

DÉBITS DANS UNE ÉTANCHÉITÉ COMPOSITE GÉOMEMBRANE BITUMINEUSE / GÉOSYNTHÉTIQUE BENTONITIQUE

FLOW RATE IN COMPOSITE LINERS INCLUDING BITUMINOUS GEOMEMBRANES AND GCLS

Hajer BANNOUR¹, Nathalie TOUZE FOLTZ¹, Thierry GISBERT²

¹ Irstea, Antony, France

² Arcadis, Paris, France

RÉSUMÉ – Plusieurs études ont été réalisées afin de cerner le comportement des géosynthétiques bentonitiques (GSB) surmontés de géomembranes endommagées (GM) en polyéthylène haute densité (PEHD) dans les étanchéités composites. Dans ce cas, le contact entre la GM et le GSB a été quantifié en termes de débit de fuite et de transmissivité d'interface pour différentes configurations. Cependant, on pourrait imaginer que l'utilisation d'autres types de GM, comme les GM bitumineuses, pourrait être bien adaptée pour des applications hydrauliques. Une quantification des débits a été réalisée dans le cas d'une GM bitumineuse (GM-B) endommagée située au-dessus d'un GSB. Cela correspond à une conception alternative pour un canal projeté en France.

Mots-clés : Géosynthétiques, barrière composite, géosynthétiques bentonitiques, géomembranes bitumineuses, débit de fuite.

ABSTRACT – Some studies were performed in the past years regarding the behaviour of geosynthetic clay liners (GCLs) as part of a composite liner composed by a GCL located under a high density polyethylene (HDPE) geomembrane (GM) exhibiting a hole. In this case, the contact between the GM and the GCL was quantified in terms of flow rate and interface transmissivity. However one could imagine that the use of other GMs, like bituminous geomembranes (B-GMs) associated to a GCL, could be adapted for hydraulic applications. A quantification of flow rates was thus performed through laboratory tests for the case of a damaged B-GM located on top of a GCL. This corresponds to an alternative design for a canal projected in France at the moment.

Keywords: Geosynthetics, composite liners, geosynthetic clay liner, bituminous geomembrane, flow rate

1. Introduction

Les géomembranes bitumineuses (GM-B) sont adoptées dans plusieurs ouvrages en géotechnique et protection de l'environnement et plus spécialement en hydraulique, infrastructure et secteurs du transport comme le stockage et le transport des eaux. Dans ces cas, la GM-B est utilisée afin d'assurer l'étanchéité des bassins de stockage ou canaux de transport des eaux (Domange, 1983 ; Duquennois et al., 1995 ; Etienne et al., 1995 ; Breul et Herment, 1998 ; Potié, 1999 ; Fagon et al., 1999 ; Flaquet-Lacoux et al., 2005) mais également l'étanchéité, le renforcement et la protection des digues et des réservoirs (Tisserand, 1983 ; Alonso et al., 1990 ; Girard et al., 1996 ; Poulain et al., 1997 ; Breul et Herment, 1997 ; Breul et al., 1998 ; Breul et Eldrige, 2009) et aussi des bassins de rétention (Breul et al., 2006) et la protection d'aquifères contre l'impact environnemental des chaussées (Coppinger et al., 2002). A part les applications environnementales, les GM-B ont été introduites également dans les installations de couvertures de stockage de déchets faiblement radioactifs ou industriels ainsi que dans les aires de maturation des mâchefers (Ossena et al., 1997 ; Potié et al., 1997 ; Faure et Itty, 1999 ; Peggs, 2008 ; Marchiol et al., 2006), en applications minières (Breul et al., 2008), ferroviaires (Imbert et al., 1997), dans les tunnels (Benchet et al., 2011), dans les fossés de drainage (Imbert et Carcenac, 1997), ainsi que dans les couches de fondations des chaussées (Breul et Herment, 1995, 1997)

Comme présenté par Breul et al. (2008), la structure d'une GM-B est la suivante (figure 1):

- un film anti perforation lié à la face inférieure de la GM qui prévient, entre autre, la pénétration des racines des plantes dans la GM ;
- un renforcement en voile de verre qui assure la stabilité de la GM lors de sa fabrication et par conséquent sa résistance lors de son exploitation ;
- un géotextile en polyester non tissé dont la masse surfacique est comprise entre 200 et 400 g/m²;

- une imprégnation et enduction de bitume et de filler qui assurent l'imperméabilité, la longévité et la haute résistance du produit ;
- un revêtement de sable fin sur la face supérieure de la GM qui offre une meilleure adhérence sur pente assurant ainsi une meilleure sécurité lors de la mise en œuvre et en service ; ce revêtement fournit également une protection contre les dégradations engendrées par les radiations UV.

D'un autre côté, les constructeurs œuvrant pour les projets nécessitant l'utilisation des GM en étanchéités composites avec géosynthétiques bentonitiques (GSB), limitent souvent leur choix aux GM en polyéthylène haute densité (PEHD) sans doute sur la base de leurs expériences dans la conception des installations de stockage de déchets. Les recherches entreprises sur les barrières composites composées de GM en PEHD et de GSB dans le cas de l'existence d'un défaut dans la GM visent à quantifier le débit de fuite et la transmissivité de l'interface séparant la GM et le géotextile supérieur du GSB. L'objectif de cet article est donc de fournir aux concepteurs et/ou constructeurs des éléments pertinents afin de considérer éventuellement un plus large choix de GM dans leurs ouvrages dans le but d'utiliser une approche plus rationnelle pour la sélection et le choix des GM dans les applications hydrauliques.

