

LE GÉOSYNTHÉTIQUE BENTONITIQUE EN COUVERTURE D'INSTALLATION DE STOCKAGE DE DÉCHETS

LANDFILL CAP DESIGN WITH GEOSYNTHETIC CLAY LINERS

Aristide HEHNER¹, Kent P. VON MAUBEUGE²

¹ Vienne, France

² Espelkamp-Fiestel, Allemagne.

RÉSUMÉ - Les géosynthétiques bentonitiques (GSB) sont utilisés en couverture provisoire d'installation de stockage de déchets (ISD) et pour la fermeture définitive. Pour ces applications, ils sont exposés à des contraintes de confinement relativement faibles, des tassements différentiels, éventuellement des variations de température et des contraintes de cisaillement sur les talus. Le dispositif d'étanchéité par GSB doit résister aux contraintes mentionnées ci-dessus mais également et sans endommagement à la procédure de mise en œuvre. Les principaux paramètres de dimensionnement ainsi que la durabilité sont les sujets de cette présentation.

Mots-clés : Géosynthétique bentonitique, installation de stockage de déchets, décharge, couverture

ABSTRACT - Geosynthetic Clay Liners (GCL) are mainly used in landfill caps and closures. In these applications the capping system is exposed to low confining stresses, differential settlement, possible temperature effects and to shear stress on slopes. Installed GCLs must not only withstand the mentioned stresses, but also withstand the installation procedure without any harm. These important design factors as well as the durability aspect are topic in this publication.

Keywords : Geosynthetic clay liners, landfill capping, design

1. Introduction

Selon la définition du Comité Français des Géosynthétiques (CFG) donnée dans le fascicule 12 (CFG, 1998), les GSB sont définis comme tout produit manufacturé en forme de nappe associant des géosynthétiques à la bentonite, utilisé dans le domaine de la géotechnique et du génie civil et assurant un rôle d'étanchéité.

La dernière norme internationale publiée, à savoir la norme ISO 10318, définit un GSB comme une barrière géosynthétique par argile (GBR-C) à côté des barrières géosynthétiques polymériques (GBR-P) et des barrières géosynthétiques bitumineuses (GBR-B). Une définition intéressante nous parvient de l'Institut de Recherche sur les Géosynthétiques (GRI) de Philadelphie (GRI-GCL3, 2005). Elle divise les GSB en 2 groupes : les GSB renforcés et les GSB non-renforcés. L'aiguilletage est l'une des techniques de renforcement. Dans ce cas, une certaine quantité de bentonite sodique, ayant une capacité de gonflement importante, est confinée entre deux géotextiles aiguilletés ensemble enfermant la couche de bentonite, évitant tout déplacement de celle-ci et renforçant l'ensemble du complexe. Le géotextile de support est soit un tissé soit une combinaison d'un tissé et d'un non-tissé, complexe qui permet un bon ancrage des fibres (figure 1).

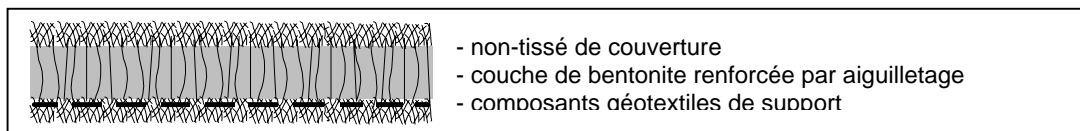


Figure 1. Coupe schématique d'un GSB aiguilleté.

La fonction première d'un GSB est la réduction/limitation du flux d'un liquide à travers le GSB . Les GSB dans la plupart des cas sont utilisés en remplacement total ou partiel d'une couche compactée de sol fin ou d'argile ayant une faible perméabilité. Une bentonite sodique, dont la capacité de gonflement est importante, peut constituer une barrière d'étanchéité simple. Pour une application en ISD, les GSB peuvent être associés à une géomembrane. Ils sont utilisés en couverture ou en fond et flanc en renforcement de la barrière de sécurité passive. Il est rappelé qu'en l'état actuel des techniques, une géomembrane est une nappe manufacturée mince et continue dont l'épaisseur est supérieure ou égale à 1 mm. Pour une épaisseur plus faible (< 1 mm), on parle de géofilm.

2. Couverture d'ISD et fermeture définitive

Les GSB sont utilisés comme barrières hydrauliques en application simple ou en combinaison avec une géomembrane pour former ensemble un dispositif d'étanchéité (figure 2). Leur fonction est de limiter les infiltrations dans le massif de déchets et les émanations de gaz dans l'atmosphère. Pour cette application, le flux à travers un GSB est influencé par la charge hydraulique qui exerce une pression sur le GSB et par la présence ou non d'une géomembrane directement en contact avec le GSB. Le plus souvent, la charge hydraulique est réduite par la présence d'un système de drainage efficace, constitué par une couche minérale de 30 cm de hauteur ou un géosynthétique de drainage de 1 cm d'épaisseur. En effet, le dispositif de drainage réduit le flux à travers l'étanchéité en diminuant le gradient hydraulique. Le calcul de la perméabilité des GSB est basé sur des essais en laboratoire mesurant un flux (selon la norme XP P 84-705, ASTM-D5887, DIN 18130 ou d'autres méthodes de test adéquates). Ces tests doivent simuler les conditions in-situ afin de fournir une information exploitable pour le dimensionnement de l'ouvrage (charge de confinement, gradient hydraulique, etc...).

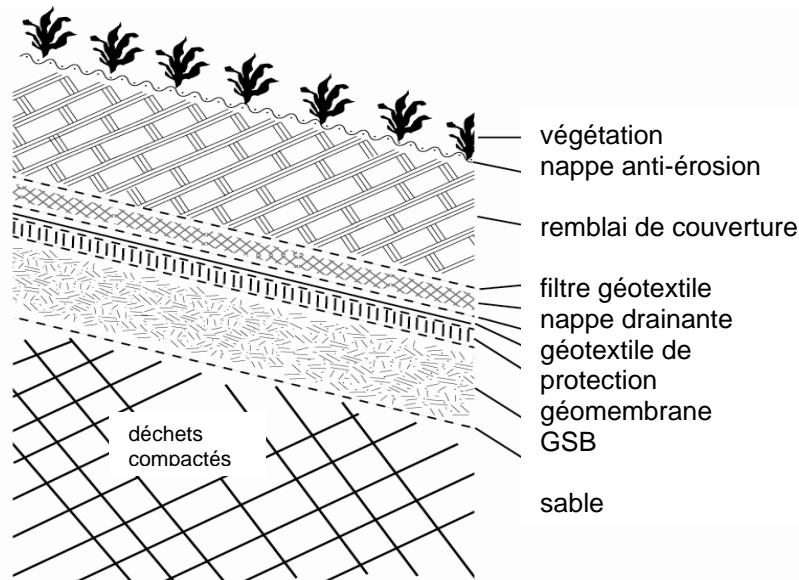


Figure 2. Coupe schématique d'une couverture de décharge de classe 2

En couverture d'ISD, la présence de tassements différentiels est un autre critère de dimensionnement. Selon les études de LaGatta (1997), les barrières minérales ou en argile compactée ne peuvent résister à des tassements supérieurs à 3% alors qu'un GSB renforcé peut résister à des contraintes d'allongement supérieures à 15%. Certains GSB constitués d'un non-tissé de chaque côté peuvent résister à 30% d'allongement tout en préservant leurs performances de faible perméabilité initiale (Université de Hanovre, 1993).

Quand les contraintes de confinement sont relativement faibles, cas des couvertures (entre 10 kPa et 50 kPa), la contrainte de cisaillement est le critère le plus important du dimensionnement. Heerten et al. (1995) et von Maubeuge et al. (1998) ont démontré qu'il existe pour les GSB une corrélation entre le cisaillement interne et le pelage des différents composants du GSB sous certaines conditions. La stabilité d'un dispositif d'étanchéité par GSB est influencé par la pente β , la contrainte normale et la friction avec les couches adjacentes au niveau de l'interface valeur φ . Dans le cas des tassements différentiels, les effets issus du gel ainsi que les effets suite à des cycles de dessiccation-humidification doivent être pris en compte. Dans le cas d'une couverture où le GSB est installé en association avec une géomembrane, par exemple sous celle-ci, la perméabilité du GSB n'est pas considérée comme un paramètre pertinent de dimensionnement. Par contre, si le GSB assure seul le rôle d'étanchéité, sa perméabilité au gaz doit être évaluée sachant qu'une réduction de la teneur en eau suite à une dessiccation de la bentonite (figure 6) influe sur la perméabilité au gaz.

