ETUDE EXPERIMENTALE DES TRANSFERTS DE GAZ ET D'EAU DANS LES COUVERTURES DE CENTRES DE STOCKAGE DE DECHETS MENAGERS

Camille BARRAL[1, 2], Irini DJERAN-MAIGRE[1], Patrick PIERSON[2], Gérard DIDIER[1], Mustapha HIDRA[3].
1 Unité de Recherche en Génie Civil, INSA de Lyon, France.
2 Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche Impliquant la Géologie et la Mécanique, UJF Grenoble, France.
3 Onyx Sanet, Chatuzange-le-Goubet, France.

RESUME – Cette étude, menée conjointement par l'URGC (INSA de Lyon) et le LIRIGM (UJF Grenoble), porte sur les transferts de masse dans les couvertures des installations de stockage de déchets ménagers. Il s'agit d'un travail expérimental effectué à deux échelles : in situ (instrumentation d'une couverture en cours) et en laboratoire avec la création d'un dispositif expérimental permettant la détermination du coefficient de perméabilité au gaz d'un pain d'argile fléchi : les premiers résultats sont présentés permettant la comparaison du coefficient de perméabilité d'un échantillon fléchi à celui d'un échantillon non fléchi.

1. Barrières étanches en couverture d'une installation de stockage

La couverture d'une installation de stockage de déchets de classe II joue un rôle important sur l'impact du site sur son environnement. En effet, celle-ci doit assurer le confinement des déchets, contrôler les infiltrations d'eau, limiter les rejets dans l'atmosphère du biogaz émis par les déchets et permettre la réhabilitation du site. Cette barrière doit également maintenir ses caractéristiques durant toute la durée de vie du site et ceci malgré les sollicitations multiples auxquelles elle est soumise : mécaniques (tassements différentiels), climatiques (cycles de gel/dégel et dessiccation/humidification), chimiques (forte capacité d'échange cationique des matériaux argileux), hydrauliques (ruissellement de l'eau d'infiltration) (CFG Fascicule 12).

Dans le cas des déchets ménagers et assimilés, la législation ne spécifie pas totalement la constitution des complexes de couverture. Le guide technique attaché à l'arrêté du 9 septembre 1997 préconise seulement deux concepts de couverture selon la nature des déchets :

- Pour les déchets de catégorie D (fortement évolutifs : déchets ménagers bruts), la couverture doit être munie « d'un écran semi-imperméable réalisé par des matériaux naturels argileux remaniés et compactés sur une épaisseur d'au moins un mètre, ou tout dispositif équivalent assurant la même efficacité ».
- Pour les déchets de catégorie E (peu évolutifs : encombrants, refus de tri, mâchefers, cendres…), elle doit être munie « d'un écran imperméable composé d'une couche de matériaux d'au moins un mètre de puissance caractérisé par un coefficient de perméabilité inférieur ou égal à 1.10^{-9} m/s, et recouvert d'une géomembrane ou de tout autre dispositif équivalent ».

Les matériaux constituant la couche d'étanchéité ont pour rôle de minimiser les échanges de liquides et de gaz entre les déchets et le milieu extérieur. Ce sont des matériaux naturels (argiles seules ou traitées par bentonite) ou composites (géomembranes, géosynthétiques bentonitiques).

Dans le cadre du Cluster Région Environnement Rhône-Alpin et du pôle Envirhônalp, les laboratoires de recherche URGC (Unité de Recherche en Génie Civil) de l'INSA de Lyon et LIRIGM (Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche Incluant la Géologie et la Mécanique) de Grenoble, mènent une étude sur les transferts de masse dans les couvertures des installations de stockage de déchets ménagers.

Le travail s'effectue donc à deux échelles :

- sur site où l'instrumentation d'une couverture a été réalisée à Chatuzange-le-Goubet (Drôme).

- en laboratoire où un dispositif expérimental a été créé permettant la détermination du coefficient de perméabilité au gaz d'un pain d'argile fléchi. L'avantage est ici de maîtriser les conditions d'essai en fixant les paramètres influant sur la perméabilité, mais sans reproduire parfaitement les conditions du site.

