

MISE EN EVIDENCE DE L'EVOLUTION DE LA PERMEABILITE D'UN GSB PAR SONDAGES ELECTRIQUES

INCREASE OF GEOSYNTHETIC CLAY LINER'S HYDRAULIC CONDUCTIVITY DETECTED THANKS TO VERTICAL ELECTRICAL SOUNDINGS

Colette SIRIEIX¹, Fanny GENELLE², Joëlle RISS¹, Nathalie TOUZE-FOLTZ³, Stéphane RENIE⁴, Philippe BEGASSAT⁵, Camille BARRAL³

¹Univ. Bordeaux, I2M, UMR5295, Talence, France

²INNOGEO, Le Bourget du Lac, France

³IRSTEA, HBAN, Antony, France

⁴HYDRO INVEST, Angoulême, France

⁵ADEME, Angers, France

RÉSUMÉ – Des sondages électriques verticaux extraits de tomographies de résistivité électrique réalisées sur une couverture expérimentale contenant un GéoSynthétique Bentonitique (GSB) pendant près de trois ans mettent en évidence une évolution de son comportement électrique. L'évolution de la résistivité, liée à un changement de la perméabilité s'accompagne d'une modification des propriétés intrinsèques du GSB.

ABSTRACT – A set of vertical electrical soundings was extracted from the ERT surveys to monitor the temporal evolution of the Geosynthetic Clay Liner (GCL) bulk electrical resistivity. An evolution of the GCL's electrical behaviour occurred over time. It is linked with changes in the proportion of sodium and calcium cations which involve an increase of its hydraulic conductivity (measured on samples three years after its installation).

1. Introduction

En France, le suivi des Installations de Stockage de Déchets Dangereux (ISDD) est obligatoire après leur fermeture (Journal Officiel de la République Française, 1993). Il consiste notamment à collecter et traiter le biogaz et les lixiviats, produits de la percolation des eaux de pluie à travers les déchets. Sur ces sites, l'infiltration de la pluie, créatrice de lixiviats, est limitée par la mise en place d'une couverture imperméable située au-dessus des déchets. L'étanchéité de cette couverture est en partie assurée par une géomembrane ou un GéoSynthétique Bentonitique (GSB). Or, de nombreux phénomènes peuvent affecter l'intégrité du GSB au cours du temps comme, par exemple, l'échange cationique (Egloffstein, 2001), la présence de racines (Cazzuffi *et al.*, 2005), la dessiccation/humidification (Bouazza *et al.*, 2007) etc. Ces phénomènes, entraînant une baisse des performances du matériau de couverture au cours du temps, ont été mis en évidence par différents auteurs (Meer et Benson, 2007; Benson et Meer, 2009; Touze-Foltz *et al.*, 2013). Par ailleurs, la présence éventuelle de défauts datant de la mise en place du GSB (Touze-Foltz, 2001; CFG, 2011) ainsi qu'une augmentation générale de la perméabilité de la couverture au cours du temps peuvent être à l'origine d'une augmentation de la quantité de lixiviats. Le traitement de ces derniers étant coûteux, il est utile de pouvoir évaluer les performances *in situ* d'un GSB.

Pouvoir évaluer les performances d'un GSB *in situ* de façon simple et non onéreuse : tel est l'enjeu de l'étude proposée ci-dessous. A cette fin, l'objectif poursuivi est de montrer que cela est possible au moyen de sondages électriques verticaux (SEV)

inversés au moyen d'une méthode d'optimisation globale (PSO) et de données a priori (géométrie et résistivité).

Après une présentation du site et des mesures de tomographie de résistivité électrique (TRE) qui y ont été réalisées, on explique comment, à partir de sondages électriques verticaux (SEV) extraits de ces tomographies, on a pu mettre en évidence l'évolution des performances du GSB et conforter les résultats obtenus par mesure des teneurs en cations Ca^{++} et Na^{+} , de l'indice de gonflement et de la conductivité hydraulique d'échantillons de GSB.

2. Site d'étude

Une couverture expérimentale de type imperméable a été installée en septembre 2009 sur la commune de Champniers en Charente. Cette couverture est constituée, de bas en haut, de 1 m de matériau argilo-graveleux, un GSB de 6 mm d'épaisseur (Bentomat®AS3700), 0,30 m de graviers, un géotextile de séparation et 0,15 m de terre végétale (figure 1). Le GSB est constitué d'un assemblage de deux géotextiles séparés par de la bentonite calcique activée. Il est caractérisé par une très faible perméabilité, inférieure à $5.10^{-11} \text{ m.s}^{-1}$ à l'état initial d'après la fiche technique du produit.

