

Performance des géosynthétiques bentonitiques en couverture d'installations de stockage de déchets : état des connaissances et proposition de méthodologie

Helmut Zanzinger^a et Nathalie Touze-Foltz^b

La performance à long terme des géosynthétiques bentonitiques (GSB) dans les couvertures d'installations de stockage de déchets (ISD) est directement liée au comportement hydraulique de l'élément assurant l'étanchéité dans un GSB, à savoir la bentonite. Dans la couverture, le GSB est non saturé. Par conséquent, la bentonite tend à se dessécher avec le temps, en particulier pendant les périodes sèches de l'année où l'évapotranspiration est importante et les précipitations faibles. De plus, la présence de racines vivantes sur ou dans la barrière va conduire à de l'absorption d'eau qui va renforcer le processus de dessèchement.

Le comportement d'un système de couverture est complexe et dépend d'un grand nombre de facteurs parmi lesquels :

- la contrainte mécanique appliquée par le sol de couverture ;
- l'eau contenue dans la couche réservoir au-dessus du GSB ;
- la couche drainante ;
- les racines présentes dans le sol ;
- les propriétés de couches complémentaires ;
- les conditions climatiques ;
- le GSB lui-même.

Les essais de laboratoire et la modélisation numérique permettent difficilement de rendre compte du comportement de ces structures.

La performance réelle doit être étudiée par des mesures en continu sur site, sur des périodes de temps raisonnables ou par l'intermédiaire d'excavations de GSB après un certain nombre d'années en service. La première partie de cet article est consacrée à une brève présentation d'un certain nombre de résultats d'essais réalisés *in situ* et d'excavations, issus de la littérature. Cette synthèse met en particulier en évidence le manque de données cohérentes d'une étude à l'autre qui conduit à l'impossibilité de donner des conclusions générales pour l'utilisation des GSB en couverture d'ISD. La deuxième partie liste un certain nombre de recommandations pour les prélèvements de GSB *in situ*. Enfin, la dernière partie est dédiée à la présentation de résultats obtenus lors d'excavations récentes en suivant au maximum les préconisations proposées.

Synthèse des résultats précédemment obtenus pour l'utilisation des GSB en couverture

Des essais *in situ* ainsi que des prélèvements ont été réalisés par le passé pour évaluer la performance des GSB dans les couvertures d'ISD. Les prélèvements apportent des informations sur le GSB à l'instant. Les essais *in situ* et en lysimètres donnent des informations sur la performance du système en collectant et en enregistrant en continu les données des bilans hydriques au cours du temps pour évaluer l'efficacité des GSB. Des éléments ont été apportés par différentes études

Les contacts

a. SKZ – TeConA GmbH,
Friedrich-Bergius-Ring
22, D-97076 Würzburg,
Allemagne.

b. Cemagref, UR HBAN,
Hydrologie et bioprocédés,
Parc de Tourvoie,
BP 44, 92163 Antony
Cedex.

relativement à l'influence des racines, de l'échange cationique et de la dessiccation, de la composition de la couverture et de son épaisseur, des conditions climatiques, et des caractéristiques des GSB. Ces différents points sont discutés dans la suite.

Influence des racines

Les racines peuvent avoir deux effets sur la performance d'un GSB en couverture. Tout d'abord, les racines peuvent induire une déshydratation des barrières minérales (Mansour, 2001 ; Melchior, 2002). Les racines qui atteignent la couche réservoir vont absorber de l'eau directement dans la barrière minérale, quelle que soit l'épaisseur de celle-ci. Ce phénomène peut renforcer la déshydratation du GSB en plus des gradients thermiques existants dans une couverture. De plus, les racines peuvent avoir une influence sur le flux à travers les GSB. En effet, si une racine pénètre à travers un GSB, tant qu'elle est vivante, la conductivité hydraulique du matériau peut ne pas s'en trouver affectée, voire être améliorée (Cazzuffi et Crippa, 2004). Dans une étape ultérieure, si la racine meurt, une fuite peut se produire par la racine elle-même et le flux sera augmenté localement.

Le choix de la végétation et son entretien doivent être pris en compte pour le dimensionnement de la couche de confinement, de même que l'épaisseur de cette couche doit être adaptée à la végétation. La végétation recommandée est de type prairiale, car les arbres et les arbustes sont problématiques de par la profondeur racinaire et pourraient nécessiter des épaisseurs de couche de confinement de 3 m. La végétation prairiale entretenue permet de limiter la pénétration racinaire (Ramke, 2003), mais si la couche de confinement est trop sèche, les racines iront plus profondément pour prélever de l'eau dans les couches inférieures.

