

COMPORTEMENT HYDRAULIQUE ET MÉCANIQUE D'UN GSB EN CONTACT AVEC DES LIXIVIATS AU SEIN D'UNE ÉTANCHÉITÉ COMPOSITE

HYDRAULIC AND MECHANICAL BEHAVIOUR OF A GCL IN CONTACT WITH LEACHATE AS PART OF A COMPOSITE LINER

Nathalie TOUZE-FOLTZ¹, Christian DUQUENNOI¹

¹Unité de recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés, Cemagref, BP 44, 92163 Antony Cedex, France

RÉSUMÉ - L'impact de l'échange cationique sur la susceptibilité au poinçonnement des GSB a été étudié en soumettant des échantillons à des essais de poinçonnement. Ces échantillons provenaient d'un GSB d'un mètre de diamètre intentionnellement mis en contact pendant un an avec des lixiviats par l'intermédiaire d'un défaut dans une géomembrane en PEHD, et avec un sol contenant du calcium. Les résultats montrent que la préhydratation du GSB sans contrainte de confinement induit des débits de fuite nettement plus élevés que pour un GSB initialement non préhydraté et installé dans la même configuration. De plus, l'accroissement de la concentration en calcium, et la réduction de la concentration en potassium et en ammonium induisent une susceptibilité supérieure au poinçonnement.

Mots-clés : géosynthétique bentonitique, géomembrane, lixiviat, échange cationique

ABSTRACT - The influence of cation exchange on the potential for squeezing of bentonite was studied by submitting 10-cm-diameter GCL samples to squeezing tests. Those samples were part of 1-m-diameter GCLs that had intentionally been put in contact with leachate during a one year period through the discontinuity in a damaged HDPE geomembrane and an underlying soil containing calcium. Results obtained tend to show that pre-hydration of GCL on the whole surface under no load resulted in a larger flow rate in the composite liner. Furthermore, an increase in the calcium concentration, and to a lesser extent a reduction in potassium and ammonium concentrations, lead to a softening of bentonite resulting in a greater susceptibility to bentonite squeezing in the GCL samples.

Keywords: geosynthetic clay liner, geomembrane, leachate, cation exchange.

1. Introduction

Les géosynthétiques bentonitiques (GSB) sont souvent utilisés dans les étanchéités de fond d'installations de stockage de déchets, sous la géomembrane. Dans le cas où la géomembrane présente des endommagements le lixiviat peut entrer en contact avec le GSB. Comme les lixiviats contiennent des cations, le phénomène d'échange cationique au sein des GSB est susceptible de se produire. Une fois hydratée, la bentonite a une faible résistance au poinçonnement. Les points d'accumulation de contrainte peuvent induire une migration latérale de la bentonite (Stark, 1998) qui génère une réduction d'épaisseur ayant pour effet une augmentation localisée du flux à travers le GSB (Fox et al., 1996; Koerner et Narejo, 1995). Les différentes causes d'accumulation de contraintes qui peuvent causer un amincissement de bentonite sont la présence de pierres, de racines, de rugosités à la surface du sol sous-jacent ou de couverture et l'existence de plis dans la géomembrane (Daniel, 2000).

Mitchell (1993) indique que des facteurs tels que la taille des particules, le degré de cristallinité, le type de cations adsorbés, le pH, la présence de matière organique et la nature et la quantité d'électrolytes en solution dans les pores du sol contrôlent les propriétés de l'argile comme la compressibilité. Par conséquent, une modification de la sensibilité au poinçonnement des GSB en relation avec l'échange cationique pourrait se produire.

Le premier objectif de cet article est de montrer de quelle manière l'échange cationique peut se produire dans un GSB faisant partie d'une étanchéité composite. Les GSB étudiés ont été mis en contact avec un lixiviat par l'intermédiaire d'un défaut dans la géomembrane générant ainsi des gradients de concentration au sein du GSB. De plus, le cation majoritaire contenu dans le sol support est le calcium, ce qui permet d'étudier la compétition entre un lixiviat contenant principalement des cations monovalents et un sol contenant un cation divalent, avec la distance au défaut dans la géomembrane. Le second objectif de cet article est de présenter les résultats d'essais de poinçonnement effectués à l'issue de la percolation de lixiviat pendant une période d'un an pour évaluer comment le potentiel d'amincissement de la bentonite est influencé par le contact avec le lixiviat et le sol sous-jacent.

2. Matériaux utilisés

Une géomembrane en PEHD de 2mm d'épaisseur a été utilisée au contact du GSB. Le GSB était un aiguilletté contenant de la bentonite sodique naturelle. La masse surfacique sèche de bentonite contenue par le GSB était égale à 5,3 kg/m² avec une teneur en eau initiale de 9%.

