Mesure expérimentale des flux traversant les zones de recouvrement des géosynthétiques bentonitiques. Apport de la modélisation numérique

P. MATHIEU
M. AL NASSAR*
G. DIDIER
URGC-Géotechnique,
INSA de Lyon
bât. J.-C.A.-Coulomb
34, av. des Arts
69621 Villeurbanne Cedex
philippe.mathieu@insa-lyon.fr
gerard.didier@insa-lyon.fr

Résumé

Les géosynthétiques bentonitiques (GSB) sont souvent utilisés pour la réalisation de barrières étanches. Afin de mesurer les débits traversant un GSB et, en particulier, dans les zones de recouvrement, un nouvel appareillage a été développé au laboratoire URGC-Géotechnique de l'INSA de Lyon. Après avoir présenté les résultats d'un essai de recouvrement réalisé avec différentes conditions de confinement et de charge hydraulique, nous montrons l'intérêt de la simulation numérique pour la compréhension d'un tel écoulement, la détermination de certains paramètres, la possibilité de simuler directement certains essais complémentaires ainsi que la vérification de la procédure expérimentale.

Mots-clés : géosynthétique bentonitique, recouvrement, mesure expérimentale, simulation numérique, perméabilité, transmissivité.

Experimental flow measurement through geosynthetic clay liner overlaps. Interest of numerical simulations

Abstract

The Geosynthetic Clay Liners (GCL) are often used to realise seal barriers. In order to measure the flow through a GCL and through a GCL overlap, a new apparatus called Flow-box, has been developed at the URGC Geotechnical Laboratory of INSA de Lyon (France). We first present flow results of one test carried out with different conditions of normal confining pressure and hydraulic head ; then we show the interest of the use of a finite element computer program for a better understanding of the nature of the flow and for determining some hydraulic parameters. With this program, we can also simulate new tests with different conditions and also verify the experimental procedure.

Key words : geosynthetic clay liner, overlap, laboratory test, finite element analysis, hydraulic conductivity, transmissivity.

* M. Al Nassar actuellement à l'Université de Damas (Syrie).

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 1er février 2004.

1

Introduction

L'objectif principal d'un géosynthétique bentonitique (GSB) est de limiter le transfert de fluides tels que l'eau, les lixiviats ou les gaz pouvant traverser le GSB aussi bien au niveau de la *partie courante* que des *recouvrements* nécessaires entre lés. L'écoulement à travers les recouvrements, zones sensibles des barrières étanches de ce type, a été assez peu étudié. L'analyse des travaux réalisés par Estornell *et al.* (1992), Cooley *et al.* (1995), Garcin (1997), Daniel *et al.* (1997) nous a conduits à concevoir et à réaliser un appareil original de type réservoir baptisé « cellule d'essai sur recouvrement » permettant de déterminer les performances hydrauliques des GSB aussi bien au niveau d'un recouvrement que dans la partie courante, Al Nassar (2002) et Al Nassar *et al.* (2002). Cet appareillage permet de tester des éprouvettes plus représentatives avec des contraintes ou des charges hydrauliques plus importantes que celles utilisées par les auteurs précédemment nommés. Ces travaux ont abouti à l'établissement de la norme NFP 84706 (2002). Dans cet article, nous insisterons tout particulièrement sur l'apport des simulations numériques réalisées à l'aide d'un logiciel d'écoulement EAUSOL développé à URGC-Géotechnique de l'INSA de Lyon et tenterons de répondre à la question : Quelles données d'origine expérimentale et quelles hypothèses sont nécessaires pour simuler de nouveaux essais avec des conditions aux limites différentes de l'essai réalisé sans recourir à une nouvelle expérimentation ?

