

PRÉDICTION DES DÉBITS DE FUITE A L'ÉCHELLE DU TERRAIN AU TRAVERS DES ÉTANCHÉITÉS COMPOSITES COMPRENANT UN GSB

LEAKAGE FLOW PREDICTION THROUGH COMPOSITE LINERS INCORPORATING GCLs AT FIELD SCALE

Fethi SAIDI¹, Nathalie TOUZE-FOLTZ¹, Patrick GOBLET²

¹ Unité HBAN, Cemagref, BP 44, 92163 Antony Cedex, France

² Centre d'informatique géologique, Ecole des Mines de Paris, France

RÉSUMÉ – L'objet de cette étude est de présenter les résultats d'une quantification numérique des transferts advectifs, à l'échelle du terrain, au travers des étanchéités composites comprenant un géosynthétique bentonitique. Deux types de défauts ont été considérés : des défauts circulaires et des défauts longitudinaux. L'article présente les résultats obtenus pour une barrière partiellement saturée, en termes de débits de fuite et de dimension de la surface d'infiltration. Ces résultats sont comparés aux prédictions données par les solutions analytiques. Une bonne adéquation est obtenue en ce qui concerne les débits. Des écarts plus importants sont observés pour la surface d'infiltration, liés à la saturation partielle de la barrière.

Mots-clés: transfert advectif, défauts, géosynthétique bentonitique, géomembrane, interface.

ABSTRACT – The purpose of this work is to present the results of a numerical quantification of the leakage flow through a composite liner incorporating a GCL at field scale. Two types of defects were considered: circular holes and longitudinal defects. The paper presents the results obtained for a partially saturated liner, in terms of flow rate and size of the wetted area. These results are compared to the predictions given by analytical solutions. A good agreement is obtained as regards flow rates. Larger differences between numerical and analytical results were observed for the wetted area, attributed to the partial saturation of the liner.

Keywords: Advective transfer, defect, geosynthetic clay liner, geomembrane, interface.

1. Introduction

Les structures d'étanchéité-drainage mises en place dans les installations de stockage de déchets (ISD) sont destinées à assurer la protection des sols et des eaux souterraines contre la pollution engendrée par les lixiviats issus de la percolation des eaux de pluie à travers les déchets ménagers domestiques. La réglementation impose que les dispositifs d'étanchéité de fond d'ISD soient formés d'une barrière de sécurité passive surmontée d'une barrière de sécurité active. La barrière de sécurité passive est constituée en général d'une couche de matériau argileux ; la barrière de sécurité active comprend une géomembrane surmontée d'une couche drainante constituée de granulats. La barrière de sécurité active assure la collecte des lixiviats et évite ainsi la sollicitation hydraulique de la barrière de sécurité passive. Lorsque la barrière passive en place n'est pas conforme à la réglementation, les matériaux argileux peuvent moyennant une démonstration d'équivalence être partiellement remplacés ou renforcés par des géosynthétiques bentonitiques (GSB). C'est ce cas de figure qui est étudié ici.

L'association d'une étanchéité minérale et d'une étanchéité synthétique, formant ce que l'on dénommera par la suite dispositif d'étanchéité composite, n'apporte pas cependant une solution parfaite aux problèmes de protection des sols et des nappes. Il s'avère en effet que les géomembranes d'ISD présentent fréquemment des défauts et endommagements, soit au niveau des soudures entre lés de géomembrane, soit dans les lés eux-mêmes. Des études récentes estiment la densité moyenne de défauts dans la géomembrane de l'ordre de la dizaine à l'hectare (Colucci et Lavagnolo, 1995 ; Peggs, 2001). La présence de ces défauts dans la géomembrane représente pour les lixiviats des passages préférentiels d'écoulement.