Échange cationique et dessiccation

Les origines de la dessiccation des couches minérales sont la remontée capillaire de l'eau de la barrière vers la couche réservoir située juste au-dessus, ainsi que le transport convectif sous forme vapeur dans la couche drainante. L'utilisation des GSB dans les couvertures est problématique s'ils ne sont pas correctement protégés (Melchior, 2002 ; Benson *et al.*, 2007). Lorsque la dessiccation et l'échange cationique se produisent après une courte période de temps, on peut s'attendre à ce que des dommages irréversibles surviennent dans le GSB. En effet, comme l'ont montré Sporer

et Gartung (2002a), la conversion des bentonites sodiques en bentonites calciques se produit en quelques années pour de nombreuses conditions. À partir de valeurs obtenues sur douze excavations, principalement dans des couvertures, Egloffstein (2001) a montré que l'échange cationique se produit en un à deux ans lorsque le GSB est utilisé dans des conditions non saturées. Qui plus est, il a été établi que l'échange cationique induit une augmentation d'un facteur 10 environ de la permittivité tant que la bentonite ne présente pas de fentes de dessiccation. Lorsque des fentes de dessiccation apparaissent, l'échange cationique ne permet plus l'auto-cicatrisation de ces fentes lors des réhydratations suivantes de la bentonite. Les transferts ne peuvent pas être évités. Un simple épisode de dessiccation peut avoir des conséquences négatives très prononcées sur la capacité d'auto-cicatrisation de la bentonite devenue calcique (Sporer et Gartung, 2002b). Les observations réalisées par certains auteurs que les fentes de dessiccation dans la bentonite lors d'épisodes de sécheresse ne se referment pas après une humidification (Melchior, 2002) ne peuvent pas seulement être attribuées à l'échange cationique, mais également à un changement irréversible de structure de la bentonite. Sous certaines conditions, par exemple pour des bentonites encore sodiques (Sivakumar Babu *et al.*, 2001) ou qui ont seulement subi un échange cationique mineur, il est possible que ces fentes de dessiccation se referment. Ces conclusions mettent en évidence la nécessité de limiter la possible dessiccation de la bentonite dans les couvertures.

Structure des couvertures

Le degré de dessiccation dépend de nombreux facteurs comme la contrainte appliquée par le sol de confinement, l'eau continue dans la couche réservoir, la couche drainante, la présence de racines et les propriétés des différentes autres couches composant la couverture (Sivakumar Babu *et al.*, 2002). Par conséquent, pour élaborer un système permettant de lutter contre la dessiccation, tous les composants de la couverture, y compris la couche de forme, la couche drainante et la couche réservoir doivent être pris en compte. Les propriétés des matériaux, leur mise en place et les épaisseurs des différentes couches doivent être dimensionnées au coup par coup, pour chaque site.

COUCHE DE CONFINEMENT

L'épaisseur de la couche de confinement de l'étanchéité de surface ne doit pas être choisie

uniquement pour répondre aux recommandations minimales, mais elle doit tenir compte des contraintes individuelles de chaque site (Henken-Mellies et Zanzinger, 2004 ; Henken-Mellies, 2005). Le sol doit être choisi de manière à assurer l'existence d'un climat humide stable dans les pores du sol au-dessus du GSB.

Plusieurs retours d'expérience en Allemagne (Arlst et Wolsfeld, 2004 ; Heerten, 2004 ; Heerten et Maubeuge, 1997 ; Heyer, 2000 ; Maile, 1997 ; Maile *et al.*, 1998 ; Siegmund *et al.*, 2001 ; Sporer, 2002) et par extension, pour des conditions climatiques océaniques d'Europe de l'Ouest, montrent qu'une couche de confinement d'un mètre d'épaisseur est suffisante pour protéger le GSB contre le phénomène de dessiccation. Aucune observation de dessiccation de GSB liée à l'existence de fentes de dessiccation n'a été observée sous ce type de conditions en Allemagne.

Des épaisseurs légèrement inférieures (0,8 à 0,9 m) en Amérique du Nord n'ont pas permis de maintenir une bonne performance des GSB en couverture (Meer et Benson, 2007 ; Mackey et Olsta, 2003). Ceci met en évidence le besoin d'une meilleure connaissance d'un certain nombre de paramètres afin de mieux comprendre le comportement des GSB en couverture, sous différentes conditions.

Ramke (2003) a synthétisé les pratiques en Allemagne utilisées pour protéger les couches minérales de la dessiccation dans les couvertures. Il recommande que la couche de confinement ait une épaisseur minimale de 1,5 m. Sous des conditions climatiques sèches (précipitations inférieures à 800 mm/a), une épaisseur d'une couche de confinement de 1,8 à 2 m, avec un matériau permettant de garantir un stockage d'eau tout au long de l'année dans les pores, semble adaptée. Dans les endroits où la végétation ne sera pas entretenue, il est recommandé d'augmenter encore cette épaisseur. La couche de confinement doit avoir une capacité de stockage d'eau utile aussi élevée que possible, si possible idéalement 200 mm/m. Elle doit être installée sans compactage, de manière à remplir cette fonction et à disposer d'une grande capacité de stockage d'eau. Dans la partie supérieure, de la terre végétale doit être utilisée sur 0,2 à 0,3 m. Pour des épaisseurs inférieures à 2 m, l'utilisation d'une barrière racinaire (couche granulaire dense) dans la partie inférieure de la couche de confinement est recommandée. Dans les zones très sèches, une géomembrane pourrait être utilisée. Jusqu'ici, la conception de la couche

de confinement pour assurer une performance à long terme n'est pas possible. En effet, ces pratiques sont basées sur des retours d'expérience, les systèmes sont très complexes et le climat évolutif.