Dans cette étude, on présente tout d'abord des résultats antérieurs relatifs à la mesure de la transmissivité d'interface dans les étanchéités composites composées de GM en PEHD et de GSB. Ensuite, on introduit les caractéristiques des matériaux testés et la procédure expérimentale de mesure de la transmissivité d'interface. Finalement on présente les résultats obtenus en termes de débit de fuite et de transmissivité d'interface obtenus pour une étanchéité composite contenant une GM-B et un GSB calcique.

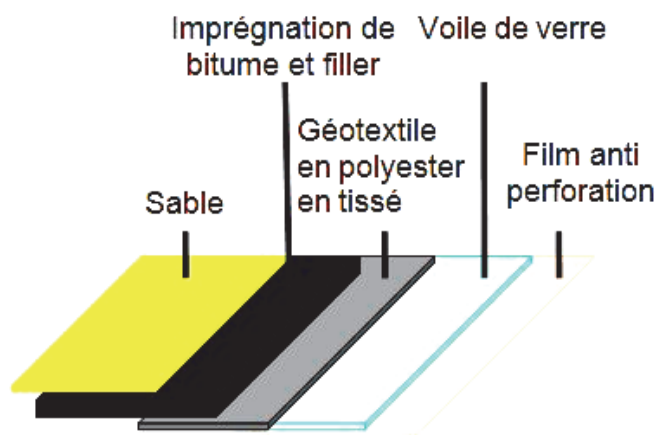


Figure 1. Structure d'une GM-B

2. Débit de fuite et transmissivité d'interface dans une étanchéité composite avec GSB incluant une GM présentant un défaut

Le travail effectué durant les années précédentes (Brown et al., 1987 ; Harpur et al., 1993; Touze-Foltz, 2002 ; Touze-Foltz et al., 2002 ; Cartaud et Touze-Foltz, 2004 ; Barroso et al., 2006, 2008, 2010 ; Mendes et al., 2010) en ce qui concerne le comportement des étanchéités composites contenant un GSB et une GM endommagée en PEHD était concentré sur la détermination du débit de fuite et de la transmissivité d'interface dans l'interface séparant la GM et le géotextile supérieur du GSB.

Le débit traversant le défaut dans la GM dépend, comme indiqué par Brown et al. (1987), de la qualité de contact entre la GM et le sol sous-jacent. D'après ces auteurs, si le contact n'est pas parfait, le liquide peut migrer à travers le défaut, se propager latéralement à travers l'espace existant entre la GM et le sol sous-jacent, appelé interface. Ce débit d'interface couvre une surface appelée surface mouillée. Finalement, le liquide s'infiltré dans le sol. Le contact entre la GM et le GSB peut être quantifié en termes de débit de fuite et de transmissivité d'interface.

2.1. Solution analytique pour le calcul de la transmissivité d'interface dans une étanchéité composite

Pour calculer la transmissivité d'interface, θ , une solution analytique développée par Touze Foltz et al. (1999) pour le cas d'un défaut circulaire dans la GM a été utilisée. Cette solution analytique se base sur les hypothèses suivantes :

- la transmissivité d'interface est uniforme ;
- le débit de fuite dans la couche transmissive est radial ;
- le débit de fuite est considéré en régime permanent ;
- le sol compacté, le GSB et l'interface GM-GSB sont saturés ;
- le flux à travers la barrière passive (sol compacté + GSB) est unidimensionnel et vertical ;

Le débit de fuite final (régime permanent) de l'essai est utilisé dans les calculs. Il est à noter que la transmissivité d'interface calculée à l'aide de la solution analytique décrite ci-dessous doit être considérée comme une transmissivité apparente à cause de l'existence de chemins préférentiels d'écoulement durant l'essai qui ne sont pas considérés lors du développement de la solution analytique employée. Ces chemins préférentiels sont dus à l'application d'un chargement à travers la couche granulaire présentant des points de contacts irréguliers avec la GM. Dans une étanchéité composite, la part la plus importante du liquide, qui passe à travers le défaut de la GM, se déplace latéralement jusqu'à une certaine distance avant de pénétrer dans le GSB et les couches de sols sous-jacentes. Sous les conditions d'essais réalisées dans ce travail, le rayon de la surface mouillée est le rayon de la cellule. Les équations 1 à 5 ci-dessous s'appliquent dans le cas où la charge hydraulique est nulle sur un certain rayon de la surface mouillée qui, dans notre cas représente le rayon de la cellule :

$$Q = \pi r_0^2 k_s \frac{h_w + d_s}{H_s} - 2 \pi r_0 \theta \alpha [AI_1(\alpha r_0) - BK_1(\alpha r_0)] \quad (1)$$

où : Q est le débit de fuite en régime permanent ; r_0 est le rayon du défaut circulaire ; K_s est la conductivité hydraulique de l'ensemble GSB- sol compacté ; h_w est la charge hydraulique ; d_s l'épaisseur de l'ensemble GSB-sol compacté ; θ est la transmissivité d'interface ; I_1 et K_1 sont les fonctions de Bessel modifiées au premier ordre ; et α , A and B sont les paramètres donnés par les équations 2 à 5 suivantes :