Trois lés de GSB d'une longueur de 13 m ont été nécessaires pour recouvrir l'ensemble de la parcelle, la largeur d'un rouleau étant de 5 m. Le GSB a été placé de façon à dépasser de 1 m les limites de la zone excavée pour la création de la couverture (figure 1). Les recouvrements des lés de GSB sont d'une largeur de l'ordre de 0,5 m, avec ajout de bentonite en poudre sur une dizaine de centimètres à leur interface, conformément aux recommandations du CFG (2011).

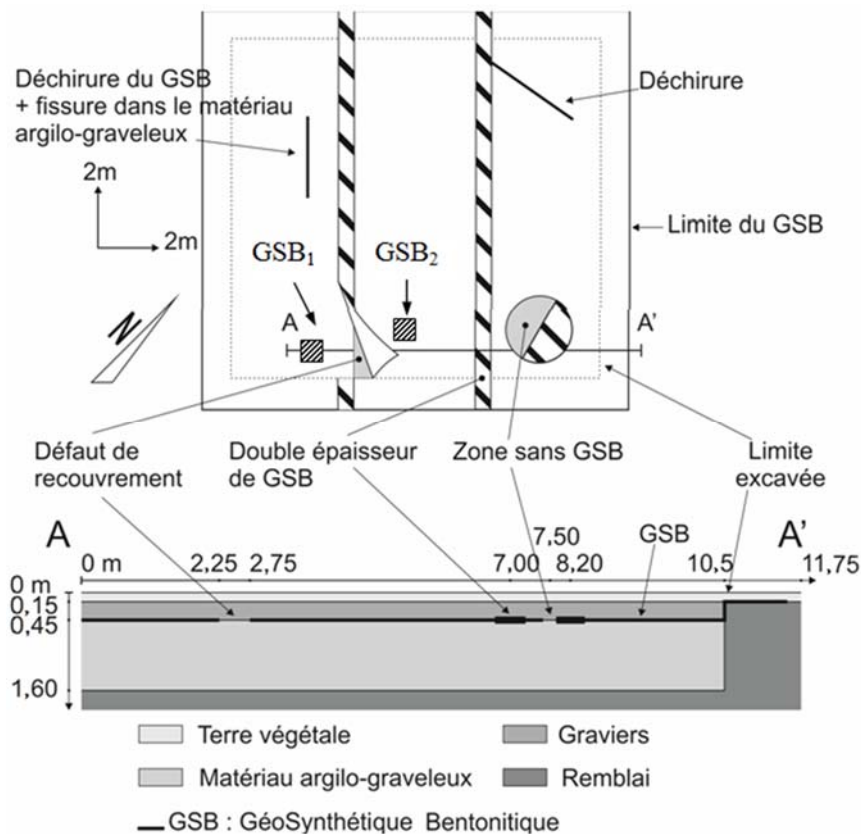


Figure 1. Emplacement des défauts au sein de la couverture expérimentale : vue de dessus et coupe verticale le long du profil de tomographie de résistivité électrique AA'.

Plusieurs défauts ont été créés au sein du GSB et simulent essentiellement des malfaçons pouvant apparaître lors de la pose du GSB sur sites réels (figure 1). L'un d'entre eux associe une déchirure du GSB sur une longueur de 2,5 m à une fissure de 0,04 m de large traversant toute l'épaisseur du matériau argilo-graveleux. Un arrachage semi-circulaire de un mètre de rayon a également été réalisé. Ce défaut peut représenter l'effet d'un coup de godet donné par un engin de chantier sur une ISD; le matériau argilo-graveleux est donc directement en contact avec la couche de graviers sus-jacente à l'endroit de ce défaut. Il est également juxtaposé à une double épaisseur de GSB correspondant à la partie découpée. Enfin, un défaut de recouvrement de deux des lés de GSB a été réalisé sur une largeur de 0,4 m et une longueur de 2 m.

