

APPROCHE DES INTERACTIONS PHYSICO CHIMIQUES BENTONITE / CIMENT : CAS DE L'ÉTANCHEITE DES OUVRAGES SOUTERRAINS

APPROACH OF PHYSICAL AND CHEMICAL INTERACTIONS BETWEEN BENTONITE / CEMENT : THE CASE OF UNDERGROUND WORKS SEALING

Alain COURADIN¹, Laurent OXARANGO², Daniel DIAS³, Catherine POTHIER⁴

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

² LTHE, UJF Grenoble, F-38400, Saint Martin d'Hères, France

³ 3SR-UMR 5521, Polytech Grenoble, F-38400, Saint Martin d'Hères, France

⁴ Univ Lyon, INSA-Lyon, LGCIE - SMS ID, F-69621, Villeurbanne, France

RÉSUMÉ – L'objet de cet article est de présenter les résultats d'un premier programme d'essais portant sur les interactions physico chimiques bentonite / ciment. Ces résultats révèlent l'influence de la concentration, valence et nature du cation présent en solution vis-à-vis du gonflement libre des bentonites et de l'échange cationique. Le pH à forte alcalinité est lui aussi un facteur d'influence.

ABSTRACT – The aim of this paper is to present the results of a first test program based on the physico chemical interactions bentonite / cement. These results reveal the influence of the concentration, nature and valence of the cation present in solution on the free swelling and cationic exchange bentonite. The high alkalinity pH is also an influencing factor.

1. Introduction

Les zones urbaines se trouvent sans cesse en mutation et la reconquête de ces espaces s'opère le plus souvent avec comme principal objectif d'optimiser la surface au sol. C'est ainsi que de nombreux ouvrages disposent de constructions enterrées. Cette configuration peut entraîner une interaction directe entre l'ouvrage et son milieu environnant, notamment la nappe phréatique. Il est alors nécessaire de contrôler les venues d'eau vers le bâtiment. Dans cette optique, une des techniques couramment employées consiste à mettre en œuvre un géosynthétique bentonitique (GSB) pour garantir l'étanchéité de l'ouvrage. L'avantage de ces géomatériaux est de présenter une très faible perméabilité ($< 10^{-11}$ m/s). L'un des arguments mis en avant pour l'utilisation de ce type de géomatériaux est leur supposée stabilité dans le temps par analogie avec la grande stabilité des matériaux argileux dans leur environnement naturel. De récents travaux de recherche menés au droit d'ouvrages génie civil en béton dans le contexte du stockage profond de déchets radioactifs ont soulevé des questions fondamentales sur ce point. En effet, les solutions hyper-alcalines formées au contact du béton peuvent entraîner des échanges ioniques intenses conduisant à une modification des matériaux argileux (Dauzères, 2010 ; Gaucher et Blanc, 2006). Sur le plan minéralogique, il faut noter une illitisation des argiles gonflantes liée à la diffusion de l'hydroxyde de potassium (KOH), une précipitation de silicates de calcium hydratés (CSH) et une carbonatation liée à l'enrichissement en calcium. Plus récemment, certains auteurs (Gates et Bouazza, 2010 ; Benson et al., 2010) ont souhaité identifier les modifications des bentonites contenues dans des GSB en contact prolongé avec des solutions hyper alcalines. En effet, cette question se pose également vis-à-vis du confinement de certains déchets miniers ou de l'industrie. Les résultats semblent en accord avec ceux dont témoigne la

communauté scientifique à savoir la formation de nouvelles phases minérales comme celles évoquées plus haut.

