

ÉVALUATION DE L'EFFICACITÉ DES GÉOSYNTHÉTIQUES DE PROTECTION CONTRE LE POINÇONNEMENT DES GÉOMEMBRANES

ASSESSMENT OF PROTECTIVE GEOTEXTILES EFFICIENCY VERSUS GEOMEMBRANES PUNCTURING

Guillaume STOLTZ¹, Véronique HEIL²

1 UMR RECOVER, INRAE, Aix-Marseille Univ., Aix-en-Provence, France

2 Cerema Direction territoriale Est, Nancy, France

RÉSUMÉ – Cet article présente les résultats d'une étude expérimentale menée par le groupe de travail « poinçonnement » du Comité Français des Géosynthétiques. L'étude a consisté à évaluer l'efficacité de géotextiles de protection vis-à-vis des endommagements par poinçonnement d'une géomembrane PEHD utilisée en fond d'installation de stockage de déchets non dangereux, dans la configuration classique des casiers de stockage réalisés en France. Sur la base d'un essai de performance nouveau, 16 géotextiles de protection ont été testés. Pour chaque géotextile testé, les résultats des essais de performance ont ensuite été mis en correspondance avec les caractéristiques index physiques (masse surfacique) et mécaniques (résistance au poinçonnement et efficacité de protection) des produits.

Mots-clés : géomembrane, géotextile, protection, endommagement, poinçonnement.

ABSTRACT – This article presents the results of an experimental study conducted by the working group “puncture action” of the French Committee of Geosynthetics. The study consisted of evaluating the effectiveness of protective geotextiles with respect to damage by puncturing actions of an HDPE geomembrane used at the bottom of a non-hazardous waste disposal facility, in the typical configuration of a landfill cell in France. On the basis of a new performance test, 16 protective geotextiles were tested. For each geotextile tested, the results of the performance tests were then analysed regarding the physical (mass per unit area) and mechanical (puncture resistance and protection efficiency) index characteristics of the products.

Keywords: geomembrane, geotextile, protection, damage, puncturing action.

1. Introduction

Les dispositifs d'étanchéité et de drainage par géomembrane (DEDG) sont des systèmes complexes associant des couches de matériaux granulaires et des géosynthétiques qui permettent de combiner une fonction de drainage et une fonction d'étanchéité. Les DEDG constituent la barrière de sécurité active en fond de casier d'Installations de Stockage de Déchets (ISD) non dangereux. Un défaut d'étanchéité est préjudiciable pour l'ouvrage et peut entraîner des conséquences graves pour l'environnement et par répercussion sur la santé des personnes. La barrière de sécurité active en fond de casier d'ISD est généralement constituée d'une géomembrane en PEHD, surmontée par une couche de drainage granulaire. Pendant toute la durée d'exploitation du casier, une contrainte mécanique dans le sens de la gravité, correspondant au poids de la colonne de déchets, s'applique sur la géomembrane. Cette contrainte induit des sollicitations de poinçonnement des matériaux granulaires sur la géomembrane, ce qui peut provoquer des ruptures localisées de l'étanchéité. Pour protéger la géomembrane vis-à-vis des sollicitations de poinçonnement induites par les matériaux granulaires, un géotextile de protection peut être utilisé, la fonction du géotextile étant la « protection ». Ce géotextile est généralement un produit non-tissé aiguilleté mais plusieurs paramètres physiques différencient les produits : nature, diamètre et longueur des fibres, épaisseur et masse surfacique de la nappe. De plus, selon les fabricants, différents modes d'aiguilletage et plus généralement de modes de fabrication (incluant par exemple l'application ou non d'un calandrage au produit) peuvent entraîner des caractéristiques mécaniques différentes pour des produits de même masse surfacique. Ainsi, pour dimensionner un géosynthétique dans le cadre de sa fonction protection, la seule propriété de masse surfacique n'est pas suffisante.

Plusieurs auteurs ont proposé des méthodes de dimensionnement des géotextiles pour protéger les géomembranes en PEHD utilisées en fond d'ISD. Ces méthodes sont de nature analytique empirique

(Koerner et al., 1996) ou bien uniquement basées sur des expérimentations (Shercliffe, 1998). Lorsque ces différentes méthodes sont comparées entre elles, il apparaît qu'elles conduisent à des dimensionnements très différents avec, par exemple, une variation de masse surfacique de plus de 2000 g/m² si l'on se base sur les méthodes de Koerner et al. (1996) et Shercliffe (1998) dans des mêmes conditions d'application. Ces différences significatives proviennent d'approches et d'hypothèses différentes comme l'indique la méthode de Shercliffe (1998) où aucune déformation de la géomembrane PEHD n'est tolérée à la différence de la méthode de Koerner et al. (1996) qui repose sur un dimensionnement à l'état limite de rupture (de la géomembrane). À ce jour, en France, en l'absence de méthode unanimement reconnue, les dimensionnements se basent sur un savoir-faire propre au concepteur, généralement issu du retour d'expérience (planches d'essais, etc.).

Le présent article n'a pas pour objectif de proposer une méthode de dimensionnement, mais présente un nouvel essai de performance, développé pour évaluer l'efficacité de protection d'un géosynthétique vis-à-vis des endommagements par poinçonnement d'une géomembrane PEHD utilisée en fond d'ISD, surmontée par une couche granulaire. À la différence de l'essai de performance défini selon l'annexe B de la norme NF EN 13719 (Afnor, 2016), l'essai de performance développé pour cette étude ne requiert pas l'usage d'une plaque de plomb entre la géomembrane et le géotextile de protection pour déterminer après démontage les déformations. L'impact d'une telle plaque de plomb, en termes d'apport d'effet protecteur, est difficilement quantifiable, c'est pourquoi l'essai de performance défini selon l'annexe B de la norme NF EN 13719 n'a pas été utilisé dans cette étude. L'essai de performance développé consiste ainsi à mesurer directement les endommagements par poinçonnement sur l'éprouvette de géomembrane qui a été soumise à essai. Après une campagne d'essai de performance sur seize produits de protection, préalablement caractérisés par leurs propriétés physiques et mécaniques, la mise en relation des caractéristiques index et de performance constitue pour l'ingénieur une base pour dimensionner les produits sur la base de leur caractéristiques index.