$$\alpha = \sqrt{\frac{k_s}{\theta d_s}} \quad (2)$$

$$A = -\frac{h_w K_0(\alpha R) + H_s (K_0(\alpha R) - K_0(\alpha r_0))}{K_0(\alpha r_0) I_0(\alpha R) - K_0(\alpha R) I_0(\alpha r_0)} \quad (3)$$

$$B = \frac{h_w K_0(\alpha R) + H_s (I_0(\alpha R) - I_0(\alpha r_0))}{K_0(\alpha r_0) I_0(\alpha R) - K_0(\alpha R) I_0(\alpha r_0)} \quad (4)$$

$$AI_1(\alpha R) + BK_1(\alpha R) - H_s = 0 \quad (5)$$

où K_0 et I_0 sont les fonctions de Bessel modifiées du premier ordre et R le rayon de la surface mouillée.

2.2. Études antérieures sur la transmissivité d'interface dans les étanchéités composites

Plusieurs situations ont été testées dans le passé dans le but d'évaluer le flux traversant une étanchéité composite formée d'une GM en contact avec un GSB (Harpur et al., 1993 ; Touze-Foltz, 2002 ; Touze-Foltz et al., 2002 ; Cartaud et Touze-Foltz, 2004 ; Barroso et al., 2006, 2008, 2010 ; Mendes et al., 2010). Harpur et al. (1993) ont vérifié qu'en régime permanent, la part la plus importante du liquide traversant la GM prend place le long de l'interface, à travers le géotextile supérieur du GSB et le long des vides existants entre le géotextile supérieur du GSB et la bentonite. Barroso et al. (2006, 2010) ont examiné l'influence de la charge hydraulique, de la pré-hydratation initiale du GSB et de la contrainte de confinement appliquée sur l'étanchéité composite. Les résultats ont montré qu'il semble difficile d'établir des règles générales exprimant l'influence de ces paramètres sur la transmissivité d'interface. Cependant, il semble que, en ce qui concerne le débit de fuite, il est important de prendre en considération simultanément la teneur en eau initiale de l'éprouvette de GSB ainsi que la contrainte de confinement appliquée (Barroso et al., 2006). La contrainte de confinement affecte différemment le débit de fuite, en fonction de la teneur en eau initiale de l'éprouvette de GSB. En effet, le débit de fuite dans des GSB pré-hydratés est d'un ordre de grandeur plus important, sous une contrainte de confinement de 50 kPa, que sous 200 kPa. D'un autre côté, pour les échantillons non pré-hydratés, les débits de fuite sont similaires pour les deux contraintes en régime permanent (Barroso et al., 2006).

La situation dans laquelle la GM en PEHD en contact avec le GSB est texturée a été également traitée (Barroso et al., 2008). Les résultats montrent que les essais sont reproductibles et que la texture de la GM a un faible effet sur la variation du débit de fuite obtenue en régime permanent, bien que, au début des essais, des débits de fuite plus importants aient été obtenus avec les GM lisses par rapport aux GM texturées.

Ceci suggère que, dans les phases préliminaires des essais, l'eau coule plus aisément dans l'interface lorsqu'une GM lisse est utilisée. La texture de la GM semble réduire l'espace existant au niveau de l'interface pour le flux d'eau. Cependant, lors de l'avancement des essais, la bentonite sodique contenue dans le GSB, en gonflant, permet d'assurer au cours du temps, un meilleur contact entre la GM et le GSB.

Plus récemment, l'effet de la nature de la bentonite contenue dans le GSB, qu'elle soit sodique ou calcique, conduisant à des flux différents, a été étudié (Mendes et al., 2010). Ces auteurs ont conclu que la nature de la bentonite et le processus de fabrication des GSB étudiés n'affectent pas la transmissivité d'interface en régime permanent. Les auteurs ont également noté que le diamètre du défaut dans la GM, de dimension comprise entre 4 et 10 mm, ne présente pas d'effet significatif sur le débit de fuite dans l'étanchéité composite; le gonflement de la bentonite sodique a été efficace pour bloquer l'écoulement issu du défaut de la GM, conduisant ainsi à la réduction du débit de fuite. Les résultats suggèrent que les GSB contenant de la bentonite sodique, dont les conductivités hydrauliques augmentent à cause du phénomène d'échange cationique, peuvent maintenir et assurer des performances remarquables en termes de transmissivités d'interface et de débits de fuites dans l'étanchéité composite GM-GBS.

3. Expérimentation

3.1. Matériaux testés

Un GSB cousu renfermant de la bentonite calcique a été testé dans cette étude en contact avec une GM-B. Les deux géotextiles du GSB sont tout les deux tissés. La masse surfacique sèche de la bentonite contenue dans le GSB est de 8,1 kg/m². La GM-B utilisée, dont les caractéristiques de fabrication sont présentées dans le tableau 1, présente deux faces d'aspects et de textures différentes : une face lisse présentant un film fin (figure 2) et une face rugueuse imprégnée de sable (figure 3).