Ces géosynthétiques ont été installés sur un sol constitué d'un mélange de sable et de limon argileux à 50% en masse sèche pour chacun des constituants. La conductivité hydraulique de ce sol était voisine de 10⁻⁹ m/s.

Deux solutions différentes ont été utilisées dans les expérimentations. La première est une solution de chlorure de sodium 10⁻³ molaire utilisée comme fluide de préhydratation notée FP et la seconde un lixiviat réel (LR) échantillonné dans le bassin de collecte de lixiviats d'une installation de stockage de déchets française âgée approximativement de 15 ans (Guyonnet et al., 2005). Les cations majoritaires contenus dans ce lixiviat sont NH₄⁺ (1,1×10⁻¹ mol/l), Na⁺ (7,6×10⁻² mol/l) et K⁺ (3,9×10⁻² mol/l).

2.1 Dispositif expérimental utilisé

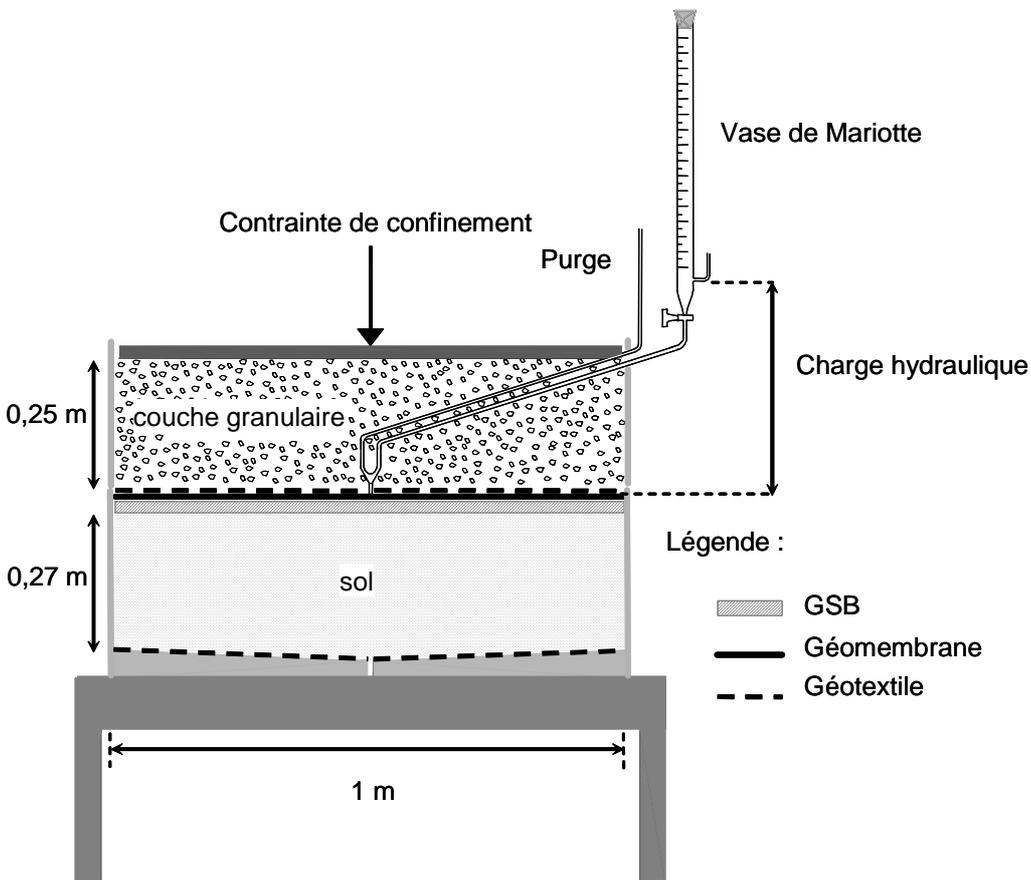


Figure 1. Schéma de principe du dispositif expérimental (d'après Barroso et al. (2006))

Le dispositif expérimental utilisé était constitué de deux cellules d'un mètre de diamètre dont un schéma de principe est décrit à la figure 1. Un protocole détaillé du montage du dispositif expérimental est présenté dans Cartaud et al. (2005) et Touze-Foltz et al. (2006). Une épaisseur de sol de 27 cm a été obtenue par compactage en 4 couches. Puis un GSB préhydraté (BH) ou initialement sec (BS) a été mis en place sur le sol, et recouvert par la géomembrane présentant en son centre un endommagement circulaire de 4 mm de diamètre.

