INVESTIGATION DES DÉBITS DE FUITE DANS LES ÉTANCHÉITÉS COMPOSITES À L'ÉCHELLE MÉTRIQUE

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FLOW RATES THROUGH COMPOSITE LINERS AT THE METRIC SCALE

N. Touze-Foltz[1], M. Barroso[2], F. Cartaud[3]
[1]*Cemagref, Unité HBAN, BP 44, 92163 ANTONY Cedex*
[2]*LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal*
[3]*Scétauroute, 11 avenue du Centre, Saint-Quentin-en-Yvelines, .78286 Guyancourt Cedex*

RÉSUMÉ - On a étudié au laboratoire le comportement hydraulique de 17 étanchéités composites. Celles-ci comportaient systématiquement une couche d'argile compactée, parfois renforcée par un géosynthétique bentonitique (GSB). La couche d'argile compactée était dans certains cas recouverte par un géotextile. L'étanchéité minérale était surmontée par une géomembrane en PEHD de 2mm d'épaisseur présentant un défaut circulaire de 4mm de diamètre. Dans le cas où des GSB ont été utilisés, on a étudié l'influence de la préhydratation sur le débit de fuite résultant dans l'étanchéité composite. La comparaison des cas de figures où des GSB et des géotextiles seuls ont été utilisés montre que les débits obtenus avec les GSB sont nettement inférieurs.
Mots-clés : étanchéité composite, transferts advectifs, argile, géosynthétique bentonitique, géotextile.

ABSTRACT - The hydraulic behaviour of 17 composite liners was investigated at the metric scale in the laboratory using 1m diameter cells. A 0.27m thick layer of clay was compacted in all cells. A GCL or a geotextile was also used at the interface in a number of cases. A 4mm diameter hole was drilled in the flat HDPE geomembrane in all experiments. In the cases GCLs were used, the influence of the pre-hydration of the GCL at the beginning of the test was studied. When comparing situations where geotextiles and GCLs were used, results tend to show that even if GCLs incorporate a geotextile the flow rates obtained with GCLs are clearly lower that flow rates obtained in the case there is a geotextile in the interface, even when the geotextile is not fully saturated.
Keywords: Composite liners, advective flow, clay, geosynthetic clay liner, geotextile.

1. Introduction

L'utilisation de la combinaison d'une couche d'argile compactée surmontée d'une géomembrane est requise par nombre de réglementations pour l'étanchéité des fonds d'installations de stockage de déchets. Dans le cas où de l'argile naturelle n'est pas facilement accessible certaines réglementations autorisent l'utilisation de géosynthétiques bentonitiques (GSB) surmontant une couche de sol de conductivité hydraulique plus ou moins importante, sous réserve que l'équivalence vis-à-vis des transferts advectifs et diffusifs soit démontrée. En France, la substitution totale de la couche d'argile compactée d'un mètre d'épaisseur n'est pas recommandée (MEDD, 2002), mais c'est plutôt le renforcement de la barrière passive argileuse par le GSB qui est prôné. Par conséquent, les GSB sont le plus souvent associés à un sol de faible conductivité hydraulique sous la géomembrane. Dans le cas de figure où il n'est pas fait recours à un GSB, il arrive qu'un géotextile soit posé à la surface de la couche d'argile compactée, même si la réglementation ne le spécifie pas, pour limiter le poinçonnement de la géomembrane par des éléments agressifs présents à la surface de la barrière argileuse, et pour faciliter la soudure de la géomembrane. La question se pose alors de la performance hydraulique des différents types d'étanchéités composites dans le cas de figure où la géomembrane présente un endommagement. Pour étudier ce point, 17 étanchéités composites différentes ont été reconstituées au laboratoire à l'échelle métrique. Les résultats obtenus seront présentés et discutés dans le paragraphe 4 de cet article, après une rapide présentation des matériaux et des méthodes dans le paragraphe 2 et du programme expérimental dans le paragraphe 3.