COUCHE DRAINANTE

Le processus d'écoulement à travers un GSB n'est pas continu mais sporadique. Il se produit principalement pendant les épisodes de fort drainage quand on peut supposer qu'une charge hydraulique s'établit dans la couche drainante, ce qui génère un transfert à travers le GSB. La plupart du temps, la couche drainante permet de maintenir cette charge hydraulique égale à zéro et par conséquent, aucun transfert ne s'opère à travers le GSB (Henken-Mellies et Zanzinger, 2004).

Une séparation doit exister entre le GSB et la couche réservoir de manière à éviter les suctions liées aux alternances saisonnières dans le GSB. En ce qui concerne la minimisation du transfert advectif (remontée capillaire de l'eau) et le transfert convectif en phase vapeur, il faut noter les principes importants suivants (Ramke, 2003) : il faut éviter une ventilation dans la couche drainante granulaire et des matériaux granulaires fins seront à préférer à des matériaux granulaires grossiers. Un gravier fin est suffisant pour assurer dans tous les cas de figure un arrêt de la remontée capillaire de l'eau du GSB vers la couche de confinement.

Il est utile de disposer d'une couche de protection au-dessus du GSB pour limiter les effets climatiques. Celle-ci peut être une couche de sable ou même un géotextile non tissé aiguilleté épais. Ces matériaux ne génèrent pas de fentes de dessiccation. Ils ont la capacité à stocker une quantité de l'eau qui s'écoule en lien avec les précipitations et d'alimenter la couche de confinement avec cette eau. Une telle couche de protection permet également d'interrompre le flux capillaire vers le haut de la couverture.

Des géocomposites de drainage peuvent, mieux qu'une couche granulaire grossière, remplir cette fonction. Du point de vue des auteurs, la meilleure configuration possible des différentes couches au-dessus du GSB serait la suivante pour assurer un bon fonctionnement sur le long terme : sable, géocomposite drainant et couche de sol avec forte capacité de stockage d'eau de grande épaisseur (couche réservoir), terre végétale.

Conditions climatiques

Les conditions climatiques moyennes et extrêmes devraient être prises en compte lors de la concep-

tion d'une couverture. Des études (Benson *et al.*, 2007 ; Mackey et Olsa, 2003 ; Meer et Benson, 2007) ont montré qu'une couche de confinement de 0,75 m en Amérique du Nord pouvait être insuffisante pour protéger les GSB. Les conditions climatiques ont donc sans aucun doute une incidence, puisque pour des installations de stockage de déchets sous un climat océanique d'Europe de l'Ouest, une épaisseur de 1 m est suffisante. Les résultats obtenus en Allemagne devraient pouvoir être transposés au nord de la France, mais sans doute pas au sud (climat méditerranéen). Pour autant, les évolutions climatiques sont difficiles à prévoir. Certaines zones vont devenir plus sèches alors que d'autres vont bénéficier de plus de précipitations que par le passé. Pour aller dans le sens de la sécurité, il serait donc judicieux de dimensionner la couverture pour des conditions plus sèches que celles actuellement rencontrées. L'adaptation des différentes couches dans la couverture selon les recommandations précédemment données est fortement recommandée, également pour pallier les conséquences des changements climatiques.

Caractéristiques des GSB

La bentonite dans les GSB peut se trouver soit sous la forme de poudre, soit sous la forme de granulés. Différentes natures de bentonite, sodique (sodique naturelle ou calcique activée) ou calcique peuvent également être rencontrées. La bentonite peut provenir de différents gisements, et être traitée de différentes façons car elle doit présenter la meilleure performance possible pour une application donnée, en l'occurrence ici, pour assurer l'étanchéité dans une couverture d'installation de stockage de déchets. La bentonite calcique ne présentant pas les mêmes performances d'étanchéité que les bentonites sodiques, sa masse par unité de surface doit environ être du double comparée à celle d'une bentonite sodique. Des performances diverses ont été observées avec des GSB comportant une faible masse par unité de surface de bentonite ($< 4 \text{ kg/m}^2$) – (Benson *et al.*, 2007 ; Melchior, 2002), parfois combinée avec une faible épaisseur du sol de couverture ($< 0,5 \text{ m}$). La masse sèche de bentonite par unité de surface est vue comme le critère de base de différenciation des GSB. Du point de vue des auteurs, la masse surfacique de bentonite sèche minimale devrait être de $4,5 \text{ kg/m}^2$ pour les bentonites sodiques et 9 kg/m^2 pour les bentonites calciques.