2. Présentation du programme d'étude

2.1. Matériaux et solutions du programme d'essais

Au total, ce sont huit bentonites qui ont été retenues (B1 à B8). Ces bentonites possèdent des caractéristiques initiales distinctes (minéralogie, activation ou non, provenance géographique, ...). Deux ciments ont été sélectionnés. Ils proviennent des deux principales cimenteries situées en région Rhône – Alpes, avec l'une située à proximité de Lyon pour le ciment Lafarge (La) et l'autre à proximité de Grenoble pour le ciment Vicat (V). Ces ciments ont été choisis parmi ceux les plus courants pour confectionner les bétons dans le cas des ouvrages enterrés et souterrains. Ils sont de type CEM I 52,5 N - SR3 CE PM-CP2 NF. Les solutions de référence sont au nombre de deux avec de l'eau déminéralisée (ED) et du chlorure de sodium (NaCl) de concentration égale à 10^{-3} M. Les solutions d'essais synthétiques sont au nombre de deux et sont du chlorure de calcium (CaCl_2) et de l'hydroxyde de potassium (KOH). Ces solutions synthétiques présentent des concentrations égales à 10^{-1} M, 10^{-2} M et 10^{-3} M. Elles ont été obtenues à partir d'une poudre appartenant chacune à la gamme de produits AnalaR NORMAPUR. Les solutions cimentaires sont au nombre de deux et ont été élaborées à partir des ciments (La et V). Le ratio liquide/solide (L/S) qui a été retenu pour ce programme est égal à 10.

2.2. Etape et contenu du programme d'essais

Le programme d'essais présente le contenu et les cinq étapes suivantes : 1) sélection des bentonites contenues dans les procédés d'étanchéité bentonitiques commercialisés aujourd'hui sur le territoire national, 2) approvisionnement en plusieurs types de ciments susceptibles d'être utilisés dans le cas des ouvrages enterrés ou souterrains, 3) caractérisation initiale des bentonites avec détermination de leur indice de gonflement libre (AFNOR, 2002), leur valeur au bleu (VBS), leur capacité d'échange cationique (AFNOR, 1993), leur teneur en carbonate (AFNOR, 1996), 4) essais de gonflement libre de la bentonite contenue dans les procédés d'étanchéité par géosynthétique bentonitique à partir des solutions de références, des solutions synthétiques et des solutions cimentaires, 5) caractérisation chimique finale des solutions surnageantes résultant des essais de gonflement libre. Les cations analysés en fonction des bentonites (B), des solutions initiales cimentaires (Si-La, Si-V) et des solutions surnageantes (S- CaCl_2 , S-KOH, S-La et S-V) sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1. Liste des cations analysés en fonction du support

Support	Cations
B	Na^+ , Ca^{2+}
Si-La, Si-V	Na^+ , Ca^{2+} , K^+
S- CaCl_2 10^{-1} M, 10^{-2} M	Ca^{2+}
S-KOH 10^{-1} M, 10^{-2} M	K^+
S-La, S-V	Na^+ , Ca^{2+} , K^+

2.3. Justification de la démarche expérimentale

La solution de chlorure de sodium présente une faible concentration molaire et un cation neutre du point de vue des échanges cationiques (NaCl , 10^{-3} M). Cette solution a été

retenue dans le cadre du programme LIXAR (Guyonnet et *al.*, 2003) comme solution de référence. Les solutions synthétiques mono-ioniques (CaCl_2 et KOH) ont comme principal objectif de simuler des concentrations molaires croissantes possédant soit un cation divalent (Ca^{2+}) susceptible de favoriser les échanges cationiques soit un cation monovalent relativement neutre (K^+) du point de vue des échanges. Si le calcium en solution peut se substituer facilement au cation interfoliaire sodique, en revanche, sa capacité à engendrer le gonflement libre est moindre jusqu'à devenir quasi inhibant à forte concentration. Le potassium peut conduire à des amplitudes de gonflement comparables à celles obtenues avec le cation monovalent sodium (Na^+) et lithium (Li^+) tant que le déficit en charge du minéral argileux est localisé dans la couche octaédrique (comme c'est le cas des montmorillonites qui sont un sous-groupe des smectites). D'autre part, les solutions de chlorure de potassium sont connues depuis longtemps pour stabiliser le gonflement des argiles bentonitiques voire même les inhiber (Azzouz, 1985).

