

INTERACTION GÉOSYNTHÉTIQUES – AGRÉGATS LÉGERS: ÉVALUATION PAR ESSAIS D'ANCRAGE

ANCHORAGE STRENGTH IN PULL-OUT TESTS: LWA – GEOSYNTHETICS INTERACTION

Joanna GÓRNIAK¹, Camille BARRAL², Philippe DELMAS², Marie TANKÉRE¹

¹ Texinov, Saint-Didier-de-la-Tour, France

² CNAM, Paris, France

RÉSUMÉ – Cette étude présente des tests réalisés au moyen d'un banc d'ancrage dans lequel différents géosynthétiques ont été testés avec des agrégats légers, sous différentes surcharges, les paramètres étant la raideur en traction et la géométrie des mailles. Les nappes géosynthétiques, placées entre deux couches de sol, ont été instrumentées au moyen de capteurs de déplacement et d'un capteur de force, un dispositif d'acquisition enregistrant l'ensemble des données. Les résultats (force d'arrachement, déplacements) permettent d'estimer le coefficient de frottement sol/géosynthétique. L'analyse permet de mettre en évidence des comportements différents selon les géosynthétiques et de proposer des recommandations pour optimiser l'interaction entre agrégats légers et géosynthétiques.

Mots-clés: résistance à l'arrachement, géosynthétiques, agrégats légers d'argile expansée, test d'ancrage avec surcharge.

ABSTRACT - This study deals with anchorage tests performed in large pull-out box, where different geosynthetic products were embedded in lightweight aggregate under different normal loads. The studied parameters were the geosynthetics stiffness and opening sizes. The tested samples, embedded in two aggregate layers were instrumented with displacement transducers and a force transducer at clamp and connected to a data acquisition system. The obtained results were plotted for the pull-out force and the corresponding displacement, whence the friction coefficient between the soil and the geosynthetic was estimated. The study emerges the different behaviors of the geosynthetics and proposes some first recommendations for the lightweight aggregate-geosynthetic interaction.

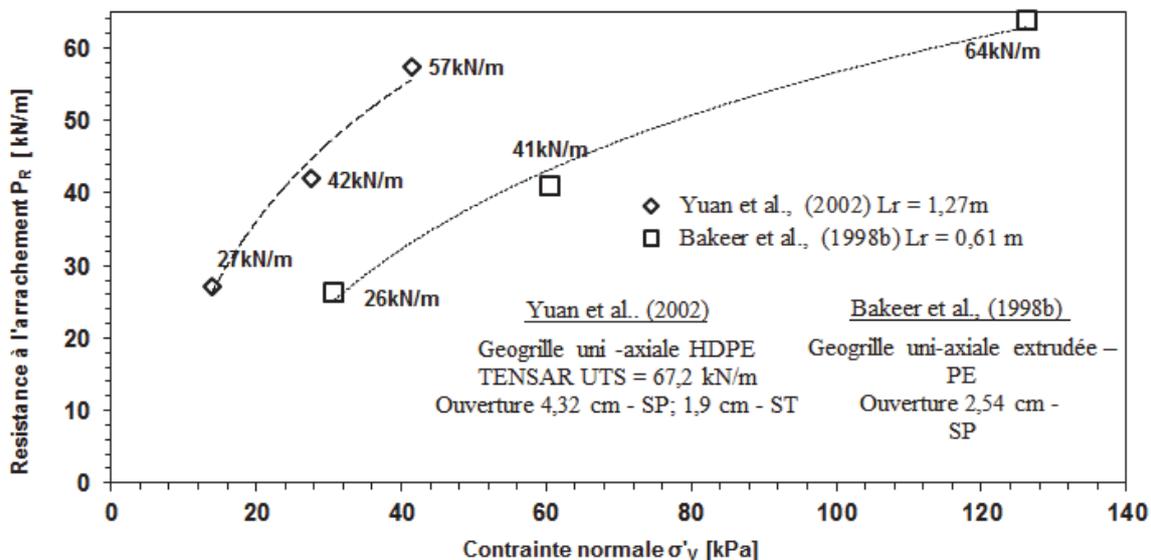
Keywords: pull-out resistance, geosynthetics, lightweight expanded clay aggregate, anchorage test with surcharge.