La surface de la barrière passive en contact avec les lixiviats au niveau des défauts dans la géomembrane est soumise à une charge hydraulique. En outre, il est admis que le contact entre la géomembrane et la barrière passive n'est pas parfait (Fukuoka, 1986 ; Brown et al. 1987). L'espace compris entre les deux matériaux, appelé interface, provoque alors l'existence d'une surface d'infiltration

du lixiviat dans la barrière passive bien supérieure à l'aire du défaut dans la géomembrane. Ces écoulements à l'interface ont été observés dans plusieurs travaux expérimentaux (Brown et al., 1987 ; Barroso et al., 2006a). Des solutions analytiques (Rowe, 1998 ; Touze-Foltz et al., 1999) et d'équations empiriques (Touze-Foltz et Barroso, 2006) permettent de prédire les débits de fuite dans les étanchéités composites comprenant un géosynthétique bentonitique. Ces solutions ne sont valides que dans le cas où la barrière minérale et l'interface sont saturées. Le premier objectif de cet article est d'étudier l'impact d'une saturation partielle de la barrière minérale sur le débit de fuite et la surface d'infiltration résultant de la présence d'un défaut dans la géomembrane. Le second objectif est une quantification numérique des transferts advectifs au travers des étanchéités composites qui sera comparée aux résultats obtenus par les solutions analytiques et les équations empiriques. Ce travail a été effectué pour deux configurations de défauts : des défauts circulaires, et des défauts longitudinaux, qui peuvent être soit des fentes longitudinales, soit des plis endommagés.

Dans la section 2 de cet article, nous présenterons les caractéristiques de l'étanchéité composite étudiée. La section 3 sera consacrée à la présentation de l'outil de modélisation utilisé. Enfin, dans la section 4, nous présenterons les résultats de l'étude de l'influence de la présence d'un défaut dans la géomembrane sur le débit de fuite et la surface d'infiltration résultante.

2. Caractéristiques de l'étanchéité composite étudiée

Le dispositif d'étanchéité composite est modélisé comme l'association de trois milieux poreux : une couche d'argile compactée, un GSB et l'interface entre la géomembrane et le GSB. Dans les cas étudiés où la géomembrane présente un défaut circulaire, une géométrie axisymétrique a été adoptée, alors qu'une géométrie bidimensionnelle a été retenue pour les cas comprenant des défauts longitudinaux. Le système étudié a un rayon de 2m pour le cas de la géométrie axisymétrique, alors qu'il s'étend sur 2m de longueur pour la géométrie bidimensionnelle.

L'épaisseur de la couche d'argile compactée étudiée est de 1m et sa conductivité hydraulique a été fixée à 10^{-9}m.s^{-1} , ce qui est en accord avec la réglementation française. Une épaisseur de 9mm a été retenue pour le GSB et une conductivité hydraulique du GSB égale à $3,7 \times 10^{-11} \text{m.s}^{-1}$. Ces deux valeurs ont été mesurées sur des échantillons de GSB par Barroso et al. (2006a).

2.1. Type et dimensions des défauts

Les dimensions des défauts dans la géomembrane souvent utilisées dans les calculs de prédiction de fuite sont basées sur les recommandations de Giroud et Bonaparte (1989) qui indiquent des défauts circulaires de 2mm et 1cm de diamètre. Ces valeurs s'avèrent sous-estimer de façon importante les défauts relevés sur site par d'autres auteurs. L'étude des données publiées par Colucci et Lavagnolo (1995) et Peggs (2001) révèle qu'il existe des défauts dans les géomembranes de toutes dimensions, de 1mm à plus de 1m de long et de toutes surfaces, de moins d' 1cm^2 à plusieurs milliers de cm^2 . Rollin et al. (2002) indiquent que 80% des défauts relevés dans leurs études sont de surface inférieure à 500mm^2 . A partir des données bibliographiques de dimension des défauts dans la géomembrane, des paramètres dimensionnels concordant avec les études citées ont été retenus. Ces paramètres sont :

- défauts circulaires de rayon variant de 1,5mm à 14mm ;
- fentes longitudinales ou plis endommagés de largeur variant de 10mm à 70cm.

2.2. Charge hydraulique appliquée

La charge hydraulique appliquée sur le système d'étanchéité ne doit pas excéder 0,3m selon la réglementation française. Dans l'optique d'étudier des scénarios de défaillance du système de drainage, nous avons augmenté dans nos calculs les valeurs de charges. Des valeurs de charge de 0,3m, 1m, 2m et 3m ont été étudiées afin de permettre la comparaison. Cette gamme est de plus en bon accord avec les niveaux de lixiviats dans les casiers que l'on peut rencontrer dans les ISD (Rowe, 1998).