2. Matériels et méthodes

2.1. Liquides

Trois liquides différents ont été utilisés :

- une solution de chlorure de sodium de faible force ionique (10^{-3} Molaire) utilisée comme fluide de préhydratation pour le GSB1 et notée FP ;
- un lixiviat réel (LR) échantillonné dans le basin de collecte de lixiviats d'une installation de stockage de déchets française âgée approximativement de 15 ans (Guyonnet et al., 2005) ;
- de l'eau distillée (ED).

2.2. Sols

Trois sols différents ont été utilisés dans cette étude. Le premier appelé S1 dans la suite était un mélange de sable fin et de limon argileux à 50 % en masse sèche, dont la conductivité hydraulique mesurée au laboratoire était voisine de 10^{-9} m/s. Le second sol noté S2 était un sol argileux en provenance d'une installation de stockage de déchets du Portugal (Barroso, 2005) de conductivité hydraulique égale à 3×10^{-10} m/s. S1 et S2 ont respectivement été utilisés en association avec les GSB 1 et 2. S3 était un sol argileux provenant d'une installation de stockage de déchets française de conductivité hydraulique égale à 2×10^{-10} m/s.

2.3. Geosynthétiques

Une géomembrane lisse en PEHD de 2mm d'épaisseur a été utilisée dans toutes les expérimentations. Les deux GSB utilisés contenaient de la bentonite sodique naturelle contenue par un géotextile tissé et un géotextile aiguilleté. Les deux GSB étaient eux-mêmes aiguilletés. La bentonite était sous forme granulaire dans le GSB1 et en poudre dans le GSB2. La masse sèche de bentonite dans les deux GSB était respectivement égale à 5,3 kg/m² et 4,67 kg/m² et les teneurs en eau initiales égales à 9% et 9,5% respectivement. Ces deux GSB provenaient de deux producteurs différents.
Trois géotextiles différents ont été placés à l'interface des étanchéités composites pour les expérimentations réalisées. Leur choix était fondé sur les résultats d'une enquête réalisée par Cartaud et al. (2005) sur les différents types de géotextiles utilisés sous la géomembrane. Le premier, noté GA, non tissé aiguilleté était le plus fréquemment cité dans les résultats de l'enquête, avec une masse surfacique égale à $300 g.m^{-2}$. Le géotextile GB était également un non tissé aiguilleté de $330 g.m^{-2}$ fourni par un producteur différent. Enfin, le géotextile GC était un géotextile non tissé thermolié de masse surfacique égale à $130 g.m^{-2}$.

2.4. Etanchéités composites étudiées

Trois types différents d'étanchéités composites ont été étudiés :

- des étanchéités composites géomembrane/GSB/argile compactée ;
- des étanchéités composites géomembrane/géotextile/argile compactée ;
- des étanchéités composites géomembrane/ argile compactée.

2.5. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental était constitué de trois cellules identiques d'un mètre de diamètre présentées à la figure 1. Les cellules comportent trois parties : (a) une embase fixée à la poutre d'une presse hydraulique destinée à appliquer la contrainte mécanique, (b) un cylindre intermédiaire d'un mètre de diamètre et de 0,3m de haut posé sur l'embase et destiné à recevoir le sol compacté (S1, S2 ou S3) et (c) un cylindre supérieur de 0,25m de haut dans lequel est mise en place une couche granulaire destinée à simuler la présence d'un couche drainante.



