



Comportement des géosynthétiques bentonitiques dans les digues de retenues des eaux pluviales

C. Barral, Nathalie Touze, D. Croissant, E. Loheas

► To cite this version:

C. Barral, Nathalie Touze, D. Croissant, E. Loheas. Comportement des géosynthétiques bentonitiques dans les digues de retenues des eaux pluviales. 9èmes Rencontres Géosynthétiques, Apr 2013, Dijon, France. 10 p. hal-00833579

HAL Id: hal-00833579

<https://hal.science/hal-00833579>

Submitted on 13 Jun 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

COMPORTEMENT DES GÉOSYNTHÉTIQUES BENTONITIQUES DANS LES DIGUES DE RETENUE DES EAUX PLUVIALES

GCL HYDRAULIC BEHAVIOUR IN SMALL DAMS

Camille BARRAL¹, Nathalie TOUZE-FOLTZ², Didier CROISSANT², Élodie LOHEAS²

¹ Irstea/Cnam, Antony, France

² Irstea, Antony, France

RÉSUMÉ – Quatre digues de retenue des eaux pluviales dans l'ouest de la France ont été étanchées par des GSB confinés par une couche d'argile sableuse à silex. Après plusieurs années de service, des échantillons de GSB ont été excavés dans chaque barrage. L'expertise réalisée a mis à jour une baisse significative des performances hydrauliques des GSB mis en place depuis plus de 3 ans. Cette évolution ne peut pas s'expliquer seulement par l'échange cationique au sein de la bentonite mais par la combinaison de cet échange cationique avec des cycles d'humidification-dessiccation rendus possibles par une épaisseur de confinement insuffisante.

Mots-clés: géosynthétiques bentonitiques, digue, flux, durabilité.

ABSTRACT – Samples of GCLs were exhumed after several years of service from four dams. The samples were tested for water content, swell index, hydraulic conductivity and exchangeable cations. The tests performed showed that the hydraulic conductivity and swell index of the bentonite evolved at the contact of the surrounding soil which contained calcium. Depending of the duration of service of GCL, very different hydraulic conductivities were obtained (up to 3 orders of magnitude) in relation with the number of hydration-desiccation cycles experienced by the GCLs.

Keywords: geosynthetic clay liner, dam, flow, durability.

1. Introduction

Les géosynthétiques bentonitiques (GSB) sont des produits manufacturés en forme de nappe constitués d'un assemblage de matériaux comportant au moins de la bentonite, en poudre ou granulés, assurant la fonction étanchéité et de un ou plusieurs géosynthétiques utilisés comme support ou conteneur, utilisé dans le domaine de la géotechnique et du génie civil (AFNOR XP P 84-700). Depuis plus de vingt ans ils ont souvent été utilisés en remplacement des couches d'argile dans les couvertures des installations de stockage de déchets (ISD) (Egloffstein, 2001 ; Bouazza, 2002). Un nombre important d'études ont été publiées sur le comportement des GSB sur site; les résultats ont permis de mettre à jour un certain nombre de paramètres influant sur la performance des GSB dans les couvertures d'ISD comme l'échange cationique et les cycles de dessiccation-hydratation (Touze-Foltz et al., 2010a).

En comparaison avec les nombreuses applications des GSB dans les ISD, l'utilisation des GSB comme barrières étanches dans les ouvrages hydrauliques est plus récente et moins répandue (Heibaum and Fleischer, 2010 ; Werth et al., 2010). Différents paramètres sont à considérer pour évaluer la durabilité des GSB dans les ouvrages hydrauliques suivant que les GSB sont utilisés pour étanchéifier les bassins (charges hydrauliques permanentes), les barrages (charges hydrauliques permanentes ou temporaires), ou encore les digues (soumises à des charges cycliques dues aux vagues).

L'objectif de cet article est de présenter les résultats obtenus sur des échantillons de GSB excavés de quatre digues de retenue des eaux pluviales après plusieurs années de service. Ces petites digues sont utilisées comme protection contre les inondations et ne sont donc soumises à des charges hydrauliques que durant des périodes courtes lorsque le niveau des eaux est élevé après des événements pluvieux importants. Les quatre digues de retenues des eaux pluviales étudiées sont restées à sec la plupart du temps et le GSB a donc été soumis à l'échange cationique et aux cycles de dessiccation-hydratation comme dans les couvertures d'ISD.

Dans la partie 2 les différents sites sont présentés ainsi que les prélèvements de GSB réalisés. Dans la troisième partie on donne les résultats obtenus sur les échantillons de GSB (conductivités hydrauliques, teneurs en eau, indices de gonflement, capacité d'échange cationique et cations en présence) et sur les échantillons de sols environnant également prélevés. Dans la dernière partie, ces

résultats d'essais sont comparés avec les résultats issus de la bibliographie récente; des résultats de tests menés en laboratoire avec des solutions de chlorure de calcium sur des GSB vierges et des résultats obtenus sur des GSB excavés de couvertures d'ISD.

