

ÉVALUATION DE L'INTERACTION SOL/GÉOGRILLE À LA BOÎTE DE CISAILEMENT ET PAR ESSAI D'EXTRACTION

ASSESSMENT OF SOIL/GEOGRID INTERACTION BY DIRECT SHEAR TEST AND PULL-OUT TEST

Guillaume STOLTZ¹, Bekoin Francis Guillaume TANO^{2,3}

1 Irstea UR RECOVER, Aix-en-Provence, France

2 Irstea UR HBAN, Antony, France

3 Ecogeos, Arras, France

RÉSUMÉ – Dans le cadre des extensions verticales des installations de stockage de déchets non dangereux, pour prévenir les déformations de la barrière de sécurité dues à un tassement localisé des anciens déchets sous-jacents, un géosynthétique de renforcement peut être utilisé. Ce géosynthétique a la principale fonction de résister à la traction. Pour que le produit remplisse sa fonction, il doit se mettre en tension, ce qui nécessite un transfert d'efforts entre le sol et le produit, principalement par cisaillement. L'évaluation de la résistance au cisaillement entre un sol et un géosynthétique de renforcement est donc primordiale pour le dimensionnement de ce type de produit. Cette étude propose cette évaluation en comparant des essais de cisaillement direct et d'extraction.

Mots-clés : Boîte de cisaillement, essai d'extraction, sol/géogrid, frottement, endommagement mécanique.

ABSTRACT – In the context of piggy-back landfill expansions, to prevent strains in the geosynthetics active barrier due to localised settlement, reinforcement geosynthetic can be used. The function of this product is to resist to tensile force. To do so, it must be put in tension which need load transfer between the soil and the product, mainly by shear stress. The assessment of the shear resistance between a soil and a reinforcement geosynthetic is thus essential to design this product. This study shows a comparison between direct shear tests and pull-out tests to assess soil/geogrid shear resistance.

Keywords: Shear box, pull out test, soil/geogrid, friction, mechanical damage.

1. Introduction

Les géosynthétiques de renforcement sont utilisés dans de nombreuses applications telles que des murs en sol (renforcé), des renforcements sur inclusions rigides ou sur cavités potentielles, etc. Dans le cadre des extensions verticales des installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND), pour prévenir les déformations de la barrière de sécurité due à un tassement localisé des anciens déchets sous-jacents, un géosynthétique de renforcement peut être utilisé (Abdelouhab et Tankéré, 2016 ; Tano, 2016) . Ce géosynthétique a la principale fonction de résister à la traction. Ce type d'application pour un tel produit est connu depuis de nombreuses années dans le cas des renforcements sous cavités potentielles (par exemple sous des ouvrages en remblais, etc.). De nombreuses études se sont intéressées au mécanisme d'effet membrane, dont la mise en équation permet notamment de dimensionner ces produits par méthode analytique.

Pour que le géosynthétique de renforcement remplisse sa fonction, il doit se mettre en tension, ce qui nécessite un transfert d'efforts entre le sol et le produit, principalement par cisaillement. L'évaluation de la résistance au cisaillement entre un sol et un géosynthétique de renforcement est donc primordiale pour le dimensionnement de ce type de produit. Pour ce faire, il existe deux types d'essais : un essai à la boîte de cisaillement direct et un essai d'extraction. Le choix du type d'essai le plus adapté dépend du type de rupture potentielle dans l'ouvrage renforcé. Par exemple, pour un mur en sol renforcé par géosynthétiques, les deux types d'essais ont leur intérêt en fonction de la ligne de rupture envisagée (principalement le long d'une interface sol/géosynthétique ou principalement perpendiculaire aux interfaces sol/géosynthétique). Dans le contexte d'une extension d'ISDND et d'un effondrement localisé dans les déchets de l'ancien casier, il n'est pas évident de répondre à cette question sans connaître précisément la cinématique entre le sol et le géosynthétique de renforcement qui peut être hétérogène le long de l'interface (Fig.1). L'objectif de cette étude n'est pas de répondre directement à cette question mais de comparer les résultats obtenus par des essais à la boîte de cisaillement direct et par des essais

d'extraction. Dans le cadre de cette étude, le sol utilisé est un sable sec et le géosynthétique de renforcement est une géogrille tissée.