Tableau 1. Caractéristiques de la GM-B utilisée

| Composition | | | |
|----------------------------------------|---------------------|------------------|--------|
| Désignation | Fonctionnalité | Unité | Valeur |
| Voile de verre | Renforcement | g/m ² | 50 |
| Géotextile non tissé | Renforcement | g/m ² | 400 |
| Bitume oxydé | Liant | g/m ² | 7310 |
| Sable | Finition de surface | g/m ² | 217 |
| Film anti perforation | Finition de surface | g/m ² | 15 |
| Épaisseur (sur produit fini) EN 1849-1 | | mm | 5,6 |

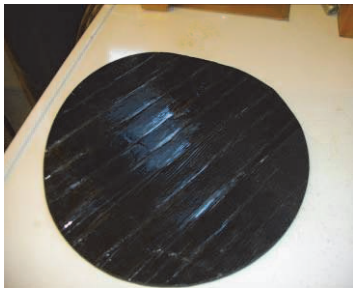


Figure 2. Face lisse de la GM-B

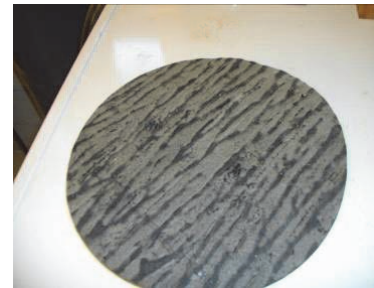


Figure 3. Face rugueuse de la GM-B

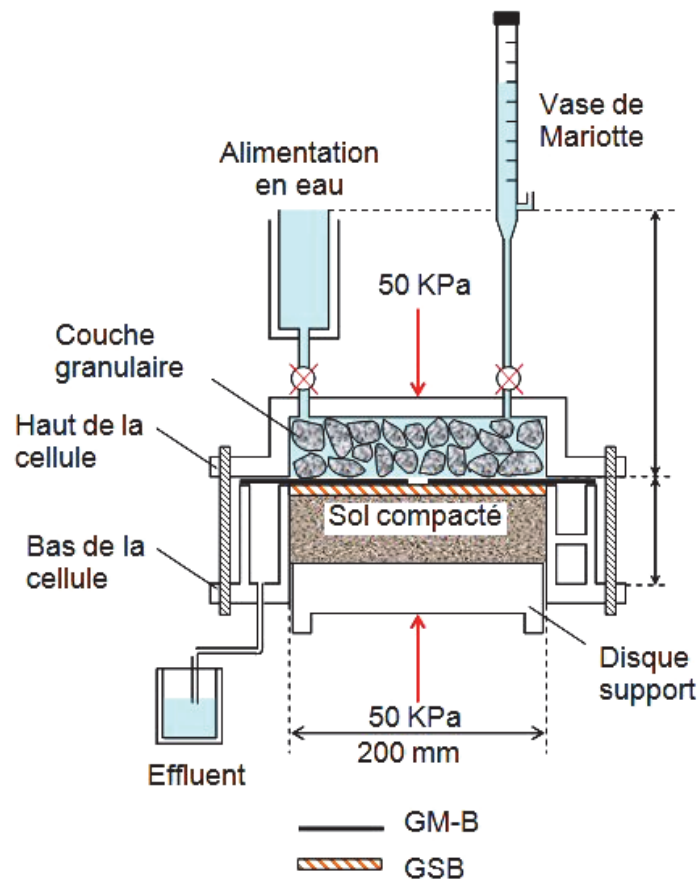


Figure 4. Schématisation du dispositif expérimental utilisé pour la quantification des débits de fuite dans les étanchéités composites au laboratoire à l'échelle décimétrique (d'après Mendes, 2010)

3.2. Appareillage et montage

Les essais de transmissivité d'interface sont réalisés sur une cellule d'essais spécialement conçue pour la mesure du débit de fuite à travers une étanchéité composite (figure 4). Comme décrit précédemment (Touze-Foltz, 2002 ; Touze-Foltz et al., 2002 ; Cartaud et Touze-Foltz, 2004 ; Barroso et al., 2006, 2008, 2010 ; Mendes et al., 2010), la cellule en Plexiglas renferme quatre parties :

- une base inférieure pour supporter le sol compacté et à travers laquelle on applique la contrainte de confinement ;
- une plaque cylindrique de 200 mm de diamètre et de 80 mm d'épaisseur représentant la partie inférieure de la cellule pour accueillir le sol compacté et l'échantillon de GSB ;
- une plaque granulaire de drainage reconstituée en résine comportant des inclusions rigides ;
- un cylindre supérieur pour renfermer la couche granulaire.

Pour monter l'essai, on commence par compacter le sol support sur la partie inférieure de la cellule sur une épaisseur de l'ordre de 6 cm tout en veillant à avoir une surface lisse au-dessous du GSB. On insère ensuite l'éprouvette de GSB et on met dessus la GM perforée artificiellement. On ajoute aussitôt la couche granulaire et on ferme la cellule à l'aide de la partie supérieure en veillant à ce que l'ensemble soit étanche. Une fois la cellule fermée et la charge d'eau imposée, la GM-B assure l'étanchéité de la partie supérieure de la cellule. Lorsque le débit de fuite est important, ce dernier est mesuré à l'aval de la cellule et dans le cas contraire, on réalise les lectures à l'amont de la cellule. Dans le but d'avoir des résultats comparables avec les différents résultats des études issues de la bibliographie (Barroso et al., 2006, 2008 ; Mendes et al., 2010), J'ai adopté un diamètre du défaut dans la GM de 4 mm, une charge d'eau imposée de 0,3m et le même sol support qu'utilisé par (tableau 2).