2. Expérimentation sur site

L'instrumentation d'une couverture est programmée sur le site des « Petits Pourcieux » à Chatuzange-le-Goubet.
Cette instrumentation comporte deux « volets » et permet l'étude conjointe :

- du comportement hydraulique de la couverture avec la quantification du volume d'eau qui pénètre dans le massif de déchet et le bilan hydrique complet de celle-ci.
- des émissions de biogaz avec la qualification et quantification du biogaz émis.

2.1. L'alvéole étudiée

L'alvéole C a subi une première phase d'exploitation entre février 1998 et janvier 2000. Depuis quatre ans, cette alvéole était fermée par une couverture provisoire (Figure 1.a). Suite aux forts tassements des déchets observés entre 2000 et 2005, un volume de 18000 m^3 s'est libéré. Après le retrait de cette couverture provisoire, il est procédé à la recharge de l'alvéole, puis à la pose de la couverture définitive (Figure 1.b).

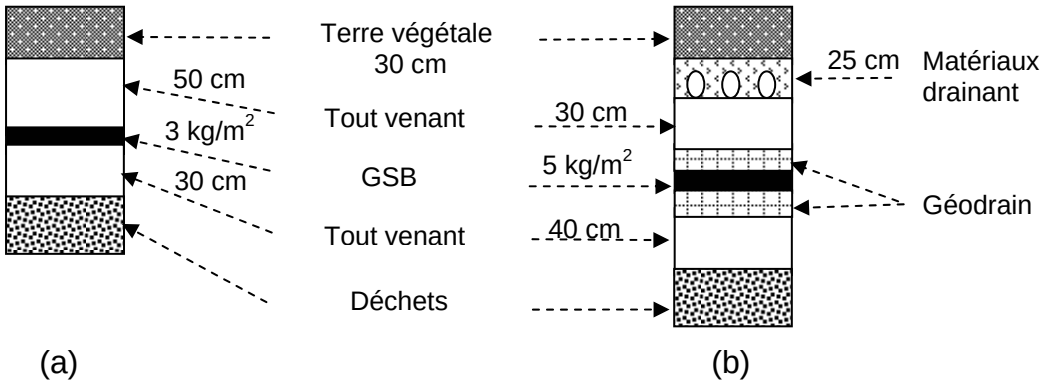


Figure 1. Configuration des couvertures provisoires et définitives de l'alvéole

Le GéoSynthétique Bentonitique (GSB) constitue la couche d'étanchéité définitive de cette couverture. Les GSB sont constitués d'une couche de bentonite comprise entre deux géotextiles reliés entre eux selon diverses techniques. Les GSB assurent leur fonction de couche étanche après hydratation et confinement (CFG fascicule 12).

Lors de la pose de la couverture définitive des appareillages de mesure seront positionnés sur et sous des GSB de natures différentes mais aussi différemment conditionnés. Cette instrumentation nous permettra de suivre l'évolution au cours du temps d'un certain nombre de paramètres tels que la quantité d'eau traversant le GSB, l'humidité du sol, les flux de biogaz émis ….

