

Performance de différents géotextiles de protection de la géomembrane dans les installations de stockage de déchets

Arnaud Budka ^a, Carole Bloquet ^a, Jean-Paul Benneton ^b, Didier Croissant ^c, Hugues Girard ^d et Matoren Khay ^e

La caractérisation de l'efficacité de géotextiles pour protéger les géomembranes contre le poinçonnement dans les dispositifs de drainage et d'étanchéité par géomembrane (DEDG), mis en place en fond d'alvéole d'installations de stockage de déchets (ISD) est un paramètre majeur pour s'assurer de la performance de la barrière active définie réglementairement.

Des géotextiles sont ainsi utilisés dans la constitution de ces DEDG d'installations de stockage de déchets pour protéger la géomembrane contre le poinçonnement lié à l'installation de la couche de drainage puis au poids des déchets sus-jacents. Ces géotextiles doivent donc être dimensionnés pour cette fonction. À ce jour, les deux essais normalisés de poinçonnement statique et dynamique, qui figurent sur l'ensemble des fiches techniques des géotextiles de protection, ne permettent pas de choisir directement le produit adapté aux sollicitations spécifiques sur les installations de stockage. La seule masse surfacique n'est pas suffisante, non plus, pour faire ce choix.

À cette fin, des essais ont été réalisés pour sélectionner les paramètres pertinents à retenir pour le choix des géotextiles dans ce type d'application. Il s'agit d'une part, de planches d'essais reproduisant en vraie grandeur les conditions de mise en œuvre de la couche de drainage, et d'autre part, d'une simulation en laboratoire des sollicitations en service à l'aide d'un appareillage de grandes dimensions.

Expérimentation *in situ* : réalisation des planches d'essai

Principe et matériaux utilisés

Dans un souci de reproduire les conditions réelles de mise en œuvre du DEDG, une expérimentation a été réalisée sur un support argileux de coefficient de perméabilité inférieur à $1,10^{-9}$ m/s. Le DEDG était ensuite constitué d'une géomembrane en PEHD¹ de 2 mm d'épaisseur, d'un des géotextiles testés et d'une couche drainante en graviers. Cette expérimentation a été réalisée du 18 au 20 mai 2005.

SUPPORT ARGILEUX

Le support en argile remaniée a été caractérisé avant sa mise en place, puis *in situ* via des essais de portance et des mesures de perméabilité. Les principales caractéristiques de ce matériau sont indiquées dans le tableau 1.

GÉOSYNTHÉTIQUES TESTÉS, PLANCHES TÉMOINS

La géomembrane utilisée est une géomembrane PEHD de 2 mm d'épaisseur livrée en rouleaux de 9,40 m de large.

Onze géotextiles de protection, numérotés A à K, d'une masse surfacique comprise entre 480 g/m² et 1 200 g/m², ont été testés ; ils ont été disposés conformément à la figure 1. Les planches d'essais ont été notées A à K (figure 1), suivant le type de géotextile, avec l'indice c ou r, en fonction du granulat, concassé (c) ou roulé (r), installé

