

Utilisation des géosynthétiques dans les applications minières : synthèse bibliographique et état des connaissances

Nathalie Touze-Foltz^a et John Lupo^b

Depuis quelques années, de nombreuses avancées ont eu lieu dans le domaine de la compréhension des sujets relatifs à l'utilisation des géomembranes et des géosynthétiques bentonitiques en tant que barrières de confinement pour la protection de l'environnement. Par conséquent, on a pu observer une augmentation du nombre des applications géo-environnementales des géosynthétiques (Rowe, 2007). Ces applications concernent des utilisations traditionnelles des géosynthétiques en fond d'installations de stockage de déchets, aussi bien pour l'étanchéité que pour le drainage, pour les couvertures d'installations de stockage de déchets, les bassins de rétention de polluants, la rétention des hydrocarbures, le confinement des liquides et des gaz dans les installations minières. L'objectif de cet article est de réaliser une synthèse de l'utilisation des géosynthétiques pour les installations minières.

Les installations minières, contrairement à d'autres installations pour la protection de l'environnement, ont des emprises foncières importantes. Par conséquent, les mesures de protection de l'environnement doivent être pratiques, robustes, fiables et adaptées (Renken *et al.*, 2005a). C'est pourquoi l'utilisation des géosynthétiques pour la conception et la construction des systèmes d'étanchéité dans les applications minières a beaucoup augmenté ces vingt dernières années. En effet, la performance des matériaux géosynthétiques pour les environnements miniers est de mieux en mieux comprise.

Dans un premier temps, nous présenterons le cadre de l'utilisation des géosynthétiques dans le contexte minier. Ensuite, nous aborderons différents points essentiels pour l'utilisation des géosynthétiques dans ce contexte particulier. Dans les applications minières, le dimensionnement des tuyaux de drainage et le dimensionnement du dispositif d'étanchéité par géosynthétiques (DEG) sont les deux premiers points où il est nécessaire de prendre en compte les très fortes contraintes mécaniques exercées. En effet, ces dernières peuvent atteindre 4 MPa. Les méthodes de dimensionnement des tuyaux de drainage sous de fortes hauteurs de confinement ne sont ni bien définies, ni bien comprises. La compréhension de la performance et des limites d'utilisation des tuyaux de drainage sous ces conditions est importante car ils sont installés dans des environnements contraignants. L'état de l'art dans ce domaine sera présenté en se basant sur de la modélisation, des expérimentations de laboratoire et des investigations *in situ*.

La sélection et la conception du DEG pour des applications où les contraintes rencontrées sont importantes, imposent une excellente compréhension des interactions entre les composants du système d'étanchéité et le type de contrainte mécanique appliquée (contraintes normale et tangentielle). Lorsque l'interaction entre les différents éléments est bien prise en compte, les géomembranes peuvent bien se comporter, même sous de très fortes contraintes mécaniques. On donnera des éléments sur les méthodes qui permettent de réaliser ce dimensionnement.

Les contacts

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

b. AMEC Earth & Environmental Inc., 140 Quarry Park Blvd. SE, Calgary, AB T2C 3G3, Canada.

On discutera ensuite la performance des géosynthétiques bentonitiques (GSB) pour l'étanchéité dans les installations minières. On discutera en particulier les mécanismes de perméabilité, de diffusion et d'atténuation des métaux dans ces matériaux. Enfin, on s'intéressera aux transferts diffusifs d'oxygène à travers les GSB, phénomène crucial dans le cas où les résidus miniers contiennent des sulfures réactifs.

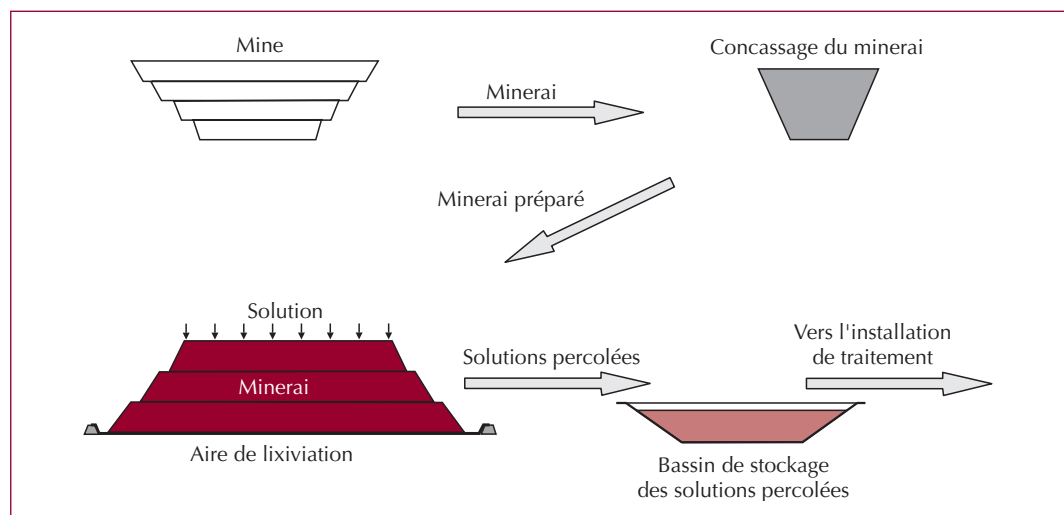
Barrières d'étanchéité pour les installations minières

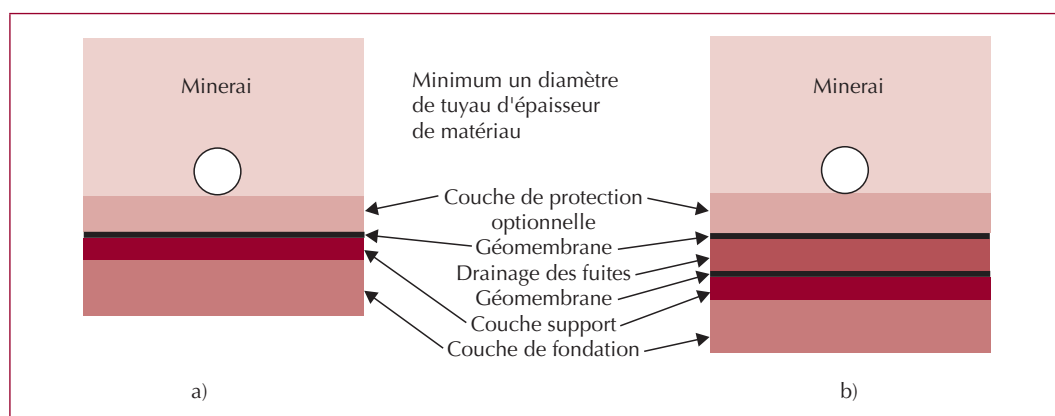
Aires de lixiviation

Les aires de lixiviation sont utilisées dans le cadre des process miniers pour extraire le métal du minerai. Elles sont utilisées en particulier pour la récupération de l'or, du cuivre, de l'argent, de l'uranium, du nickel et d'autres éléments métalliques et non métalliques. Les aires de lixiviation sont des surfaces imperméabilisées sur lesquelles on place le minerai. Une solution est alors déposée sur le minerai avec un certain débit de manière à percoler à travers le minerai et à dissoudre les métaux. La solution utilisée est variable, en fonction du métal et peut être constituée d'un acide fort (par exemple, de l'acide sulfurique) ou, dans le cas de l'or et de l'argent, d'une solution diluée de cyanure. La solution est ensuite récupérée et dirigée vers des bassins de récupération où l'on effectue la récupération du métal. Un schéma de principe d'une installation minière de ce type est présenté à la figure 1.

La zone d'extraction est classiquement imperméabilisée en utilisant des matériaux naturels ou géosynthétiques. Pour faciliter la récupération des métaux et la protection de l'environnement par le confinement de la solution et du minerai, les systèmes d'étanchéité sont constitués par une double ou une simple étanchéité et une couche drainante, comme indiqué sur la figure 2. Les étanchéités composites élémentaires sont généralement constituées par une géomembrane placée sur un sol support compacté. Les géomembranes les plus fréquemment utilisées sont le polyéthylène haute densité (PEHD), le polyéthylène basse densité (PEBD) le polychlorure de vinyle (PVC) ainsi que le polypropylène. Dans la plupart des installations modernes, on utilise du PEHD ou du PEBD. L'utilisation extensive du PEHD et du PEBD dans ce type d'ouvrages a montré qu'ils conviennent parfaitement pour contenir les eaux de drainage corrosives acides ainsi que les lixiviats métalliques pour des périodes d'au moins vingt ans. Il n'existe pas à l'heure actuelle de données sur le long terme (cinquante à cent ans) (Renken *et al.*, 2007). Les étanchéités composites élémentaires sont la structure la plus rencontrée lorsque les charges hydrauliques attendues sur l'étanchéité sont faibles (moins d'un mètre). Par contre, dans le cas où l'on s'attend à des charges hydrauliques plus élevées, on a recours à des étanchéités composites doubles séparées par une couche drainante intermédiaire. Les GSB pourraient être utilisés sous la géomembrane. Cependant, dans ce cas, il faudra étudier précisément les risques de migration de la bentonite dans le réseau drainant sous-jacent, ainsi que le

► Figure 1 – Schéma de principe d'une installation de récupération des métaux (d'après Touze-Foltz *et al.*, 2008).