Il est à noter que certains auteurs (Konan, 2006, Bouala et *al.*, 2011) ont opté pour une solution d'hydroxyde de calcium ou chaux éteinte $\text{Ca}(\text{OH})_2$ afin de simuler le milieu cimentaire. En effet, ce milieu constitue une solution idéale puisqu'il se rapproche des conditions d'équilibre d'une solution cimentaire riche en calcium et possédant un pH alcalin à très alcalin. Mais puisque l'adsorption des ions Ca^{2+} et OH^- se fait dans un rapport proche de 2 dans le cas de la montmorillonite, ce résultat semble indiquer un lien entre les adsorptions des ions calcium et hydroxyle. C'est pourquoi, ce programme expérimental a fait le choix de déconnecter le signal entre l'adsorption des ions calcium et hydroxyle en choisissant d'une part une solution de chlorure de calcium et d'autre part une solution d'hydroxyde de potassium.

La détermination de l'indice de gonflement libre (IG) est utilisée à la fois pour caractériser la bentonite initiale contenue dans les différents procédés d'étanchéité avec les solutions de référence et celles soumises au contact avec les solutions synthétiques et cimentaires. Il s'agit donc de l'essai principal de ce programme. Cet essai est retenu comme un indicateur de performance pour caractériser les bentonites (Guyonnet et *al.*, 2008). En effet cet essai qui permet de renseigner la compatibilité du système électrolytes en solution – bentonite, reste simple dans sa mise en œuvre, facile dans son exploitation, rapide vis-à-vis de l'obtention du résultat et aisément reproductible d'un géomatériau à l'autre voire d'une solution d'essai à l'autre. C'est pourquoi, certains auteurs (Shackelford, 2000, Jo, 2001, Shan, 2002, Ashmawy, 2002, Kolstad, 2004, Katsumi et *al.*, 2008) proposent d'établir une corrélation entre cet indice et la performance hydraulique des GSB. Cette corrélation demeure problématique pour des valeurs inférieures à $20 \text{ cm}^3/2\text{gsec}$.

3. Résultats

3.1. Caractérisation des matériaux et des solutions de référence

Les grandeurs déterminées, à savoir la teneur en carbonate (CaCO_3 , %), la capacité d'échange cationique (CEC, meq/100g), la valeur au bleu de méthylène (VBS, g/100gsec) sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Identification initiale des bentonites

Essai	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
CaCO_3	0,0	0,28	0,0	3,95	1,31	1,40	1,67	1,81
CEC	74,64	65,26	74,44	64,63	/	54,52	76,0	83,3
VBS	22,5	27,5	27,5	25	22,5	25	20	32,5

Le résultat des essais de gonflement libre (IG, $2g/cm^3sec$) avec les solutions de référence sont présentés dans les Tableaux 3 et 4. Chaque solution surnageante fait l'objet après IG de la détermination du potentiel hydrogène (pH, -) et de la conductivité électrique (CE, $\mu S/cm$).

Tableau 3. Indice de gonflement libre (IG) avec l'eau déminéralisée (ED)

Essai	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
IG ($cm^3/2gsec$)	40	28	27	28	24	23	21	26
pH (-)	9,4	9,7	10,05	9,96	9,9	9,89	9,55	10,02
CE ($\mu S/cm$)	165	99	211	277	212	334	89,4	430

Tableau 4. Indice de gonflement libre (IG) avec le chlorure de sodium (NaCl) 10^{-3} M

Essai	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
IG ($cm^3/2gsec$)	25	27	27	25	27	25	26	27
pH (-)	9,35	9,7	10,05	9,96	9,9	9,89	9,55	10,12
CE ($\mu S/cm$)	240	232	274	383	423	416	253	369

3.2. Essais IG avec les solutions synthétiques

Les résultats des caractéristiques physico-chimiques des solutions synthétiques et des essais de gonflement libre sont présentés respectivement dans le Tableau 5 et les Tableaux 6 et 7.

