VALORISATION DE SABLES DE FONDERIE EN BARRIERE ETANCHE OUVRAGEE : PERMEABILITE EN LABORATOIRE

VALORISATION OF FOUNDRY SANDS AS MINERAL BARRIERS : HYDRAULIC CONDUCTIVITIES STUDY IN LABORATORY

Alain COURADIN[1], Thierry CHASSAGNAC[2], Gérard DIDIER[3]
1 INSAVALOR, Equipe géotechnique environnementale, Villeurbanne, France
2 3C, Morancé, France
3 CED Ingénierie, Lyon, France

RÉSUMÉ – L'objet de cet article est de présenter les principaux résultats issus d'une étude en laboratoire vis-à-vis de la valorisation de sables de fonderie en barrière étanche ouvragée.

ABSTRACT — The objective of this paper is to introduce the main results of a study in laboratory driven with a sand-bentonite mixture (foundry sands) as hydraulic mineral barriers.

1. Introduction

En génie civil, les exemples de réalisation d'ouvrages faisant appel à la fonction étanchéité des matériaux naturels sont nombreux. En matière de confinement, les installations de stockage de déchets et les sites et sols pollués font explicitement référence à la notion de barrière étanche opérant alors comme coupure hydraulique. Par exemple, dans le cas des installations de stockage de déchets non dangereux et comme le requiert la réglementation française (JORF, 2006), une perméabilité inférieure à 10^{-9} m/s est recherchée. Encore faut-il disposer sur place ou à proximité de l'ouvrage d'un géomatériau naturel présentant le niveau de faible perméabilité requis. Lorsque ces géomatériaux sont absents, une opportunité consiste à envisager l'emploi de co-produits industriels susceptibles de répondre aux exigences réglementaires. L'objet de cet article est de présenter une étude géotechnique conduite en laboratoire, à partir de laquelle, le potentiel d'étanchéité de sables de fonderie est évalué. En effet, ces sables possèdent la particularité d'être fortement adjuvanté en bentonite. Le terme de bentonite désigne ici l'appellation commerciale d'une famille d'argiles constituée principalement par de la smectite et plus particulièrement de la montmorillonite. Cette famille d'argiles est généralement connue pour son caractère hydrophile, leur conférant une capacité accrue au gonflement en présence de solutés (ce qui n'est pas le cas de toutes les argiles). Si l'utilisation de la bentonite en fonderie est recherchée pour ses propriétés liantes, en génie civil, elle sera recherchée principalement en technique d'étanchéité des ouvrages. En effet, il est démontré que les matériaux grenus enrichis à plus ou moins forte (voire très forte) concentration en minéraux argileux de type bentonite peuvent se prêter de manière artificielle à la réalisation de barrières étanches tant pour le confinement des déchets dangereux et non dangereux (Calvacante-Rocha, 1994) que pour les déchets issus de l'industrie nucléaire (Komine, 2004).

2. Présentation du programme d'étude en laboratoire

2.1. Généralités

L'étude du remaniement et/ou traitement d'un géomatériau en vue de constituer une barrière étanche nécessite de connaître son identification géotechnique (NF P 11-300) puis son potentiel d'étanchéité (NF X 30-441). Si ce potentiel ne permet pas de qualifier le matériau pressenti, le programme d'essai se prolonge par le traitement du matériau avec ajout d'adjuvant (ce ne sera pas le cas dans la présente étude). Cette étude nécessite de connaître également la relation qui existe entre le poids volumique sec (γ_d en kN/m^3) et la teneur en eau (w en %) de compactage du matériau selon la procédure Proctor (NF P 94-093) afin de déterminer les paramètres d'identification à l'optimum (poids volumique sec maximal, γ_{dmax}, et teneur en eau à l'optimum Proctor).

2.2. Programme d'essais

Le descriptif du programme d'essais peut être synthétisé à l'aide du tableau suivant.