◀ Figure 2 –
a) Étanchéité composite unique ;
b) Double étanchéité composite pour aire de lixiviation.

risque de cisaillement interne (Lupo et Morrison, 2007). Les étanchéités simples par géomembrane sont le plus fréquemment utilisées dans les mines de cuivre alors que les étanchéités composites se rencontrent fréquemment pour les mines d'or et d'argent (Breitenbach et Smith, 2006).

Qui plus est, il est intéressant de noter que les géotextiles ne sont pas fréquemment utilisés en protection anti-poinçonnante de la géomembrane dans les applications minières. En effet, la faible friction à l'interface géomembrane-géotextile a conduit à de nombreuses ruptures dans les applications minières (Breitenbach, 1995).

Zones de stockage de résidus de lixiviation

Les zones de stockage de résidus de lixiviation sont des structures ouvragées construites pour stocker des pâtes épaissies ou des matériaux pilés et desséchés provenant des activités de transformation des minéraux. Le minerai est concassé à une certaine granulométrie, puis envoyé à un moulin où la roche est réduite en une fine poudre. Cette poudre est transformée en une suspension, en utilisant différentes méthodes pour extraire le métal.

Les suspensions sont généralement constituées de fines particules mélangées à la solution. La teneur en solides varie entre 5 et 65 % en masse en fonction du process utilisé. Après que la suspension ait été déposée dans la zone de stockage, les particules fines sédimentent et une consolidation se produit, relarguant ainsi les eaux (usées) de process qui peuvent être récupérées et réutilisées dans le process. La plus grosse part de ces eaux de process forme une solution surnageante à la surface de la boue en cours de consolidation. Cette solution peut être pompée ou collectée par

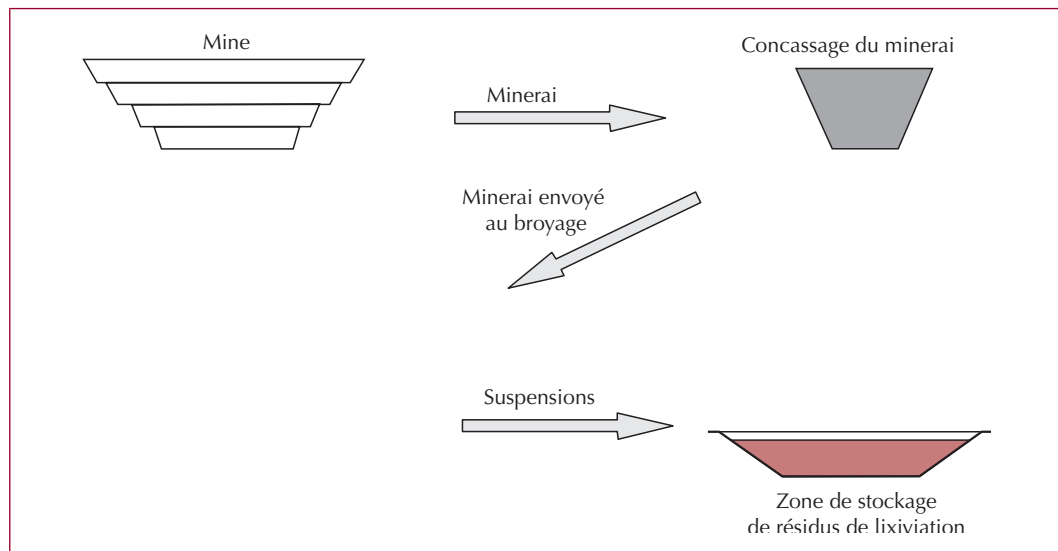
gravité. Le résidu issu du processus de production peut ensuite être épaissi, pour former une pâte, ou desséché. Une vue schématique d'ensemble de l'installation correspondante est présentée sur la figure 3. Selon la chimie des résidus et la solution utilisée, l'imperméabilisation de la zone de stockage de résidus par l'utilisation de géosynthétiques peut être requise.

La plupart du temps, les structures d'étanchéité mises en place pour ces zones de stockage de résidus sont des étanchéités composites élémentaires, bien que les charges hydrauliques puissent parfois excéder 100 m. En effet, la boue ainsi constituée forme une couche de faible conductivité hydraulique à la base de la zone de stockage de résidus comprise entre 10^{-6} et moins de 10^{-10} m/s. Les transferts à travers la barrière sont donc de ce fait minimisés. Les mêmes géomembranes que dans le cas des aires de lixiviation peuvent être rencontrées. Comme pour les aires de lixiviation, la conception de l'étanchéité impose de prendre en compte la compatibilité des différents éléments du système. Les facteurs importants qui influencent la conception du système incluent le tassement de la fondation, la capacité d'expansion de l'installation et les aspects environnementaux.

Stockage des stériles

Lors du process d'extraction du minerai, de la roche est également extraite pour accéder au minerai. Les matériaux correspondants, les stériles, sont souvent placés dans une installation dédiée, pour faciliter la stabilité et le drainage. Dans certains cas, des géosynthétiques ont été incorporés aux structures de confinement de ces stériles. On a recours à une étanchéité quand on craint que les eaux de drainage à travers ces stériles ne puissent avoir un effet néfaste sur l'environnement.

► Figure 3 – Schématisation d'une installation de préparation et stockage de résidus (d'après Touze-Foltz *et al.*, 2008).



Lorsque cette structure d'étanchéité peut être mise en place avant le stockage des stériles, on a le plus souvent recours à une étanchéité composite. Un point important de la conception des systèmes d'étanchéité pour les déchets rocheux est l'épaisseur de la couche de protection sur la géomembrane en raison du fort trafic des engins. C'est essentiel dans le cas de chargeurs qui ont des capacités de trois cent tonnes ou plus, avec des poids totaux qui peuvent excéder quatre-cent-cinquante tonnes. Les concepteurs vont souvent adapter l'épaisseur du matériau de protection pour réduire la contrainte normale sur la géomembrane à une valeur comprise entre 36 et 70 kPa. Cette approche a été utilisée dans plusieurs mines (Crouse *et al.*, 1999) et semble

permettre d'obtenir une bonne protection pour la géomembrane.

Dans le cas où une barrière d'étanchéité n'a pas été mise en place préalablement au dépôt des stériles, une couverture de ces déchets doit être assurée. Ballie *et al.* (1999) ont présenté le cas de l'utilisation d'une géomembrane bitumineuse en couverture de terril.

▼ Figure 4 – Tuyaux annelés en PEHD pour le drainage d'une zone d'extraction de métaux (d'après Touze-Foltz *et al.*, 2008).



Systèmes drainants pour les applications minières

Aires de lixiviation

Une considération importante pour le dimensionnement des aires de lixiviation est le système de collecte des effluents. En effet, ce système drainant ne doit pas seulement être dimensionné pour collecter la solution qui aura percolé à travers le minerai, mais également pour contrôler la charge hydraulique sur l'étanchéité.

Ce contrôle de la charge hydraulique va permettre de réduire l'instabilité du minerai et de la structure elle-même. Des changements minimes dans la charge hydraulique ou dans les conditions de drainage au sein de la zone d'extraction peuvent conduire à une rupture au sein du massif de minerai. Le contrôle de la charge hydraulique peut également réduire les transferts à travers les éventuels défauts dans la géomembrane. Les systèmes de drainage les plus courants sont constitués de tuyaux de drainage en polymères insérés dans une couche drainante comme présenté à la figure 4.

En fonction du dimensionnement et des conditions d'utilisation, le système drainant peut également incorporer un géotextile, des tuyaux annelés perforés à simple ou double paroi, des collecteurs perforés ou non en PEHD qui seront désignés sous le terme générique de géodrains.

Le dimensionnement d'un système drainant pour une zone d'extraction des métaux, à savoir entre autre le choix de la capacité, de l'espacement entre géodrains et des matériaux constitutifs, doit prendre en compte les éléments suivants :

- débit d'application de la solution percolante ;
- type et qualité de la zone d'extraction des métaux ;
- l'exposition prolongée à des acides ou des bases fortes pour des durées potentiellement supérieures à vingt ans ;
- l'écrasement des géodrains associé aux fortes contraintes appliquées par la grande épaisseur de minerai (qui peut atteindre 180 m) conduisant à des contraintes mécaniques pouvant atteindre 4 MPa ;
- la fissuration sous contrainte du matériau lorsqu'il est en PEHD ;
- le tassement de la fondation de la zone d'extraction des métaux ;
- la dégradation des matériaux drainants et la formation de fines qui va pouvoir générer du colmatage ;
- le colmatage des géodrains et du (des) géotextile(s).

