

UTILISATION DE MÉTHODES HYDRAULIQUES ET MÉCANIQUES POUR DIFFÉRENCIER LES TYPES DE BENTONITES

ON THE USE OF MECHANICAL AND HYDRAULIC METHODS FOR DIFFERENTIATING BETWEEN BENTONITES

Sandrine PAUMIER¹, Nathalie TOUZE-FOLTZ¹, Anne PANTET², Dominique GUYONNET³, Véronique NOROTTE⁴, Gérard DIDIER⁴

¹ Cemagref, Antony, France

² Laboratoire d'Études Aérodynamiques (LEA), Chasseneuil, France.

³ BRGM, Orléans, France.

⁴ INSAVALOR, Villeurbanne, France

RÉSUMÉ – Les géosynthétiques bentonitiques (GSB) sont des matériaux qui peuvent être utilisés en fond d'installation de stockage de déchets et être exposés à des lixiviats. En fonction de la nature et de l'état d'hydratation de la bentonite, les lixiviats pourraient avoir un impact sur l'étanchéité du GSB. Un outil de différenciation rapide des bentonites est donc nécessaire. Des essais à l'œdoperméamètre et au filtre presse montrent que les GSB contenant de la bentonite calcique activée ou de la bentonite sodique naturelle présentent des conductivités hydrauliques peu différentes. Considérant que l'étanchéité du GSB est liée à la structuration des matériaux, des essais rhéométriques ont été réalisés. La viscosité et le seuil d'écoulement permettent de différencier les bentonites sodiques naturelles des bentonites calciques activées.

Mots-clés : oedoperméamètre, filtre-pressé, rhéomètre, activation, suspension.

ABSTRACT – Geosynthetic clay liners (GCLs) can be used in landfill bottom liners. In these conditions, the material may be exposed to leachate. Depending on the bentonite saturation, the leachate could more or less modify the hydraulic conductivity of GCL. An efficient method to differentiate the bentonite type is thus required. Several oedopermeameter tests and filter press tests show similarities between the hydraulic conductivity of the natural sodium bentonites and the activated calcium bentonites. As the low hydraulic conductivity of the bentonite originates from its structuration, rheometric methods that are mechanical methods very sensitive to the structuration, were used. The viscosity and the yield stress determination also allowed differentiating natural sodium bentonites from activated calcium bentonites.

Keywords: oedopermeameter, filter press, rheometer, activation, dispersion.

1. Introduction

Un géosynthétique bentonitique (GSB) est un produit manufacturé en forme de nappe. Il est composé le plus souvent de deux géotextiles, tissés et/ou non-tissés, encadrant une couche de bentonite. L'ensemble est lié par un aiguilletage ou des coutures. Une bentonite est une roche naturelle contenant une grande proportion d'argile gonflante, de la smectite, ainsi que des minéraux associés de type feldspaths, quartz ... La part de smectite au sein de la bentonite peut varier d'un matériel à l'autre. Une smectite est composée de feuillets d'épaisseur nanométrique et d'extension micrométrique. Ces feuillets présentent des défauts cristallins qui leur confèrent une charge négative. Pour équilibrer cette charge, les feuillets sont entourés à l'état naturel de cations hydratés de type calcium, magnésium, sodium, ammonium et potassium à divers ratio. Ces cations sont susceptibles de s'échanger avec le fluide environnant.

Les GSB sont utilisés en fond d'installations de stockage de déchets, sous le dispositif d'étanchéité par géomembrane, pour pallier d'éventuelles faiblesses de la barrière géologique (dite barrière passive). Différentes bentonites sont utilisées pour l'élaboration des GSB. Elles sont exposées aux lixiviats lorsque des défauts existent dans la géomembrane. Leur hydratation provoque des échanges entre les cations contenus dans le lixiviat et le cortège d'échange des smectites (Verburg et Baveye, 1994) pouvant altérer la conductivité hydraulique du GSB (Rowe et al., 2005).

Au vu de la grande diversité des bentonites existant dans le commerce, il serait envisageable d'adapter le choix du GSB au type de lixiviat susceptible d'être formé. À l'échelle des conditions de stockage, l'imbibition du lixiviat dans la bentonite est un phénomène lent. Les essais en œdoperméamètre permettent d'évaluer précisément l'évolution de la conductivité hydraulique dans les cas de contact avec des effluents (Touze-Foltz et al., 2008). Cependant, ces essais sont longs (2-6

mois), rendant coûteuse toute étude comparative. L'objectif du travail de recherche présenté dans cet article est de mettre au point un protocole permettant d'évaluer rapidement l'action d'un lixiviat sur la conductivité hydraulique d'un GSB. On ne présentera ici que les résultats préliminaires obtenus lorsque la bentonite est mise en contact avec du NaCl 1mM. L'objectif de cette première phase est d'évaluer la possibilité de distinguer les différents types de bentonite au moyen de différents essais hydrauliques et rhéologiques.