Tableau I. Descriptif des essais

Nature	**G**	**VBS**	**GTR**	**Proctor**		**k**
				Normal	Modifié	
Nombre	1	1	1	1	1	8

La première ligne du tableau indique le programme d'essais qui a été réalisé avec successivement de gauche à droite, G pour l'identification granulométrique par la méthode de tamisage par voie humide du matériau (NF P 94-041), VBS pour la détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche (NF P 94-068), GTR en référence à la classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières, Proctor pour la détermination des références de compactage d'un matériau selon l'essai Proctor aux deux (2) énergies standards (Proctor normal et modifié) et enfin k pour la détermination en laboratoire du coefficient de perméabilité à saturation d'un matériau, au perméamètre à paroi rigide à gradient hydraulique constant. La seconde ligne du tableau renseigne le nombre d'essais réalisés par nature de l'essai. Ainsi, il a été réalisé un (1) essai par nature excepté pour la perméabilité pour laquelle huit (8) essais au total ont été pratiqués. Ces huit essais se répartissent avec quatre (4) essais de perméabilité pour chaque énergie de compactage. L'énergie de compactage au Proctor modifié a été retenue en plus de celle habituellement utilisée (Proctor normal) car pour la fourchette des teneurs en eau envisagées, le gain d'énergie entraine d'une part une compacité plus importante du matériau à teneur en eau équivalente et d'autre part une référence à l'optimum de teneur en eau moindre. Ces constats permettent d'envisager différents scénarios quant à la mise en œuvre ultérieure du matériau et notamment à la nécessité de procéder ou non à une correction hydrique avant son compactage. C'est pourquoi, le programme d'étude décline des essais de perméabilité de part et d'autre l'optimum Proctor pour chaque énergie. En effet, ces deux (2) paramètres (teneur en eau et énergie de compactage) possèdent un effet significatif dès lors qu'il s'agit d'obtenir de faible perméabilité à partir d'un matériau reconstitué.

2.3. Principe des essais

2.3.1. Perméabilité des éprouvettes

L'essai de perméabilité au perméamètre à paroi rigide consiste à isoler une éprouvette compactée entre deux pierres poreuses placées dans des embases munies de joints toriques. L'ensemble est prolongé par un tube rilsan jusqu'à une bouteille de Mariotte (elle permet de contrôler à la fois la charge hydraulique et le volume d'eau entrant). L'essai est donc conduit à volume constant (pas de déformation du matériau), à gradient hydraulique constant et se base sur le suivi d'un débit d'écoulement vertical (par infiltration) à travers l'éprouvette du matériau pour caractériser son coefficient de perméabilité verticale (à l'aide de la relation de DARCY). Ce suivi dans le temps de l'infiltration s'opère tant en volume entrant qu'en volume sortant. La représentation de la perméabilité (k) en fonction de la durée de l'essai (t) permet d'en déduire une cinétique à travers un diagramme k = f(t).

2.3.2. Autres

L'essai de tamisage par voie humide consiste à faire passer au travers d'une colonne de tamis d'ouverture de plus en plus serrée une masse de sol sec donnée jusqu'au refus (le passage des grains du sol est facilitée par l'utilisation d'un mince filet d'eau). La courbe granulométrique est une représentation graphique G = f(P) de la répartition de la masse des particules (exprimé en pourcentage cumulé des passants, P) en fonction de leur dimension (G). La détermination de la valeur de bleu (VBS) permet de caractériser la fraction argileuse d'un géomatériau. En effet, le résultat de l'essai sera fonction à la fois de la quantité et de la nature minéralogique du(es) minéral(aux) argileux contenu(s) dans le géomatériau. Son principe consiste à introduire successivement des doses d'une solution de bleu de méthylène de concentration initiale fixée contenant une masse de géomatériau connue (la VBS s'exprime comme étant le rapport entre la masse de bleu introduite à celle de la prise d'essai). Le principe de l'essai de compactage consiste à humidifier le géomatériau à plusieurs teneurs en eau croissantes et à le compacter dans un volume fixé (moule Proctor) selon un procédé et une énergie identiques et normalisés. Pour chaque teneur en eau (w), la densité sèche (γ_d) obtenue après compactage est déterminée. Les résultats sont alors reportés dans un diagramme γ_d = f(w) et le graphe représente alors la courbe Proctor.

