

ECHANGE CATIONIQUE PAR TRANSFERT HYDRIQUE ENTRE UN GSB ET UN SOL A FORTE TENEUR EN CARBONATE DE CALCIUM

CATIONIC EXCHANGE BY WATER TRANSFER BETWEEN A GSB AND A SOIL WITH HIGH CONTENT OF CALCIUM CARBONATE

Alain COURADIN¹, Catherine POTHIER², Stéphane VACHERIE², Eva QUEHEILLE^{1,2}

¹ MeTeD_k, F-38150, La Chapelle de Surieu, France

² Univ Lyon, INSA-Lyon, LGCIE - SMS ID, F-69621, Villeurbanne, France

RÉSUMÉ – L'objet de cet article est de présenter les principaux résultats de l'échange cationique entre un GSB (Géosynthétique Bentonitique) et un sol riche en fraction carbonatée. Le protocole expérimental en laboratoire atteste de son efficacité puisque en deux mois d'essais les transferts hydriques et l'échange cationique ont bien opéré.

ABSTRACT – The aim of this paper is to present the main results of cation exchange between GCL (Geosynthetic Clay Liner) and a soil with a high carbonate fraction. The experimental laboratory protocol demonstrates its effectiveness as two months of testing the water transfer and the cation exchange have operated well.

1. Introduction

1.1. Contexte de l'étude : les GSB et l'échange cationique

Développés pour la première fois dans les années 80 aux Etats-Unis (Gates et al., 2009), les géosynthétiques bentonitiques (GSB) occupent actuellement une place importante sur le marché du génie civil et de la géotechnique. Apprécies surtout pour leur fonction d'étanchéité, leurs domaines d'application sont divers et depuis quelques années, leur utilité dans le secteur de l'environnement est confirmé pour de plus en plus de projets : réhabilitation de sites pollués, surveillance de sites miniers et étanchéité des installations de stockage de déchets. Les GSB voient ainsi leurs domaines d'applications s'étendre et leur amélioration s'accroître, grâce aux nombreuses recherches réalisées au niveau national et international. Leur utilisation dans les installations de stockage de déchets est également concernée et a d'ailleurs permis de dévoiler l'existence d'un phénomène non négligeable vis-à-vis de l'étanchéité des GSB : l'échange cationique. En effet, il s'avère que face à l'échange cationique, la fonction étanchéité des GSB peut à terme s'altérer jusqu'à devenir en le couplant à d'autres sollicitations, comme les cycles d'hydratation/dessiccation, quasi-irréversibles. Parmi la communauté scientifique et professionnelle, des guides et des recommandations sont régulièrement mis à jour vis-à-vis de ce phénomène. La plus récente recommandation propose l'estimation préalable des transferts ioniques entre un GSB et un sol, et donc l'impact sur les performances hydrauliques d'un GSB, lorsqu'un sol calcaire est impliqué lors des travaux (MEEDDAT, 2009). Cependant, de telles vérifications n'ont jamais réellement vues le jour et aucune application n'a pour l'instant été proposée pour et par les professionnels du domaine.

1.2. Etat de l'art : Etudes similaires ou proches

Depuis la définition de l'échange cationique et de son effet négatif sur les GSB, des projets de recherche ont été réalisés pour mieux comprendre ce phénomène, en

laboratoire mais également *in situ*. En laboratoire, il a plus souvent été question d'enrichir en calcium la solution d'hydratation du produit que de mettre en contact le géosynthétique avec un sol réel. Rares sont donc les projets qui ont exploité ce deuxième cas et qui ont étudié des GSB composés de bentonite calcique activée. *In situ*, les travaux concernent essentiellement les barrières sommitales des installations de stockage de déchets.

En laboratoire, le travail le plus récent (Bradshaw *et al.*, 2013) a consisté en la mise en contact direct d'un GSB (bentonite sodique naturelle) avec plusieurs sols en mode support dont la teneur en calcite variait entre 4 et 7 %. La teneur en eau de ces sols était comprise entre 12 et 16 %. Le suivi de ces essais a été réalisé et des prélèvements de GSB ont permis l'évaluation de l'échange cationique à travers la mesure de l'Indice de Gonflement libre (IG) de la bentonite. Au bout de seulement trente jours de contact et d'hydratation par le sol, l'IG a diminué à une valeur de 21,5 mL/2gsec alors que la bentonite neuve gonfle jusqu'à 28 mL/2 gsec.