La faible conductivité hydraulique des GSB provient de la capacité d'hydratation et de structuration des feuillets de smectite. Cette structuration est d'autant plus visible lors de la réalisation de suspensions. De plus, les contacts entre les surfaces argileuses et le liquide sont optimisés, accélérant ainsi leur interaction. Une étude mécanique pourrait donc permettre de différencier efficacement les matériaux.

La filtration sous pression des suspensions a également été utilisée pour caractériser ces suspensions. La mesure de la quantité de fluide extraite au cours du temps permet d'appréhender la conductivité hydraulique des cakes formés (Pantet et Monnet, 2007). Cette valeur est comparée à la conductivité hydraulique obtenue à l'œdoperméamètre. La rhéologie permet de détecter de fines variations de la microstructuration des suspensions de smectites (Coussot, 1997). Les essais d'écoulement, réalisés à l'aide d'un rhéomètre, permettent de déterminer la viscosité, le seuil d'écoulement (Barnes, 1999) et la thixotropie des suspensions (Mujumbar et al., 2001). Les GSB testés sont représentatifs de la diversité des GSB utilisés en Europe. Ils contiennent de la bentonite calcique naturelle, de la bentonite sodique naturelle ou de la bentonite calcique activée en sodique.

Les matériels et méthodes utilisés seront tout d'abord exposés, puis les résultats obtenus à l'œdoperméamètre, au filtre presse et au rhéomètre avant de conclure.

2. Matériel et méthodes

2.1. Les GSB

Les six GSB étudiés sont couramment utilisés en fond d'installation de stockage de déchets. Leurs matériaux constitutifs, géosynthétiques et bentonite, ainsi que leurs modes de liaisonnement sont variés (tableau I).

Tableau I. Description des six géosynthétiques bentonitique étudiés.

	Géotextile supérieur	Bentonite	Géotextile inférieur	Assemblage	Masse surfacique (kg/m ²)
LX1	Tissé	Calcique activée en poudre	Tissé	Cousu	5
LX2	Tissé	Sodique naturelle en grains	Non-tissé	Aiguilleté	5
LX3	Non-tissé	Sodique naturelle en poudre	Tissé	Aiguilleté	5,3
LX5	Tissé	Calcique activée en grains	Non-tissé	Aiguilleté	5
LX6	Non-tissé	Calcique naturelle en grains	Tissé	Aiguilleté	5
LX8	Tissé	Calcique naturelle en poudre	Tissé	Cousu	10

Le tableau I montre que deux GSB contiennent de la bentonite calcique naturelle (LX6 et LX8); deux GSB contiennent de la bentonite sodique naturelle (LX2 et LX3) et deux GSB contiennent de la bentonite calcique activée en sodique (LX1 et LX5). Les caractéristiques chimiques des bentonites issues de ces GSB sont reportées dans le tableau 2. Elles ont été déterminées par Guyonnet et al. (2008) dans le cadre du programme LIXAR2. La proportion de smectite dans les bentonites est comprise entre 68,8% et 76,8% sauf pour LX6 (29,6%). La capacité d'échange cationique (CEC) correspond au nombre de cations monovalents qu'il est possible de substituer aux cations compensateurs pour compenser la charge négative de 100g d'argile. Les CEC s'échelonnent de 66,2 à 75meq/100g sauf pour LX6 (33,7meq/100g). Les cations extractibles des bentonites calciques naturelles sont principalement du calcium et du magnésium tandis que pour les bentonites sodiques naturelles et calciques activées, le sodium est largement majoritaire.

Tableau II. Caractéristiques chimiques des différentes bentonites déterminées par Guyonnet et al. (2008).

		LX1	LX2	LX3	LX5	LX6	LX8
Pourcentage de smectite (%)		76,5	68,8	71,3	71,5	29,6	76,8
CEC (meq/100g)		75	66,2	73,3	70,1	33,7	72,5
Cation extractibles (% du cortège d'échange)	Ca ²⁺	9,9	27,5	27,8	10,6	67,6	60,3
	K ⁺	0,7	1,2	1,8	0,5	1,2	0,6
	Mg ²⁺	10,1	6,2	3,4	9,9	24,8	27,9
	Na ⁺	79,3	65,1	66,9	79,1	6,4	11,3

2.2. Les essais à l'œdoperméamètre

Les essais de perméabilité sont réalisés selon la norme française [NF P 84-705]. Ils consistent à mesurer des flux et une perméabilité sur un GSB sous une contrainte normale donnée et soumis à une charge hydraulique constante au contact d'un liquide donné (Figure 1a). Le principe de l'essai est décrit par Guyonnet et al. (2005, 2008) et Langlois (2006).

