INTERNATIONAL SOCIETY FOR
SOIL MECHANICS AND
GEOTECHNICAL ENGINEERING

SIMSG ISSMGE

This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

https://www.issmge.org/publications/online-library

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Contrôle de la perméabilité des géosynthétiques bentonitiques utilisés dans les centres de stockage de déchets

Permeability control of geosynthetic clay liners used in waste containment

G. Didier, L.Comeaga & D.Cazaux – *INSA Lyon, France*

RESUME: Utilisés dans les dispositifs d'étanchéité de fond et de couverture des centres de stockage de déchets et d'ouvrages hydrauliques, les Géosynthétiques Bentonitiques présentent de faibles perméabilités, difficilement mesurables aussi bien en laboratoire qu'in situ. Dans le cadre des procédures qualité (MQA/CQA), la perméabilité est un paramètre important qu'il convient de contrôler. L'article présente des méthodes originales de contrôle en laboratoire et in situ.

ABSTRACT: Used in waste disposal for lining or capping, the Geosynthetic Clay Liners have very low permeability, difficult to measure in laboratory or field. In the context of the quality procedures (MQA/CQA), Geosynthetic Clay Liner permeability is an important parameter which must be controled. The paper presents original methods to control this parameter in laboratory or in field.

1. INTRODUCTION

Généralement, le contrôle qualité d'un produit manufacturé (MQC) doit inclure nécessairement des tests de perméabilité réalisés la plupart du temps par le fabricant selon l'ASTM D-5084 ou GRI GCL2 (Daniel, Koerner 1995). Il est cependant d'un grand intérêt de pouvoir tester les caractéristiques des Géosynthétiques Bentonitiques (Géotextiles et Géofilms Bentonitiques regroupés sous l'abréviation GB) pour des applications particulières sur site. Ainsi, dans le cadre de contrôle de qualité en cours ou après construction (CQC), il est nécessaire de réaliser des essais sous des sollicitations spécifiques en faisant varier les paramètres suivants: charge hydraulique, contrainte de confinement, matériau de confinement (granulométrie, mode de compactage), fluide (eau ou lixiviat). C'est dans ce cadre que s'inscrit la procédure d'essais en laboratoire que nous décrivons au chapitre 2 et qui est applicable à tous les géotextiles bentonitiques. Dans certains cas, il est demandé de réaliser des tests de perméabilité in-situ. Ce type d'essai, présenté au chapitre 3, constitue une évolution dans les procédures CQC et permet de déceler des défauts détectables uniquement après la pose (effets cumulés du transport, de la manutention et de la pose).

2. ESSAIS DE LABORATOIRE

Les contrôles de perméabilité des Géosynthétiques Bentonitiques réalisés en laboratoire doivent reproduire le plus fidèlement possible les conditions réelles de mise en œuvre et d'exploitation, soit:

- faible contrainte normale en début d'exploitation, apportée par la couche de confinement;
- faible charge hydraulique, fixée en France à 30cm par la réglementation en vigueur pour les étanchéités de fond;
- GB mis en contact avec les matériaux granulaires qui seront utilisés pour les couches support ou de confinement;
- GB en contact avec le liquide réel: eau pour les GB utilisés en couverture et lixiviat pour ceux utilisés en étanchéité de fond.

2.1. Appareillage

A l'URGC - Géotechnique de l'INSA de Lyon nous avons mis au point un appareillage qui permet de réaliser ces contrôles. Il s'agit d'un œdoperméamètre en polyéthylène constitué de deux parties, l'embase et le piston, pouvant être solidarisées par 6 vis de fixation.

A l'aide de cet appareillage on peut suivre la cinétique de gonflement et d'absorption d'eau, la mesure du débit entrant et sortant (eau ou lixiviat) sous une contrainte normale σ donnée et une charge hydraulique ΔH constante (figure 1).

Le diamètre de la cellule est de 250mm. L'étanchéité latérale est assurée par un cordon de pâte de bentonite (figure 2).