2. Matériels et méthodes

2.1. Principe de l'essai de performance

L'essai de performance qui a été développé dans cette étude consiste à simuler le plus fidèlement possible les contraintes mécaniques subies par une géomembrane PEHD en fond de casier d'ISD. Le schéma de principe de l'essai est représenté sur la Figure 1. Sur le support d'une presse de compression de haute capacité (d'au moins 10 tonnes), une éprouvette cylindrique de géomembrane (diamètre 50 cm) est positionnée au-dessus d'un support en caoutchouc (élastomère) dense d'une épaisseur de 25 mm et d'une dureté Shore A de 50. Ce type d'élastomère est utilisé dans la norme « détermination de l'efficacité de protection » NF EN 13719 (Afnor, 2016). Il a été montré dans une étude spécifique que ce type de support élastomère était le plus adapté pour simuler une couche d'argile compactée représentative de celles réalisées en tant que barrière passive en fond de casier d'ISD (Aufrère et al., 2009). L'éprouvette de géosynthétique de protection à tester, de même forme et dimension que l'éprouvette de géomembrane, est positionnée au-dessus de cette dernière. Enfin, une couche granulaire de 30 cm d'épaisseur est mise en place au-dessus des éprouvettes de géosynthétiques de protection et de géomembrane. Cette couche granulaire est confinée dans une structure grillagée souple, de telle sorte que la dimension des mailles de cette structure grillage évite la perte de granulats sur les côtés. L'avantage d'une telle structure souple est qu'elle ne repose pas de façon rigide sur le support inférieur de la presse, ce qui évite, comme ce serait le cas dans le cas d'un cylindre rigide, une « perte d'efforts normaux » par frottement latéral des granulats sur les parois de la cellule. Ainsi, dans le cas du présent dispositif de la Figure 1, l'ensemble de la charge normale appliquée par un vérin appuyant sur une plaque métallique cylindrique (de 50 cm de diamètre), est transmise intégralement sous forme de contrainte normale à la couche granulaire et donc aux géosynthétiques testés. Une fois l'ensemble du dispositif monté et la compression lancée, cette dernière est maintenue durant un temps préalablement défini. À l'issue du temps écoulé, la compression normale est arrêtée et les géosynthétiques sont retirés du dispositif de compression en vue de mesurer les endommagements par poinçonnement directement sur la géomembrane. En conclusion, pour cet essai de performance, il faut définir le granulat à tester (en plus de la géomembrane et du géosynthétique de protection), ainsi que 2 paramètres expérimentaux : contrainte normale et temps d'application de la contrainte. L'essai se déroule à la température du laboratoire, soit en moyenne de 21°C.

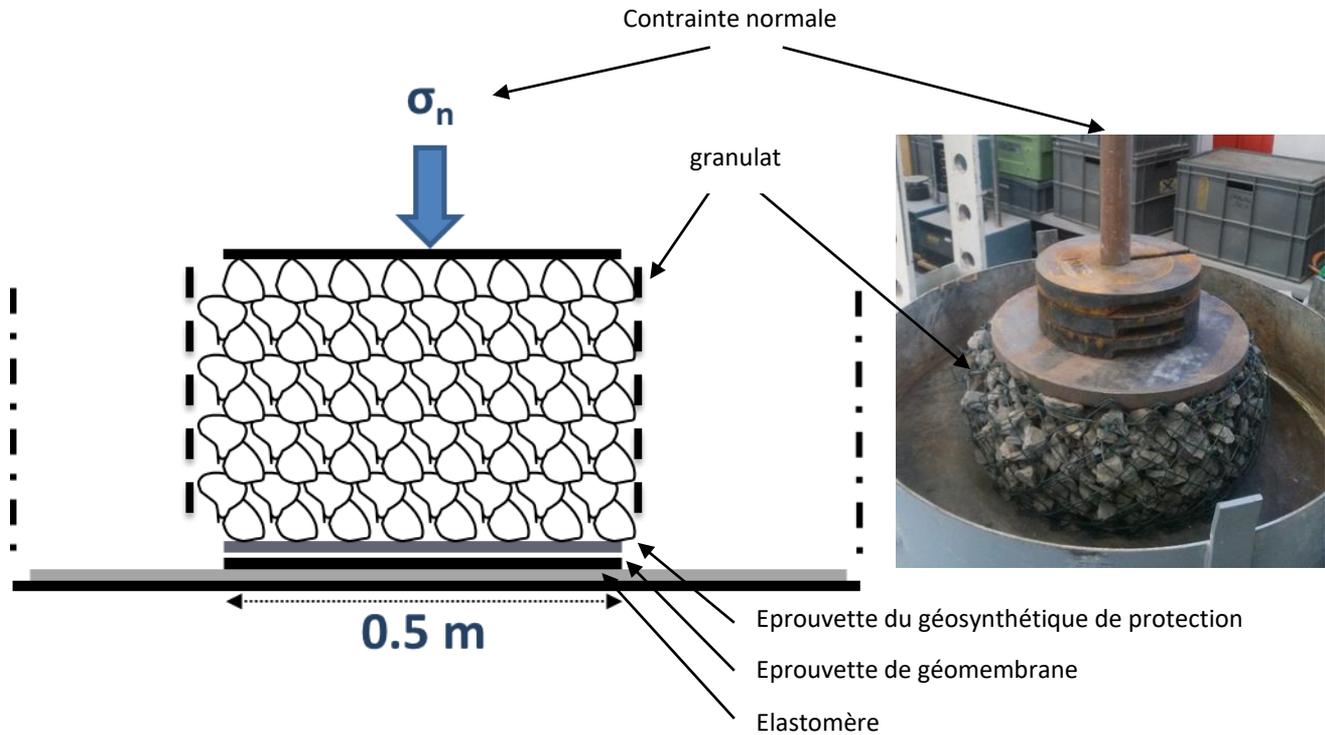


Figure 1. Schéma de principe de l'essai de performance développé.