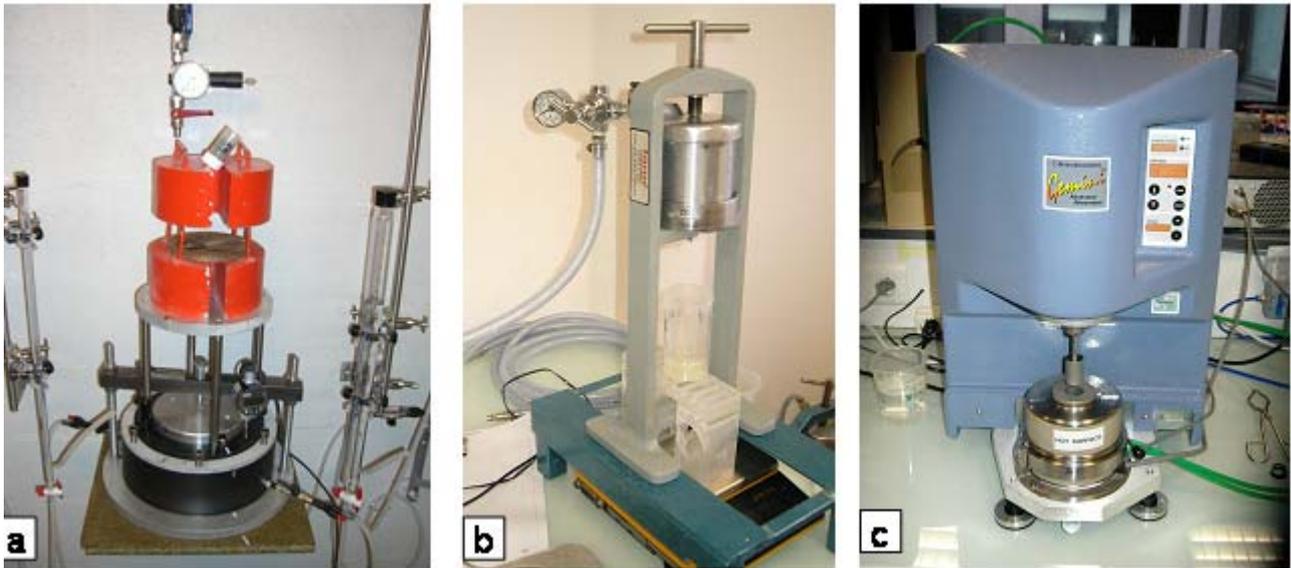


Figure 1. Les méthodes utilisées au cours de la première phase du projet : (a) œdoperméamètre, (b) filtre presse API et (c) rhéomètre Boehlin Gemini du LEA de Poitiers.

La conductivité hydraulique des six GSB est mesurée après une préhydratation et un gonflement au NaCl 1mM sous une contrainte normale de 10kPa et une différence de charge hydraulique de part et d'autre de l'éprouvette nulle. Quand le gonflement de l'éprouvette a atteint 90% du gonflement calculé pour un temps infini, l'œdoperméamètre est passé en mode "flux". La contrainte normale est alors augmentée à 25 kPa pour une durée d'au moins un mois. La charge hydraulique est augmentée progressivement jusqu'à 120 cm. Le but est de créer un écoulement au travers du GSB. Suivent des paliers de contrainte à 50 et 100 kPa toujours sous une charge hydraulique de 120 cm sur une durée d'au moins 1 mois. Cette succession de paliers simule le remplissage d'un casier par les déchets.

L'augmentation de la contrainte de confinement entraîne une consolidation de la bentonite avec une réduction de son volume des vides soit un tassement de l'éprouvette et une diminution du coefficient de perméabilité parallèlement à l'augmentation de la densité de la bentonite. L'évolution de l'épaisseur de l'éprouvette est suivie au cours du temps pendant tout l'essai. Les volumes de solution entrant et sortant (percolats) sont suivis en fonction du temps.

2.3. Les essais de filtration sous pression

Les essais de filtration ont été réalisés à l'aide d'un filtre presse API de 90 mm de diamètre et 90 mm de hauteur (Figure 1a). La bentonite (40 g) est mise en suspension dans 400 ml de fluide puis agitée 3 min à 11000 tr/min. La suspension est laissée au repos 24 h avant l'essai pour permettre le gonflement de la smectite et ainsi atteindre un état stable. La suspension (300 ml) est placée dans la cellule puis soumise à une pression constante (700 kPa) par application directe d'air pressurisé. Sous l'effet de la pression la quantité de filtrat en sortie de cellule est pesée en continu. L'essai dure 1 h. À ce stade, la cellule est démontée. On observe la formation d'un cake plus ou moins consistant au contact du filtre et une suspension surnageante. Leur poids ainsi que l'épaisseur du cake sont notés en sortie d'essai et après séchage à 110°C.

La perméabilité intrinsèque du cake K_c est déterminée à l'aide de la loi de Darcy. Cette méthode, décrite par de nombreux auteurs, suppose que la perméabilité et le volume spécifique du cake sont constant au cours de la filtration (Sherwood, 1997, Li *et al.*, 1997, Benna *et al.*, 2002 ; Pantet et Monnet, 2007). Le volume de filtrat augmente linéairement avec la racine carrée du temps (Équation 1), nous pouvons donc déterminer la pente a de la courbe de filtration et K_c (Équations 2 et 3). Les perméabilités obtenues à l'aide du filtre presse sont transformées en conductivité hydraulique à l'aide de l'équation 4.