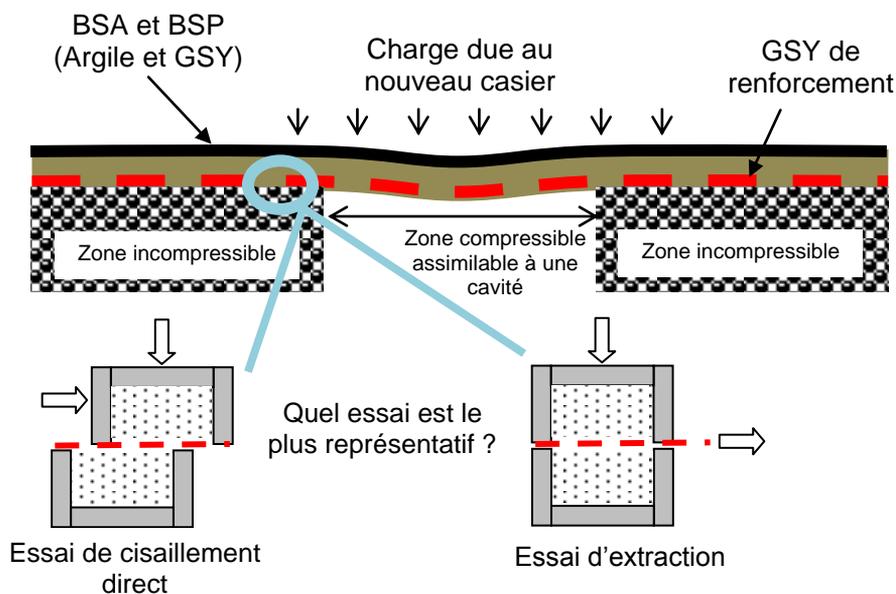


Figure 1. Représentation schématique d'un dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG) d'extension d'ISDND sujet à un effondrement localisé et question posée concernant l'essai le plus représentatif pour mesurer la résistance sol/géosynthétique de renforcement.

2. État de l'art

2.1 Mécanismes d'interaction entre un sol et un géosynthétique de renforcement

Les mécanismes d'interaction entre un sol et un géosynthétique de renforcement sont fondamentaux car ils permettent aux produits de renforcement de se mettre en tension et ainsi reprendre des efforts conférés par l'ouvrage. De manière théorique, un produit ayant une importante résistance à la traction unidirectionnelle (par exemple 100 kN/m) mais un coefficient d'interaction avec le sol quasi-nul (par exemple des câbles polyester reliés entre eux par de simples « fils de couture en coton ») ne saurait remplir sa fonction de renforcement dans un sol.

Les mécanismes d'interaction sol/géosynthétiques dépendent du produit géosynthétique (continu ou à mailles ouvertes) :

- dans le cas des géosynthétiques à nappe continue (des géotextiles de façon générale), le seul mécanisme d'interaction est le frottement entre le sol et le produit ;
- dans le cas des géogrilles à maille ouverte, selon Jewell et al. (1985), trois mécanismes élémentaires sont identifiés (Fig. 2) : le frottement entre le sol et la surface solide de la géogrille, le frottement sol/sol dans les ouvertures de la grille et la résistance passive du sol vis-à-vis des éléments transversaux (par rapport au sens d'extraction de façon générale). Selon le rapport de taille entre la géogrille et la largeur de la boîte, un quatrième mécanisme de dilatance empêchée peut également survenir (Alfaro et al., 1995). Ce phénomène semble être plus identifié comme un effet 3D qu'un mécanisme élémentaire (Moraci et al., 2016). Ce comportement complexe est généralement simplifié en faisant intervenir une résistance au cisaillement globale de l'interface sans distinction des quatre mécanismes élémentaires.

Pour mesurer la résistance au cisaillement d'une interface sol/géosynthétique de renforcement, deux types d'essais de laboratoire existent : essai à la « boîte de cisaillement direct » et essai « d'extraction ».