Figure 1 : Photographie du dispositif expérimental utilisé

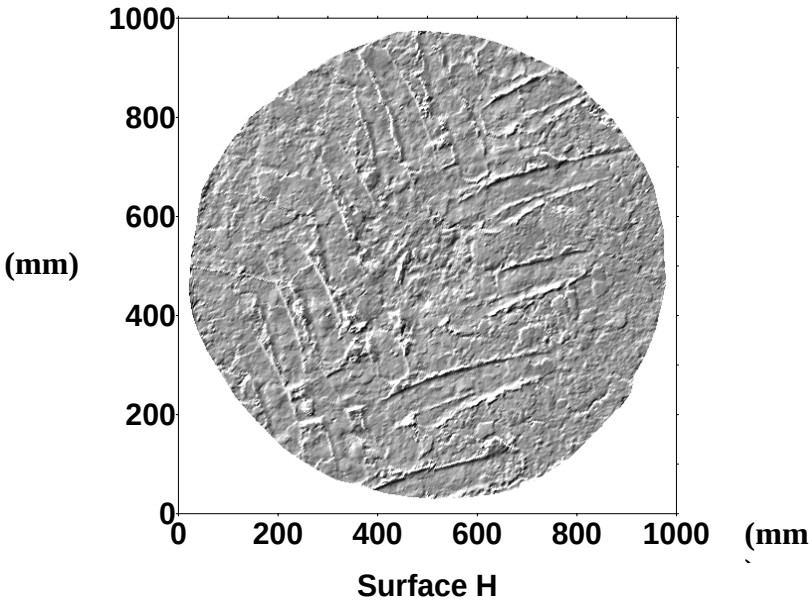


Figure 2. Relief ombré de la surface argileuse du sol S3 (d'après Cartaud et al., 2005)

Le sol (S1, S2 or S3) a été soigneusement compacté en 4 couches en utilisant un marteau pneumatique. Dans le cas du sol S3 qui n'a jamais été utilisé en combinaison avec un GSB, la surface du sol a été moulée en utilisant le protocole décrit par Cartaud et al. (2005) dans le but de disposer d'un état de surface de sol argileux représentatif du processus de compactage in situ. Cet état de surface, représenté à la figure 2, avait en effet été moulé sur un fond d'installation de stockage de déchets immédiatement après le compactage du matériau argileux. Dans le cas où un géotextile a été placé à l'interface entre la géomembrane et le sol argileux compacté, on a étudié différents cas de figure correspondant à des géotextiles préhydratés ou non. Pour les GSB, c'est systématiquement le géotextile non tissé aiguilleté qui a été placé au contact de la géomembrane.

Pour un des essais réalisés, le GSB1 a été préhydraté par immersion dans FP pendant deux heures et demi, sans contrainte. Cette durée était nécessaire pour que la teneur en eau de la bentonite atteigne une valeur de 100% qui correspond aux recommandations du CFG. (Comité Français des Géosynthétiques, 1998).

Dans tous les essais, la géomembrane comportant un défaut de 4mm de diamètre a été placée soit sur le GSB, soit sur un géotextile, soit directement au contact de l'argile. Une connexion en “Y” était collée au-dessus du défaut de la géomembrane. Deux tuyaux étaient ensuite insérés dans cette connexion, l'un relié à un vase de Mariotte permettant la mesure du flux, et le second servant de purge. Un géotextile antipoinçonnant de masse surfacique égale à 828 g/m^2 a été placé au-dessus de la géomembrane de manière à la protéger de potentiels endommagements par la couche granulaire 25/35 mm. Puis une plaque en acier a été posée sur la couche granulaire de manière à transmettre aux étanchéités des contraintes comprises entre 6 et 134 kPa par l'intermédiaire de la presse hydraulique. Une fois ces opérations effectuées une charge hydraulique de 0,3m a été appliquée sur les différentes étanchéités composites réalisées, et les débits de fuite résultants ont été mesurés.

L'évaporation a été mesurée à proximité des colonnes dans un tube vertical de 4mm de diamètre dans le but de vérifier que la baisse de niveau dans le vase de Mariotte était bien imputable à une infiltration dans les différentes colonnes.

3. Résultats obtenus

Le tableau 1 synthétise les conditions expérimentales des 17 essais réalisés.