1. Polyéthylène haute densité.

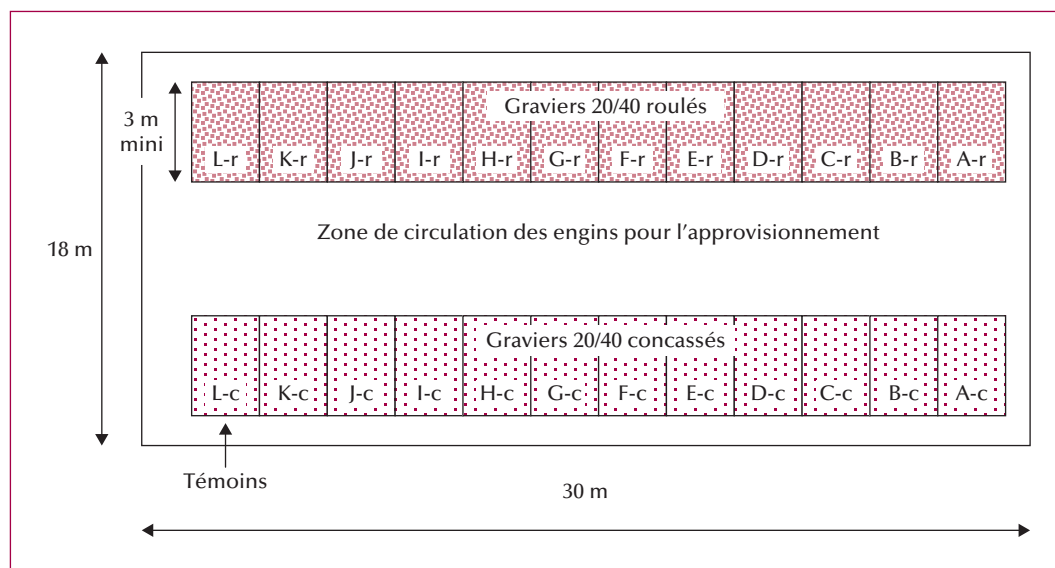
Les contacts

- a. SITA France, 132 rue des Trois Fontanots, 92758 Nanterre Cedex
- b. Ministère de l'Équipement, CETE de Lyon, 25 avenue François Mitterrand, Case n° 1, 69674 Bron Cedex
- c. Cemagref, UR Hydrosystèmes et bioprocédés, Parc de Tourvoie, BP 44, 92163 Antony Cedex
- d. Cemagref, UR Réseaux, épuration et qualité des eaux, 50 avenue de Verdun, Gazinet, 33612 Cestas Cedex
- e. Ministère de l'Équipement, CETE Normandie, CER, BP 245, 76121 Grand Quevilly

► Tableau 1 – Caractéristiques du matériau support argileux.

Type d'argile	Argile glauconieuse verte
Masse volumique sèche à l'Optimum Proctor Normal (ρ_{dOPN})	1,31 t/m ³
Teneur en eau à l'Optimum Proctor Normal (W_{OPN})	29 %
Classification GTR	A2-A3 th
Résultats de la planche d'essai de compactage (08-11-04) : - masse volumique sèche - teneur en eau	1,10 à 1,17 t/m ³ 50,5 à 52 %
Résistance dynamique de pointe R (17-05-05 ; pénétromètre dynamique de type B – norme NF P 94115)	0,8-3 MPa
Teneurs en eau mesurées lors de l'expérimentation	33 à 42 % (6 mesures)

▼ Figure 1 – Disposition des planches d'essais.



au-dessus. Les deux planches L-c et L-r sont les planches témoin, sans géotextile.

GRANULATS

Des graviers 20/40 concassés et 20/40 roulés ont été sélectionnés comme représentatifs des matériaux granulaires les plus couramment utilisés.

ENGINS

Deux engins ont été utilisés pour l'approvisionnement en granulats et l'application des sollicitations sur les deux couches de granulats : une pelle hydraulique sur chenilles CAT 320 BL (24 tonnes) et un tombereau automoteur à roues CAT D 300 E (22,5 tonnes).

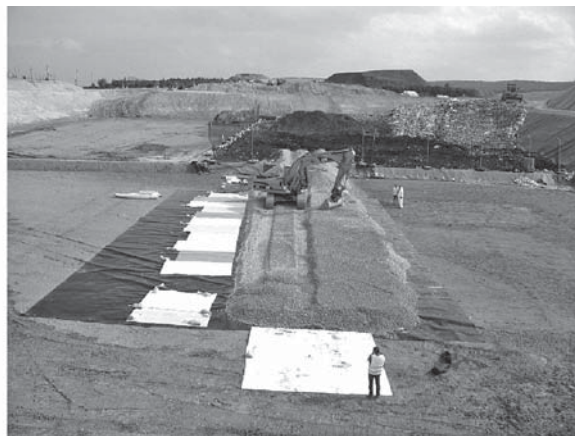
Protocole expérimental

MISE EN PLACE DES PLANCHES

La géomembrane a tout d'abord été déroulée sur 30 m de long (figure 1) ; deux lès ont été disposés côte à côte avec un léger recouvrement. On disposait ainsi d'une surface de géomembrane de 18 × 30 m. Les géotextiles, de dimensions 2 × 3 m, ont été placés puis soudés (figure 1) les uns aux autres (figure 2-a) pour éviter qu'ils ne se déplacent lors de la mise en place des granulats. Chaque géotextile est considéré comme une planche d'essai. La partie centrale, entre les deux lignes de géotextiles, a servi de voie de roulement



a- Soudure des géotextiles.



b- Mise en place des graviers concassés.



c- Mise en place des graviers roulés.



d- Circulation des engins (simulation des sollicitations de mise en œuvre).



e- Enlèvement des graviers.



f- Observations.