Tableau 5. pH et conductivité électrique des solutions synthétiques

Essai	CaCl ₂ 10^{-1} M	CaCl ₂ 10^{-2} M	CaCl ₂ 10^{-3} M	KOH 10^{-1} M	KOH 10^{-2} M	KOH 10^{-3} M
pH (-)	5,6	6,37	5,94	12,32	11,34	9,57
CE ($\mu S/cm$)	19040	2200	477	21200	2140	86,9

Tableau 6. Indice de gonflement libre avec CaCl₂ 10^{-1} M

Essai	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
IG ($cm^3/2gsec$)	10	10	8	9	7	10	7	9
pH (-)	6,47	6,72	6,8	6,82	7,05	7	7,18	7,21
CE ($\mu S/cm$)	17500	17200	17090	17100	17050	17410	16940	17340

Tableau 7. Indice de gonflement libre avec KOH 10^{-1} M

Essai	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
IG ($cm^3/2gsec$)	17	16	20	20	15	32	12	19
pH (-)	12,38	12,41	12,33	12,36	12,41	12,37	12,38	12,41
CE ($\mu S/cm$)	17840	17750	18450	17800	18320	17940	18130	17670

3.3. Essais IG avec les solutions cimentaires

Le résultat des essais IG avec les deux solutions est présenté dans les Tableaux 8 et 9.

Tableau 8. Indice de gonflement libre avec CEM I La

Essai	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
IG ($cm^3/2gsec$)	33	32	33	32	27	37	20	24
pH (-)	11,88	11,82	11,79	11,36	11,75	11,49	12,98	13,11
CE ($\mu S/cm$)	13480	12300	13120	15950	16900	12150	13750	14130

Tableau 9. Indice de gonflement libre avec CEM I V

Essai	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
IG (cm ³ /2gsec)	21	20	21	22	16	32	15	20
pH (-)	13,8	13,72	13,23	12,88	12,96	13,76	13,33	13,9
CE (μS/cm)	14280	13550	14460	14060	14550	14810	14210	14020

Les valeurs du pH et de la conductivité électrique (CE) des solutions initiales cimentaires sont respectivement égales à 13,03 et 4980 μS/cm (CEM I La), 12,26 et 7500 μS/cm (CEMI V).

3.5. Concentrations en cations des solutions surnageantes

Les Tableaux 10 à 13 présentent les bilans ioniques avec les solutions surnageantes.

Tableau 10. Concentration en calcium et potassium des solutions surnageantes

Bentonite	CaCl ₂ , KOH 10 ⁻¹ M		CaCl ₂ , KOH 10 ⁻² M	
	Ca ²⁺ , (mol/L)	K ⁺ (mol/L)	Ca ²⁺ , (mol/L)	K ⁺ (mol/L)
B2	0,098	0,091	0,011	0,005
B3	0,088	0,078	0,013	0,004
B4	0,074	0,095	0,012	0,005
B8	0,094	0,099	0,013	0,008

Tableau 11. Composition chimique en alcalin et calcium des solutions cimentaires

	Na (mol/L)	K (mol/L)	Ca (mol/L)
CEM I La	0,013	0,67	3,17
CEM I V	0,01	1,10	7,63

Tableau 12. Composition chimique de la solution surnageante CEM I La

Cations	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
Na (mol/L)	0,2	0,21	0,09	0,13	0,023	0,16	0,15	0,16
K (mol/L)	0,54	0,016	0,26	0,4	0,06	0,0164	0,85	0,80
Ca (mol/L)	1,47	1,15	1,23	1,31	1,23	1,31	4,11	3,95