Tableau 2. Propriétés du sol support utilisé (adapté de Barroso et al., 2006)

| Pourcentage de fines (%) | Pourcentage d'argile (%) | Limites d'Atterberg D 4318 | | Proctor modifié ASTM D 1557 | | K_{CCL} (m/s) |
|--------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| | | w_L (%) | w_P (%) | w_O (%) | γ_{dmax} (KN/m ³) | |
| 73,6 | 40,5 | 54,2 | 23,7 | 13,6 | 19,1 | 8.10^{-11} |

K_{CCL} , la conductivité hydraulique du sol compacté; w_L , la limite de liquidité; w_P , la limite de plasticité; w_O , la teneur en eau à l'optimum Proctor; γ_{dmax} , la densité maximale à l'optimum Proctor.

4. Résultats et discussion

Comme on peut le noter sur la figure 5, le débit de fuite à l'interface entre la GM et le GSB décroît graduellement en fonction du temps durant 300 heures environ pour les deux configurations (face lisse et face rugueuse en contact avec le GSB). Au-delà, le débit de fuite reste constant ce qui correspond à l'établissement du régime permanent. Le tableau 3 résume les résultats de débits de fuite, de conductivités hydrauliques et de transmissivités d'interface obtenus en régime permanent. Les conductivités hydrauliques ont été obtenues en utilisant d'anciens résultats effectués sur des GSB de mêmes natures (géotextiles, nature de la bentonite, forme de bentonite, fabricant, masse surfacique sèche de bentonite). Ces essais permettent de mesurer les caractéristiques de gonflement, flux et perméabilité des GSB à l'aide d'un œdoperméamètre selon la norme NF P 84-705. Les transmissivités d'interface apparentes ont été obtenues à l'aide de la solution analytique (Touze-Foltz et al., 1999). Pour comparer les résultats des deux configurations selon la face en contact avec le GSB, les résultats montrent que la face lisse en contact avec le GSB génère des débits de fuite plus faibles que dans le cas de la face rugueuse en régime transitoire (figure 5). Ceci peut être expliqué par le fait la face rugueuse permet le stockage d'une plus grande quantité d'eau à l'interface en comparaison avec la face lisse. Le contact entre la GM-B présentant une face rugueuse et le GSB pourrait présenter des irrégularités de forme ce qui permet à l'eau d'avoir des chemins préférentiels d'écoulement. Une fois les pores de la face rugueuse remplis et la bentonite gonflée, les résultats ne sont plus affectés ce qui permet d'avoir des débits de fuite en fin d'essais qui sont similaires pour des deux configurations. Le débit de fuite obtenu en régime permanent est de $2,69.10^{-11} \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ dans le cas de la face rugueuse de la GM et de $3,14.10^{-11} \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ dans le cas de la face lisse. Il est à noter que ces faibles variations peuvent être associées à la différence entre la qualité de contact entre les deux configurations en régime permanent ainsi qu'à l'écart des masses surfaciques sèches de bentonite observé entre les deux éprouvettes de GSB testées.

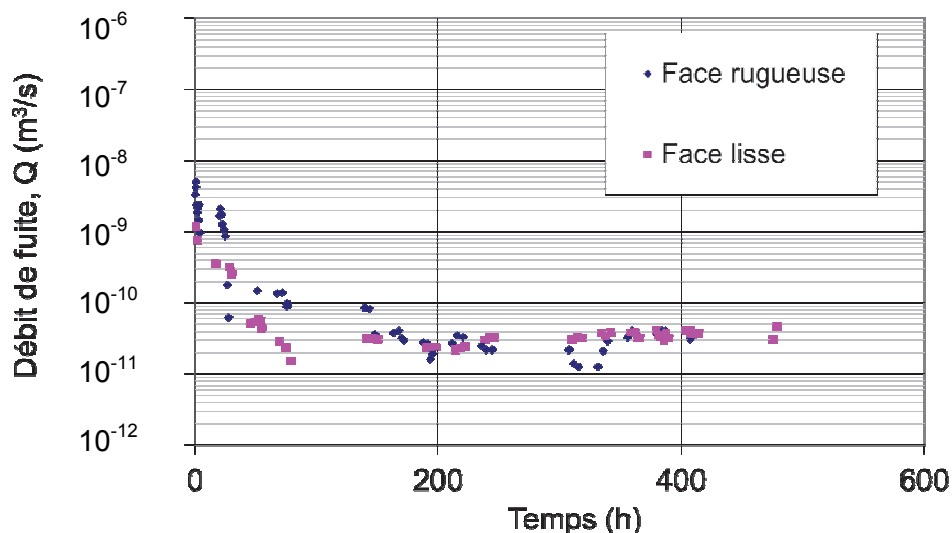


Figure 5. Comparaison des résultats des débits de fuite obtenus en fonction du temps pour les deux configurations de la GM: face rugueuse et face lisse en contact avec le GSB

Tableau 3. Valeurs des transmissivités d'interface finales calculées à l'aide de la solution analytique donnée par l'équation 1

| Test | Q (m ³ /s) | K _{GCL} (m ² /s) | R (m) | θ (m ² /s) |
|---------------|------------------------|--------------------------------------|-------|------------------------|
| Face rugueuse | 2,69.10 ⁻¹¹ | 6,9.10 ⁻¹⁰ | 0,1 | 5,03.10 ⁻¹¹ |
| Face lisse | 3,14.10 ⁻¹¹ | 6,9.10 ⁻¹⁰ | 0,1 | 5,96.10 ⁻¹¹ |

Q, débit de fuite; K_{GSB}, conductivité hydraulique en régime permanent; R, rayon de la surface mouillée; θ, transmissivité d'interface calculée à l'aide de la solution analytique.