2.4. Présentation des géomatériaux

2.4.1. Sable

Le sable (Sf) est issu du process industriel de la fonderie (après l'opération de décochage des pièces moulées). Sur site, ce matériau est stocké sous forme d'andain. A l'origine, ce matériau grenu est siliceux, de granulométrie serrée (avec un Cu = 1,6) et unimodale. Ses caractéristiques physiques et minéralogiques en font un candidat éprouvé pour une utilisation en fonderie. Cette utilisation requiert à ce qu'il soit mélangé à de la bentonite à une concentration d'environ 8 % (du noir de carbone est décelable à hauteur de 4 % qui lui confère sa couleur caractéristique). Sa valorisation a été envisagée après une première étape de validation qui a consisté à vérifier son écocompatibilité vis-à-vis de l'environnement par des essais de lixiviation.

2.4.2. Bentonite

La bentonite utilisée pour le traitement en fonderie est de deux natures minéralogiques, la première (pour 2/3 du mélange en bentonite) est une montmorillonite calcique activée en sodium (son appellation commerciale est BENTONIL S V), la seconde (pour 1/3 du mélange) est une montmorillonite sodique naturelle (son appellation commerciale est GREENBOND 453 G). En rappel, le procédé d'activation d'une bentonite consiste à ajouter à la matière première, un pourcentage pondéral de carbonate de sodium (Na_2CO_3). La désignation calcique ou sodique d'une bentonite fait référence à la nature du cation compensateur qui se trouve de façon majoritaire en position interfoliaire du groupement Te-Oc-Te de la montmorillonite. Selon la nature calcique ou sodique de ce cation compensateur, les propriétés du minéral le possédant sera différente, avec comme principale distinction, une meilleure disposition à l'adsoprtion et au gonflement en présence d'eau dans le cas des bentonites sodiques, en revanche, une capacité moindre à l'échange cationique dans le cas des calciques (Gleason et al., 1997). Pour le domaine d'application qui est envisagé, ces différences peuvent se traduire par des performances hydrauliques distinctes (Couradin et al., 2008). En effet, il est reconnu, qu'en matière de traitement des sols, que les bentonites calciques possèdent des performances hydrauliques moindres que les bentonites sodiques.

3. Résultats et commentaires

3.1. Identification et caractéristiques Proctor

Le matériau Sf possède un passant au tamis de 80 µm égal à 2,45 %, une VBS de 2,7 et une teneur en eau à réception égale à 2,4 %. Il en découle un classement B_2 du matériau selon le GTR. Ses caractéristiques à l'optimum Proctor sont pour le poids volumique sec maximal et la teneur en eau à l'optimum du Proctor (w_{oPn}/w_{oPm}) respectivement égales à 17,9 kN/m^3 et 11,2 % pour le Proctor normal et 19,2 kN/m^3 et 9,4 % pour le Proctor modifié (Figure 1).