2.3. Transmissivité d'interface

Les résultats numériques ont été obtenus en considérant les deux valeurs extrêmes de la transmissivité mesurée par Barroso et al. (2006a) à savoir $1,5 \times 10^{-11} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et $7,3 \times 10^{-11} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

2.4. Paramètres hydrauliques non-saturés des éléments constitutifs de l'étanchéité composite

L'interface, le sol argileux et le GSB sont définis dans le modèle comme trois milieux poreux distincts. Pour représenter les lois de comportement hydrodynamique de ces milieux non saturés, nous avons utilisé le modèle de Mualem et Van Genuchten. Ce modèle caractérise le matériau par deux paramètres α et n . Outre la porosité et les paramètres de Van Genuchten, d'autres paramètres hydrodynamiques de ces milieux sont nécessaires au modèle pour réaliser des simulations numériques. Ces paramètres sont : le degré de saturation initial et les teneurs en eau à saturation et résiduelle. Un résumé de l'ensemble du jeu de paramètres utilisés dans les simulations figure dans le tableau I.

Tableau I. Résumé du jeu de paramètres utilisés dans les simulations.

Charge hydraulique (m)	0,3 -1 -2 -3		
Milieu	Sol	GSB	Interface
Epaisseur (m)	1	0,009 ^d	$2,64 \times 10^{-6} - 4,47 \times 10^{-6}$ ^d
Conductivité à la saturation (m/s)	8×10^{-11}	$3,7 \times 10^{-11}$ ^d	$5,7 \times 10^{-6} - 1,63 \times 10^{-5}$ ^d
Porosité	0,4 ^a	0,74 ^b	0,68 ^a
Degré initial de saturation	0,8 ^a	0,1 -0,2 ^d	0,00015 ^e - 0,0018 ^e
Teneur en eau résiduelle	0	0	0
Teneur en eau à saturation	0,4 ^a	0,7 ^b	0,68 ^a
Paramètres de Van Genuchten			
Paramètre α (kPa ⁻¹)	0,196 ^c	0,018 ^d	30 ^a
Paramètre n	1,26 ^c	1,67 ^d	2,12 ^a

^aCartaud et al. (2005) ; ^bSouthen et Rowe (2004); ^cTinjum et al. (1997); ^dBarroso et al. (2006b);

^e Valeurs calculées de façon à obtenir équilibre de succion entre le GSB et l'interface au début de la simulation.

3. Modèle d'écoulement et conditions aux limites

3.1. Description du code numérique

Le code de calcul Metis, développé au Centre d'informatiques géologique de l'Ecole des Mines de Paris, permet la simulation d'écoulement et de transport miscible en milieu poreux et fracturé en utilisant la méthode des éléments finis. Les calculs sont effectués soit en régime permanent, soit en régime transitoire. Il permet aussi de traiter les problèmes en 1, 2 et 3 dimensions. Le critère qui a conduit à utiliser Metis plutôt qu'un autre code était sa capacité à intégrer à son maillage des éléments monodimensionnels qui permettent de caractériser l'interface par une transmissivité et un coefficient d'emmagasinement sans que l'épaisseur intervienne spécifiquement. L'épaisseur de ces éléments peut néanmoins être fournie explicitement et est utilisée pour le calcul des flux, mais elle est « fictive ».

Dans la présente étude, l'écoulement dans un milieu poreux non saturé est modélisé en utilisant l'équation de Richards (Richards, 1931). La résolution de l'équation de Richards, en conditions non-saturées est un processus itératif dont la recherche d'une solution est accélérée dans Metis par une initialisation adéquate des variables charge hydraulique, succion et saturation. La technique de résolution est classique, elle fait appel à la méthode des éléments finis. La discrétisation spatiale suit une approche de Galerkin standard et la discrétisation temporelle utilise une formulation de Crank-Nicholson avec une sélection automatique du pas de temps. Le mode de traitement des non-linéarités par défaut est de type P-(NR) : la première itération d'un pas de temps est de type Picard, puis Newton-Raphson. Le nombre maximum d'itérations, des critères de convergence sur les potentiels ou sur les résidus peuvent être modifiés afin d'accélérer la convergence des calculs en conditions non-saturées. Pour des problèmes en 2D comme ceux traités dans cette étude, des éléments avec 4 nœuds sont utilisés dans la discrétisation du domaine représentant l'étanchéité composite, et des éléments segmentaires (à 2 nœuds) pour représenter l'interface.