Recommandations pour les prélèvements futurs de GSB

Les informations pertinentes ne sont pas toujours données dans la littérature. Les données sont donc difficiles à comparer d'une excavation à une autre. Par conséquent, nous proposons la méthodologie exposée dans les paragraphes suivants avec un certain nombre d'informations à collecter. Bien sûr, cette liste exhaustive représente le cas idéal. Il est évident que pour des raisons économiques, il se peut que tous ces tests ne puissent pas être réalisés.

Description du produit

Le GSB doit être décrit en détail : description des composants géosynthétiques ; mode de liaison (aiguilletté, cousu, collé) ; type de bentonite comme sodique naturelle, calcique activée ou calcique ; forme de la bentonite, en poudre ou en granulés et provenance. Quand le GSB a-t-il été installé ? Était-il à teneur en eau naturelle ou préhydraté ? Quelles étaient ses propriétés initiales au moment de l'installation ? Donner la masse par unité de surface de la bentonite accompagnée de la teneur en eau correspondante. Donner les propriétés de la bentonite comme l'indice de gonflement, la capacité d'absorption d'eau et la perte de fluide. Demander au producteur le maximum d'informations possibles. Demander également les documents de contrôle de production et de contrôle qualité de l'entreprise s'ils sont disponibles.

Description du site

Le climat d'appartenance du site doit être défini (océanique, méditerranéen, continental). L'altitude du site doit être précisée. Est-ce une région côtière ou de montagne ? Un maximum de données climatiques doit être collecté (précipitations annuelles moyennes, précipitations mensuelles moyennes, température mensuelle moyenne). Indiquer les précipitations sur le site si elles sont quantifiées. La zone d'implantation du site est-elle ensoleillée ou ombragée comme dans une forêt ou dans une vallée ? Indiquer l'orientation de la localisation du prélèvement. Est-ce sur pente ou sur un plateau et sur quelle exposition ? Indiquer l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne. Décrire la végétation de surface. Vérifier le type de plantes, leur taille ainsi que celle du système racinaire. À quelle saison le prélèvement a-t-il été pratiqué ?

Description du sol

La tranchée peut être ouverte à l'aide d'une pelle mécanique. Les derniers 0,2 m doivent être creusés manuellement à la pelle. Une surface minimum de 1 x 1 m² du GSB doit être dégagée. Décrire la nature et le type de chacune des couches de la structure de confinement et mesurer l'épaisseur de chacune de ces couches. Prélever des échantillons non remaniés de chacune de ces couches. Mesurer la densité du sol et donner son indice de compression. Déterminer la conductivité hydraulique à l'eau. Déterminer la capacité au champ du sol. Sur des échantillons remaniés, réaliser une granulométrie du sol. Déterminer la teneur en matières organiques. Mesurer également la teneur en cations et en particulier en calcium. Vérifier également les concentrations en fer. Décrire les racines présentes dans le sol et leur profondeur maximale. Décrire également le sol support du GSB et quantifier les cations présents dans ce sol. Décrire les autres géosynthétiques éventuellement présents et prélever des échantillons. Indiquer si le géocomposite drainant présente des incrustations ferriques.

Échantillonnage du GSB

Le GSB doit être prélevé avec beaucoup de précautions. Il est interdit de marcher dessus. Au moins deux éprouvettes de 0,3 m x 0,3 m environ doivent être découpées à l'aide d'un cutter. Photographier les différentes phases du prélèvement. Numéroter les échantillons à l'aide d'un seul chiffre et une flèche dans le sens production du géosynthétique sur la face supérieure de chaque éprouvette. Indiquer si les racines sont en contact avec le GSB, voire l'ont traversé. Ces racines sont-elles vivantes ou mortes ? Après découpage, prélever les éprouvettes avec soin. Éviter de plier les éprouvettes. Indiquer à quoi ressemblent les bords de l'éprouvette. La bentonite présente-t-elle des fissures ? Présente-t-elle des modifications de couleur ? Décrire toutes les singularités. Conditionner chacune des éprouvettes dans un film plastique pour réduire au maximum le séchage des échantillons. Les stocker immédiatement dans un récipient rigide de manière à limiter tout risque d'endommagement. Les éprouvettes ne doivent plus être manipulées. Il faut s'assurer que lors de la manipulation avant le placement dans la boîte rigide et lors du transport, les éprouvettes ne soient soumises à aucune contrainte mécanique, ni à aucune température élevée. Stocker les éprouvettes dans un endroit sec et frais pour

limiter les risques de séchage. Couvrir et refermer le trou opéré dans le GSB avec une rustine de GSB selon les règles de l'art. On pourra utilement se référer à la norme NF EN ISO 13437 pour préparer les prélèvements *in situ*.