3. Le dimensionnement en couverture de décharge

Le dispositif d'étanchéité en couverture de décharge doit être dimensionné soigneusement en prenant en compte notamment la charge hydraulique et les contraintes mécaniques. Ceci suppose certaines analyses et essais pour évaluer les performances du dispositif. L'application de facteurs de sécurité est

également recommandée et le maître d'œuvre doit ajuster le niveau de performance du GSB à chaque type d'application.

4. La bentonite

L'expérience nous montre que pour la bentonite issue du GSB, seules 2 méthodes d'essais sont à ce jour fréquemment utilisées dans le cadre de l'assurance qualité : le gonflement libre selon ASTM D5890 et le volume de filtrat selon l'ASTM D5891. La bentonite constitue la barrière hydraulique et ce sont ses propriétés de gonflement qui lui confèrent ses qualités d'étanchéité. Quand elle s'hydrate et gonfle, le chemin parcouru par l'eau à travers la couche de bentonite devient complexe et long. L'essai le plus fréquemment utilisé aujourd'hui pour évaluer les propriétés d'imperméabilisation du GSB est l'essai de « perméabilité » ou de flux (paragraphe 4.1). La bentonite est l'élément clé d'un GSB. On peut comprendre que la bentonite soit soumise à une procédure de contrôle de qualité sévère avant son utilisation dans la partie production du GSB. Les procédures de test sont indiquées ci-après. Il faut noter que ces essais ne sont pas des essais isolés et que la réalisation d'un seul essai sur la bentonite ne permet pas à l'utilisateur de celle-ci de conclure sur sa qualité.

En général, la performance hydraulique d'une bentonite sodique est liée à son fort potentiel de gonflement, que l'on peut estimer par une valeur élevée de l'indice de gonflement I_G de 2 g de bentonite sèche (ASTM D5890 et plus récemment AFNOR XP P84-703). Une valeur minimale courante de cet indice pour une bentonite utilisée dans un GSB est de 24 ml/2g.

L'essai ASTM D5891, qui mesure le volume de filtrat, est une méthode rapide d'appréciation des capacités d'étanchéité d'un GSB en supposant que la bentonite assure son rôle d'étanchéité d'une manière homogène dans le GSB. La valeur maximale courante est de 18 ml. Des essais réalisés sur un GSB aiguilleté montrent (figure 3) une bonne corrélation entre ce paramètre et la perméabilité.

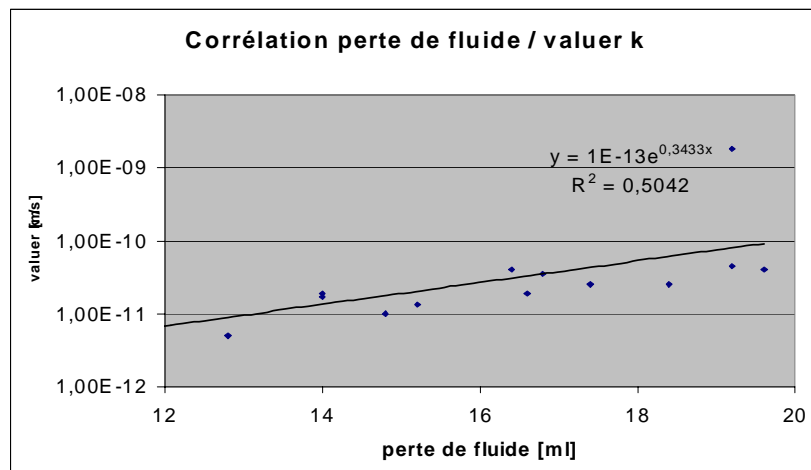


Figure 3. Corrélation entre la perte de fluide (ASTM D5891) et la perméabilité (ASTM D5887) (von Maubeuge, 2004)

L'essai au bleu de méthylène permet d'évaluer l'absorption du bleu de méthylène par la bentonite pour mesurer globalement la quantité et l'activité de la fraction argileuse. La valeur mesurée V_{BS} est également un indicateur de la capacité d'échange cationique. Les normes américaines ASTM C837 et D2330 ne sont pas utilisées par l'industrie du GSB. Les méthodes de test allemandes VDG P 96 et le test néerlandais CUR se sont répandues auprès des producteurs de GSB.

Avec la méthode de diffraction des rayons X (DRX), l'identification de certains types de minéraux et la quantification des proportions sont possibles mais une quantification exacte nécessite souvent des analyses complémentaires, comme l'analyse chimique globale (fluorimétrie X et calcimétrie). Cette méthode est occasionnellement utilisée par les fabricants de GSB afin de déterminer la teneur en montmorillonite dans la bentonite, mais la présence de minéraux comme l'illite peut conduire à des inexactitudes dans les résultats (teneur en montmorillonite plus élevée). Cette méthode de test n'est pas applicable pour les spécifications des GSB car, aujourd'hui, elle n'est pas normalisée et les résultats et surtout leur interprétation peuvent varier d'un laboratoire à l'autre et d'un opérateur à l'autre.

Comme l'ont montré Landis et von Maubeuge en 2004, les isotopes du carbone et de l'oxygène $^{13}C/^{12}C$ et $^{18}O/^{16}O$ déterminés sur la phase carbonatée de la bentonite sont caractéristiques du mode de diagénèse et peuvent aider par conséquent à distinguer des bentonites de différentes provenances.

Cette méthode d'essai devrait être développée pour devenir un outil standard dans le contrôle qualité du fabricant.

Une caractéristique importante du GSB est la masse par unité de surface de la bentonite. Au départ, cette valeur a été fixée à 4900 g/m² sans que la teneur en eau de la bentonite ne soit spécifiée. Cela a créé des confusions sur le marché car la teneur en eau de la bentonite peut varier d'un fabricant à l'autre et en fonction du procédé de fabrication utilisé car certains de ces procédés nécessitent un ajout d'eau. En comparant différents GSB ayant une masse surfacique identique, les GSB avec une teneur en eau plus élevée contiennent en fait moins de bentonite si l'on ramène les valeurs à 0% de teneur en eau. Pour cette raison, la norme ASTM D5993, méthode standard pour la mesure de la masse surfacique d'un GSB, a été créée et indique que la masse surfacique de la bentonite doit être ramenée à une teneur en eau de 0%. Une comparaison des masses surfaciques ainsi mesurées sur différents GSB devient alors possible.

Pour les fabricants de GSB, il serait idéal de disposer d'un essai simple qui permette l'identification et la caractérisation d'une bentonite afin de savoir si celle-ci répond aux critères définis au préalable pour assurer à long terme son rôle de barrière d'étanchéité. À ce jour, nous n'avons pas connaissance d'un seul essai capable d'assurer cette exigence. Il est de pratique courante d'utiliser différents essais afin d'identifier une bentonite mais l'utilisation des deux essais suivants est fréquente. Il s'agit de l'indice de gonflement I_G et des essais de perméabilité-diffusion. Selon l'expérience des auteurs, une bentonite sodique dont les cinq caractéristiques suivantes sont atteintes assure une perméabilité maximale, k , de 5.10^{-11} m/s selon la norme ASTM D5887.

Tableau 1. Recommandations sur les caractéristiques des bentonites sodiques ($k < 5.10^{-11}$ m/s) (von Maubeuge 2002).