3.2. Maillage

Un maillage irrégulier a été utilisé pour discrétiser le domaine étudié. Ce maillage est composé d'éléments quadrilatères de taille variable, raffinés au niveau du défaut et dont la dimension augmente régulièrement de 1,5mm à 8cm suivant les directions x et y, au fur et à mesure que l'on s'éloigne du défaut. L'interface a été représentée par des éléments monodimensionnels qui partagent les nœuds du maillage avec la limite supérieure du domaine barrière minérale.

3.3. Conditions aux limites

Une charge hydraulique est appliquée au niveau des nœuds décrivant la discontinuité dans la géomembrane. Sur la frontière droite du système, à l'opposé du défaut, une condition limite de type suintement est appliquée à tous les nœuds de la frontière droite du domaine barrière minérale (GSB+argile) ainsi qu'au dernier nœud de l'interface, celui est situé à l'opposé du défaut comme il est indiqué dans la figure 1. A la base du système, une condition de pression nulle est appliquée sur tous les nœuds et seuls les flux sortants sont admis, simulant ainsi la présence du toit d'une nappe aquifère sous la barrière d'étanchéité. Enfin, des conditions limites imperméables ont été imposées sur l'axe ou le plan de symétrie du système.

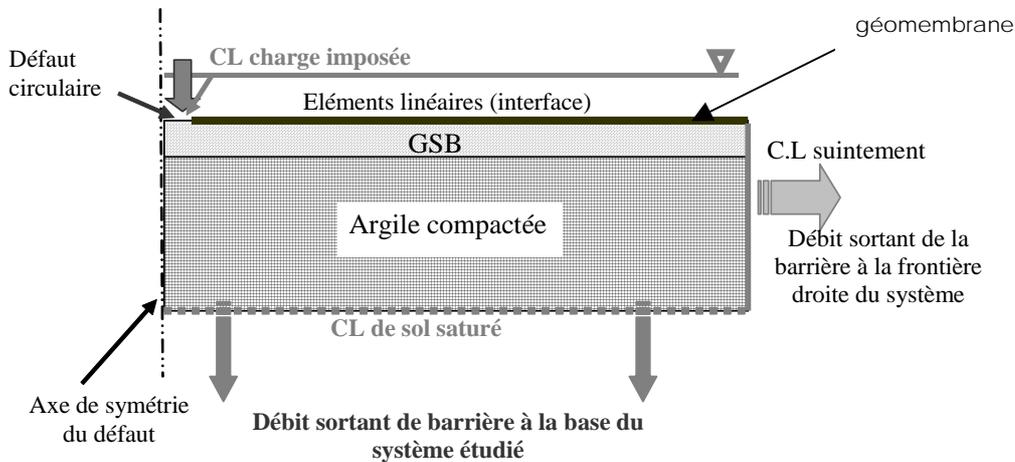


Figure 1. Schéma du système d'étanchéité composite (géomembrane, GSB et sol argileux) tel que représenté dans le modèle

4. Résultats et discussion

4.1 Influence de la présence d'un défaut circulaire

La figure 2 présente l'évolution du débit de fuite en fonction de la taille du défaut circulaire pour différentes valeurs de la charge hydraulique appliquée à l'étanchéité composite.

La figure 2 montre que la tendance est à l'augmentation du débit de fuite avec la taille du défaut. On constate aussi que le débit de fuite est proportionnel à la charge hydraulique. Ces résultats numériques corroborent les observations expérimentales de Koerner & Koerner (2002) et de Barroso et al. (2006a).

Les résultats d'écoulements simulés ont été comparés aux flux obtenus en utilisant la solution analytique proposée par Touze-Foltz et al. (1999) supposant que la barrière est saturée donnée par l'équation 1 :

$$Q = \pi r_0^2 k_s i + 2\pi r_0 T (h_w + C) \frac{\Omega_{\alpha,1,1}(R_C, r_0)}{\Omega_{\alpha,0,1}(r_0, R_C)} \quad (1)$$

avec i le gradient hydraulique appliqué sur la barrière minérale au niveau du défaut, r_0 le rayon du défaut, k_s la moyenne harmonique des conductivités hydrauliques de l'étanchéité minérale d'épaisseur H_l et de la couche de fondation d'épaisseur H_f , T la transmissivité de l'interface, h_w la charge hydraulique, C (égal à $H_f + H_l$), α (égal à $[k_s / ((H_f + H_l)T)]^{0.5} \text{ m}^{-1}$) et $\Omega_{\alpha,n,m}$ une convention de notation correspondant à :