Une fois la période d'application de la charge normale écoulee, l'éprouvette de géomembrane est extraite du dispositif de compression et les 5 endommagements majeurs sont identifiés (Figure 2a). Un prélèvement d'une éprouvette carrée 10 cm x 10 cm est alors effectué au niveau de chacun des 5 endommagements identifiés, de façon à permettre un mesurage de la réduction maximale d'épaisseur, c'est-à-dire prise au centre de l'endommagement (Figure 2b). Cette mesure est effectuée à l'aide d'un micromètre, ayant une touche de mesure calibrée correspondant à une bille carbure de 2 mm de diamètre et appliquant automatiquement une force de contact comprise entre 1 N et 2 N. Pour un endommagement donné, la réduction d'épaisseur, évaluée en pourcentage de déformation, correspond à la différence entre l'épaisseur initiale, mesurée sur un bord de l'éprouvette non déformée, et l'épaisseur déformée, le tout rapporté à l'épaisseur initiale. Pour ne pas être influencé par le retour visco-élastique des déformations du PEHD, la mesure des 5 endommagements est effectuée dans l'heure suivant le démontage du dispositif et l'extraction de l'éprouvette de géomembrane. Pour un couple d'éprouvettes de géomembrane et de géosynthétique de protection soumis à essai, le résultat est donc la moyenne des valeurs de réduction d'épaisseur (en pourcentage) des 5 endommagements les plus significatifs relevés sur l'éprouvette de géomembrane endommagée.

Cette procédure de compression des éprouvettes suivi d'une phase de mesurage des déformations de type réduction d'épaisseur est alors répétée 3 fois, ce qui signifie qu'il y a en tout 3 éprouvettes de géosynthétique de protection et 3 éprouvettes de géomembrane qui sont soumises à essai. Finalement, le résultat définitif de l'essai de performance qui vise à évaluer la performance d'un géosynthétique de protection, pour protéger une géomembrane sous-jacente d'endommagements de poinçonnement causés par un matériau granulaire sus-jacent, correspond à la moyenne des valeurs de réduction d'épaisseur des 15 endommagements de poinçonnement les plus significatifs, mesurées sur 3 éprouvettes de géomembranes distinctes.

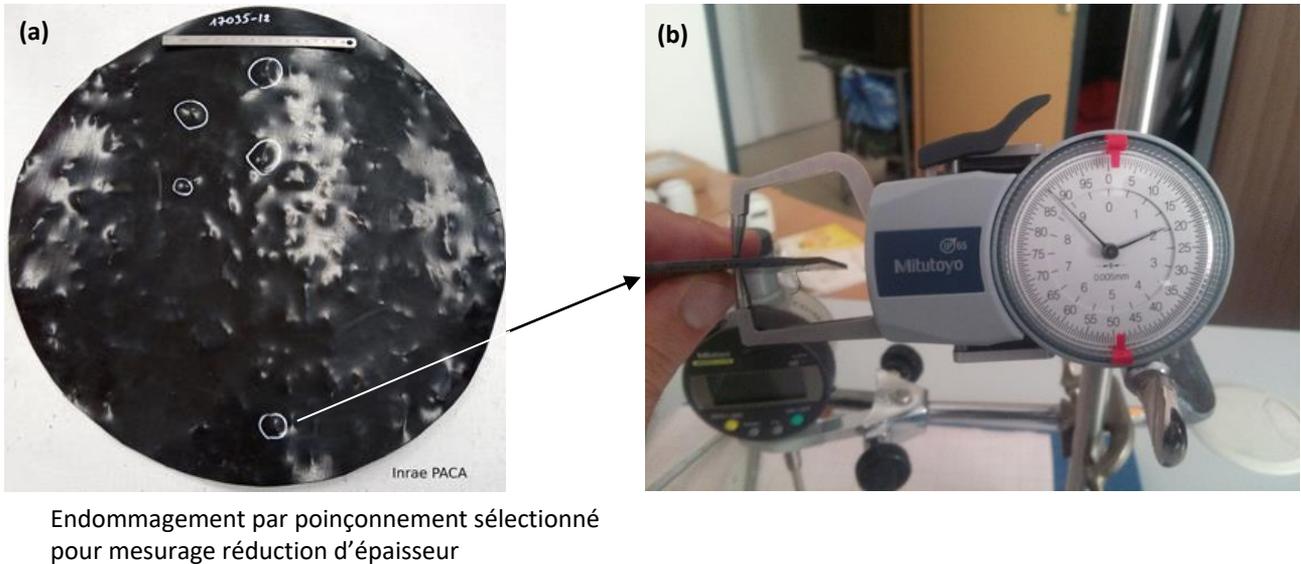


Figure 2. Principe d'évaluation de l'intensité des endommagements sélectionnés (a) par poinçonnement par mesure de la réduction d'épaisseur (b).

2.2. Géomembrane PEHD utilisée pour l'ensemble de la campagne d'essai

La géomembrane utilisée dans le cadre de cette étude est en PEHD et a une épaisseur de 2 mm. L'épaisseur et la masse surfacique ont été mesurées au laboratoire d'Inrae Aix-en-Provence selon la norme NF EN 1849 – 2 (Afnor, 1999) et les valeurs sont données dans les Tableaux 1 et 2.