3. Mesures de tomographie de résistivité électrique

Des mesures de tomographie de résistivité électrique ont été effectuées le long du profil AA' qui recoupe le défaut de recouvrement et l'arrachage volontairement créés au niveau du GSB (figure 1). Elles ont été réalisées pendant près de trois ans, dans des conditions météorologiques variables. Ces données météorologiques (pluviométrie, température, etc.) ont été enregistrées grâce à une station météorologique installée à proximité immédiate de la couverture expérimentale (Genelle, 2012). Chaque mesure de TRE a été réalisée à l'aide de quarante-huit électrodes espacées de 0,25 m selon le dispositif dipôle-dipôle. Les données de résistivité électrique ont été traitées au moyen du logiciel RES2DINV© par une inversion robuste (norme L1) associée à un affinage du maillage du modèle.

De l'ensemble des tomographies réalisées (Genelle, 2012), on rapporte les résultats essentiels obtenus au moyen du dispositif dipôle-dipôle (Genelle, 2012 ; Sirieix, 2013) :

- un premier horizon conducteur peu épais est bien caractérisé : il correspond à la terre végétale,
- un deuxième horizon très résistant dont l'épaisseur change au cours du temps est attribué au GSB ; il s'avère très épais en 2010 (figure 2) et devient moins épais à partir de 2011 ce qui permet de le distinguer du niveau argileux sous-jacent. La surestimation de son épaisseur s'explique par le principe d'équivalence (Maillet, 1947).
- le niveau de gravier se distingue mal de la terre végétale et du GSB en raison du principe de suppression (sa résistivité est intermédiaire entre celles de la terre végétale et du GSB)
- un troisième horizon conducteur associé au matériau argilo-sableux situé en dessous du GSB devient visible essentiellement à partir de juillet 2011.
- les défauts n'ont été détectables qu'après le mois de juillet 2011, après que la résistivité du deuxième horizon ait diminué, soit vingt-deux mois après la pose du GSB.

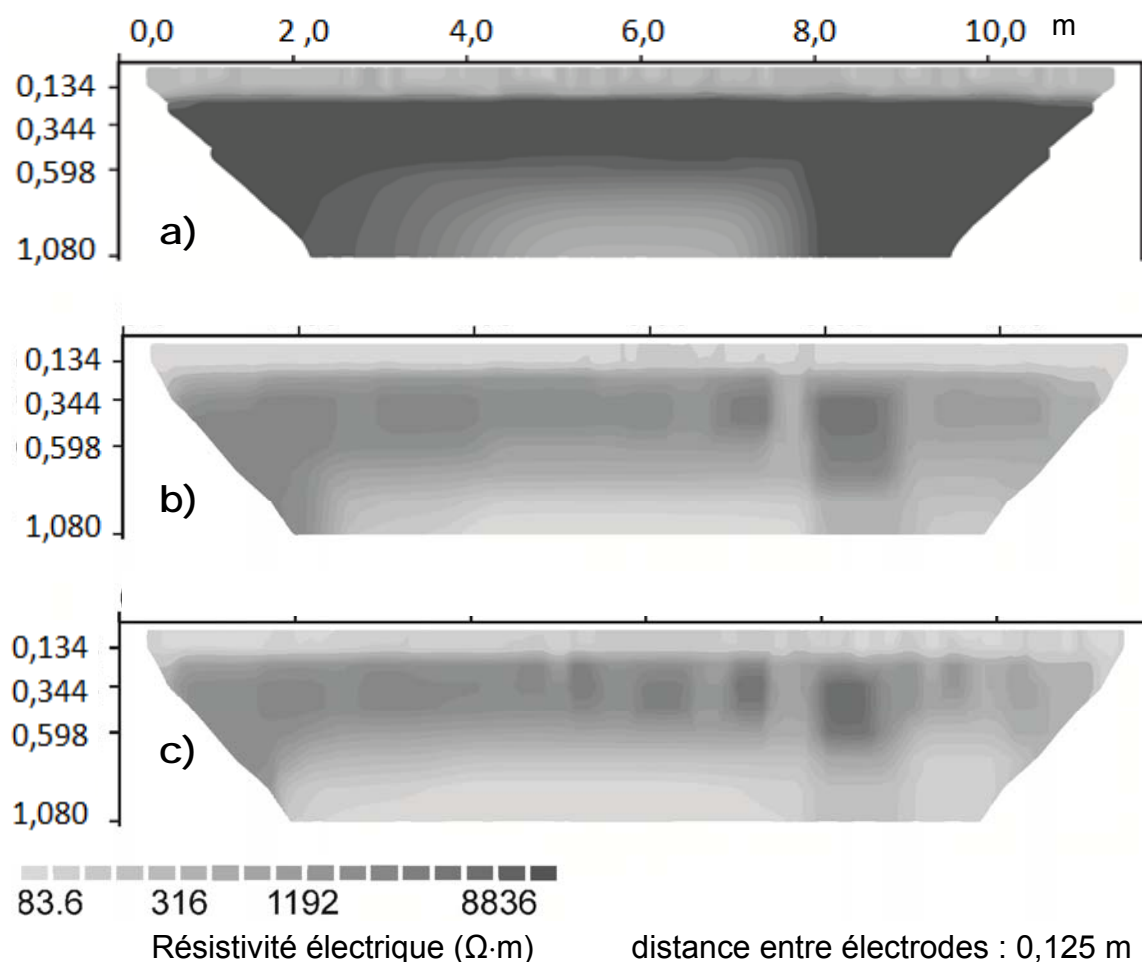
Trois de ces modèles issus de Genelle (2012) sont montrés figure 2.