Une expérimentation similaire a consisté à simuler l'hydratation et l'échange cationique d'un GSB (bentonite sodique naturelle) avec un sol support d'un mètre d'épaisseur (Rowe et Abdelatty, 2012). Pour enrichir ce dernier en calcium, le sable utilisé a été hydraté avec une solution de chlorure de calcium jusqu'à atteindre une teneur en eau de 13,9 %. L'essai a été réalisé durant 3 ans, avec des prélèvements fréquents permettant de suivre le déroulement de l'échange cationique. Au bout de 130 jours (soit 4 mois), la bentonite a déjà perdu 5 mL/2gsec en indice de gonflement libre. L'échange cationique s'est déroulé jusqu'à 625 jours (soit un peu plus de 1,5 ans), au terme desquels la perméabilité du GSB a augmenté d'un facteur 10.

En couverture d'installations de stockage de déchets, des GSB composés de bentonite sodique ont été exhumés après huit ans de service (Touze-Foltz *et al.*, 2013). Les deux sols utilisés dans la couverture (sol de confinement et couche de forme) ont été considérés riches en calcium avec une concentration voisine des 110 mg/L. Cette forte valeur explique les indices de gonflement obtenus, inférieurs à 10 mL/2gsec et synonymes du passage de la bentonite sodique à une nature calcique. Une même opération a été exécutée pour des GSB (bentonite sodique naturelle) en service dont la durée a varié entre quatre et onze ans (Meer et Benson, 2004, 2007). Les sols de confinement utilisés possédaient une faible teneur en carbonate : entre 1,0 et 2,6 %. Pourtant, l'échange cationique a bien affecté chaque GSB, avec une forte baisse de l'IG (entre 11 et 7 mL/2gsec), alors que l'IG est de 35 mL/2gsec pour la bentonite neuve. La durée de service du GSB n'a pas influencé l'échange cationique, l'ampleur de ce dernier étant bien plus proportionnelle à la concentration en CaCO₃ des sols, même si les teneurs étaient très faibles.

1.3. Enjeux de l'étude actuelle

Face à ce constat, les producteurs de GSB proposent de nouveaux types de GSB. C'est le cas de la société Naue Applications qui a mis au point un nouveau procédé dans le but de remédier essentiellement au risque d'échange cationique mais également à celui de dessiccation : le Bentofix® X2.

D'un point de vue expérimental et scientifique, l'originalité de cette étude tient aux configurations envisagées puisqu'il s'agit de simuler en laboratoire l'échange cationique d'un GSB en contact prolongé avec un sol à forte teneur en carbonate de calcium. Dans notre cas, l'échange cationique est provoqué par transfert hydrique soit en imbibition, soit en phase vapeur. En rappel, de nombreux types de sols et matériaux riches en calcium peuvent être utilisés en ouvrages de génie-civil : limons, sables calcaires, marnes calcaires, craie, calcaire, ou les sols issus de leur altération, ...

2. Présentation du programme d'étude

2.1. Matériaux et solutions du programme d'essais

2.1.1. Sol support, GSB et bentonites

Le matériau utilisé est un sable calcaire propre, grenu, écrêté au passant de 1mm. Dans le passé, ce matériau a été utilisé comme sable référent pour un programme de recherche visant à comparer les performances hydrauliques d'adjuvants argileux utilisés sur le territoire national en traitement des sols (Couradin *et al.*, 2008).

Deux types de GSB ont été utilisés (X2 et CV). Dans les deux cas, les GSB appartiennent à la famille des géotextiles bentonitiques (CFG, 2011). Le protocole expérimental distingue pour le GSB X2 la présence ou non d'un revêtement en polyoléfine dont l'adhérence au géotextile tissé est assurée par enduction.

Les bentonites sont au nombre de trois. Les deux premières appartiennent aux différents GSB, avec une bentonite calcique activée pour le X2 et une bentonite sodique naturelle pour le CV. La troisième bentonite est une calcique naturelle (FZO). Cette dernière a été utilisée afin d'amender le sable référent à un dosage égal à 3 %.