Zones de stockage de résidus de lessivage

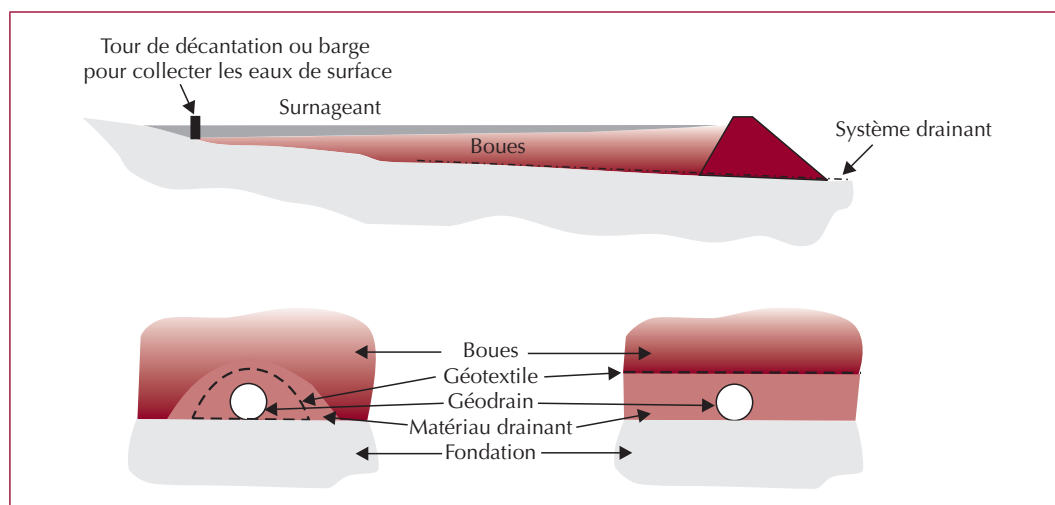
Une couche drainante continue ou intermittente peut également être mise en place sur la barrière d'étanchéité pour favoriser la consolidation de la suspension ou fournir un drainage interne à la structure et potentiellement récupérer la solution pour une réutilisation dans le process minier.

Là encore, les matériaux géosynthétiques qui peuvent être utilisés dans la conception du système drainant sont des tuyaux en matériau polymérique, des géotextiles et des géodrains. Un schéma de principe du système drainant pour une zone de stockage des résidus est présenté sur la figure 5.

La performance d'un système drainant est essentielle dans la conception de la zone de stockage de résidus car elle présente les avantages suivants :

- réduction de la durée de consolidation des boues en apportant une autre voie de collecte de l'eau de drainage ;
- augmentation de la densité des boues en place qui augmente la capacité de stockage ;
- amélioration de la récupération de la solution utilisée dans le process qui favorise sa réutilisation ;
- réduction de la charge hydraulique sur la structure de confinement à la base de la zone de stockage.

La conception des systèmes drainants peut être très variable, en fonction des buts à atteindre,



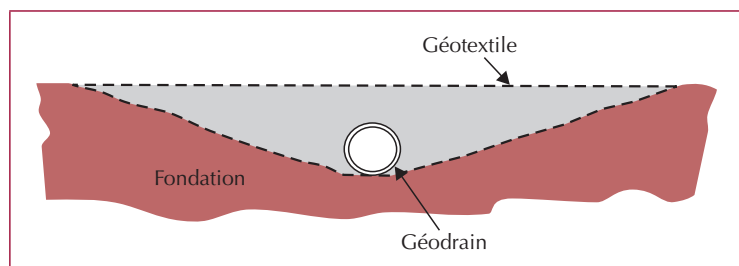
◀ Figure 5 – Schéma de principe d'une zone de stockage de résidus.

de la performance visée et des caractéristiques des résidus. Par exemple, un important réseau drainant couvrant l'intégralité de la surface de l'ouvrage peut être utilisé dans le cas de figure où la densité de la boue est faible et la capacité de la zone de stockage limitée. Pour d'autres cas de figure, une couverture partielle de la surface de la zone de stockage peut être suffisante pour atteindre les buts fixés. Comme indiqué sur la figure 6, le système drainant est souvent constitué d'une série de géodrains insérés dans un matériau drainant (gravier, sable, etc.) Un géotextile peut également être utilisé pour minimiser la migration des fines vers les géodrains. Parmi les points essentiels à prendre en compte pour le dimensionnement du système drainant, on doit s'intéresser tout particulièrement à :

- l'espacement entre géodrains et la géométrie du système drainant pour atteindre les objectifs fixés. L'espacement entre drains est souvent déterminé à l'aide de solutions analytiques ou de simulations numériques ;

- la compatibilité entre les matériaux drainants, le géotextile et les éventuelles fines pour éviter le colmatage et assurer la filtration. On pourra se reporter, pour cette évaluation, aux méthodes proposées dans *International Commission on Large Dams* (ICOLD, 1994), Lafleur *et al.* (1989), et Sherard *et al.* (1984). La compatibilité en termes de filtration entre les résidus et le géotextile pourra être évaluée par l'approche proposée par Luetich *et al.* (1992). Il est important de prendre en compte que la granulométrie des résidus va varier en fonction du type de process. Des minéraux finement broyés peuvent présenter des tailles de particules inférieures à 0,074 mm pour 60 à 80 % en masse du matériau, dimension qui est inférieure à l'ouverture de filtration des géotextiles. Dans ces conditions, le système de collecte de la solution est surdimensionné pour prendre en compte une certaine baisse de performance liée à du colmatage particulaire ;

▼ Figure 6 – Drain typique de collecte pour le stockage des stériles.



- la contrainte appliquée sur les géodrains, imposée par le poids des résidus. Celle-ci peut être excessivement importante lorsque la hauteur de résidus atteint 130 m, ce qui s'est déjà rencontré.

Stockage des stériles

Dans le cas où la qualité des déchets rocheux présente un danger potentiel pour l'environnement, un système drainant est inclus à la base du stockage pour récupérer les liquides ayant percolé à travers les déchets rocheux et les diriger vers des bassins. Ces effluents sont alors analysés pour savoir s'ils doivent et comment ils doivent être traités avant rejet dans le milieu naturel.

Les systèmes drainants pour ce type d'installations sont généralement constitués de drains excavés dans le sol de fondation de l'installation. Ces drains peuvent être tapissés par un géotextile de façon à prévenir la migration des particules fines dans les géodrains. Un matériau drainant granulaire est placé autour du géodrain, à l'intérieur du géotextile, comme indiqué sur la figure 6.

Les points critiques relatifs à la conception de tels systèmes drainants sont les suivants :

- le dimensionnement des géodrains, des matériaux drainants et du géotextile pour assurer leur fonctionnement sous les contraintes très fortes qui peuvent être rencontrées sous des hauteurs de déchets rocheux atteignant 150 m ;

- le choix de la granulométrie du matériau drainant pour assurer sa compatibilité avec le tuyau drainant et le type et les caractéristiques du géotextile utilisé ;

- l'évaluation de la performance hydraulique du système drainant en prenant en compte les conditions météorologiques du site et les paramètres hydrodynamiques du matériau stocké.

Conception des tuyaux de drainage pour les fortes contraintes mécaniques

Les géodrains utilisés pour assurer le drainage sont généralement construits en polyéthylène (PE) ou en PVC et sont disponibles soit sous la forme de tubes lisses, soit sous la forme de tubes annelés. Les tubes à parois lisses sont en général utilisés pour les configurations où des pressions internes entre 340 kPa et 1,8 MPa existent, ou lorsque le géodrain risque d'être soumis à des contraintes

normales élevées. Les tuyaux annelés en PE sont disponibles en simple, double ou triple paroi. Les tuyaux annelés constituent une alternative plus légère en termes de poids aux tuyaux à paroi rigide et peuvent être utilisés dans les applications où de fortes contraintes extérieures peuvent être rencontrées. Récemment, des tuyaux annelés non perforés ont été utilisés pour transporter des solutions avec une pression interne dans le tuyau pouvant atteindre 34 kPa. Des installations types de géodrains avec ou sans tranchées sont présentées sur les figures 7 et 8.

Dans de nombreuses installations, les géodrains sont utilisés à la fois pour des installations enterrées et en surface. Les méthodes de dimensionnement de ces géodrains ne sont ni bien connues ni bien comprises pour les fortes contraintes mécaniques qui peuvent être rencontrées. Cette compréhension est pourtant essentielle car ces matériaux sont placés dans des environnements particulièrement agressifs. En effet, les contraintes qui peuvent s'appliquer sur ces géodrains peuvent atteindre 3,5 MPa dans certains sites ; de plus,

les géodrains peuvent être exposés à des acides forts (pH¹ compris entre 1 et 2) ou à des solutions fortement basiques (pH supérieurs ou égaux à 10) contenant des métaux dissous. La compréhension de la performance des géodrains sous ces contraintes est essentielle pour éviter des ruptures du type de celle présentée à la figure 9.

Le PE et le PVC ont des propriétés viscoélastiques qui leur confèrent une moindre rigidité que la plupart des matériaux enveloppes qui vont être placés autour des géodrains, comme des sables ou des graviers bien calibrés compactés.

Avant de présenter une discussion sur les méthodes de dimensionnement des géodrains, il est important de reconnaître que les critères de dimensionnement et de performance pour les géodrains vont varier en fonction du type de projet, de la durée de vie du site, des solutions utilisées et de la méthode de construction. Par exemple, le critère de dimensionnement d'un géodrain installé dans une installation de stockage de déchets pour laquelle la durée de vie peut excéder cent ans ne sera pas

1. Potentiel hydrogène.



a)



b)

◀ Figure 7 –
a) Installation de tubes PVC ;
b) Installation de tubes PE annelés à simple et double paroi.



a)



b)

◀ Figure 8 –
Installation de tubes rigides en PE :
a) sans tranchée ;
b) installation dans une tranchée.