Spécifications	Normes	Valeurs
Masse surfacique	ASTM D5993	> 3.500 g/m ² (teneur en eau à 10%)
Indice de gonflement	ASTM D5890	24 ml/2g
Perte de flux	ASTM D5891	< 18 ml
Enslin Neff	DIN 18132	> 550%
Bleu de méthylène	CUR 33	> 300 mg/g

Dans les cas où la perméabilité est supérieure à 5.10^{-11} m/s, on peut conclure qu'au moins une des valeurs du tableau 1 n'est pas atteinte. Par contre, on a observé qu'une bentonite peut avoir une perméabilité inférieure à 5.10^{-11} m/s, alors que le critère pour l'indice de gonflement I_G ou pour la valeur d'Enslin Neff n'est pas atteint. Ce phénomène met en évidence la nécessité de spécifier plus de 2 méthodes de essai et même de prévoir un essai à long terme (normalement plus de 14 jours) selon la norme ASTM D5889. En 2004, von Maubeuge et al. ont publié une nouvelle méthode d'essai potentielle afin de définir la performance hydraulique comme un critère de contrôle de qualité qui permet la détermination des performances des bentonites dans un laps de temps bien plus court. Mais cet essai n'a pas encore été discuté dans les groupes de normalisation.

5. Les composants géosynthétiques

Daniel (2000) a mentionné qu'un autre critère est nécessaire afin d'assurer à long terme le maintien des performances hydrauliques d'un GSB, d'éviter la perte de la bentonite et d'empêcher des pénétrations voire une détérioration d'un GSB. Estornell et al. (1992) ont constaté qu'aucune migration de bentonite dans un géocomposite de drainage situé sous le GSB ne se produit dans le cas d'utilisation de géotextiles non-tissés de masse surfacique importante (>356 g/m²).

En examinant la masse surfacique des géotextiles utilisés dans les GSB, on peut constater que cette masse surfacique pour le géotextile support du GSB a été beaucoup plus importante dans les premières années de développement des GSB – entre 300 à 800 g/m² (Heerten, 2000). Ensuite, un tissé en bandelettes comme élément de renforcement a été incorporé dans le géotextile de support non-tissé. Ce concept issu des résultats d'essais de turbulence, afin de simuler un gradient hydraulique important, a montré que le complexe géotextile non-tissé renforcé par le tissé en bandelette évitait bien mieux la perte de bentonite à travers le complexe que les non-tissés épais de l'époque.

Gilbert et al. (1997) témoignent également que la bentonite s'extrude à travers certains non-tissés de faible épaisseur et certains tissés en constatant l'effet suivant :

« ..Pour les GSB constitués d'une couche de bentonite entre deux géotextiles, la bentonite passe à travers les géotextiles dans les interfaces adjacentes et influence l'angle de frottement des interfaces. L'extrusion de la bentonite est normalement associée à des géotextiles tissés. Par contre, ce phénomène a été également observé pour des géotextiles non-tissés quand la masse surfacique de celui-ci est inférieure à 220 g/m². Non seulement la bentonite s'extrude à travers le géotextile tissé mais également la géomembrane lisse qui est en contact avec le GSB est imbibée de bentonite passée à travers le tissé après hydratation. »

En généralisant, on peut constater deux causes probables d'une extrusion de bentonite à travers les composants du GSB. La première est l'extrusion de la bentonite à travers un géotextile de faible épaisseur due à la simple pression du gonflement de la bentonite. Dans ce cas, cette extrusion peut causer une lubrification des surfaces du GSB et réduire l'angle de friction de cette interface en contact avec d'autres matériaux comme par exemple une géomembrane ou même certains types de sol, comme cela a été mis en évidence par les planches d'essai grandeur nature à Cincinnati, USA (Koerner 1996). Ce type d'extrusion de la bentonite est limité à de faibles quantités de bentonite et intervient souvent dans les premiers mois de son hydratation. Un film visqueux est créé par ce phénomène. On ne peut constater d'un impact sur les performances hydrauliques même du GSB.

La deuxième cause d'extrusion de bentonite à travers les géotextiles est constatée sous des gradients hydrauliques importants. Dans cette situation, l'extrusion de bentonite intervient lorsque le sous-sol présente des caractéristiques de porosité importante, par exemple des sables grossiers ou du gravier. On peut constater également ce phénomène d'extrusion lorsque la couche inférieure est constituée par une géogrille de drainage ou un géotextile. Un choix prudent des matériaux adjacents et des géosynthétiques mis en contact avec le GSB est alors recommandé. L'extrusion due à des charges importantes peut avoir des conséquences directes sur la performance hydraulique du GSB.

Les géotextiles non-tissés plus épais ou les géotextiles renforcés par un tissé de bandelettes peuvent éviter l'extrusion de bentonite constatée dans les deux cas décrits précédemment.

Les composants géotextiles les plus utilisés dans les produits GSB « standard » se situent entre 220 g/m² pour les composants non-tissés et 110 g/m² pour les composants tissés en bandelettes. Ces valeurs peuvent également être considérées comme les valeurs les plus faibles et tolérables pour les applications qui nécessitent une résistance au cisaillement interne et sur les interfaces sous des contraintes importantes.

Si certains considèrent un GSB comme un produit « banal » qui permet de réaliser des économies, le maître d'ouvrage qui décide de l'utilisation d'un GSB doit prendre en compte les éventuelles influences de l'environnement sur le fonctionnement du GSB comme il doit préciser les paramètres techniques du produit GSB incluant les paramètres du composant du géotextile. Par exemple, dans le cas d'une utilisation d'un GSB en combinaison avec une géomembrane sur un talus de pente supérieure à 3H/1V, l'étude de la résistance au cisaillement interne et de l'angle de frottement externe du produit sont indispensables, tandis que cette même application ne nécessite pas une attention particulière concernant le gradient hydraulique. Par contre, dans le cas d'une utilisation du GSB comme barrière d'étanchéité simple, les paramètres de la conteneurisation de la bentonite et le choix du géotextile nécessitent une attention particulière et une spécification adaptée et précise.

6. La barrière d'étanchéité par un GSB

La caractérisation des composants du GSB est un outil nécessaire et important pour définir le type de GSB dont on a besoin pour une application précise et doit être bien spécifiée dans le cahier des charges. Non seulement cela aide à décrire le type de GSB et ses performances mais cela permet également au donneur d'ordre et au maître d'œuvre de pouvoir comparer différents produits entre eux. Une spécification claire et précise, à respecter par l'ensemble des opérateurs dans un marché, permet d'assurer les performances du dispositif d'étanchéité et d'éviter tout risque de défaillance.

6.1 Propriétés hydrauliques, propriétés d'étanchéité

L'essai selon la norme ASTM D5887 permet de mesurer de manière reproductible et contrôlable le flux hydraulique dans des conditions fixées pour la contrainte normale (35 kPa) et la charge hydraulique (1,50 m). Depuis peu la norme expérimentale française XP P 84-705 (AFNOR, 2002) permet de mesurer un flux pour une contrainte normale donnée en fonction du projet, simulant les conditions du site

Le procédé de fabrication du GSB et l'utilisation des additifs tels que des polymères ou des colles peuvent influencer favorablement la conductivité hydraulique. On mesure la perméabilité globale du GSB (bentonite+géosynthétique) et non de la bentonite seule. Dans le cas où le GSB est composé d'une couche de bentonite associée à un géofilm ou une induction et que la perméabilité affichée du

produit fini indique une valeur k inférieure à $5 \cdot 10^{-12}$ m/s, aucune indication n'est donnée sur la qualité de la bentonite car la perméabilité calculée est issue d'une mesure du flux à travers le géofilm ou l'induction. Dans ce cas-là, il est recommandé de réaliser le test sur le GSB après avoir retiré le géofilm ou l'induction car la bentonite est le composant assurant l'étanchéité (voir la définition du CFG, 1998). Cette recommandation est donnée par les experts des géosynthétiques regroupés au niveau CEN et ISO qui ont donné naissance à la définition des barrières géosynthétiques argileuses (GBR-C) en précisant que *la fonction de la barrière d'étanchéité est essentiellement assurée par une argile*.

En augmentant la contrainte verticale sur un GSB fabriqué à partir d'une bentonite sodique, on peut diminuer la perméabilité (figure 4). En augmentant la contrainte sur une bentonite sodique, on peut éviter certains effets comme la fissuration en cas de déshydratation qui peut influencer sur la perméabilité. Ces effets peuvent intervenir lors d'une dessiccation de la bentonite ou lors du contact avec une concentration élevée de sols calciques, qui sont agressifs sur une bentonite sodique. Les effets susmentionnés peuvent être évités si l'épaisseur de la couche de confinement est supérieure à 1,5 m et si la pénétration des racines est ainsi évitée. En général, les GSB placés au fond d'une alvéole de stockage de déchets et soumis à une contrainte verticale élevée sont beaucoup moins vulnérables aux phénomènes décrits précédemment que les GSB placés sous une faible contrainte (< 20 kPa). Si le GSB placé en couverture d'ISD est surmonté d'une géomembrane, le risque de dessiccation et le risque de perforation par des racines est pratiquement réduit à 0.