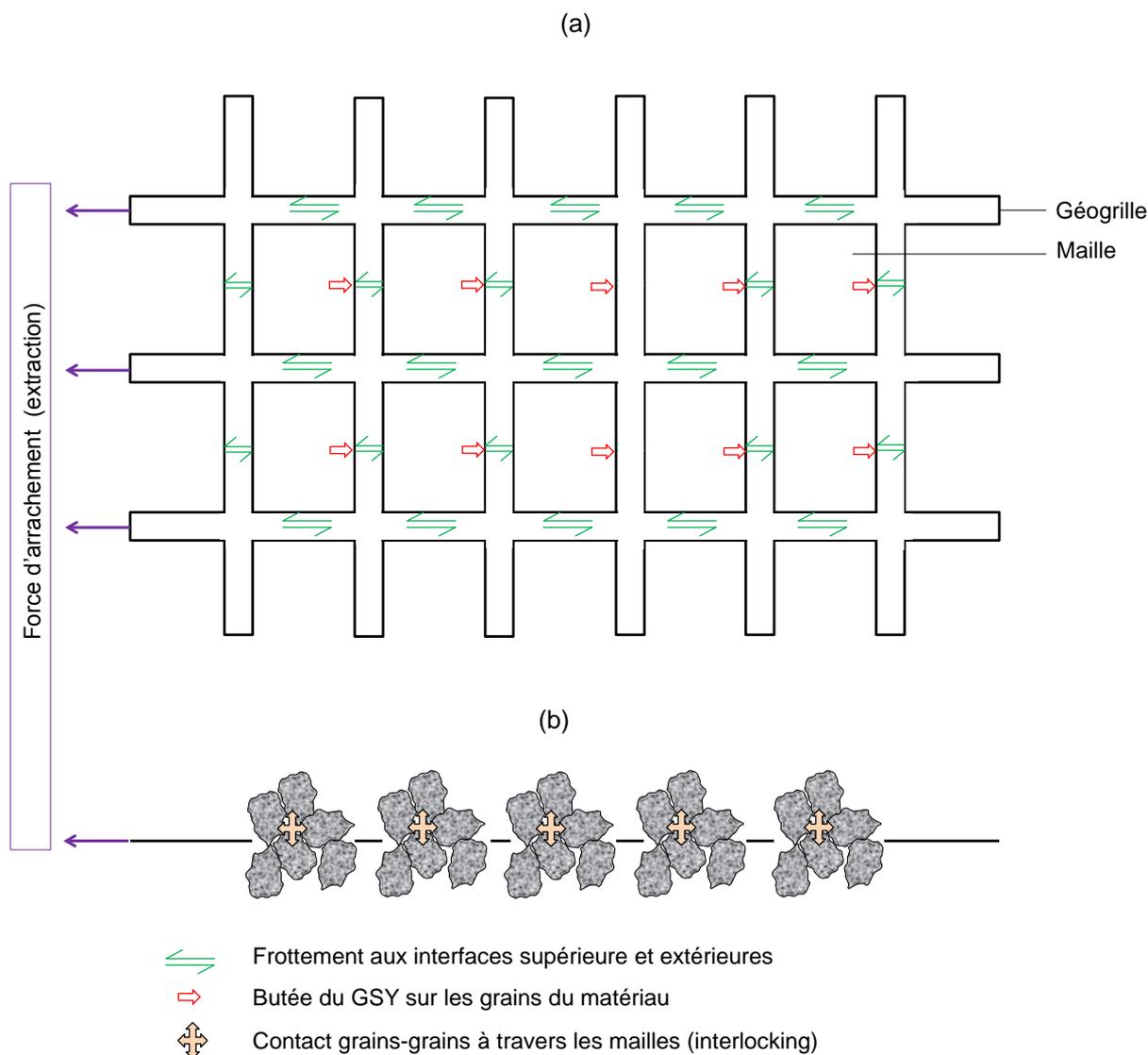


Figure 2. Mécanismes intervenant dans le comportement du contact entre une géogrille et un matériau granulaire (a) vue en plan (b) vue en coupe (Tano, 2016).

2.2 Mécanismes mobilisés dans l'essai à la « boîte de cisaillement »

Cet essai consiste à faire déplacer un boîtier supérieur rempli de sol au-dessus d'une géogrille qui est quasiment statique car ancrée. Selon Jewell et al. (1985), seuls les mécanismes élémentaires (i) frottement entre le sol et la surface solide de la géogrille et (ii) le frottement sol/sol dans les ouvertures de la grille participent à la résistance au cisaillement de l'interface. Cependant, Liu et al. (2009b) ont montré que le troisième mécanisme élémentaire (iii) « résistance passive du sol vis-à-vis des éléments transversaux » pouvait participer à la résistance au cisaillement mais pour des larges déplacements. Cela a été confirmé par Stoltz et Auray (2014) à la suite d'une campagne d'essais de frottement sable/géogrille à la boîte de cisaillement et à l'aide d'un plan incliné.

Il existe la norme NF EN ISO 12 957-1 qui permet d'évaluer la résistance au cisaillement d'une interface sol/géogrille selon plusieurs possibilités : avec la géogrille « fixée » sur un support rigide (par collage ou au moyen d'un support de frottement normalisé, par exemple une plaque abrasive en oxyde d'aluminium, type P80). Cependant, pour que le troisième mécanisme élémentaire participe à la résistance au cisaillement de l'interface (cf. ci-dessus), la géogrille doit être libre de se mettre en traction, ce qui est en contradiction avec l'obligation de la fixer sur son support. Pour les géogrilles à ouvertures larges (supérieures à 15 mm) et à pourcentage élevé d'ouvertures (supérieur à 50 % de la surface totale de l'éprouvette), une possibilité que permet la norme est d'utiliser le sable comme support en remplissant la partie inférieure avec du sable, à la masse volumique spécifiée. Liu et al. (2009a) ont montré que cette option était la mieux appropriée.

2.3 Mécanismes mobilisés dans l'essai « d'extraction »

Cet essai consiste à extraire une géogridle d'un boîtier supérieur rempli de sol tout en mesurant le déplacement de la géogridle dans le sol et la force d'extraction. Comme il l'a été présenté au § 2.1, les trois mécanismes élémentaires d'interaction sol/géogridle participent à la résistance au cisaillement de l'interface.

Il existe la norme NF EN 13 738 qui permet de déterminer la résistance à l'arrachement d'un géosynthétique dans un sol, confiné à une contrainte jusqu'à 100 KPa. Moraci et al. (2016) ont réalisé une étude bibliographique poussée sur les essais d'arrachement de géosynthétique de renforcement dans un sol et ont montré que de nombreux facteurs pouvaient influencer la résistance au cisaillement de l'interface sol/géosynthétique. Ces facteurs concernent :

- le dispositif de mesure : système d'application du chargement vertical, effet de bord sur la face avant de la boîte, frottement entre les parois latérales de la boîte et le sol, dimension de la boîte, système de mors ;
- la procédure d'essai : la vitesse d'extraction, le compactage du sol, le mode d'application de la contrainte verticale, l'instrumentation ;
- le sol : nature, granulométrie, compactage, résistance au cisaillement ;
- le géosynthétique : type de renforcement, taille, raideur, géométrie et structure.