$$\{\Omega_{\alpha,n,m}(x,y) = I_n(\alpha x)K_m(\alpha y) - I_m(\alpha y)K_n(\alpha x) \text{ si } m+n \text{ est pair} \quad (2)$$

$$\{\Omega_{\alpha,n,m}(x,y) = I_n(\alpha x)K_m(\alpha y) + I_m(\alpha y)K_n(\alpha x) \text{ si } m+n \text{ est impair} \quad (3)$$

où I_n est la fonction modifiée de Bessel d'ordre n et de première espèce et K_m est la fonction modifiée de Bessel d'ordre m et de troisième espèce ou fonction de MacDonald.

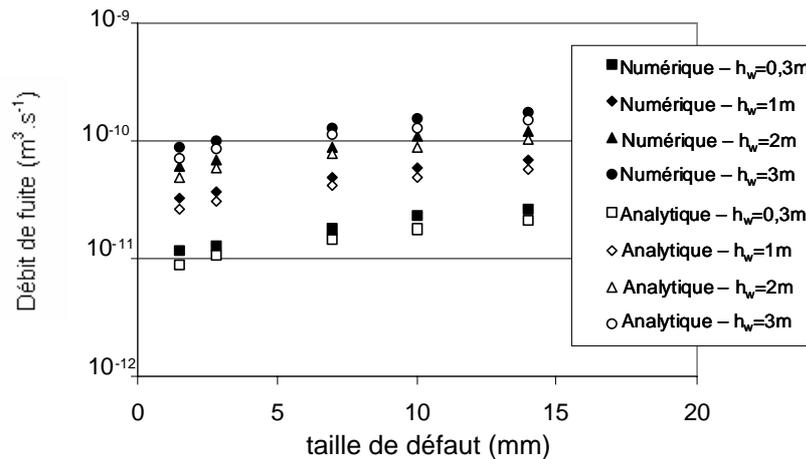


Figure 2. Evolution du débit de fuite en fonction de la taille du défaut circulaire pour différentes valeurs de la charge hydraulique et en considérant la valeur de la transmissivité minimale de l'interface

La comparaison des deux débits (simulés et ceux obtenus avec la solution analytique) montre qu'ils sont très proches. En effet, l'écart le plus élevé constaté est de l'ordre de 13%. Cette différence est à attribuer à l'hypothèse de saturation initiale de la barrière qui est considérée dans la solution analytique. Il est important de souligner ici que cette hypothèse ne correspond ni aux conditions de terrain ni aux conditions initiales de saturation considérées dans notre modélisation.

Les débits simulés ont été par la suite comparés aux débits prédits par l'équation empirique de Touze-Foltz et Barroso (2006). Cette dernière est donnée par l'expression suivante :

$$Q = 2 \times 10^{-4} h_w^{0,87} a^{0,07} k_s^{0,64} \left[1 + 0,31 \left(\frac{h_w}{H_f + H_l} \right)^{0,79} \right] \quad (4)$$

Les résultats de la comparaison montrent des écarts très importants entre les deux débits (de l'ordre de 85%). Ainsi, l'équation empirique de Touze-Foltz et Barroso (2006) surestime largement le débit de fuite. Notons aussi que ces écarts sont d'autant plus élevés que la transmissivité de l'interface est faible. Ceci est logique car l'objectif des équations empiriques développées était de disposer d'une borne supérieure pour les débits de fuite dans les étanchéités composites comprenant un GSB.

Nous en déduisons que pour la prédiction des débits de fuite résultants de la présence de défauts circulaires dans la géomembrane, la solution analytique de Touze-Foltz et al. (1999) constitue un outil approprié capable d'estimer correctement les transferts advectifs au travers des étanchéités composites comprenant un géosynthétique bentonitique.

Sur la figure 3 est représentée l'évolution du rayon de la surface d'infiltration en fonction de la taille du défaut pour différentes valeurs de la charge hydraulique. On constate que le rayon de la surface d'infiltration croît avec l'augmentation de la taille du défaut et avec la charge hydraulique.