Tableau 13. Composition chimique de la solution surnageante CEM I V

Cations	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
Na (mol/L)	0,03	0,089	0,019	0,028	0,227	0,15	0,03	0,23
K (mol/L)	1,358	0,28	1,08	1,26	1,07	1,09	1,45	0,84
Ca (mol/L)	5,23	5	5,19	4,43	5,47	5,15	4,91	5,01

3.6 Commentaires

Toutes les bentonites possèdent des proportions très faibles en carbonate de calcium (< à 5 %), une capacité d'échange cationique élevée (> 65 meq/100g). Ces différentes valeurs sont classiques pour ce type de matériau (Tableau 2). Les solutions surnageantes révèlent un pH faiblement basique (Tableaux 3 et 4). Ce constat s'explique dans le cas de la solution de chlorure de sodium puisque son pH initial est déjà légèrement basique. En revanche, l'eau déminéralisée possède un pH initial neutre. Cette évolution du pH vers la basicité peut s'expliquer par la nature des surfaces argileuses qui sont en contact direct avec les molécules d'eau. En effet, les plaquettes de l'argile bentonitique (cas des smectites prépondérantes) comportent deux surfaces basales siliceuses et des surfaces latérales. La surface basale siliceuse, par l'intermédiaire des doublets d'électrons

disponibles sur les atomes d'oxygène, se lie à la molécule d'eau par l'intermédiaire de l'atome d'hydrogène. Le transfert d'électrons de la surface basale siliceuse vers la molécule d'eau favorise la fixation de H^+ . La surface se comporte alors comme une base faible de Brönsted. Comme prévue, la conductivité électrique des solutions synthétiques (Tableau 5) est fonction de leur concentration molaire avec une forte valeur pour les deux solutions à 10^{-1} M. Le pH des solutions d'hydroxyde de potassium se révèle alcalin à fortement alcalin.

La série d'essais avec les solutions $CaCl_2$ (Tableau 6) met en évidence l'influence de la concentration de la solution initiale sur le résultat de l'IG. En effet, l'indice de gonflement en présence de la solution 10^{-1} M est égal ou proche de $10\text{ cm}^3/2\text{gsec}$ (avec les solutions 10^{-2} M et 10^{-3} M cet indice passe respectivement à des valeurs comprises entre 22 et $26\text{ cm}^3/2\text{gsec}$ et entre 23 et $40\text{ cm}^3/2\text{gsec}$). La série d'essais avec la solution KOH (Tableau 7) révèle les conditions initiales d'alcalinité puisque en présence de la solution hyperalcaline KOH 10^{-1} M, les bentonites présentent des capacités atténuées au gonflement avec des indices de l'ordre de 15 à $20\text{ cm}^3/2\text{gsec}$ alors que la conductivité électrique initiale de la solution révèle une forte concentration en électrolytes en tout cas similaire à celle de $CaCl_2\ 10^{-1}$ M. Pour information et pour des conditions initiales de pH basique à fortement basique (en présence de KOH 10^{-3} M et KOH 10^{-2} M) l'indice de gonflement des différentes bentonites ne présente pas de valeurs inférieures à $20\text{ cm}^3/2\text{gsec}$.

Les solutions cimentaires possèdent un pH fortement basique et une conductivité électrique moyenne, en tout cas, inférieure à celle obtenue avec les solutions $CaCl_2$ et KOH 10^{-1} M. Les résultats issus des essais de gonflement libre (Tableaux 8 et 9) mettent en évidence un comportement distinct des bentonites en contact avec les deux solutions issues d'un ciment de même classe (CEM I) et dont le rapport L/S est équivalent. En effet, la solution cimentaire CEM I La favorise un gonflement homogène et supérieur à $24\text{ cm}^3/2\text{gsec}$, alors que la solution cimentaire CEM I V fait apparaître des gonflements atténués et contrastés dont la majorité demeure de l'ordre de $20\text{ cm}^3/2\text{gsec}$.