2.1.2. Solutions d'essais

Trois solutions d'essais ont été utilisées. Ces trois solutions sont de l'eau déminéralisée (ED), la solution provenant d'un essai batch (B) dont le rapport L/S (ED/sable référent) est égal à 4, puis une solution mono-ionique à différentes concentrations croissantes en chlorure de calcium (CaCl_2). Les concentrations en CaCl_2 sont égales à 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} , $5 \cdot 10^{-2}$ et 10^{-1} mol/L. La première solution est une solution de référence (ED) les deux autres (B, CaCl_2) sont synthétisées afin de créer et simuler les échanges ioniques.

2.2. Programme expérimental

2.2.1. Introduction

Pour répondre aux objectifs du projet, plusieurs essais de géotechnique et de géochimie ont été choisis en fonction des phénomènes à étudier. Les méthodes d'essais utilisées peuvent être réparties en deux groupes : 1) Essais de caractérisation, 2) Essais de performance.

2.2.1. Essais de caractérisation

Ces essais visent à caractériser initialement puis à terme les matériaux et solutions d'essais. La caractérisation à terme est effectuée sur la bentonite issue des essais de performances. Il s'agit des essais d'identification géotechnique (NF P 11-300) du sable référent, de la teneur en eau pondérale (NF P 94-050) du sable référent et des bentonites, de la teneur en carbonate (NF P 94-050) du sable et des bentonites, de l'indice de gonflement libre de la bentonite (XP P 84-703) initialement en présence des différentes solutions (ED, B et CaCl_2) puis à terme avec la solution ED, de la capacité d'absorption d'eau de l'argile (NF EN ISO 10769) initialement en présence des différentes solutions puis à terme avec la solution ED, de la détermination de la masse surfacique en bentonite sèche du GSB (NF EN 14196) et enfin de la capacité d'échange cationique (NF X 31-130) des bentonites et de leurs cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+).

2.2.2. Essais de performance

Il s'agit d'un essai expérimental qui utilise l'œdoperméamètre (Coméaga, 1997) décrit dans le texte normatif NF P 84-705. Cette cellule d'essai permet de réaliser deux types d'essais (Norotte *et al.*, 2006) : 1) Essai de conformité, afin de déterminer avec des conditions d'essai toujours identiques si les caractéristiques hydrauliques du GSB sont

conformes à celles annoncées 2) Essai de performance, afin de déterminer les caractéristiques hydrauliques du GSB placé dans des conditions rencontrées dans un projet que ce soit pour la contrainte normale, la charge hydraulique, la nature de la solution d'infiltration ou des matériaux en contact.

La cellule se décompose en trois parties, avec une embase inférieure, un piston et un dispositif d'application de la contrainte uni-axiale (Figure 1).

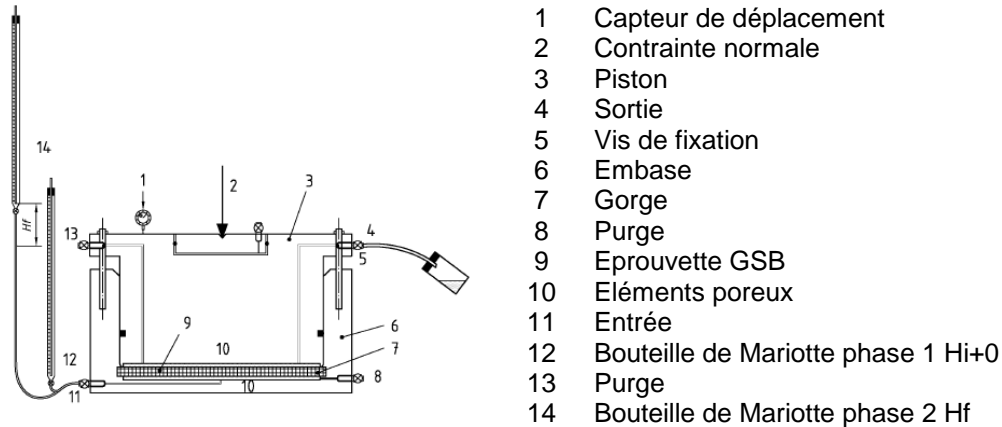


Figure 1. Schéma de l'appareillage.