$$\Omega = \left[\frac{2\Delta P A^2 K}{\mu b} \right]^{0,5} t^{0,5} = at^{0,5} \quad (1)$$

$$K_c = \frac{a^2 \mu b}{2\Delta P A^2} \quad (2)$$

$$b = \frac{cA}{\Omega} \quad (3)$$

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (4)$$

où Ω est le volume de filtrat (m^3); ΔP est la différence de pression (Pa); A est la section du filtre presse (m^2); μ est la viscosité du filtrat ($kg.m^{-1}.s^{-1}$); b est le volume spécifique du cake (sans dimension) (Equation 3); t est le temps (s); et c est l'épaisseur du cake (m); K est la conductivité hydraulique ($m.s^{-1}$); k est la perméabilité intrinsèque (m^2); ρ est la masse volumique du liquide ($1000kg.m^{-3}$); g est l'accélération de la pesanteur ($9,81m.s^{-2}$) et μ est la viscosité du liquide ($10^{-1}kg/m.s$).

2.4. Les essais rhéologiques

Les propriétés mécaniques des suspensions préparées pour les essais de filtre presse sont évaluées par des essais rhéométriques. Cet essai consiste à mesurer la résistance au cisaillement de la suspension. Pour cela la suspension est placée dans un cylindre creux réglé en température (20°C). Un cylindre plein, plongé dans la suspension, vient cisailier le fluide à une vitesse programmée (Fig. 1b). Parmi les différents paramètres accessibles via cet essai, nous nous intéresserons plus particulièrement à la viscosité et au seuil de contrainte afin d'évaluer la structuration de la suspension. Cette structure interne pourrait être liée à la perméabilité du matériau.

Le rhéomètre utilisé est un BOEHLIN Gémini haute résolution équipé de cylindres coaxiaux sablés (CCStarch) et surmontés d'un dispositif anti-évaporation. Le protocole d'essai en vitesse asservie est précédé d'un précisaillement de 60 s à 100 s^{-1} suivi de 160 s d'attente. L'essai consiste à appliquer des paliers de vitesses de cisaillement croissantes (de $10^{-3} s^{-1}$ à 500 s^{-1}) puis décroissantes (de 500 s^{-1} à $10^{-3} s^{-1}$). Les 50 paliers ont une distribution logarithmique sur l'intervalle, ils se décomposent en 15 s d'attente de la vitesse demandée et l'acquisition correspond à la moyenne des mesures obtenues au cours des 5 s suivantes. Pour les suspensions de bentonite calcique naturelle, dont la stabilité est limitée dans le temps, le protocole a été ramené à une montée simple de 0,1 s^{-1} à 150 s^{-1} précédé d'un court précisaillement.

3. Résultats

3.1. Les essais à l'œdoperméamètre

Les conductivités hydrauliques des GSB sont déterminées à l'œdoperméamètre. Le tableau III présente les résultats obtenus en fin d'essai, sous une contrainte de 100kPa et une charge hydraulique de 1,20m.

Les conductivités hydrauliques des GSB vont de $1,2 \cdot 10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$ à $2,4 \cdot 10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$ pour les GSB LX1, LX2, LX3 et LX5. Les GSB contenant de la bentonite calcique naturelle, étudiés dans le cadre de ce projet, ont des conductivités hydrauliques nettement plus importantes. Le nombre de volume des vides est faible car à ces conductivités hydrauliques, le temps de percolation est long. Ainsi l'équilibre chimique n'est peut être pas atteint, toutefois des mesures de la conductivité hydraulique de l'effluent en cours de test donne des valeurs quasiment stables.

Tableau III. Conductivités hydrauliques (m.s^{-1}) obtenues à l'aide de l'oedoperméamètre (k_O) et du filtre presse (k_{FP}) pour les six bentonites au contact d'une solution de NaCl 1mM. Avec nV_v : nombre de volume des vides (essais à l'oedoperméamètre); nc : non communiqué.

	LX1	LX2	LX3	LX5	LX6	LX8
k_O (m.s^{-1})	$2,4 \cdot 10^{-11}$	$1,2 \cdot 10^{-11}$	$1,4 \cdot 10^{-11}$	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$4,5 \cdot 10^{-9}$	$4,7 \cdot 10^{-10}$
nV_v	3,4	2,1	1	3,5	1,3	15,1
k_{FP} (m.s^{-1})	$2,3 \cdot 10^{-11}$	$1,9 \cdot 10^{-11}$	$2,3 \cdot 10^{-11}$	$1,9 \cdot 10^{-11}$	$4,1 \cdot 10^{-11}$	$4,1 \cdot 10^{-10}$

3.2. Les essais de filtration sous pression

L'évolution de la masse de filtrat Ω obtenue au cours du temps est représentée pour chaque suspension de bentonite sur la figure 2. Les masses de filtrats obtenues pour les suspensions de bentonite calcique naturelle sont supérieures aux masses obtenues pour les autres suspensions. Ainsi, le cake formé lors de la filtration est moins efficace en termes d'étanchéité que les autres matériaux. Cependant, du fait de la sédimentation de la suspension dans la cellule de filtration, il est impossible de différencier le cake de la suspension sédimentée et sa conductivité hydraulique ne peut donc pas être déterminée.