Essais de laboratoire sur GSB

Prélever des échantillons dans la première éprouvette pour effectuer les essais suivants :

- mesure du flux à l'eau et de la permittivité (NF P 84-705 ou ASTM D 5887) ;
- masse de GSB par unité de surface (NF EN 14196) ;
- masse de bentonite par unité de surface (NF EN 14196) ;
- teneur en eau de la bentonite (ISO 11465) ;
- indice de gonflement de la bentonite (XP P 84-703 ou ASTM D 5890) ;
- absorption d'eau de la bentonite (XP P 84-704) ;
- perte de liquide de la bentonite (ASTM D 5891) ;
- capacité d'échange cationique (NF X 31.130) ;
- fraction molaire des cations (sodium, calcium, potassium, magnésium) de la bentonite (NF X 31.130).

Pour les essais de mesure de flux, une charge hydraulique jusqu'à 0,3 m peut être appliquée même si en France, pour le dimensionnement hydraulique des couvertures d'ISD, on utilise en général une charge hydraulique de 0,1 m. La contrainte de confinement appliquée doit être représentative de celle utilisée *in situ*. En termes de fluide, on pourra utiliser de l'eau déminéralisée, ou l'eau du site ayant percolé à travers le sol de couverture, ou encore des solutions diluées de NaCl¹ ou CaCl₂². La découpe de l'éprouvette de GSB et sa manipulation doivent être effectuées avec le plus grand soin pour éviter toute perturbation. Seul du personnel compétent pourra être habilité à réaliser ces essais.

1. Chlorure de sodium.

2. Chlorure de calcium.

Les essais minimaux à réaliser nous semblent être la détermination de la permittivité, la teneur en eau, la masse par unité de surface, l'indice de gonflement et les teneurs en cations. Pour chacun de ces essais, il est très utile, lorsque c'est possible, de disposer des caractéristiques initiales,

en particulier en ce qui concerne les propriétés de la bentonite. La seconde éprouvette peut être utilisée pour vérifier la présence de fissures à l'aide d'imagerie aux rayons X.

Résultats d'excavations récentes

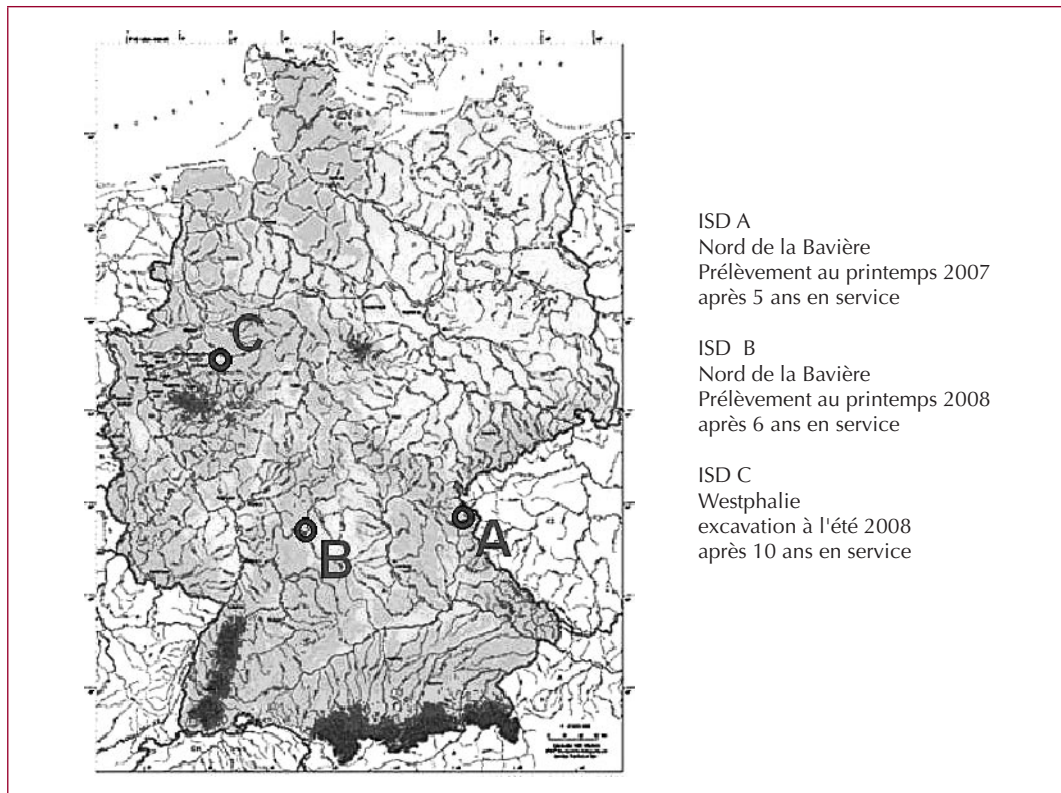
Les excavations présentées dans la suite, réalisées par le premier auteur sur trois ISD ont suivi le protocole détaillé précédemment. Les essais minimaux préconisés ont été réalisés. Le choix des sites a été guidé par les critères suivants :

- l'installation des GSB devait avoir eu lieu depuis au moins cinq ans pour que des observations puissent être réalisées ;
- ce choix des sites permettait d'avoir des retours d'expériences aussi bien sur des bentonites calciques que sodiques ;
- des GSB de deux producteurs différents ont pu être évalués ;
- enfin, l'accès aux ISD correspondantes et l'autorisation de prélèvement de la part des producteurs ont pu être obtenus.