2. Description des sites, excavation des GSB et des sols environnant

2.1 Description du site

Les quatre digues sont situées à l'ouest de la France (climat océanique), dans un périmètre réduit d'environ 30 m² et reçoivent environ 700 à 1200 mm de pluie annuellement. Ces digues sont des barrages déversant et permettent de retenir les eaux pluviales lors des épisodes orageux conséquents (garantie décennale) (Figure 1). Depuis leurs constructions respectives entre 2005 et 2008 aucune d'entre elles n'a été soumise à des charges hydrauliques élevées.

Le sol recouvrant les GSB est constitué de 15 à 30 cm de terre végétale contenant des morceaux de silex et des racines. Une description des quatre sites est présentée dans le tableau 1.



Figure 1. Illustration de la végétation présente sur la digue 4

Tableau 1. Description des quatre sites

	Digue 1	Digue 2	Digue 3	Digue 4
Date de mise en service	Juillet 2005	Juillet 2006	Mars 2008	Février 2008
Date de l'excavation	Mai 2011	Mai 2011	Mai 2011	Mai 2011
Temps de service du GSB (année)	5,9	4,9	3,25	3,3
Épaisseur du sol de couverture (cm)	30	15	20	16
Nom de l'échantillon de GSB	D1	D2	D3	D4
Localisation de l'échantillon de GSB	Bas talus	Bas talus	Bas talus	Bas talus
Masse surfacique de bentonite sèche des GSB (kg/m²)	5,5	6,2	5,5	6,6

2.2 Description des GSB

Tous les GSB mis en œuvre sont des GSB cousus contenant initialement de la bentonite sodique avec des masses surfaciques de bentonite sèches comprises entre 5,5 et 6,6 kg/m² (tableau 1). Les GSB ont été mis en œuvre entre juillet 2005 et mars 2008 et les prélèvements ont été effectués en mai 2011.

2.3 Description des excavations

Les recommandations préconisées par Zanzinger et Touze-Foltz (2009) sur le prélèvement, le transport et les essais à réaliser sur les échantillons de GSB prélevés sur sites pour obtenir des résultats les plus complets et fiables possibles ont été suivies.

Pour toutes les excavations le sol de couverture a été enlevé précautionneusement avec une pelle mécanique jusqu'à une profondeur proche du GSB. Puis le reste de sol recouvrant le GSB a été enlevé à la main afin de ne pas endommager le GSB. Des échantillons rectangulaires de GSB (0,3×0,6 m) ont ensuite été découpés avec un cutter (Figure 2), transférés sur des supports rigides et hermétiquement emballés dans des sacs plastiques afin d'éviter une perte d'humidité ou une déformation des échantillons durant leur transport et leur stockage.

Tous les échantillons prélevés étaient traversés par des petites racines (présence des racines de part et d'autre des échantillons); aucune fissure de dessiccation n'était visible à l'œil nu.

À l'arrivée au laboratoire, une éprouvette de chaque échantillon de 0,25 m de diamètre a été prélevée afin de réaliser des essais en oedoperméamètre. Le reste des échantillons a été utilisé pour prélever de la bentonite qui a servi, après séchage à 50°C, à la réalisation d'essais de détermination de la capacité de gonflement et de détermination des cations interfoliaires.

Des échantillons des sols de couverture et des sols situés sous le GSB ont également été prélevés afin de déterminer leurs teneurs en eau et leurs teneurs en cations solubles.

Les résultats de ces différents essais sont présentés ci-après.



Figure 2. Échantillon de GSB découpé et transféré sur un support rigide.

3. Méthodes de test et résultats obtenus

3.1 Capacité de gonflement de la bentonite

Des essais de quantification de la capacité de gonflement de l'argile selon la norme XP P 84-703 ont été réalisés pour les bentonites extraites de chaque échantillon de GSB prélevé. Les valeurs des indices de gonflement obtenues sont cohérentes avec les valeurs typiques obtenues pour des bentonites sodiques (<10 mL/2g) (Egloffstein, 2001).

3.2 Détermination des propriétés hydrauliques des GSB excavés

Des essais pour déterminer la conductivité hydraulique des échantillons de GSB excavés ont été menés dans des oedoperméamètres selon la norme NF P84-705 (AFNOR 2008). La cellule de test a été présentée par Guyonnet et al. (2005). Une solution de NaCl 10^{-3} M a été utilisée comme liquide d'essai. Une contrainte verticale égale à 10 kPa a été appliquée sur les éprouvettes de GSB afin de représenter les faibles contraintes observées sur site dues aux faibles épaisseurs de sols au dessus des GSB dans les digues. Les essais se composent d'une phase initiale de saturation-gonflement des éprouvettes sous faible gradient hydraulique suivie d'une phase de mesure des volumes traversant l'éprouvette sous différents gradients hydrauliques constants.

Durant la phase de saturation-gonflement nous avons constaté que tous les GSB excavés ne possédaient plus de capacité de gonflement ce qui est cohérent avec les résultats d'essais de mesure de la capacité de gonflement; la phase de mesure a donc débutée lorsque au moins 90 % du volume absorbé pour un temps infini (ΔH^∞) a été atteint.