Dans le cas du GSB BH, la préhydratation s'est effectuée par immersion dans FP pendant deux heures et demi, sans confinement. Cette durée était nécessaire pour atteindre une teneur en eau de 100 % qui correspond aux recommandations du CFG (1998).

La géomembrane a ensuite été recouverte d'un géotextile antipoinçonnant et d'une couche de matériaux granulaires 25/35 mm de 0,25m d'épaisseur. Une contrainte de confinement de 50 kPa a été

appliquée sur l'étanchéité composite au moyen d'une presse hydraulique. L'alimentation hydraulique de l'étanchéité composite a été réalisée au moyen d'un vase de Mariotte connecté au défaut dans la géomembrane. La charge hydraulique appliquée était égale à 0,3m. Dans la colonne BS, on a alimenté l'étanchéité pendant deux semaines avec FP avant d'introduire le lixiviat. Ceci peut correspondre à la situation où de l'eau de pluie peut percoler à travers un défaut apparu au moment de la pose de la géomembrane, avant production de lixiviat. Pour la colonne BH, L'étanchéité est restée sous contrainte de confinement pendant 2 semaines sans alimentation hydraulique avant l'application d'une charge hydraulique de lixiviat. Cette condition expérimentale peut représenter ce qui se passe lorsqu'un défaut n'apparaît pas immédiatement au moment de la pose de la géomembrane, mais au cours du temps et que le GSB se préhydrate au contact du sol support, ou dans le cas où aucun évènement pluvieux n'aurait lieu dans les deux semaines suivant la pose du GSB.

2.2 Méthodologie pour les essais de poinçonnement

A l'issue d'une année de contact entre le GSB situé sous la géomembrane et le lixiviat, les colonnes ont été démontées et des échantillons de GSB de 0,1m de diamètre prélevés selon le plan d'échantillonnage présenté à la figure 2.

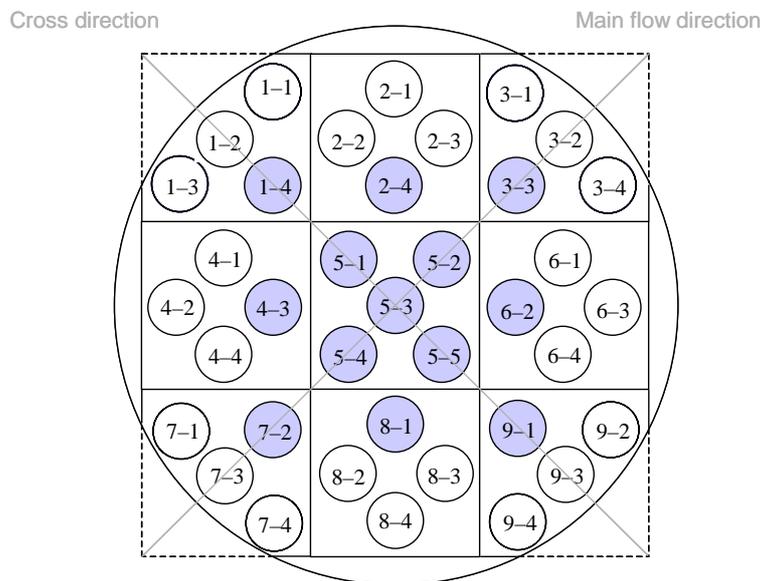


Figure 2. Positionnement des échantillons de GSB de 0,1m de diamètre prélevés

Ces échantillons ont ensuite été soumis à un essai de poinçonnement sur une plaque rigide par l'intermédiaire d'un piston de 40mm de diamètre. Pour chaque échantillon on a appliqué une succession de paliers de 80 kPa d'amplitude, pendant la durée nécessaire à l'obtention d'une valeur de pénétration constante. La vitesse d'application de la contrainte était égale à 5 N/s.

2.3 Caractérisation des cations en présence

A l'issue des essais de poinçonnement les échantillons de GSB ont été séchés et de la bentonite prélevée afin de déterminer les cations présents à la surface des particules argileuses selon le protocole décrit par Guyonnet et al. (2005).