L'embase et le piston possèdent deux pierres poreuses planes et parallèles entre-elles. L'éprouvette d'essai est placée entre ces pierres et le suivi de la déformation verticale est assuré au moyen d'un capteur de déplacement. Le contrôleur pression-volume est de type bouteille de Mariotte. Elle permet l'application d'une différence de charge hydraulique constante et de lire les volumes absorbés (et infiltrés) au cours de l'essai.

L'essai NF P 84-705 décrit par le texte normatif prévoit deux phases d'essai. La première autorise la déformation verticale de l'éprouvette avec le suivi de sa déformation et du volume absorbé. Cette phase est réalisée sous contrainte uni-axiale et avec à l'application d'une différence de charge hydraulique quasi-nulle. Son critère d'arrêt est l'obtention d'un gonflement ou d'un volume absorbé au moins égal à 90 % du gonflement ou du volume absorbé pour un temps infini. En effet, dans ces conditions et pour des temps d'essai suffisamment longs, la cinétique du gonflement et du volume absorbé obéit à une loi hyperbolique (Didier, 1972). Lorsque ce critère est atteint, la deuxième phase est engagée, il s'agit de la phase d'écoulement et de perméabilité. Dans notre cas, cette deuxième phase ne sera pas entreprise car l'essai de performance sera arrêté dès lors que la première phase aura atteint son critère d'arrêt.

Seuls six essais et leurs résultats seront présentés, les quatre autres essais de ce programme simulant une pré-hydratation du GSB en sol support ainsi que ceux en sol de confinement ne le seront pas. Ces six essais concernent une seule configuration par l'application d'une seule et même contrainte uniaxiale égale à 10 kPa et avec le sol support représenté par le sable référent seul ou adjuvanté à 3 % en bentonite calcique. Pour cette configuration, deux dispositions du sable référent ont été retenues en fonction de sa teneur en eau initiale. Pour la première, le sable référent est placé dans la cellule d'essai dans un état sec (teneur en eau initiale égale à 0,6 %) quasi-foisonné. Pour cette disposition, la différence de charge hydraulique est maintenue constante au niveau de la vanne d'entrée. La seconde présente un sable référent hydraté à 13 %, adjuvanté à 3 % en bentonite calcique puis disposé quasi-foisonné. Pour cette disposition, le dispositif d'essai évolue en système fermé, si bien qu'aucune connexion hydraulique n'est assurée par la bouteille de Mariotte au cours de l'essai. De cette façon, les transferts hydriques sont maintenus respectivement par imbibition et en phase vapeur.

3. Résultats

3.1. Essais d'identification et de caractérisation

Avant son écrêtage au tamis de 1 mm, le sable référent est classé B2. Son passant à 2, 1 et 0,08 mm est respectivement égal à 98, 96 et 10 %. Sa valeur au bleu de méthylène est égale à 0,5. Sa fraction carbonatée est égale à 25%. La distribution des cations majeurs dosés dans ce sable présente l'ordre suivant : $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ avec Ca^{2+} égale à 1,42 meq/L puis 0,26, 0,13, 0,08 meq/L pour respectivement Na^+ , K^+ et Mg^{2+} . Les trois bentonites possèdent les caractéristiques initiales suivantes (Tableau 1).

Tableau 1. Caractéristiques initiales des bentonites X2, CV et FZO

bentonite (n°)	CEC (cmol+/kg)	CaCO ₃ (%)	Cations majeurs (cmol+/kg)				Na/(Na+Ca) (%)
			Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	
X2	57,05	4,5	57,4	14,45	6,75	1,0	79,9
CV	67,5	1,1	46,1	19,0	3,85	1,6	70,85
FZO	65,25	7,0	8,6	61,6	5,75	3,45	/

Les différentes solutions d'essais possèdent les caractéristiques physico-chimiques suivantes, avec la mesure de la conductivité électrique (CE) et du pH (Tableau 2).

Tableau 2. Caractéristiques initiales des solutions d'essais ED, B et CaCl₂

Solution (n°)	ED	B	CaCl ₂ (mol/L)				
			10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	5.10 ⁻²	10 ⁻¹
pH	6,26	7,76	6,16	5,69	6,3	5,68	5,82
CE (μS/cm)	4,76	164	33,5	294	2193	9270	16567

Après essais de gonflement libre (IG) avec la bentonite X2, les mêmes solutions possèdent les caractéristiques suivantes (Tableau 3).