Plusieurs charges hydrauliques ont été appliquées aux éprouvettes, entre 1 cm et 10 cm suivant la conductivité hydraulique des éprouvettes mesurée. En effet, lorsque les flux obtenus sont élevés seulement des faibles valeurs de charge hydraulique peuvent être appliquées sur l'éprouvette afin de pouvoir mesurer ce flux de manière correcte en considérant les limites du dispositif de mesure (Figure 3).

Afin de vérifier que les valeurs élevées du flux n'étaient pas dues à des fuites latérales dans la cellule de test, un colorant bleu a été ajouté au liquide d'essai en fin de tests. Le colorant s'est diffusé de manière homogène au travers des éprouvettes et aucune fuite latérale n'a été observée (Figure 4).

Une synthèse des valeurs de conductivité hydraulique obtenues ainsi que des teneurs en eau initiales et en fin de test des éprouvettes de GSB testées est présentée dans le tableau 2. On constate que des valeurs élevées de conductivité hydraulique ont été obtenues pour les échantillons D1 et D2 ($k \sim 10^{-6}$ m/s) largement supérieures à celles d'un produit vierge (de 4 à 5 ordres de grandeur) alors que les échantillons D3 et D4 ont eux montrés des valeurs plus faibles de conductivité hydraulique ($k < 10^{-9}$ m/s). Ces différents résultats seront discutés dans la suite de l'article.

