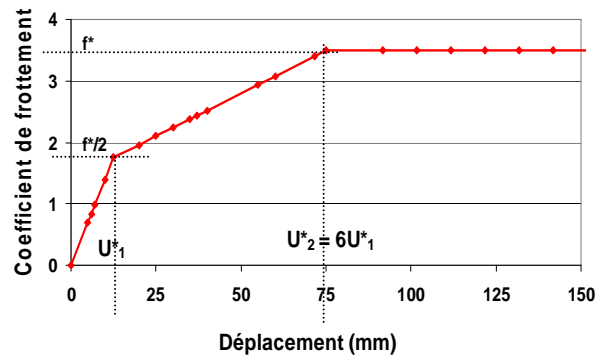


Figure 10. Loi de frottement local trilineaire (Essai 1)

Le principe de la méthode réside dans l'écriture de l'équilibre des efforts de chaque tronçon de nappe. De nombreux auteurs ont utilisés le même type de formulation (Schlosser, 1981 ; Segrestin et Bastick, 1996).

4.2. Recherche des paramètres optimums pour la modélisation

L'analyse induit une optimisation des paramètres permettant de simuler les essais expérimentaux avec la plus grande précision. Ces paramètres sont précisés dans le tableau III. Une automatisation de l'optimisation a été implémentée sous Matlab. Le critère utilisé pour estimer l'erreur entre le résultat de la modélisation et le résultat expérimental est le suivant :

$$E = \sqrt{\sum (u_{i\text{calculé}} - u_{i\text{mesuré}})^2}$$

Les paramètres retenus pour les lois d'ancrages sont ceux qui conduisent à la plus faible erreur.

Tableau III. Paramètres optimisés.

Paramètres	Erreur E	U*	J	ε ₀
Essai 1	59	0,075	1500	0,035
Essai 2	308	0,06	1500	0,035

4.3. Confrontation aux résultats expérimentaux

La modélisation des essais expérimentaux permet de bien reproduire les déplacements en tête (Figure 11). Pour les déplacements en queue, la modélisation analytique conduit à une meilleure simulation des déplacements pour la nappe de l'essai 1 (erreur E inférieure à celle de l'essai 2).

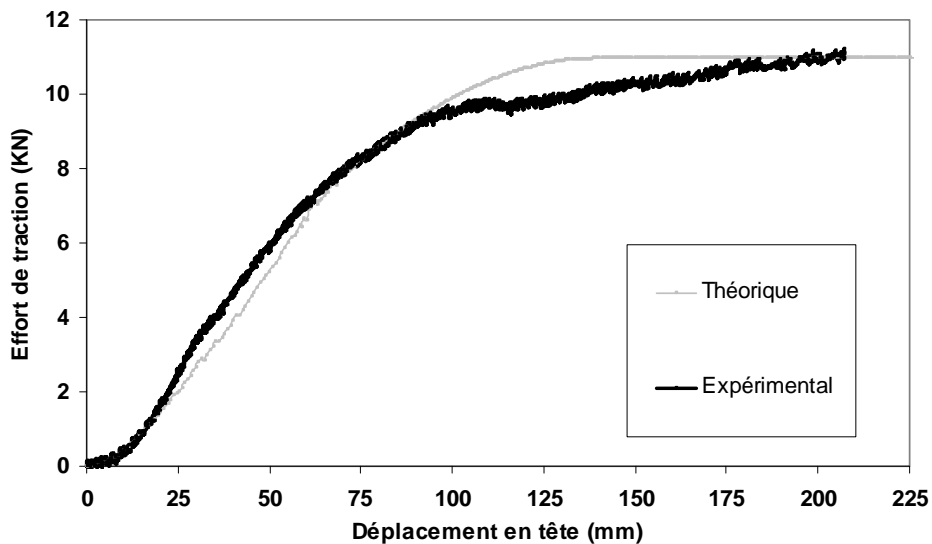


Figure 11. Confrontation Expérimental/Analytique (Essai 1)

5. Conclusions

Au cours de ces deux essais et pour des contraintes similaires (~ 7 kPa), la nappe Enkamat® a atteint des niveaux de déformation admissibles (inférieurs à 12 %). Dans les configurations étudiées, il semble que le cisaillement se produise progressivement en allant de l'interface géotextile/monofilaments (couture) vers le sol environnant. L'effort maximum de traction dans la grave est plus important qu'avec le sable (~27 %). Il semble donc que l'influence de la nature du massif dans lequel est placée la nappe Enkamat® soit importante. La valeur plus élevée de la contrainte de cisaillement dans la grave renforce cette observation. En effet, la grave est de nature frottante et cohérente alors que le sable est uniquement frottant. Ce retard observé entre la queue et la tête traduit une mobilisation progressive de la nappe.