Tableau 3. Caractéristiques des solutions d'essais après IG avec X2

Solution (n°)	ED	B	CaCl ₂ (mol/L)				
			10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	5.10 ⁻²	10 ⁻¹
IG (cm ³ /2g)	28	30	29	31	34	18	11
pH	10,34	9,23	10,18	9,42	8,51	7,95	7,92
CE (μS/cm)	305,7	325,7	293,7	493	2253	9197	16410

L'IG représente l'indice de gonflement libre de la bentonite obtenu après 24 h. La cinétique de la capacité d'absorption de la bentonite X2 avec les différentes solutions est présentée dans la Figure 2.

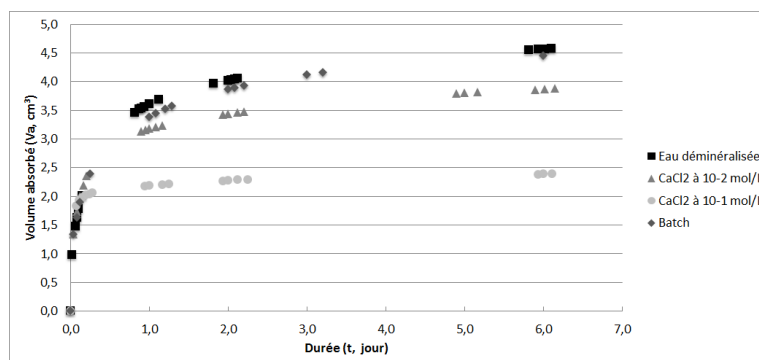


Figure 2. Cinétique d'absorption de la bentonite X2 avec les solutions.

3.2. Essais de performance

Les principales grandeurs des essais en sol support sont présentées dans les Tableaux 4 et 5. Les essais sont codifiés selon l'organisation suivante : le premier ensemble (X2, CV) distingue la bentonite du GSB, le second composé de trois lettres (SSI, RSI) distingue pour la première, le GSB avec ou sans revêtement (R ou S), la seconde, la configuration (S car sol support et / sans sol support), la troisième représente l'état hydrique initial de la bentonite (ici I pour teneur en eau initiale), enfin le troisième ensemble (M) distingue s'il s'agit ou non du sable référent adjuvanté en bentonite FZO (M pour adjuvanté).

Tableau 4. Caractéristiques des éprouvettes (sable référent et GSB) – Essai sol support

Essai (n°)	Durée (j)	Teneur en eau bentonite (%)		Epaisseur GSB (mm)		Teneur en eau sable (%)
		Initiale	Finale	Initiale	Finale	Sable/Finale
X2 S/I	24	12,9	149,2	4,28	7,60	/
X2 SSI	29	12,7	156,6	4,64	7,85	23,5
X2 SSI ∞	57	12,7	156,3	3,92	7,42	21,7
X2 RSI	73	12,6	82,7	5,26	5,67	24,1
X2 SSI M	19	12,5	91,8	3,61	5,14	9,5
CV SSI M	23	14,1	94,9	4,87	7,28	9,15

Tableau 5. CEC, CaCO₃ et CM des bentonites en fin d'essai – Essai sol support

Essai (n°)	CEC (cmol+/kg)	CaCO ₃ (%)	Cations majeurs (cmol+/kg)				Na/(Na+Ca) (%)
			Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	
X2 S/I	59,6	5,565	60,45	16,5	5,0	1,05	78,55
X2 SSI	59,2	6,655	37,6	18,7	5,65	0,9	66,8
X2 SSI ∞	59,5	4,37	52,2	20,5	5,75	0,85	71,8
X2 RSI	56,65	3,675	61,6	15,35	5,9	1,0	80,05
X2 SSI M	52,55	1,565	31,4	31,4	7,05	1,1	49,8
CV SSI M	49,10	2,9	13,4	21,7	5,8	1,4	38,15

L'essai X2 SSI ∞ représente le cas où la phase de gonflement a été conduite pour des temps d'essai dépassant la durée pour arriver aux 100 % du gonflement pour un temps infini puisque ils ont été atteints au bout de 20 jours alors que l'essai a duré 57 jours. L'essai X2 S/I peut être considéré comme *témoin* car réalisé sans sol support.