2

Description de la cellule d'essai sur recouvrement

La cellule présentée les figures 1 et 2 est un réservoir métallique de 200 litres de contenance (1 m x 1 m x 0,20 m). Ce réservoir est fermé par une membrane en caoutchouc armé et un couvercle, l'ensemble étant totalement étanche après solidarisation. Deux lysimètres d'une surface unitaire de 0,15 m², de largeur courante de 0,20 m, sont présents au fond du réservoir. Les éléments poreux au droit des lysimètres sont des géocomposites de drainage. Ces lysimètres permettent de comparer en même temps l'écoulement à travers une partie courante du GSB et une zone de recouvrement de longueur L égale à 0,80 m. Les lés de GSB sont disposés au fond de la cellule. Une étanchéité de fond entre les deux lysimètres rend indépendants les écoulements arrivant dans chaque lysimètre. Cette étanchéité est réalisée avec de la pâte de bentonite à 300 % de teneur en eau qui imprègne complètement le non tissé inférieur du GSB.

Cet appareillage original permet de :

– tester un échantillon représentatif de géosynthétique bentonitique ;

– faire varier la largeur b du recouvrement jusqu'à 0,30 m ;

– suivre les cinétiques de gonflement ou de tassement et d'absorption de liquide sous une contrainte de confinement imposée supérieure ou égale à 5 kPa sous charge hydraulique faible ;

– suivre l'évolution des flux en partie courante et dans la zone de recouvrement du GSB pour plusieurs valeurs de la contrainte de confinement (jusqu'à 100 kPa) et de la charge hydraulique ;

– étudier l'influence de la nature des matériaux de confinement en contact avec le géosynthétique bentonitique sur ses performances hydrauliques (aux niveaux du recouvrement et de la partie courante) en présence d'eau ou de tout autre liquide ;

– étudier l'écoulement de gaz à travers la partie courante ou le recouvrement d'un GSB.

La compatibilité chimique et l'influence des lixiviats sur le recouvrement de GSB peuvent être étudiées dans cet appareil. Dans ce cas, tous les constituants de la cellule doivent être chimiquement compatibles avec le liquide d'essai.

3

Mode opératoire

3.1

Préparation des éprouvettes

La méthodologie de préparation et de caractérisation des éprouvettes est décrite dans la norme NFP 84706. La partie courante testée dans le lysimètre n° 2 a une surface de 0,15 m². Le recouvrement testé dans le lysimètre n° 1 a une longueur L égale à 0,80 m et une largeur b variable. La largeur du lysimètre n° 1 est de 0,20 m. Selon la norme, la section courante au droit de ce lysimètre a une largeur de 0,1 m et le fond a été étanché sous le recouvrement jusqu'au bord du lysimètre (Figs. 1 et 3). Nous montrerons numériquement plus loin que cette étanchéité ainsi réalisée peut sous-évaluer les flux pour des recouvrements s'étendant au-delà du lysimètre.

3.2

Application de la contrainte normale de confinement

Par l'intermédiaire du contrôleur pression volume CPV1 (Fig. 1), on exerce dans la chambre de pression située au-dessus de la membrane en caoutchouc armé une pression d'eau appliquant sur le matériau de confinement une contrainte supérieure de 10 kPa à celle qui sera utilisée ultérieurement lors de l'essai. Cette opération a pour objectif de consolider le matériau de confinement afin de minimiser le tassement de celui-ci pour la suite de l'essai. Le CPV1 permet de contrôler la stabilisation du tassement ainsi que l'étanchéité globale du système d'application de la contrainte de confinement σ. Cette contrainte s'exerçant sur les GSB est égale à la pression s'exerçant sur la membrane de caoutchouc armé à laquelle s'ajoute l'effet du poids du matériau de confinement non saturé.