Tableau 1. Epaisseur de la géomembrane utilisée dans cette étude (selon la norme NF EN 1849 – 2, complétée par le mode opératoire n° 1 du recueil des méthodes d'essais de l'ASQUAL

N° éprouvette	Epaisseur (mm)
1	2,024
2	2,009
3	2,029
4	2,023
5	2,025
6	2,058
7	2,054
8	2,038
9	2,044
10	2,048
Epaisseur moyenne = (2,035 +/- 0,022) mm (k=2)	
Coefficient de variation = 0,77 %	

Tableau 2. Masse surfacique de la géomembrane utilisée dans cette étude (selon la norme NF EN 1849 – 2, complétée par le mode opératoire n° 1 du recueil des méthodes d'essais de l'ASQUAL

N° éprouvette	Masse (g)	Masse surfacique (g/m ²)
1	18,953	1895
2	18,892	1889
3	18,975	1898
4	18,942	1894
5	18,984	1898
6	18,976	1898
7	18,986	1899
8	18,966	1897
9	18,996	1900
10	18,955	1896
Masse surfacique moyenne = (1896 +/- 19) g/m² (k=2)		
Coefficient de variation = 0,16 %		

2.3. Caractéristiques des granulats utilisés en tant que matériaux sus-jacents à la géomembrane et au géosynthétique de protection

Le matériau granulaire utilisé pour simuler la couche de drainage granulaire de l'ensemble des essais de performance est un granulat concassé 20 – 40 mm (basalte comme nature pétrographique), issu de la carrière Vicat à Lorient (Drôme). Ponctuellement, il a été observé que quelques granulats se brisaient lors de l'application de la charge de compression. Ainsi, après chaque essai, les granulats ont été tamisés au tamis 20 mm pour éliminer les granulats issus du fractionnement des plus gros.

2.4. Caractéristiques des géosynthétiques de protection testés

Seize géosynthétiques de protection ont été testés dans cette étude. Tous ces géosynthétiques étaient des géotextiles non-tissés. De façon plus détaillée, un géotextile d'une masse surfacique proche de 300 g/m² était non-tissé thermolié. Les quinze autres géotextiles, de masse surfacique comprise entre 800 et 1200 g/m² étaient non-tissés aiguilletés. En plus de la masse surfacique, la résistance au poinçonnement, selon la norme NF G 38-019 (Afnor, 1988), a été mesurée au Cerema Direction territoriale Est à Nancy (Figure 3). Le principe de cet essai consiste à déterminer la force nécessaire pour assurer la traversée d'une éprouvette de géotextile par un poinçon pyramidal, perpendiculairement au géotextile. Sur cette Figure 3, la résistance au poinçonnement a été tracée en fonction de la masse surfacique des géosynthétiques. Pour une lecture plus aisée du graphique, les produits de masse surfacique comprise entre 300 et 800 g/m² sont représentés avec des points de couleurs bleu ciel, les produits de masse surfacique de 1000 g/m² sont représentés avec des points de couleurs bleu clair, et les produits de masse surfacique de 1200 g/m² sont représentés avec des points de couleurs bleu foncé (la couleur est d'autant plus foncée que la masse surfacique du géotextile est élevée). Il est observé qualitativement que la résistance au poinçonnement augmente avec la masse surfacique. Cette observation s'explique par le fait que les géotextiles ont un mode de fabrication, et plus précisément de liaisonnement des fibres, relativement proche. En effet, dans le cas d'un autre mode d'agencement des fibres, par exemple par simple contact sans aiguilletage (Figure 4), il s'avère que la résistance au poinçonnement serait pratiquement nulle et n'augmenterait pas ou peu avec l'augmentation de la masse surfacique. Cette analyse est faite pour justifier que la masse surfacique ne peut pas être le paramètre dimensionnant de la fonction protection.