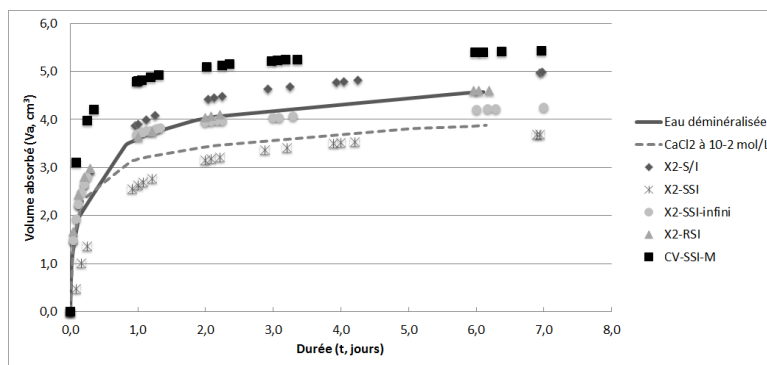


Figure 3. Cinétique d'absorption des bentonites après essai de performance.

Tableau 6. IG des bentonites après essais de performance (solution ED)

	X2 S/I	X2 SSI	X2 SSI ∞	X2 RSI	X2 SSI M	CV SSI M
IG (cm ³ /2g)	29	25	26	30	28	30

3.3. Commentaires

Les résultats issus des essais d'identification (Tableau 1) révèlent que la bentonite CV est sodique naturelle à plus de 70 % de sa CEC. La bentonite X2 possède un excédent en sodium échangeable par rapport à sa CEC, ce qui laisse supposer que ce biais dans la mesure peut être attribuable à la présence de carbonate de sodium (Na_2CO_3) résultant d'un processus d'activation de cette bentonite. Dans ce cas, le rapport $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Ca})$ révèle que le procédé d'activation de cette bentonite a bien opéré car égal à 80 %.

Les résultats issus des essais de caractérisation (Tableau 3 et Figure 2) expriment la même tendance, à savoir, que le gonflement libre et le volume absorbé diminuent en fonction de l'augmentation de la concentration en électrolytes de la solution initiale. En comparaison, l'IG obtenue avec la bentonite CV et les solutions ED et CaCl_2 à 10^{-2} et 10^{-1} mol/L est respectivement égal à 29, 31 et 12 $\text{cm}^3/2\text{gsec}$. La valeur égale à 11/12 $\text{cm}^3/2\text{gsec}$ pour l'IG avec CaCl_2 à 10^{-1} mol/L atteste d'une certaine inhibition des bentonites X2 et CV au gonflement libre. En comparaison, la bentonite FZO (cacique naturelle) possède un IG égal à 7 $\text{cm}^3/2\text{gsec}$ avec ED. Les essais de capacité d'absorption se révèlent être plus sensibles à la concentration en électrolytes que l'essai de gonflement libre puisque dès CaCl_2 à 10^{-2} mol/L, le volume absorbé pour un temps infini ($V_{a\infty}$) est inférieur à celui obtenu avec ED (respectivement $V_{a\infty}/\text{CaCl}_2$ à 0,01 mol/L = 405,5 % contre $V_{a\infty}/\text{ED} = 482,6$ %) alors que dans le cas de l'IG, ce rapport s'inverse en faveur de l'IG avec la solution CaCl_2 à 0,01 mol/L.