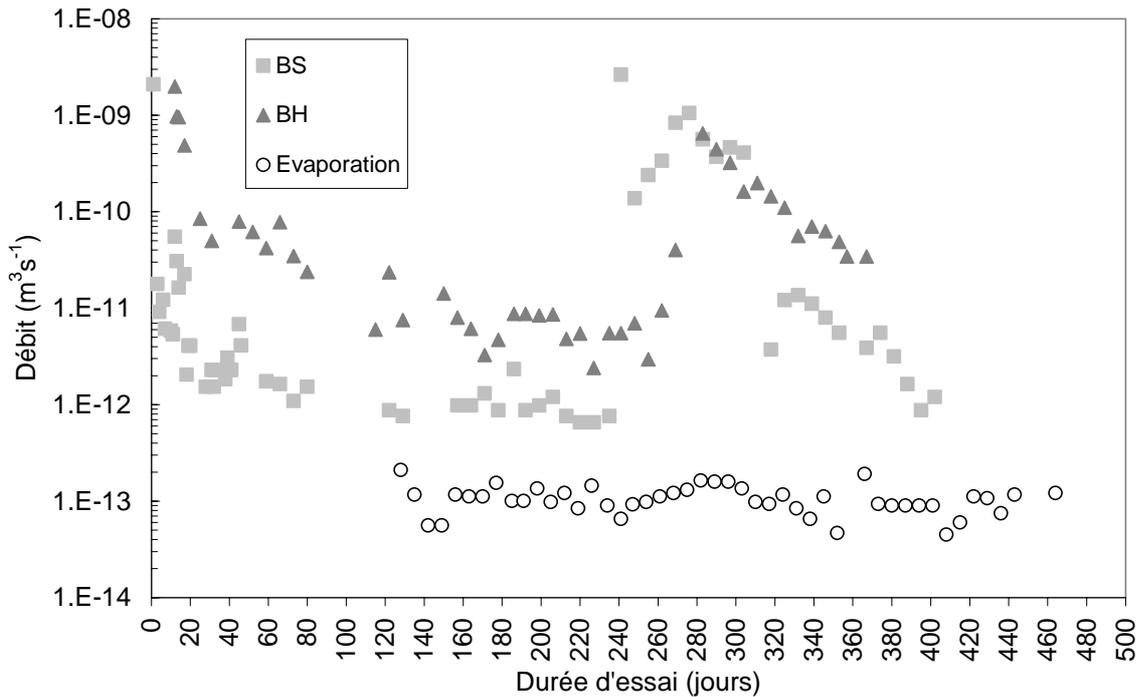


Figure 3. Evolution temporelle des débits dans les colonnes BS et BH comparées à l'évaporation

3. Résultats obtenus

3.1. Débits mesurés

Les débits mesurés pour les deux colonnes sont représentés à la figure 3. Ils sont significatifs par rapport au flux évaporatoire de l'ordre de 10^{-13} m³/s. Les débits dans les deux colonnes ont diminué au cours du temps et ont atteint un régime permanent après 4 mois d'essai de l'ordre de 10^{-12} m³/s pour BS et 6×10^{-12} m³/s pour BH. Le débit le plus important mesuré sur cette dernière colonne est attribué à la préhydratation sans contrainte du GSB qui a pu avoir pour conséquence une augmentation de la conductivité hydraulique par rapport à celle du GSB BS (Petrov et al., 1997)

Après 240 jours d'essai, une coupure d'électricité qui n'a pas été immédiatement détectée a eu pour effet un relâchement de la contrainte mécanique suivi d'une augmentation du débit de fuite. Dès ce phénomène détecté, la contrainte a été à nouveau appliquée, et le débit dans la colonne BS pour laquelle le temps d'expérimentation a été suffisamment long est redescendu à sa valeur avant cet événement. Une diminution du débit a également été notée sur la colonne BH après réapplication de la contrainte mécanique.

3.2. Chimie de surface des particules argileuses

La répartition de la population de cations échangeables à la surface des feuillets argileux est présentée à la figure 4, pour un des axes d'écoulement et pour la zone centrale de la colonne correspondant aux échantillons grisés à la figure 2. On n'a en effet pas constaté d'évolution significative de la répartition en calcium et sodium au-delà de cette limite. Ammonium et potassium sont absents en dehors de la zone grisée. L'analyse de la bentonite provenant du GSB avant essai est présentée dans la première colonne désignée sous le terme "bentonite", et celle du sol dans la colonne sol.

Le premier constat est que pour tous les échantillons, la proportion de sodium a diminué. Il est vraisemblable que l'absence de contrainte mécanique pendant une partie de la durée de l'essai a conduit les GSB à s'hydrater et à absorber de l'eau en provenance du sol support. Par conséquent les mécanismes de diffusion et d'advection ont dû être impliqués dans le transfert de calcium du sol support vers le GSB. Il en résulte que le phénomène d'échange cationique a certainement été accéléré par rapport à un cas de figure où la contrainte aurait été maintenue constante tout au long de l'essai.