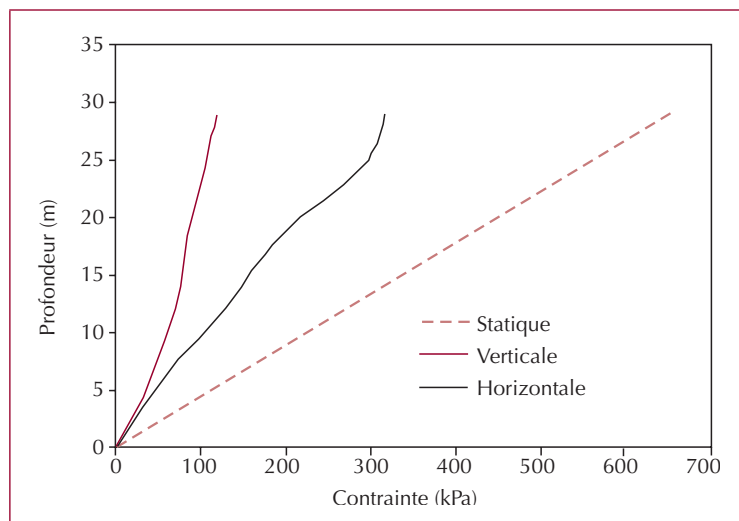
► Figure 9 –
Écrasement
de géodrain.

2. United States
Department of
Agriculture.



le même que celui d'un géodrain d'un système drainant installé dans une aire de lixiviation dont la durée de vie est de dix ans. En effet, dans le dernier cas, la durée de vie de l'installation est limitée après quoi l'installation sera réhabilitée. Par conséquent, de fortes déformations des géodrains et un écrasement partiel peuvent être acceptables.

▼ Figure 10 –
Illustration de l'effet
voûte (d'après Adams
et al., 1988).

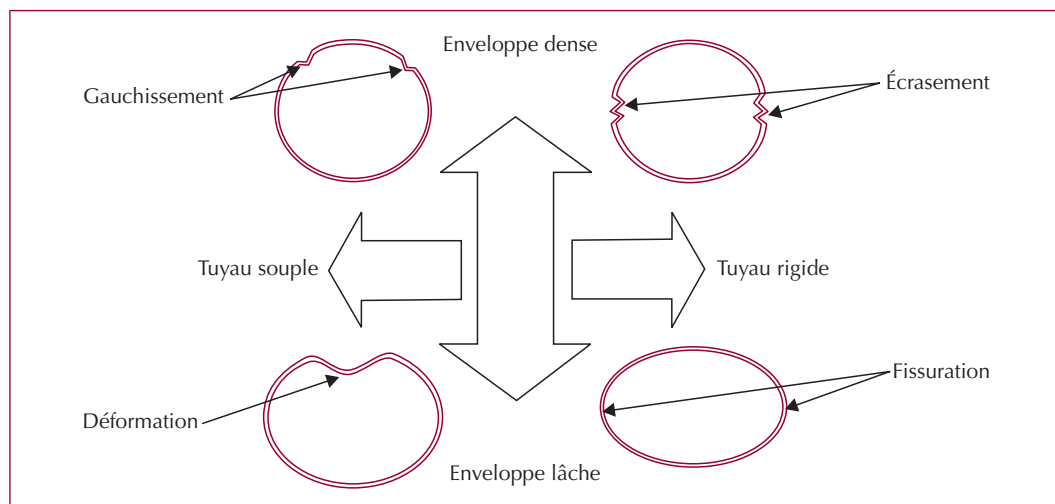


Les méthodes traditionnelles pour le dimensionnement de géodrains enterrés sont issues des travaux de Marston et Anderson (1913) et Spangler (1941), pour de faibles profondeurs. Le travail de Spangler (1941) a ensuite été révisé pour élaborer les méthodes « Iowa » et « Iowa modifiée » (USDA², 1990), qui ont représenté la norme pendant de nombreuses années. Pour autant, ces méthodes sont basées sur de nombreuses hypothèses qui ne sont pas applicables pour des profondeurs d'enfouissement élevées. Par exemple, la pression sur la génératrice supérieure du géodrain, liée à la hauteur de confinement, est supposée égale à la densité du matériau multipliée par l'épaisseur de matériau, corrigée de quelques facteurs pour prendre en compte les différentes configurations possibles (par exemple : géodrain dans une tranchée, pas de tranchée...). Si cette hypothèse peut être considérée comme valable pour des profondeurs inférieures à 5 m, ce n'est pas le cas pour des profondeurs plus importantes. En effet, un grand nombre de mesures de contraintes réalisées *in situ* ou dans des essais de laboratoire par Adams *et al.* (1988), Reeve *et al.* (1981), Sargand *et al.* (1993), Watkins (1990), Watkins *et al.* (1987) et Watkins et Reeve (1979) ont montré qu'à cause de l'effet voûte dans la colonne de sol au-dessus du géodrain, la pression appliquée sur la génératrice supérieure du géodrain peut être significativement inférieure à celle calculée à l'aide de la méthode « Iowa modifiée ».

Un exemple d'effet voûte issu de mesures réalisées *in situ* est présenté à la figure 10 (Adams *et al.*, 1988). On peut observer que la contrainte à proximité du géodrain est significativement inférieure à la contrainte statique utilisée dans la méthode Iowa modifiée.

Des études conduites par Adams *et al.* (1988), Lefebvre *et al.* (1976), Reeve *et al.* (1981), Sargand *et al.* (1993), Selig (1990), Valsangkar et Britto (1978), Watkins (1990), Watkins *et al.* (1987) et Watkins et Reeve (1979) montrent une forte corrélation entre la performance des géodrains et la compressibilité du matériau enveloppe. Un schéma indiquant l'interaction du matériau enveloppe au regard de la performance du géodrain basé sur l'étude de Watkins et Reeve (1979) est présenté sur la figure 11. La combinaison de la rigidité du matériau enveloppe et du géodrain affecte la performance du géodrain et le mode de déformation de celui-ci.

Willardson et Watkins (2002) ont discuté les caractéristiques requises pour les matériaux enveloppes autour des tuyaux flexibles. Les essais



◀ Figure 11 – Interaction entre le géodrain et son enveloppe (d'après Watkins et Reeve, 1979).

réalisés *in situ* ont montré que le placement des tuyaux dans des tranchées en V avant recouvrement avait pour effet un bon maintien du tuyau et limitait la déformation.

À partir de données de laboratoire et de terrain, Watkins et Reeve (1979), Adams *et al.* (1988), Watkins (1990) et Willardson et Watkins (2002) ont montré que le tuyau restait ouvert tant que l'effet voûte était présent dans le matériau enveloppe et que la contrainte totale n'excédait pas une certaine valeur.

Burns et Richard (1964) et Höeg (1968) ont développé des équations qui permettent le dimensionnement pour des conduites circulaires de faible épaisseur entourées par un sol élastique. Ces équations sont particulièrement utiles car elles incluent l'interaction de tuyau avec le matériau enveloppe qui tous deux ont des propriétés indépendantes. Qui plus est, ces équations prennent en compte de façon explicite l'effet voûte dans le matériau enveloppe. Ces équations peuvent être utilisées pour estimer les efforts dans les tuyaux ainsi que les déplacements pour deux conditions limites : glissement total (pas de friction entre l'enveloppe du tuyau et sa surface) et absence de glissement. Le glissement total représente le cas où le sol peut se déplacer autour du géodrain. Le cas sans glissement représente la configuration où la déformation dans le sol et le géodrain est uniforme. Ces méthodes ont été utilisées par Brachman (2001) et Lupo (2001) pour évaluer la performance de tubes plastiques sous de fortes contraintes mécaniques.

Des méthodes numériques faisant appel à des codes de calcul aux différences finies ou aux

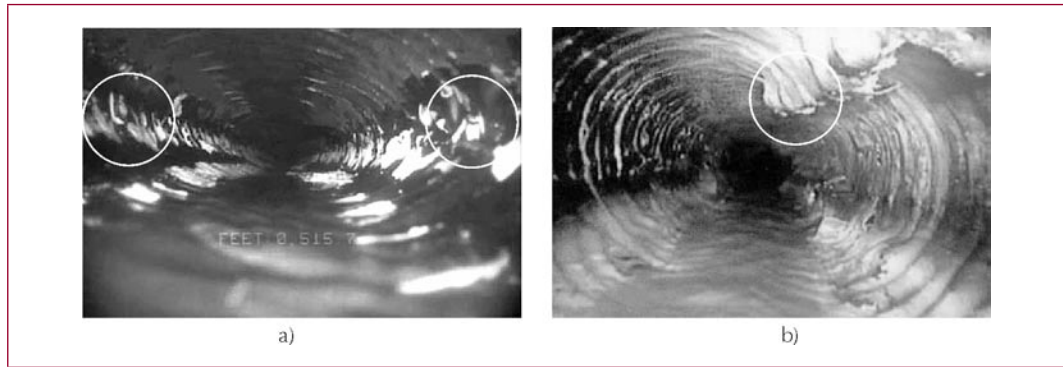
éléments finis ont également été utilisées. Katona (1988) a ainsi déterminé la profondeur maximale d'utilisation de tubes annelés en PE pour des diamètres pouvant atteindre 760 mm. Dans cette analyse, la profondeur maximale d'enfouissement était calculée comme celle qui correspondait à une déformation maximale du tube de 7,5 %. En utilisant ce critère, la profondeur maximale admissible était de 10 m environ pour la plupart des diamètres évalués.