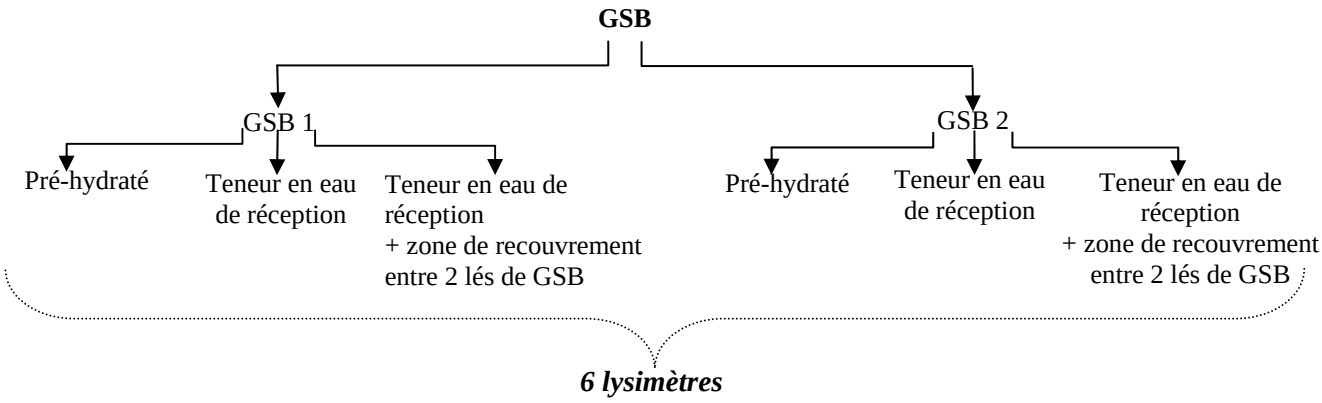
2.2. Etude des transferts de fluides dans un complexe de couverture

2.2.1. Flux hydriques

Afin de connaître les volumes d'eau qui traversent les GSB, six lysimètres seront placés sous deux types de GSB (trois lysimètres par type de GSB) avec pour chacun d'eux :

- un lysimètre sous le GSB pré-hydraté in situ
- un lysimètre sous le GSB à sa teneur en eau de réception
- un lysimètre sous un recouvrement entre deux lés.

L'organigramme ci-dessous nous présente les différentes configurations testées.



Les lysimètres sont constitués par la superposition d'une géomembrane et d'un géocomposite de drainage et ont chacun une surface environ égale à 34 m^2 (17m×2m). Ils sont reliés par des tuyaux à des réservoirs situés en bordure de l'alvéole dans un regard (Figure 2.).

Un dispositif de récupération des eaux qui ruissellent sur le GSB est aussi mis en place (Figure 3.). Il consiste en un tube fendu, placé sur le GSB en bas du casier, relié par un tube Rilsan à un réservoir situé lui aussi dans un regard en bordure du casier.

L'humidité à différents niveaux du sol est mesurée grâce à des blocs de gypse (trois zones de mesure avec pour chaque zone cinq sondes sur une même verticale afin de suivre dans le temps l'évolution du front d'infiltration).

Six piézomètres sont installés à différents endroits autour des lysimètres. Ces piézomètres sont utiles pour estimer la charge hydraulique qui s'applique sur le GSB quand il pleut.

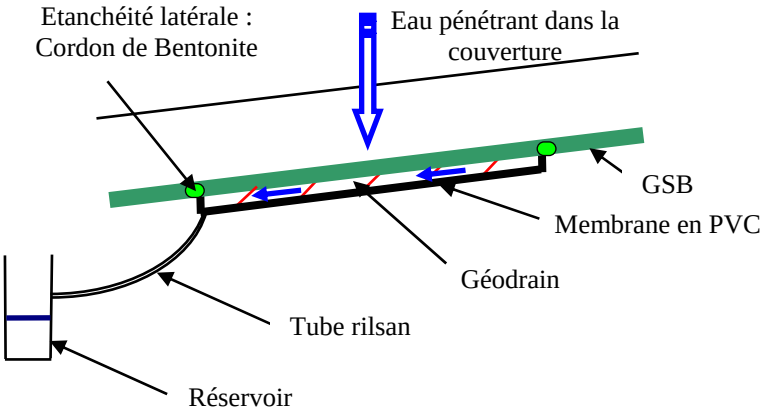


Figure 2. Schéma du lysimètre sous la couverture (vue en coupe).

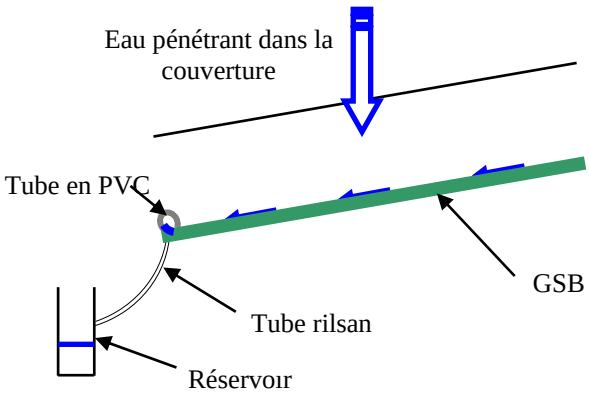


Figure 3. Schéma du système de récupération des eaux qui ruissellent sur le GSB (vue en coupe).