3.1. Etanchéités composites argile/géomembrane

Les essais 4 et 5 ont été réalisés en utilisant le sol S3 compacté selon le protocole expérimental décrit par Cartaud et al. (2005). Pour une contrainte normale faible, égale à 6 kPa, l'interface entre la géomembrane et l'argile compactée est très ouverte. Par conséquent, un débit de fuite très important a été mesuré, égal à 7×10^{-6} m^3/s. Ce débit de fuite ne correspond pas à l'infiltration dans la barrière argileuse mais au débit en périphérie de la cellule où un écoulement était autorisé. Ce résultat n'est donc pas représentatif du comportement in situ de telles étanchéités composites. Sous 64 kPa en revanche, le débit mesuré représenté à la figure 3 était faible et une période de 4 mois de mesure a été nécessaire pour pouvoir quantifier ce flux et atteindre un régime permanent avec un débit de fuite voisin de 5×10^{-12}m^3.s^{-1}. Une autre des caractéristiques de ces expérimentations est la durée nécessaire au liquide pour parcourir les 0,5m séparant le défaut de la périphérie de la colonne. Sous une contrainte de 6 kPa, le liquide est apparu environ une minute après le début de l'essai, alors que sous une contrainte de 64 kPa, aucun écoulement n'a pu être observé en périphérie de la cellule pendant les 4 mois d'essai. Ces résultats montrent que même pour le cas d'une couche d'argile compactée avec une surface représentative de conditions de terrain, de faibles débits de fuite peuvent être obtenus, du même ordre de grandeur que ceux obtenus avec des GSB. Des expérimentations complémentaires restent à effectuer avec des états de surface d'argile compactées différents pour pouvoir étendre ce résultat à toutes les conditions de terrain, ou au contraire l'infirmer.

Tableau 1. Synthèse des essais réalisés

N° d'essai	Sol	GSB ou GT	Liquide	Contrainte (kPa)	Débit de fuite (m3/s)
1	S1	GSB1	FP + LR	50	1×10^{-12}
2	S1	GSB1PH	FP + LR	50	6×10^{-12}
3	S2	GSB2	ED	50	2.7×10^{-12}
4	S3	–	ED	6	7×10^{-6}
5	S3	–	ED	64	5×10^{-12}
6	S3	GA	ED	64	1×10^{-9}
7	S3	GAPH	ED	64	5×10^{-8}
8	S3	GB	ED	64	4×10^{-8}
9	S3	GBPH	ED	64	4×10^{-8}
10	S3	GC	ED	64	1×10^{-9}
11	S3	GCPH	ED	64	1×10^{-9}
12	S3	GA	ED	134	9×10^{-10}
13	S3	GAPH	ED	134	2×10^{-7}
14	S3	GB	ED	134	2×10^{-8}
15	S3	GBPH	ED	134	2×10^{-8}
16	S3	GC	ED	134	1×10^{-9}
17	S3	GCPH	ED	134	1×10^{-9}

$_{PH}$: préhydraté ; FP : fluide de préhydratation ; LR : lixiviat réél ; ED : eau distillée

3.2. Influence de la présence d'un géotextile à l'interface

Les essais ont été réalisés sur une durée de 8 heures qui correspondait approximativement au temps nécessaire pour l'atteinte d'un régime permanent.

On a étudié l'impact de la préhydratation du géotextile préalablement à sa mise en place dans la colonne. Le comportement des géotextiles GB et GC était indépendant de l'état préhydraté ou non, quelle que soit la contrainte mécanique appliquée, alors que les débits de fuite obtenus avec le géotextile GA en dépendaient fortement comme le montre la figure 4. D'après Cartaud et al. (2005) ces résultats sont liés aux courbes de rétention des géotextiles étudiés, et par conséquent à leur capacité à s'hydrater et à se drainer. Ces résultats mettent en évidence que des géotextiles qui ont les mêmes caractéristiques macroscopiques comme les géotextiles GA et GB peuvent se comporter de manière très différente hydrauliquement.