Durant l'essai, les faibles contraintes de confinement (jusqu'à 10 kPa) peuvent être appliquées par le réservoir du CPV1 relié à la pression atmosphérique (en réglant sa hauteur). Pour les plus fortes contraintes (jusqu'à 100 kPa), on appliquera sur l'eau du réservoir une pression d'air comprimé régulée. La déformation verticale de l'ensemble de l'éprouvette (GSB et maté-

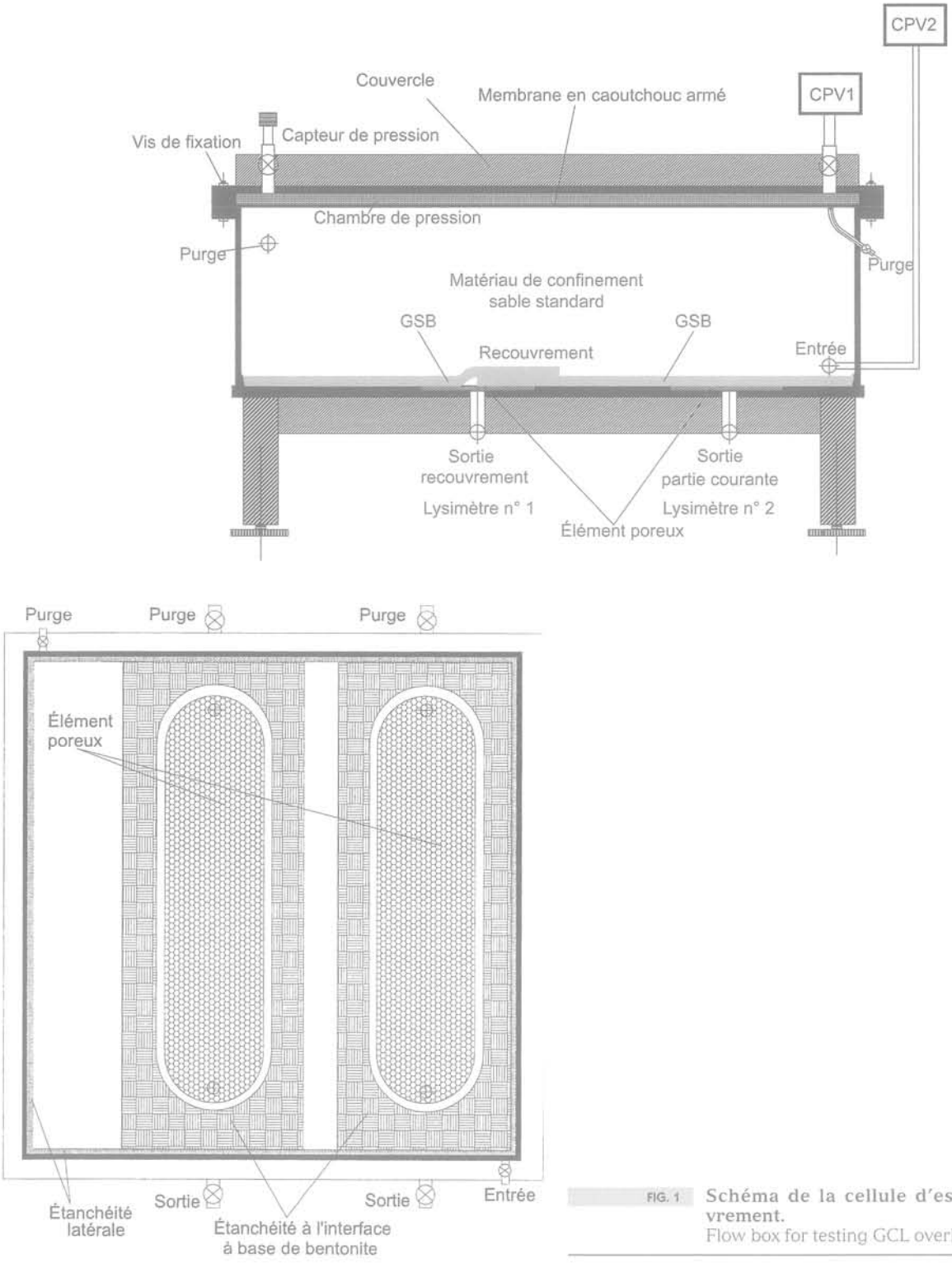


FIG. 1 **Schéma de la cellule d'essai sur recouvrement.**
Flow box for testing GCL overlaps.

riau de confinement) sera mesurée jusqu'à la stabilisation à l'aide du CPV1.