La figure 1 indique la localisation des trois sites de prélèvement.

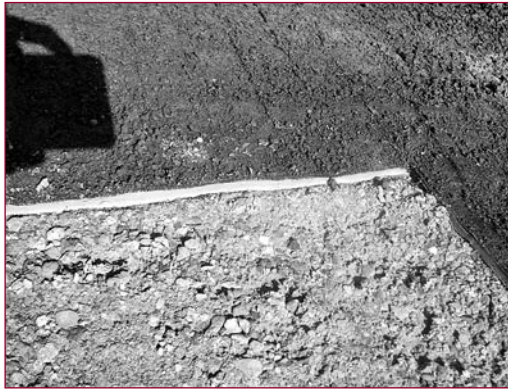
Deux des installations de stockage de déchets sont situées au nord de la Bavière (ISD A et B) et la troisième en Westphalie (ISD C). Dans l'ISD A, la masse par unité de surface du GSB contenant de la bentonite calcique activée était de $10,5 \text{ kg/m}^2$ à une teneur en eau de 89 %. L'indice de gonflement est égal à 14 ml/2g et la capacité d'absorption à 255 %. La permittivité du GSB est comprise entre $1,8 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ et $2,7 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ sous une contrainte de confinement de 15 kPa. L'épaisseur de sol sur le GSB était égale à 0,65 m (photo 1) et comportait 0,1 m de granulat sableux sur le GSB (photo 2). Ces résultats indiquent que la bentonite calcique activée a été partiellement convertie en bentonite calcique, mais la conductivité hydraulique est toujours représentative de celle d'une bentonite sodique. Après cinq ans en service et sous une épaisseur de 0,65 m de sol, les performances de ce GSB sont toujours satisfaisantes. Aucune racine n'a été observée à la surface du GSB (photo 3).

► Figure 1 – Localisations des sites de prélèvement en Allemagne.

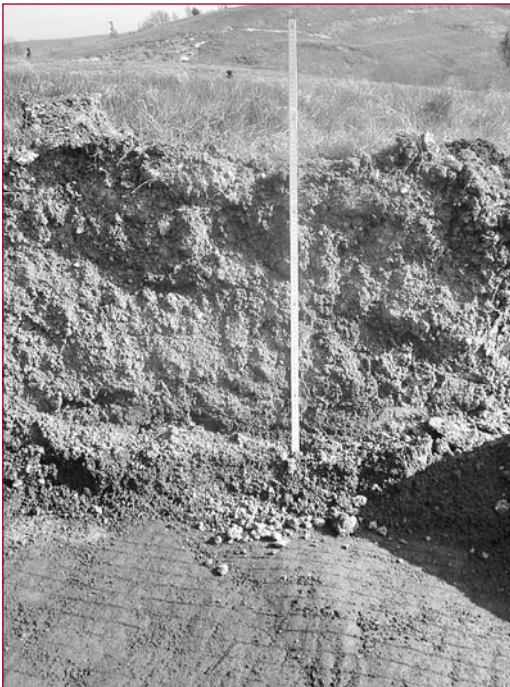




▲ Photo 1 – Prélèvement sur l'ISD A.



◀ Photo 3 – Vue de la tranche du GSB après prélèvement et du sol support sur l'ISD A.



▲ Photo 2 – Sol de confinement sur l'ISD A.



◀ Photo 4 – Prélèvement sur l'ISD B.



◀ Photo 5 – Sol de couverture sur l'ISD B.

La masse par unité de surface du GSB calcique de l'ISD B était comprise entre 16,3 et 19 kg/m² à une teneur en eau comprise entre 70 et 80 %. L'indice de gonflement était égal à 7 ml/2g et la capacité d'absorption comprise entre 190 et 300 %. La permittivité varie de $5 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ à $8 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ sous une contrainte de confinement de 30 kPa. Les échantillons ont été prélevés six ans et demi après la construction. L'épaisseur de la couche de sol sur les échantillons est de l'ordre de 1,2 m (photos 4 et 5). Aucune modification de la bentonite calcique n'a été observée pendant

► Photo 6 – Vue de la tranche du GSB après prélèvement et du sol support sur l'ISD B.



cette période. Le matériau assure sa fonction d'étanchéité. Des racines ont atteint le GSB, même si le sol présente une épaisseur de 1,2 m et qu'un géocomposite de drainage est présent. Pour autant, aucune pénétration des racines à travers le GSB n'a été observée (photo 6).