De plus, l'eau qui ruisselle sur l'ensemble de la couverture du casier est récoltée par différents caniveaux qui se rejoignent en une buse unique. La mesure du débit est faite par un canal Venturi sur la buse qui amène l'eau dans un bassin de rétention.

Enfin, un pluviomètre sur le site informe sur les précipitations et Météo France nous fournit l'évapotranspiration potentielle.

Cette instrumentation permet de suivre l'évolution de l'ensemble des flux entrant et sortant de la couverture au cours du temps.

2.2.2. Flux de gaz

La deuxième partie de cette expérimentation concerne l'étude des flux de biogaz émis par les déchets et traversant le géosynthétique bentonitique grâce à deux dispositifs de chambre à flux.

Le premier se situe sous le GSB et se construit comme un lysimètre (Figure 4.). C'est une véritable « poche » étanche sous le GSB qui, lorsqu'elle est mise sous pression d'azote, permet la détermination du coefficient de perméabilité au gaz par deux méthodes :

- en régime permanent par mesure du débit et des pressions amont et aval (norme Afnor XP P 84-707).
- en régime variable en suivant la chute de pression de l'azote dans la poche (Li et al., 2003).

Le deuxième dispositif se situe sur le GSB et est construit comme un lysimètre inversé (Figure 5.). Un balayage à l'azote est mis en place dans cette « poche » avec une pompe. Un analyseur de gaz dose alors le CH_4 et le H_2S (ou d'autres gaz), provenant de la décomposition des déchets et traversant le GSB.

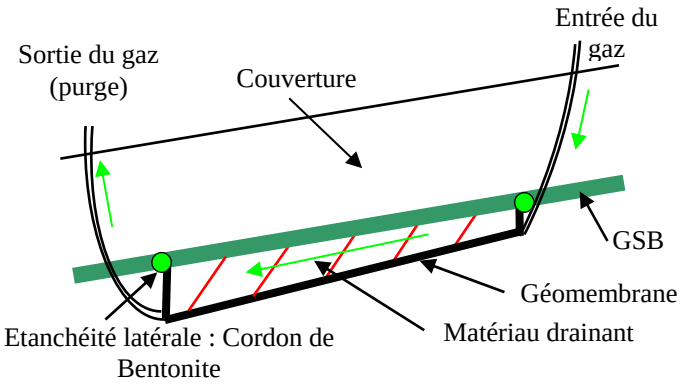


Figure 4. Schéma de la chambre à flux sous la couverture (vue en coupe)

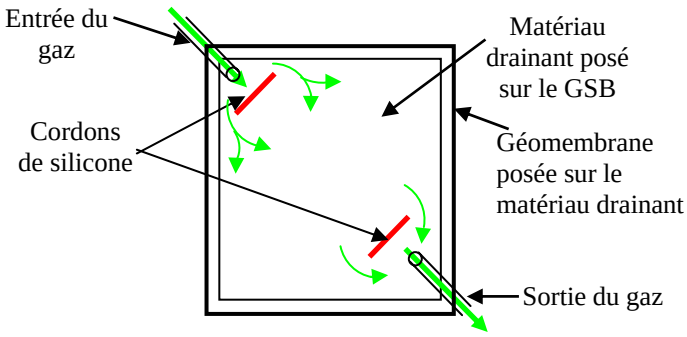


Figure 5. Schéma de la chambre à flux sur la couverture (vue du dessus)

2.2.3. Gradient de température

Trois thermocouples sont implantés afin de suivre l'évolution de la température dans différentes couches de la couverture. En effet, les matériaux de couverture sont sensibles aux variations climatiques. Des cycles de gel/dégel ou encore de dessiccation/humidification peuvent modifier la structure des matériaux constitutifs du complexe multicouche en place et donc sa perméabilité.