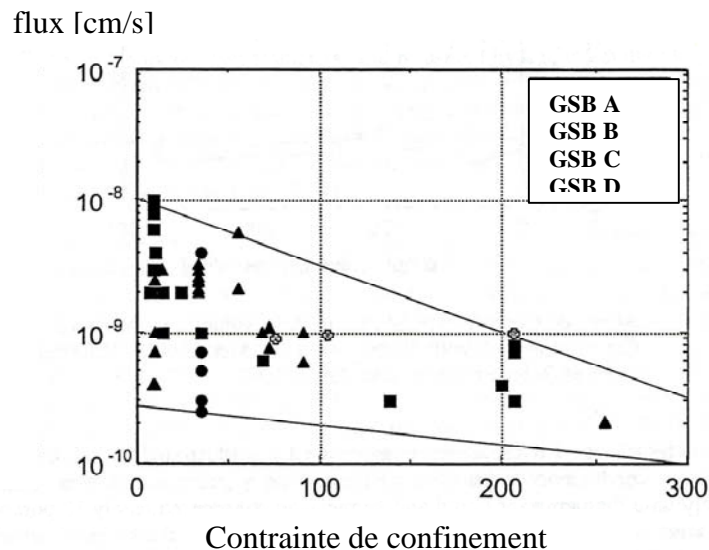


Figure 4. Influence de la contrainte de confinement sur le flux à travers un GSB hydraté à l'eau (Daniel, 2000)

Le flux de liquide passant à travers un GSB ou un complexe (GSB/géomembrane) doit être quantifié afin d'évaluer les performances d'une barrière d'étanchéité par GSB. Le débit d'eau Q (en m^3/s) qui peut passer à travers un GSB hydraté peut être calculée selon la formule de Darcy :

$$Q = k [(h + t_{\text{GSB}})/t_{\text{GSB}}] A$$

où k est le coefficient de perméabilité de la bentonite, t est l'épaisseur effective du GSB, h est le gradient hydraulique sur le GSB et A la surface.

Le débit d'eau passant à travers un complexe (GSB/géomembrane) dû à un défaut de la géomembrane est calculé par l'équation suivante (Giroud, 1997) :

$$Q = 0.976 C_{qo} [1 + 0.1(h/t_{\text{GSB}})^{0.95}] d^{0.2} h^{0.9} k^{0.74}_{\text{GSB}}$$

avec d = diamètre du trou [m] ; h = lgradient hydraulique sur la géomembrane [m] ; k_{GSB} = perméabilité du GSB [m/s] ; t_{GSB} = épaisseur de la couche de bentonite du GSB [m] ; C_{qo} = qualité du contact pour un trou circulaire défini par Giroud (1997).

Dans le cas d'un GSB Giroud (1997) a indiqué que les conditions de contact entre un GSB et une géomembrane sont bonnes ($C_{qo \text{ bon}} = 0,21$).

6.2 Échange ionique

S'il existe, dans le sol environnant, une concentration libre d'ions en calcium ou en magnésium et si cette concentration peut avoir un impact sur la bentonite sodique d'un GSB, un échange ionique entre la bentonite et cet environnement peut intervenir dans le temps (Egloffstein et al., 2002) à savoir dans une période d'environ deux années (Egloffstein, 2000). Pourtant, les études effectuées sur des couvertures d'ISD par GSB réalisées au cours des dernières années ont montré qu'un échange ionique entre la bentonite et le sol environnant n'influence pas l'efficacité des performances du GSB si le DEG a été correctement dimensionné (Bluemel et al., 2002 ; Heerten, 2000).

Ce dimensionnement comprend la mise en place d'un matériau de couverture d'une épaisseur minimale de 0,75 m, qui va éviter la pénétration par les racines du dispositif d'étanchéité. Dans le cas où le GSB est surmonté d'une géomembrane en PEHD, tout risque de pénétration par des racines, dessiccation de la bentonite et échange ionique est évité et, en conséquence, une diminution des performances hydrauliques n'est pas à craindre. Dans les cas où le GSB assure seul le rôle d'étanchéité, il est recommandé d'effectuer des analyses sur le matériau de couverture prévu afin d'évaluer le potentiel d'influence de celui-ci sur les performances de perméabilité ou d'assurer dès le départ une épaisseur supérieure du matériau de confinement.

6.3 Perméabilité au biogaz

Les émissions de gaz et la maîtrise des odeurs sont aujourd'hui des paramètres à prendre en compte lors du dimensionnement de la couverture et du réseau de drainage. Au cours des dernières années, la récupération des biogaz et l'utilisation des nouvelles technologies sont devenus des éléments importants dans la gestion du site. Dans le cas d'une étanchéité combinée (GSB surmonté d'une géomembrane), le risque d'une émanation de gaz est très faible à cause de la présence de la géomembrane.

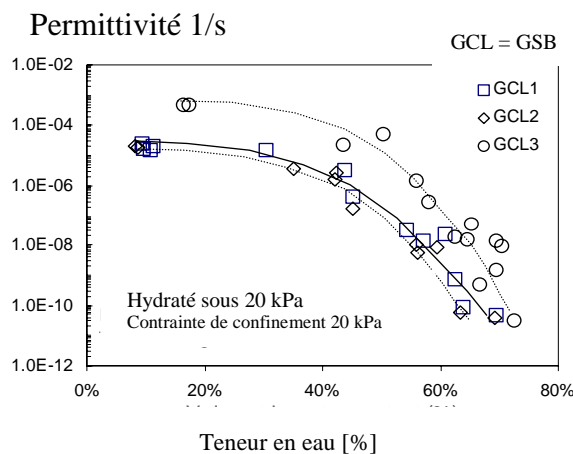


Figure 5. Variation de la perméabilité à l'azote en fonction de la teneur en eau de la bentonite du GSB (Vangpaisal et al., 2001)

Dans le cas d'une étanchéité simple, le GSB offre de nombreux avantages par rapport à une argile compactée installée en couverture, comme par exemple une meilleure stabilité, un potentiel bien inférieur du risque de dessiccation et de fissuration et la maîtrise de l'infiltration des eaux pluviales (Eberle et al., 2003). Vangpaisal et al. (2001) ont longuement étudié les performances du GSB en utilisant de l'azote (figure 5). Il faut noter que, dans ce contexte, la teneur en eau d'un GSB placé en couverture d'ISD est généralement supérieure à 80% (Eberle & von Maubeuge, 1998).

6.4 Résistance au cisaillement

6.4.1 Résistance au cisaillement interne.

Les GSB sont divisés en deux groupes (GRI, 2005) : les GSB renforcés et les GSB non-renforcés. En pratique, un GSB non-renforcé ne peut pas être utilisé pour des applications sur pente à cause du faible angle de frottement de la bentonite (pour une bentonite hydratée cet angle de frottement vaut environ 9 degrés, l'angle résiduel se situe entre 4 et 5 degrés). Pour cette raison, un renforcement minimal est nécessaire afin d'assurer une résistance au cisaillement à court terme et à long terme du produit GSB.