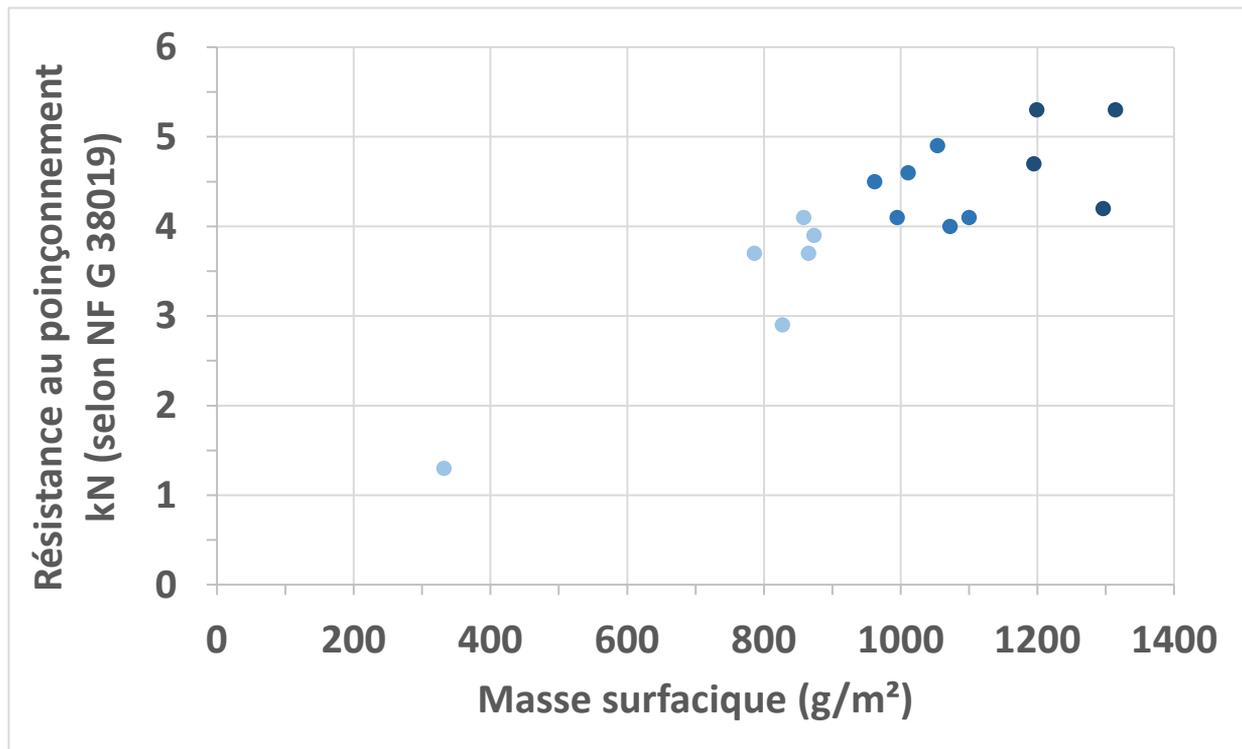


Figure 3. Résistance au poinçonnement des 16 géotextiles utilisés dans cette étude (mesurée selon la norme NF G 38-019).

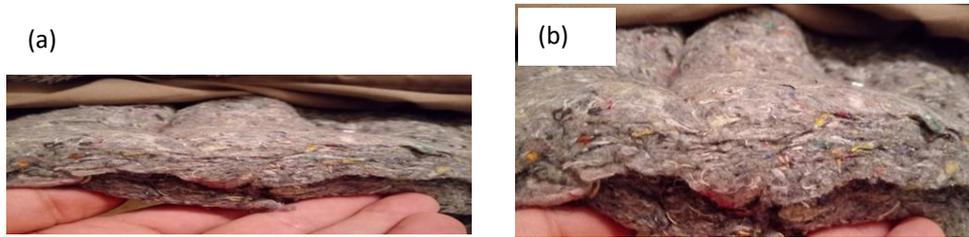


Figure 4. Représentation d'un nuage de fibres non liées avec une augmentation de la masse surfacique entre les nappes (a) et (b)

En plus de la masse surfacique et de la résistance au poinçonnement, l'efficacité de protection, selon la norme NF EN 13719 (Afnor, 2016), a été mesurée au BTTG à Manchester (Figure 5). Le principe de cet essai est de mesurer les déformations locales sur une plaque de plomb induites par l'application d'une charge normale au moyen d'un granulats factice normalisé (billes d'acier) ; la plaque de plomb reposant sur un support factice normalisé (élastomère) et étant surmonté du géotextile à tester. Les valeurs de l'efficacité de protection représentent le pourcentage de déformation par poinçonnement induite sur la géomembrane. Plus le pourcentage est grand, plus cela représente une géomembrane grandement déformée par poinçonnement, et, à l'inverse, plus le pourcentage est faible, plus cela représente une géomembrane peu déformée par poinçonnement, donc suffisamment protégée. Comme précédemment, les valeurs d'efficacité de protection sont tracées en fonction de la masse surfacique des produits. Il est observé que l'augmentation de masse surfacique conduit à une valeur plus faible de l'efficacité de protection, ce qui signifie en réalité une meilleure efficacité de protection. En effet, les valeurs représentent le pourcentage de déformation par poinçonnement induite sur la géomembrane. Plus le pourcentage est grand, plus cela représente une géomembrane grandement déformée par poinçonnement, et, à l'inverse, plus le pourcentage est faible, plus cela représente une géomembrane peu déformée par poinçonnement, donc suffisamment protégée. Comme cela a été argumenté précédemment, le raisonnement démontrant que la masse surfacique n'est pas le paramètre dimensionnant de la fonction protection peut également être appliqué dans le cas présent du paramètre « efficacité de protection », mesuré selon la norme NF EN 13719 (Afnor, 2016).

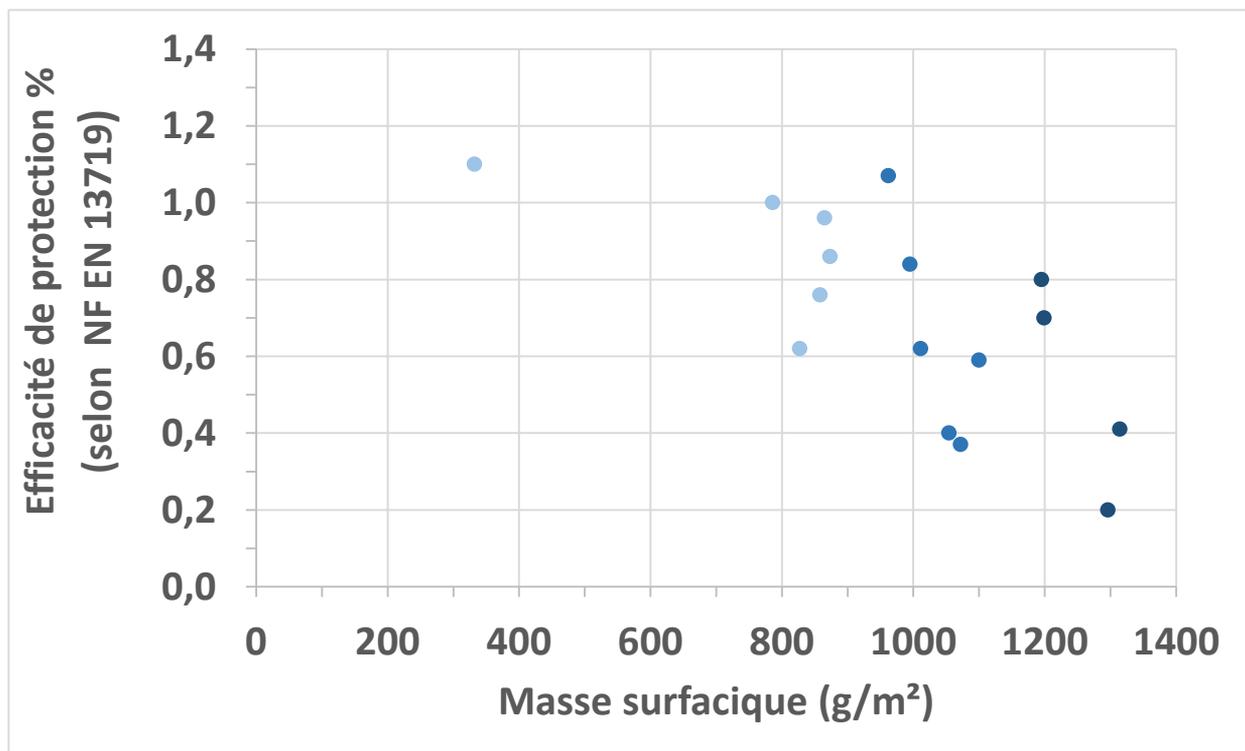


Figure 5. Résistance au poinçonnement des 16 géotextiles utilisés dans cette étude (mesurée selon la norme NF G 38-019)