Moraci et al. (2016) ont donné plusieurs recommandations à respecter pour le dispositif utilisé de façon à obtenir des essais représentatifs, les moins possible affectés d'effets de bords. Cependant, toutes ces préconisations imposent des dispositifs de mesure lourds à mettre en œuvre. Certains auteurs comme Ziegler (2016) travaillent avec des dispositifs de plus petites dimensions (par exemple 30 x 40 cm pour le dispositif de Ziegler, 2016) de façon à pouvoir conduire un grand nombre d'essais et étudier l'influence de plusieurs paramètres (par exemple, l'effet des éléments transversaux d'une géogridle).

3. Matériels et méthode

3.1 Dispositif de cisaillement et d'extraction

La boîte de cisaillement direct utilisée est un dispositif situé à Irstea Aix-en-Provence de dimension 30 cm x 30cm permettant de réaliser des essais selon la norme NF EN ISO 12957-1. Ce dispositif permet d'appliquer des contraintes de confinement à plus de 300 kPa. Tous les essais de cette étude ont été réalisés à une vitesse de déplacement de 1 mm/min jusqu'à un déplacement maximal de 50 mm.

Que ce soit pour des essais de cisaillement sur sable ou des essais de cisaillement entre un sable et un géosynthétique, la surface de cisaillement est constante.



Figure 3. Dispositif d'essais en configuration « essai de cisaillement direct » (photo de gauche) et en configuration « essai d'extraction » (photo de droite).

Cette boîte de cisaillement a été adaptée de façon à réaliser des essais d'extraction à haute contrainte de confinement (au moins 150 kPa). Dans cette configuration, le boîtier a les mêmes dimensions 300 mm x 300 mm que celui utilisé pour les essais de cisaillement direct. Pour extraire le produit de renforcement testé dans cette étude (voir 3.3), il a été choisi d'attacher directement le produit au vérin horizontal sans passer par un mors intermédiaire qui fragilise le produit pouvant donc conduire une rupture prématurée (Fig. 3).

L'essai consiste à imposer un déplacement à la vitesse constante de 1 mm/min afin d'extraire le géosynthétique du massif de sol confiné par une contrainte normale de 50, 100 ou 150 kPa tout en mesurant la force d'extraction. La boîte a une ouverture des deux côtés et, le produit dépassant du boîtier côté aval, la surface de cisaillement est considérée comme constante dans cet essai. Le produit n'ayant pas été instrumenté par des capteurs de déplacement à fil, seul le déplacement horizontal (en x) du vérin est mesuré (valeur maximale de déplacement de 80 mm). Pour l'interprétation des mesures, il sera donc nécessaire de tenir compte de la déformation du produit de renforcement non confiné, c'est-à-dire à l'extérieur du boîtier.

3.2 Sol testé

Le sol testé dans cette étude est un sable siliceux sec extrait de la carrière d'Hostun et ayant une granulométrie resserrée avec des tailles de grains comprises entre 0,6 et 1,6 mm. Un essai de cisaillement direct avec le dispositif présenté ci-dessus a été réalisé sur ce sable pour des contraintes de confinement 50, 100 et 150 kPa. Le sable est mis en place sec et sans compactage avec une densité d'environ 1,4 dans les essais de cisaillement direct et d'extraction.

3.3 Géosynthétiques

Le géosynthétique de renforcement testé dans cette étude est une géogrille en PVA tricotée de 100 kN/m de résistance à la rupture (Fig. 4). La géogrille est à mailles ouvertes avec deux tailles de mailles : un réseau de mailles primaires de dimensions d'environ 31 mm x 19 mm formé par l'intersection des câbles longitudinaux (sens production) et des éléments transversaux et un réseau de mailles secondaires de dimensions d'environ 19 mm x 2 mm (Fig. 5).

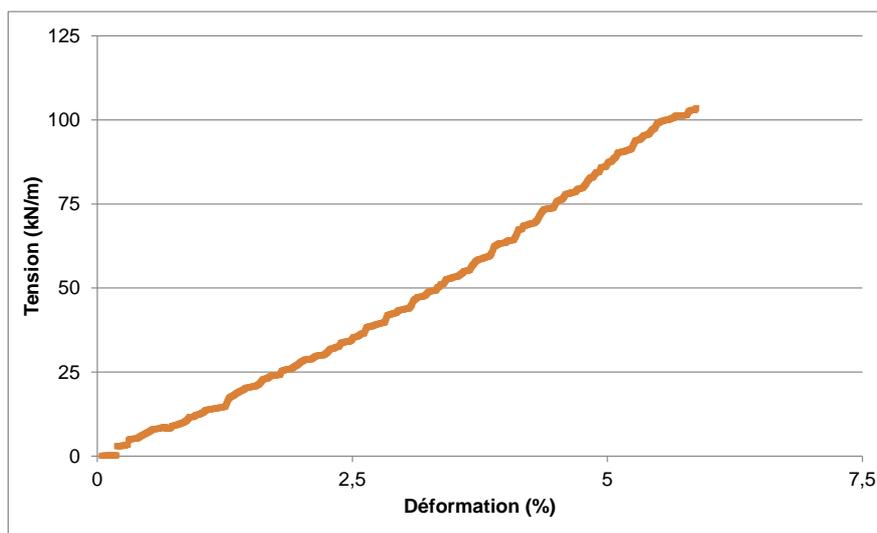


Figure 4. Courbe de résistance à la traction de la géogrille testée.