Dans le cas de la solution $CaCl_2\ 10^{-1}$ M, la solution surnageante en contact avec les bentonites B2, B3, B4 et B8 est moins concentrée en cation Ca^{2+} que la solution initiale, c'est l'inverse avec la solution $CaCl_2\ 10^{-2}$ M. Les solutions surnageantes en KOH sont moins concentrées en cation K^+ que les solutions initiales (Tableau 10). Ce résultat est en conformité avec les expérimentations et simulations des auteurs. A savoir, la formation d'un panache alcalin à partir duquel peut se générer, entre autres, l'illitisation des smectites par la diffusion du potassium.

Initialement et pour un même rapport L/S, les solutions cimentaires possèdent des concentrations différentes en alcalins (Na^+ et K^+) et calcium (Tableau 11). En effet, les grains anhydres du ciment se dissolvent pour former des silicates de calcium hydratés (CSH) et de la portlandite ($Ca(OH)_2$), en équilibre avec une solution de pH très basique. Le milieu cimentaire est donc basique et riche en cations dont le plus important est le calcium. La solution CEM I V est deux fois plus concentrée en cations K^+ et Ca^{2+} (mol/L) que la solution CEM I La (pour un même rapport L/S). Ainsi, les deux ciments semblent posséder des compositions chimiques (et de ce fait minéralogiques) différentes. Cette différence de composition s'exprime vis-à-vis des échanges ioniques au cours de la mise en suspension des bentonites (Tableaux 12 et 13). Alors que le sodium vient enrichir la concentration des deux solutions surnageantes, le potassium demeure stable en présence des différentes bentonites mises en contact avec la solution CEM I V, tandis qu'avec la solution CEM I La, sa concentration diminue sauf au contact des bentonites B7 et B8. Pour le calcium, les concentrations initiales des solutions cimentaires diminuent après la mise en suspension des bentonites. Finalement, la solution qui opère les plus importants échanges ioniques avec les bentonites est la solution CEM I La puisqu'elle opère un bilan d'échange ionique deux fois plus important que CEM I V. Toutes

bentonites confondues, c'est le sodium qui participe le plus aux échanges ioniques, ensuite le potassium uniquement avec la solution CEM I La puis le calcium.

4. Conclusions

Les résultats issus de ce programme d'essais sont en conformité avec l'état de l'art en la matière, à savoir, une influence de la concentration, valence et nature des cations qui composent les solutions mises en contact avec les différentes bentonites pour les essais de gonflement libre. L'aspect innovant consiste en l'approche combinée et comparative des solutions mono-ioniques (CaCl_2 , KOH) avec des concentrations croissantes et les solutions cimentaires.

L'influence du pH est bien démontrée grâce aux solutions KOH. Cette influence semble s'atténuer avec les solutions cimentaires. En effet, ces solutions sont poly-cationiques, si bien qu'une compétition entre cations se révèle être un facteur d'atténuation. Ainsi, il ne paraît pas réaliste de considérer uniquement des solutions synthétiques mono-cationiques (même à concentration croissante) pour espérer aborder les interactions physico-chimiques entre ciment et bentonite.

Enfin, bien que les solutions cimentaires possèdent le même rapport (L/S = 10) les échanges entre ces solutions et les bentonites sont contrastées. L'essai IG bien que simple et efficace ne permet pas à lui seul de couvrir et d'expliquer la globalité des phénomènes, comme de prédire la cinétique des échanges ioniques et leur impact en termes de performance hydraulique à long terme. L'apport de l'analyse chimique des solutions surnageantes après l'essai de gonflement libre permet de constater les échanges ioniques sans les confirmer de manière quantitative au niveau des bentonites.

Bien que ces premiers résultats soient encourageants, il n'est pas permis à ce stade de l'expérimentation d'envisager une conclusion quant à l'évolution des performances hydrauliques des bentonites soumises au contact avec des solutions cimentaires. C'est pourquoi une étude plus approfondie et fournie mérite d'être entreprise.