Le Geosynthetic Research Institute (GRI-GCL3) recommande une résistance au pelage minimale de 360 N/m pour des GSB renforcés selon la norme ASTM D6768. Selon Heerten et al. (1995), Berald (1997), Mackey et al. (1999) et von Maubeuge et al. (2002), les résultats de l'essai de résistance au pelage permettent d'effectuer une corrélation avec ceux de l'essai de cisaillement, dans le cas où les deux essais ont été réalisés dans les mêmes conditions. Une simple comparaison des résultats de cisaillement ne permettra pas forcément d'établir cette corrélation si l'on présume que le GSB dispose d'une résistance au pelage minimale sans avoir effectué au préalable les essais correspondants (Zornberg et al., 2005). Il est prouvé qu'un aiguilletage plus dense, surtout quand les fibres de renforcement sont en plus, après aiguilletage, soudées avec le géotextile inférieur, permet l'obtention d'une résistance au pelage supérieure. La contribution à la stabilité au cisaillement par des fibres renforçant le complexe GSB dans le contexte de faibles contraintes verticales est également due à un ancrage efficace et à la précontrainte apportée par les fibres lors du gonflement de la bentonite. Mais la contribution du renforcement par des fibres aiguilletées à la résistance au cisaillement interne est significative pour tous les types de contraintes normales faibles ou importantes. Les conditions d'essai peuvent influencer de manière importante les résultats de l'essai de cisaillement (von Maubeuge et al., 2002). La résistance au pelage du GSB est évaluée en respectant la procédure d'essai de la norme ASTM D6496. Par contre, pour obtenir des résultats fiables pour la résistance au cisaillement du complexe, il est nécessaire de spécifier les conditions de l'essai. Le maître d'œuvre spécifie normalement un minimum de résistance au pelage afin d'assurer un assemblage adéquat et régulier.

6.4.2 Fluage

Les polymères des fibres et la bentonite contenue dans les GSB connaissent le phénomène du fluage s'ils sont sollicités par d'importantes contraintes à long terme. Les rapports publiés par Koerner et al. (1998) et Siebken et al. (1995) ont montré que la plupart des déplacements dus au cisaillement interne interviennent pendant les premières cent heures de charge. Si les sollicitations sur un GSB installé restent stables et que l'installation du dispositif survit la première semaine, on peut considérer que le GSB résiste au fluage, comme le concluent les observations des essais de performance des GSB installés sur talus effectués au cours des dernières années à Cincinnati par l'EPA, Daniel et al. (1996). Sur ces planches d'essai, les GSB renforcés ont été testés sur des talus de 2H/1V avec un facteur de sécurité de 1,5. Les dernières études effectuées par Mueller (2005) concluent que des GSB utilisant des fibres pour le renforcement de l'aiguilletage dont les résines ont été bien définies dans un cahier des charges, sont stables à long terme au phénomène de fluage et assureront une durée de vie supérieure à 400 ans.

En avril 1994, NAUE a construit plusieurs boîtes de cisaillement de grande taille afin d'évaluer le comportement de ces GSB aiguilletés sous différentes conditions in-situ et sous des contraintes verticales faibles, proches des applications en couverture d'ISD. Le programme d'essai inclut la mesure de différents déplacements dus au fluage. Les GSB testés ont été installés sur un appareillage d'une dimension de 1m x 1m avec de haut en bas, les éléments suivants :

- charge de 25 kPa apportée par des plaques en acier
- 30 cm de gravier concassé gradué 2/8 mm
- un GSB avec un géotextile de couverture ancré en haut du cadre en acier

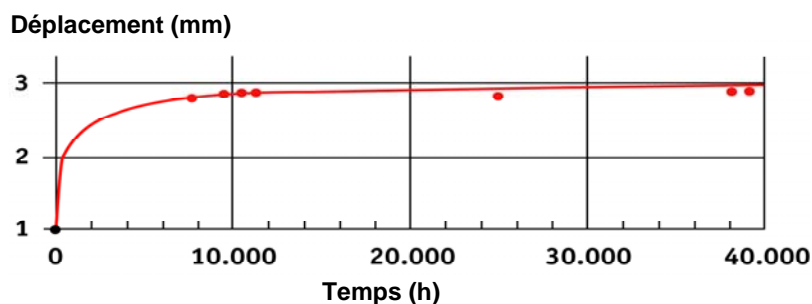


Figure 6. Valeur de fluage en fonction du temps (présentation incluant la déformation initiale due au tassement des matériaux granulaires)

Après la première mise en charge de l'échantillon sous contrainte, un faible déplacement dû au tassement du gravier dans la boîte a été mesuré dans le système. Ce mouvement a été pris en compte dans l'exploitation finale de l'essai, afin de présenter la situation la plus défavorable. Avec un

déplacement initial de 2,5 mm, la valeur finale s'approche d'un déplacement de 2,9 mm après 4000 heures de mise en charge en incluant le tassement initial et représenté en figure 6. Eu égard à cette étude, le comportement du GSB n'est pas influencé par l'effet de fluage sous l'effet d'une faible contrainte comme celle décrite auparavant.

6.4.3 Stabilité au cisaillement des interfaces

Pour le dimensionnement, il est important de prendre en compte non seulement la résistance au cisaillement interne d'un produit GSB mais également les interfaces entre les matériaux des couches adjacentes au GSB, ainsi que toutes les autres interfaces du dispositif d'étanchéité et la résistance de chacun des matériaux au cisaillement interne. Partir de l'hypothèse que la résistance interne au cisaillement d'un GSB représente l'interface critique du DEDG peut conduire à des erreurs fatales de dimensionnement et à des échecs de stabilité de l'ouvrage, comme l'ont publié Koerner et al. (1996). La sous-estimation d'une possible migration de la bentonite à travers les géotextiles de faible masse surfacique et la lubrification de la géomembrane adjacente par la bentonite peuvent également conduire à la réduction de l'angle de frottement entre les deux matériaux et, en fonction de l'inclinaison du talus, peuvent provoquer une rupture du dispositif d'étanchéité. Pour cette raison, il n'est pas recommandé d'installer le GSB avec le côté tissé en contact avec la géomembrane sur les talus d'une inclinaison inférieure ou égale à 18 degrés (sans prendre en compte un facteur de sécurité). En général, il est recommandé d'utiliser un GSB avec des composants géotextiles non-tissés des deux côtés pour des applications en talus. Néanmoins, les dernières recommandations du GRI-GCL3 concluent de ne pas appliquer sur talus des GSB composés uniquement de géotextiles non tissés des deux côtés mais de renforcer en plus un des deux composants non-tissé avec un tissé en bandelettes d'une masse supérieure ou égale à 100 g/m², pour des raisons de stabilité dimensionnelle.

6.4.4 Évaluation de la stabilité sur pente.

La méthode la plus commune et la plus utilisée pour évaluer la stabilité d'un GSB sur pente, tel qu'il est utilisé pour l'étanchéité en ISD et pour les couvertures finales est la modélisation sur une pente infinie. Le facteur de sécurité pour évaluer la sécurité du matériel de couverture peut être obtenu en utilisant l'équation générale pour la stabilité sur une pente infinie :

$$F_s = \frac{\tan \varphi (1 - u) / \gamma z - k_s \tan \beta \tan \varphi}{k_s + \tan \beta}$$

avec F_s = facteur de sécurité, φ = angle de frottement du matériau de couverture, k_s = coefficient sismique, γ = masse spécifique du ou des matériaux sur pente, u = gradient hydraulique ou pression de gaz sur la surface, β = angle de frottement interne de l'interface présumée la plus faible, z = épaisseur de la couche de confinement.

6.5 Migration interne de la bentonite

L'utilisation plus fréquente des GSB dans un dispositif d'étanchéité par géosynthétiques soulève la question d'un éventuel potentiel de migration de la bentonite, d'une part parce que la bentonite par sa nature assure la fonction d'étanchéité, d'autre part parce que les GSB sont des matériaux relativement minces et donc l'influence d'un gradient hydraulique peut être relativement importante pour l'efficacité de l'étanchéité. La présence d'un gradient hydraulique important en contact avec des sols argileux peut créer un potentiel d'érosion interne (migration des particules fines en dehors de l'étanchéité argileuse) et en conséquence et à terme une altération de la couche d'étanchéité. Les recommandations générales existantes pour l'application des GSB donnent à peu près les mêmes conseils pour les caractéristiques des fonds de forme destinés à recevoir un GSB et les spécifications sont pratiquement les mêmes pour tous types de GSB confondus. Pourtant, on peut se demander si ces recommandations générales sont appropriées pour répondre à tous les produits disponibles sur le marché, étant donné leur diversité. Une série d'essais destinée à analyser la performance des GSB par rapport à l'érosion de la bentonite a été réalisée par Rowe et al. (2002). Cinq GSB différents ont été testés en contact avec trois différents types de fond de forme. Parmi les cinq GSB testés, deux sont composés de géotextiles supports de type tissés, un de géotextile support de type non-tissé et deux de géotextiles support de type non-tissés renforcés par un tissé de bandelettes. Les trois types de fond de forme sont composés de sable, de gravier 6 mm, et d'une âme drainante rigide. Il a été prouvé que le fond de forme en sable était le plus adapté à la fonction d'étanchéité du GSB. Les GSB qui ont été placés directement sur la couche de gravier en 6 mm ont subi une érosion de la bentonite et une augmentation de la perméabilité pour ceux