2.2.4. Suivi des tassements

Le suivi des tassements différentiels se fera grâce aux cartographies scanner laser 3D réalisées chaque semestre (Olivier et al., 2005). Un plan topographique du casier est aussi réalisé par l'exploitant deux fois par an. Ce suivi est important car les tassements des déchets, même s'ils sont relativement faibles dans notre cas (car le tassement primaire des déchets est déjà effectué), dégradent non seulement la couverture mais risquent aussi de nuire au bon fonctionnement de notre dispositif expérimental.

3. Expérimentation en laboratoire

Afin de conserver la stabilité et la sécurité du site, la conductivité hydraulique de la couche d'argile doit rester inférieure à 10^{-9} m.s^{-1} malgré les tassements différentiels qui peuvent se produire au sein des déchets.

L'originalité de la présente étude consiste à mesurer l'effet que peut produire une flexion de l'argile (provoquée par le tassement des déchets) sur sa conductivité hydraulique.

3.1. La perméabilité dans le milieu poreux non saturé

Si l'on considère qu'il n'y a pas d'interaction entre les différents fluides, la loi de Darcy peut être appliquée pour chaque fluide du système et pour une saturation partielle en eau donnée (milieu non saturé) (Dullien, 1979).

$$u_w = -\frac{k_{ew}}{\mu_w}\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{k_{ew}}{\mu_w}\frac{\Delta P}{Z} \quad (1)$$

$$u_g = -\frac{k_{eg}}{\mu_g}\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{k_{eg}}{\mu_g}\frac{\Delta P}{Z} \quad (2)$$

où
- u_i vitesse d'écoulement du fluide i en m.s^{-1}
- P pression du gaz en Pa=kg.m^{-1}.s^{-2}
- Z hauteur de l'échantillon en m
- k_{ew} coefficient de perméabilité effective à l'eau du matériau en m^2
- μ_w viscosité de l'eau en kg.m^{-1}.s^{-1}
- k_{eg} coefficient de perméabilité effective au gaz du matériau en m^2
- μ_g viscosité du gaz en kg.m^{-1}.s^{-1}

3.2. Dispositif expérimental de l'étude

3.2.1. La cellule d'expérimentation

Nous disposons d'une boîte en acier rectangulaire (L=40cm, l=10cm, Z=10cm) sans couvercle, dans laquelle on place un pain d'argile surélevé sur des rouleaux en fer afin de former au dessous de celui-ci un espace de volume (V) rempli par le gaz considéré (Photo 1.). La face inférieure de l'échantillon est donc en contact direct avec le gaz et la face supérieure est ouverte à l'air ambiant. L'étanchéité entre le socle et les quatre côtés de la boîte est assurée par un joint de nature bitumineuse. L'étanchéité entre le pain d'argile et les parois latérales de la boîte est assurée par de la graisse au silicone. Un trou a été percé à la base de l'une des parois latérales pour permettre l'envoi du gaz sous pression dans l'espace libre. Le gaz pénètre ainsi dans la boîte et peut s'échapper uniquement au travers du pain d'argile.

Photo 1. Cellule d'expérimentation

3.2.2. Dispositif pour tester la perméabilité au gaz

La boîte est reliée à une bouteille de gaz via un manomètre permettant un premier réglage de la pression. Le gaz utilisé est de l'azote car celui-ci est un gaz inerte vis-à-vis de l'argile. Un capteur de pression relié à un ordinateur relève la pression absolue à l'entrée de la boîte.