La question du critère à retenir est essentielle. Celui-ci peut varier en fonction du type d'installation, de considérations hydrauliques (charges hydrauliques et débits), de contraintes de stabilité, des matériaux utilisés pour la construction ainsi que de contraintes d'exploitation.

Par exemple, dans certaines installations minières, de fortes déformations, pouvant atteindre 20 %, peuvent être considérées comme acceptables pour autant que la capacité drainante du géodrain soit satisfaisante. Ce critère de dimensionnement devrait prendre en compte une surface minimum ouverte pour le transfert de liquide, la déflexion maximum en tête, le matériau constitutif de l'enveloppe du géodrain, et le mode de construction.

La figure 12 présente des photographies de tubes obtenues lors d'inspections vidéo dans différents sites miniers. Il est important de noter que, bien que les tubes soient endommagés et qu'ils présentent des écrasements, des torsions et une forte déformation, ils continuent à fonctionner en collectant et en acheminant les liquides. Ces différents géodrains satisfont encore leur critère initial de dimensionnement.

► Figure 12 –
 (a) Tuyau en PC annelé de 0,6 m de diamètre sous 90 m de minerai (environ 1,6 MPa) avec une déformation de 20 % ; b) Tuyau en PE annelé sous 60 m de minerai (environ 1,1 MPa) avec une déformation de 15 %.



L'expérience issue de ces investigations dans des sites miniers pour des géodrains enfouis à des profondeurs importantes a montré que c'est la performance de l'enveloppe du tuyau qui exerce l'influence prépondérante sur la performance du géodrain. Dans les cas de rupture de géodrains comme sur la figure 13, on a pu démontrer que ce phénomène était lié à des matériaux mal mis en place et mal compactés autour du géodrain (Zhan et Rajani, 1997 ; Willardson et Watkins, 2002). Par conséquent, une attention toute particulière doit être portée à la qualité et la compressibilité du matériau mis en place autour du géodrain.

Un matériau convenable doit posséder les caractéristiques suivantes :

- matériau concassé qui permet de favoriser l'effet voûte autour du géodrain ;
- matériau neuf, qui n'a pas été soumis aux conditions atmosphériques, pour réduire la compressibilité ;
- matériau enveloppe testé chimiquement vis-à-vis de la compatibilité chimique avec les solutions qui vont entrer en contact avec lui. Ce matériau

ne doit pas se dégrader dans le temps à cause de l'exposition à des solutions agressives, faute de quoi l'effet voûte pourrait être réduit ;

– granulométrie inférieure à 25 mm pour le matériau enveloppe, car il peut ainsi être bien placé autour des géodrains ;

– si le matériau enveloppe doit aussi être utilisé à des fonctions drainantes, ses caractéristiques doivent être testées pour des contraintes mécaniques supérieures à celle qui correspond à la contrainte appliquée par le matériau de recouvrement. En effet, les contraintes dans le matériau enveloppe peuvent excéder celles appliquées par l'épaisseur de recouvrement, en lien avec l'effet voûte. Ces contraintes peuvent être suffisantes pour écraser le matériau et entraîner ainsi une diminution de la conductivité hydraulique.

En plus d'un choix de matériau adapté pour la réalisation de l'enveloppe du géodrain, il est essentiel de bien dimensionner l'épaisseur minimale de matériau sur le géodrain. Ce point est essentiel car l'effet voûte ne se peut produire que s'il y a suffisamment de matériau enveloppe au-dessus du géodrain. Lupo et Morrison (2005) recommandent une épaisseur minimale pour le matériau enveloppe égale à deux fois le diamètre du géodrain à partir de calculs. L'expérience a montré que plus l'épaisseur de matériau enveloppe était importante et meilleures étaient la protection et la performance des géodrains.

► Figure 13 – Rupture de géodrain.



Dimensionnement des géomembranes pour les fortes contraintes

Les observations réalisées pendant la construction et le suivi de tels ouvrages sur des sites miniers montrent qu'il est important que la conception

de l'étanchéité inclue la question de la compatibilité entre les différents composants, à savoir la fondation, la couche support, la géomembrane, et le matériau de couverture. La performance globale du système d'étanchéité dépend de l'interaction entre ces différents composants. Ceci est d'autant plus vrai que la contrainte appliquée est importante. Dans la suite, on présente une méthodologie pour évaluer l'adéquation d'une géomembrane à un contexte donné. On discutera également brièvement le tassement de la fondation sous forte contrainte ainsi que les tassements internes.

Poinçonnement des géomembranes sous fortes contraintes

Pour les géomembranes utilisées sous fortes contraintes, la sélection du matériau (épaisseur et nature) est généralement basée sur la performance sous les conditions de contrainte anticipées, avec l'angularité du matériau placé au contact de la géomembrane, le tassement estimé de la fondation et les propriétés du matériau.

En termes d'épaisseur du matériau, des analyses théoriques telles que celle présentée par Giroud *et al.* (1995) peuvent être utilisées, mais il est plus courant de réaliser une série d'essais en utilisant la méthodologie décrite par *Environmental Agency* (2006), Brachman *et al.* (2000), Lupo et Morrison (2007), Shercliff (1998) et Thiel et Smith (2004). Ces essais permettent d'évaluer la performance du dispositif d'étanchéité dans son intégralité, sous la contrainte objective. Une illustration du dispositif et de la configuration d'essai est présentée sur la figure 14.

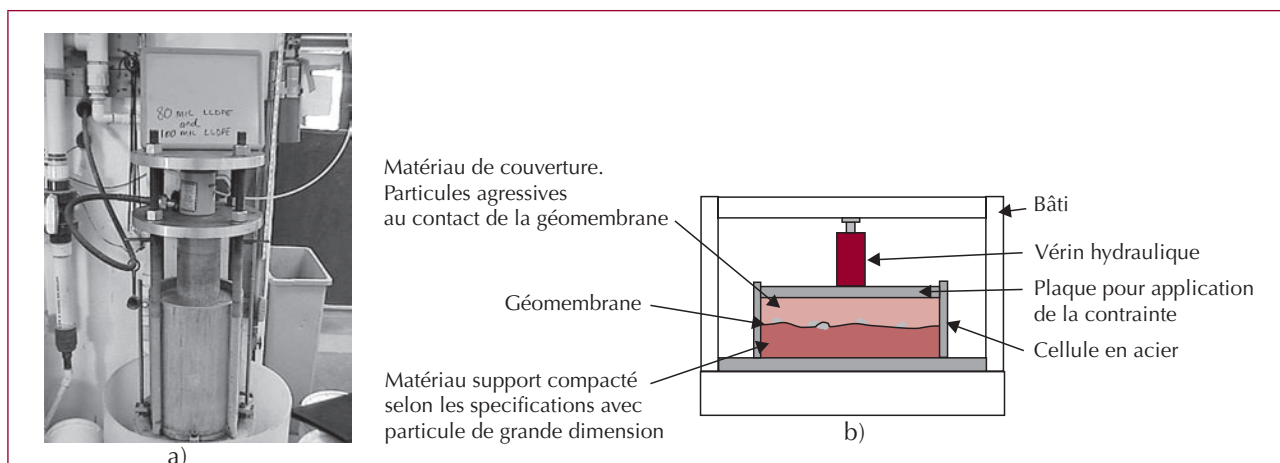
Ce type de dispositif est connu sous le nom d'essai cylindre (*cylinder test*) – (*Environmental Agency*, 2006). La procédure consiste à reproduire le dispositif d'étanchéité avec les mêmes spécifications et les mêmes matériaux que sur le terrain. En particulier, on doit trouver à la surface du sol au contact de la géomembrane, aussi bien dessus que dessous, des éléments les plus grossiers du sol (figure 15). On applique sur le dispositif la contrainte attendue sur le terrain. La durée d'essai dépend de l'application et peut atteindre mille heures. À l'issue de l'essai, on inspecte la géomembrane à la recherche de poinçonnements, visuellement et en appliquant une dépression (70 mmHg). Cette procédure (*Environmental Agency*, 2006) inclut également l'utilisation d'une feuille de plomb de manière à quantifier la déformation de la géomembrane.

À partir de retours d'expérience relatifs à l'utilisation de géomembrane sous fortes contraintes dans des sites miniers, Lupo et Morrison (2007) ont développé les recommandations présentées dans le tableau 1 pour le choix de la géomembrane en fonction de la contrainte mécanique appliquée, des caractéristiques de la fondation et des matériaux au contact de la géomembrane. Ce tableau peut être utilisé comme un point de départ pour le choix de la géomembrane (nature et épaisseur). Cependant, des essais spécifiques doivent être réalisés pour valider ce choix dans les conditions spécifiques de chaque réalisation.

Tassement de la fondation sous forte contrainte

L'application de fortes contraintes peut conduire à l'apparition de tassements importants, voire

▼ Figure 14 – Dispositif expérimental : a) photographie ; b) schéma.



► Tableau 1 - Guide général de sélection de la géomembrane pour les aires de lixiviation, d'après Lupo et Morrison (2007).