Les courbes de filtration des bentonites sodiques naturelles et des bentonites calciques activées sont très proches, le calcul de la conductivité hydraulique des cakes donne également des résultats peu différenciés (Tableau 3). Les valeurs sont proches des valeurs obtenues à l'oedoperméamètre.

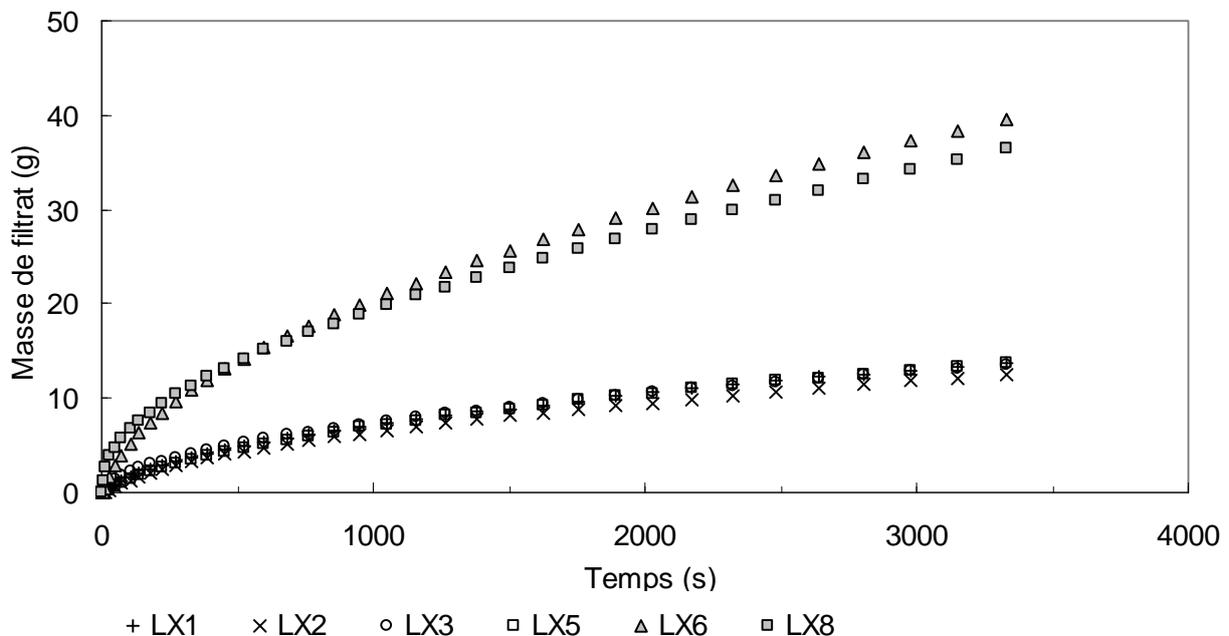


Figure 2. Courbes de filtrations obtenues pour diverses suspensions de bentonites.

3.3. Les essais rhéologiques

Les courbes d'écoulement en vitesse de cisaillement asservie consistent à imposer au cylindre interne de respecter des paliers de vitesses successifs. La capacité d'écoulement du fluide est définie par sa viscosité. Plus le fluide est visqueux, plus la contrainte à appliquer au cylindre interne est élevée.

Les fluides les plus simples sont les fluides visqueux dits "newtoniens. Leur viscosité est indépendante de la vitesse de cisaillement. Les suspensions de bentonite calcique naturelle sont de ce type, la contrainte augmente linéairement avec la vitesse de cisaillement (Figure 3a). Les viscosités sont très faibles et les contraintes atteintes au cours de l'essai ne dépassent pas 0,15 Pa. Ce comportement atteste que les feuillets de smectite en suspension sont regroupés en agrégats avec peu d'interactions (Paumier et al., 2008).

Les suspensions de bentonites sodiques naturelles sont rhéofluidifiantes, la viscosité du fluide diminue avec l'augmentation des vitesses de cisaillement. Les rhéogrammes obtenus sont donc incurvés (Figure 3b). Un seuil d'écoulement de moins de 20 Pa est également visible au début des courbes. Ce phénomène complexe se produit pour des suspensions structurées en gels. Le seuil d'écoulement correspond à la valeur de contrainte minimale nécessaire pour obtenir un écoulement de la suspension. Il se traduit sur la courbe par une augmentation importante des contraintes à très faible vitesse de cisaillement.

Les seuils d'écoulement obtenus avec les suspensions de bentonites calciques activées sont supérieurs à 80 Pa. La forme particulière du rhéogramme de LX5 est liée à des hétérogénéités de cisaillement dans l'entrefer. La différence de seuil d'écoulement indique que les bentonites calciques activées sont plus structurées que les bentonites sodiques naturelles. Cependant, une fois la contrainte seuil atteinte, les suspensions se liquéfient rapidement.