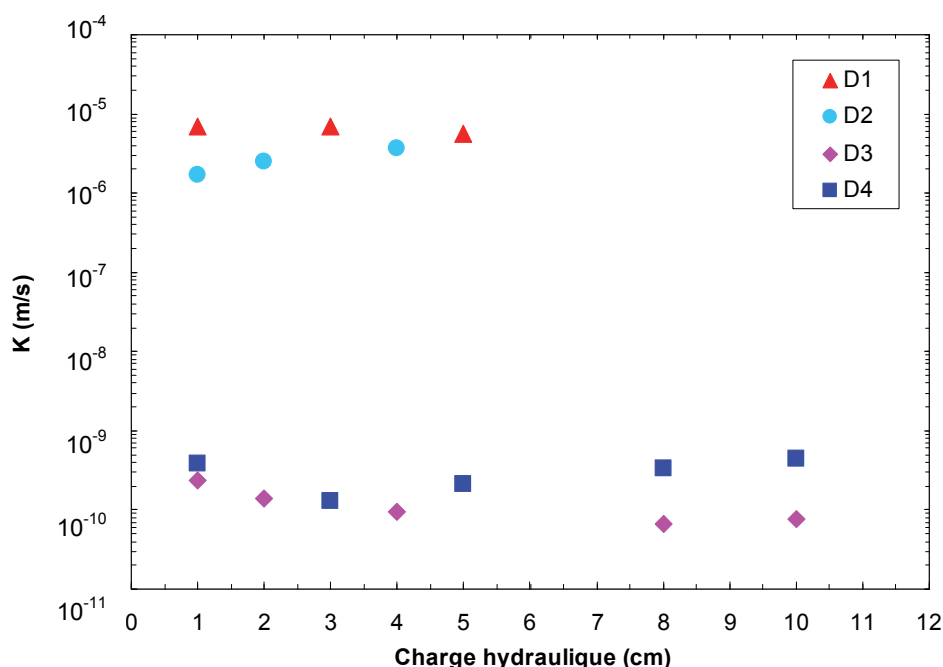


Figure 3. Conductivités hydrauliques des GSB excavés

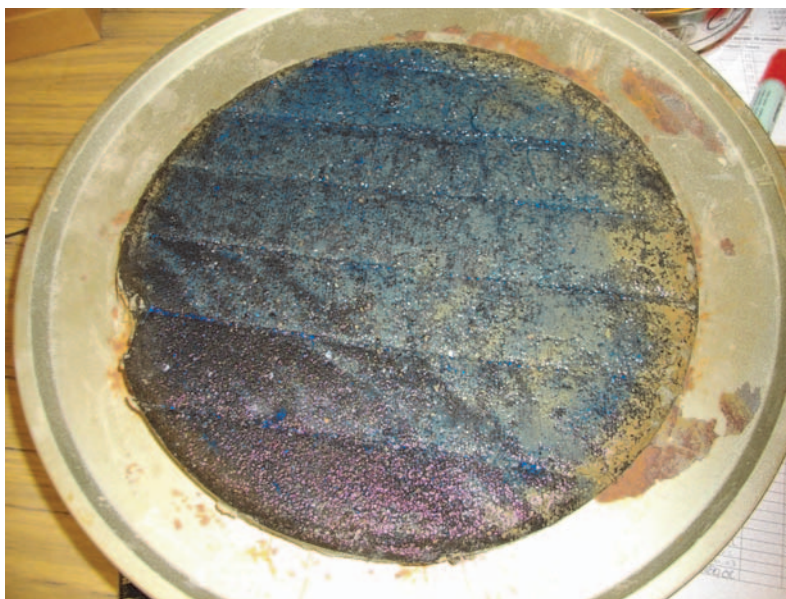


Figure 4. Eprouvette de GSB après percolation avec le colorant bleu

Tableau 2. Propriétés des échantillons de GSB testés selon la norme NF P 84-705

Site	Teneur en eau initiale (%)	Teneur en eau en fin de test (%)	Epaisseur sous 10 kPa (mm)	Conductivité hydraulique ^a (m/s)	CEC (meq/100g)	Cations échangeables (cmol/kg)			
						Na	K	Ca	Mg
D1	43	61	10,4	$5,5 \times 10^{-6}$	96,3	2,9	0,9	37,3	1,8
D2	26	95	9,4	$3,6 \times 10^{-6}$	75,2	3,3	0,1	35,2	0,8
D3	30	74	6,9	$7,7 \times 10^{-11}$	85,2	7,5	1,0	29,3	8,3
D4	27	69	7,6	$4,5 \times 10^{-10}$	84,5	8,4	1,0	30,1	7,8

^a valeur moyenne obtenue pour la charge hydraulique appliquée la plus élevée

3.3 Détermination de la capacité d'échange cationique et de la proportion des différents cations dans la bentonite

La capacité d'échange cationique (CEC) et la proportion des différents cations présents dans la bentonite ont été déterminées selon la norme NF X 31-130 (AFNOR 1999). La CEC a été déterminée après extraction des cations interfoliaires par contact entre la bentonite et le chlorure de cobaltihexammine.

La CEC et les cations échangeables Na, K, Ca and Mg pour chaque échantillon de GSB prélevé sont présentés dans le tableau 2. On constate que l'échange ionique s'est totalement produit au sein des GSB; en effet, le sodium originellement contenu dans les bentonites a été remplacé par les ions Ca et Mg provenant des sols environnant et de la dissolution des carbonates au sein des GSB. Ces résultats sont cohérents avec les faibles indices de gonflement obtenus pour les différents échantillons.

Cette détermination a également été réalisée sur le sol recouvrant le géosynthétique bentonitique et sur le sol situé dessous. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3. On constate que les cations Ca et Na sont présents dans la même proportion dans les sols situés au dessus des GSB alors que le calcium apparaît comme le cation majoritaire dans les sols situés au dessous des GSB sauf pour le sol situé en dessous de l'échantillon D3. On peut noter à travers ce tableau qu'il existe une proportion de calcium contenue dans le sol entourant le GSB qui justifie donc sans aucun doute en grande partie l'échange cationique qui s'est presque totalement produit dans la bentonite.

Tableau 3. Propriétés des sols environnants

Site		Teneur en eau	CEC	Cations échangeables (cmol/kg)			
		(%)	(meq/100g)	Na	K	Ca	Mg
D1	Sol au dessus du GSB	8,74	14,81	8,16	0,29	8,56	0,37
	Sol en dessous du GSB	11,41	16,47	6,28	0,34	8,71	0,35
D2	Sol au dessus du GSB	6,18	21,74	4,53	0,17	4,69	0,24
	Sol en dessous du GSB	6,85	21,71	5,19	0,19	7,26	0,30
D3	Sol au dessus du GSB	5,27	24,34	5,87	0,31	5,63	0,29
	Sol en dessous du GSB	16,94	17,50	5,72	0,33	3,13	0,29
D4	Sol au dessus du GSB	8,89	22,04	4,64	0,51	8,27	0,80
	Sol en dessous du GSB	5,56	24,00	5,50	0,33	8,75	0,26

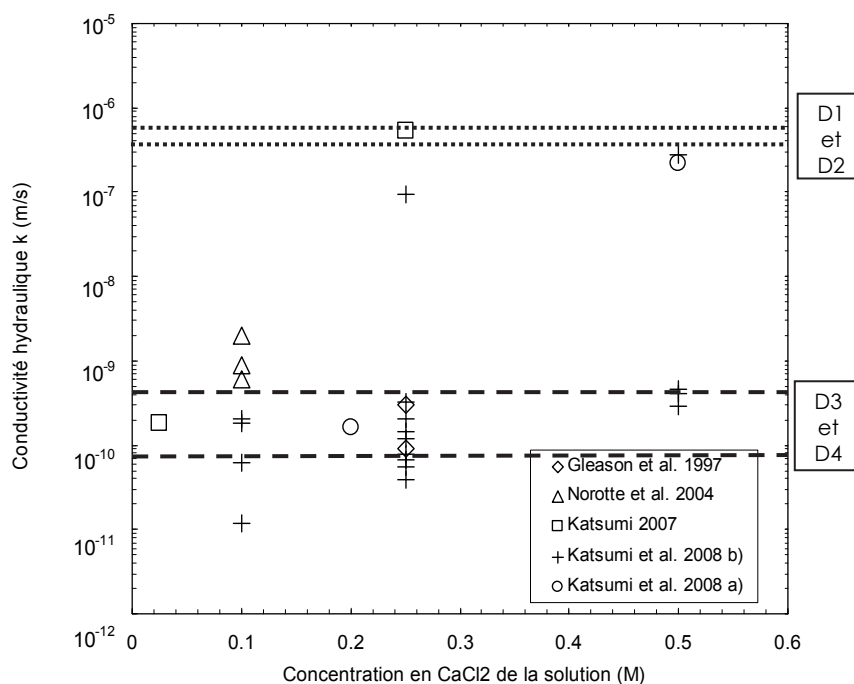
4. Discussion sur les propriétés des GSB excavés

4.1 Comparaison avec des essais réalisés en laboratoire sur des GSB vierges avec des solutions de chlorure de calcium

De nombreuses études ont montré que la conductivité hydraulique des GSB varie en fonction de la concentration de la solution de percolation et de la valence des ions contenus dans cette solution (Lin & Benson, 2000 ; Jo et al, 2001 ; Vasko et al, 2001 ; Lee et al, 2005 ; Jo et al, 2005).