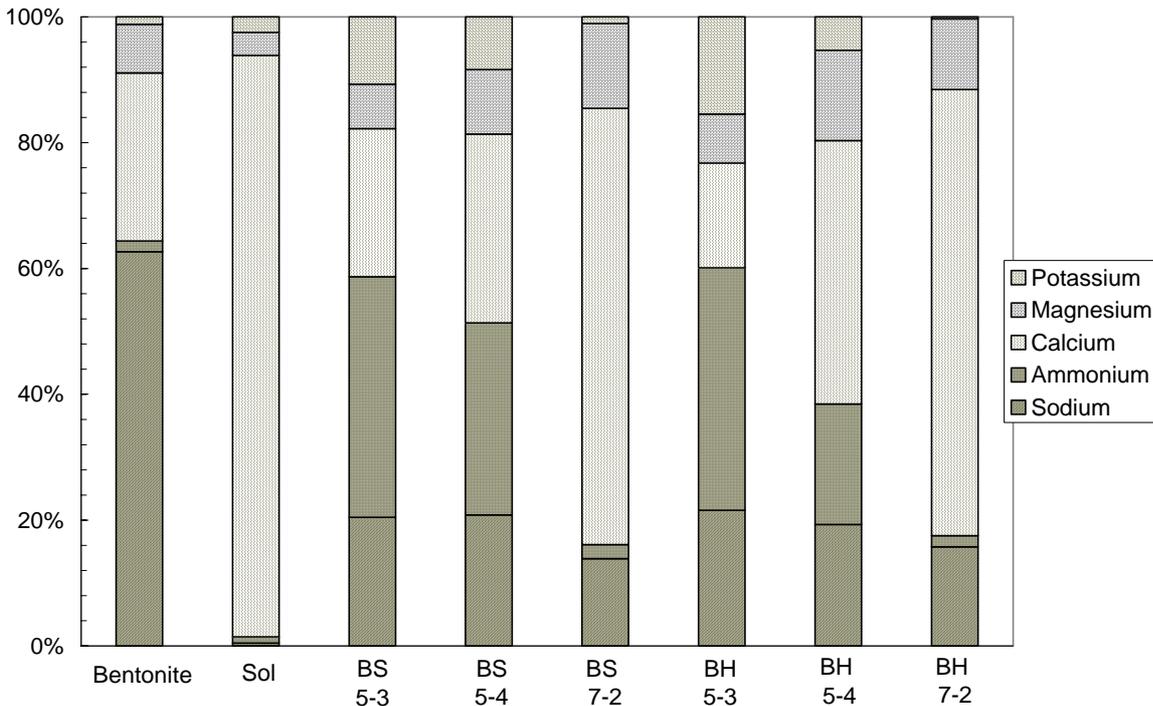


Figure 4. Comparaison de la population cationique à la surface de la bentonite vierge, du sol et des échantillons de GSB 5-3, 5-4 et 7-2 pour les colonnes BS et BH.

A l'aplomb du défaut dans la géomembrane, là où l'échange avec le lixiviat a été maximal, la proportion de Ca^{2+} et Mg^{2+} est légèrement inférieure à celle de la bentonite. Na^+ s'est échangé préférentiellement avec NH_4^+ et K^+ présents à de fortes concentrations dans le lixiviat.

Avec l'augmentation de la distance au défaut, la proportion relative de NH_4^+ et K^+ diminue alors que celle de Ca^{2+} augmente.

Cette diminution des proportions en NH_4^+ et K^+ avec l'augmentation de la distance au défaut est cohérente avec l'invasion du lixiviat dans l'interface, de plus en plus faible à mesure qu'on s'éloigne du défaut. Par conséquent, l'augmentation de la proportion de Ca^{2+} n'est pas due à la migration du lixiviat, mais plutôt à un apport par le sol support pour lequel Ca^{2+} est le cation majoritaire.

3.3. Résultats des essais de poinçonnement

Tous les échantillons de GSB prélevés ont été soumis à l'essai de poinçonnement défini au paragraphe 2.2. Les valeurs de contraintes appliquées, représentées à la figure 5 en fonction de l'enfoncement du poinçon, ont été obtenues au terme de chaque palier de contrainte. Les courbes obtenues sont pratiquement linéaires pour des contraintes supérieures à 160 kPa. Par conséquent, la pente des courbes contrainte-enfoncement notée \tilde{E} a été calculée pour chaque échantillon. La figure 5 montre que \tilde{E} diminue avec l'augmentation de la distance au défaut dans la géomembrane. Différents facteurs, comme la masse surfacique de bentonite et l'épaisseur des échantillons ou leur teneur en eau pourraient expliquer ce phénomène.