Lors des essais de cisaillement direct sur l'interface sol/géogrille, il a été choisi de faire reposer la géogrille directement sur le sable et non pas sur un support de frottement normalisé (cf §2.2). Afin d'avoir une couche « fixe » par rapport à son support, une structure mono filamentaire 3D a été mise en contact avec le support inférieur rigide. Cette structure mono filamentaire 3D permet d'avoir une couche de sable d'environ 3 mm d'épaisseur en dessous de la géogrille testée (Fig. 5). Un essai de cisaillement direct sur l'interface structure mono filamentaire 3D / sable (sans géogrille) a été tout de même effectué.



Figure 5. Dans la boîte de cisaillement, mise en place de l'interface inférieure géogrille/sable avec le sable inclus dans la structure filamentaire 3D (photo de gauche) et mise en place de l'interface supérieure géogrille/sable (photo de droite).

4. Résultats

4.1 Essais de cisaillement direct

La figure 6 présente les courbes de cisaillement direct sur sable, sur l'interface structure mono-filamentaire 3D / sable et sur l'interface structure mono-filamentaire 3D / géogrille / sable pour les contraintes de confinement 50, 100 et 150 kPa.

La première analyse consiste à comparer les courbes de cisaillement sur sable avec celles sur l'interface structure mono-filamentaire 3D / sable. L'intérêt de la structure mono-filamentaire 3D, fixée par ancrage sur le support de la boîte était d'obtenir, pour une même contrainte de confinement, une résistance au cisaillement comparable à celle du sable. Les résultats montrent que ce n'est pas obtenu pour tout l'intervalle compris entre 5 et 50 mm. Pour de larges déplacements (50 mm), la résistance au cisaillement de cette interface se rapproche de celle du sable mais restent inférieure de 5 à 15%.

Lorsque la géogrille étudiée est ajoutée au-dessus de la structure mono-filamentaire 3D (Fig. 5), les courbes de cisaillement indiquent un accroissement de la résistance au cisaillement par rapport au cas sans géogrille. Lors de la fin de l'essai, il est observé visuellement que les câbles se sont mis en tension ce qui permet de conclure que l'accroissement de résistance s'explique par le transfert de charge entre le sable et le produit. Selon les mécanismes décrits au § 2.2, ce transfert de charge provient de la résistance passive du sol vis-à-vis des éléments transversaux, bien que seule la couche de sable supérieure soit mobile. Cependant, cette mobilisation de transfert de charge se produit sur de relativement grands déplacements (sur un intervalle d'environ 30 mm de déplacement pour la contrainte de confinement la plus forte de 150 kPa).

En fin d'essai de cisaillement direct, il n'a pas été observé d'endommagement sur les produits après démontage comme le montre la figure 7 (pour la contrainte de confinement la plus forte de 150 kPa).

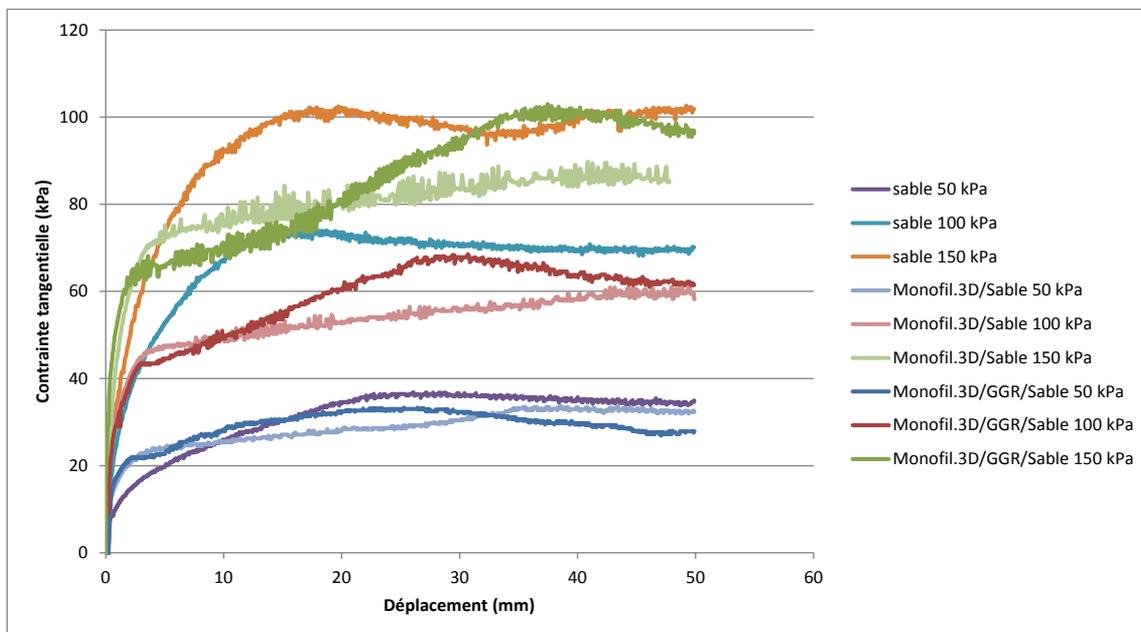


Figure 6. Courbes de cisaillement direct sur sable, sur l'interface structure mono-filamentaire 3D / sable et sur l'interface structure mono-filamentaire 3D / géogrille / sable pour les contraintes de confinement 50, 100 et 150 kPa.