La figure 6 montre une synthèse des différentes données antérieures issues de la bibliographie de transmissivités d'interface et de conductivités hydrauliques des argiles compactées ou GSB. Les conditions de contact GM-argile compactée ont été obtenues à partir d'équations empiriques menées sur différentes configurations d'étanchéités composites (Rowe, 1998 ; Touze-Foltz et Giroud, 2003 ; Touze-Foltz et Barroso, 2006) (tableau 4).

Tableau 4. Description et caractéristiques des conditions de contact GM-argile compactée dans une étanchéité composite

| Condition de contact pour l'argile compactée | Équations | Description |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Faible | $\log \theta = 1,15 + 1,092 \log k_s + 0,0207(\log k_s)^2$ (Rowe, 1998) $(\log \theta = -1,7476 + 0,7175 \log k_s)^*$ | - GM installée avec des rides - Sol de basse perméabilité pas bien compacté et superficie pas assez lisse |
| Bonne | $\log \theta = 0,07 + 1,036 \log k_s + 0,018(\log k_s)^2$ (Rowe, 1998) $(\log \theta = -1,3564 + 0,7175 \cdot \log k_s)^*$ | -GM avec le plus bas nombre de rides possible - Sol de basse perméabilité, bien compacté, avec superficie lisse - Contrainte normale suffisante pour garantir le contact entre la GM et le sol |
| Excellente | $\log \theta = -0,321 + 1,036 \log k_s + 0,018(\log k_s)^2$ (Touze-Foltz et Giroud, 2003) $(\log \theta = -1,7476 + 0,7175 \cdot \log k_s)^*$ | -GM installée sans rides et sur un GSB -Sol de basse perméabilité, bien compacté, avec superficie lisse -Contrainte normale suffisante pour garantir le contact entre la GM et le GSB |

* Approche Touze-Foltz et Giroud (2003) : équations linéaires.

En ajoutant les résultats obtenus lors de cette étude, on note que pour les deux configurations testées (face lisse et face rugueuse en contact avec le GSB), les résultats se situent au dessous de la condition

de contact GM-GSB définie par Barroso et al. (2006) reliant la transmissivité d'interface θ à la conductivité hydraulique k_{GSB} du GSB selon l'équation suivante :

$$\log \theta = -2,2322 + 0,7155 \log k_{GSB} \quad (6)$$

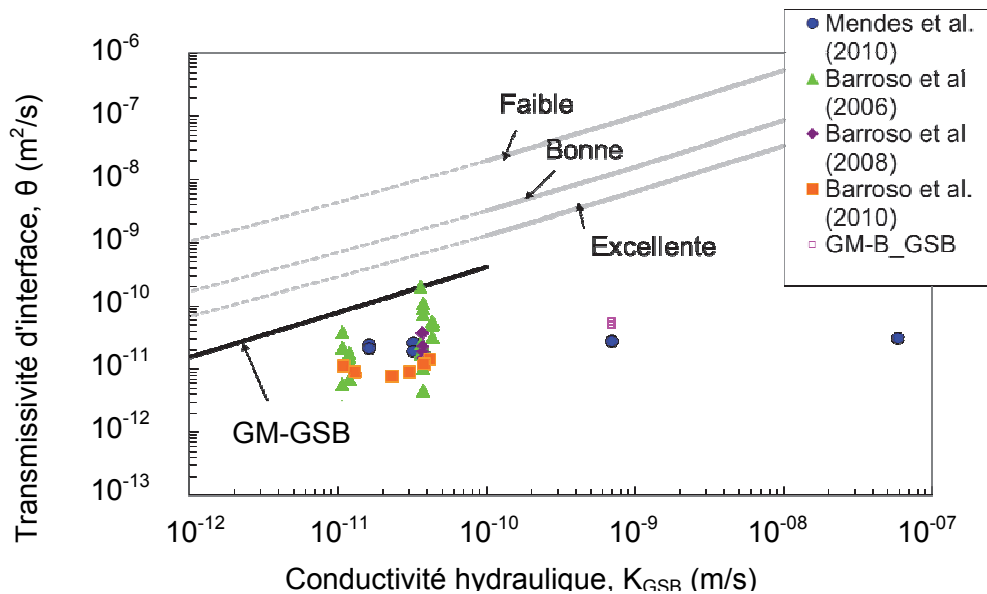


Figure.6 Synthèse des résultats antérieurs de transmissivité d'interface en contact avec une GM en PEHD avec l'introduction des résultats obtenus avec la GM-B

5. Conclusion

Le travail effectué lors de cette étude vise à quantifier le débit de fuite à travers les étanchéités composites définies par un GSB calcique et GM-B perforée et présentant deux faces (une face rugueuse définie par une imprégnation de sable et une face lisse faite avec un film en polyester). Le GSB a été testé et mis en contact respectivement avec les deux faces de la GM-B. Les essais ont été réalisés sur la cellule de mesure de la transmissivité d'interface sous une contrainte de confinement de 50 kPa et une charge hydraulique imposée de 0,3m. Les deux configurations de l'étanchéité composite ont montré de bonnes performances en termes de débits de fuite et de transmissivité d'interface comparables à celles obtenues en utilisant une GM en PEHD. Pour les deux configurations de la GM, les données de transmissivité d'interfaces et de conductivités hydrauliques se situent sous la condition de contact GM-GSB. Ceci prouve l'efficacité d'utiliser les GMs-B en association avec les GSBs dans les étanchéités composites pour des applications hydrauliques.