Afin de normaliser l'effet de ces paramètres, on a eu recours au calcul de l'indice des vides apparent du GSB, e_b , introduit par Petrov et Rowe (1997) qui permet d'homogénéiser les effets de la variabilité de la masse surfacique sur l'épaisseur des échantillons. Les résultats obtenus n'ont pas permis de mettre en évidence de tendance de variation de \tilde{E} avec e_b pour un GSB donné.

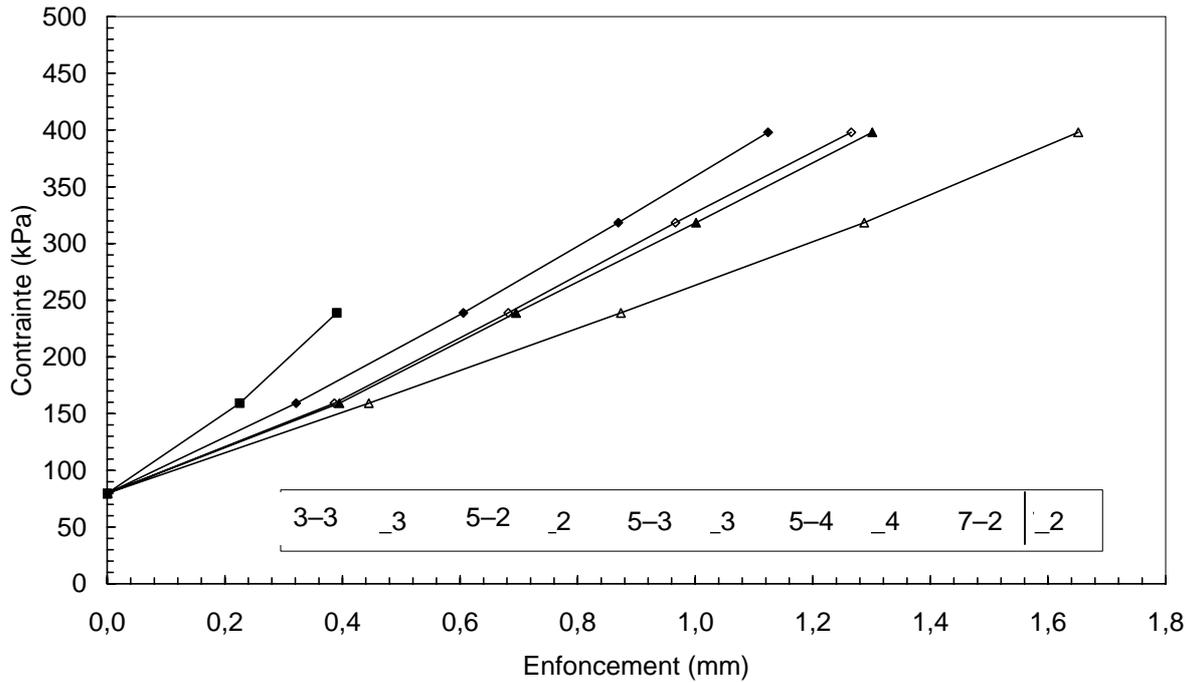


Figure 5. Contraincte en fonction de l'enfoncement à la fin de chaque palier de chargement pour BH

