



Réactualisation du guide sur l'équivalence en étanchéité passive d'installation de stockage de déchets

D. Guyonnet, Olivier Bour, A. Couradin, G. Didier, L. Eisenlohr, I. Hebe, V. Norotte, Nathalie Touze

► To cite this version:

D. Guyonnet, Olivier Bour, A. Couradin, G. Didier, L. Eisenlohr, et al.. Réactualisation du guide sur l'équivalence en étanchéité passive d'installation de stockage de déchets. Rencontres géosynthétiques 2009, Apr 2009, Nantes, France. pp.363-370. hal-02592346

HAL Id: hal-02592346

<https://hal.inrae.fr/hal-02592346>

Submitted on 18 Aug 2020

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.

INDICATEURS DE PERFORMANCE POUR LE CONTRÔLE DES GSB EN ÉTANCHÉITÉ D'INSTALLATION DE STOCKAGE DE DÉCHETS

PERFORMANCE INDICATORS FOR THE CONTROL OF GCLS USED AS LANDFILL LINERS

Dominique GUYONNET¹, Nathalie TOUZE-FOLTZ², Véronique NOROTTE³, Catherine POTHIER³, Gérard DIDIER³, Hélène GAILHANOU¹, Philippe BLANC¹, Fabienne WARMONT⁴

¹ BRGM, Orléans, France

² Cemagref, Antony, France

³ INSA-Lyon, Lyon, France

⁴ CRMD, Orléans, France

RÉSUMÉ – Les utilisateurs de géosynthétiques bentonitiques (GSB) en installations de stockage de déchets (ISD) ont besoin d'indicateurs dont la mesure est relativement simple et peu coûteuse, leur permettant de contrôler l'adéquation d'un produit par rapport à une application donnée, notamment pour ce qui concerne les performances hydrauliques à moyen et à long terme. Le projet LIXAR2 a eu pour objectif d'identifier de tels indicateurs, sur la base de caractérisations détaillées des principaux GSB utilisés en ISD en France. Les résultats illustrent notamment la variabilité de composition que peut recouvrir le terme « bentonite » et la nécessité de baser les choix sur des indicateurs de performance plutôt que sur les simples dénominations « Na-naturelle », « Ca-activée », etc.

Mots-clés : GSB, perméabilité, échanges ioniques, déchets

ABSTRACT – Users of geosynthetic clay liners (GCLs) in landfill applications, need indicators that are relatively simple and cheap to measure, to help them assess whether a given product is suitable for a given application, in particular with respect to medium to long term hydraulic performance. The objective of the LIXAR2 project was to identify such indicators, based on detailed characterizations of the main GCLs used in French landfills. Results highlight in particular the diversity of composition that the term "bentonite" may cover and the importance of basing choices on performance indicators rather than simply on denominations such as "Na-natural", "Ca-activated", etc.

Keywords: GCL, permeability, ion exchange, waste

1. Introduction

En raison notamment de leur relative facilité de mise en œuvre et de leur coût, les géosynthétiques bentonitiques (GSB) sont de plus en plus utilisés en tant que barrières en fond ou en couverture d'installations de stockage de déchets (ISD). De nombreuses études soulignent l'importance des précautions de mise en œuvre de ces matériaux, par exemple l'utilisation d'une couche de protection d'épaisseur suffisante (au moins 1 m) pour les applications en couverture (Touze-Foltz et al., 2008) ou l'importance de la mise sous contrainte du matériau. Un point particulièrement important, souligné par les précédents chercheurs, a trait à la sensibilité des GSB aux échanges chimiques avec les fluides avec lesquels ils viennent en contact. Le projet LIXAR1 (Interaction lixiviat-argiles ; Guyonnet et al., 2003) a permis de mieux comprendre l'influence de différents fluides sur la conductivité hydraulique des GSB et notamment les liens entre la chimie de la bentonite, sa microstructure et sa conductivité hydraulique. Ce projet a permis de préciser certaines précautions d'utilisation, dans un souci de meilleure protection des ressources en eau souterraine.