Il apparaît donc que la seule observation des modèles de résistivité ne permet pas de modéliser le GSB et que celui-ci se manifeste par une surestimation de l'épaisseur et une sous-estimation de la résistivité (deuxième et troisième colonne du tableau 1). Cependant, par application du principe d'équivalence et en supposant une épaisseur de 0,6 m pour le GSB, la résistivité du seul GSB a pu être estimée (quatrième colonne du tableau 1) ; les estimations ont été faites à partir des résistivités électriques extraites des modèles de TRE en se plaçant à 4 m de l'extrémité gauche du début du profil AA' et suffisamment loin des défauts pour qu'ils n'aient aucune influence (figure 1). Celles-ci évoluent de $4,6 \cdot 10^5 \Omega \cdot m$ au mois de février 2010 à $1,2 \cdot 10^5 \Omega \cdot m$ au mois de mai 2012 en passant par $15,2 \cdot 10^5 \Omega \cdot m$ pour le mois de septembre 2010 après un été chaud et sec.

Globalement, les résistivités ont diminué avec le temps ce que l'on a cherché à vérifier et préciser au moyen de données 1D (assimilables à un SEV) dont les inversions ont été réalisées par une méthode d'optimisation globale (ici, les essais particuliers PSO).

Tableau 1. Résistivités électriques du GSB estimée à partir des différentes méthodes

Date des mesures	Estimées à partir des modèles inversés TRE		Calculées pour une épaisseur de 6 mm)	Médianes des distributions obtenues par PSO
	ρ_{GSB} ($\Omega \cdot m$)	Epaisseur (m)	ρ_{GSB} ($\Omega \cdot m$) à partir des TRE	ρ_{GSB} ($\Omega \cdot m$)
4 février 2010	$5,5 \times 10^3$	0,50	$4,58 \times 10^5$	3×10^5
28 septembre 2010	$13,0 \times 10^3$	0,70	$15,20 \times 10^5$	10×10^5
20 mai 2011	$6,0 \times 10^3$	0,40	4×10^5	$3,5 \times 10^5$
22 juillet 2011	$2,3 \times 10^3$	0,30	$1,15 \times 10^5$	$0,4 \times 10^5$
29 juillet 2011	$1,3 \times 10^3$	0,60	$1,30 \times 10^5$	$0,4 \times 10^5$
30 janvier 2012	$1,9 \times 10^3$	0,45	$1,43 \times 10^5$	$0,9 \times 10^5$
10 mai 2012	$2,4 \times 10^3$	0,30	$1,20 \times 10^5$	$0,52 \times 10^5$



4. Inversion des SEV

4.1. La méthode d'optimisation globale : les essais particuliers

On a appliqué une telle méthode au moyen du logiciel VESLAB développé par Fernández Martínez *et al.* (2010) ; ce logiciel permet d'inverser des SEV de type Schlumberger au moyen d'une méthode d'optimisation fondée sur des algorithmes globaux (ici les essais particuliers, en anglais PSO pour Particle Swarm Optimisation. Avec cette méthode, on obtient, non pas un unique modèle par SEV mais une distribution statistique des paramètres des modèles (distributions des épaisseurs et des résistivités réelles des terrains) conditionnellement aux données des SEV.