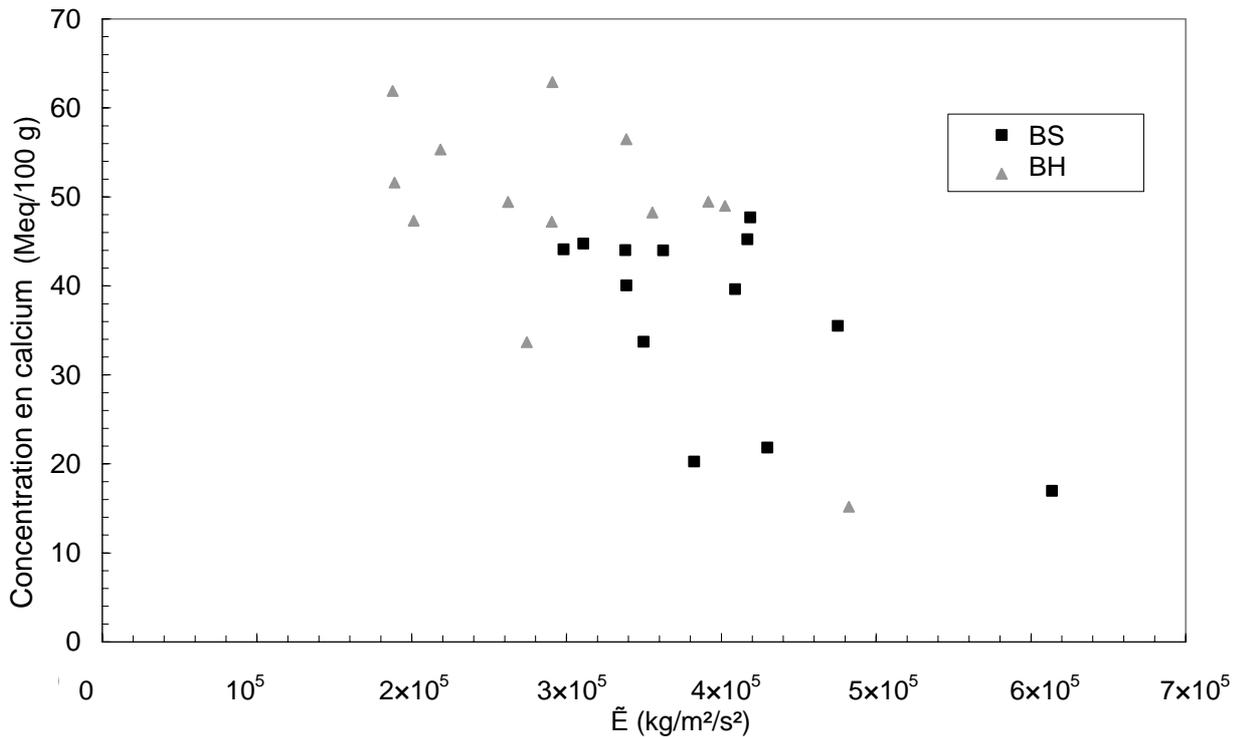


Figure 6. Evolution de la concentration en calcium avec $\dot{\epsilon}$

On a également cherché à mettre en évidence un possible lien entre la concentration en différents cations et l'évolution de $\dot{\epsilon}$. L'évolution la plus significative a été obtenue pour le calcium et est présentée à la figure 6. Elle montre une augmentation de $\dot{\epsilon}$ avec la réduction de la concentration en calcium. On a également observé, mais dans une moindre mesure, une augmentation de $\dot{\epsilon}$ avec l'augmentation de la

concentration en potassium à la figure 7, et en ammonium (non montré ici) toutefois pas aussi claire pour l'ammonium que pour le potassium.