2.5. Programme expérimental

Les seize géotextiles de protection ont été soumis aux essais de performance décrits au § 2.1 dans les conditions suivantes : application d'une contrainte de 300 kPa pendant 100 h.

3. Résultats et discussion

3.1. Critère d'analyse pour les essais de performance

Les essais de performance renvoient une valeur moyenne d'une réduction d'épaisseur, évaluées sur 15 endommagements de poinçonnement présents sur 3 éprouvettes de géomembrane circulaires de diamètre 50 cm. Pour qualifier un géotextile comme suffisamment protecteur ou non, il est nécessaire de se donner un critère qui validera ou infirmera la bonne protection de la géomembrane. Aujourd'hui, il n'existe aucune étude scientifique qui démontre la relation entre le niveau de déformation locale sur une géomembrane PEHD et la durabilité à long terme (d'un point de vue d'absence de rupture localisée). En l'absence d'une telle étude, il est nécessaire d'adopter un point de vue sécuritaire, relativement proche de l'absence de déformation. Aujourd'hui, la certification des géomembranes suppose que sur 10 valeurs individuelles d'épaisseur mesurées sur toute la largeur d'un lé, il n'y ait aucune mesure inférieure à 5% de la valeur nominale déclarée du produit, la valeur nominale déclarée étant relativement proche de la valeur moyenne du produit. D'un point de vue pratique, pour être relativement proche de la sécurité, les essais de performance sont interprétés de telle sorte qu'une valeur moyenne de réduction d'épaisseur supérieure à 5% qualifie la fonction protection comme inadaptée, tandis qu'une valeur moyenne de réduction d'épaisseur inférieure ou égale à 5% qualifie la fonction protection comme suffisante. Cette analyse ne constitue pas une démonstration scientifique mais repose sur une analyse pratique, menée du côté de la sécurité en l'absence d'études complémentaires. La campagne d'essais menés sur plusieurs géotextiles permet à la fois d'évaluer les produits en termes de performance pour la protection mais également de trouver une corrélation entre les valeurs de l'essai de performance et les valeurs des essais index des produits (selon les normes NF G 38-019 et NF EN 13719).

3.2. Analyse des essais de performance

Pour chaque géotextile de protection testé, les valeurs issues de l'essai de performance ont été tracées en fonction de la résistance au poinçonnement (Figure 6.). Il est observé sur la Figure 6 que la majorité des géotextiles de masse surfacique inférieure à 800 g/m², et présentant une valeur de résistance au poinçonnement inférieure à 4 kN, n'apportent pas une protection suffisante à la GMB PEHD, dans les conditions d'essais mentionnées plus haut. Cependant, deux géotextiles ont une valeur de résistance au poinçonnement supérieure à 4 kN mais n'apportent pas une protection suffisante à la GMB PEHD. Pour le géotextile de masse surfacique de 1000 g/m², et avec une valeur de résistance au poinçonnement proche de 4,5 kN, il peut être expliqué que la protection insuffisante apportée par ce géotextile provient d'une valeur élevée de déformation (1,07%), selon la norme NF EN 13719. Le second géotextile identifié présente une faible valeur d'efficacité de protection selon la norme NF EN 13719 (0,2%), correspondant donc à une bonne performance, mais la nature de ses fibres régénérées peut expliquer le critère de 5% non satisfait.