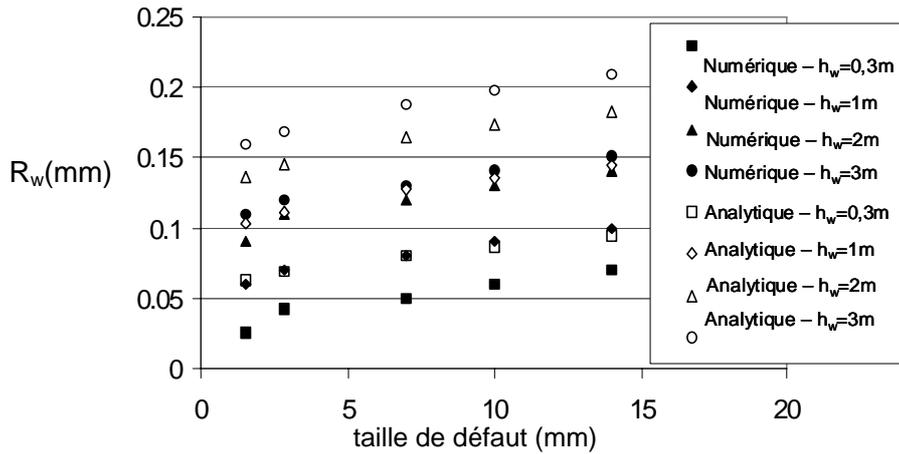


Figure 3. Evolution du rayon de la surface d'infiltration (R_w) en fonction de la taille du défaut circulaire pour différentes valeurs de la charge hydraulique

Le rayon de la surface d'infiltration simulé a été ensuite comparé au rayon d'infiltration obtenu en utilisant la solution analytique de Touze-Foltz et al. (1999) donnée par l'équation implicite suivante :

$$p(r_0) = \frac{\rho g k_s R^2}{4T} \left[2 \ln \left(\frac{R}{r_0} \right) + \frac{r_0^2}{R^2} - 1 \right] \quad (5)$$

Où, p est la pression dans l'interface, ρ la masse volumique du liquide, r_0 est le rayon du système étudié et R le rayon de la surface d'infiltration.

Les résultats de la comparaison des deux rayons d'infiltration (simulé et obtenu à partir de la solution analytique) montrent qu'il y a un grand écart entre les deux. Cette différence s'explique par l'hypothèse de saturation initiale de la barrière et de l'interface considérée dans la solution analytique. On constate aussi que la différence entre le rayon d'infiltration simulé et celui obtenu avec la solution analytique tend à décroître avec l'augmentation de la taille du défaut et de la charge hydraulique appliquée à l'étanchéité composite, au fur et à mesure que l'on se rapproche de conditions saturées dans l'étanchéité minérale.

4.2 Influence de la présence d'un défaut longitudinal

Sur la figure 4 est représentée l'évolution du débit de fuite avec la taille du défaut longitudinal pour différentes valeurs de la charge hydraulique.

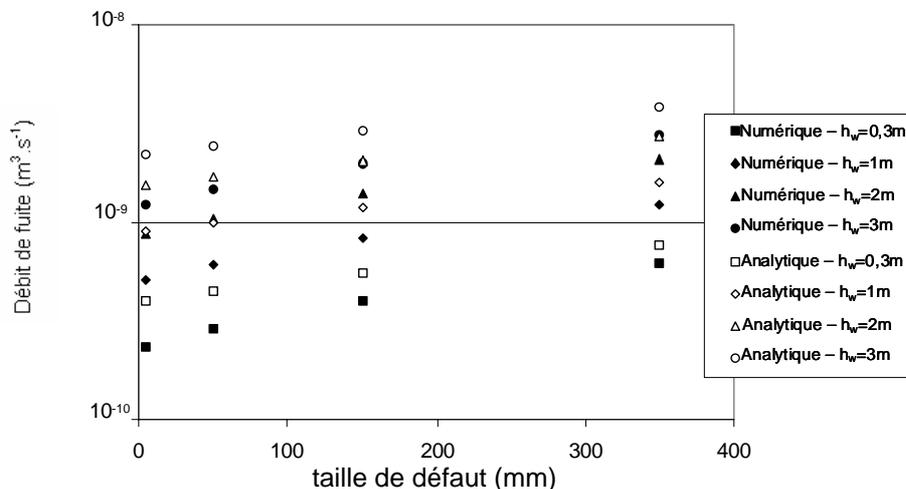


Figure 4. Evolution du débit de fuite en fonction de la taille du défaut longitudinal pour différentes valeurs de la charge hydraulique et en considérant la valeur de la transmissivité maximale de l'interface