L'échantillon peut être placé entre deux surfaces drainantes lisses (géodrains) ou en contact avec le matériau granulaire qui sera en contact in situ avec le GB (figure 3).

La contrainte normale σ peut être appliquée par chargement direct (cas des faibles valeurs en début d'essai) ou à l'aide d'une pression d'air comprimé transmise par le petit piston (figure 1), pour les contraintes plus importantes apportées par les déchets.

Le liquide peut être de l'eau ou du lixiviat, ce dernier étant utilisé afin de connaître la compatibilité chimique d'un GB employé en étanchéité de fond dans un centre de stockage de déchets.

L'essai comporte deux phases principales:

(A) une phase de saturation de l'échantillon sous charge

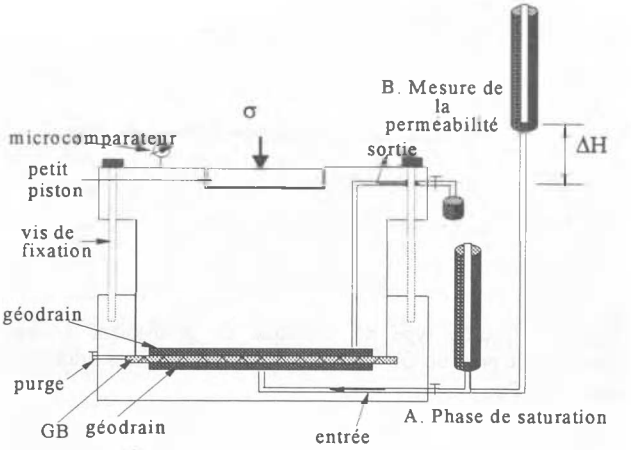

Figure 1: Schéma de l'appareillage de mesure au laboratoire

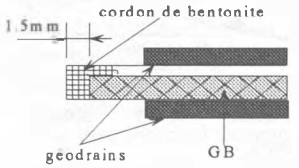

Figure 2: Réalisation de l'étanchéité latérale

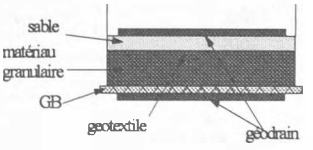

Figure 3: Mise en place du GB en contact avec un matériau granulaire

hydraulique nulle et sous la contrainte normale apportée par la couche de confinement qui sera mise en place. Les cinétiques de gonflement et d'absorption d'eau sont suivies jusqu'à un gonflement au moins égal à 90% du gonflement final (voir paragraphe 2.2).
(B) la phase de mesure de la perméabilité à l'eau ou au lixiviat, sous la charge hydraulique désirée. Les vis de fixation sont serrées afin d'éviter un éventuel soulèvement de l'échantillon si la charge hydraulique est forte. Les débits entrant et sortant sont mesurés.
(C) dans le cas d'un essai de compatibilité chimique GB - lixiviat, la quantité de liquide récupérée à la sortie sera analysée du point de vue chimique (dosage des cations et anions) tout au long de l'essai. La bentonite pourra être analysée en fin d'essai, afin de connaître les modifications produites.

2.2. Exploitation des résultats.

Des essais réalisés précédemment (Dakshanamurthy, 1978) ont montré que la cinétique de gonflement obéit à une loi hyperbolique de la forme:

$$\Delta h = \Delta h_\infty \times \frac{t}{t_{50} + t} \qquad (1)$$

où: Δh = le gonflement de l'échantillon au moment t, en mm, Δh_∞=le gonflement final correspondant à un temps infini, en mm, t = le temps en minutes et t_{50} = le temps correspondant à 50% du gonflement final, en minutes.

La représentation graphique de cette loi est une droite dans le repère t/Δh-t, dont l'équation est:

$$\frac{t}{\Delta h} = \frac{t_{50}}{\Delta h_\infty} + \frac{1}{\Delta h_\infty} t \qquad (2)$$

Cette droite permet de déterminer les paramètres Δh_∞ et t_{50}.