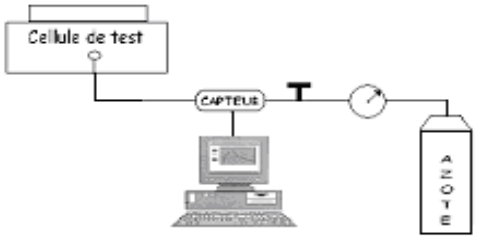


Figure 6. Dispositif pour tester la perméabilité

3.2.3. Dispositif pour endommager l'argile

L'essai de flexion présenté dans la norme française NFP 18407 consiste à soumettre un échantillon prismatique d'argile à de la flexion. L'éprouvette est disposée sur deux rouleaux inférieurs distants de L'=3Z (avec Z la hauteur de la brique). Les deux rouleaux supérieurs sont quant à eux distants de l'=2Z (figure 7.). Le plateau inférieur sur lequel sont fixés deux rouleaux remonte à vitesse constante et les deux rouleaux supérieurs fixes appliquent alors une charge F sur l'échantillon (Photo 2.).

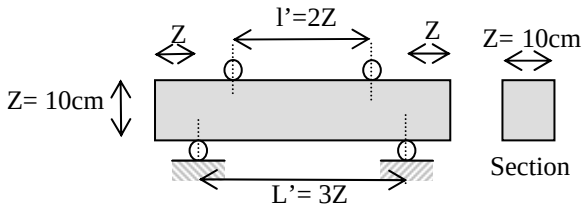


Figure 7. Schéma de l'essai de flexion

Photo 2. Flexion de l'échantillon dans la boîte

Pour notre étude, les essais de flexion ont lieu dans la boîte. En effet, les briques d'argile fissurées sont très fragiles et doivent être manipulées le moins possible. Au cours des essais de flexion, un capteur enregistre la force F exercée sur l'échantillon et trois autres capteurs relèvent le déplacement de la flèche au centre et sur les appuis.

3.3. Méthode de détermination du coefficient de perméabilité au gaz

Le dispositif est constitué d'une boîte sans couvercle dans laquelle on place une éprouvette du matériau, dont on veut tester la perméabilité, en le surélevant afin de laisser un certain volume pour le gaz (Figure 8.). L'étanchéité entre l'éprouvette et les parois latérales de la boîte est assurée par un joint. Le test consiste à mettre sous pression de gaz le volume situé en dessous de l'éprouvette, puis à enregistrer la décroissance de la pression occasionnée par le flux de gaz au travers de l'échantillon.

Le calcul analytique approximé de la perméabilité à l'air du goudron de Li et al. (2003) montre que les courbes représentant la chute de pression en fonction du temps prennent la forme d'une exponentielle décroissante.

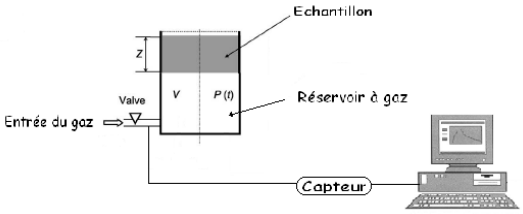


Figure 8. Schéma du dispositif

$$P(t) = \frac{\left(c + e^{st}\right)}{\left(c - e^{st}\right)} P_{atm} \tag{3}$$

avec $P(0)$ pression initiale dans le réservoir
P_{atm} pression finale dans le réservoir
s coefficient déterminé par le graphe
t temps
c constante définie par $P(0)$ et P_{atm} , $c = \dfrac{P(0) + P_{atm}}{P(0) - P_{atm}}$

La formule suivante donne une bonne approximation du coefficient de perméabilité au gaz k_{eg} de l'éprouvette (exprimée en m^2) :

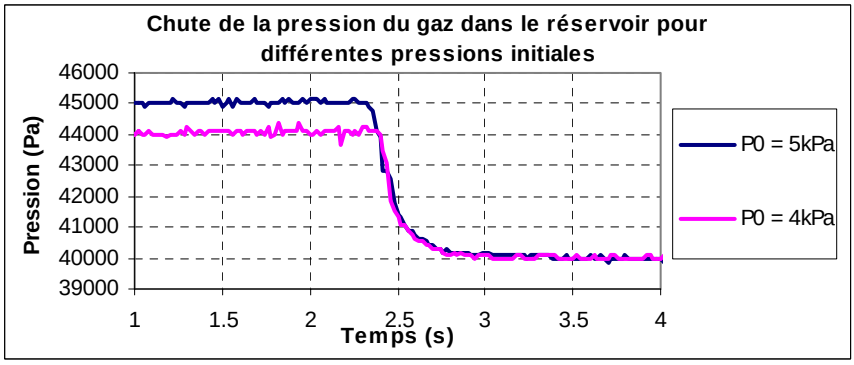
$$k_{eg} = -\frac{V' Z \mu_g s}{S P_{atm}} \tag{4}$$