▲ Figure 2 – Réalisation de l'expérimentation.

pour l'approvisionnement des graviers par le tombereau et la pelleuse. Une couche de 50 cm de graviers concassés et roulés a été mise en place respectivement sur les zones correspondantes, à l'aide de la pelleuse, sans circulation des engins sur les planches d'essais (figures 2-b et 2-c).

SOLLICITATIONS APPLIQUÉES SUR LA ZONE DES GRAVIERS CONCASSÉS

La figure 2-d illustre la circulation des engins : pelle sur la zone « r » (zone des graviers roulés) et tombereau sur la zone « c » (zone des graviers concassés). Dans un premier temps, 20 passages de la pelleuse ont été appliqués en tout point au-dessus des géotextiles, dans la zone « c », soit 10 allers-retours ; compte tenu de la largeur des chenilles, la pelle a besoin de se décaler 5 fois pour couvrir toute la surface des géotextiles (3 m). Après cette sollicitation, les cailloux et les géotextiles ont été enlevés sur environ 1 m² sur les planches A-c et C-c ; seules de légères éraflures ont été constatées. De façon identique, 20 passages du tombereau ont ensuite été appliqués.

SOLLICITATIONS APPLIQUÉES SUR LA ZONE DES GRAVIERS ROULÉS

Vingt passages de la pelle ont également été appliqués dans la zone des graviers roulés mais seulement 2 passages du tombereau. En effet, la mauvaise tenue de ce matériau à la circulation du tombereau (action des pneus) entraînait un « fluage » des graviers latéralement, réduisant l'épaisseur moyenne de la couche à 30-40 cm. Il a donc été décidé de réduire le nombre de passages du tombereau, considérant que le même phénomène se produit vraisemblablement sur les chantiers et nécessite dans ce cas le recours à des engins à chenilles.

ENLÈVEMENT DES GRAVIERS

Il a ensuite été procédé à l'enlèvement des graviers et des géotextiles sur l'ensemble des planches. Cet enlèvement a d'abord été fait à la pelleuse pour la partie supérieure des couches, puis manuellement sur les 15 à 20 derniers centimètres au contact du géotextile (figure 2-e).

PREMIÈRES OBSERVATIONS DE LA GÉOMEMBRANE ET PRÉLÈVEMENTS

Les dommages observés sur la géomembrane ont été repérés sur celle-ci (figure 1-f). Ensuite, la géomembrane a été découpée sur les différentes planches en vue d'un examen visuel plus approfondi en laboratoire et la réalisation d'essais

de caractérisation des dommages constatés. La dimension du prélèvement est d'environ 2 × 3 m pour chaque planche.

Expérimentation *in situ* : examen et caractérisation des prélèvements de géomembrane

Nomenclature des endommagements

Les définitions du guide pour la réalisation et l'exploitation de planches d'essais sur DEG (CFG, 2001) ont été utilisées pour caractériser les dommages constatés visuellement sur les échantillons prélevés. Les 4 types de dommages identifiés sur les planches sont :