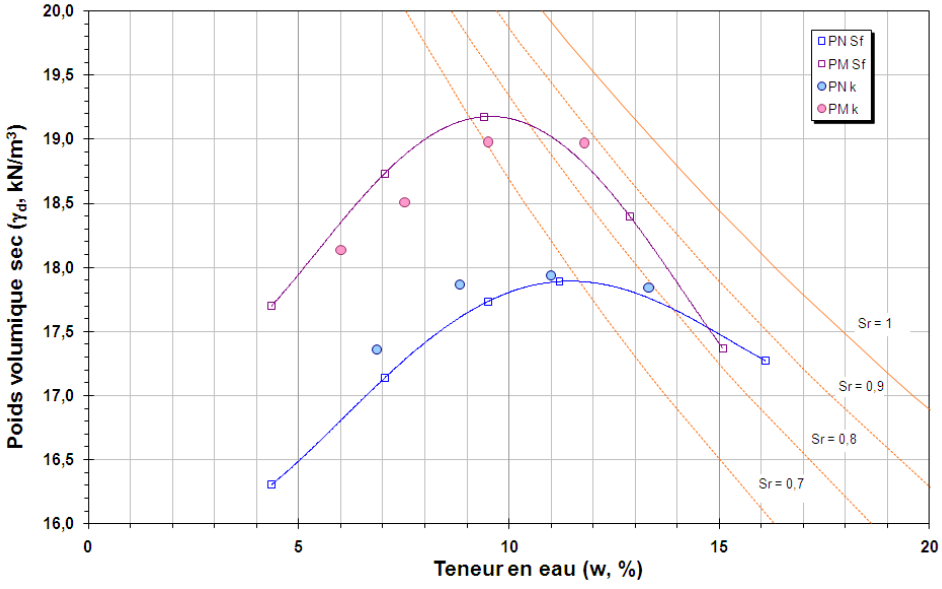

Figure 1. Courbes Proctor du matériau Sf

Le degré de saturation (Sr) du matériau Sf a été calculé à partir d'un poids volumique des grains solides égal à 2,55. Sur la figure 1, les figurés vides reliés par un trait plein représentent les couples « humidité-densité » des éprouvettes ayant été compactées pour construire la courbe Proctor (au moins cinq éprouvettes par courbe), alors que les figurés pleins symbolisent celles destinées aux essais de perméabilité (quatre par énergie réparties de part et d'autre l'optimum Proctor).

3.2. Potentiel d'étanchéité

Les principales caractéristiques initiales des éprouvettes sont résumées dans le tableau II. La première colonne du tableau désigne les éprouvettes avec comme référence l'énergie Proctor utilisée (PN et PM pour respectivement le Proctor normal et modifié) et leur teneur en eau de compactage. La légende des caractères en première ligne se rapporte aux paramètres de compactage des éprouvettes, avec consécutivement de gauche à droite, le poids volumique humide, la teneur en eau, le poids volumique sec, la teneur en eau de saturation et le degré initial de saturation.

Tableau II. Caractéristiques physiques initiales des éprouvettes

Eprouvette (n°)	γ_h (kN/m^3)	w_c (%)	γ_d (kN/m^3)	w_{sat} (%)	Sr_i (%)
PN7%	18,55	6,9	17,36	18,4	37,3
PN9%	19,44	8,8	17,86	16,8	52,7
PN11%	19,91	11,0	17,94	16,5	66,5
PN13%	20,22	13,3	17,84	16,8	79,15
PM6%	19,22	6,0	18,13	15,95	37,65
PM8%	19,90	7,5	18,51	14,8	50,75
PM10%	20,78	9,5	18,98	13,5	70,5
PM12%	21,21	11,8	18,97	13,5	87,5

Le tableau III résume les conditions de l'essai de perméabilité avec la différence de charge hydraulique appliquée (h) de part et d'autre l'éprouvette en fin d'essai et le gradient hydraulique correspondant (i). Les trois derniers paramètres (Sr_f, F, k) sont les caractéristiques des éprouvettes obtenues en fin d'essai, avec le degré final de saturation, le flux surfacique et le coefficient de perméabilité.

Tableau III. Résultats de l'essai de perméabilité

Eprouvette (n°)	**h** (m)	**i** (m/m)	Sr_f (%)	**F** (m^3/m^2/s)	**k** (m/s)
PN7%	0,92	18,4	88,9	$6{,}2 \cdot 10^{-9}$	$3{,}4 \cdot 10^{-10}$
PN9%	0,77	15,4	92,15	$3{,}6 \cdot 10^{-9}$	$2{,}4 \cdot 10^{-10}$
PN11%	0,92	18,4	91	$6{,}0 \cdot 10^{-9}$	$2{,}0 \cdot 10^{-10}$
PN13%	0,92	18,4	96	$1{,}7 \cdot 10^{-9}$	$9 \cdot 10^{-11}$
PM6%	1	25	98	$3{,}7 \cdot 10^{-9}$	$1{,}5 \cdot 10^{-10}$
PM8%	1	25	93	$3{,}7 \cdot 10^{-9}$	$1{,}2 \cdot 10^{-10}$
PM10%	1	25	100	$3{,}7 \cdot 10^{-9}$	$1{,}3 \cdot 10^{-10}$
PM12%	1	25	100	$3{,}7 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-11}$

Quels que soient l'énergie de compactage et le degré initial de saturation des éprouvettes, le coefficient de perméabilité est inférieur à 1 x 10^{-9} m/s (figure 2).