La figure 5 présente les résultats d'essais réalisés sur des GSB vierges en laboratoire traversés par des solutions de chlorure de calcium à différentes concentrations (Gleason et al, 1997 ; Norotte et al, 2004 ; Katsumi et al, 2007 ; Katsumi et al, 2008a ; Katsumi et al, 2008b).

Les conductivités hydrauliques les plus élevées sont obtenues avec les solutions de CaCl_2 les plus concentrées ($>0,2$ M); en revanche de nombreux résultats montrent que les GSB conservent des valeurs faibles de conductivité hydraulique (entre 10^{-11} et 10^{-9} m/s) lorsqu'ils sont en contact avec des solutions présentant des concentrations en CaCl_2 plus faibles qui sont proches des valeurs de concentrations que l'on retrouve dans les pores des sols (entre 0,001 M et 0,004 M) (Egloffstein, 2001).

Figure 5. Conductivité hydraulique des GSB traversés par des solutions de CaCl_2 diluées

Les concentrations en CaCl_2 trouvées dans les sols situés au dessus et en dessous des GSB dans les quatre digues étudiées sont inférieures à 0,0037 M (Tableau 3). Pour cette plage de concentrations on peut comparer les valeurs de conductivités hydrauliques obtenues en laboratoire et pour les échantillons excavés. On constate que pour ces faibles concentrations en CaCl_2 il est normal de trouver les faibles valeurs de conductivités hydrauliques obtenues pour les échantillons de GSB D3 et D4.

La différence entre les valeurs de conductivité hydraulique obtenues pour les échantillons D3 et D4 ($k < 10^{-9}$ m/s) et les échantillons D1 et D2 ($k > 10^{-7}$ m/s) ne peut s'expliquer uniquement par l'échange cationique qui s'est déroulé au sein des bentonites mais par une combinaison de plusieurs facteurs : échange cationique et cycles de dessiccation-hydratation subis par les GSB. En effet, les GSB prélevés dans les digues D1 et D2 ont eu une durée de service plus grande (4,9 et 5,9 ans) qui les a soumis à une exposition aux aléas climatiques plus grande.

4.2 Comparaison avec des études récentes sur des GSB excavés d'ISD

Seulement quelques études récentes sur site ont été réalisées sur le comportement des GSB en couverture d'ISD avec des résultats complets et détaillés.

Benson et al. (2007) ont étudié des échantillons de GSB aiguilletés excavés d'une couverture d'ISD dans le Wisconsin après 2 ans et 4 ans de service. Les GSB contenaient initialement de la bentonite sodique et étaient couverts par 0,76 m de terre végétale. Les GSB excavés après 2 ans ont présenté des conductivités hydrauliques comprises entre $4,2 \cdot 10^{-10}$ et $9,4 \cdot 10^{-8}$ m/s alors que celles des GSB excavés après 4 ans de service étaient comprises entre $1,4 \cdot 10^{-8}$ et $8,1 \cdot 10^{-7}$ m/s. Le remplacement des ions sodium par les ions calcium et magnésium combiné à la déshydratation de la bentonite est apparu comme le facteur clé qui a engendré cette augmentation de conductivité hydraulique. Les sols environnants sont désignés comme les sources de cations Ca et Mg.

Meer and Benson (2007) ont détaillé des excavations de GSB aiguilletés réalisées dans trois ISD dans le Wisconsin et en Georgie après 4,6, 4,1 et 5,6 années de service. Tous les GSB contenaient initialement de la bentonite sodique et étaient recouverts par 0,75 m et 0,80 m de terre végétale selon le site. La majorité des ions sodium contenus dans les GSB excavés a été remplacée par des ions calcium et magnésium; les bentonites présentaient des indices de gonflement typiques des bentonites calciques (~ 10 mL/2g). Les conductivités hydrauliques des échantillons excavés étaient comprises entre $5,2 \cdot 10^{-11}$ to $1,3 \cdot 10^{-6}$ m/s et étaient étroitement reliées à la teneur en eau des échantillons lors de leur prélèvement; en effet, les GSB présentant une teneur en eau inférieure à 80% avaient des conductivités hydrauliques élevées (10^{-8} to 10^{-6} m/s) (Figure 6) alors que les GSB ayant une teneur en eau supérieure à 100% avaient des conductivités hydrauliques plus faibles (10^{-11} to 10^{-9} m/s). Selon Meer and Benson la variation abrupte de conductivité hydraulique visible à la Figure 7 suggère qu'une dessiccation du GSB entraînant une baisse de la teneur en eau conséquente a un effet dramatique sur la conductivité hydraulique du GSB.