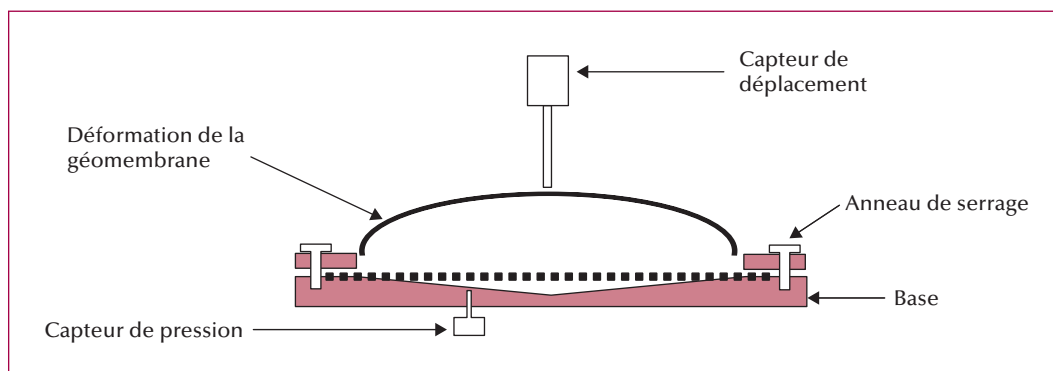
- « *éraflure* » : rayure de surface ;
- « *entaille* » : rayure en profondeur, sans percement ;
- « *indentation* » : poinçonnement ponctuel rémanent et sans perforation, avec réduction d'épaisseur importante, correspondant généralement à l'empreinte d'un granulat ; pour ces planches, ont été distinguées des « *indentations vers le haut* » dues aux cailloux présents dans le support, et des « *indentations vers le bas* », dues aux graviers de la couche drainante ;
- « *percement* » : trou ou déchirure.

Un 5^e type de dommage défini par le guide n'a pas été rencontré ici : il s'agit des « *déformations* » (déformation de la géomembrane du fait d'une irrégularité dans la planéité du support ou de la pro-éminence d'un élément grossier, rémanente ou non et sans réduction notable de l'épaisseur).

Appareillages utilisés pour la caractérisation de l'état de la géomembrane

ESSAI DE TRACTION MULTI-AXIALE

Cet essai, parfois appelé essai d'éclatométrie (projet de norme européenne prEN 14151), consiste à appliquer une pression sous une éprouvette de géomembrane de forme circulaire (figure 3). Cette pression déforme la géomembrane et crée, au centre de la déformée, une contrainte isotrope dans le plan tangent de la géomembrane. Lors de l'essai, on mesure la déflexion du centre de l'éprouvette et la pression sous la géomembrane. Ces deux mesures permettent de calculer les



◀ Figure 3 – Schéma de principe de l'essai de traction multi-axiale.

▼ Figure 4 – Appareillages utilisés pour les essais de traction multi-axiale (650 mm à gauche et 200 mm à droite).

valeurs de déformation et de contrainte, en se basant notamment sur des hypothèses simplificatrices suivantes : déformation sphérique et uniforme dans le sens méridien de la géomembrane durant tout l'essai, homogénéité et incompressibilité de la géomembrane et champ de contrainte constant dans l'épaisseur de la géomembrane.

Deux appareillages ont été utilisés (figure 4). L'appareillage du CER² de Rouen a un diamètre utile des éprouvettes de 650 mm ; ce diamètre est de 200 mm pour celui du Cemagref d'Antony. Les essais peuvent être réalisés à gradient de pression constant ou à vitesse de déformation constante. L'asservissement de l'essai est assuré par un logiciel pour le contrôle de la pression de consigne.

La figure 5 donne un exemple de résultats obtenus à l'essai de traction multi-axiale (200 mm) ; on peut observer, sur la figure 5-a, le dommage soumis à l'essai, sur la figure 5-b, les courbes « contrainte-déformation » pour l'éprouvette endommagée et une éprouvette vierge et, sur la