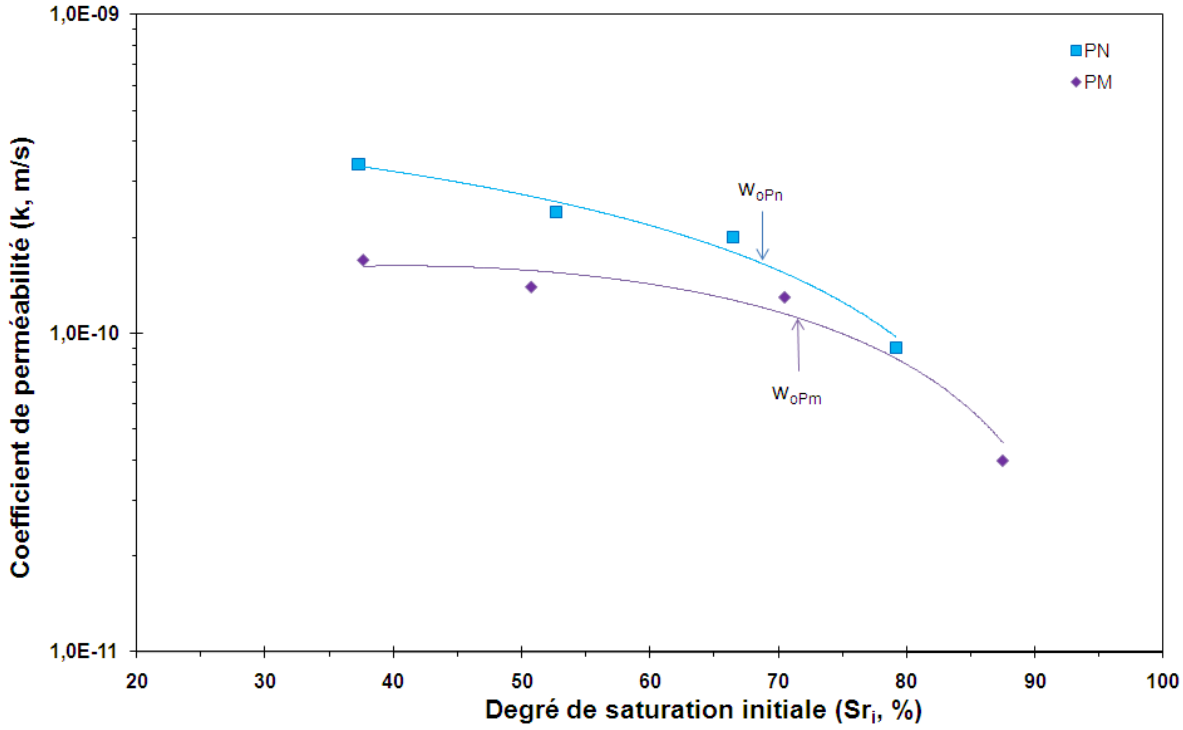

Figure 2. Relation entre la perméabilité et le degré initial de saturation des éprouvettes compactées aux énergies Proctor normal et modifié