1. Introduction

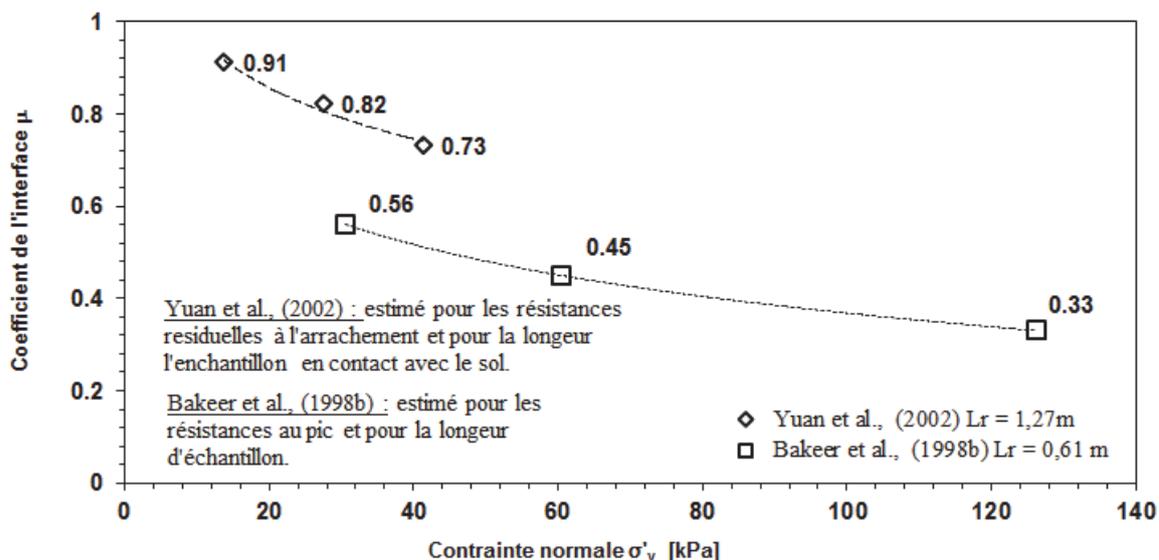
Plusieurs études ont permis, depuis une dizaine d'années, d'approfondir la connaissance de la résistance à l'arrachement. Cependant, l'interaction spécifique des géosynthétiques de renforcement avec un sol non conventionnel, tels les agrégats légers, nécessite une étude particulière. L'objectif de l'étude réalisée est de caractériser cette interaction en termes de résistance à l'arrachement, de déplacement et de coefficient de frottement sol/géosynthétique, dans le cas d'un sol aux propriétés spécifiques (argile expansée de granulométrie 10-20 mm, de faible poids volumique 350 kg/m³), en utilisant un appareillage de grandes dimensions et sous contraintes modérées.

2. Études expérimentales d'arrachement de géosynthétiques dans des matériaux légers

Depuis plusieurs années, on recense de nombreuses études sur le comportement des géosynthétiques, en ancrage dans le renforcement des sols classiques. Plusieurs travaux de recherche (Bakeer et al., 1998a ; Delmas, 1979 ; Forsman et Slunga, 1994 ; Moraci et Recalcati, 2006 ; Palmeira, 1987, 2009 ; Yuan et al., 2002) ont été menés, à partir d'essais simples d'arrachement jusqu'à des dispositifs complexes. De tels essais ont également été conduits dans le cas des structures en agrégats légers renforcées par des géosynthétiques, lorsque le remblai permettait de mobiliser une résistance suffisante à l'arrachement dans le cas des murs de soutènement (Bakeer et al., 1998b ; Yuan et al., 2002). Par ailleurs, le dimensionnement de structures associant géosynthétiques et agrégats légers repose en général sur une approche conservatrice en matière de stabilité, comme décrit par Dalwadi et Douala-Rigby (2012) ou Jenner et al. (2008).



(a)



(b)

Figure 1. Comparaison des résultats de tests d'arrachement billes d'argile expansée – géosynthétiques obtenus par (Yuan et al., 2002) et (Bakeer et al., 1998b) : résistance à l'arrachement – contrainte normale (a) et coefficient de frottement ($\mu = \text{tg } \varphi'_{\text{gsy/sol}} / \text{tg } \varphi'_{\text{sol}}$) – contrainte normale (b).

D'autres auteurs ont jugé que l'interaction entre géosynthétiques et agrégats légers méritait une étude approfondie, notamment en raison des avantages que présentent ces derniers par rapport aux sols classiques: angle de frottement interne élevé $\varphi' = 38$ degrés, résistance à la compression simple $R = 0,68 \text{ N/mm}^2$, très faible poids volumique 350 kg/m^3 (Wood et Hova, 2009), ainsi que de la facilité et de la rapidité de mise en place par soufflage (Watn, 2001, 2008).

Des tests de résistance à l'arrachement menés par (Yuan et al., 2002) et (Bakeer et al., 1998b) ont mis en évidence une résistance à l'arrachement élevée pour plusieurs niveaux de contrainte, dans le cas des grilles géosynthétiques et des billes d'argile expansée 0/10 mm (Yuan et al., 2002) et 0/11 mm (Bakeer et al., 1998b). Une comparaison des résultats est présentée sur la figure 1.

Dans les deux cas (Bakeer et al., 1998b; Yuan et al., 2002), les nappes géosynthétiques ont été soumises à différentes contraintes normales. La figure 1a met en évidence l'influence de la surface de contact entre le sol et le géosynthétique (longueur d'ancrage L_r et largeur d'ancrage B_r) sur la résistance à l'arrachement ($L_r = 1,27 \text{ m} \times B_r = 0,425 \text{ m}$ pour Yuan et al. (2002) et $L_r = 0,61 \text{ m} \times B_r = 0,61 \text{ m}$ pour

Bakeer et al. (1998b)). Il est à noter que les produits testés sont réalisés avec la même technologie avec des polymères similaires, mais avec des tailles de maille différentes. La figure 1b tente de mettre en évidence les écarts de coefficients de frottement ($\mu = \text{tg } \varphi'_{\text{gsy/sol}} / \text{tg } \varphi'_{\text{sol}}$) déterminés par ces auteurs. On notera cependant que les évaluations du coefficient (μ) sont faites sur la base de conditions différentes suivant les auteurs : Yuan et al. (2002) estiment (μ) pour les résistances résiduelles à l'arrachement sur la base de la surface du géosynthétique restant en contact avec le sol alors que Bakeer et al. (1998b) estiment (μ) pour les résistances de pic à l'arrachement sur la base de la surface du géosynthétique testé, qui semble être la même que la longueur et la largeur de la boîte à l'arrachement.