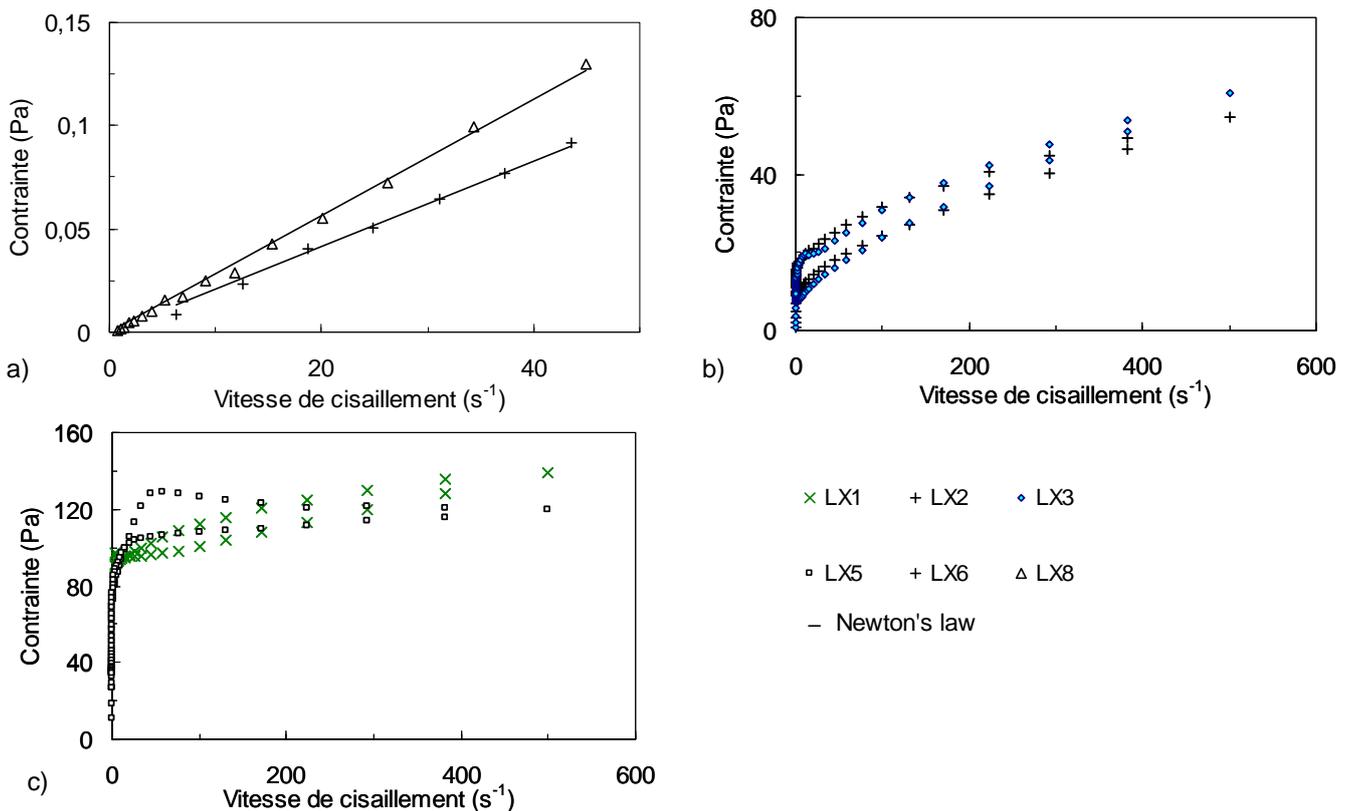


Figure 3. Rhéogrammes obtenus pour des suspensions de bentonite calcique naturelle (a: LX6, LX8), de bentonite sodique naturelle (b: LX2, LX3) et de bentonite calcique activée (c: LX1 et LX5), préparée avec du NaCl 1mM.

4. Discussion

L'œdoperméamètre présente deux avantages importants. Tout d'abord, les conditions d'essais peuvent être adaptées pour correspondre au mieux aux conditions sur site : la contrainte normale et la charge hydraulique reproduisent respectivement le poids des déchets sur site et la pression des lixiviats sur le GSB. De plus, le GSB est étudié dans son intégralité, ce qui présente un avantage par rapport au filtre-presse et au rhéomètre. Toutefois, comme indiqué précédemment, le principal inconvénient de cette méthode est sa durée, de 3 à 6 mois, et l'équipement important nécessaire à ces essais. Ainsi l'essai en œdoperméamètre est assez coûteux et long mais fournit une conductivité hydraulique bien représentative du matériau dans son domaine d'application. La détermination de la conductivité hydraulique permet de différencier aisément les performances des GSB contenant de la bentonite calcique naturelle des autres bentonites (Tableau IV.).

Le filtre presse est un appareil peu coûteux, simple et rapide d'utilisation. Son apport est de deux types (Tableau IV) : (1) il permet de différencier les bentonites calciques naturelles des autres bentonites en observant les courbes de filtration, (2) la conductivité hydraulique du cake obtenue en une journée avec le filtre presse est proche de la conductivité hydraulique obtenue à l'œdoperméamètre en plusieurs mois. L'étude de suspensions de bentonites permet de maximiser les interactions fluide/bentonite. Les conductivités hydrauliques obtenues devraient donc correspondre au résultat à long terme de l'œdoperméamètre. Toutefois cette méthode nécessite encore quelques développements afin de définir précisément l'épaisseur du cake. De plus cette méthode ne permet pas de déterminer les conductivités hydrauliques des suspensions peu stables, ce qui risque d'engendrer des difficultés lors de l'étude de fluides agressifs. Dans ce cas, seule la courbe de filtration serait utilisable.