6. Références bibliographiques

- AFNOR. EN ISO 10318 (2006). Géosynthétiques— Termes et définitions.
- AFNOR. EN 14150 (2006). Barrières Géosynthétiques— Détermination de la perméabilité aux liquides.
- AFNOR EN 14196 (2004). Géosynthétiques— Méthode de mesure de la masse surfacique des géosynthétiques bentonitiques.
- AFNOR EN 1849-1 (1999). Feuilles souples d'étanchéité. Détermination de l'épaisseur et de la masse surfacique. Partie : Feuilles bitumineuses armées pour l'étanchéité des toitures.
- AFNOR NF P 84-705 (2008). Détermination à l'œdoperméamètre des caractéristiques de gonflement, flux et perméabilité des géosynthétiques bentonitiques (GSB) — Essai de caractérisation and performance tests, pp. 3-23.
- AFNOR EN ISO 9863-1. (2006). Géosynthétiques — Détermination de l'épaisseur à une pression précifique partie 1 : couches individuelles.
- Alonso, E. Degoutte, G., Girard, H. (1990). Results of seventeen years of using geomembranes in dams and basins. *4ème conférence internationale sur les Géotextiles, Géomembranes et produits apparentés, La Haye, pp. 437-442.*

- Barroso M. (2005). Contribution à l'étude des transferts de masse au niveau des joints de géomembranes et à l'interface entre géomembrane et géosynthétique bentonitique. *Thèse de doctorat, Université de Grenoble I, Joseph Fourier, 215 pages.*
- Barroso M., Lopes M., Bergamini G. (2010). Effect of the waste pressure on fluid migration through geomembrane defects. *Proc. 9th International Conference on geosynthetics, Guaruja, Brazil, pp. 959-962.*
- Barroso M., Touze-Foltz N., von Maubeuge, K. (2008). Influence of the textured structure of geomembrane on the flow rate through geomembrane GCL composite liners. *EuroGeo4, numéro du papier 86.*
- Barroso M., Touze-Foltz, N., von Maubeuge, K., Pierson, P. (2006) Laboratory investigation of flow rate through composite liners involving GCLs. *Geotextiles and Geomembranes, Volume. 24, pp.139-155.*
- Benchet R., Numitor G., Ferretti P. (2011). Étanchéité compartimentée par géomembrane bitumineuse d'une tranchée couverte à double voûte. *Rencontres géosynthétiques 2011, Tours, pp. 65-72.*
- Breul B., Herment R. (1995). Les géomembranes bitumineuses dans la protection des couches de fondation des chaussées. *Rencontres 1997 géotextiles et géomembranes, Reims, pp. 75-78.*
- Breul B., Herment R. (1997). Étanchéité par géomembranes bitumineuses dans les réservoirs de stockage. *Rencontres 1997 géotextiles et géomembranes, Reims, pp. 164-167.*
- Breul B., Herment R. (1998). Bitumen geomembranes in irrigation - case histories from a range of climates. *Proc. of the 6th International Conference of Geosynthetics, Atlanta, pp. 1133-1138.*
- Breul B., Herment R. (1995). Les géomembranes bitumineuses dans la protection des sous-sols contre la pollution routière. *Revue Générale des routes et des aérodromes, 734 pages.*
- Breul B., Eldrige T. (2009). Two case histories of dams waterproofing in South America with BGMS. *Proc. Rencontres Géosynthétiques 2009, Nantes, France, pp. 223-232.*
- Breul B., Huru M., Palolahti A. (2008). Use of bituminous geomembrane liner for agnico eagle mine in Kittila. *4th European Geosynthetics Conference on geosynthetics. Numéro du papier 245.*
- Breul B., Reinson J., Eldridge T., Stenson G., Harman Al. (2006). Bituminous geomembrane in extremely cold conditions. *International geosynthetic conference, Rotterdam, pp. 395-398.*
- Brown K.W., Thomas J.C., Lytton R.L., Jayawickrama, P., Bhart S. (1987). Quantification of leakage rates through holes in landfill liners. *United States Environmental Protection Agency Report CR810940, Cincinnati, OH, 147 pages.*
- Cartaud F., Touze-Foltz N. (2004). Influence of geotextiles at the interface of landfill bottom composite liners. *Geosynthetics conference, Munich.*
- Coppinger J., Farrell E.R., Cherrill H., Stenson G., Breul B., Caquel F., Giroud J.P. (2002). *International Conference of Geosynthetics, Delmas, Afrique du sud, pp. 921-926.*
- Domange G. (1983). L'utilisation des géomembranes bitumineuses dans les canaux. *Colloque sur l'étanchéité superficielle des bassins, barrages et canaux, Paris, pp. 263-266.*
- Duquenois C., Girard H., Mathieu G., Tognetti D. (1995). Étanchéité par géomembranes de rivières et canaux. *Rencontres 95 géotextiles et géomembranes, Beaune, pp. 93-99.*
- Etienne D. Breul B., Herment R. (1995). Utilisation des géomembranes bitumineuses dans la réfection de l'étanchéité des canaux de navigation. *Rencontres 95 géotextiles et géomembranes, Beaune, pp. 72-78.*
- Fagon Y., Flaquet-Lacoux V., Girard H., Poulain, D. (1999). 10 ans d'utilisation des dispositifs d'étanchéités par géosynthétiques dans les canaux de navigations. *Rencontres géosynthétiques 1999, Bordeaux, pp. 187-192.*
- Faure B., Itty J. (1999). Étanchéité des aires de maturation des mâchefers par géomembranes bitumineuses. *Rencontres géosynthétiques, Bordeaux, France, Volume 2.*
- Flaquet-Lacoux V., Malascrabes M., Poulain D., Girard H., Lino M. Réhabilitation de l'étanchéité des canaux de navigation par géomembranes. *Ingénierie Numéro Spécial, pp. 159-167.*
- Comité français des géosynthétiques (CFG). (2011). Évaluation du contact entre un géosynthétiques bentonitiques et une géomembrane en terme de transmissivité, 84 pages.
- Girard H. Lefranc, M, Tisserand C. (1996). Waterproofing and rehabilitation of dams by geomembranes in France. *1st European Geosynthetics Conference Eurogeo 1, Maastricht, pp. 945-952.*
- Harpur W.A., Wilson-Fahmy R.F, Koerner R.M. (1993). Evaluation of the contact between geosynthetic clay liners and geomembranes in terms of transmissivity. *Proc. de la 7ème conférence sur les dispositifs d'étanchéités par géosynthétiques, IFAI, St. Paul, MN, pp. 138-149.*
- Imbert B., Breul B., Herment R. (1997). Plus de vingt ans d'expérience d'utilisation d'une géomembrane bitumineuse sous ballast SNCF. *Rencontres 97 géotextiles et géomembranes, Reims, pp. 35-39.*
- Imbert B., Carcenac J.P. (1997). Deux chantiers expérimentaux de fossés en géomembranes