Toujours selon Meer and Benson la conductivité hydraulique des GSB ne semble pas être reliée à la fraction molaire des cations Na présents dans les échantillons; en effet, tous les échantillons présentaient des fractions molaires faibles. En revanche, les GSB excavés peuvent être séparés en deux groupes en fonction de cette fraction molaire des cations Na: les échantillons ayant une conductivité hydraulique élevée ($> 10^{-7}$ m/s) et les échantillons présentant une conductivité hydraulique plus faible ($< 10^{-9}$ m/s) (Figure 7). Les valeurs faibles de conductivités hydrauliques sont similaires à celles obtenues dans les essais réalisés en laboratoire par Egloffstein (2001) et Jo (2005) sur des échantillons de GSB vierges avec des solutions de CaCl_2 diluées (10 mM); alors que les valeurs les plus élevées de conductivité hydrauliques obtenues sont causées par d'autres facteurs en conjonction avec l'échange cationique.

Touze-Foltz et al. (2010b) ont présenté des résultats obtenus sur des GSB aiguilletés excavés de deux couvertures d'ISD en France après 3 et 6 ans de service. Les GSB contenaient initialement de la bentonite calcique activée; l'épaisseur des sols de couverture étaient respectivement de 0,2 et 0,5 m et contenaient une grande quantité de carbonates de calcium. La bentonite contenue dans les échantillons prélevés a montré un échange cationique complet; les échantillons ne présentaient plus aucune capacité de gonflement et leurs conductivités hydrauliques étaient comprises entre $1,07 \cdot 10^{-6}$ et $6,91 \cdot 10^{-6}$ m/s. Les GSB n'assuraient donc plus leur fonction étanchéité à cause des nombreuses racines traversant les GSB, des cycles de dessiccation-hydratations et de l'échange cationique subis par le GSB.

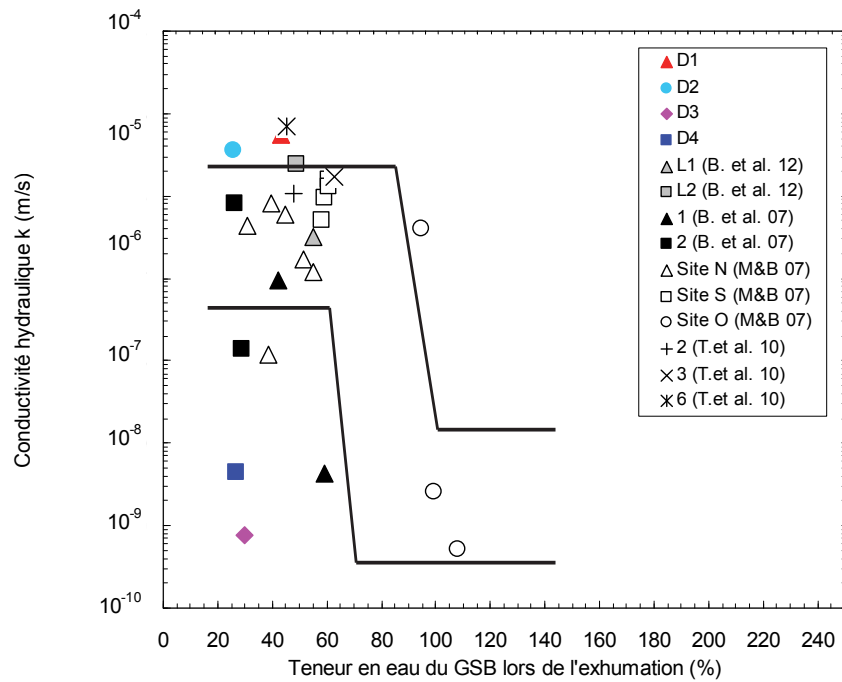


Figure 6. Conductivité hydraulique des GSB excavés en fonction de la teneur en eau au moment de l'excavation