Attaché à étudier l'évolution des performances à long terme de ces produits, le projet LIXAR1 a fait appel à des essais en œdoperméamètres (NF P 84-705), qui sont particulièrement longs à mettre en œuvre. Or les Maîtres d'Ouvrage, Maîtres d'Œuvre, Bureaux d'Etude, représentants de l'état, etc., ont besoin d'outils de caractérisation pratiques et rapides, leur permettant de contrôler les produits dans un délai court et de vérifier leur adéquation par rapport à une application donnée. L'objectif du projet LIXAR2 était d'identifier de tels essais, pour contrôler l'adéquation d'un GSB par rapport à la fonction "étanchéité en fond d'ISD". Toutefois, certains résultats s'appliquent également aux applications en couverture d'ISD.

2. Matériels et méthodes

Le projet a porté sur huit GSB, provenant des principaux fournisseurs opérant sur le marché français du stockage des déchets. Six des produits étaient à base de bentonite sodique et deux à base de bentonite calcique. Afin de garantir une certaine représentativité des produits testés, les produits ont été échantillonnés par le chef de projet sur les sites de production, parmi un choix d'au moins dix rouleaux. Les premiers mètres des rouleaux ont été éliminés et les neuf mètres suivants ont été conditionnés et marqués avant envoi aux différents laboratoires chargés de réaliser les essais. Certaines caractéristiques de base des produits testés sont présentées dans le Tableau 1. Dans ce tableau, la mention « selon fournisseur » indique que la caractéristique correspond à ce qui était communiqué par le fournisseur. La démarche générale a consisté à effectuer des caractérisations détaillées des bentonites des GSB, avant et après contact avec différents fluides au cours d'essais en œdoperméamètres, avec pour but de corréler les résultats de ces essais avec d'éventuelles modifications des caractéristiques chimiques et/ou microstructurales des bentonites.

Tableau I. Quelques caractéristiques des produits testés

Produit	Type de bentonite (s.f.)	Teneur en eau (%)	Masse surfacique (m.s.*) (kg/m ²)
LX 1	Na naturelle	14.8	4.5
LX 2	Na naturelle	14.3	6.1
LX 3	Na naturelle	9.1	5.7
LX 4	Na activée	10.5	4.7
LX 5	Na activée	19.4	4.7
LX 6	Ca naturelle	11.5	4.9
LX 7	Na activée	8.7	4.8
LX 8	Ca naturelle	9.5	9.4

Notes :

s.f. : selon fournisseur

* : par rapport à la masse sèche

Des analyses chimiques globales ont été effectuées par fluorométrie X et les résultats ont servi à déterminer les proportions en différents minéraux dans les bentonites, à partir de calculs modaux et de méthodes d'ajustement automatiques de spectres de Diffraction des Rayons X (DRX ; Blanc et al., 2007). Des analyses de la proportion de carbonates dans les bentonites ont été réalisées à l'aide d'une attaque acide avec mesure du CO₂ émis, en suivant la norme AFNOR (1996). Les cations échangeables ont été analysés selon la méthode de Rémy et Orsini (1976) où une masse d'argile est placée en contact avec une solution de trichlorure de cobaltihexamine pendant une heure. La quantité de cobaltihexamine adsorbée, obtenue par colorimétrie, est convertie en capacité d'échange cationique (CEC).

Des analyses des isotopes du carbone et de l'oxygène ont été réalisées selon la méthode décrite par Landis et von Maubeuge (2004). L'application de cette méthode à des bentonites de GSB utilisés en France a été décrite par Guyonnet et al. (2006). Des images de la microstructure des bentonites, à des échelles variant de quelques microns à moins d'un nanomètre, ont été obtenues par microscopie électronique à transmission (MET), à l'aide d'un microscope PHILIPS CM20, dont la résolution est de 1,4Å. Cette technique nécessite une préparation des échantillons, avec un remplacement de l'eau interstitielle par du méthanol puis par de la résine, procédure qui permet de préserver la microstructure de l'argile (Srodon et al., 1990). Des coupes (épaisseurs entre 70 et 100 nm) sont réalisées à l'aide d'un ultramicrotome (LKB) équipé d'un couteau de diamant. Elles sont alors déposées sur une grille en cuivre carbonée.