Le peu de données disponibles sur ce type de matériau léger et la granulométrie différente utilisée dans les ouvrages (10/20 au lieu de 0/10 dans les études) montrent la nécessité d'engager cette étude.

3. Dispositif expérimental

3.1. Installation expérimentale et instrumentation

L'appareil d'essais développé par Briançon (2001) et mis à disposition par Irstea, se compose d'un cadre métallique comprenant des poutres et des poteaux entre lesquels prennent place des parois de contreplaqué sur les quatre faces. Ses dimensions extérieures sont 2,5 m en longueur et 1,2 m en largeur, intérieures respectivement 2,45 m et 1,15 m (Figure 2).

Ce dispositif permet de tester des nappes de 2,45 m de longueur, avec différentes hauteurs de sol ou de matériau, la hauteur de l'appareil étant de 1,5 m. La force de traction est exercée au moyen d'un treuil manuel, fixé à un cadre d'acier rigide. Afin d'éviter un effet parasite de frottement entre le matériau testé et les parois, des films en plastique sont agrafés à l'intérieur de celles-ci. La vitesse de test est réglée manuellement, contrôlée par le nombre de tours du treuil par minute avec un ordre de grandeur de $v = 5 \text{ mm/min}$.

Le maintien du géotextile est assuré par enroulement autour d'un mors métallique de même largeur que la nappe. Un capteur de force est installé au niveau du mors. Afin de déterminer les valeurs de déplacement en différents points de la nappe, des capteurs de déplacement à fils (LVDTs) sont disposés en diagonale et fixés à celle-ci (Figure 3). La charge normale est appliquée au moyen de plaques d'acier (contrainte unitaire apportée par chaque plaque 3,69 kPa) posées sur une plaque de répartition en contreplaqué de 12 mm. L'ensemble du dispositif est représenté sur les figures 2 et 3.

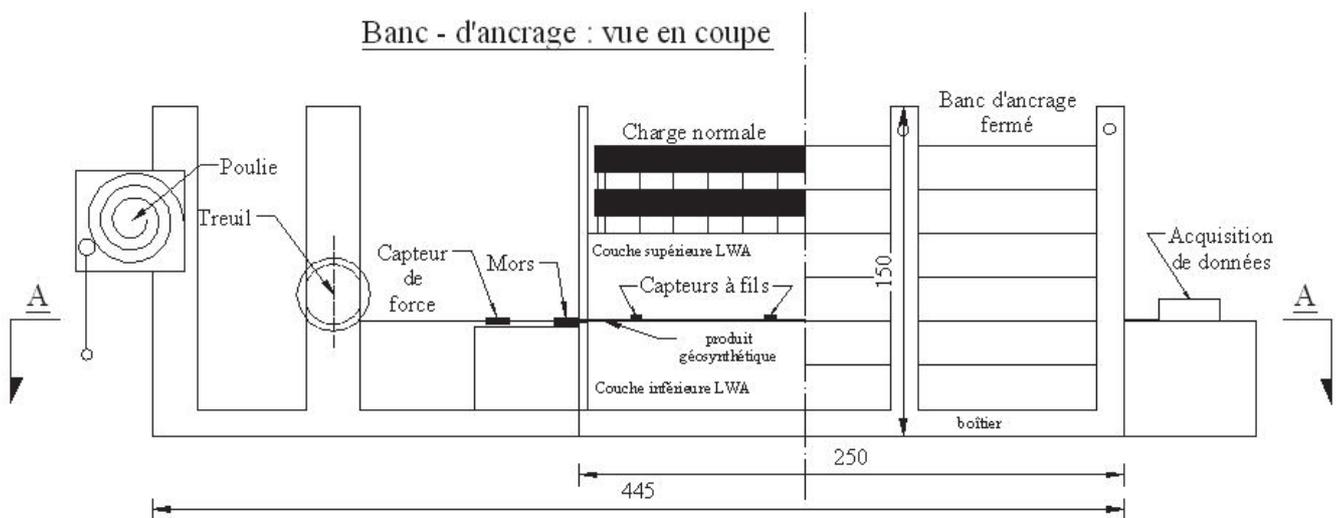


Figure 2. Banc d'ancrage. Vue en coupe de l'installation. Noter que les couches d'agrégats sont bloquées au droit du mors.