composés d'un tissé ou d'un non-tissé du côté de la face inférieure en contact avec le sol. Seuls les GSB composés d'un géotextile non-tissé renforcé d'un tissé en bandelettes en contact avec le fond de forme n'ont pas souffert sous un gradient hydraulique élevé. Les GSB qui ont été mis directement en contact avec la grille de drainage ont subi des pertes de bentonite et le flux a augmenté de l'ordre d'une puissance par rapport aux performances initiales. Aucune différence n'a été constatée entre une bentonite en poudre ou une bentonite sous forme de granulés. Le seul produit qui n'a pas montré un signe de migration voire de perte de bentonite a été le GSB avec un non-tissé renforcé avec un tissé de bandelettes en contact avec le sol support et un non-tissé comme géotextile de couverture. Il faut noter que ces résultats sont uniquement représentatifs pour les géotextiles supports qui sont composés soit de tissés de 110 g/m², soit de non-tissés de 220 g/m² soit de non-tissés renforcés par des tissés de bandelettes (tissés de bandelettes de 100 g/m² et non-tissés de 250 g/m²). Les composants géotextiles avec une masse surfacique inférieure peuvent créer des migrations de bentonite plus importantes. Des composants géosynthétiques avec une masse surfacique supérieure confèrent au GSB une meilleure résistance à l'érosion et sont toutefois compatibles avec des sols supports constitués de matériaux fins.

6.6 Autocicatrisation

Les GSB ont la capacité de colmater ou de limiter une fuite ponctuelle au droit d'une perforation accidentelle. Cette aptitude à l'autocicatrisation doit être prise en compte et examinée en tenant compte de l'environnement du GSB, en particulier de la nature des matériaux constitutifs de la couche support et des matériaux de confinement, ainsi que de la charge hydraulique.

Les essais selon la norme expérimentale AFNOR XP P84-708 permettent de déterminer les caractéristiques de gonflement, de la perméabilité à l'eau et de la charge hydraulique limite de claquage d'un GSB dans lequel un trou de diamètre connu est pratiqué. Ils permettent de caractériser la capacité du produit à s'autocicatriser.

Les recherches menées par l'URGC de l'INSA de Lyon dans le but de qualifier et visualiser l'autocicatrisation d'un GSB soumis à différentes conditions aux limites, à savoir de quantifier cette autocicatrisation jusqu'à l'obtention de la charge hydraulique critique provoquant le claquage du défaut cicatrisé sur des défauts de diamètres de 10 mm, 20 mm, 30 mm et de 40 mm, montrent qu'un GSB de type aiguilleté composé d'un non-tissé renforcé par un tissé de bandelettes et d'un non-tissé de 300 g/m² renfermant 4200 g/m² de bentonite en poudre présente de bonnes performances d'autocicatrisation, même dans des conditions particulièrement défavorables (sol support perméable). De plus, les charges hydrauliques limites de claquage pour des défauts de diamètre inférieurs à 40 mm sont supérieures à 1 m donc bien supérieures à celles que nous aurions dans le contexte d'une utilisation d'un GSB en couverture d'ISD.

6.7 Résistance à long terme

Les GSB sont généralement renforcés avec des fibres en polypropylène (PP) pour améliorer leur résistance à des contraintes de cisaillement. Depuis que la résistance au cisaillement est souvent utilisée dans le dimensionnement des talus, la durée de vie de l'élément de renforcement peut être le facteur déterminant pour la durée de vie de l'ensemble du dispositif d'étanchéité sur talus. Pour cela, il est important de comprendre le comportement à long terme des GSB renforcés. Deux mécanismes d'échec sont connus pour les fibres renforçant le GSB, à savoir la rupture due au fluage du matériau et l'oxydation de celui-ci. Pour cette raison, NAUE a commencé un programme de recherche en 1999 afin d'évaluer ces phénomènes. Une partie a été élaborée par le BAM (Agence fédérale pour la recherche et les méthodes d'essais sur les matériaux), la seconde par le TRI (Institut de recherche à Austin, Texas).

Lorsque le DIBt (Office de l'état allemand pour le bâtiment et les travaux publics) a donné son agrément pour l'utilisation des GSB dans les installations de stockages de déchets pour les déchets ménagers et assimilés (1997 – 1998), il a également demandé aux fabricants des GSB bénéficiant de cet agrément d'effectuer des essais prouvant une résistance au cisaillement à long terme et en continu pendant cette première phase d'agrément, à savoir 5 ans. Ces essais, qui ont été réalisés en coopération avec le BAM, ont donné comme résultat le développement d'une procédure d'essai (figure 7) pour les GSB. Cette méthode d'essai est basée sur une méthode appliquée aux géomembranes. L'ensemble des fabricants de GSB pouvait participer à ce développement de procédure. L'essai ainsi développé permet d'appliquer une charge de 50 kPa sur une pente de 2,5H/1V à 80°C d'eau chaude. Les GSB doivent résister à ces contraintes particulièrement défavorables pendant toute la durée de test, soit 365 jours sans le moindre cisaillement afin d'assurer une durée de vie fonctionnelle d'au minimum 200 ans dans des conditions normales. En juin 2005, le BAM a communiqué une estimation sur le comportement au cisaillement à long terme sur les GSB testés chez NAUE. Cette communication

(Mueller 2005) certifie que les GSB testés peuvent assurer une durée de vie fonctionnelle minimale de 400 ans à 15°C, température ambiante, cette conclusion étant basée sur une extrapolation scientifique.

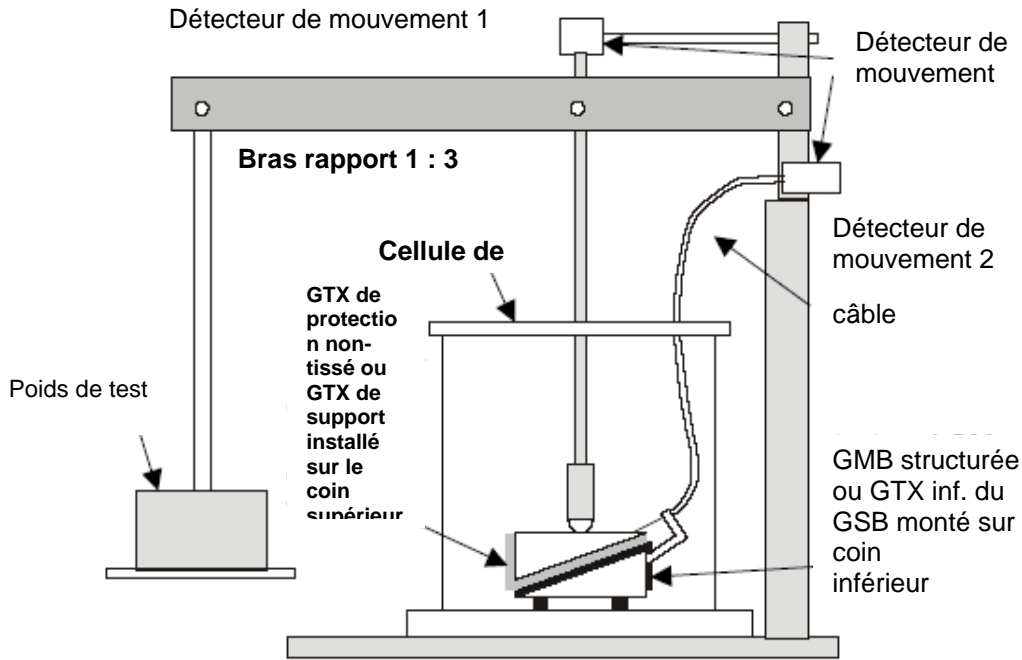


Figure 7. Schéma de la cellule pour la détermination de la résistance au cisaillement à long terme