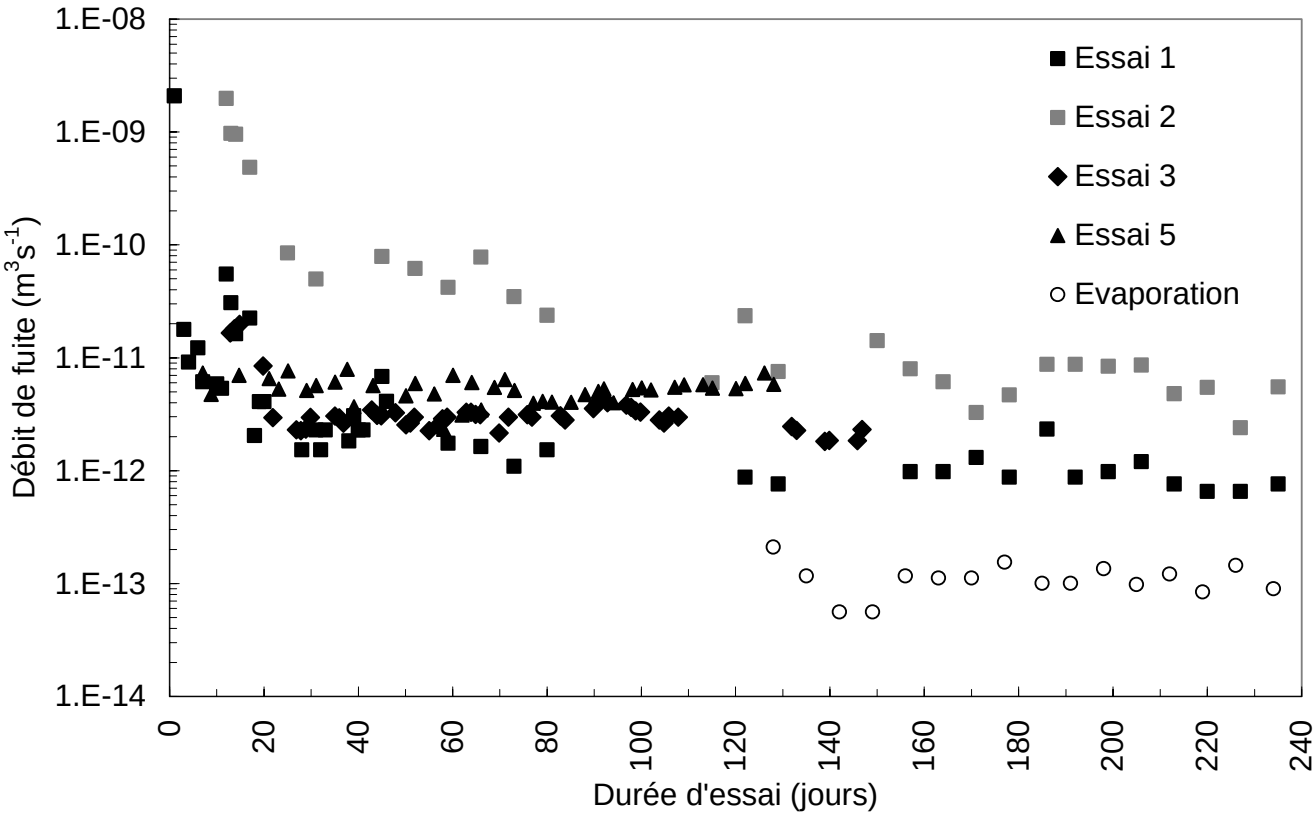


Figure 3. Evolution temporelle des débits de fuite mesurés pour les essais 1, 2, 3 et 5 comparés à l'évaporation.