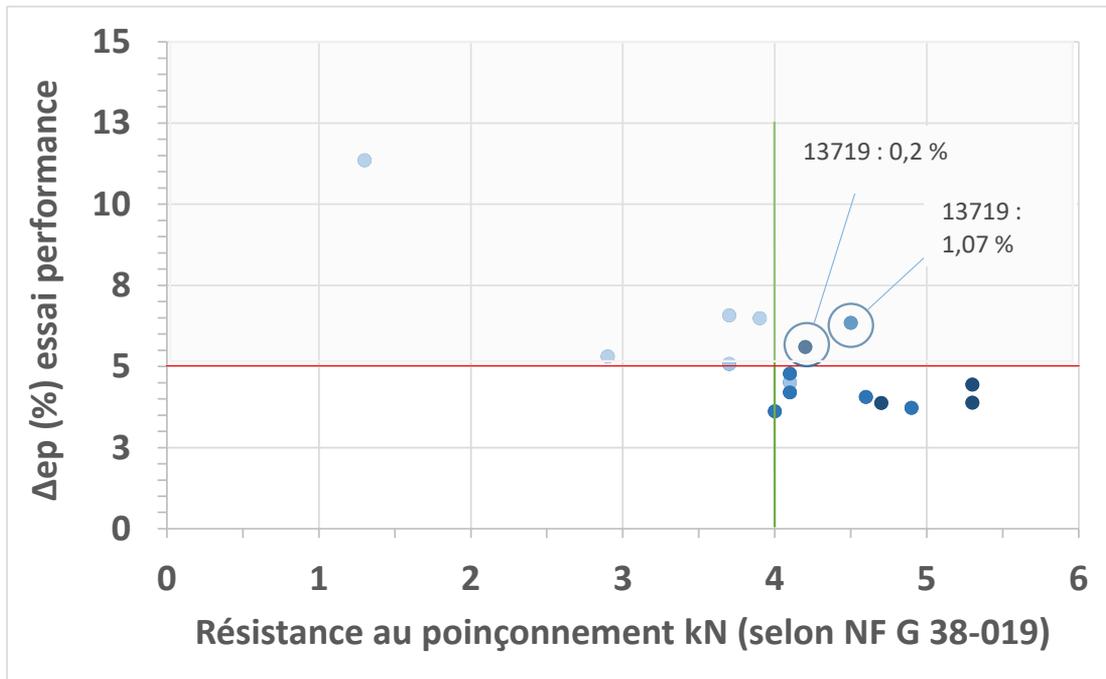


Figure 6. Réduction d'épaisseur (de la géomembrane PEHD) mesurée par les essais de performance en fonction de la résistance au poinçonnement des géotextiles de protection (note : la zone grisée représente une zone pour laquelle la protection est insuffisante ; la moyenne des réductions d'épaisseur mesurées à l'essai de performance étant supérieure à 5%)

Pour chaque géotextile de protection testé, les valeurs issues de l'essai de performance ont été tracées en fonction de la résistance au poinçonnement (Figure 7). Il est observé sur la Figure 7 que la majorité des géotextiles de masse surfacique inférieure à 800 g/m², et présentant une valeur de résistance d'efficacité de protection supérieur à 0,85, n'apportent pas une protection suffisante. Deux géotextiles sont inadaptés en protection bien que présentant une valeur d'efficacité de protection inférieure à 0,85. En revanche, pour ces deux produits, la valeur de la résistance au poinçonnement est soit inférieure soit très proche de 4 kN.

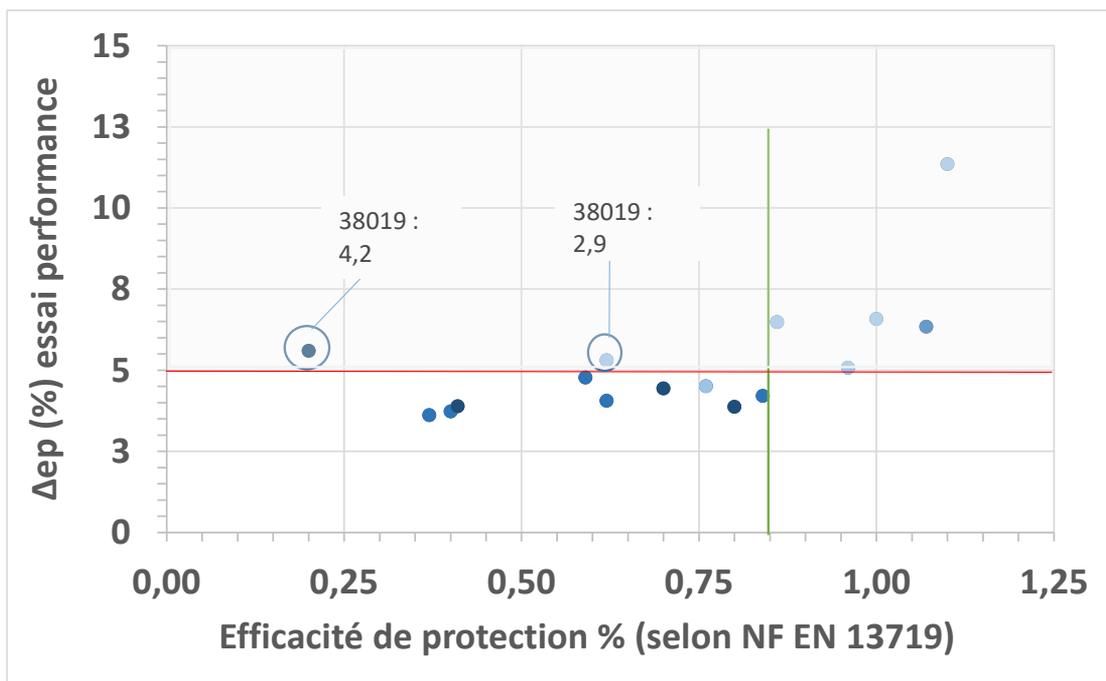


Figure 7. Réduction d'épaisseur (de la géomembrane PEHD) mesurée par les essais de performance en fonction de l'efficacité de protection des géotextiles de protection.