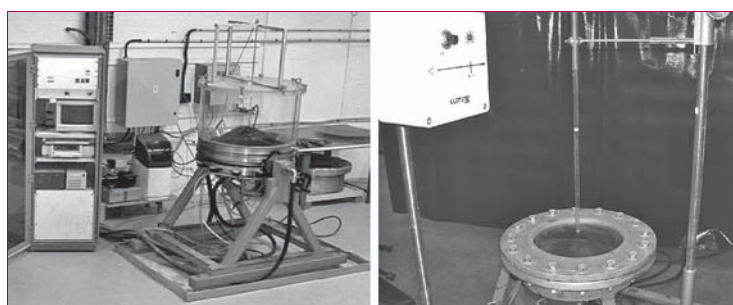
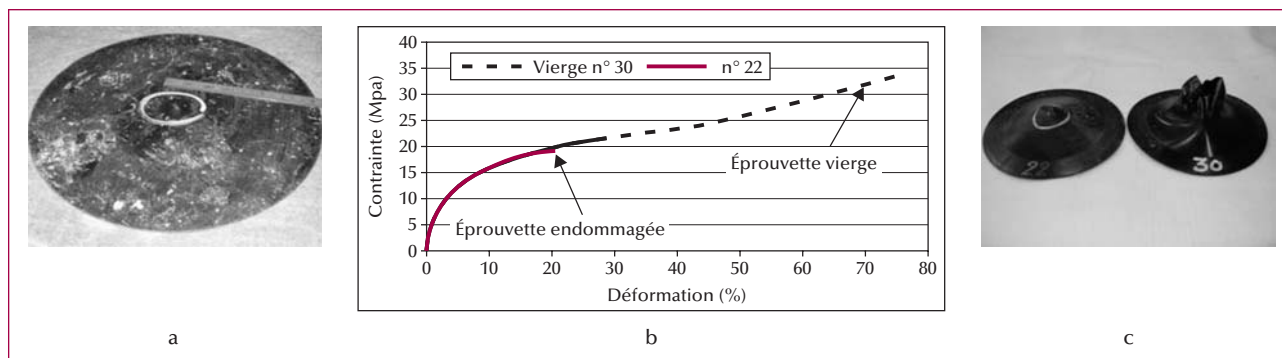


figure 5-c, les éprouvettes correspondantes après rupture (éprouvette vierge numérotée 30).

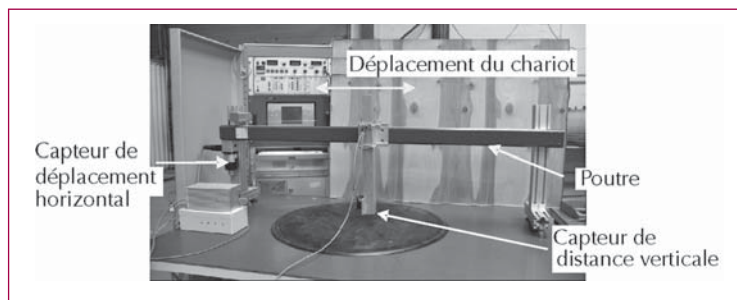
PROFILOMÈTRE « LASER »

Le profilomètre a été mis au point par le CER de Rouen afin de faire des relevés de déformations et de dommages permanents de la géomembrane engendrés par une sollicitation mécanique. Les dommages à quantifier au travers des mesures de profils ont des dimensions variant de l'épaisseur d'un trait jusqu'aux dimensions des granulats de la couche drainante. Le dispositif de mesure

2. Centre d'expérimentation routière.



▲ Figure 5 – Exemple de résultats à l'essai de traction multi-axiale (diamètre = 200 mm).



▲ Figure 6 –
Appareillage du
profilomètre « Laser ».

(figure 6) est constitué d'un capteur de déplacement linéaire, de type magnétostrictif, et d'un capteur de déplacement optoélectronique, fonctionnant selon le principe de triangulation. L'équipage à déplacement mécanisé est monté sur une poutre rigide en profilé d'aluminium. L'association de ces capteurs sur ce banc de mesure couplé à un système d'acquisition et d'analyse permet d'obtenir le profil de l'éprouvette de géomembrane reflétant son état d'endommagement ou de déformation.

Les traitements des données effectués permettent d'obtenir le nombre d'impacts (creux et pics), les intervalles entre deux pics ou deux creux, l'intégration de la courbe de profil et la développée de la courbe de profil.

Protocole retenu pour l'examen et la caractérisation des prélèvements

Après avoir récupéré les 24 prélèvements (2×3 m) de géomembranes ayant subi les différentes conditions de sollicitations à la mise en œuvre, se pose la question suivante : comment caractériser leur endommagement éventuel ? À la suite des discussions entre les intervenants de la présente étude et de l'analyse de la bibliographie (Badu-Tweneboah *et al.*, 1998 ; Reddy *et al.*, 1998 ; Khay *et al.*, 2006), l'essai de traction multi-axiale a été retenu comme principal essai de caractérisation de l'état des géomembranes prélevées. Les deux appareillages décrits dans le paragraphe « Essai de traction multi-axiale » (page 10) ont été utilisés. L'appareillage de grand diamètre présente l'intérêt de caractériser une surface importante de géomembrane et de répondre au critère proposé par Badu-Tweneboah *et al.* ; selon ce critère, un endommagement mécanique subi par une géomembrane est jugé inacceptable si, pour une éprouvette de cette géomembrane, testée dans un appareillage de traction multi-axiale de grand diamètre ($d \geq 0,50$ m), une rupture est observée à un autre endroit qu'au