Comme pour le cas axisymétrique, la tendance est aussi à l'augmentation du débit de fuite avec la taille du défaut longitudinal et la charge hydraulique. Les débits simulés ont été par la suite comparés aux débits obtenus à partir de la solution analytique de Touze-Foltz et al. (1999) pour une géométrie bidimensionnelle donnée par l'équation (6)

$$Q = 2 \times k_s \times i_s \left[b + \frac{1}{\alpha} \tanh \left[\cosh^{-1} \left(\frac{h_w + C}{C} \right) \right] \right] \quad (6)$$

Où, b est la demi-largeur du défaut longitudinal, i_s est le gradient hydraulique maximal dans l'étanchéité.

On constate aussi que les écarts entre les débits simulés et les débits calculés à partir de la solution analytique de Touze-Foltz et al. (1999) sont plus élevés que pour le cas axisymétrique. Enfin, on constate que les écarts entre les deux débits tendent à diminuer avec l'augmentation de la taille du défaut. En effet, plus la taille du défaut augmente, plus on se rapproche de la condition de saturation de toute l'interface et de l'étanchéité minérale.

La figure 5 présente l'évolution de la largeur de la surface d'infiltration en fonction de la taille du défaut.

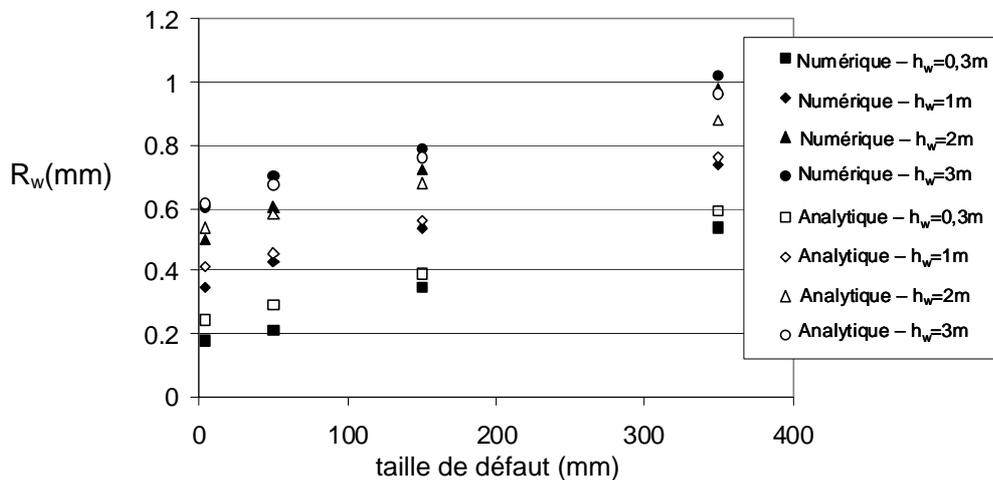


Figure 5. Evolution de la largeur de la zone d'infiltration (X_w) en fonction de la taille du défaut longitudinal pour différentes valeurs de la charge hydraulique

La figure 5 montre que la surface d'infiltration augmente avec l'augmentation de la taille du défaut et de la charge hydraulique. On constate que la largeur de la surface d'infiltration semble être plus affectée par une variation de la charge hydraulique appliquée à l'étanchéité composite. On note aussi que les écarts entre la largeur de la surface d'infiltration simulée et celle déterminée à partir de la solution analytique de Touze-Foltz et al. (1999), donnée par l'équation 7, tend à diminuer avec l'augmentation de ces deux paramètres. Enfin, les écarts entre la largeur de la surface d'infiltration simulée et celle déterminée à partir de la solution analytique tendent à diminuer avec l'augmentation de la charge hydraulique appliquée à l'étanchéité composite.

$$X_c = b - \frac{1}{\alpha} \ln \left[\frac{C}{C + h_w} \right] \quad (7)$$

Nous en déduisons que la solution analytique pourrait être utilisée pour estimer les débits de fuite résultants de la présence d'un défaut longitudinal dans la géomembrane d'une étanchéité composite comprenant un GSB. Les prédictions données par la solution analytique sont d'autant plus correctes que la charge hydraulique et la taille du défaut sont élevées.