Les résultats des expérimentations du BAM sur la durée de vie fonctionnelle des GSB supérieure à 400 ans ont été complétés de manière indépendante par une série d'essais de mesure d'oxydation des fibres exposées à un environnement de type installation de stockage de déchets. Ce deuxième type de test a été réalisé au TRI (Thomas, 2004), un laboratoire d'essais et de recherche à Austin/Texas. Cette expérimentation utilise l'extrapolation des valeurs des résultats d'essais afin de déterminer l'oxydation des fibres exposées à l'air à des températures de 100, 90, 80, 70 et 60°C. Le matériau utilisé pour ces essais est un géotextile non tissé aiguilleté en polypropylène de type SECUTEX[®] qui est utilisé comme composant pour les GSB de type BENTOFIX[®]. Les échantillons testés dans des étuves ont une taille de 5cmx15cm. Ils sont exposés dans des étuves chauffées à l'air chaud à différentes températures, à savoir 100, 90, 80 et 70°C. L'objectif de l'étude est également de proposer une recommandation générale exigeant que les géotextiles testés maintiennent une valeur supérieure ou égale à 50% de leur résistance à la traction après exposition aux différentes conditions d'essais qui ont servi de base à l'extrapolation. Il résulte de cette extrapolation que les géotextiles utilisés peuvent avoir une durée de vie de 373 ans dans le cadre d'une application normale.

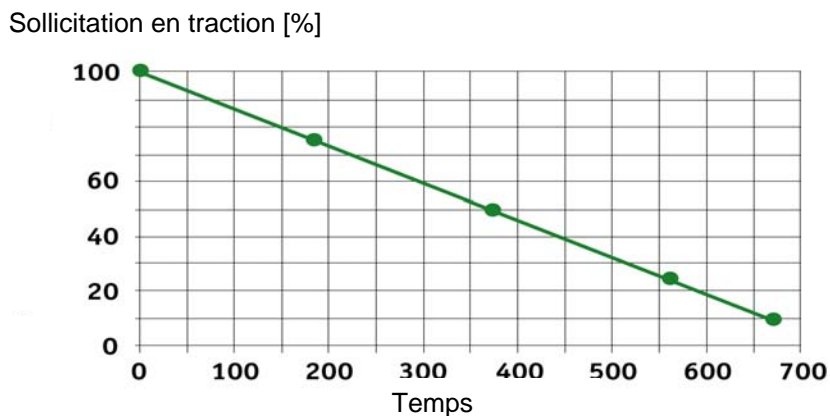


Figure 8. Prédiction de la durée de vie des fibres renforçant un GSB aiguilleté à 15°C

Ces résultats sont en bonne corrélation avec les résultats du BAM. La publication des résultats de ces organismes indépendants montre l'aptitude et la performance des GSB testés à résister à de longues périodes d'application. Pourtant, la dernière méthode d'essai est très prudente car le maintien de la

résistance à la traction initiale à 50% est largement supérieur à la sollicitation réelle à long terme de 25% voire 10% qui est suffisante pour la plupart des applications.

7 Contrôle de qualité et installation

La pratique veut qu'on réalise un dimensionnement en prenant en compte les conditions les plus pénalisantes. Pour les GSB, la phase la plus délicate est probablement la phase d'installation et de mise en place de la couche de confinement. Ces dernières années, différents documents ont été publiés pour servir de support pour la spécification et l'installation. Toutefois, ces données ne constituent par forcément les données de base reflétant les besoins minimaux pour un ouvrage donné ou une application réelle. Il appartient alors au maître d'oeuvre, au maître d'ouvrage, à l'applicateur ou à toute personne impliquée dans la réalisation de l'ouvrage d'assurer par ses propres recommandations les caractéristiques minimum du produit GSB et les prescriptions pour sa mise en oeuvre. Les recommandations et normes de base à respecter sont les suivantes :

- Contrôle de qualité lors de la fabrication : La norme ASTM D5889 donne les directives au fabricant de GSB pour son plan d'assurance qualité avant livraison. Cette norme donne les types et les fréquences des essais à réaliser par le fabricant.
- Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques (CFG, 1998). Ce fascicule fournit des informations générales sur les GSB ainsi que des recommandations pour leur utilisation et leur mise en oeuvre dans le cadre de différentes applications.

Les points suivants doivent toujours être pris en compte pour l'application du GSB :

- Protection du rouleau pendant la phase de stockage et de transport, étiquetage (marque, référence commerciale, numéro de rouleau...) et marquage CE.
- Le sol support doit être plan, bien compacté et dépourvu d'objets perforants, tranchants ou coupant.
- La circulation d'engins sur le GSB déroulé est prohibée avant la mise en place d'une couche de confinement minimale. Avec l'accord du maître d'oeuvre, des exceptions peuvent avoir lieu en ce qui concerne l'installation des géosynthétiques sur le GSB pour l'utilisation de véhicules légers équipés de pneumatiques adaptés. La circulation directement sur un GSB hydraté est strictement interdite.
- La continuité de l'étanchéité est assurée par un chevauchement des lés (principe des tuiles sur une toiture) avec une zone de recouvrement renforcée la présence (ajout) de bentonite mise en place lors de la fabrication (traitement des bords) ou par un apport lors de la pose. Un phénomène de rétrécissement des GSB a été constaté dans certains cas où le GSB était placé sous une géomembrane. La teneur en eau des GSB se situait alors entre 24% et 44% pour 4 des 5 cas, la séparation des lés se situait entre 0 et 300 mm à l'exception d'un cas extrême où la séparation était bien plus importante. Il faut noter que les composants géotextiles utilisés dans ces GSB étaient de type aiguilletés et non tissés mais sans renforcement par des tissés de bandelettes. La cause possible de ce phénomène serait le rétrécissement du GSB dû à des cycles d'hydratation et de déshydratation dans des conditions où le GSB n'était pas confiné. À l'issue de ces constats, les recommandations données sont les suivantes :
 - ne pas laisser le dispositif GMB/GSB sans confinement ;
 - utiliser des composants géotextiles renforcés par des tissés de bandelettes sur au moins un côté ;
 - augmenter la largeur de recouvrement afin de compenser un risque potentiel de séparation des lés (pour des détails, voir Géosynthetic Research Institute, 2005a).
- Les GSB doivent être confinés avec au moins 30 cm de matériau non agressif, en général un sol bien gradué, ayant un coefficient d'uniformité supérieur à 5, avec une dimension maximale des grains de 64 mm est souhaitable. Toutefois, la présence de matériau fin en contact avec le GSB est préférable. Dans le cas d'une circulation fréquente au droit du complexe d'étanchéité par GSB, la mise en place d'une piste d'une hauteur minimale de 0,5 m est recommandée.
- Les pénétrations (par exemple, tuyaux, canalisations) doivent être étanchéifiées selon les recommandations de pose du fournisseur.
- Une procédure doit être prévue avec le fournisseur du GSB pour le traitement ou la gestion des cas de non-conformité (défaut, endommagement,..).

8 Conclusion

Les géosynthétiques bentonitiques (GSB) sont souvent utilisés en couverture d'installation de stockage de déchets, soit comme élément d'étanchéité simple, soit en combinaison avec une géomembrane. Ils remplacent des couches épaisses d'argile ou de matériaux argileux en raison de nombreux avantages comme une installation facile, une perméabilité très faible, la capacité d'autocicatrisation, le renforcement de la géomembrane notamment au droit d'éventuel défaut, une bonne résistance aux tassements différentiels et aux contraintes de cisaillement sans oublier un coût souvent moindre et mieux maîtrisé.

Malgré l'existence de nombreuses recommandations et de spécifications, le maître d'œuvre doit prendre en compte les conditions spécifiques de chaque site, notamment pour le sol support, le matériau de confinement, les caractéristiques de talus, le cisaillement interne et le cisaillement sur les interfaces ainsi que les conditions d'exploitation. Il doit donner les spécifications nécessaires pour que la fonction du GSB et de l'ensemble du DEDG soit assurée tout au long de la vie de l'ouvrage. Les recommandations générales sur l'utilisation des GSB se situant souvent à un niveau inférieur, la spécification individuelle précise souvent des caractéristiques plus sévères pour certains composants (géotextiles, bentonite) suivant l'application ou le type d'ouvrage. Ainsi les recommandations d'installation doivent être révisées et complétées en fonction de chaque application individuelle, elles peuvent faire appel à un essai de performance ou une planche d'essai pour validation..