Afin d'appliquer cette méthode à des SEV de type Schlumberger dont nous ne disposons pas, nous avons transformé au moyen de la méthode de Patella (1974) les données issues des tomographies de résistivité électrique de type dipôle-dipôle (Sirieux *et al.*, 2013 ; Sirieux *et al.*, 2015) en données compatibles. L'application de la méthode a consisté à explorer l'espace dit des modèles (tableau 2 ; espace à 2N-1 dimensions : N pour les résistivités et N-1 pour les épaisseurs) à la recherche des meilleurs modèles. L'intérêt de cette méthode consiste en l'obtention d'un ensemble de modèles satisfaisant un seuil fixé a priori et, à ne pas dépasser pour la fonction coût ; modèles desquels découlent des distributions statistiques des paramètres résistivité et épaisseur des N terrains. Le seuil choisi, pour cette étude, a été 10%. La fonction coût mesure l'écart entre le modèle trouvé et les données expérimentales selon l'équation 1.

$$\frac{\sum_{i=1}^p (d_i^* \text{ modèle} - d_i \text{ mesuré})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^p d_i^2 \text{ mesuré}}} \quad (1)$$

où d_i et d_i^* représentent respectivement la $i^{\text{ème}}$ résistivité apparente mesurée et celle issue du modèle.

4.2. Résultats

On montre figure 3 les distributions des valeurs de résistivité obtenues en explorant l'espace des modèles tel que défini au tableau 2 au moyen de l'algorithme PSO. Les distributions se répartissent selon trois groupes :

- le groupe des distributions situées à gauche sur la figure 3 montre les résistivités les plus faibles entre $4 \cdot 10^4$ et $9 \cdot 10^4 \Omega \cdot m$ pour les dates des mois de juillet 2011, janvier et mai 2012.
- le groupe intermédiaire (février 2010 et mai 2011).
- le groupe qui se réduit à une seule distribution (septembre 2010) montre des résistivités très nettement plus élevées que les précédentes.

Cette méthode a permis d'estimer la résistivité très élevée du GSB (tableau 1, dernière colonne).

Une première conclusion s'impose, l'usage de SEV est approprié à l'estimation de la résistivité du GSB dont on rappelle qu'il constitue un niveau de très haute résistivité et très peu épais situé entre deux niveaux conducteurs. Il l'est, si les inversions sont conduites au moyen d'une méthode d'optimisation globale. La deuxième conclusion concerne l'évolution de la résistivité du GSB au cours du temps qui est passée de 3×10^5 (février 2010) voire plus en conditions très chaudes et sèches (septembre 2010) quelques mois après sa mise en service (septembre 2009) à $0,4 \times 10^5 \Omega \cdot m$ après 22 mois de service (juillet 2011). Il restait à déterminer l'origine de cette baisse de résistivité.

Tableau 2. Espace des modèles pour la couverture expérimentale

	Résistivité* ($\Omega \cdot m$)	Epaisseur (m)
Terre végétale	20 – 400	0,10 – 0,20
Graviers	500 – $4500 \cdot 10^3$	0,23 – 0,35
GSB	$5 \cdot 10^3$ – $1 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^{-3}$ – $7 \cdot 10^{-3}$
Matériau argilo-graveleux	10 – 100	

*pour le SEV du 28/09/2010 : [20 – 400 ; 500 – $4500 \cdot 10^3$; $5 \cdot 10^3$ – $2 \cdot 10^6$; 10–100]