Des essais de gonflement libre ont été effectués selon la norme XP P 84-703 (AFNOR, 2002) : 2 g de bentonite sèche (séchage à l'étuve à 105°C), préalablement broyée pour passer au tamis de 160 µm, sont versés progressivement dans 100 mL de fluide. Une lecture visuelle du volume (V) occupé par ces 2g dans l'éprouvette graduée est effectuée après 24 h de repos. L'indice de gonflement (IG) correspond à ce volume ; il est donné en (cm³/2g).

Vingt-quatre essais à l'œdopermeamètre ont été réalisés suivant la norme NF P 84-705 (AFNOR, 2008). La procédure d'essai avait pour objectif de se rapprocher de conditions de confinement représentatives de matériaux en fond d'ISD. Les essais ont débuté par une phase de saturation, sous 10 kPa, avec un « fluide d'imbibition » (FI) très dilué ($\text{NaCl } 10^{-3} \text{ M}$). Ce fluide n'est pas du tout agressif chimiquement vis-à-vis d'une bentonite et sa force ionique est analogue à celle d'une pluie. Lorsqu'au moins 90% du gonflement à l'infini (Norotte et al., 2004) était atteint, le fluide était éventuellement remplacé par un autre fluide et la contrainte de confinement était augmentée graduellement, avec un premier palier à 25 kPa, puis à 50 kPa et enfin à 100 kPa. Les deux autres fluides d'essai utilisés sont un lixiviat synthétique (noté LS) et un lixiviat réel (noté LR) collecté dans un bassin de lixiviats couvert sur une ISD en France. Les compositions de ces deux fluides sont présentées dans Guyonnet et al. (2008). On notera simplement que la composition du LS a été sélectionnée pour être représentative d'un lixiviat plutôt jeune, avec une proportion de calcium (cation qui a tendance à interagir avec la bentonite sodique) plutôt élevée (environ 1 g/L), tandis que le lixiviat réel était typique d'un lixiviat provenant d'une installation en phase de méthanogénèse stabilisée.

3. Principaux résultats

Cette section présente quelques résultats marquants ; on trouvera plus de détails dans le travail de Guyonnet et al. (2008). Les principaux résultats des analyses minéralogiques et chimiques sont présentés dans le Tableau 2. Les résultats plus détaillés suggèrent que pour ce qui concerne toutes les bentonites sodiques, la smectite (Tableau 2) est composée principalement de Montmorillonite-Na avec des proportions diverses de Montmorillonite-Mg et de Nontronite-Na. On note dans le Tableau 2 que l'échantillon LX6 a une proportion de smectite inférieure à 30% ; sa fraction argileuse est constituée principalement de kaolinite. Pourtant cet échantillon est appelé « bentonite » par son fournisseur, ce qui illustre bien le fait que ce terme n'est pas une appellation minéralogique, mais industrielle. Il est donc essentiel de disposer de critères plus objectifs pour juger de l'adéquation d'un produit en confinement de déchets.

Tableau II. Principaux résultats des analyses minéralogiques des bentonites (% pondéral)

Minéraux	LX1	LX2	LX3	LX4	LX5	LX6	LX7	LX8
Total Feldspath	1,2	10,5	8,1	7,6	6,0	0,0	3,2	2,3
Carb organique	0,4	0,2	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0
Calcite*	2,1	1,5	1,4	4,9	2,7	0,5	2,8	0,4
Sidérite	0,5	0,0	1,4	0,8	1,4	0,0	1,1	0,0
Total Silice	9,5	18,0	14,6	6,4	7,7	23,4	10,9	12,1
Total Soufre	0,6	0,8	0,6	0,9	0,6	0,5	0,3	0,1
Illite	0,0	0,5	0,0	0,0	0,4	8,9	0,0	2,5
Kaolinite	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	35,5	0,0	4,2
Total Smectite	76,5	68,8	71,3	75,0	71,5	29,6	74,8	76,8

* : mesuré par calcidolométrie

Le Tableau III synthétise quelques résultats de la caractérisation initiale. On observe une bonne corrélation entre la capacité d'échange cationique (CEC) et la proportion de smectite (Figure 1). La corrélation était bien meilleure qu'avec les valeurs au bleu, qui montrent beaucoup plus de dispersion, en raison de la difficulté, avec des matériaux fortement absorbants, à identifier précisément le moment où cesse l'absorption de bleu de méthylène.