Fondation	Sol support	Matériau de couverture	Contrainte normale effective (MPa)		
			< 0,5	0,5 < < 1,2	> 1,2
Rigide	Grossier	Grossier	2 mm PEHD ou PEBD	2 mm PEBD ou PEHD	2,5 mm PEHD ou PEBD
		Grains fins	1,5 mm PEHD ou PEBD	2 mm PEBD ou PEHD	2,5 mm PEHD ou PEBD
	Grains fins	Grossier	1,5 mm PEHD ou PEBD	1,5 mm PEBD ou PEHD	2 mm PEHD ou PEBD
		Grains fins	1 mm PEHD ou PEBD	1,5 mm PEBD ou HDPE	2 mm PEHD ou PEBD
Souple	Grossier	Grossier	2 mm PEBD	2 mm PEBD	2,5 mm PEBD
		Grains fins	1,5 mm PEBD	2 mm PEBD	2,5 mm PEBD
	Grains fins	Grossier	2 mm PEBD	2 mm PEBD	2,5 mm PEBD
		Grains fins	1,5 mm PEBD	2 mm PEBD	2,5 mm PEBD

inacceptables du sol de fondation sous la géomembrane. Ces tassements peuvent conduire à des tensions dans la géomembrane qui soient inacceptables. La géomembrane est en effet un matériau dont la seule fonction est l'étanchéité. Elle n'est pas censée reprendre d'efforts mécaniques. Des exemples de systèmes d'étanchéité conçus pour des fondations compressibles sont présentés dans Dillon *et al.* (2004) et Lupo et Morrison (2005).

Une analyse peut être conduite soit analytiquement soit numériquement. Les solutions analytiques présentées par Giroud *et al.* (1990), Giroud et Soderman (1995), et Miura *et al.* (1990) constituent une approche simplificatrice qui peut être utilisée pour estimer les contraintes et les forces. Des méthodes numériques utilisant des éléments finis ou des différences finies peuvent s'avérer indispensables dans le cas de géométries complexes.

Consolidation interne

La consolidation interne désigne le tassement qui se produit dans les matériaux qui sont déposés au-dessus de l'étanchéité. Elle peut également conduire à l'apparition de tensions excessives dans la géomembrane. Ce phénomène a d'autant plus de chances de se produire que l'épaisseur du matériau, et donc la contrainte appliquée, augmentent. Dans les applications minières, il y a eu plusieurs cas de ruptures d'étanchéités sous fortes contraintes dues aux tassements (Breitenbach, 1997). Kodikara (2000) a proposé

une solution analytique pour estimer l'ampleur des tensions dans la géomembrane en lien avec la consolidation interne. Giroud (2005) a développé une approche basée sur la « co-énergie ». Liu et Gilbert (2005) ont proposé une solution graphique simplifiée pour estimer les tensions. Des méthodes numériques peuvent également être utilisées (Filz *et al.*, 2001).

Migration et atténuation à travers les GSB

L'extraction de minerais sur les aires de lixiviation va générer la formation de lixiviats contenant majoritairement des ions. Les ions ne diffusent pas à travers les géomembranes. Par contre, leur interaction avec les matériaux argileux, comme les géosynthétiques bentonitiques, peut être forte. Dans la suite, on s'intéresse donc à la migration de lixiviats issus de lixiviations de minerais dans les géosynthétiques bentonitiques. De plus, la migration de l'oxygène à travers ces matériaux sera présentée.

Conductivité hydraulique des GSB aux solutions issues des installations minières

Lange *et al.* (2007) ont étudié la capacité des GSB à atténuer les métaux et les métalloïdes provenant des eaux de drainage acide (EDA) et des solutions à pH neutre riches en arsenic associées à des résidus de mines d'or (RMO). Le GSB étudié était un GSB aiguilleté contenant

de la bentonite sodique naturelle de masse surfacique comprise entre 5,5 et 6 kg/m². La conductivité hydraulique du GSB a augmenté de $1,6 \times 10^{-11}$ m/s après cinq volumes poraux d'eau à 5×10^{-11} m/s et $1,3 \times 10^{-10}$ m/s après la perméation avec l'EDA et le RMO respectivement, après passage de 20 volumes poraux de liquide. La différence de comportement du même métal dans les différentes solutions minières testées met en évidence comment la présence de différentes espèces ioniques en solution peut compliquer le processus de transport, en produisant des combinaisons chimiques inattendues avec des effets collaboratifs ou au contraire opposés.

Impact des solutions riches en aluminium

Lake *et al.* (2007) ont étudié la conductivité hydraulique d'un GSB aiguilleté contenant de la bentonite sodique à des solutions contenant de l'aluminium. La perméation avec des solutions 0,0185 M et 0,015 M de sulfate d'alumine a été réalisée respectivement sous des contraintes normales de 56 kPa et 114 kPa. La conductivité hydraulique du GSB est restée inférieure à 5×10^{-11} m/s. Une atténuation substantielle de l'aluminium a été observée dans ces essais, sans doute en lien avec le phénomène d'échange cationique dans la bentonite. Une étude complémentaire réalisée par Benson *et al.* (2008) a montré que la perméation d'un lixiviat provenant d'une raffinerie d'aluminium après 8 volumes poraux a conduit à un impact significatif sur la conductivité hydraulique du GSB, avec des différences en fonction de la nature de la bentonite. La préhydratation a également eu une influence importante sur la conductivité hydraulique. Ces auteurs ont observé que la conductivité hydraulique du GSB contenant une bentonite sodique australienne était 60 à 800 fois plus élevée au lixiviat qu'à l'eau du robinet. Pour la bentonite calcique activée chinoise ; le ratio des conductivités hydrauliques est compris entre 120 et 390.

Diffusion et sorption des composés inorganiques dans les GSB

Ouhadi *et al.* (2006) ont étudié l'interaction entre la bentonite et plusieurs métaux lourds (zinc, plomb) à différentes concentrations et valeurs de pH. Une série d'essais d'absorption a été réalisée. Ils ont montré que la rétention des métaux lourds diminuait quand la concentration en ions H⁺ ³ augmentait. La plus forte adsorption s'est produite à des niveaux de pH supérieurs à 6. Pour des

pH inférieurs à 4 le potentiel de rétention peut décroître d'au moins 50 %.

Lake *et al.* (2007) ont étudié la diffusion de l'aluminium à une contrainte effective de 100 kPa à travers le même GSB que celui étudié pour la mesure de la conductivité hydraulique aux solutions de sulfate d'alumine. La concentration initiale en aluminium était de 0,037 M. Des essais d'immersion ont également été réalisés. Les résultats obtenus sont un coefficient de partition de 30 l/kg et un coefficient de diffusion égal à $1,5 \times 10^{-10}$ m/s. Ces essais d'immersion suggèrent une forte sorption aux faibles concentrations et une sorption non linéaire pour la gamme des sorptions étudiées.

Lange *et al.* (2007) ont étudié la capacité d'un GSB à atténuer les métaux et métalloïdes comme l'arsenic (As), l'aluminium (Al), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le fer (Fe), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le strontium (Sr) et le zinc (Zn), à partir d'EDA et de solutions à pH neutre riches en arsenic associées avec des RMO. La précipitation du gypse s'est produite dans les échantillons de RMO et a été responsable de l'atténuation du calcium et du soufre. Elle pourrait aussi être responsable de l'atténuation du cadmium et de l'arsenic. Toutefois, le cadmium reste plus mobile que les autres métaux. Lange *et al.* (2007) ont également observé la précipitation de ferrhydrite dans les échantillons d'EDA et de gypse dans les échantillons de RMO. Ces minéraux ont également été responsables de la rétention de métaux en plus de l'échange cationique qui s'est produit dans le GSB. Les coefficients de diffusion effectifs pour le nickel, le cadmium, le zinc et le manganèse donnés par Lange *et al.* (2008) varient de $7,6 \times 10^{-11}$ m²/s pour le nickel à $9,9 \times 10^{-11}$ m²/s pour le manganèse.

Diffusion d'oxygène à travers les GSB

L'objectif des systèmes de couverture dans les installations minières contenant des déchets miniers réactifs avec du sulfure est de réduire l'oxydation de ces résidus en présence d'oxygène ou d'eau. Lorsque les EDA se forment, le pH diminue progressivement d'une valeur de pH pratiquement neutre à légèrement acide, à des valeurs de très faibles pH (Renken *et al.*, 2005b). Ces liquides fortement acides peuvent dissoudre les métaux lourds résiduels encore contenus dans les déchets sulfurés et contaminer les sols et les eaux situés à proximité de l'installation. Dans la mesure où les GSB pourraient représenter une alternative aux

3. H⁺ désigne un ion hydrogène, c'est-à-dire un atome d'hydrogène ayant perdu un électron.

barrières capillaires ou aux étanchéités composites, même s'ils ne sont pas régulièrement utilisés en couverture dans les installations de stockage de résidus miniers il est important de quantifier leur performance au regard de la diffusion de l'oxygène (Bouazza et Rahman, 2007).