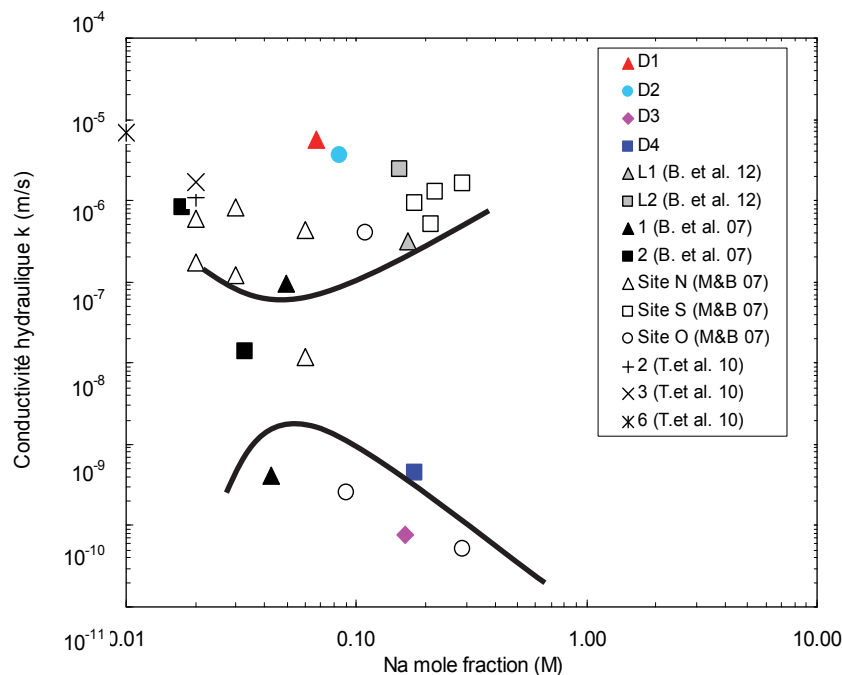


Figure 7. Conductivité hydraulique des GSB excavés en fonction de la fraction molaire des cations Na présents dans les échantillons

Pour les échantillons prélevés dans les digues D1 et D2 les valeurs de conductivités en fonction de la teneur en eau de la bentonite lors de l'excavation des échantillons de GSB sont en accord avec les tendances observées par Meer and Benson (2007) (Figure 6); des valeurs élevées de conductivités hydrauliques sont obtenues lorsque la teneur en eau est inférieure à 60%. Les échantillons de GSB excavés des digues D3 et D4 ont une teneur en eau très faible lors de leur excavation à cause de l'épaisseur faible de sol les recouvrant (respectivement 20 et 16 cm) mais présentent des valeurs de conductivités hydrauliques faibles qui peuvent s'expliquer par les durées de service des GSB qui sont inférieures à 3,5 ans.

Comme décrit par Meer and Benson (2007), même si il n'y a pas de relation apparente entre la conductivité hydraulique et la fraction molaire des cations Na présents dans les échantillons, les valeurs

obtenues dans les différentes études précédentes peuvent être divisées en deux groupes en fonction de la fraction molaire des cations Na (Figure 7), excepté pour deux points. Même si tous les échantillons de GSB excavés des digues ont une faible teneur en ions sodium (fraction molaire des cations Na entre 0,07 et 0,18), les valeurs de conductivités hydrauliques obtenues pour les échantillons D3 et D4 sont en adéquation avec le groupe des faibles valeurs de conductivités alors que les conductivités hydrauliques obtenues pour les échantillons D1 et D2 appartiennent au groupe des valeurs élevées. Cette différence entre les valeurs de conductivité hydrauliques obtenues pour les échantillons D1, D2 et D3, D4 peuvent être reliées aux différentes durées de service des GSB (moins de 3,5 ans pour les échantillons D3 et D4 et entre 5 et 6 ans pour les échantillons D1 et D2). L'échange cationique complet des ions sodium ainsi qu'une épaisseur insuffisante de sol de couverture des GSB qui ne peut pas le protéger de la dessiccation combinés à une durée de service et donc d'exposition aux conditions climatiques supérieure à 4 années ont entraîné la formation de fissures irréversibles au sein de la bentonite.

5. Conclusion

Des échantillons de GSB ont été excavés de quatre digues de retenue des eaux pluviales après des durées de service différentes variant entre 3,25 et 5,9 années. Les GSB étaient recouverts chacun d'une faible épaisseur de sol (entre 15 cm et 30 cm) et des échantillons des sols de couverture ont également été prélevés. Plusieurs essais ont été réalisés sur les échantillons et sur les sols prélevés afin de déterminer leurs teneurs en eau initiales, leurs capacités de gonflement, leurs conductivités hydrauliques ainsi que leurs teneurs en cations échangeables.

Les indices de gonflement ainsi que les teneurs en différents cations échangeables obtenus ont montré pour tous les échantillons excavés que les bentonites initialement sodiques avaient toutes subi un échange cationique complet et étaient devenues calciques.

Mais la différence dans les résultats de conductivité hydraulique obtenus entre les échantillons D1, D2 ($k \sim 10^{-6}$ m/s) et D3, D4 ($k < 10^{-9}$ m/s) ne peut pas être expliquée uniquement par cet échange cationique mais par une combinaison entre l'échange cationique et des cycles de dessiccation-hydratation subis par les GSB au sein des digues.

En effet, la comparaison entre les valeurs de conductivité hydrauliques obtenues pour ces échantillons excavés et des échantillons de GSB vierges testés en laboratoire avec des solutions de CaCl_2 diluées a montré que les GSB maintiennent une faible conductivité hydraulique (entre 10^{-11} et 10^{-9} m/s) lorsque qu'ils sont en contact avec des solutions faiblement concentrées en calcium ($< 0,004$ M) qui sont représentatives de la concentration en calcium contenue dans les eaux porales des sols environnant les GSB dans les digues.

Les résultats de cette étude sont cohérents avec les études récentes menées sur des échantillons excavés de couverture d'ISD issues de la littérature qui nous indiquent que l'échange cationique combiné à des cycles de dessiccation-hydratation affecte de manière irréversible le GSB qui ne pourra plus assurer sa fonction de barrière hydraulique.