3.3. Commentaires

Les caractéristiques de compactage aux deux énergies standards rejoignent celles citées (Abichou et al., 2000), à savoir une teneur en eau à l'optimum pour l'énergie du Proctor normal appartenant à la fourchette comprise entre 9,6 % et 15,5 % pour le Proctor normal et comprise entre 8 % et 11,6 % pour le Proctor modifié, alors que les poids volumique sec maximal se rangent respectivement entre 16,5 et 18,4 kN/m^3 et entre 18,5 et 19,3 % kN/m^3. Les coefficients de perméabilité obtenus, soulignent la même tendance, à savoir un potentiel d'étanchéité des sables de fonderie inférieur à 1 x 10^{-9} m/s (pour des valeurs de gradient hydraulique comparables à ceux utilisés) et au delà, confirment une concentration en bentonite supérieure à 6 % de l'échantillon des sables de fonderie Sf. Cette concentration a été estimée indirectement à partir des valeurs de rétention au bleu de méthylène de chacune des bentonites utilisées pour le mélange en fonderie. Ces valeurs de rétention sont égales à 380 mg/g et 350 mg/g respectivement pour la BENTONIL S V et la GREENBOND 453 G. La concentration qui en est déduite est égale à 7,5 % pour une concentration initiale du mélange égale à environ 8 %.

Le principal constat qui se dégage de cette étude et des études précédentes peut se résumer en affirmant que le potentiel d'étanchéité des sables de fonderie est suffisant en l'état pour constituer des barrières étanches ouvragées. En effet, dès lors que la concentration en bentonite est adéquate, ces géomatériaux peuvent se prêter pour ce type d'application. A propos de concentration, un seuil est avancé, il est égal à au moins 6 %. L'influence de la teneur en eau de compactage et de son

énergie n'est pas déterminante comme elle peut l'être pour des matériaux fins plus franchement argileux et plastiques. Toutefois, ce constat vis à vis de l'influence des teneurs en eau et des énergies de compactage peut être nuancé, car quelle que soit l'énergie employée, lorsque 70 % du degré de saturation initiale des éprouvettes est dépassé (figure 2), l'amélioration des performances hydrauliques devient sensible (un facteur 2 et 3 est constaté respectivement entre PN11%/PN13% et PM10%/PM12%). De ce point de vue, le comportement des sables de fonderie s'apparente à celui des sols fins. Cette dernière observation révèle son importance au regard des faibles teneurs en eau initiales de ces sables, en tout cas très éloignées de celles définies à l'optimum des Proctor standards (à réception, le géomatériau possède un état hydrique très sec).

Enfin, ces résultats sont en accord avec ceux obtenus à partir de géomatériaux similaires, si bien, que du point de vue de leur potentiel d'étanchéité, les sables de fonderie s'apparentent à des mélanges classiques de sable-bentonite. En effet, le retour d'expérience en matière de réalisation de barrières ouvragées étanches à partir de matériaux grenus (de classe géotechnique B_2) souligne qu'il est envisageable de réaliser de tels ouvrages, moyennant certaines précautions tant au stade de l'étude géotechnique en laboratoire qu'au stade de la mise en œuvre sur site. Par exemple, il sera préférable de travailler à l'énergie du Proctor modifié à l'aide d'une forte concentration en bentonite (au moins supérieure ou égale à 6 %). De même, l'influence de la teneur en eau de compactage devra être évaluée vis à vis du potentiel d'étanchéité de ces mélanges.

3.4. Perspectives et recommandations

Au préalable et avant toute généralisation du procédé de mise en œuvre à l'échelle d'un projet, il est particulièrement recommandé de réaliser sur site des planches d'essais permettant de faire varier (un à un ces paramètres de base) pour les engins de compactage disponibles :

1. L'épaisseur des couches élémentaires (0,25 m ou 0,33 m)
2. Le nombre de passes des engins de compactage et leur type
3. La teneur en eau initiale de compactage du géomatériau

Ces planches devront-être instrumentées par des essais de perméabilité, de façon à valider la faisabilité du (des) scénario(s) retenu(s). Lors de la mise en œuvre des différentes couches élémentaires, un contrôle classique au gamma-densimètre (au droit d'une même station, nous recommandons la mesure à plusieurs profondeurs) de la teneur en eau et de la densité du matériau compacté peut être opéré. A ces opérations de contrôle peuvent s'ajouter des prélèvements destinés au laboratoire en vue d'essais au bleu de méthylène et de la conductivité électrique des mélanges sable-bentonite (Abu-Hassanein, 1996). Enfin, une (ou des) planche(s) d'essai(s) pourront être instrumentées pour y effectuer des mesures de la perméabilité sur le plus long terme.