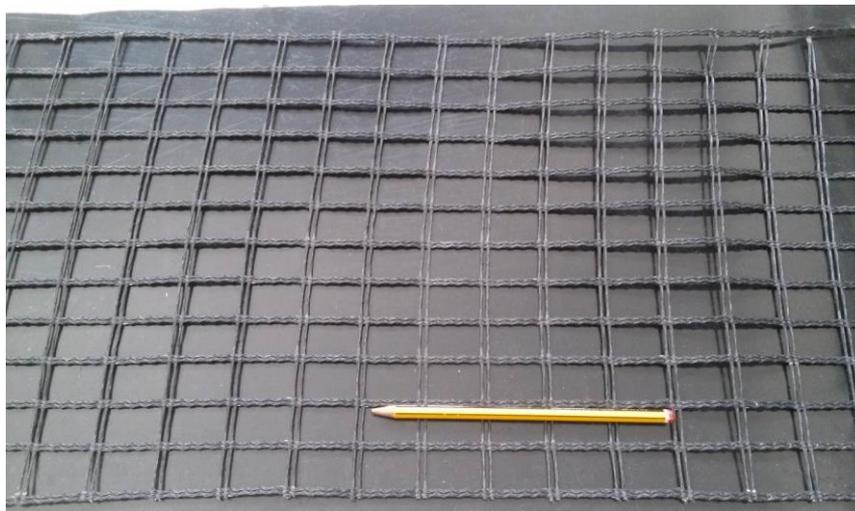


Figure 7. Photographie de la géogrille après cisaillement direct sur l'interface structure mono-filamentaire 3D / géogrille / sable pour la contrainte de confinement 150 kPa.

4.2 Essais d'extraction

Les courbes d'extraction de la géogrille du sable sont présentées à la figure 8 et comparées aux courbes de cisaillement direct sur l'interface structure mono-filamentaire 3D / géogrille / sable. Pour les courbes d'extraction, la contrainte tangentielle est calculée en divisant la force extraction par le double de la surface du boîtier (soit $2 \times 30 \times 30 \text{ cm}^2$) dans la mesure où les deux surfaces en contact avec le sable (sous-jacente et sus-jacente à la géogrille) sont en conditions cinématiques. Il est rappelé ici que le seul déplacement mesuré dans l'essai d'extraction est le déplacement horizontal du vérin, ce qui implique que la première partie des courbes d'extraction (Fig. 8) correspond à une mise en tension de la géogrille hors de sa zone de confinement. Pour les essais effectués, le déplacement relatif entre la géogrille et le sol n'est pas mesuré. Des courbes d'extraction (Fig. 8), il est peut être grossièrement estimé que la géogrille commence à se déplacer dans le sol à partir d'un déplacement en x du vérin d'environ 10 mm.