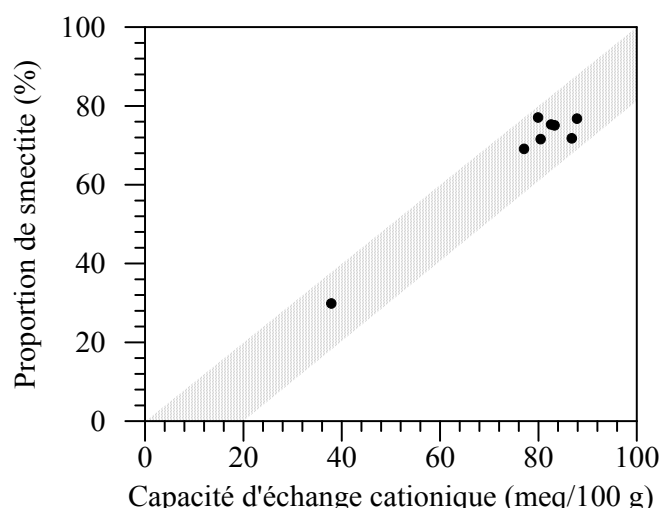


Figure 1. Proportions de smectite et CEC dans les bentonites testées

Bien que la Figure 1 ne comporte pas de valeurs intermédiaires entre LX6 et les autres échantillons, elle confirme que la CEC pourrait être un indicateur utile de la proportion de smectite pour le contrôle des produits en situation réelle. En effet, il s'agit d'une mesure de faible coût et assez rapide à mettre en œuvre, surtout par comparaison avec une véritable analyse minéralogique par interprétation de spectres DRX.

Tableau III. Quelques résultats de caractérisation initiale

Échantillon	pH*	Chlorures* (mg/L)	Calcite (%)	Smectite wt%	CEC (meq/100g)	Cations échangeables (% sites d'échange)			
						Ca	K	Mg	Na
LX1	9,75	2856	2,1	76,5	88,0	7,6	0,5	7,8	84,1
LX2	9,55	113	1,5	68,8	77,2	27,5	1,2	6,2	65,1
LX3	9,8	101	1,4	71,3	80,6	27,8	1,8	3,4	66,9
LX4	10	340	4,9	75,0	82,8	5,1	1,4	6,0	87,5
LX5	9,95	2236	2,7	71,5	87,0	10,6	0,5	9,9	79,1
LX6	7,7	107	0,5	29,6	38,1	67,6	1,2	24,8	6,4
LX7	9,85	1621	2,8	74,8	83,5	12,6	1,2	5,3	81,0
LX8	8,7	328	0,4	76,8	80,1	60,3	0,6	27,9	11,3

Notes

*: mesuré sur éluat au cours d'essais de lixiviation

CEC = capacité d'échange cationique

La figure 2 montre les résultats d'analyses isotopiques réalisées sur les bentonites sodiques. Sur cette figure, chaque échantillon est représenté par son numéro d'échantillon et les mesures sont comparées aux données de Landis et von Maubeuge (2004) et Decher (1996). D'après cette figure, les échantillons LX2 et LX3 sont des bentonites sodiques naturelles du Wyoming, LX4 est une bentonite activée grecque, tandis que les échantillons LX1, LX5 et LX7 sont également des bentonites activées. Ces analyses confirment les informations indiquées par les fournisseurs (Tableau 1) pour tous les échantillons sauf LX1, qui était indiqué comme étant à base de bentonite sodique naturelle. Ce caractère activé de LX1 est confirmé par la forte conductivité électrique mesurée sur des suspensions de bentonite et durant les essais de lixiviation, ce qui indique la présence de sels témoignant d'une possible activation. En fait, le fournisseur de LX1 (qui n'est pas "fabriquant" de bentonite) a simplement relayé l'information de son propre fournisseur. Or cette information est très difficile à vérifier et dépend de ce qui s'est passé au niveau du gisement (indien, en l'occurrence). Tel carrier peut considérer comme étant un processus d'activation, une manipulation qu'un autre ne prendra pas en compte. On