5. Références bibliographiques

AFNOR (1993). Méthodes chimiques – Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) et des cations extractibles, AFNOR, mai 1993.

AFNOR (1996). Sols : Reconnaissance et essais – Détermination de la teneur en carbonate – Méthode du calcimètre, AFNOR, octobre 1996.

AFNOR (2002). Géosynthétiques bentonitiques - Détermination de la capacité de gonflement de l'argile dans les géosynthétiques bentonitiques. AFNOR, août 2002.

Azzouz R., (1985). *Contribution à l'étude de la stabilité des argiles feuilletées en cours de forage*. Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon. 106 pages.

Ashmawy A.K., El-Hadji D., Sotelo N., Muhammad N. (2002). Hydraulic performance of untreated and polymer-treated bentonite in inorganic landfill leachates. *Clays and clays minerals*, vol. 50, pp. 546-552.

Benson C. H., Oren A. H., Gates W. P. (2010). Hydraulic conductivity of two geosynthetic clay liners permeated with a hyperalkaline solution. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 28, pp. 206-218.

Boualla N., Benaouda El-H. (2011). *Comportement des argiles dans un milieu basique. Catégorie : Environnement.* ScienceLib Editions Mersenne : Volume 3, N ° 110708. ISSN 2111-4706.

Dauzères A., (2010). *Etude expérimentale et modélisation des mécanismes physico-chimiques des interactions béton-argile dans le contexte du stockage géologique des déchets radioactifs.* Thèse de l'Université de Poitiers. 249 pages.

Gaucher E., Blanc P. (2006). Cement/clay interactions – A review / Experiments, natural analogues, and modeling. *Waste Management, vol. 26 pp. 776-788.*

Gates W. P., Bouazza A., (2010). Bentonite transformations in strongly alkaline solutions. *Geotextiles and geomembranes, vol. 28, pp. 219-225.*

Guyonnet D., Touze-Foltz N., Norotte V., Pothier C., Didier G., Gailhanou H., Blanc P., Pantet A. (2008) : *Projet LIXAR2 – Indicateurs de performance pour les géosynthétiques bentonitiques.* Rapport final, BRGM/RP-56356-FR, mai 2008, 166 pages.

Guyonnet D., Norotte V., Touze-Foltz N., Pons C, H., Clinard C., Didier G., Gaucher E., Gaboriau H. (2003). *LIXAR (Interactions lixiviats-argiles).* Rapport final. Rapport BRGM-RP-52449-FR.

Jo H.Y., Katsumi T., Benson C.H., Edil T.B. (2001). Hydraulic conductivity and swelling of nonprehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 127, pp. 557-567.*

Katsumi T., Ishimori H., Onitaka M., Fukagawa R. (2008). Long-term barrier performance of modified bentonite materials against sodium and calcium permeant solutions. *Geotextiles and Geomembranes, vol. 26, pp. 14–30.*

Kolstad D.C., Benson C.H., Edil T.B., Jo H.Y. (2004). Hydraulic conductivity of a dense prehydrated GCL permeated with aggressive inorganic solutions. *Geosynthetics International, vol. 11, pp. 233-241.*

2006 Konan, K, L., (2006). *Interactions entre des matériaux argileux et un milieu basique riche en calcium.* Thèse de l'Université de Limoges. 144 pages.

Shackelford C.D., Benson C.H., Katsumi T., Edil T.B., Lin L. (2000). Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids. *Geotextiles and Geomembranes, vol. 18, pp. 133-161.*

Shan H.Y., Lai Y.J. (2002). Effect of hydrating liquid on the hydraulic properties of geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes, vol. 20, pp. 19-38.*

Remerciements

MeTeD_k porteur et concepteur du projet remercie les sociétés DIP Technologies (69), NAUE Applications (38) et SPPM (91) pour leur contribution à ce programme.