Dans la troisième ISD, l'ISD C, un GSB contenant de la bentonite sodique naturelle a été utilisé. Les prélèvements ont été effectués onze ans après la mise en place du matériau. La masse surfacique du GSB est de l'ordre de $10,3 \text{ kg/m}^2$ à une teneur en eau de 85 %. L'indice de gonflement est égal à 8 ml/2g et la capacité d'absorption est comprise entre 164 et 190 %. Les permittivités mesurées sont dans une gamme allant de valeurs inférieures à $1 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ jusqu'à $1,9 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ sous une contrainte de confinement de 20 kPa. Les permittivités les plus faibles correspondent aux échantillons dans lesquels des racines ont été trouvées (photo 7), bien que les essais aient été effectués environ six semaines après le prélèvement. Les racines n'ont pas eu le temps de suffisamment se dessécher pour entraîner une perte des performances hydrauliques. L'épaisseur du sol de couverture

► Photo 7 – Vue du GSB C avec des racines et du sol support.



était égale à 1 m (photo 8). La couverture comportait également un géocomposite de drainage. Les résultats obtenus sont typiques de ceux d'un GSB sodique ayant subi un échange cationique total. Pour autant, le GSB remplit encore sa fonction d'étanchéité dans la couverture de l'ISD C.



▲ Photo 8 – Prélèvement sur l'ISD C.

Conclusions

Du point de vue des auteurs, compte tenu des différentes observations réalisées, il semble que la masse surfacique minimale de bentonite sèche doit être de $4,5 \text{ kg/m}^2$ pour les GSB contenant de la bentonite sodique (respectivement 9 kg/m^2 pour la bentonite calcique) et que l'épaisseur minimale de la couche de confinement (structure réservoir) doit être de 1,5 m sous les climats océaniques d'Europe de l'Ouest. La végétation sur la couverture doit être entretenue de manière à éviter la pénétration des racines en profondeur. La couche réservoir doit être installée sans compactage de manière à disposer d'une grande capacité de stockage d'eau. Pour des épaisseurs de la structure de confinement inférieures à 2 m, le recours à une barrière racinaire est recommandé.

Les géocomposites de drainage doivent être préférés aux matériaux granulaires grossiers. Une couche de protection (par exemple, du sable) située sur la barrière minérale a l'aptitude à stocker une certaine quantité de l'eau ayant percolé à travers les couches sous-jacentes et ainsi à la garder disponible pour maintenir l'hydratation du GSB.

Les résultats de trois excavations réalisées récemment en Allemagne montrent une évolution de la bentonite sodique dans deux des GSB. Cependant, les matériaux utilisés présentent toujours de bonnes performances et la fonction étanchéité est encore remplie en couverture. □

Résumé

Les géosynthétiques bentonitiques (GSB) utilisés en couverture d'installations de stockage de déchets (ISD) doivent apporter un niveau d'étanchéité suffisant sur le long terme. La dessiccation possible de la bentonite couplée à des phénomènes d'échanges cationiques a été identifiée comme le principal mode de vieillissement. L'objectif de cet article est, à partir d'une synthèse bibliographique, de déterminer les conditions optimales pour prévenir les baisses de performance des GSB. Différents paramètres seront discutés. Cette synthèse bibliographique met en évidence le manque de données cohérentes d'étude à étude. C'est pourquoi une liste d'informations à collecter au cours des prochaines excavations est également proposée à la fin de l'article avant la présentation de résultats d'excavations récentes de GSB.

Abstract

Clay geosynthetic barriers (GBR-Cs) used in landfill covers must ensure lining on the long term. The primary mode of ageing of bentonite GBR-Cs in covers is the coupling of cation exchange and hydration-desiccation cycles. The objective of this paper is to synthesize the optimal conditions to prevent a loss of performance of GBR-Cs in covers with time, based on a literature review. Various parameters will be discussed. The literature review will put in light the lack of consistent information from study to study. This enforces the need for a list of information to collect in future excavations. Such a list is proposed in the third section of this paper followed by the presentation of results from recent excavations performed by the first author.