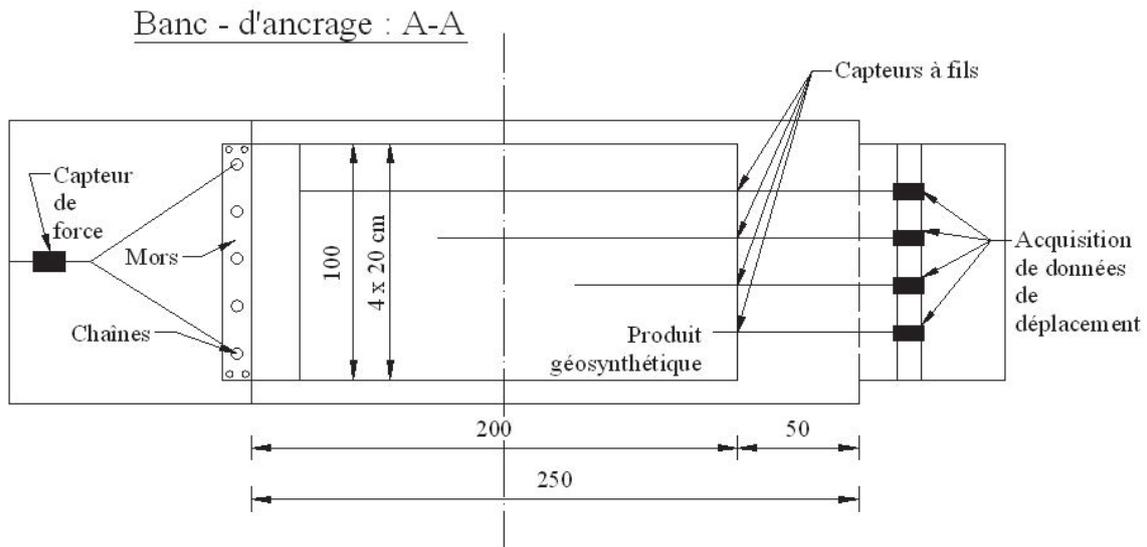


Figure 3. Vue en plan du dispositif et position des capteurs de force et de déplacement.

Tableau 1. Caractéristiques des géosynthétiques.

Dénomination	Matériau	Épaisseur [mm]	Résistance max R [kN/m]	Allongement à l'effort maximum ε_r [%]	Raideur J_2 à $\varepsilon = 8\%$ [kN/m]
Produit A – NOTEX® C Grille enduite Ouvertures: 8x4 cm resp. SP et ST	PET [#]	1,5	130 SP 60 ST	11 SP 11 ST	1500 SP
Produit B – NOTEX® GX Ouvertures: 0.38x0.38 cm resp. SP et ST	PET [#]	1,0	150 SP 50 ST	11 SP 11 ST	2300 SP
Produit C – Geoter® FPP Pas d'ouvertures	PP [#]	3,0	150 SP 50 ST	16 SP 16 ST	1100 SP

[#] PET polyester, PP polypropylène
SP: sens production, ST: sens travers

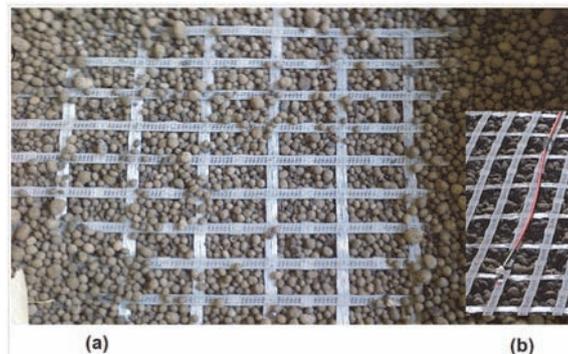


Figure 4. Produit A installé dans les billes d'argile (a) avec capteur de déplacement à fils (b).

3.2. Matériaux testés

Les géosynthétiques utilisés sont présentés dans le tableau 1. Ce sont des produits bi-directionnels, tricotés-tramés, les paramètres variables étant la taille des ouvertures et les matériaux composant les nappes géosynthétiques. Les propriétés des agrégats légers en argile expansée sont résumées dans le

tableau 2. Résultats provenant de tests triaxiaux de compression (Wood et Hova, 2009). Les agrégats légers en argile expansée sont mis en place au moyen de pelles, sans technique de soufflage. Cette technique assure une diminution de volume du matériau d'environ 10% (tableau 2), soit une compaction légère comparable à celle réalisée dans (Wood et Hova, 2009) (figure 4).

3.3. Configuration expérimentale

Les échantillons de géotextiles sont préparés en longueur 2 m, largeur 1 m. Le sol mis en place au-dessus est recouvert de la plaque de répartition en contreplaqué, d'épaisseur suffisante pour permettre une répartition uniforme de la surcharge. Trois surcharges différentes sont appliquées au moyen de plaques d'acier : 5 kPa, 8,9 kPa et 12,4 kPa. Chaque configuration de test est répétée deux fois (18 tests au total). Les tests sont arrêtés lorsque le déplacement du premier capteur fixé à la nappe géosynthétique, côté mors, atteint 20 cm. Les épaisseurs d'agrégats au-dessus et au-dessous du géosynthétique testé sont d'environ 0,40 m et 0,40 m respectivement.

Tableau 2. Propriétés des agrégats légers en argile expansée (LECA® RÆLINGEN 10/20 mm) (Wood et Hova, 2009).

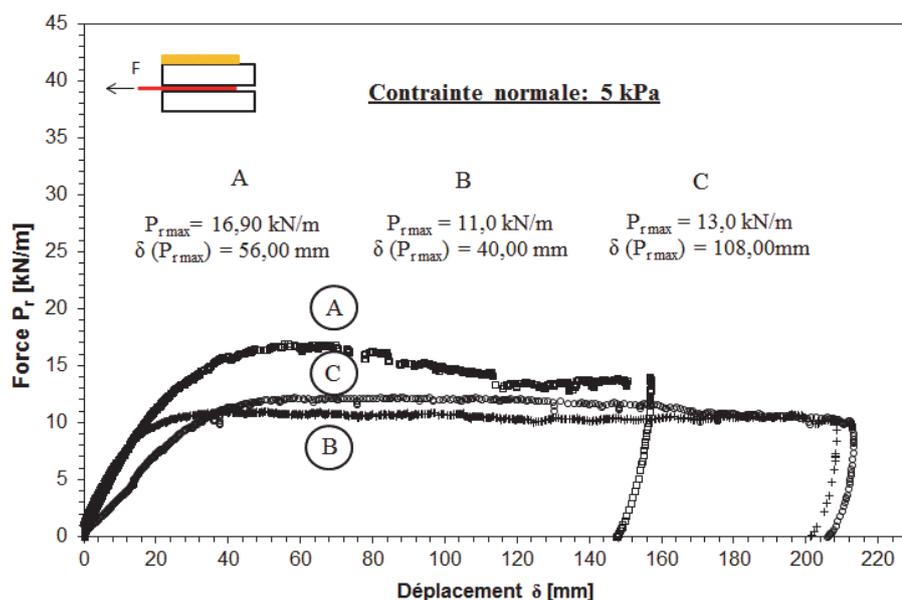
État	Masse volumique (kg/m ³)	Angle de frottement interne au pic φ_p' (degré)	Angle de frottement interne résiduel φ_r' (degré)	Comportement	Granulométrie
Lâche	350	38*	38	Contractant	10/20 mm