avec V' volume du gaz
Z hauteur de l'éprouvette
μ_g viscosité du gaz
S surface de l'éprouvette
s pente de la droite, $\ln\left(c\dfrac{P(t) - P_{atm}}{P(t) + P_{atm}}\right) = st$

3.4. Résultats des essais

3.4.1. Résultats obtenus sans flexion

Les premiers essais sur des pains d'argile montrent que les courbes obtenues ont bien la forme d'une exponentielle décroissante (Graphe 1.). De plus, il y a une bonne répétitivité des résultats.



Graphe 1. Décroissance de la pression du gaz pour différentes pressions

Les coefficients de perméabilité effectifs au gaz sont calculés à l'aide de la relation (4). On trouve alors k_{eg} de l'ordre de 1.10^{-11} m^2 pour tous les essais.

3.4.2. Résultats avec flexion

Lorsque la flexion de la brique est faible, c'est-à-dire lorsque la flèche maximale de la brique est inférieure à 1mm, la perméabilité au gaz augmente d'un ordre de grandeur (de 10^{-11} à 10^{-10} m²).

Mais lors de flexions plus grandes, la boîte en acier autour de l'argile ne permet pas à la brique de se déformer normalement et ne garantit plus l'étanchéité du système.

4. Conclusions

La mise en place du dispositif expérimental sur le site de Chatuzange est prévue pour le mois d'avril 2006. Les premières données sur les transferts dans la couverture seront donc disponibles au cours du mois de mai.

L'étude en laboratoire avait pour but de relier la déformation de l'argile avec sa perméabilité. Un dispositif expérimental permettant d'effectuer des tests de perméabilité ainsi que des tests de flexion sur des échantillons d'argile a donc été conçu. Les essais de perméabilité se sont avérés plutôt concluants sur les pains d'argile intacts et sur les briques ayant subies de faibles déformations. En effet, les courbes obtenues ont permis de caler un modèle analytique et ainsi de donner une estimation de la perméabilité du milieu. Des essais complémentaires permettront d'étudier l'influence des différents paramètres.

De plus, dans une volonté de couplage entre les différentes échelles d'expérimentation, d'autres essais seront menés en laboratoire en fonction des résultats obtenus sur site. Ces essais permettront notamment de quantifier plus exactement des phénomènes observés sur le site. Il est notamment prévu pour cette étude, l'utilisation de divers dispositifs permettant de déterminer la conductivité hydraulique et la perméabilité au gaz des GSB et de l'argile sous contraintes multiples.

5. Références bibliographiques

AFNOR NF XP P 84-707 (août 2002). *Perméabilité au gaz des géosynthétiques bentonitiques partiellement saturés*.

AFNOR NF P 18407. *Résistance à la flexion*.

Comité Français de Géosynthétiques (1998), *Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par Géosynthétiques Bentonitiques*, Fascicule 12.

Dullien F.A.L. (1979), *Porous media, fluid transport and pore structure*, Academic Press.

Li H., Jiao J.J., Luk M. (2004), *A failing-pressure method for measuring air permeability of asphalt in laboratory*, Journal of Hydrology, 286 (2004) 69-77.

J.O. de la République Française (2 octobre 1997). *Arrêté du 9 septembre 1997 relatif aux décharges existantes et aux nouvelles installations de stockage de déchets ménagers et assimilés*.

Olivier F., Lhomme D., Gourc J.P., Hidra M. (2005), *The measurement of landfill settlement using 3D laser scanner imaging*, Proc.Sardinia 2005, 10th International Landfill Symposium, Calgliari, Italy.