Bibliographie

- ARLST, K.-J., WOLSFELD, N., 2004, Angepasste Oberflächenabdichtungs-Systeme für Monodeponien der Stahlindustrie – 2 Jahre Monitoring der 12 Testfelder am Standort Dillinger Hütte, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 132, Erich Schmidt Verlag, Berlin, p. 241-257.
- BENSON, C.-H., THORSTAD, P.-A., JO, H.-Y., ROCK, S.-A., 2007, Hydraulic performance of geosynthetic clay liners in a landfill final cover, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, p. 814-827.
- CAZZUFFI, D., CRIPPA, E., 2004, Behaviour versus time of geosynthetic clay liners sampled from a brownfield in Southern Italy after seven years of installation, in : *Proceedings of the 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics Geoasia 2004*, p. 480-487.
- EGLOFFSTEIN, T., 2001, Einfluss des Ionenaustausches auf die Dichtwirkung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen von Deponien, in : *7th German Geosynthetic Conference. Geotechnik special issue 2001*, DGGT, Essen, Germany, p. 79-83.
- HEERTEN, G., 2004, *Bentonitmatten als mineralisches Dichtungselement im Umweltschutz*, 20th SKZ landfill conference, Würzburg.
- HEERTEN, G., MAUBEUGE, K.-P., 1997, Auswirkungen von Wassergehaltsschwankungen in vernaldeten Geosynthetischen Tondichtungsbahnen auf ihre Wirksamkeit als Dichtungselement, in : *5th German Geosynthetic Conference*, Geotechnik special issue 1997, DGGT, Essen, p. 193-200.
- HENKEN-MELLIES, W.-U., 2005, Long-term observations of alternative landfill capping systems – Field tests on a landfill in Bavaria, 16th Nuremberg landfill seminar 2005, LGA.
- HENKEN-MELLIES, W.-U., ZANZINGER, H., 2004, Lysimeter field study of a clay geosynthetic barrier in a landfill cover system, in : *Proceedings EuroGeo 3, Third European Geosynthetics Conference*, 1-3 March 2004, Munich, p. 183-188.

HEYER, D., 2000, Bentonitmatten als Dichtungselement in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien, 16th SKZ landfill conference, Würzburg.

MACKEY, R.-E., OLSTA, J.-T., 2003, *Performance of Geosynthetic Clay Liners used in two Landfill Closures in a Coastal Area of Florida*, Advances in Geosynthetic Clay Liner Technology, 2nd Symposium, ASTM STP 1456, R.-E. Mackey, K. von Maubeuge, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA 2003, 18 p.

MAILE, A., 1997, Leistungsfähigkeit von Oberflächenabdichtungssystemen zur Verminderung von Sickerwasser und Schadstoffemissionen bei Landschaftskörpern, Studienreihe Abfall NOW, Band 15.

MAILE, A., BIDLINGMAIER, W., KRAFT, E., SCHITTKOWSKI, T., 1998, Oberflächenabdichtungen im Vergleich. In Entwicklungstendenzen in der Deponietechnik unter Berücksichtigung abfallwirtschaftlicher Aspekte und der Nachsorge – Dokumentation der 1, Hamburger Abfallwirtschaftstage'98.

MANSOUR, R.-I., 2001, GCL performance in semiarid climate conditions, in : *Proceedings Sardinia 2001*, 8th International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Sardinia, Italy, p. 219-226.

MEER, S.-R., BENSON, C.-H., 2007, Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners exhumed from landfill final covers, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, p. 550-563.

MELCHIOR, S., 2002, Field studies and excavations of geosynthetic clay barriers in landfill covers, in : Zanzinger, Koerner & Gartung (eds.), *Clay Geosynthetic Barriers*, Balkema, Netherlands, p. 321-330.

RAMKE, H.-G., 2003, Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen – Zusammenfassung der Ergebnisse des Status-Workshops der Arbeitsgruppe "Oberflächenabdichtungssysteme" des AK 6.1 der DGGT, in : *14th Nuremberg landfill seminar 2003*, LGA, p. 169-180.

SIEGMUND, M., WITT, K.-J., ALEXIEW, N., 2001, Calcium-Bentonitmatten unter Feuchtigkeitsveränderungen, 7th German Geosynthetic Conference, in : *Geotechnik special issue 2001*, DGGT, Essen, p. 97-104.

SIVAKUMAR BABU, G.-L., SPORER, H., ZANZINGER, H., GARTUNG, E., 2001, Self-healing properties of geosynthetic clay liners, *Geosynthetics International*, 8(5), p. 461-470.

SIVAKUMAR BABU, G.-L., SPORER, H., ZANZINGER, H., GARTUNG, E., 2002, Desiccation behaviour of selected geosynthetic clay liners, in : Zanzinger, Koerner & Gartung (eds.), *Clay Geosynthetic Barriers*, Balkema, Netherlands, p. 295-302.

SPORER, H., 2002, Exhumed clay geosynthetic barriers, Bavarian experience. Presentation at International Symposium on Clay Geosynthetic Barriers in Nuremberg, unpublished.

SPORER, H., GARTUNG, E., 2002a, Laboratory tests on desiccation of geosynthetic clay liners, in : Zanzinger, Koerner & Gartung (eds.), *Clay Geosynthetic Barriers*, Balkema, Netherlands, p. 331-338.

SPORER, H., GARTUNG, E., 2002b, Examinations on the self-healing capacity of geosynthetic clay liners, in : Zanzinger, Koerner & Gartung (eds.), *Clay Geosynthetic Barriers*, Balkema, Netherlands, p. 339-343.