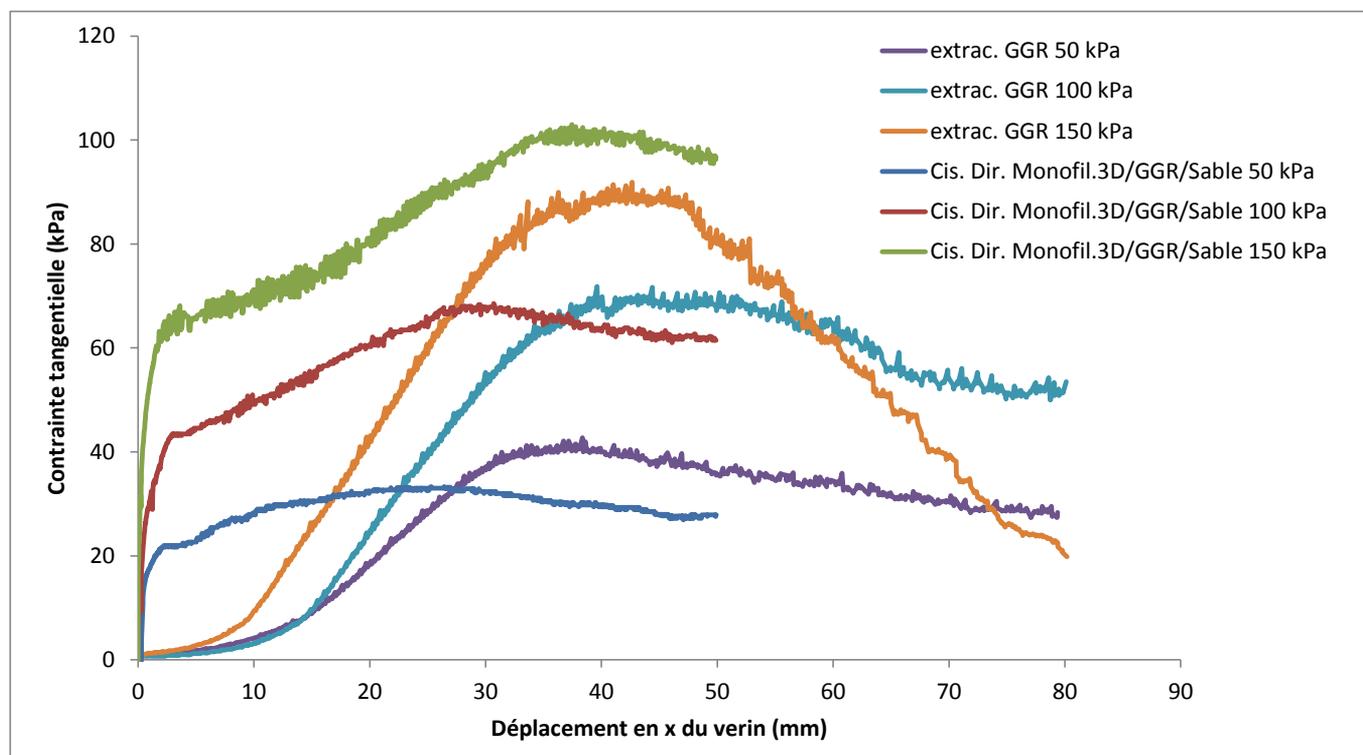


Figure 8. Courbes d'extraction de la géogridle du sable et courbes de cisaillement direct sur l'interface structure mono-filamentaire 3D / géogridle / sable pour les contraintes de confinement 50, 100 et 150 kPa.

Durant la première phase d'extraction (de 10 à environ 35 mm de déplacement), il est observé une augmentation progressive de la contrainte de cisaillement tangentielle avec un module de cisaillement d'interface nettement différent de celui obtenu à partir des essais de cisaillement direct sur l'interface structure mono-filamentaire 3D / géogridle / sable. Concernant les valeurs maximales obtenues, quel que soit le type d'essai (cisaillement direct ou extraction), elles sont assez proches pour les contraintes de confinement de 50 et 100 kPa et pour des grands déplacements (environ supérieurs à 35 mm pour l'essai d'extraction). Cependant, la courbe d'extraction à 150 kPa affiche une valeur maximale de la contrainte tangentielle d'environ 10% de moins (par rapport à celle obtenue par l'essai de cisaillement direct) et affiche surtout une forte diminution de la contrainte tangentielle d'environ 90 à 20 kPa pour des déplacements de 40 à 80 mm.

En fin d'essai, l'analyse de la géogridle ne montre pas de signe spécifique d'endommagement pour la plus faible contrainte de confinement (Fig. 9 à gauche). Cependant, à 100 kPa, des ruptures au niveau des éléments transversaux commencent à être observées (Fig. 9 à droite) ce qui explique vraisemblablement la diminution de la contrainte tangentielle observée après 50 mm de déplacement. Enfin, pour la plus forte contrainte de confinement de 150 kPa, l'analyse du produit indique de multiples ruptures à la fois des éléments transversaux et des éléments longitudinaux de la géogridle (Fig. 10). Pour cette contrainte de confinement de 150 kPa, la force d'extraction maximale mesurée est d'environ 50,5 kN/m, à comparer avec la résistance à la traction unidirectionnelle supérieure à 100 kN/m (Fig. 4). Compte tenu de cette comparaison et de la forme des endommagements observés (Fig. 10), il est probable que le mode de rupture du produit soit plus complexe qu'une simple rupture par traction unidirectionnelle. En considérant les endommagements observés pour la contrainte de confinement de 100 kPa, il peut être supposé que la rupture s'initie au niveau des éléments transversaux et que les câbles longitudinaux sont endommagés par frottement et abrasion à la fois par les grains et par les câbles transversaux. La description complète de ce mode de rupture observé pour les fortes contraintes de confinement (à partir de 100 kPa) reste à explorer.