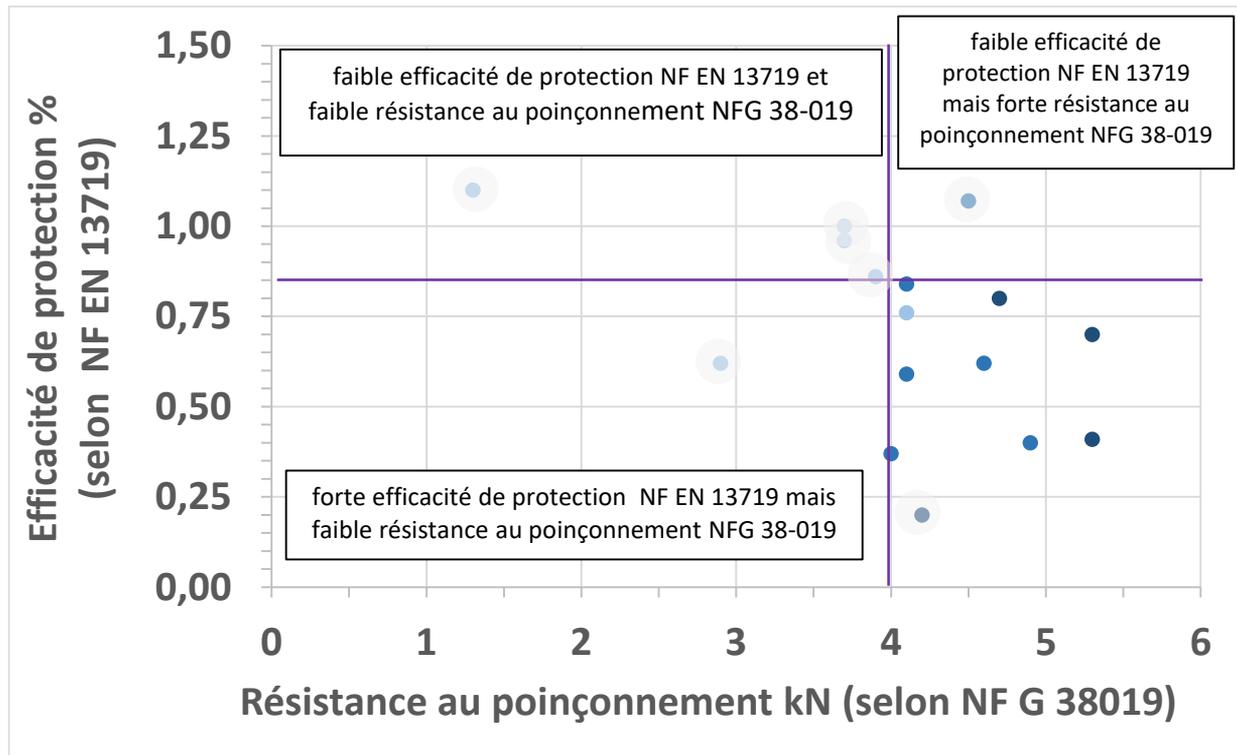


Figure 8. Efficacité de protection des géotextiles en fonction de la résistance au poinçonnement des géotextiles (pour une meilleure lisibilité, les produits qui ne respectent pas le critère d'une valeur inférieure ou égale à 5% mesurée à l'essai de performance ont leurs points entourés de gris)

Des deux Figures 6 et 7, il ressort que les deux paramètres résistance au poinçonnement et efficacité de protection sont à considérer pour dimensionner la fonction protection. Sur la Figure 8, les valeurs d'efficacité de protection et de résistance au poinçonnement ont été tracées sur le même graphique. Ce graphique fait ressortir la zone en bas à droite du graphique dans laquelle l'ensemble des produits de protection adéquate sont rassemblés. Cette zone identifiée par les valeurs de résistance au poinçonnement (4 kN) et d'efficacité de protection (0,85 %) qui sont ressorties comme valeurs limites pour obtenir une protection suffisante.

4. Conclusions

Cette étude expérimentale avait pour objectif de préciser les paramètres essentiels pour dimensionner la fonction protection dans l'application spécifique d'une géomembrane PEHD (2 mm dans le cadre de cette étude) installée en fond de casier d'ISD et surmontée par une couche de granulat grossier et une colonne de 30 m de déchets. Pour ce faire, un essai de performance a été développé et une vaste campagne expérimentale, impliquant 16 géosynthétiques de protection, a été réalisée. L'analyse des essais de performance a été réalisée en considérant la valeur de 5% de réduction d'épaisseur moyenne de la géomembrane comme critère qualifiant la fonction protection comme suffisante ou non. Il a été mis en évidence dans cette étude que la masse surfacique du géosynthétique de protection ne permettait pas d'être le paramètre dimensionnant pertinent. En revanche, le couple de paramètre résistance au poinçonnement (selon la norme NF G 38-019) et efficacité de protection (selon la norme NF EN 13719) était pertinent pour dimensionner cette fonction protection. Dans le cas de l'application considérée, il a été montré qu'une protection suffisante était apportée par un géotextile ayant une résistance au poinçonnement supérieure ou égale à 4 kN et une valeur d'efficacité de protection inférieure ou égale à 0,85%.

5. Remerciements

Les résultats de cette étude sont issus d'une campagne d'essais de performance initiée en septembre 2017 par le groupe de travail « poinçonnement » du CFG et qui s'est déroulée pendant deux ans. Cette campagne d'essais a été soutenue financièrement par le CFG, l'Asqual, Suez Recyclage et Valorisation France et plusieurs producteurs de géosynthétiques (Afitexinov, Dupont de Nemours, Enka Solutions, Fibertex, Huesker, Naue et Tencate Geosynthetics). Les auteurs de cette étude remercient particulièrement l'ensemble des membres du groupe de travail qui ont participé aux échanges ainsi que toutes les structures ayant contribué financièrement à cette étude. Une partie de cette étude se base sur des travaux préliminaires qui ont été menés dans le cadre du projet RESBA financé par l'Europe dans le cadre du programme INTERREG ALCOTRA. Enfin, Florian et Eva Del Grande sont particulièrement remerciés pour la réalisation de nombreux essais constituant cette étude.

6. Références bibliographiques

- AFNOR (2016) NF EN 13719 Géosynthétiques - Détermination de l'efficacité de protection à long terme des géosynthétiques en contact avec les géomembranes.
- AFNOR (1988) NF G38-019 Textiles – Articles à usages industriels – Essais des géotextiles : détermination de la résistance au poinçonnement.
- Aufrère A., Bloquet C., Budka A., Croissant D., Gallo, Girard H., Lussac F. (2009). Protection antipoinçonnement des géomembranes en installation de stockage de déchets : une procédure d'étude. Rencontres Géosynthétiques 2009, 329-338.
- Koerner R.M., Wilson-Fahmy R.F., Narejo D. (1996). Puncture protection of geomembranes: Part II: Experimental, Geosynthetics International, Vol 3, no 5, pp. 629-653.
- Shercliffe D.A. (1998). Designing with the cylinder test. Polluted and Marginal Land '98 , Forde, M.C., Editor, Engineering Technics Press, Proceedings of the Fifth International Conference on the Re-use of Contaminated Land and Landfills, Brunel University, London, UK, July 1998, pp. 527-533.