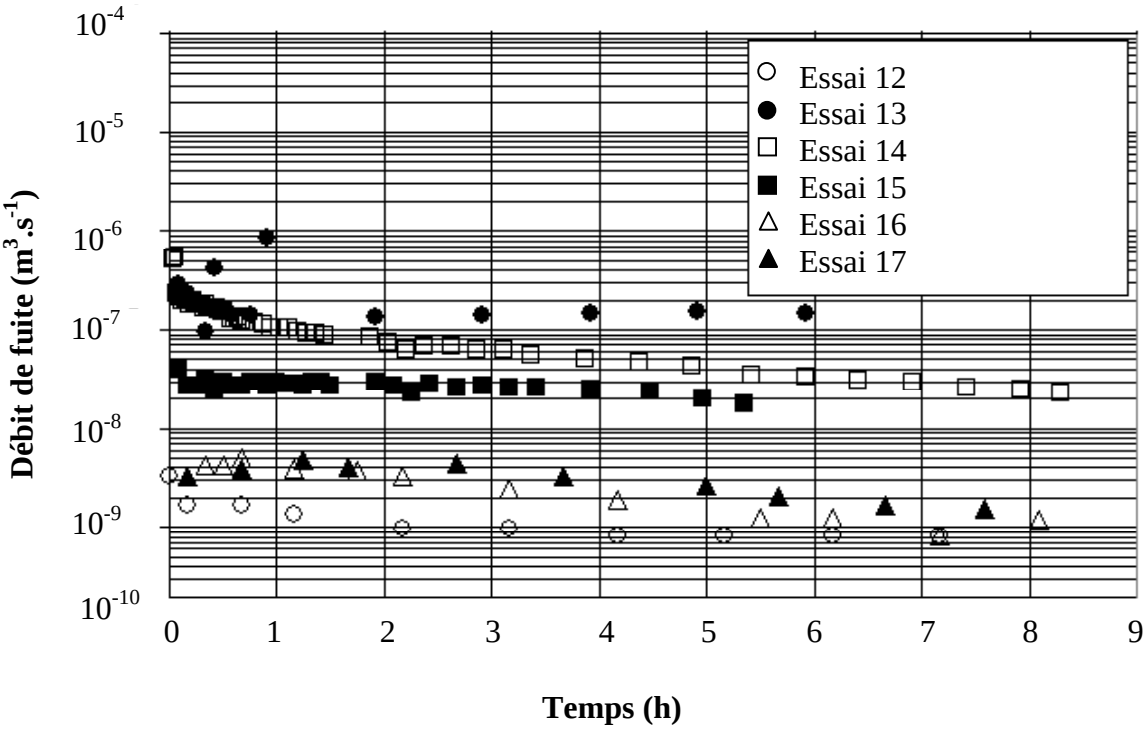


Figure 4. Débits de fuite dans l'étanchéité composite en fonction du géotextile utilisé à l'interface sous une contrainte normale de 134 kPa

3.3. Comportement des étanchéités composites avec GSB

La figure 3 présente les résultats obtenus dans les essais 1, 2 et 3 pour lesquels un GSB était situé sous la géomembrane.

La première observation qui peut être faite est que dans tous les cas une période de 4 mois a été nécessaire avant d'atteindre le régime permanent. Les débits obtenus dans les trois cas sont significativement supérieurs à l'évaporation mesurée dans le laboratoire. Par conséquent les débits mesurés sont représentatifs d'une infiltration dan l'étanchéité composite. Les débits mesurés en régime permanent étaient approximativement égaux à 10^{-12} m^3/s pour l'essai 1 alors que le débit de fuite moyen était voisin de 6×10^{-12} m^3/s pour l'essai 2. Le débit de fuite plus important obtenu sur cette colonne est attribué au mode de préhydratation du GSB, sans contrainte de confinement. En effet, Petrov et al. (1997) ont mis en évidence le fait que la préhydratation sous contrainte avait pour effet l'obtention d'une moindre conductivité hydraulique. Les résultats présentés ici montrent l'effet néfaste de la préhydratation sans contrainte sur le débit de fuite résultant dans l'étanchéité composite.

Une comparaison des résultats obtenus dans les essais 1 et 3 montre que les débits de fuite sont du même ordre de grandeur, ce qui signifie que sur la durée d'essai considérée ici la percolation de lixiviat réel n'a pas d'impact significatif sur le GSB par rapport à de l'eau distillée. Une comparaison plus approfondie des résultats ne peut pas être entreprise car les matériaux (GSB et sol compacté) constitutifs des essais 1 et 3 sont différents, même si les propriétés hydrauliques attendues sont du même ordre de grandeur.

3.4. Comparaison des débits de fuite obtenus en présence de géotextiles et de GSB

Dans les essais comportant les géotextiles GA initialement sec, GC, ainsi que pour les colonnes comportant un GSB, on n'a pas noté d'écoulement en périphérie des colonnes en cours d'essai. Par conséquent les débits mesurés en régime permanent sont uniquement imputables à de l'infiltration dans le sol.