Nous présentons figures 4 et 5 une courbe type de gonflement en fonction du temps et la droite correspondante dans le repère t/Δh-t pour un GB aiguilleté entre deux surfaces drainantes lisses, sous une contrainte normale de 8kPa (50cm de couche de confinement).
L'équation de la droite obtenue permet de calculer le gonflement pour un temps infini, Δh_∞ et de contrôler à tout moment l'état de gonflement de l'échantillon. Quand au moins 90% du Δh_∞ sont atteints, nous pouvons considérer que la phase de saturation est achevée. Il faut préciser que la loi hyperbolique n'est pas valable

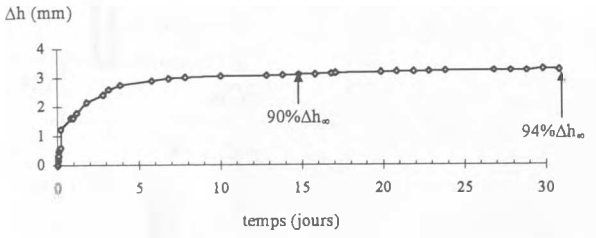

Figure 4: Courbe type de cinétique de gonflement à l'eau déminéralisée pour un GB aiguilleté entre deux surfaces drainantes lisses, σ=8kPa

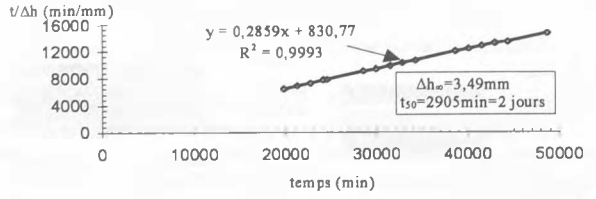

Figure 5: Validation de la loi hyperbolique et calcul des paramètres Δh_∞ et t_{50}.

pour le début de la courbe Δh-t.

Nous présentons figure 6 une courbe type de cinétique d'absorption d'eau.
En représentant les valeurs t/V en fonction du temps nous avons obtenu des droites (figure 7), ce qui montre que la cinétique d'absorption obéit aussi à une loi hyperbolique de la forme:

$$V = V_\infty \frac{t}{t_x + t} \qquad (3)$$

où V = le volume absorbé, en cm^3, V_∞ = le volume absorbé pour un temps infini, en cm^3, t = le temps, en minutes et t_x = le temps correspondant à x% du volume V_∞.
Le calcul de la perméabilité en appliquant la loi de Darcy nécessite que l'épaisseur de l'échantillon soit constante et connue. Ces conditions ne sont pas satisfaites pour les GB cousus ou en contact avec des matériaux granulaires. C'est la raison pour laquelle les performances hydrauliques sont, de préférence, exprimées en flux q pour une charge hydraulique imposée:

$$q = \frac{Q}{A} \qquad (4)$$

où: q = flux, en $m^3/m^2/s$, Q = le débit sortant, en m^3/s et A = la surface de l'échantillon, en m^2.

Nous présentons figure 8 une courbe de variation du flux d'eau déminéralisée et de lixiviat synthétique en fonction du temps, pour un GB aiguilleté, entre deux surfaces drainantes lisses, sous une contrainte normale de 8kPa et une charge hydraulique de 30cm. Après la mesure du flux d'eau, celle-ci a été remplacée par un lixiviat synthétique avec une composition chimique proche d'un lixiviat réel de déchets ménagers (Didier, Comeaga, 1996).

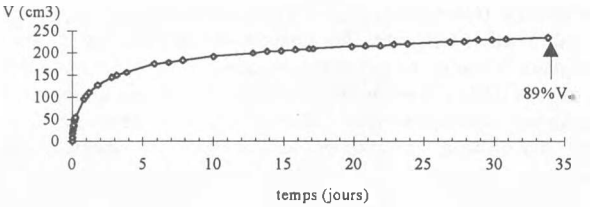

Figure 6: Courbe type de cinétique d'absorption d'eau déminéralisée pour un GB aiguilleté entre deux surfaces drainantes lisses, σ=8kPa.