- bitumineuses. *Rencontres 97 géotextiles et géomembranes, Reims, pp. 49-57.*
- Mendes M. J. A., Touze-Foltz N., Palmeira E. M., Pierson, P. (2010) Influence of structural and material properties of GCLs on interface flow in composite liners due to geomembrane defects. *Geosynthetics International, 2010, Volume 17, pp ? 34-47.*
- Mendes M.J.A. (2010). Alguns fatores que influenciam o desempenho de geocompostos bentoníticos sob fluxo de gases e líquidos em barreiras de aterros sanitários. *Thèse de doctorat, Université de Brasília, 177 pages.*
- Marchiol A., Romero M.A., Benneton J.-P., Dumas Ph., Gautier J.L. (2006). Examen d'une géomembrane bitumineuse après 12 ans d'utilisation comme couverture d'un centre de stockage de déchets. *Proc. Rencontres Géosynthétiques 2006, Montpellier, France, pp. 123-132.*
- Ossena G., Breul B., Herment R. (1997). Conception et réalisation de la couverture étanche d'un site de stockage de déchets faiblement radioactifs. *Rencontres 97 Géotextiles et géomembranes, Volume. 2, Reims, pp. 150-156.*
- Peggs I. (2008). Prefabricated bituminous geomembrane: a candidate for exposed geomembrane caps from landfill closures. *Proc. The first Pan American Geosynthetics Conference and Exhibition, Cancun, pp. 191-197.*
- Potié G. (1999). Les géomembranes bitumineuses dans les canaux. *Rencontres Géosynthétiques, Bordeaux. Volume 2.*
- Potié G., Steiner B., Ailloud G., Matichard Y. (1997). Barrières de couvertures avec revêtements géosynthétiques pour les décharges de déchets industriels. *Rencontres 97 Géotextiles et Géomembranes, Reims, France, Vol. 2, pp. 117-123.*
- Poulain D., Girard H., Mine C., Potié G. (1997). Étanchéité des digues avec géomembranes. *Rencontres 97 Géotextiles et Géomembranes, Reims, pp. 142-148.*
- Rowe R.K. (1998). Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste, Keynote paper, *Proc. of the Sixth International Conference on Geosynthetics, Vol. 1, Atlanta, USA, pp. 27-103.*
- Tisserand C. (1983). Reservoir of Guazza. A large reservoir of unprotected membrane. *Colloque sur l'Étanchéité superficielle des bassins, Barrages et canaux. Paris, pp. 87-89.*
- Touze-Foltz N. (2002). Evaluation of the hydraulic transmissivity in soil liner-geomembrane interfaces. *7th International Conference on Geosynthetics, Vol. 2, Nice, pp. 799-802.*
- Touze-Foltz, N., Darlot O., Barroso, M. (2002). Experimental investigation of the influence of the pre-hydration of GCLs on the leakage rates through composite liners. *International Symposium on Geosynthetic Clay Barriers, Nuremberg, pp. 265-274.*
- Touze-Foltz N., Giroud J.P. (2003). Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through composite liners due to geomembrane defects. *Geosynthetics International, Volume 10, No. 6, pp. 215-233.*
- Touze-Foltz N., Rowe R. K., Duquennoi C. (1999). Liquid flow through composite liners due to geomembrane defects: Analytical solutions for axi-symmetric and two-dimensional problems. *Geosynthetics International, Volume 6, pp. 455-479.*