*Mise en place avec 10% de compaction

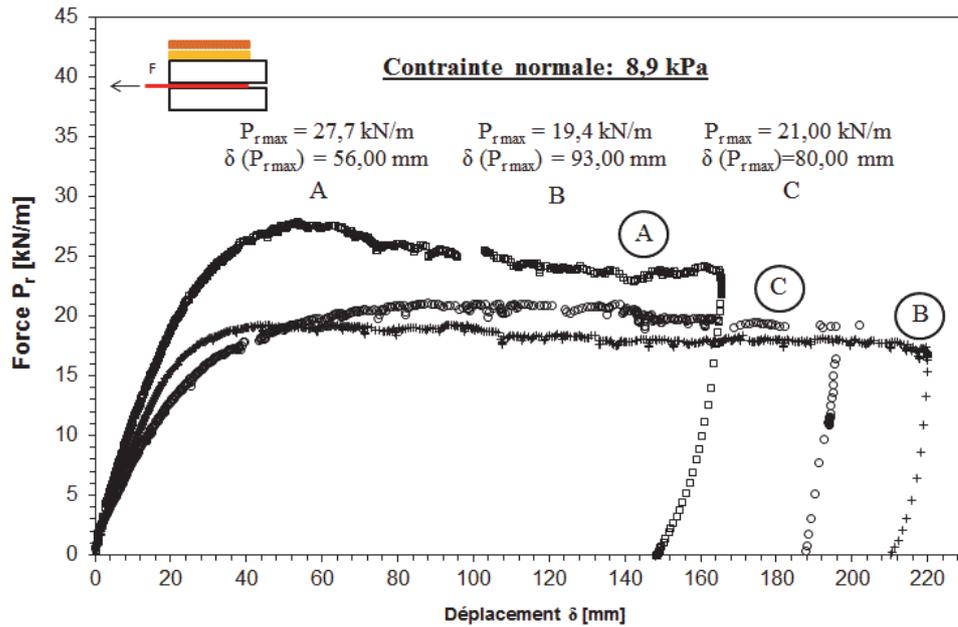
4. Analyse des résultats

4.1. Résistances à l'arrachement

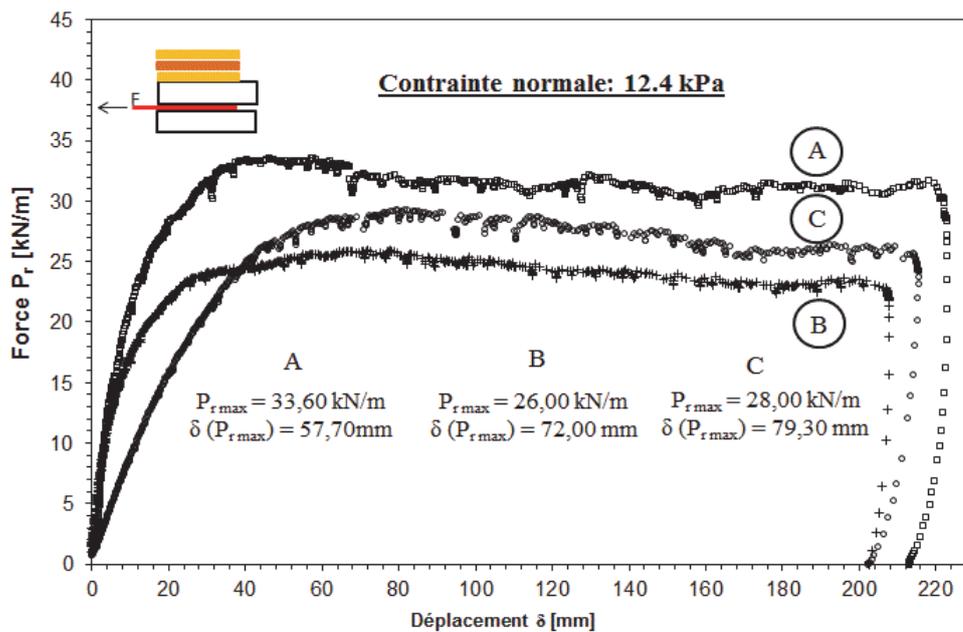
Classiquement, le test de résistance à l'arrachement avec couches de sols bloquées (NF-EN13738 2005) permet de déterminer la résistance au pic qui correspond à la valeur maximale de la force mesurée lors du test, ainsi que la résistance résiduelle de l'ancrage, correspondant à la valeur de la force pour les grands déplacements. Les forces d'arrachement que l'on peut mesurer pour des ancrages déformables comme les géosynthétiques dépendent de la surcharge normale appliquée, ainsi que de la raideur et de la longueur des nappes (Figure 5). Les résultats sont représentés sous forme de courbes force-déplacement pour chacun des produits : A, B et C. La force est mesurée au mors, le déplacement est celui du capteur D1 placé à 20 cm du mors comme le montre la figure 6.