Pour autant, différents comportements ont été observés selon qu'un géotextile seul ou un GSB était utilisé. En effet, dans le cas d'un géotextile seul le régime permanent était atteint en 8 heures et le débit de fuite le plus faible mesuré était égal à 10^{-9} m^3/s.

Au contraire, pour toutes les étanchéités composites comportant un GSB, une période de 4 mois a été nécessaire pour atteindre le régime permanent. De plus, les débits mesurés en régime permanent étaient compris entre 1×10^{-12} et 6×10^{-12} m^3/s ce qui montre que le géotextile se comporte différemment selon qu'il est utilisé seul ou incorporé à un GSB. Les possibles explications de ce phénomène sont liées à l'extrusion de la bentonite dans le géotextile et à la capacité de gonflement de la bentonite sodique naturelle spécialement quand elle est confinée, ce qui concourt à réduire la capacité de débit dans le plan du géotextile. Des recherches complémentaires sont nécessaires pour finaliser l'analyse de ces comportements.

4. Conclusions

Le comportement hydraulique d'étanchéités composites à l'échelle métrique a été étudié pour différents types d'étanchéité composites. Les résultats montrent que si de forts débits de fuite peuvent être obtenus dans le cas ou une argile compactée est utilisée seule sous une géomembrane sous de faibles contraintes normales, une forte réduction du débit de fuite est observée pour une contrainte de 64 kPa. Dans ce cas de figure, pour l'état de surface d'argile utilisé dans les expérimentations décrites ici, le débit obtenu avec l'étanchéité composite argile/géomembrane est du même ordre de grandeur que celui obtenu dans les étanchéités composites avec GSB. Ce résultat obtenu sur un cas de figure d'état de surface reste à confirmer avec des états de surface de barrières argileuses compactées différents.

L'impact d'un géotextile utilisé à l'interface sur le flux dépend de ce qu'il est utilisé seul, ou au sein d'un GSB. Des débits de fuite très significativement supérieurs sont obtenus dans tous les cas de figure où un géotextile seul est utilisé entre la géomembrane et l'argile, par comparaison au cas des étanchéités composites argile/géomembrane et argile/GSB/géomembrane.

L'impact du géotextile dépend également de son mode de fabrication.

Enfin, les résultats montrent que la préhydratation du GSB sans contrainte conduit à l'obtention d'un débit de fuite 6 fois supérieur à celui obtenu dans le cas où le GSB n'est pas préhydraté préalablement à la percolation de liquide à travers le défaut dans la géomembrane.

5. Remerciements

Les auteurs sont reconnaissants à la Fundação Calouste Gulbenkian (Portugal) et à la Région Ile-de-France pour les financements partiels des thèses de doctorat de Dr. M. Barroso et Dr. F. Cartaud.

6. Références bibliographiques

Barroso M. (2005). Fluid Migration through Geomembrane Seams and through the Interface between Geomembrane and Geosynthetic Clay Liner. Ph.D. Thesis, University Joseph Fourier of Grenoble (France) and University of Coimbra (Portugal), 215 p. En anglais.

Cartaud F., Touze-Foltz N., Duval Y. (2005). “Experimental investigation of the influence of a geotextile beneath the geomembrane in a composite liner on the leakage through a hole in the geomembrane”, *Geotextiles and Geomembranes* 23, 117 – 143.

Comité Français des Géosynthétiques (1998). Recommandations Générales pour la Réalisation d'Etanchéité par Géosynthétiques Bentonitiques, Fascicule n°12, 56 p.

Guyonnet D., Gaucher E., Gaboriau H., Pons C.-H., Clinard C., Norotte V., Didier G. (2005). “Geosynthetic clay liner interaction with leachate: Correlation between permeability, microstructure, and surface chemistry”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 131 (6), 740 – 749.

MEDD (2002). Guide de recommandations à l’usage des tiers-experts pour l’évaluation de “l’équivalence” en étanchéité passive de centre de stockage. 20 p. (in French).

Petrov R.J., Rowe R.K. (1997). “Geosynthetic clay liners (GCL) – Chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance”, *Canadian Geotechnical Journal* 34, 863 – 885.