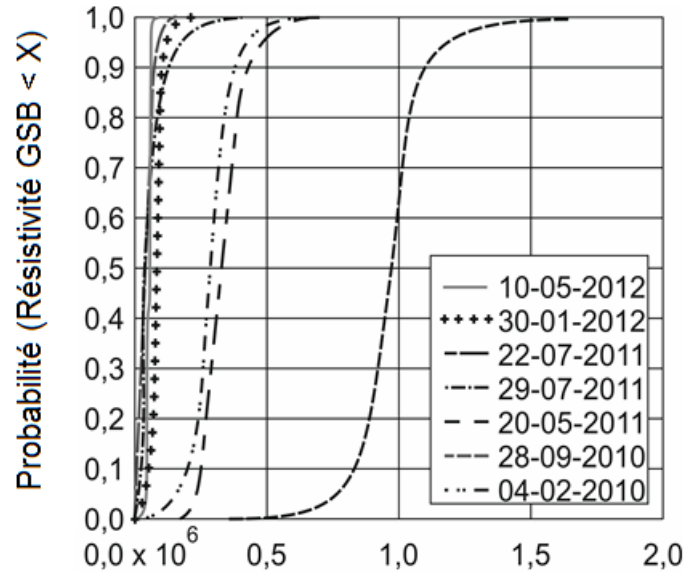


Figure 3. Distribution des valeurs des résistivités électriques ($\Omega \cdot m$ en abscisses) du GSB obtenues par la méthode des essais particuliers (fréquences cumulées en ordonnées).

5. Propriétés intrinsèques du GSB

Afin de comprendre l'origine de la baisse de la résistivité du GSB au cours du temps, des mesures de la teneur en cations interfoliaires Na^+ et Ca^{2+} , de l'indice de gonflement et de la conductivité hydraulique ont été réalisées sur des échantillons en provenance du site. Deux échantillons de GSB (de dimensions 0,39 m par 0,54 m) ont été prélevés le lendemain de la mesure du mois de mai 2012, respectivement à une distance de 0,8 et 4 m du début du profil AA'. L'échantillon noté GSB₁ a été prélevé directement au droit du profil et celui noté GSB₂ l'a été à proximité (figure 1). Ils ont été conservés sur un support rigide et conditionnés dans des sacs plastiques pour éviter toute modification postérieure au prélèvement. Sur chaque échantillon, un morceau de 0,25 m de diamètre a été prélevé pour les essais à l'oedoperméamètre et la détermination de la conductivité hydraulique (norme AFNOR NF P 84-705 (2008)). De la bentonite a ensuite été prélevée sur le reste des échantillons qui, après séchage à 50°C, sert à la réalisation d'essais de capacité de gonflement et de détermination des cations interfoliaires (normes AFNOR XP P 84-703 (2002) et NF X 31-130 (1999)). De plus, à fin de comparaison, les mêmes analyses ont été conduites sur un échantillon de GSB intact, GSB₀, conservé sous une protection à l'extérieur pendant plusieurs mois.

Les analyses mettent en évidence un changement dans les proportions d'ions sodium et calcium par rapport à l'échantillon de GSB₀ vierge (tableau 3). S'agissant de bentonite calcique activée, les ions sodium, présents initialement à près de 80 %, ont été presque totalement remplacés par des ions calcium. Cela explique une baisse de l'indice de gonflement (divisé par deux) et l'augmentation significative de la conductivité hydraulique de quatre ordres de grandeur, bien supérieure à celle du produit vierge.

Tableau 3. Propriétés intrinsèques des échantillons de GSB

	GSB ₁	GSB ₂	GSB ₀
Na ⁺ (%)	4,2	5,3	78,7
Ca ²⁺ (%)	81,5	81,1	13,7
Indice de gonflement (mL/2g)	<10	<10	23
Conductivité hydraulique (m/s)	4,8·10 ⁻⁶	1,3·10 ⁻⁶	2,2·10 ⁻¹⁰

6. Conclusions

Au cours de cette étude, il a été possible de mettre en évidence l'évolution du GSB au cours du temps. Par ailleurs, on a montré que des SEV inversés avec la méthode PSO permettaient de suivre cette évolution ; évolution qui a été confirmée par des mesures d'échanges cationiques, de capacité de gonflement et de la conductivité hydraulique sur échantillon. L'augmentation de la perméabilité du GSB situé à 0,45 m de profondeur a pu être rapide en raison de la faible épaisseur des terrains sus-jacents favorisant l'effet des cycles de dessiccation/humidification. Des résultats similaires ont été obtenus avec une épaisseur de confinement du GSB de 0,5 m (Touze-Foltz *et al.*, 2013). A noter que le Comité Français des Géosynthétiques (CFG) préconise une épaisseur minimale de recouvrement de 1 m. D'un point de vue pratique, des SEV de petite taille (petite valeur maximale de AB/2), rapides de mise en œuvre accompagnés d'une inversion par la méthode décrite dans l'article permettraient une surveillance efficace de l'état de la couverture d'une ISD comprenant un GSB.