(a)



(b)



(c)

Figure 5. Graphiques force/déplacement pour des nappes de longueur 2 m sous différentes surcharges (5 kPa ; 8,9 kPa et 12,4 kPa).

Sur la figure 5, le comportement des géogrilles, comparé à celui des géotextiles, fait apparaître un effet d'atténuation des déplacements, avec une diminution progressive de la résistance à l'arrachement après le pic. Au contraire, les géotextiles plus fermés (produits B et C) ont tendance à maintenir la résistance à l'arrachement après le pic. Ce comportement peut être expliqué par l'interaction entre le géosynthétique et les agrégats d'argile expansée, le frottement à l'interface dépendant du rapport entre la taille des agrégats et l'ouverture du géosynthétique.

Pour les différents niveaux de charge verticale - cas (a), (b) et (c) respectivement -, la raideur du produit est un paramètre important dans la zone avant le pic, c'est-à-dire lors de l'application de l'effort d'arrachement pour des déplacements de respectivement de 20, 30 et 40 mm. Pour chacun des tests, le produit C, de raideur la moins élevée, présente (à force égale) des déplacements plus importants que le produit B. On note également que les tensions comme les déplacements (voir aussi le paragraphe 0)

sont mobilisés de façon différente sur la longueur de la nappe géosynthétique, ce qui met en évidence le comportement non linéaire des allongements sous cette sollicitation. Une fois le pic atteint, les nappes de renforcement se déplacent de manière relativement uniforme (pour un déplacement maximum au mors de 200 mm), ce qui maintient la force d'arrachement résiduelle à un niveau constant pour les produits B et C. Malgré une raideur moins élevée du produit C, il semble que la géométrie de ce produit permette d'obtenir une meilleure résistance à l'arrachement que pour le produit B.

4.2. Déplacements

La figure 6 présente le comportement en ancrage du produit B sous un confinement de 12,4 kPa. On a représenté la force d'arrachement et les déplacements le long du géosynthétique en fonction d'un paramètre temps propre au système d'acquisition de mesures. L'analyse de l'évolution de l'effort d'arrachement en fonction des valeurs de déplacement lors du chargement confirme que le frottement sol/géosynthétique maximal est mobilisé lorsque l'extrémité de la nappe s'est déplacée.

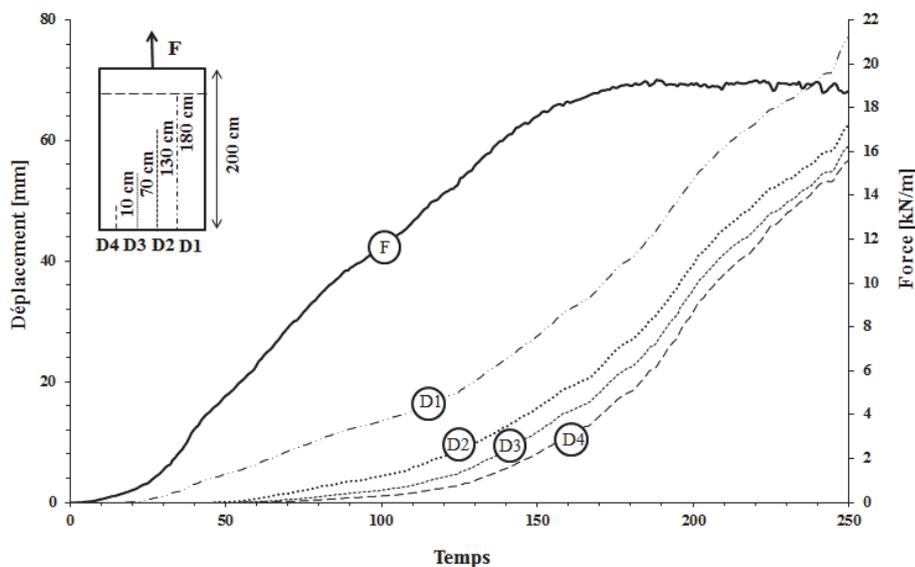


Figure 6. Exemple de courbes force d'arrachement et déplacements le long du géosynthétique pour le test d'ancrage du produit B, avec une surcharge $\sigma'_v = 12,4 \text{ kPa}$.

Pour les trois produits A, B et C, l'évolution des déplacements est comparée pour une force d'arrachement de $P_R = 6 \text{ kN/m}$ correspondant à un effort avant le pic, pouvant correspondre à une mobilisation proche d'un état de service (Figure 7). Pour chaque produit, on observe une répartition non linéaire des déplacements des points repérés sur la nappe géosynthétique. On remarque que le produit A se comporte différemment des produits B et C : déplacement plus faible en tête et plus important sur la partie libre de l'ancrage. Par contre les produits B et C ont des distributions de déplacements très semblables. Si l'on considère que les modules des produits A et C sont du même ordre de grandeur, ces résultats montrent l'incidence prépondérante de la taille des mailles dans la mobilisation du frottement. Des ouvertures de taille suffisante ($D_{\text{maille}} = 2 \text{ à } 4 \text{ fois } D_{\text{granulats}}$) (Palmeira, 2009) peuvent permettre l'imbrication des granulats dans la maille du géosynthétique et agissent comme une rigidification du géosynthétique: mobilisation de l'ancrage sur une longueur plus importante, donc pour un effort d'arrachement donné, moindre déplacement en tête.