Les essais de performance appellent les commentaires suivants. Les transferts hydriques du sol support vers le GSB ont fonctionné car au terme de chaque essai il est attesté une augmentation de la teneur en eau et de l'épaisseur du GSB (Tableau 4). De ce point de vue, le phénomène d'absorption d'eau et de gonflement de la bentonite contenue dans le GSB est prouvé. Ce commentaire vaut également pour le GSB muni de son revêtement en polyoléfine (essai X2 RSI) avec cependant une tendance moins affirmée à l'absorption et au gonflement. Comparativement, le sol support a gagné en teneur en eau lorsque l'appareillage est en système ouvert (gain réalisé par imbibition) alors qu'il en a perdu en système fermé (perte en phase vapeur). Le phénomène d'échange cationique de la bentonite contenue dans le GSB est témoigné par l'évolution du rapport $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Ca})$ indiquant une substitution des ions de sodium par ceux de calcium (Tableau 5). Ce phénomène est encore plus accentué pour les essais présentant le sol support adjuvanté à 3 % en bentonite calcique. Ce commentaire n'est pas justifié pour l'essai X2 RSI (GSB avec revêtement en polyoléfine) et X2 S/I (essai *témoin*). Les essais de capacité d'absorption (Figure 3) et de gonflement libre (Tableau 6) des bentonites issues des essais de performance expriment la même tendance avec en ordre décroissant pour l'IG, CV SSI M(30) = X2 RSI(30) > X2 S/I (29, *témoin*) > X2 SSI M(28) > X2 SSI ∞ (26) > X2 SSI(25) et pour $V_{a\infty}$, CV SSI M(558,7) > X2 S/I(523,85, *témoin*) > X2 RSI(494,3) > X2 SSI ∞ (435) > X2 SSI(396,85). Le critère d'arrêt des essais de performance semble être pertinent car le volume absorbé et le gonflement libre de X2 SSI ∞ sont supérieurs à ceux de X2 SSI. Il n'est donc pas nécessaire de conduire l'essai de performance au-delà des 90 % du gonflement ou du volume pour un temps infini.

4. Conclusions

Les essais de performance en œdoperméamètre démontrent la réalité des transferts hydriques à partir des deux conditions opératoires conçues pour simuler l'imbibition et la phase vapeur. A partir de ces conditions, le phénomène de l'échange cationique se révèle actif puisque le bilan des cations majeurs en fin d'essais montre bien une modification de

la minéralogie initiale des deux bentonites (sauf dans le cas de l'essai X2 RSI). Ainsi, ce protocole expérimental s'avère pertinent dès lors qu'il s'agit « (...) de vérifier l'effet d'un transfert des ions calcium du sol vers la bentonite du GSB, (...) », (MEEDDAT, 2009).

5. Références bibliographiques

Bradshaw S., Benson C.H., et Scalia J. (2013). Hydration and cation exchange during subgrade hydration and effect on hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol n°139 – 12 pages.

Comeaga L. (1997). *Dispositifs d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques dans les centres de stockage de déchets*. Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, 297 pages.

Couradin A., Razakamanantsoa R., Didier G., Djeran -Maigre I. Etude comparative des performances hydrauliques d'adjuvants argileux en traitement de sols. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur 2008. Nantes (France), 18-20/05/2008, pp. 53-60.*

CFG (2011). *Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques en installations de stockage de déchets*. Version 3, 85 pages.

Didier G., (1972). *Gonflement cristallin et macroscopique des montmorillonites, sa prévision*. Thèse de l'Université Claude Bernard, Lyon, 109 pages.

Gates W.P., Hornsey W.P., et Buckley J.L. (2009) – *Geosynthetic clay liners : Is the key component being overlooked ?* GeoAfrica Conference – 10 pages

MEEDDAT(2009) – *Guide de recommandations pour l'évaluation de « l'équivalence » en étanchéité passive d'installation de stockage de déchets*. Version 2, 52 pages.

Meer S., Benson C. (2004). *In-service hydraulic conductivity of GCLs used in landfill covers : laboratory and field studies* – Geo Engineering Report – 116 pages.

Meer S., Benson C. (2007) – *Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners exhumed from landfill final covers*. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 14 pages.

Norotte V., Pothier C., Couradin A., Didier G., (2006). Apport de la norme XP P 84-705 pour la réalisation d'essais de performance sur les géosynthétiques bentonitiques. *CFG, Rencontres Géosynthétiques 2006, Montpellier, 12 et 14 juin 2006, pp 231-237.*

Rowe R.K., et Abdelatty K. (2012). Effect of a calcium-rich soil on the performance of an overlying GCL. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 9 pages.

Touze-Foltz N., Bloquet C., Barral C., Oberti O. et Chappe J. (2013). Évaluation de la performance d'un géosynthétique bentonitique en couverture d'installation de stockage de déchets. *9èmes Rencontres Géosynthétiques*. 8 pages.

Remerciements

MeTeD_k porteur et concepteur du projet remercie la société NAUE Applications pour sa contribution à ce programme.