La modélisation analytique développée permet de simuler avec précision le comportement du géocomposite en introduisant des lois de frottement et une loi de comportement en traction de la nappe adéquate. L'utilisation des paramètres optimisés de la modélisation permettra donc d'aboutir à un dimensionnement plus réaliste de l'interaction sol/structure des nappes « accroche terre ».

6. Références bibliographiques

- Abdelouhab A., Dias D., Freitag N., Bourdeau Y., Kastner R. (2008). Analytical modelling of pull-out tests on geosynthetic straps. *The Challenge of Sustainability in the Geoenvironment 'GeoCongress 2008'*, New Orleans, USA.
- Abdelouhab A., Dias D., Freitag N., Bourdeau Y. (2007). Soil/Reinforcement interface characterization using three-dimensional physical modelling. *The 5th International Symposium on Earth Reinforcement 'IS Kyushu 2007'*, Fukuoka, Japan.
- Alimi I., Bacot J., Lareal P., Long N.T., Schlosser F. (1977). Étude de l'adhérence sol-armature. Proc., 9th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Engrg., *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Japan, Vol. 1, 11-14.
- Bakeer R.M. et al. (1998). Geotextile friction mobilization during field pullout test". *Geotextiles and Geomembranes* 16(1998), 73–85.
- Briançon L., Girard H., Poulain D., Mazeau N. (2000). "Design of anchoring at the top of slopes for geomembrane lining systems", *Proceedings of the Second European Geosynthetics Conference, "EUROGEO 2000"*. Bologna, Italy, 15-18 October 2000, vol.2, pp 645-650.
- Briançon L. (2001). Stabilité sur pentes des dispositifs géosynthétiques — caractérisation du frottement aux interface et applications. *Ph.D. thesis*, Université Bordeaux I, Talence, France.
- Chu L.M., Yin J.H. (2005). Comparison of interface shear strength of soil nails measured by both direct shear box tests and pullout tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.131, No 9.
- Juran I., Chen C.L. (1988). Soil-geotextile pull-out interaction properties: testing and interpretation. Transp. Res. Record 1188, Transportation Research Board (TRB), *National Research Council*, Washington, D.C., 37-47.
- Lentz R.W., Pyatt J.N. (1988). Pull-out resistance of geogrids in sand. Transp. Res. Record 1188, TRB, *National Research Council*, Washington, D.C., 48-55.
- Moraci N., Romano G., Montanelli F. (2004). Factors affecting the interface apparent coefficient of friction mobilised in pullout condition. *Third European Geosynthetics Conference*, vol. 1, Monaco, pp. 313–318.
- Murad Y., Abu-Farsakh, Khalid Farrag, Izzaldin Almoh'd, Ather Mohiuddin (2004). Evaluation of interaction between geosynthetics and marginal cohesive soils from pullout tests. *Geo jordan*, 2004, 143, 25.
- Palmeira E. M., Milligan W.E. (1989). Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grids buried in sand. *Géotechnique*, London, England, 39(3), 511-524.
- Perkins S.W., Edens M.Q. (2003). Finite element modelling of a geosynthetic pullout test. *Geotechnical and Geological Engineering*, 21: 357-375, 2003.
- Raju D.M., Fannin R.J. (1998). Load.strain.displacement response of geosynthetics in monotonic and cyclic pullout. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, pp.183-193.
- Schwab E.F., Pregl O., Broms B.B. (1977). Deformation behaviour of reinforced sand at model tests measured by the X-ray technique. Proc., Int. Conf. on the *Use of Fabrics in Geotechnics*, Association Amicale des Ingénieurs Anciens Elèves de l'E.N.P.C., Paris, France, Vol. 1, 105-112.

- Sugimoto M., Alagiyawanna A.M.N. (2003). Pullout behavior of geogrid by test and numerical analysis”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.129, No 4.
- Sugimoto M., Alagiyawanna A.M.N., Kadoguchi K. (2001). Influence of rigid and flexible face on geogrid pullout tests. *Geotextiles and Geomembranes* 19 (2001) 257–277.
- Wilson-Fahmy R.F., Koerner R.M., Sansone L.J. (1994). Experimental behaviors of polymeric geogrids in pullout. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.120, No 4.
- Wilson-Fahmy R.F. et al. (1994). Long-term pullout behavior of polymeric geogrids. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121, No 10.