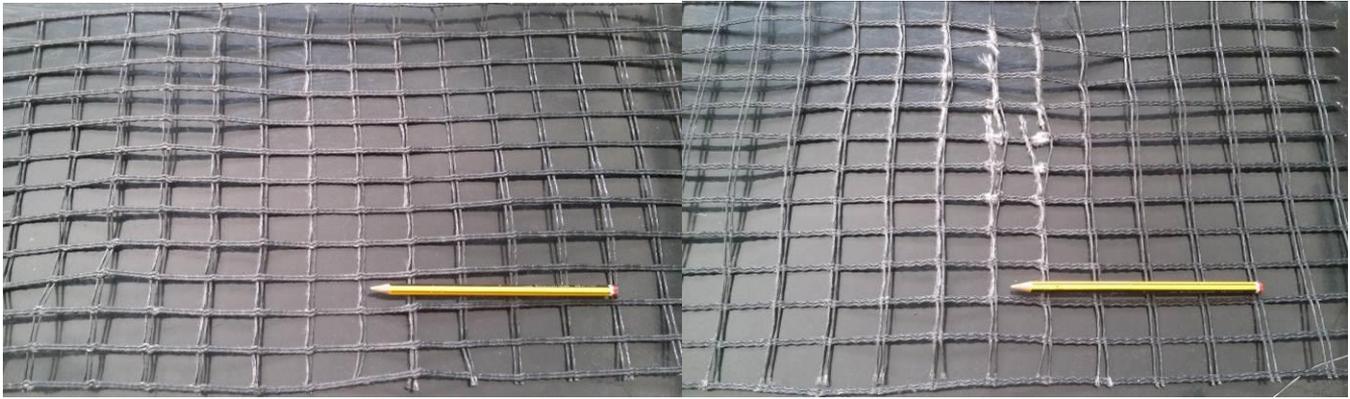


Figure 9. Photographie de la géogrille après essai d'extraction pour la contrainte de confinement 50 kPa (photo de gauche) et 100 kPa (photo de droite).



Figure 10. Photographie de la géogrille après essai d'extraction pour la contrainte de confinement 150 kPa.

5. Conclusion

L'objectif de cette étude était de comparer l'évaluation de la résistance au cisaillement à forte contrainte de confinement d'une interface sable/géogrille tissée à maille ouverte en utilisant deux types d'essais : un essai de type cisaillement direct et un essai de type extraction.

Il a été montré que, pour les deux types d'essais, les mécanismes de transferts de charges sont mobilisés, notamment la résistance passive du sol vis-à-vis des éléments transversaux. Cependant, la mobilisation du transfert de charge se fait de façon progressive et pour de relativement grands déplacements (10% de la surface de l'éprouvette) dans les deux types d'essais. Pour les deux types d'essais, pour les contraintes de confinement de 50 et 100 kPa, la résistance au cisaillement maximale mesurée est proche (15% d'écart pour la contrainte de 50 kPa). En revanche, le module de cisaillement d'interface est nettement différent pour les deux types d'essais.

Enfin, il a été observé qu'à forte contrainte de confinement (i.e. 150 kPa), l'essai d'extraction conduit à de multiples ruptures à la fois d'éléments transversaux et d'éléments longitudinaux de la géogrille, ce qui n'est à l'inverse pas observé lors de l'essai de cisaillement direct.

Cette étude montre que, dans le cas d'utilisation d'un produit de renforcement fortement confiné (comme c'est le cas pour le fond des extensions d'ISDND), en plus de caractériser la résistance au cisaillement ainsi que le module de cisaillement d'interface, il est essentiel de vérifier l'absence d'endommagement du produit lorsque l'interface est cisailée. Cette conclusion peut s'appliquer dans d'autres applications que celui du fond des extensions d'ISDND comme par exemple le renforcement par géosynthétiques d'un ouvrage sur inclusions rigides.

Dans le cadre des perspectives de cette étude, il est prévu d'apporter au dispositif existant une instrumentation complémentaire pour mesurer précisément les déplacements relatifs d'interface ainsi que les déformations des produits géosynthétiques.

6. Remerciements

Les auteurs remercient Côme Brossolet (Irstea), Clément Bruneau (Irstea), Faustine Byron (Irstea), Naïm Chaouch (Irstea), Yves Grémeaux (Irstea) et Philippe Maillat (IFTH) pour l'aide apportée pour la réalisation des essais présentés dans cette communication.

7. Références

- Abdelouhab A., Tankéré M. (2016). Design methods of geosynthetic reinforcements for the extension of old landfill, Eurogeo 6.
- Alfaro M.C., Miura N., Bergado D.T. (1995). Soil-geogrid reinforcement interaction by pullout and direct shear tests. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 18, No. 2, June 1995, pp. 157-167.
- Jewell R.A., Milligan G.W.E., Sarsby R.W., Dubois D. (1985). Interaction between soil and geogrids, in: Telford, T. (Ed.), Symposium on Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering, pp. 18-30.
- Liu C.-N., Ho Y.-H., Huang J.-W. (2009a). Large scale direct shear tests of soil/PET-yarn geogrid interfaces. Geotextiles and Geomembranes 27, 19-30.
- Liu C.-N., Zornberg J.G., Chen T.-C., Ho Y.-H., Lin B.-H. (2009b). Behavior of geogrid and interface in direct shear mode. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 135, 1863-1871.
- Moraci N., Cardile G., Pisano M., Carrubba P. (2016). Geosynthetics interface properties under static, cyclic or dynamic Loads. Eurogeo 6.
- Stoltz G. Auray G. (2014). Comparison of various testing methods for soil-geogrid friction parameters estimation to stabilise a thin soil layer on slopes, 10th ICG.
- Tano B.F.G. (2016). Étude analytique, numérique et expérimentale du comportement mécanique des systèmes géosynthétiques : application au cas des barrières de sécurité des extensions d'ISDND. Thèse de l'Université Grenoble Alpes.
- Ziegler M. (2016). Geosynthetic reinforcement applications. Eurogeo 6.