Les essais de perméabilité sur site (Cazaux, 1998) visent à contrôler les performances hydrauliques de la barrière reconstituée. Ils seront engagés aussi bien en infiltrométrie verticale de surface (NF X 30-420) qu'en forage court (NF X 30-424). L'homogénéité des performances pourra également être démontrée en couplant au préalable aux essais de perméabilité une campagne géophysique de détection des principaux contrastes de résistivité (Ait Saadi, 2003).

4. Conclusion

La qualification du géomatériau Sf en vue de son utilisation en barrière étanche ouvragée a nécessité la réalisation de huit (8) essais de perméabilité (quatre (4) essais par énergie de compactage standard, à des teneurs en eau situées en majorité à gauche de l'optimum défini pour chaque énergie). Les huit (8) coefficients de perméabilité déterminés à partir de chacun des couples « humidité-densité » des éprouvettes compactées aux deux énergies standards sont inférieurs à 1 x 10^{-9} m/s et sont compris entre 3,4 x 10^{-10} m/s (PN7%) pour la plus forte valeur et 5 x 10^{-11} m/s (PM12%) pour la plus faible. Ces résultats sont cohérents avec ceux de la littérature et les constats qui en découlent, vont également dans le même sens que ceux formulés, à savoir, que ce géomatériau sans pour autant être un sol fin (comme une argile franche plastique) possède des caractéristiques qui s'en rapprochent, c'est-à-dire une certaine sensibilité de la teneur en eau de compactage et de son énergie du point de vue de l'obtention de ses performances hydrauliques. Toutefois, la concentration en bentonite demeure le facteur prépondérant qui règle le potentiel d'étanchéité de ce géomatériau.

5. Remerciements

Les auteurs remercient les entreprises Fiday Gestion (Chassey les Scey, 70) et BentoFrance (Portes les Valence, 26) pour leur contribution à ce programme d'étude.

6. Références bibliographiques

Abichou T., & Al,. (2000) « Foundry green sands as hydraulic barriers : Laboratory study ». Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol. 126, No. 12,December 2000, pp., 1174-1183.

Abu-Hassanein Z.S., Benson C.H., Wang X., Blotz L.R. (1996) Determining Bentonite Content in Soil-Bentonite Mixtures Using Electrical Conductivity. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 19, No. 1, March 1996, pp. 51-57.

Ait Saadi L. (2003) Méthodologie de contrôle de l'homogénéité et de la perméabilité des barrières argileuses ». Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 302 p

Calvacante Rocha J. (1994) Définition des conditions optimale de traitement en place d'un sol perméable en vue de son imperméabilisation. Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 202 p.

Cazaux D. (1998) Mesure et contrôle in situ de la perméabilité des matériaux utilisés dans les dispositifs d'étanchéité pour la protection de l'environnement – Etat de l'Art. Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 338 p.

Couradin A, Razakamanantsoa A.R., Djeran-maigre I., Didier G. (2008) Etude comparative des performances hydrauliques d'adjuvants argileux en traitement de sols. JNGG'08, Nantes, 18-20 juin 2008, 53-60.

Gleason M.H., Daniel D.E., Eykholt G.R. (1997) Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No. 5, May 1997, pp. 438-445.

JORF (2006) Arrêté du 19 janvier 2006 modifiant l'arrêté du 9 septembre 1997 relatif aux installations de stockage de déchets ménagers et assimilés. Journal Officiel de la République Française du 16 mars 2006.

Komine H. (2004) Simplified evaluation on hydraulic conductivities of sand-bentonite mixture backfill, Applied Clay Science, Volume 26, Issues 1-4, August 2004, pp. 13-19.