peut en déduire que les dénominations « naturelle » ou « activée » peuvent être parfois subjectives et dépendantes de facteurs sur lesquels le fournisseur n'a que peu de prise. Ceci souligne plus encore l'intérêt d'avoir des indicateurs de qualification des bentonites des GSB basés sur leurs performances hydrauliques.

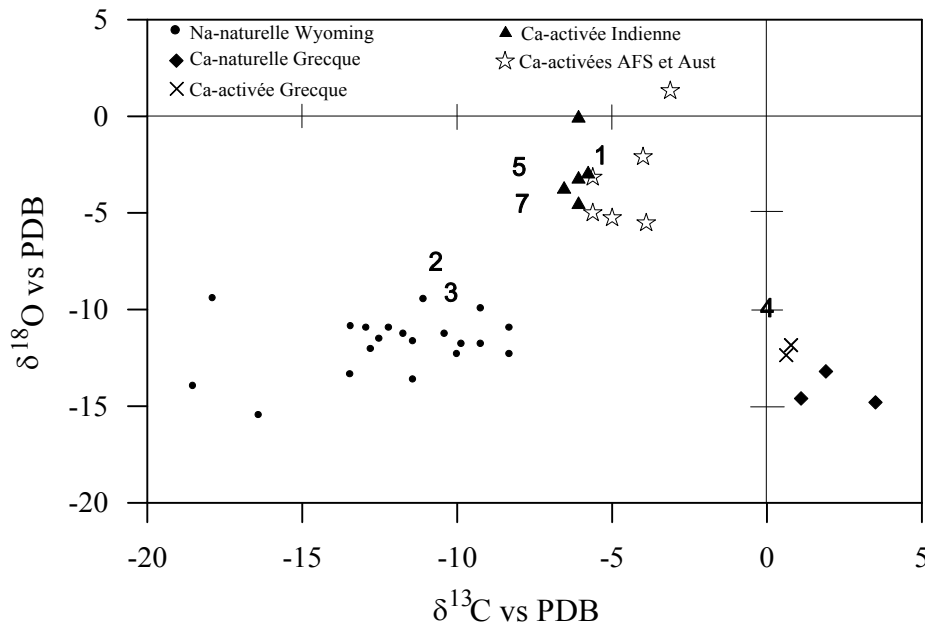


Figure 2. Analyses des isotopes du carbone et de l'oxygène

Les résultats des essais de gonflement libre (IG) sont présentés sur la figure 3. On note que les IG des bentonites sodiques (qu'elles soient naturelles ou activées) diminuent de manière très significative lorsque les bentonites sont mises en contact direct avec le lixiviat synthétique. Le contact avec le lixiviat réel a un effet mais moins dramatique. Par contre, les essais réalisés avec des bentonites pré-hydratées avec le fluide d'imbibition, montrent beaucoup moins d'effet des lixiviats synthétique et réel. On notera que les bentonites calciques (LX6, LX8) ont des IG bien inférieurs aux bentonites sodiques, mais qu'elles sont moins influencées par le contact avec les lixiviats, les IG pouvant même augmenter.