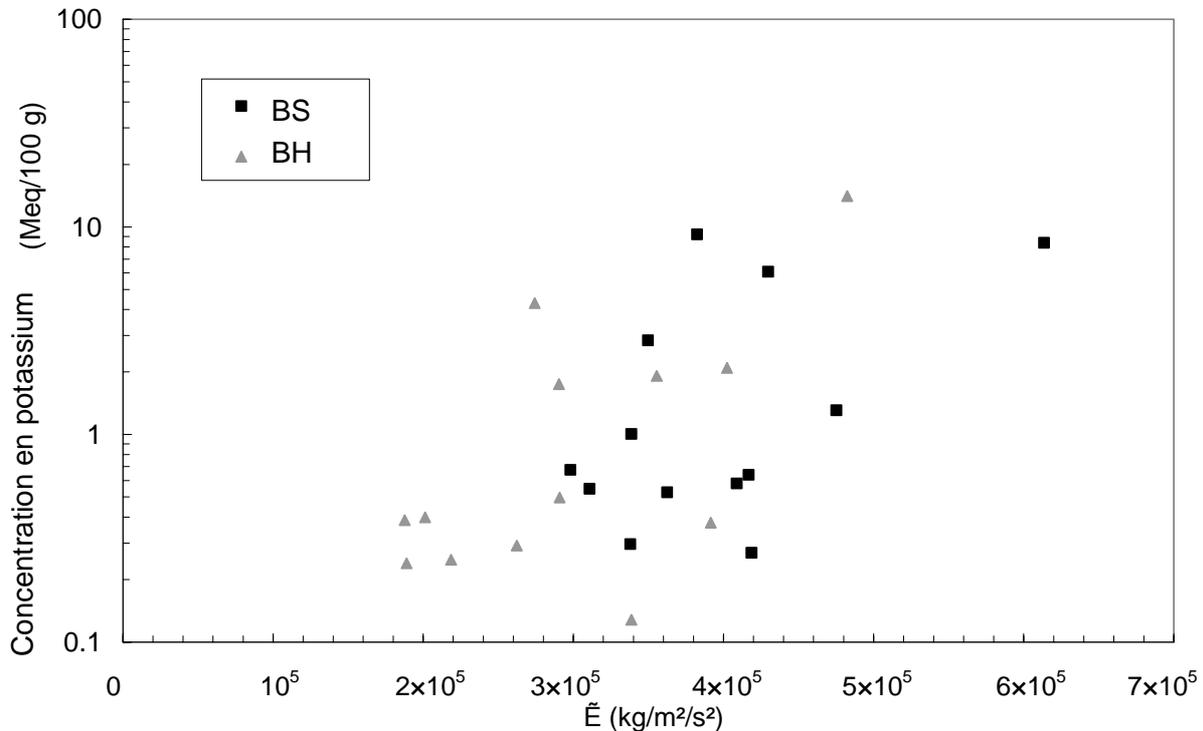


Figure 7. Evolution de la concentration en potassium avec \bar{E}

4. Discussion

Lorsque des cations divalents remplacent des cations Na^+ la capacité de gonflement de la bentonite est réduite. On devrait donc observer une réduction d'épaisseur de la bentonite et une augmentation de la fraction mobile de liquide interstitiel (Jo et al., 2001).

Comme la concentration en Ca^{2+} dans les échantillons augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du défaut dans la géomembrane, le potentiel d'accroissement de la proportion d'eau libre qui peut être expulsée plus aisément pendant les essais de poinçonnement augmente également. Ce phénomène pourrait expliquer un ramollissement du matériau avec l'augmentation de la concentration en calcium.

L'effet négatif de l'échange cationique, généralement étudié en termes de remplacement de Na^+ par Ca^{2+} est assez bien connu en ce qui concerne l'évolution de la conductivité hydraulique des GSB et de la capacité d'autocicatrisation. Les résultats présentés dans cet article semblent montrer que cet échange cationique a également un effet sur les propriétés mécaniques de la bentonite car une augmentation de la concentration en calcium induit une plus grande susceptibilité à l'amincissement du GSB qui peut avoir pour effet une augmentation du flux à travers ces matériaux.

5. Conclusions

Deux expérimentations d'un mètre de diamètre dont l'objectif était de quantifier les débits de fuite dans les étanchéités composites avec GSB ont été menées, avec du lixiviat, pendant un an. La différence fondamentale résidait dans le mode de préhydratation des GSB. A l'issue de l'expérimentation hydraulique des échantillons de GSB de 0,1m de diamètre ont été soumis à un essai de poinçonnement.

Les résultats obtenus indiquent que l'échange cationique a découlé non seulement de l'infiltration de lixiviat mais également du contact avec le sol support du GSB. Ceci montre l'importance lors du dimensionnement de prendre en compte le GSB et son environnement.

Enfin, les essais de poinçonnement réalisés tendent à montrer qu'une augmentation de la concentration en calcium, et dans une moindre mesure d'une diminution de la concentration en ammonium et en potassium ont eu pour effet un ramollissement de la bentonite, rendant potentiellement les GSB plus sensibles à une réduction d'épaisseur sous contrainte uniforme.

6. Remerciements

Les résultats présentés ici font partie du programme de recherche LIXAR mené conjointement par le BRGM, le Cemagref et l'INSA de Lyon avec le soutien financier de l'Ademe.

7. Références bibliographiques

- Barroso M., Touze-Foltz N., von Maubeuge K., Pierson P. (2006) Laboratory investigation of flow rate through composite liners consisting of a geomembrane, a GCL and a soil liner. Accepted for publication in *Geotextiles and Geomembranes*, 16 January 2006.
- Cartaud F., Duval Y., Touze-Foltz N. (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) Recommandation Générales pour la réalisation d'Etanchéité par Géosynthétiques Bentonitiques, Fascicule n°12, 56 p.
- Daniel D.E. (2000) Hydraulic durability of geosynthetic clay liners. *Proceedings of the 14th GRI Conference (hot topics on geosynthetics) USA*, 118–135.
- Fox P.J., De Battista D.J., Chen, S.H. (1996) Bearing capacity of GCLs for cover soils of varying particle size. *Geosynthetics International* 3(4), 447–461.
- 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.
- Koerner R.M., Narejo D. (1995) Bearing capacity of hydrated geosynthetic clay liner. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 121(1), 82–85.
- Jo H.Y., Katsumi T., Benson C.H., Edil T. (2001) Hydraulic conductivity and swelling of nonprehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127(7), 557–567.
- Mitchell J.K. (1993) Fundamentals of soil behaviour, 2nd Edition, 437 pages.
- 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.
- Petrov R.J. Rowe R.K., Quigley R.M. (1997) Selected factors influencing GCL hydraulic conductivity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 123(8), 683–695.
- Stark T.D. (1998) Bentonite migration in geosynthetic clay liners. *Proceedings of the 6th International Conference on Geosynthetics* 1, 315–323.
- Touze-Foltz N., Barroso M., Cartaud F. (2006) Investigation des débits de fuite dans les étanchéités composites à l'échelle métrique, *Rencontres Géosynthétiques 2006*, 8 pages.