sommet du « dôme » et que cette rupture est localisée à l'emplacement d'un dommage visible. Néanmoins, la surface de chaque éprouvette ne correspond qu'à une faible partie de chaque planche d'essai et les résultats dépendent de la présence ou non d'un ou plusieurs dommages dans l'éprouvette testée. Ceci est encore plus vrai pour les éprouvettes de 200 mm de diamètre ; dans ce cas, le dommage est placé au centre de l'éprouvette.

En conséquence, la démarche suivante a été adoptée dans ce cas d'une géomembrane en PEHD :

- examen visuel approfondi de l'ensemble de la surface de la géomembrane pour chaque planche ;
- classification des dommages suivant la nomenclature adoptée (cf. « Nomenclature des endommagements », page 10) et dénombrement des dommages de chaque type pour chaque planche ;
- « étalonnage » de l'examen visuel au moyen des essais de traction multi-axiale : pour chacun des quatre types de dommages identifiés, plusieurs éprouvettes intégrant ce dommage sont soumises à l'essai afin de caractériser le degré d'endommagement de la géomembrane correspondant à ce dommage ; ce degré d'endommagement, pour un type de dommage, est évalué par le rapport de ses caractéristiques à celles mesurées pour un échantillon « vierge » ;
- utilisation du profilomètre « laser » pour compléter l'étalonnage de l'examen visuel et mesurer la taille de certains dommages ;
- appréciation globale de l'état de la géomembrane pour chaque planche à partir du nombre de dommages de chaque type observé sur le prélèvement correspondant et des résultats des essais de laboratoire.

L'objectif est de définir un critère permettant de juger de l'efficacité des géotextiles testés à protéger la géomembrane vis-à-vis des sollicitations et des conditions de mise en œuvre de la présente expérimentation ; il est proposé de considérer que la géomembrane a été efficacement protégée à la mise en œuvre si elle n'a pas subi d'endommagement notable, c'est-à-dire qu'elle ne présente pas de dommage entraînant une chute significative de ses caractéristiques mécaniques mesurées à l'essai de traction multi-axiale et qu'elle a conservé son étanchéité tout au long de l'essai.

Premières constatations

La présence de silex dans le support argileux a entraîné l'apparition de dommages dus à ces silex, dénommés « indentations vers le haut », qui seront considérés spécifiquement et non pris en compte comme dommages dus à la mise en œuvre de la couche drainante.

Étude en laboratoire de l'endommagement statique sous les sollicitations de service