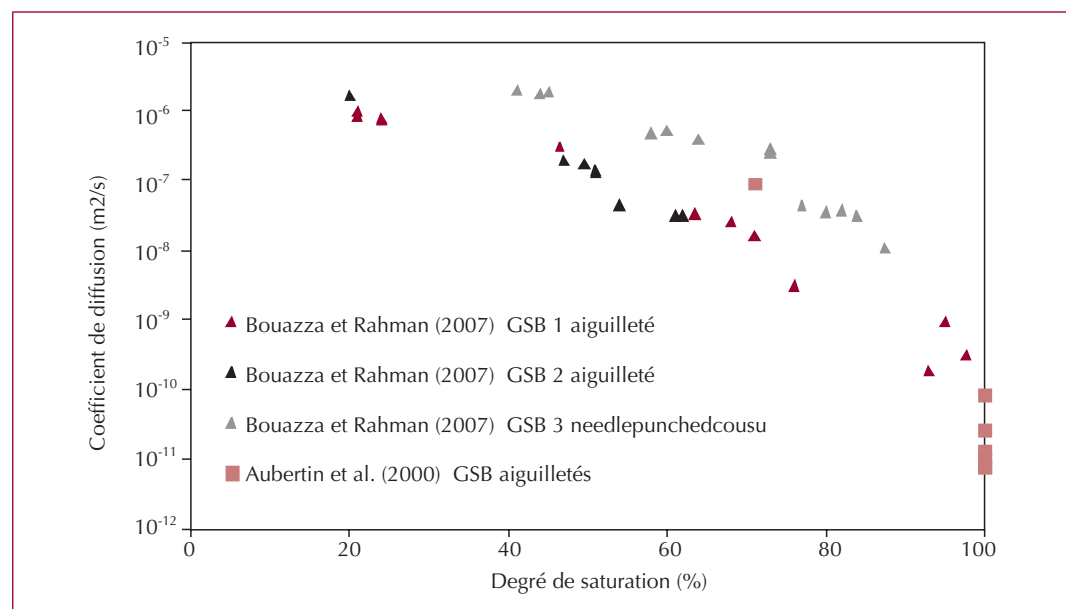
Aubertin *et al.* (2000) ont présenté les résultats d'une étude réalisée au laboratoire avec un GSB aiguilleté contenant 3,3 kg/m² de bentonite. La contrainte appliquée sur les échantillons était comprise entre 10 et 30 kPa. La plupart des mesures ont été réalisées sur des GSB totalement hydratés. Une comparaison avec les résultats obtenus à un degré de saturation égal à 71 % a mis en évidence la nécessité de maintenir le degré de saturation proche de 100 % en continu pour minimiser la diffusion de l'oxygène car le coefficient de diffusion de l'oxygène varie entre 1×10^{-7} m²/s et 2×10^{-11} m²/s dans cette gamme de degrés de saturation pour le GSB étudié.

Bouazza et Rahman (2007) ont également conduit une évaluation expérimentale sur trois GSB contenant de la bentonite sodique naturelle, en poudre ou en granulés. Deux des GSB étaient aiguilletés, et le troisième cousu. La masse par unité de surface de bentonite était comprise entre 3 et 6 kg/m². Une décroissance d'environ quatre ordres de grandeur de 2×10^{-6} à 2×10^{-10} m²/s du coefficient de diffusion de l'oxygène a été observée alors que le degré de saturation aug-

mentait de 20 à 97 % (figure 15). Le coefficient de diffusion varie de deux ordres de grandeur pour un degré de saturation variant de 20 à 80 % alors que pour un degré de saturation supérieur à 80 %, un changement de seulement 15 % du degré de saturation a permis de faire varier le coefficient de diffusion d'encore deux ordres de grandeur. Les coefficients de diffusion à travers le GSB cousu sont supérieurs à ceux observés pour les GSB aiguilletés. Ce résultat a été attribué au fait que la bentonite est partiellement confinée par la couture, mais peut gonfler librement entre les coutures. Ces résultats indépendamment du type de GSB suggèrent que le degré de saturation du GSB doit rester élevé pour que ce matériau soit une barrière effective à l'oxygène (Bouazza et Rahman 2007). La couverture doit donc être conçue en conséquence (Zanzinger et Touze-Foltz, 2009).

Différentes expérimentations ont également été réalisées *in situ* pour caractériser la performance des GSB à la diffusion de l'oxygène. Des concentrations en oxygène ont été mesurées par Renken *et al.* (2005b) sur des planches d'essai de 15 m × 15 m. Elles indiquent que le GSB utilisé contenant une masse surfacique de bentonite égale à 3,6 kg/m² était insuffisant pour prévenir la diffusion de l'oxygène. Une explication peut résider dans la dessiccation partielle du GSB pendant l'été. Adu-Wusu et Yanful (2006) ont également présenté les résultats obtenus sur une planche

► Figure 15 – Coefficient de diffusion effectif de l'oxygène dans différents GSB en fonction du degré de saturation (d'après Bouazza et Rahman, 2007).



d'essai de 12,2 m × 24,4 m contenant un GSB de 8 mm d'épaisseur. Après trois ans de mesures il s'avère que le GSB ne réduit pas significativement le gradient d'oxygène à travers la barrière. Comme la teneur en eau du GSB n'a pas été quantifiée au cours de l'expérimentation, aucune explication n'a pu être proposée. Ce sujet nécessite donc des investigations complémentaires.

Conclusion

Cet article a permis de présenter un état des lieux de l'utilisation des géosynthétiques pour les installations de traitement minières à la fois pour les aies de lixiviation, les zones de stockage de résidus de lixiviation ainsi que les stockages de stériles, aussi bien en ce qui concerne les structures d'étanchéité que de drainage. Nous avons abordé la problématique du dimensionnement et de la durabilité des systèmes drainants et d'étanchéité sous les fortes contraintes mécaniques typiquement rencontrées dans les installations

minières. Nous avons également discuté de la possibilité pour les GSB d'atténuer les métaux contenus dans les lixiviats issus des installations minières. La quantification des transferts à travers ces matériaux a également été discutée. Enfin, la problématique de la diffusion de l'oxygène en lien avec la teneur en eau du GSB a été discutée. Cette synthèse met en évidence qu'il existe des outils, qui n'ont pas pu être tous détaillés ici, mais les références bibliographiques ont été indiquées, qui permettent de dimensionner de façon certaine les dispositifs d'étanchéité drainage pour les sites minières de manière à garantir le meilleur fonctionnement possible des géosynthétiques dans ces installations. Cette synthèse a également permis de mettre en évidence qu'il existe des limites d'utilisation des géosynthétiques et que ceux-ci ne peuvent pas dans tous les cas apporter la solution. Il convient donc de réfléchir lors de la conception de l'ouvrage à l'utilité ou non des géosynthétiques en fonction des limites d'utilisation des matériaux pressentis. □

Résumé

Cet article permet, après une présentation de différentes structures à base de géosynthétiques rencontrées dans les installations minières – aires de lixiviation, zones de stockage de résidus de lixiviation ainsi que stockages de stériles, de discuter des structures d'étanchéité et de drainage mises en place dans ces structures. On aborde ensuite la problématique du dimensionnement et de la durabilité des systèmes drainants et d'étanchéité sous les fortes contraintes mécaniques typiquement rencontrées dans les installations minières. Puis on discute les transferts liquides et gazeux ainsi que l'atténuation des métaux dans les géosynthétiques bentonitiques.

Abstract

This paper aims at presenting the various lining and drainage structures including geosynthetics that can be encountered in mining applications like heap leach pads, tailing storage facilities and waste rock storage facilities. The question of design and durability of drainage and lining systems is then discussed as regards the impact of the large loads that can be encountered in mining applications. Then liquid and gas transfers are discussed together with the attenuation of metals in GCLs.

Bibliographie

- ADAMS, D.N., MUINDI, T., SELIG, E.T., 1988, *Performance of High Density Polyethylene Pipe Under High Fill*, Geotechnical Report n° ADS88-351F, Department of Civil Engineering, University of Massachusetts, Amherst.
- ADU-WUSU, C., YANFUL, E.K., 2006, Performance of engineered test covers on acid-generating waste rock at Whistle mine, Ontario, *Canadian Geotechnical Journal*, n° 43, p. 1-18.
- AUBERTIN, M., AACHIB, M., AUTHIER, K., 2000, Évaluation de diffusive gas flux through covers with a GCL, *Geotextiles and Geomembranes*, n° 18, p. 215-233.
- BALLIE, M., STUDIO, R., BREUL, B., 1999, Étanchéité de parois de terrils, in : *Rencontres Géosynthétiques 99*, p. 45-50.
- BENSON, C.H., WANG, X., GASSNER, F.W., FOO, D.C.F., 2008, Hydraulic Conductivity of two geosynthetic clay liners permeated with an alumina residue leachate, in : *Proceedings Geoamericas*, Cancun, 2-5 March 2008, p. 94-101.
- BOUAZZA, A., RAHMAN, F., 2007, Oxygen diffusion through partially hydrated geosynthetic clay liners, *Géotechnique*, 57(9), p. 767-772.
- BRACHMAN, R.W.I., 2001, Tensile stresses and the durability of PE pipes, Tailings and Mine Waste 2001, Balkema.
- BRACHMAN, R.W.I., MOORE, I.D., ROWE, R.K., 2000, The design of a laboratory facility for evaluating the structural response of small diameter buried pipes, *Canadian Geotechnical Journal*, n° 37, p. 281-295.
- BREITENBACH, A.J., 1995, Lessons learned from geomembrane liner failures under high fill loads, Geosynthetics : Lessons Learned from Failures, Industrial Fabrics Association International (IFA), Draft Manuscript.
- BREITENBACH, A.J., 1997, Overview Study of Several Geomembrane Liner Failures Under High Fill Load Conditions, in : *Proceedings Geosynthetics '97*, n° 2, p. 1045-1061.
- BREITENBACH, A.J., SMITH, M.E., 2006, Overview of geomembrane history in the mining industry, in : *Proceedings 8th International Conference on Geosynthetics*, ISBN 90 5966 044 7, p. 345-349.
- BURNS, J.Q., RICHARD, R.M., 1964, Attenuation of Stresses for Buried Conduits, in : *Proceedings Symposium on Soil-Structure Interaction*, University of Arizona, p. 378-392.
- CROUSE, P., JACOBS, B., CORSER, P., REDMOND, J., 1999, Geomembrane and GCL mining usage tests, *Geosynthetics Fabrics Report*, 17(8), 9 p.
- DILLON, M., WHITE, R., POWER, D., 2004, Tailings storage at Lisheen Mine, Ireland, *Minerals Engineering*, n° 17, p. 123-130.
- ENVIRONMENTAL AGENCY, 2006, *Methodology for cylinder testing of protectors for geomembranes on landfill sites*, Environmental Agency U.K.
- FILZ, G.M., ESTERHUIZEN, J.B., DUNCAN, J.M., 2001, Progressive Failure of Lined Waste Impoundments, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 127(10), p. 841-848.
- GIROUD, J.-P., 2005, Quantification of Geosynthetics Behavior, *Geosynthetics International*, Special Issue on Giroud Lectures, 12(1), p. 2-27.
- GIROUD, J.-P., BADU-TWENEBOAH, K., SODERMAN, K.L., 1995, Theoretical analysis of geomembrane puncture, *Geosynthetics International*, 2 (6), p. 1019-1048.
- GIROUD, J.-P., BONAPARTE, R., BEECH, J.F., GROSS, B.A., 1990, Design of soil layer-geosynthetics systems overlying voids, *Geotextile and Geomembranes*, n° 9, p. 11-50.