5. Conclusion

Les principaux résultats tirés de cette étude sont les suivants: (1) le modèle d'écoulement utilisé permet de simuler les écoulements dans les interfaces des étanchéités composites comprenant un GSB; (2) les écarts entre les débits et les surfaces d'infiltration simulés avec ceux obtenus en utilisant les solutions analytiques pourraient être expliqués par l'hypothèse considérée lors de l'établissement des solutions analytiques, qui est que la barrière est saturée; et (3) la solution analytique développée par Touze-Foltz et al. (1999) constitue un outil approprié pour estimer les transferts advectifs au travers des étanchéités composites comprenant un GSB.

Les résultats de notre étude montrent aussi que les méthodes empiriques constituent une approche pouvant être utilisée compte tenu qu'elles se placent du côté de la sécurité en surestimant les débits de fuite au travers des défauts dans la géomembrane.

6. Références bibliographiques

- Barroso M., Touze-Foltz N., von Maubeuge K., Pierson P. (2006a) Laboratory investigation of flow rate through composite liners consisting of a geomembrane, a GCL and a soil liner, accepted to *Geotextiles and Geomembranes*, 16 January 2006.
- Barroso M., Touze-Foltz N., Saidi F. (2006b) Validation of the use of filter paper suction measurements for the determination of GCLs retention curves. *8th International Conference on Geosynthetics*, Yokohama, Japan, September 18-22, 4 pages.
- Brown K.W., Thomas J.C., Lytton R.L., Jayawickrama P., Bhart S. (1987) Quantification of leakage rates through holes in landfill liners, USEPA Report CR810940, Cincinnati, OH, 147 p.
- Cartaud F., Goblet P., Touze-Foltz N. (2005) Numerical study of advective flow through composite liners. *Geosynthetics International* 12(6), 299-309.
- Colucci P., Lavagnolo M.C. (1995) Three years field experience in electrical control of synthetic landfill liners. *Proceedings of the Sardinia 95 Conference*, Cagliari, Italie (2), 437-452.
- Fukuoka M. (1986) Large scale permeability test for geomembrane subgrade system. *3rd International Conference on Geotextiles*, Vienna, Austria, 917-922.
- Giroud J.P., Bonaparte R. (1989) Leakage through liners constructed with geomembranes – Part II, *Geotextiles and Geomembranes* (8), 71-111.
- Koerner G.R., Koerner, R.M. (2002) Geomembrane leakage arising from broken needles with GCLs. *Proceedings of the International Symposium IS Nuremberg 2002*, Nuremberg, Germany, pp. 209-217.
- Peggs I.D. (2001) Three challenging electrical integrity/leak surveys on uncovered and deep waste-covered liners, *Proceedings of the Geosynthetics Conference*, Portland, USA, 245-262.
- Richards L.A. (1931) Capillary conduction of liquids through porous medium. *Physics* 1, No. 11, 318-333.
- Rowe R.K. (1998) Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste: Keynote paper. *Proceedings of the 6th International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, 1, 27-103.
- Rollin A., Marcotte M., Chaput L., Caquel F. (2002) Lessons learned from geo-electrical leaks surveys. *Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics*, Nice, France, (2) 527-530, Delmas, Gourc et Girard (Eds).
- Southern J.M., Rowe R.K. (2004) Investigation of the Behavior of Geosynthetic Clay Liners Subjected to Thermal Gradients in Basal Liner Applications", *Journal of ASTM International* 1 (2).
- Tinjum J.M., Benson C.H., Blotz L. (1997) Soil-water characteristic curves for compacted clays. *Journal of Geotechnical Engineering* 123(11), 1060-1069.
- Touze-Foltz N., Rowe R.K. Duquennois C. (1999) Liquid Flow Through Composite Liners due to Geomembrane Defects: Analytical Solutions for Axi-symmetric and Two-dimensional Problems. *Geosynthetics International*, 6(6), 455-479 (Erratum: 2000, 7(1), p. 77).
- Touze-Foltz N., Giroud J.P., (2005) Empirical Equations for Calculating the Rate of Liquid Flow through Composite Liners due to Large Circular Defects in the Geomembrane. *Geosynthetics International* 12(4), 205-207.
- Touze-Foltz N., Barroso M. (2006) Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through geosynthetic clay liners–geomembrane composite liners due to circular defects or defects of uniform width and finite length. *Geosynthetics International*, 13(4).