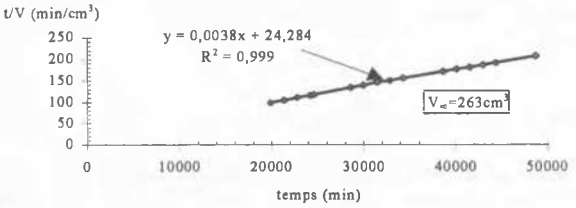

Figure 7: Validation de la loi hyperbolique pour l'absorption d'eau et le calcul du volume correspondant à un temps infini, V_∞.

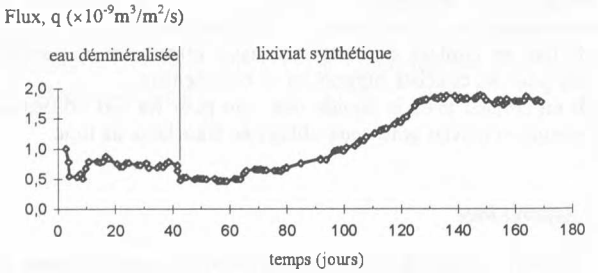

Figure 8: Flux d'eau déminéralisée et de lixiviat synthétique pour un GB aiguilleté entre deux surfaces drainantes lisses, σ=8kPa, ΔH=30cm.

2.3. Durée des essais

Pour la phase (A), de saturation, il faut compter au minimum 15 jours pour atteindre 90% Δh_∞, en fonction du type de bentonite: la bentonite en granulés se sature plus vite que celle en poudre.

Le système d'assemblage (aiguilletage ou coutures) joue aussi un rôle important dans la durée de cette phase d'hydratation.

Pour la phase (B) de mesure de la perméabilité, la durée dépend essentiellement de la nature du liquide. En général, le flux d'eau se stabilise assez rapidement, après une dizaine de jours. Pour le lixiviat, à cause des échanges cationiques qui se produisent, la stabilisation a lieu plus lentement, entre 40 et 80 jours. Pour les essais de compatibilité chimique, il est nécessaire de récupérer une quantité suffisante de percolats (au minimum 10 fois le volume des vides), afin de pouvoir suivre l'évolution des échanges cationiques jusqu'à leur stabilisation (Didier, Comeaga, 1996).

Malgré leur durée, ces essais sont importants car ce sont les seuls à pouvoir répondre pendant la phase d'études à un certain nombre de questions concernant la durabilité des performances hydrauliques des GB dans les conditions réelles du site.

3. CONTROLE DU FLUX IN-SITU

Traditionnellement, le contrôle de conformité de la perméabilité des GB est basé seulement sur les résultats d'essais en laboratoire dont les durées, comme nous l'avons signalé précédemment sont très longues. Ces essais ne peuvent donc pas faire partie du contrôle qualité en cours de construction car ils pénaliseraient l'avancement du chantier. Pour répondre aux exigences de certains concepteurs, nous avons envisagé une procédure standard d'essai de courte durée (3 jours maximum) qui permet de garantir l'intégrité du produit. Les défauts qui peuvent causer des fuites peuvent être réduits significativement par un programme d'assurance et contrôle qualité en phase chantier. Ce programme permet d'assurer les Maître d'Ouvrages et ingénieurs que les procédures sont suivies durant la construction et que le GB est installé conformément au planning et aux recommendations techniques. L'introduction de ces tests dans l'évaluation de la conformité du produit permet de développer des stratégies d'essai permettant de répondre à différentes questions. Le critère principal est la sélection d'une aire représentative du GB. Les aires d'essai doivent être de préférence des zones singulières (anomalies de masse surfacique, d'épaisseur, de support...). Le test est réalisé à l'aide d'un infiltromètre simple anneau fermé. Le test peut être utilisé sur tous les types de GB et le flux est déterminé à partir de l'infiltration du fluide (généralement l'eau) en fonction du temps. Le volume de liquide pénétrant dans l'anneau (par l'intermédiaire d'une bouteille de Mariotte) est équivalent à la mesure du volume de liquide qui s'infiltre dans le GB. Le volume infiltré par intervalle de temps est converti en flux.