Tableau IV. Synthèse des paramètres permettant de différencier les types de bentonites. k_O et k_{FP} sont les conductivités hydrauliques déterminées respectivement à l'œdoperméamètre et au filtre presse.

	Bentonites sodiques naturelles	Bentonites calciques activées	Bentonites calciques naturelles
Oedoperméamètre	k_O faible		k_O fort
Filtre presse	écoulement faible k_{FP} faible		écoulement important k_{FP} non déterminable
Rhéométrie	seuil faible	seuil fort	pas de seuil

Les courbes d'écoulement peuvent être déterminées avec des rhéomètres de moyenne gamme, peu coûteux. Leur utilisation est simple et pourrait permettre de réaliser de nombreux essais comparatifs en peu de temps. Le protocole d'essai pourrait être modifié pour réduire le temps d'essai à quelques minutes. Les courbes d'écoulement permettent de différencier immédiatement les suspensions de bentonite calcique naturelle. Cette différence est également visible à l'œil nu puisque les suspensions sont peu stables et très peu visqueuses.

La rhéométrie est la seule méthode qui a donné des résultats contrastés entre les bentonites sodiques naturelles et calciques activées (Tableau IV). La figure 4 reporte les valeurs de conductivité hydraulique obtenues à l'œdoperméamètre et les seuils d'écoulement obtenus sur les courbes d'écoulement pour chaque bentonite. Les suspensions de bentonites sodiques naturelles ont des seuils d'écoulement nettement plus faibles que les suspensions de bentonites calciques activées. Toutefois le lien entre ce seuil d'écoulement et la conductivité hydraulique du matériau est difficile à établir. Une suspension à seuil d'écoulement étant une suspension très structurée, on pourrait penser qu'il existe une valeur de seuil en dessous de laquelle la conductivité hydraulique devient importante.

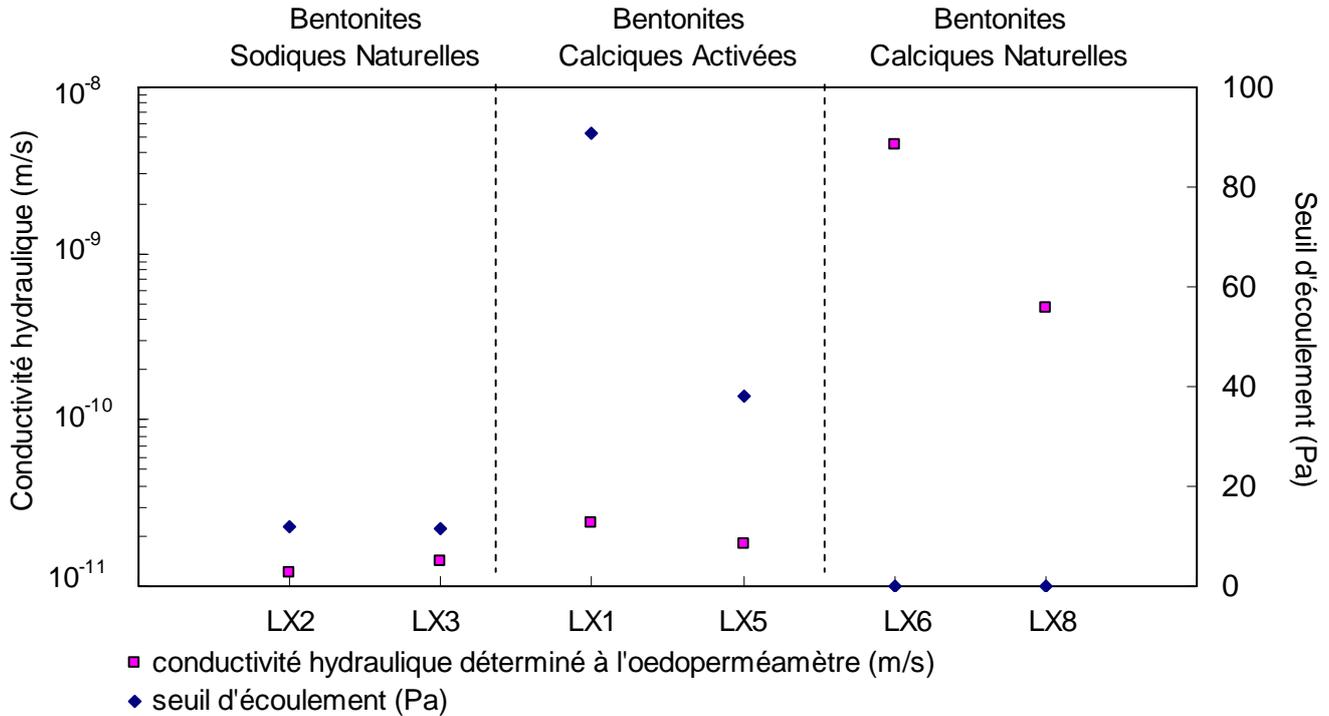


Figure 4 : Conductivités hydrauliques obtenues à l'œdoperméamètre et valeurs de seuil obtenues au rhéomètre pour les différentes bentonites en contact avec du NaCl 1mM.