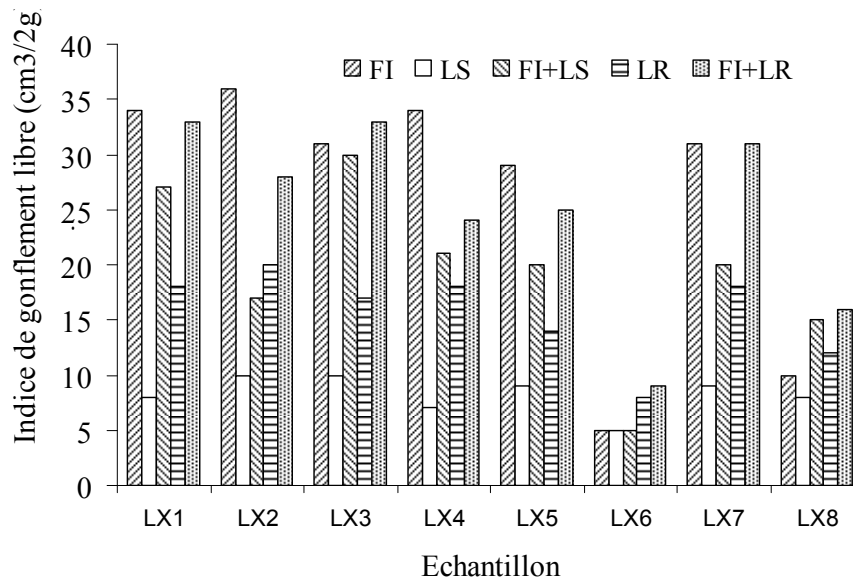


Figure 3. Résultats des essais de gonflement libre

Les principaux résultats des essais en œdoperméamètre sont présentés sur la Figure 4. Ces résultats montrent que les GSB à base de bentonite sodique, qu'elle soit Na-naturelle ou Ca-activée, présentent de bonnes performances hydrauliques lors d'un contact prolongé avec le fluide dilué (FI ;

NaCl 10^{-3} M). Le contact avec le lixiviat synthétique (LS) tend à augmenter légèrement la conductivité hydraulique, jusqu'à un facteur d'environ 4. Par contre, le contact avec le lixiviat réel (LR) a plutôt eu tendance à diminuer la conductivité hydraulique, ce qui est cohérent avec les données de Benson et al. (2008), qui proposent un effet de colmatage des pores par de la matière organique colloïdale du lixiviat.

Les GSB à base de bentonite calcique (LX6 et LX8) présentent des conductivités hydrauliques plus importantes (en particulier LX6). À noter que des essais ultérieurs (non présentés) sur LX8 ont montré des conductivités hydrauliques plus proches de celles des GSB à base de bentonite sodique. Le contact avec les lixiviats synthétique ou réel induisent, soit peu d'effet ou alors une diminution de la conductivité hydraulique (LX6).