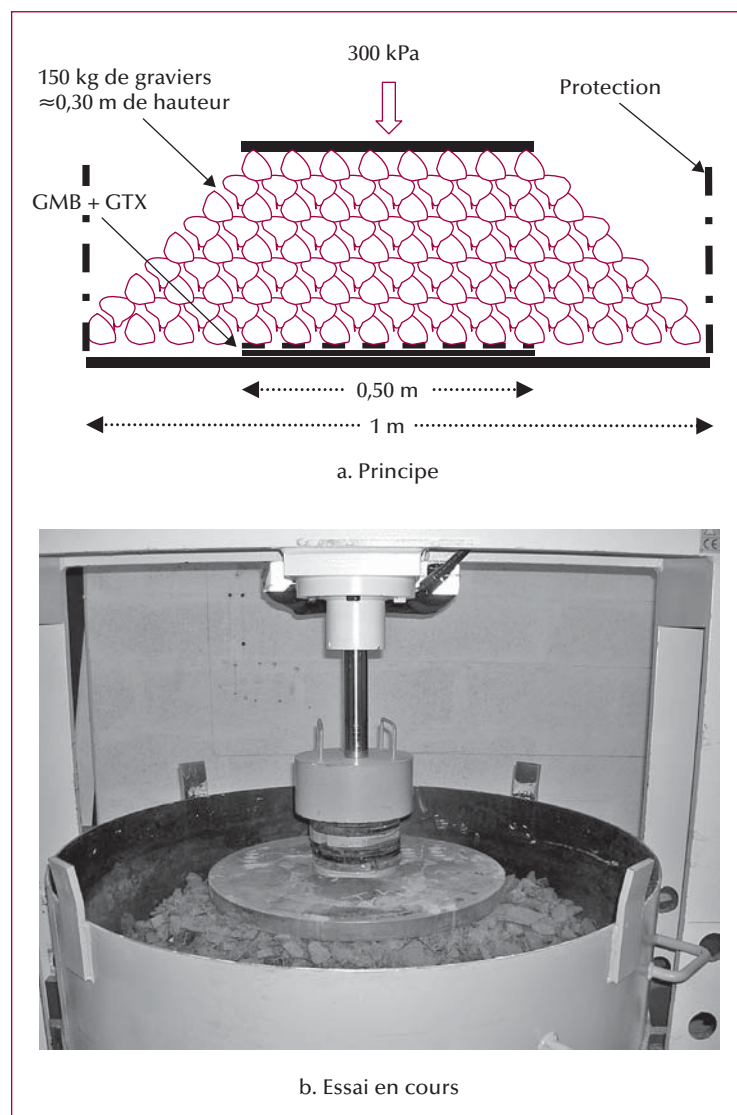
Principe et objectifs

L'objectif de cette partie de l'étude est d'étudier l'efficacité de différents géotextiles pour la protection d'une géomembrane dans des conditions de service, sous l'effet du poids des déchets ; un appareillage de grandes dimensions a été développé par le Cemagref d'Antony, pour simuler ces sollicitations en laboratoire. Le DEDG peut être placé sur un support rigide ou déformable et soumis à une charge statique équivalente à une hauteur de déchets de 30 m ; cette charge a été appliquée jusqu'à des durées de 1 000 heures.

L'appareillage, dénommé par la suite « appareillage d'endommagement statique » (figure 7), est constitué d'une presse de 10 tonnes, d'un support en acier de 1 m de diamètre et d'une protection en acier de 1 m de diamètre contre les projections de granulats, d'une plaque en acier de 500 mm sur laquelle est appliquée une charge de 300 kPa ; 150 kg de granulats, concassés ou roulés, sont déposés sur le complexe géosynthétique (GMB + GTX).

Mise au point, procédure, matériaux testés

La mise au point de l'appareillage et de la procédure d'endommagement (ou de chargement) s'est appuyée, notamment pour fixer la durée d'application des charges, sur l'annexe B de la norme NF EN 13719 (août 2003) relative à la « Détermination de l'efficacité de protection à long terme des géotextiles » et sur les travaux de Reddy *et al.* (1998), similaires à notre projet. Nous avons effectué des chargements de 1 000 heures et de 100 heures, sur support rigide ; à partir des observations faites sur ces premiers chargements, des indications de la norme et des travaux de Reddy, une durée de 100 heures a été jugée suffisante pour obtenir une simulation signifi-



cative des sollicitations de service. Il n'a pas été placé de paroi rigide au contact des graviers afin d'éliminer les effets de bord. Après déchargement et enlèvement des graviers, le protocole d'évaluation de l'endommagement éventuel de la géomembrane est identique à celui adopté et décrit ci-dessus pour les planches d'essai (examen visuel détaillé de la géomembrane, essais de traction multi-axiale...).

▲ Figure 7 – Simulation en laboratoire de l'endommagement statique : cette charge a été appliquée jusqu'à des durées de 1 000 heures.

Ces essais sont en cours de réalisation sur les mêmes matériaux que ceux utilisés pour les planches d'essai de mise en œuvre, le nombre d'essais tenant compte des résultats obtenus pour les planches.

Conclusion

La présente communication décrit d'une part la réalisation d'une expérimentation *in situ* comportant 24 planches d'essai de mise en œuvre d'un DEDG en fond d'installation de stockage de déchets. L'objectif est de tester l'efficacité de différents géotextiles en protection d'une géomembrane lors de la mise en œuvre de la couche drainante granulaire ; ces essais, réalisés pour un support argileux, une géomembrane donnée, 11 géotextiles et 2 types de graviers, sont en cours d'exploitation. Un protocole d'exploitation de ces planches d'essai, basé notamment sur un examen visuel détaillé et des essais de traction multi-axiale sur les échantillons de géomembrane exhumés après la mise en œuvre du DEDG dans les conditions d'un chantier, a été défini.