Pour les produits B et C, on peut considérer en première approximation que la différence de taille de maille n'est pas significative vis-à-vis des granulats utilisés (D_{min} des granulats = 10 mm très inférieur à D_{max} de la maille des produits (3,8 mm)). Le faible écart des courbes de distribution de déplacement montre que la différence de raideur en traction n'est pas suffisante (facteur 2) pour engendrer une différence de comportement.

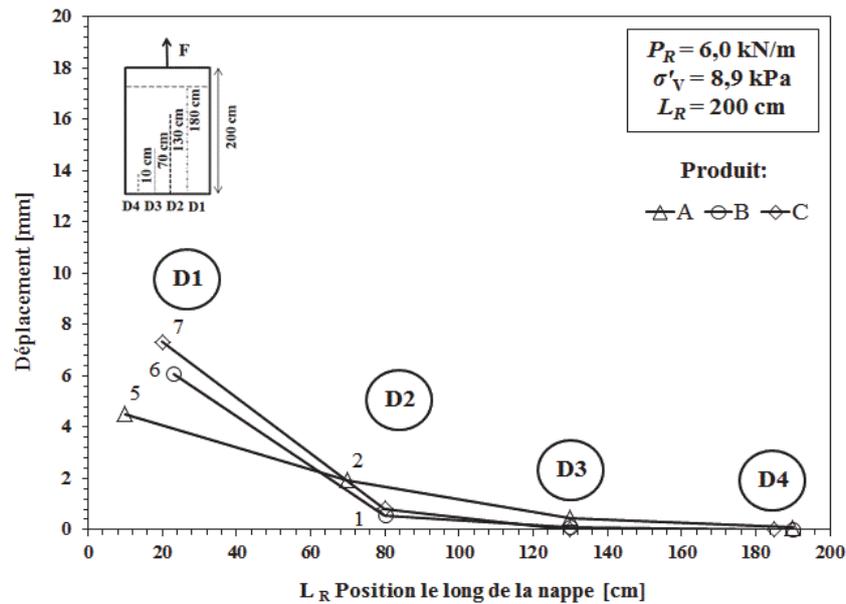


Figure 7. Exemple de distributions des déplacements le long de la nappe pour chacun des 3 produits pour un effort d'arrachement de $P_R = 6,0 \text{ kN/m}$, zone avant le pic.

À noter que la figure 5 montre l'évolution de l'effort au mors en fonction du déplacement du capteur de déplacement à fil le plus près du mors. Elle permet donc d'évaluer et de comparer les différents efforts maximum, mais ne permet pas d'analyser et de comparer les comportements des différents produits en effort/déplacement. C'est la raison pour laquelle la comparaison des comportements en ancrage est faite sur la base des mesures de déplacement réalisées le long de chaque nappe (figure 7).

4.3. Coefficient de frottement à l'interface

Le calcul de contrainte de cisaillement τ^{pic} s'effectue selon l'équation (1):

$$\tau^{pic} = \frac{P_R}{2 \cdot (L_R - D_{pic}) \cdot B} \quad (1)$$

Avec : P_R force maximale d'arrachement exercée lors du test,
 L_R longueur initiale de la nappe géosynthétique,
 D_{pic} déplacement mesuré en tête pour la force d'arrachement au pic,
 B largeur du produit.

Suivant la norme (XPG38064), il est possible d'évaluer le coefficient de frottement (ou ratio de frottement) de l'interface sol – géosynthétique $C_{i\phi/arrachement}$ enfoui dans le sol (équation 2).

$$C_{i\phi/arrachement} = \frac{\tan\phi_{sol/géosynthétique}}{\tan\phi'_{sol}} \quad (2)$$

avec : $\tan\phi_{sol/géosynthétique}$ coefficient obtenu lors d'un essai d'arrachement
 $\tan\phi'_{sol}$ coefficient obtenu lors d'un essai de cisaillement direct (l'équation 2)

Le tableau 3 présente la synthèse des résultats obtenus pour les tests d'ancrage matériau – géosynthétique, les essais étant effectués sous des contraintes normales comprises entre 5,0 kPa et 12,4 kPa.

Tableau 3. Caractéristiques de frottement interne de granulats en argile expansée et de l'interface granulats – géosynthétiques.

Produit	Largeur B (m)	Longueur L_R (m)	Angle de frottement interne φ'_{sol} (degré)	Coefficient de frottement $C_{iq/arrachement}$ (2) (angle de frottement apparent (degré))
A	1,0	2,0	38	0,79 (32°)
B	1,0	2,0	38	0,61 (26°)
C	1,0	2,0	38	0,73 (30°)

On notera que le coefficient $C_{iq/arrachement}$ obtenu pour le produit A (grille ouverte) est inférieur à la valeur attendue de 1. Ceci est vraisemblablement dû aux propriétés géométriques et granulométriques des billes d'argile qui ne favorisent pas leur blocage dans les mailles de la grille en raison de leur adaptabilité au roulement.