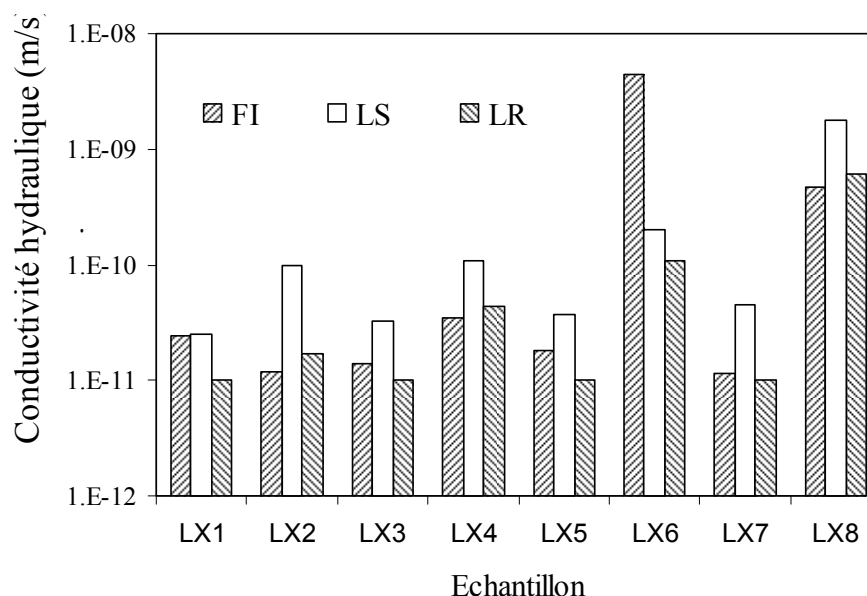


Figure 4. Résultats des essais en œdoperméamètre

Les photographies MET et les mesures de cations échangeables (Guyonnet et al., 2008) illustrent l'influence des modifications de chimie de surface sur la microstructure des bentonites. Après contact avec le lixiviat synthétique (LS), la bentonite présente une microstructure beaucoup plus « particulière » qu'après contact avec le fluide dilué (FI) où la microstructure est typique d'une « phase gel » (Guyonnet et al., 2003). La microstructure après contact avec le lixiviat réel (LR) est de type intermédiaire entre ces deux situations, ce qui est cohérent avec les plus faibles conductivités hydrauliques observées avec LR qu'avec LS.

4. Conclusions et recommandations pour des indicateurs de performances

On note sur la Figure 4 que le GSB à base de bentonite sodique présentant les plus fortes conductivités hydrauliques aux différents fluides (LX4) est également celui dont la bentonite a la plus forte proportion de carbonate de calcium (4,9% ; Tableau 2). Ceci est cohérent avec les données de Benson et al. (2008) qui notent que la conductivité hydraulique d'un GSB dont la proportion de calcite était de 7,9%, augmentait de manière significative, tandis qu'un GSB dont la bentonite avait une proportion de calcite de seulement 0,6%, conservait une faible conductivité hydraulique. Une influence négative du carbonate de calcium sur la conductivité hydraulique de la bentonite avait également été notée par Guyonnet et al. (2003). Comme la calcite est très soluble, lorsque la bentonite sodique est en contact avec un fluide dilué, celui-ci tend à dissoudre la calcite, ce qui libère des ions Ca^{2+} qui peuvent s'échanger avec le sodium de la bentonite et entraîner une augmentation de la conductivité hydraulique. Ceci amène à préconiser un contrôle sur la proportion de carbonate de calcium dans la bentonite sodique des GSB utilisés en étanchéité d'ISD.

Les indicateurs de performance du tableau 4, proposés pour le contrôle des GSB dans le cadre d'applications en étanchéité de fond d'ISD, ont été sélectionnés sur la base de trois critères :

- leur pertinence par rapport aux performances hydrauliques des GSB à long-terme ;
- leur rapidité de mise en œuvre ;

- leur faible coût de réalisation.

Ces indicateurs sont proposés en sus des indicateurs plus classiques utilisés pour les applications de GSB en barrière d'ISD (par exemple la masse surfacique ; cf. CFG). Par ailleurs, ils concernent le contrôle des GSB à base de bentonite sodique : comme il a été vu durant le projet LIXAR2, l'utilisation de GSB à base de bentonite calcique en fond d'ISD pose des questions particulières qui nécessiteraient quelques compléments en termes de recherche. Il faut noter que l'utilisation de GSB à base de bentonite calcique, de masse surfacique plus importante que celle des GSB à base de bentonite sodique, peut être indiquée notamment dans le cas de la pose de GSB sur un support calcaire (MEEDDAT, 2008).

On notera dans le tableau 4 qu'il n'est pas proposé de mesurer la proportion de smectite à l'aide d'outils minéralogiques, car cela paraît peu adapté à du contrôle, en raison des délais de réalisation. En revanche, la valeur préconisée dans le tableau 4 pour la capacité d'échange cationique (CEC) devrait garantir une proportion pondérale de smectite d'au moins 60%. De même, pour montrer le caractère sodique d'une bentonite, on pourrait proposer la mesure de la proportion de sodium échangeable, avec un objectif d'au moins 60% de la CEC. Mais cette proportion est bien corrélée à l'indice de gonflement libre (IG) et la valeur d'IG de 24 cm³/2g devrait permettre de garantir la nature sodique de la bentonite. D'autres indicateurs sont envisageables, mais avec plus ou moins de difficultés d'utilisation et/ou d'interprétation.