5. Références bibliographiques

- AFNOR. (1999). NF X 31-130. Qualité des sols – méthodes chimiques – détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) et des cations extractibles. Association Française de Normalisation (AFNOR), Paris, France.
- AFNOR. (2002). NF XP P 84-703. Géosynthétiques bentonitiques – détermination de la capacité de gonflement des géosynthétiques bentonitiques. Association Française de Normalisation (AFNOR), Paris, France.
- AFNOR. (2008). NF P 84-705. Géosynthétiques bentonitiques. Détermination à l'oedoperméamètre des caractéristiques de gonflement, flux et perméabilité des géosynthétiques bentonitiques (GSB). Essai de caractérisation et essai de performance. Association Française de Normalisation (AFNOR), Paris, France.
- Benson C.H., Meer S.R. (2009). Relative abundance of monovalent and divalent cations and the impact of desiccation on geosynthetic clay liners. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 135 n°3, pp. 349-358.
- Bouazza A., Jefferis S., Vangpaisal T. (2007). Investigation of the effects and degree of calcium exchange on the Atterberg limits and swelling of geosynthetic clay liners when subjected to wet-dry cycles. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 25, pp.170-185.

- Cazzuffi D., Crippa E., Villa C. (2005). Laboratory tests and field observations on a geosynthetic clay liner (GCL) system installed as capping since seven years. *International Workshop "Hydro-Physico-Mechanics of Landfills"*, Grenoble. 7 pp.
- Comité Français des Géosynthétiques. (2011). Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques bentonitiques en installations de stockage de déchets. *Fascicule n°13*, 85 pages.
- Egloffstein T.A. (2001). Natural bentonites influence of the ion exchange and partial desiccation on permeability and self-healing capacity of bentonites used in GCLs. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 19, pp. 427-444.
- Fernandez Martinez J.L., Garcia Gonzalo E., Fernandez Alvarez J.P., Kuzma H. A., Menendez Perez C.O. (2010). PSO: a powerful algorithm to solve geophysical inverse problems: application to a 1D-DC resistivity case. *Journal of Applied Geophysics*, vol.71, pp. 13-25.
- Fernandez Martinez J.L., Fernández Muñoz, Z., Tompkins, Michael J., (2012). On the topography of the cost functional in linear and nonlinear inverse problems. *Geophysics* 77 (W1). <http://dx.doi.org/10.1190/geo2011-0341.1>.
- Garcia Gonzalo M.E. (2011). Avances en el análisis teórico del algoritmo particle swarm optimization aplicación a la resolución de problemas inversos. <https://docs.google.com/file/d/0Bx0Jz1VlgjG5N1Itc0lIN1lwUms/edit?usp=sharing>.
- Genelle F. (2012). Les méthodes géophysiques pour la caractérisation des couvertures d'installation de stockage de déchets. Thèse de doctorat université Bordeaux 1. 366 pages. <http://www.theses.fr/16370595X>
- La République Française. (1993). Arrêté du 18 décembre 1992 relatif au stockage de certains déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés pour les installations existantes. *Journal Officiel de la République Française*, 30 mars.
- Maillet R. (1947). The fundamental equations of electrical prospecting. *Geophysics* 12, 529-556
- Meer S.R., Benson C.H. (2007). Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners exhumed from landfill final covers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.133, pp. 550-563.
- Patella D. (1974). On the transformation of dipole to Schlumberger sounding curves, *Geophysical Prospecting*, pp. 22, 315-329.
- Scalia J., Benson C.H. (2011). Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners exhumed from landfill final covers with composite barriers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.137, pp. 1-13.
- Sirieux, C., Fernández Martínez, J.-L., Riss, J., Genelle, F. (2013). Electrical resistivity characterization and defect detection on a geosynthetic clay liner (GCL) on an experimental site. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 90, pp. 19-26.
- Sirieux C., Genelle F., Barral C., Touze-Foltz N., Riss J., Bégassat P. (2015). Characterizing the ageing of a geosynthetic clay liner through electrical resistivity. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 52.
- Touze-Foltz N. (2001). Modélisation des transferts advectifs dans les étanchéités composites de centres de stockage de déchets. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 286 pages.
- Touze-Foltz N., Bloquet C., Barral C., Oberti O., Chappe J. (2013). Performances d'un GSB dans une couverture d'installation de stockage de déchets après six ans en service. *Rencontres géosynthétiques*, pp. 339-348.