5. Remerciements

La communauté d'agglomération du Havre (CODAH) a permis la réalisation de cette étude en autorisant les prélèvements et les essais sur les GSB. L'assistance de l'équipe technique de la CODAH lors des prélèvements de GSB est aussi vivement remerciée.

6. Références bibliographiques

- AFNOR, 1999, NF X 31,130, Qualité des sols - Méthodes chimiques - Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) et des cations extractibles, Association Française de Normalisation.
- AFNOR, 2008, XP P84-700, Géosynthétiques bentonitiques – Généralités – Définitions, Association Française de Normalisation (AFNOR), Paris, France.
- AFNOR, 2008, NF P 84-705. Détermination à l'œdoperméamètre des caractéristiques de gonflement, flux et perméabilité des géosynthétiques bentonitiques (GSB) - Essai de caractérisation et essai de performance, Association Française de Normalisation (AFNOR), Paris, France.

- AFNOR, 2002, XP P 84-703, Géosynthétiques bentonitiques - Détermination de la capacité de gonflement des géosynthétiques bentonitiques, Association Française de Normalisation (AFNOR).
- Benson, C., Thorstad, P., Jo, H., Rock, S. 2007. Hydraulic performance of geosynthetic clay liners in a landfill final cover. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 133(7): 814-827.
- Bouazza, A. 2002. Geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes* 20: 3-17.
- Egloffstein, T. 2001. Natural bentonites-Influence of the ion exchange and partial desiccation on permeability and self-healing capacity of bentonites used in GCLs. *Geotextiles and Geomembranes* 19:427-444.
- Gleason, M., Daniel, D., Eykolt, G. 1997. Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(5): 438-445.
- 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.
- Heibaum, M., Fleischer, P. 2010. Geosynthetic clay liners (GBR-C) for hydraulic structures. 3rd International Symposium on Geosynthetic Clay Liners, Würzburg, Germany, 15-16 September 2010.
- Jo, H., Katsumi, T., Benson, C., 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.
- Jo, H., Benson, C., Shakelford, C., Lee, J-M., Edil, T. 2005. Long term hydraulic conductivity of a geosynthetic clay liner permeated with inorganic salt solutions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 131(4) : 405-417.
- Katsumi, T., Ishimori, H., Ogawa, A., Yoshikawa, K., Hanamoto, K., Fukagawa, R. 2007. Hydraulic conductivity of nonprehydrated geosynthetic clay liners permeated with inorganic solutions and waste leachates. *Soils and Foundations* 47 (1): 79-96.
- Katsumi, T., Ishimori, H., Onikata, M., S., Fukagawa, R. 2008a. Long term barrier performance of modified bentonite materials against sodium and calcium permeant solutions. *Geotextiles and Geomembranes* 26:14-30.
- Katsumi, T., Ishimori, H., Ogawa, A., Maruyama, S., Fukagawa, R. 2008b. Effect of water content distribution on hydraulic conductivity of prehydrated GCLs against calcium chloride solutions. *Soils and Foundations* 48 (3): 407-417.
- Lee, J., Shackelford, C., Benson, C., Jo, H., Edil, T. 2005. Correlating index properties and hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 131(11): 1319-1329.
- Lin, L., Benson, C. 2000. Effect of Wet-Dry Cycling on Swelling and Hydraulic Conductivity of GCLs. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126(1): 40-49.
- Meer, S., Benson, C. 2007. Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners exhumed from landfill final covers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 133(5): 550-563.
- Norotte, V., Didier, G., Guyonnet, D., Gaucher, E. 2004. Evolution of GCL hydraulic performance during contact with landfill leachate. *Advances in Geosynthetic Clay Liner Technology: 2nd Symposium, ASTM STP 1456, R.E. Mackey and K. von Maubeuge, Eds, ASTM International, West Conshohocken, PA.*
- Touze-Foltz, N., Lupo, J., Barroso, M. 2010a. Geoenvironmental applications of geosynthetics. 4th European Geosynthetics Conference (EuroGeo 4), Keynote paper, Edinburgh, Scotland, United Kingdom, 7-10 September 2008.
- Touze-Foltz, N., Croissant, D., Rosin-Paumier, S., Pirrion, T., Ouvry, J-F. 2010b. Performance of a GCL in a landfill cover after six years in service. 3rd International Symposium on Geosynthetic Clay Liners, Würzburg, Germany, 15-16 September 2010.
- Vasko, S.M., Jo, H.Y., Benson, C.H., Edil, T.B., Katsumi, T. 2001. Hydraulic conductivity of partially prehydrated geosynthetic clay liners permeated with aqueous calcium chloride solutions. *Geosynthetics Conference 2001, IFAI, St Paul, MN.*
- Werth, K., Heerten, G., Pries, J-K., Klompmaker, J. 2010. 20 years experience with GCLs in dams and dykes. 3rd International Symposium on Geosynthetic Clay Liners, Würzburg, Germany, 15-16 September 2010.
- Zanzinger, H., Touze-Foltz, N. 2009. Clay geosynthetic barriers performance in landfill covers. *GIGSA GeoAfrica 2009 Conference, Cape Town, 2-5 September 2009.*