Tableau IV. Propositions pour des indicateurs de performances des bentonites sodiques

Indicateur	Valeur	Commentaires
Indice de gonflement libre (IG) (XP P 84-703)	$\geq 24 \text{ cm}^3/2\text{g}$	Cette valeur seuil, qui apparaît dans les fiches produits des GSB, paraît bien adaptée
Capacité d'Echange Cationique (CEC) NF X 31.130	$\geq 70 \text{ meq}/100 \text{ g}$	Corrélié à la proportion de smectite.
Proportion de CaCO ₃ (NF P 94-048)	$\leq 5\% \text{ pondéral}$	Cette proportion de CaCO ₃ aurait, après dissolution, la capacité de saturer une CEC de 75 meq/100 g avec des ions Ca ²⁺
Isotopes Carbone et Oxygène	--	Pour le cas où l'on souhaite connaître l'origine de la bentonite

Note : les pourcentages pondéraux sont exprimés par rapport à la masse sèche de la bentonite (0% de teneur en eau).

Enfin, il n'est pas exclu que des GSB ne respectant pas les critères du Tableau 4 puissent présenter de bonnes performances hydrauliques mais, dans ce cas, il s'agira de le démontrer à partir d'un essai de perméabilité à l'œdoperméamètre (norme NF P 84-705).

5. Remerciements

Le projet LIXAR2 a été réalisé avec le soutien de l'ADEME, CETCO, HUESKER, NAUE, SITA et Véolia-Propreté.

6. Références bibliographiques

- AFNOR (2008). Détermination à l'œdoperméamètre des caractéristiques de gonflement, absorption et perméabilité à l'eau sous contrainte des géosynthétiques bentonitiques. NF P 84-705, AFNOR, Paris, 21 pages.
- AFNOR (2002). Détermination de la capacité de gonflement de l'argile dans les géosynthétiques bentonitiques. XP P 84-703, AFNOR, Paris, 6 pages.
- AFNOR (1996). Détermination de la teneur en carbonate – Méthode du calcimètre. NF P 94-048, AFNOR, Paris.

- Benson C., Wang X., Gassner F.W., Foo D.C.F. (2008). Hydraulic conductivity of two geosynthetic clay liners permeated with an alumina residue leachate. In: Proceedings of the First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition, 2-5 March 2008, Cancun, Mexico.
- Blanc P., Legendre O., Gaucher E.C. (2007). Estimate of clay mineral amounts from XRD pattern modelling: the Arquant model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32, pp. 135-144.
- CFG (1998). Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques. Comité Français des Géosynthétiques, Fascicule no. 12.
- Guyonnet D., Touze-Foltz N., Norotte V., Pothier C., Didier G., Gailhanou H., Blanc Ph., Pantet A., (2008). Projet LIXAR2 – Indicateurs de performance pour les géosynthétiques bentonitiques. Rapport Final. Rapport Final. Rapport BRGM N° 56356-FR.
- Guyonnet D., Fléhoc C., Chevrier B. (2006). Traçabilité de la bentonite des GSB : l'outil isotopique. *Rencontres Géosynthétiques 2006*, Montpellier 12-14 juin 2006.
- 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, n°6, pp. 740-749.
- Landis C.R., von Maubeuge, K. (2004). Activated and natural sodium bentonites and their markets. *Mining Engineering*, November 2004, 17-22.
- MEEDDAT (2008). Guide de recommandations pour l'évaluation de « l'équivalence » en étanchéité d'installation de stockage de déchets. Version 2. Novembre 2008.
- Norotte V., Didier G., Guyonnet D., Gaucher E. (2004). Evolution of GCL hydraulic performance during contact with landfill leachate. Dans : *Advances in Geosynthetic Clay Liner Technology: 2nd Symposium*, ASTM STP 1456, Mackey and von Maubeuge (eds.), ASTM International, West Conshohocken, PA., 41-52.
- Srodon J., Andreoli C., Elsass F., Robert M. (1990). Direct high-resolution transmission electron microscopic measurement of expandability of mixed-layer illite/smectite in bentonite rock. *Clays Clay Minerals*, 38, pp. 373-379.
- Touze-Foltz N., Lupo J., Barroso M. (2008). Geoenvironmental applications of Geosynthetics, *Proceedings Eurogeo 4*, 98 pages.