5. Conclusions

Des tests d'ancrage à grande échelle ont été réalisés pour trois produits géosynthétiques souples d'ouverture et de raideur différentes, sous trois surcharges, en utilisant le banc d'ancrage mis à disposition par Irstea. Les nappes géosynthétiques de dimensions 2 m x 1 m ont été placées entre deux couches d'agrégats légers d'argile expansée de 40 cm d'épaisseur. Elles sont instrumentées au moyen de capteurs de déplacement répartis sur la longueur de la nappe et d'un capteur de force en tête, un dispositif d'acquisition en continu enregistrant l'ensemble des données.

Les essais réalisés ont permis de montrer l'importance de l'adéquation de la taille des ouvertures de grille à la taille des agrégats légers d'argile expansée.

Un bon dimensionnement de la maille permet naturellement d'améliorer le coefficient d'interaction sol – géosynthétique. Mais il semble en outre que le composite constitué du géosynthétique avec les agrégats imbriqués permette de constituer une armature de raideur plus importante que le géosynthétique seul. Ceci a pour effet, avant le pic (état de service) de mobiliser l'ancrage sur une longueur plus importante que pour des géosynthétiques de maille plus fermée et donc de réduire la déformation de l'ancrage pour un effort d'arrachement donné.

Les écarts de raideur des produits testés ne semblent pas être suffisants pour montrer de différences de comportement significatives. Des essais complémentaires devront confirmer ces premiers résultats encourageants.

Il est à noter que ces résultats obtenus sur un matériau de granulométrie resserrée (10/20) ne sont pas nécessairement transposables à des sols classiques.

De manière plus générale, il convient de noter qu'aujourd'hui les normes permettent d'évaluer les paramètres des matériaux à la rupture (par exemple effort d'arrachement au pic, ou résiduel). Or l'étude ci-dessus montre combien l'analyse avant rupture peut fournir des informations utiles sur la conception des ouvrages en particulier sur l'approche de l'évaluation des déplacements.

6. Remerciements

Ce programme a pu être réalisé grâce au laboratoire Irstea, qui a mis à disposition le banc d'ancrage pour les essais. Les essais d'ancrage font partie du programme de recherche TeMaSi, dont l'objet est la mise au point d'un système constructif associant des tubes géosynthétiques et des agrégats légers d'argile expansée. Ce programme, labellisé EUREKA Σ!4572, associe quatre partenaires européens : Texinov et CNAM (France), Saint-Gobain Weber et SINTEF (Norvège) ; il est cofinancé par la Fondation Franco-Norvégienne et par Oséo.

7. Références bibliographiques

- Bakeer, R. M., Abdel-Rahman, A. H., Napolitano, P. J. (1998a). Geotextile friction mobilization during field pullout test. *Geotextiles and Geomembranes* 16 (2): 73-85.
- Bakeer R. M., Sayed S. M., Cates P., Subramanian R. (1998b). Pullout and shear tests on geogrid reinforced lightweight aggregate. *Geotextiles and Geomembranes* 16 (2): 119-133.

- Briançon L. (2001). Stabilité sur pentes des dispositifs géosynthétiques - Caractérisation du frottement aux interfaces et application. Université de Bordeaux I, Ph.D. Thesis, 200 pages.
- Dalwadi M., Doukala-Rigby C. (2012). The use of lightweight filling material and geogrids for the construction of a reinforced soil retaining structure over soft alluvium foundation soil in Wales, UK. Presented on the 5th European Geosynthetic Congress, Valencia, Spain. 5: 120 - 124
- Delmas P. (1979). Sols renforcés par Géotextiles. Premières études. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, Ph. D. Thesis, 202 pages.
- Forsman J., Slunga E. (1994). The interface friction and anchor capacity of synthetic georeinforcements. Presented on the 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products. Singapore. 1: 405 - 410
- Jenner C.G., Wills P.G., Karri S., Blundell L. (2008). Modular block faced, reinforced soil bridge wingwalls, utilising lightweight expanded clay fill. Presented on the XI Congresso Nacional de Geotecnica. Coimbra, Portugal. 6 pages
- Moraci N., Recalcati P. (2006). Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in compacted granular soil. *Geotextiles and Geomembranes* 24 (4): 220-242.
- Norme française NF EN13738 Géotextiles et produits apparentés aux géotextiles. Détermination de la résistance à l'arrachement du sol., AFNOR, 18 pages
- Palmeira E.M. (1987). The study of soil-reinforcement interaction by means of large scale laboratory tests. University of Oxford, Ph. D. Thesis, 237 pages.
- Palmeira E.M. (2009). Soil-geosynthetic interaction: Modelling and analysis. *Geotextiles and Geomembranes* 27 (5): 368-390.
- Watn A. (2001). Lightweight aggregate for civil engineering. Technical solutions, mechanical properties, certification and quality control. Presented on the *Brisk Events, New Technology Seminar*. Amersfoort, Netherlands. 20 pages
- Watn A. (2008). Expanded lightweight aggregates for geotechnical applications. Presented on the 11th Portuguese Geotechnical Society Meeting: Congresso Nacional de Geotecnica. April 2008. Coimbra, Portugal. 8 pages
- Wood J.R., Hova M.E. (2009). Characterization of LWA for geotechnical applications. Internal report from tests conducted on lightweight expanded clay aggregate at SINTEF (Norway). Trondheim, SINTEF.
- Norme française XP G 38 064 (Annexe D). Murs inclinés et talus raidis en sols renforcés par nappes géosynthétiques - Justification du dimensionnement et éléments de conception, 67 pages
- Yuan Z., Moore J.K., Swan R.H.J. (2002). Pullout resistance of geogrid in expanded clay lightweight aggregate Mmaterial. TRB Annual Meeting CD-ROM.