9. Références bibliographiques

- Berald J.F. (1997). Evaluation of needle punched geosynthetic clay liners' internal friction (Évaluation de l'angle de friction interne des GSB aiguilletés), *Geosynthetic '97*, Long Beach, March
- Blumel W., Mueller-Kirchenbauer A., von Maubeuge K.P., Markwardt N. (2003). Investigations on water permeability and balance in landfill capping systems with GCLs (Investigations sur la perméabilité à l'eau et l'équilibre dans des couvertures d'installations de stockage de déchets avec des GSB), *56ème Conférence canadienne de géotechnique*, Winnipeg, Canada.
- Comité Français des Géosynthétiques (1998). *Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques*, Fascicule n°12.
- Daniel D.E., Scranton H. B. (1996). *Report of 1995 Workshop of Geosynthetic Clay Liners* (Rapport de 1995, Assises sur les GSB), EPA/600/R-96/149, U. S. EPA, Cincinnati, OH, U.S.A., 228 pages.
- Daniel D.E. (1996). Geosynthetic clay liners, part two : hydraulic properties (GSB partie 2 : Propriétés hydrauliques), *Geotechnical Fabric Report*, June/July issue
- Daniel D.E. (2000). Hydraulic durability of geosynthetic clay liners (Durabilité des paramètres hydrauliques des GSB), *GRI seminar 14*, Las Vegas, USA
- Didier G., Plagne G. (1999). *Capacité d'auto-cicatrisation des géosynthétiques bentonitiques : le BENTOFIX®*, Lyon (novembre 1999)
- Eberle M.A., von Maubeuge K.P. (1998). Measuring the in-situ moisture content of geosynthetic clay liners (GCLs) using time domain reflectometry (TDR) (Mesure de la teneur en eau des GSB en utilisant la méthode de réflectométrie (TDR)), *Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics*, Atlanta USA, pp. 205-210.
- Egloffstein T.A. (2000). Natural bentonites – Influence of the ion exchange and partial desiccation on permeability and self-healing capacities of bentonites used in GCLs (Les bentonites naturelles – l'influence de l'échange ionique et de la dessiccation partielle sur la perméabilité et les capacités d'autocicatrisation des bentonites utilisées dans le GSB), *GRI Conference*
- Egloffstein T.A., von Maubeuge K.P., Reuter E. (2002). Application of GCLs in contact with leachates or chemical solutions (Application des GSB en contact avec les lixiviats et des solutions chimiques), *7th ICG*, Nice, France, pp. 813-818.
- Estornell P., Daniel, D.E. (1992). Hydraulic conductivity of three geosynthetic clay liners (Mesures de flux dans trois GSB), *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 118, no. 10, pp. 1592-1606
- Geosynthetic Research Institute (2005) *GRI-GCL3 Standard sSpecification for test methods, required properties and testing frequencies of geosynthetic clay liners (GCLs)* (Spécifications standards pour les méthodes de test et propriétés à prescrire et les fréquences de test pour les géosynthétiques bentonitiques (GSB), Folsom, Philadelphia
- Gilbert R.B., Daniel D.E., Scranton H. B. (1997). Shear strength testing for geosynthetic clay liners, testing and acceptance criteria for geosynthetic clay liners (Évaluation de la résistance au cisaillement des GSB, critère de test et de prescription pour les GSB), *ASTM STP 1308*, (Well, L.W. editor) Philadelphia

- Giroud J.P., Rad N.S., McKelvey J.A. (1997). *Evaluation of the surface area of a GCL hydrated by leachate migrating through geomembrane defects* (Évaluation de la surface d'un GSB hydraté par des lixiviats passant par des défauts causés par des géomembranes)
- Heerten G., Saathoff F., Scheu C., von Maubeuge K. (1995). On the long-term shear behaviour of geosynthetic clay liners (GCLs) in capping sealing systems (Rapport sur la résistance au cisaillement à long terme des géosynthétiques bentonitiques (GSB) dans la couverture d'installations de stockage de déchets), *Proceedings of an international GCL Symposium*, Nürnberg, 1995
- Heerten G. (2000). Geosynthetic clay liner performance in geotechnical applications (Les performances des géosynthétiques bentonitiques dans des applications de géotechnique), *GRI Seminar 14*, Las Vegas, USA
- Koerner R.M. (1998). *Designing with geosynthetics* (Dimensionnement avec des géosynthétiques), Prentice Hall, New Jersey
- Koerner R.M., Carson D.A., Daniel D.E., Bonaparte R. (1996). Current status of the Cincinnati GCL test plots (Rapport sur les planches d'essai de GSB à Cincinnati), *GRI-10 Conference of Field Performance of Geosynthetic Related Systems*
- LaGatta M.D., Boardman B.T., Cooley B.H., Daniel D.E. (1997). Geosynthetic clay liners subjected to differential settlement (Géosynthétiques bentonitiques exposés au tassement différentiel). *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 123, N° 5, pp. 402-410.
- Landis C., von Maubeuge K. (2004). Distinguishing sodium activated and natural sodium bentonites (Faire la différence entre des bentonites sodiques activées et des bentonites sodiques naturelles) : Impact on a Dynamic Global Mineral Market, Mining Engineering, November
- Mueller W. W. (2005). Expert report on the long-term shear strength of Geosynthetic Clay Liner BENTOFIX® B 4000 (Rapport d'expert sur la résistance au cisaillement à long terme des GSB BENTOFIX® B 4000, 2ème version, BAM, Berlin)
- Rowe R.K., Orsini C. (2002). Internal erosion of GCLs placed over fine gravel (Migration interne de la bentonite dans les GSB installés sur du gravier), *Clay Geosynthetic Barriers*, Nuremberg
- Siebken J.R., Swan Jr. R.H., Yuan Z. (1995). Short-term and creep shear characteristics of a needlepunched thermally locked GCL (Caractéristiques de cisaillement au fluage et à court terme des GSB aiguilletés), *Testing and Acceptance Criteria for Geosynthetic Clay Liners*, ASTM STP 1308, (Well, L.W. editor) Philadelphia.
- Thomas R. (2005). Thermal oxidation of a polypropylene geotextile used in a geosynthetic clay liner (Oxydation thermique d'un géotextile en polypropylène utilisé comme géosynthétique bentonique), *TRI Report*, currently unpublished
- Université d'Hanovre, IGBE (1993). *Ergebnisse von Laboruntersuchungen an Naue-Bentonit-Dichtungsmatten* (Results of Lab Testing on Naue GCLs) (Résultats d'analyse au laboratoire sur des GSB fabriqués par Naue), Akz. 42/92
- Vangpaisal T., Bouazza A. (2001). Gas permeability of three needle punched Geosynthetic clay liners (Perméabilité au gaz de 3 géosynthétiques bentonitiques aiguilletés), *2nd ANZ Conference on Environmental Geotechnics*, Newcastle, NSW, Australia
- von Maubeuge K.P., Eberle M. (1998). *Can geosynthetic clay liners be used on slopes to achieve long-term stability ?* (Les géosynthétiques bentonitiques utilisés sur talus peuvent-ils assurer une stabilité à long terme ?). 3^{ème} Congrès International sur la géotechnique environnementale, Lisbonne, Portugal.
- von Maubeuge K.P., Lucas S. N. (2002). Peel and shear test comparison and geosynthetic clay liner shear strength correlation (Comparaison des tests de pelage et des tests au cisaillement et corrélation de la résistance au cisaillement des GSB), *Barrières géosynthétiques argileuses*, Nuremberg
- von Maubeuge K.P., Egloffstein A.T. (2004). Quality requirements for bentonite in geosynthetic clay liners and the validity of test methods (Cahier des charges pour la bentonite utilisée dans les géosynthétiques bentonitiques et validité des méthodes d'essai), *Advances in geosynthetic clay liner Technology : 2nd Symposium*, STP 1456 Robert E. Mackey & Kent von Maubeuge, ASTM
- Zornberg J.G., McCartney J.S., Swan Jr R.H. (2005). Analysis of a large database of GCL internal shear strength results (Analyse d'une banque de données concernant les résultats du cisaillement interne des GSB), *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, March.