3.1. Appareillage

L'appareil est un infiltromètre simple anneau fermé en acier inoxydable de 200 mm de diamètre sous charge hydraulique constante. Il permet la mesure simultanée de l'infiltration et du gonflement sous une contrainte verticale donnée. L'appareillage permet le maintien d'une charge hydraulique constante au dessus du GB par l'intermédiaire d'un contrôleur pression-volume (CPV) ou une bouteille de Mariotte (figure 9 et 10). Le test fournit une valeur de flux entrant par la surface du GB sous un ensemble de conditions d'essai spécifiques: charge hydraulique faible (< 5 cm) durant la phase de saturation, contrainte normale constante (s_v) équivalente à la charge de service (s_S) transmise par l'intermédiaire de la pierre poreuse, et charge hydraulique constante équivalente à la charge de service pour la suite de l'essai.

La procédure détaillée d'installation de l'infiltromètre a été décrite par nous-même précédemment (Didier, Cazaux, 1996). La réalisation du cordon d'étanchéité dans le géotextile supérieur sous

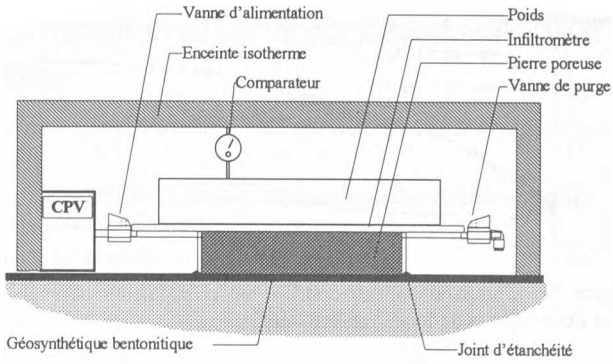

Figure 9: Schéma de principe de l'infiltromètre.

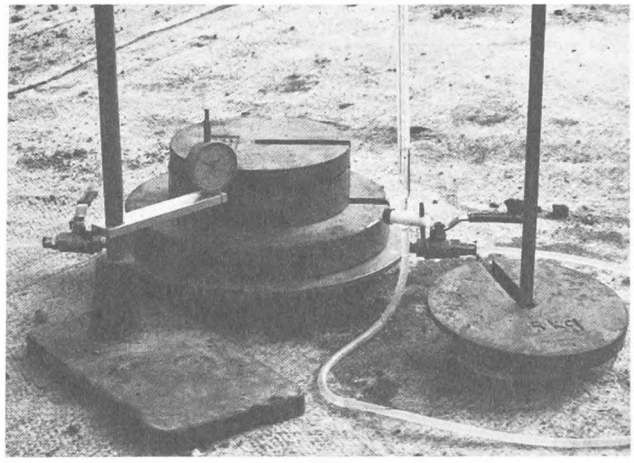

Figure 10: Photographie de l'infiltromètre sur chantier.

le périmètre de l'anneau est la phase la plus délicate puisque la réussite de l'essai nécessite une étanchéité parfaite à l'interface anneau-GB.

L'infiltromètre est couvert d'une enceinte isotherme pour minimiser l'évaporation, les changements de température et protéger l'ensemble de la pluie.