GIROUD, J.-P., SODERMAN, K.L., 1995, Comparison of geomembranes subjected to differential settlement, *Geosynthetics International*, 2(6), p. 953-969.

HÖEG, K., 1968, Stresses Against Underground Structural Cylinders, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, 94(SM4), p. 833-858.

ICOLD, 1994, *Tailings dams – Design of drainage*, ICOLD Bulletin 097-1994, 121 p.

KATONA, M.G., 1988, Allowable fill heights for corrugated polyethylene pipe, *Transportation Research Record 1191*, p. 30-38.

KODIKARA, J.K., 2000, Analysis of tension development in geomembranes placed on landfill slopes, *Geotextiles and Membranes*, n° 18, p. 47-61.

LAFLEUR, J., MLYNAREK, J., ROLLIN, A.L., 1989, Filtration of Broadly Graded Cohesionless Soils, *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, 115 (12), p. 1747-1768.

LAKE, C.B., CARDENAS, G., GOREHAM, V., GAGNON, G.A., 2007, Aluminium migration through a geosynthetic clay liner, *Geosynthetics International*, 14(4), p. 201-210.

LANGE, K., ROWE, R.K., JAMIESON, H., 2007, Metal retention in geosynthetic clay liners following permeation by different mining solutions, *Geosynthetics International*, 14(3), p. 178-187.

LANGE, K., ROWE, R. K., JAMIESON, H., 2008, The potential role of geosynthetic clay liners in acidic rock drainage treatment systems, in : *Proceedings Geoamericas*, Cancun, 2-5 March 2008, p. 1509-1515.

LEFEBVRE, G., LALIBERTÉ, M., LEFEBVRE, L.M., LAFLEUR, J., FISHER, C.L., 1976, Measurement of soil arching above a large diameter flexible culvert, *Canadian Geotechnical Journal*, 13(58), p. 58-71.

LIU, C.N., GILBERT, R.B., 2005, Graphical solution for estimating geosynthetic load in geosynthetic-soil layered systems on slopes, *Geosynthetics International*, 12 (4), p. 208-214.

LUETTICH, S.M., GIROUD, J.P., BACHUS, R.C., 1992, Geotextile Filter Design Guide, *Geotextiles and Geomembranes*, n° 11, p. 355-370.

LUPO, J.F., 2001, *Stability of HDPE pipes under high heap loads*, Society of Mining Engineers Annual Meeting, Denver, Colorado, Preprint 01-102, 8 p.

LUPO, J.F., MORRISON, K.F., 2005, Innovative geosynthetic liner design approaches and construction in the mining industry, in : *Proceedings of the ASCE Geo-Frontiers*, Austin, Texas, 24-26 January, 16 p.

LUPO, J.F., MORRISON, K.F., 2007, Geosynthetic design and construction approaches in the mining industry, *Geotextiles and Geomembranes*, n° 25, p. 96-108.

MARSTON, A., ANDERSON, A.O., 1913, The theory of loads on pipes in ditches and test of cement and clay drain tile and sewer pipe, *The Iowa State College Bulletin*, n° 31, volume XI, Iowa Engineering Experiment Station, Iowa State College.

MIURA, N., SAKAI, A., TAESIRI, Y., YAMANOUCHI, T., YASUHARA, K., 1990, Polymer grid reinforced pavement on soft clay grounds, *Geotextiles and Geomembranes*, 9(1), p. 99-123.

OUHADI, V.R., YONG, R.N., SEDIGHI, M., 2006, Desorption response and degradation of buffering capability of bentonite subjected to heavy metal contaminants, *Engineering Geology*, n° 85, p. 102-110.

REEVE, R.C., SLICKER, R.E., LANG, T.J., 1981, Corrugated Plastic Tubing, in : *Proceedings International Conference Underground Plastic Pipe*, ASCE, New Orleans, Louisiana, p. 227-242.

RENKEN, K., MCHAINA, D.M., YANFUL, E.K., 2005a, *Geosynthetics research and applications in the mining and mineral processing environment*, NAGS 2005/GRI 19 Conference, 20 p.

- RENKEN, K., YANFUL, E.K., MCCHAINA, D.M., 2005b, *Effective oxygen diffusion coefficient and field oxygen concentrations below a geosynthetic clay liner covering mine tailings*, *Waste Containment and Remediation*, ASCE Geotechnical Special Publication n° 142. Austin, TX, 16 p.
- RENKEN, K., MCHAINA, D., YANFUL, E., 2007, Use of geosynthetics in the mining and mineral process industry, Nags award of merit, *Geosynthetics*, 25(4), p. 38-42.
- ROWE, R.K., 2007, Advances and remaining challenges for geosynthetics in geoenvironmental engineering applications, in : *23rd Manual Rocha Lecture Soils and Rocks*, 30(1), p. 3-30.
- SARGAND, S.M., HAZEN, G.A., FERNANDO, M.E.R., HURD, J.O., 1993, Field Performance of a Corrugated HDPE Pipe, in : *Transportation Research Board, 72nd Annual Meeting*, Washington, D.C., Paper 93-0514, 15 p.
- SELIG, E.T., 1990, Soil properties for plastic pipe installations, in : *Proceedings of the Symposium on Buried Plastic Pipe Technology*, ASTM, STP 1093, p. 281-293.
- SHERARD, J.L., DUNNIGAN, L.P., TALBOT, J.R., 1984, Filters for silts and clays, *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(6), p. 701-718.
- SHERCLIFF, D.A., 1998, Designing with the cylinder test, in : *Proceedings of the Polluted and Marginal Land Conference*, Brunel University, London.
- THIEL, R.S., SMITH, M.E., 2004, *State of the practice review of heap leach pad design issues*, *Geosynthetics* 25(2), Industrial Fabrics Association International (IFAI), 17 p.
- TOUZE-FOLTZ, N., LUPO, M., BARROSO, M., 2008, *Geoenvironmental applications of geosynthetics*, Keynote Lecture, *Proceedings Eurogeo 4*, 98 p.
- USDA, 1990, *Design and Installation of Flexible Conduits – Plastic Pipe*, Soil Conservation Service, Technical Release n° 77.
- VALSANGKAR, A.J., BRITTO, A.M., 1978, *The validity of ring compression theory in the design of flexible buried pipes. Supplementary Report 440*, Earthworks and Underground Pipes Division, Structures Department, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire ISSN 0305-1315.
- WATKINS, R.K., 1990, Plastic Pipes Under High Landfills. Buried Plastic Pipe Technology, *ASTM STP 1093*, George S. Buczala and Michael J. Cassady, Eds.
- WATKINS, R.K., DWIGGINS, J.M., ALTERMATT, W.E., 1987, Structural Design of Buried Corrugated Polyethylene Pipes, in : *Transportation Research Record 1129*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 12-20.
- WATKINS, R.K., REEVE, R.C., 1979, Structural Performance of Buried Corrugated Polyethylene Tubing, in : *Thirtieth Annual Highway Geology Symposium*, FHA, Portland, Oregon, 12 p.
- WILLARDSON, L.S., WATKINS, R.K., 2002, Minimum-risk bedding for flexible drain pipes, *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, ASCE, 128(2), p. 74-77.
- ZANZINGER, H., TOUZE-FOLTZ, N., 2009, Performance des géosynthétiques bentonitiques en couverture d'installation de stockage de déchets : état des connaissances et proposition de méthodologie, *Ingénieries-EAT*, numéro spécial Les géosynthétiques : des outils pour réduire les risques de pollution et protéger l'environnement, p. 83-92.
- ZHAN, C., RAJANI, B., 1997, Load transfer analysis of buried pipe in different backfills, *Journal Transportation Engineering*, ASCE, 123(6), p. 447-453.