D'autre part, un dispositif d'endommagement statique en laboratoire, de grandes dimensions, a été développé. Ce dispositif a pour objectif de simuler les sollicitations en service subies par le DEDG.

Comme pour l'étude de l'endommagement à la mise en œuvre, les géomembranes ayant subi ces sollicitations sont soumises à des essais de traction multi-axiale ; les mêmes matériaux que pour l'expérimentation *in situ* sont testés et l'exploitation des résultats de ces essais est similaire.

À ce jour, une méthodologie a été proposée pour étudier l'efficacité en protection de géotextiles utilisés en fond d'ISD, à la fois à court terme et à long terme, et exploiter les résultats des expérimentations correspondantes effectuées en laboratoire et *in situ*. Les résultats de l'ensemble de l'étude seront publiés à l'achèvement des essais d'endommagement statique, qui sont des essais de longue durée, compte tenu du nombre de paramètres examinés.

Enfin, cette étude devrait être poursuivie par la réalisation d'essais d'identification (poinçonnement) afin d'examiner l'apport de ces essais simples pour le pré-dimensionnement des DEDG. □

Résumé

Les géotextiles de protection sont utilisés dans la constitution des étanchéités des installations de stockage de déchets (ISD) pour protéger la géomembrane contre le poinçonnement lié à la mise en œuvre de la couche de drainage puis au poids des déchets sus-jacents. Pour faciliter le dimensionnement de ces géotextiles, des tests en grandeur réelle ont été réalisés sur une zone d'expérimentation de 18 m × 30 m constituée d'une géomembrane en polyéthylène haute densité (PHED) couverte de plusieurs échantillons de géotextiles puis d'une couche de 50 cm de graviers. Un tombereau et une pelle ont ensuite roulé sur cette planche afin de simuler la circulation des engins lors de la réalisation d'un chantier réel. Ensuite, les dommages visibles sur la géomembrane ont été relevés avant le prélèvement d'échantillons pour la réalisation de tests de caractérisation de cet endommagement sous les sollicitations de mise en œuvre. Ensuite, en laboratoire, des essais d'endommagement statique à grande échelle ont été mis en œuvre pour simuler les sollicitations en service dues au poids des déchets.

Abstract

Protecting geotextiles are used in the design of watertight bottom liner of landfill sites, above the geomembrane to protect it against puncture during the installation of the drainage layer and, during the service life, to the weight of the waste to be put in place. To help in the design of the geotextile, a field test of 18 m × 30 m was undertaken. A geomembrane was put in place and several samples of geotextiles installed above it before the 50 cm thick gravel layer. A truck and a loader have run on the field tests to simulate the circulation of earthmovers. Observations of the geomembrane were undertaken in correlation with the type of geotextile installed on the area of concern. Geomembrane samples were taken for lab tests. Static damage tests were also undertaken to simulate the waste loading conditions.

Bibliographie

BADU-TWENEBOAH, K., GIROUD, J.-P., CARLSON, D.-S., SCHMERTMANN, G.-R., 1998, Evaluation of the effectiveness of HDPE geomembrane liner protection, *6th International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, USA, 25-29 mars 1998, p. 279-284.

CFG, 1995, *Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans les centres de stockage de déchets*, Comité Français des Géosynthétiques, Fascicule 11, 48 p.

CFG, 2001, *Guide pour la réalisation de planches d'essais d'endommagement*, Comité Français des Géosynthétiques, www.cfg.asso.fr, 16 p.

Ministère de l'Écologie et du Développement durable, 2006, Arrêté du 19 janvier 2006 modifiant l'arrêté du 9 septembre 1997 modifié relatif aux installations de stockage de déchets ménagers et assimilés, *Journal Officiel de la République Française*, 16 mars 2006.

REDDY, K.-R., SAICHEK, R.-E., 1998, A rational design for the protection of landfill geomembranes liners, *6th International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, USA, 25-29 mars 1998, p. 289-294.