3.2. Mesure

Le volume de liquide infiltré est obtenu en mesurant la descente du niveau d'eau dans la bouteille de Mariotte ou le CPV par intervalle de temps. Il est nécessaire d'enregistrer simultanément la température du liquide et le gonflement du GB (comparateur). Dans le cas d'un essai réalisé sur un GB à la teneur en eau de pose (entre 5 et 30% (Daniel, Koerner, 1995)) le gonflement entraîne une infiltration apparente qui n'est pas représentative de l'écoulement gravitaire traduisant le flux. En conséquence, l'aire d'essai est pré-hydratée avant installation de l'infiltromètre. La pré-hydratation consiste à apporter au matériau une quantité d'eau nécessaire à l'obtention d'une valeur de la teneur en eau de pseudo-saturation qui est contrôlée à l'aide d'un échantillon témoin. La valeur de teneur en eau avant essai est choisie de manière à ce que le gonflement sous s_v soit limité. La figure 11 montre la différence entre les courbes de gonflement obtenues avec deux teneurs en eau initiales sur un même matériau. On remarque que la préhydratation limite nettement le gonflement qui se stabilise rapidement après un léger tassement dû à l'application de la contrainte verticale.

Le flux, exprimé comme le débit d'infiltration par unité de surface est calculé à partir de l'équation (4) sur la partie linéaire de la courbe d'infiltration.

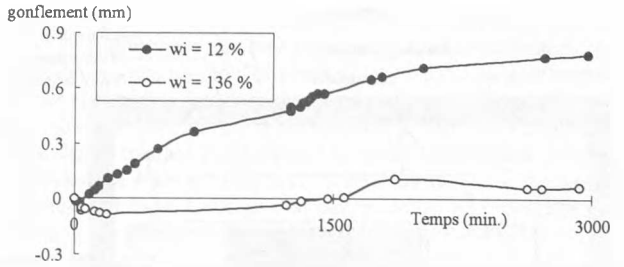

Figure 11: Comparaison des courbes de gonflements obtenues pour deux valeurs de teneur en eau initiale.

Tableau 1: Mode de préhydratation des deux tests réalisés

no. test	mode de pré-hydratation	teneur en eau initiale de l'essai
1	3,6 litres d'eau sur une surface de 0.36 m^2 durant 24 heures	152 %
2	pluie météorique fine durant 24 heures	49 %

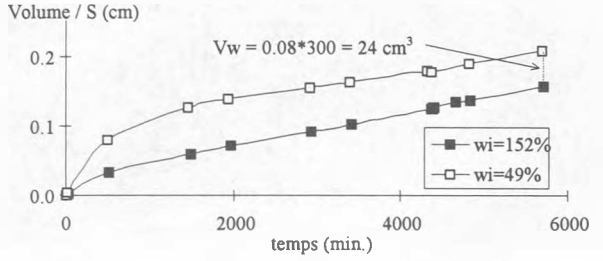

Figure 12: Evolution du volume d'eau infiltré par unité de surface en fonction du temps pour deux valeurs de teneur en eau initiale.

3.3. Expérimentation in-situ

De nombreux résultats (Didier, Cazaux, 1996) ont déjà été obtenus in-situ et en laboratoire au moyen de l'infiltromètre sur différents types de géosynthétiques bentonitiques (aiguilletés ou cousus).

Nous présentons figures 12 et 13 les résultats de deux essais réalisés sur un géosynthétique aiguilleté. Les deux tests ont été effectués sur le même rouleau après installation sur le chantier.

Nous avons cherché à mettre en évidence l'importance de la préhydratation sur la cinétique des essais (tableau 1).

Chaque essai a été conduit sous une charge hydraulique de 15 cm et sous une contrainte verticale de 10.2 kPa. Les figures 12 et 13 montrent qu'après une journée d'essai, les flux de chaque test sont identiques. Si on détermine la part d'infiltration comme étant égale à l'élévation de l'anneau mesurée par le capteur de déplacement ramenée à la surface d'essai (300 cm^2), on obtient un volume de 25 cm^3 (figure 14). D'autre part, le calcul de la différence de volume d'eau infiltré par les deux essais jusqu'à l'obtention d'un flux équivalent donne 24 cm^3 (figure 12). Ceci met en évidence la nécessité d'une préhydratation afin que l'effet du gonflement soit négligeable sur la mesure de l'infiltration.