5. Conclusion

Dans cette étude, les conductivités hydrauliques de six GSB aux caractéristiques physico-chimiques variées ont été déterminées à l'œdoperméamètre sur le GSB entier et au filtre-presse sur des suspensions réalisées à partir de la bentonite extraite des GSB. Les bentonites sodiques naturelles et calciques activées ont des conductivités hydrauliques proches les unes des autres et inférieures aux conductivités hydrauliques des bentonites calciques naturelles pour les matériaux testés dans le cadre de cette étude. D'autres essais à l'œdoperméamètre réalisés sur une bentonite calcique différente de celles testées dans le cadre du projet de recherche LIXAR 2 ont révélé des performances comparables à celle des bentonites calciques activées et sodiques naturelles.

Seules les courbes d'écoulement obtenues au rhéomètre ont permis de différencier les trois types de bentonites. Les viscosités des suspensions de bentonites calciques naturelles sont très faibles, tandis que les autres bentonites forment des suspensions nettement plus visqueuses et rhéofluidifiantes. Leur différenciation est possible par l'observation du seuil d'écoulement. Les bentonites sodiques naturelles ont des seuils d'écoulement nettement plus faibles que les bentonites calciques activées.

D'autres essais seraient nécessaires pour valider une équivalence réelle entre les conductivités hydrauliques obtenues à l'œdoperméamètre et au filtre presse mais, au vu des résultats, cet objectif semble accessible. De même, des développements seraient nécessaires pour relier l'évolution de la structuration mécanique des suspensions aux valeurs de conductivité hydraulique. L'idée serait ici de détecter si l'apparition d'un seuil d'écoulement est corrélée aux faibles conductivités hydrauliques.

6. Références

- Barnes H.A. (1999). The yield stress—a review or 'panta roi'—everything flows? *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 81, pp. 133–178.
- Benna M., Kbir-Arigoib N., Clinard C., Bergaya F. (2002). Card-house microstructure of purified Na-montmorillonite gels evidenced by filtration properties at different pH. *Progress in Colloid Polymer Science*, vol. 117, pp. 204-210.
- Besq A., Malfoy C., Pantet A., Monnet P., Righi D. (2003). Physicochemical characterization and flow properties of some bentonite muds. *Applied Clay Science*, vol. 23, pp. 275-286.
- Coussot P. (1997). Mudflow rheology and dynamics, A.A. Balkema editor, IAHR Monograph, Rotterdam.

- 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*, vol. 131, pp. 740-749.
- Guyonnet D, Touze-Foltz N, Didier G, Norotte V, Pothier C, Blanc P. (). Performance-based indicators for controlling geosynthetic clay liners in landfill applications. *Soumis à Geotextiles and Geomembranes*.
- Keren R. (1989). Effect of clay charge density and adsorbed ions on the rheology of montmorillonite suspensions. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 53, pp. 25-29.
- Lagaly G., Ziesmer S. (2003). Colloid chemistry of clay minerals: the coagulation of montmorillonite dispersions. *Coll. and Int. Sci.*, vol.100, pp. 105–128
- Langlois L. (2006). Quantification des transferts advectifs dans les géosynthétiques bentonitiques. Mémoire de Master recherche seconde année, Faculté des sciences d'Orsay, 152 pages.
- Li Y., Argillier J.F., Rosenberg E., Durrieu J. (1997) Static and dynamic filtration properties of aqueous suspensions of clays and electrolytes. *Revue de l'Institut Français du Pétrole* n° 52, pp. 207-218.
- Mujumbar A., Beris A., Metzner A. (2001). Transient phenomena in thixotropic systems. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2072, pp.1-22.
- Pantet A., Monnet P. (2007). Liquid–solid transition of kaolinite suspensions. *Mechanics of Materials* vol. 39, pp. 819-833
- Paumier S., Pantet A., Monnet P. (2008). Evaluation of the organization of the homoionic smectites layers (Na⁺ or Ca²⁺) in diluted dispersions using granulometry, microscopy and rheometry, *Adv. Coll. Int. Sci.* 141, pp. 66–75
- Rowe R.K. (2005). Long-term performance of contaminant barrier systems. *Géotechnique*, vol. 55, pp. 631-638.
- Sherwood J.D. (1997). Initial and final stages of compressible filtercake compaction. *AIChE Journal* 43, 1488–1493.
- Touze-Foltz N., Lupo J., Brachman R., Barroso M. (2008). Geoenvironmental applications of geosynthetics. Keynote Lecture, à paraître dans les actes de EuroGeo4, 4th European Geosynthetics Conference, Edinbourg, 7-10 September 2008.
- Verburg K., Baveye P. (1994). Hysteresis in the binary exchange of cations on 2:1 clay minerals: a critical review. *Clays and Clay Minerals* 42, pp. 207-220.