En ce qui concerne la valeur du flux, après deux jours d'essais (environ 3000 min.) elle devient la même pour chacun des essais (10^{-9} m/s) et diminue ensuite pour atteindre 3.10^{-10} m/s au bout de 3 jours d'essai (figure 13). Cette valeur est plus faible que celle obtenue en laboratoire en raison d'une contrainte normale supérieure (10.2 contre 8 kPA au laboratoire) et d'une charge hydraulique plus faible (15 cm contre 30 cm au laboratoire).

Les deux essais fournissent néanmoins une bonne approximation des caractéristiques hydrauliques in-situ du GB et montre une corrélation satisfaisante avec les essais en laboratoire.

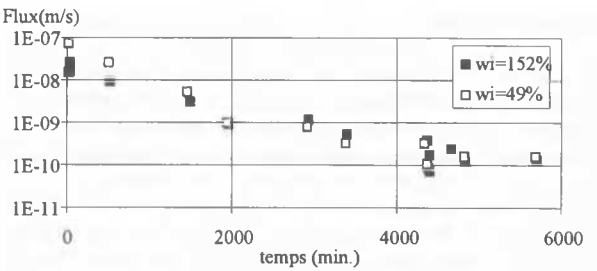

Figure 13: Evolution du flux entrant en fonction du temps pour deux valeurs de la teneur en eau initiale.

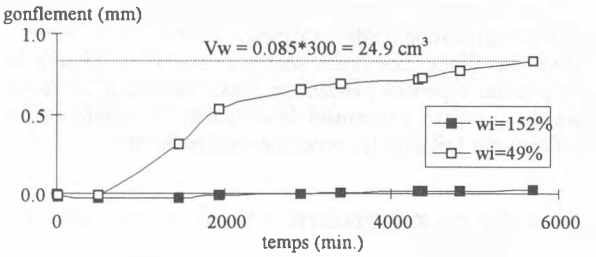

Figure 14: Evolution du gonflement pour les deux tests.

4. CONCLUSIONS

Les procédures d'essais que nous avons décrites peuvent être appliquées à la famille des Géotextiles Bentonitiques. Elles présentent l'originalité de pouvoir mettre le matériau sous les sollicitations physiques qui seront rencontrées sur le chantier.

Les essais réalisés en laboratoire permettent de tester les caractéristiques hydrauliques en faisant varier la nature et la charge hydraulique du fluide, la contrainte verticale et son mode d'application (géotextile, sable, matériau grossier). Ils constituent un support technique important au stade de la conception du projet permettant ainsi son optimisation technique et économique avec les garanties de qualité et sécurité nécessaires.

La méthodologie de contrôle in-situ, que nous proposons, contraste avec les procédures de contrôle sur chantier habituellement suivies. Elle permet de tester, de manière ponctuelle et non destructive, les caractéristiques hydrauliques de zones singulières recensées après inspection visuelle (défaut de fabrication ou d'installation, anomalie de masse surfacique de bentonite). C'est le seul moyen de vérifier, après la pose et de manière rapide, le potentiel d'étanchéité d'un géosynthétique bentonitique dans le contexte de l'ouvrage (contrainte de confinement et charge hydraulique).

5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Dakshanamurthy, V. 1978. A New Method to predict swelling using hyperbolic equation, *Geotechnical Engineering* Vol. 9, no. 1, pp. 29-38.

Daniel, D.E., Koerner, R.M.1995. *Waste Containment Facilities*, ASCE Press, New York.

Didier, G., Cazaux, D.1996. Field Permeability measurement of Geosynthetic Clay Liners, *Proceedings of 1st European Geosynthetics Conference, Maastricht*. Rotterdam: Balkema.

Didier, G., Comeaga, L. 1996. Influence On Initial Hydration conditions on GCL leachate Permeability, *Testing and Acceptance Criteria for Geosynthtic Clay Liners*, ASTM STP 1308, Philadelphia (à paraître).