3.3

Phase de saturation du GSB

L'origine des *z* pour mesurer la charge hydraulique *H* est le fond de la cellule (face inférieure du GSB). La charge hydraulique est appliquée à l'aide du contrôleur pression volume CPV2 (Fig. 1) relié à la cuve contenant le GSB et le matériau de confinement. La saturation du GSB s'opère sous une charge hydraulique *H* faible (environ 15 mm).

Une des deux procédures suivantes peut être réalisée lors de la phase de saturation.

3.3.1

Saturation sous contrainte constante

La chambre de pression supérieure est reliée à la pression atmosphérique, la contrainte de confinement,

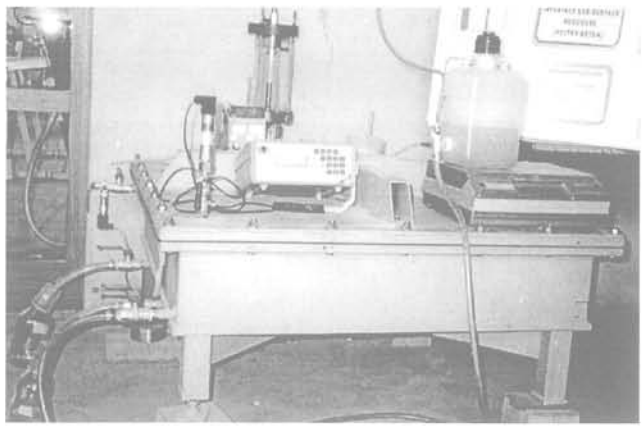


FIG. 2 **Cellule d'essai sur recouvrement (essai en cours).**
Flow box during testing GCL overlaps.

mesurée avec le CPV1, reste constante : il n'y aura donc pas de déformation du matériau de confinement. Le gonflement et l'absorption seront suivis au cours du temps. La déformation verticale du GSB est alors mesurée grâce au capteur CPV1 qui enregistre la quantité d'eau entrant ou sortant de la chambre supérieure. Cette quantité d'eau divisée par la surface totale du GSB donne une estimation de la déformation verticale supposée uniforme.

3.3.2

Saturation avec éprouvette confinée

La chambre de pression supérieure étant fermée et pleine d'eau, l'éprouvette dans son ensemble est confinée et ne peut gonfler. La pression transmise par les GSB et l'absorption seront mesurées au cours du temps. La phase de saturation des GSB peut durer deux à trois semaines. Les résultats sont exploités au fur et à mesure. La phase de saturation sera considérée comme achevée quand au moins 90 % de la pression mesurée pour un temps infini a été atteinte. Cette pression suit une loi hyperbolique en fonction du temps ce qui permet de déterminer la pression d'équilibre. Cette pression n'est pas la pression de gonflement, car le GSB a pu légèrement gonfler d'une valeur correspondant au tassement du matériau de confinement malgré la surpression à laquelle il a été soumis au préalable, car ce matériau n'est pas saturé.

3.4

Augmentation de la charge hydraulique et de la contrainte de confinement

Le gonflement ou la pression d'équilibre du GSB ayant atteint au moins 90 % de sa valeur finale, le matériau de confinement est alors saturé et la charge hydraulique H est augmentée jusqu'à la valeur désirée. La contrainte dans la chambre supérieure est augmentée d'une valeur $\Delta\sigma_F = \gamma_w.H_F$ correspondant à l'augmentation de la pression d'eau, H_F étant l'augmentation de charge, pour garder la même contrainte normale effective sur le GSB. La contrainte de confinement σ, définie dans la norme NFP 84706, est celle qui s'exerçait avant saturation, sa valeur est donc constante avant et après saturation et pendant l'augmentation de la charge hydraulique, cela signifie que la contrainte effective appliquée sur le GSB reste constante. Au cours du temps, on mesurera les volumes entrant et sortant au niveau des deux lysimètres jusqu'à la stabilisation des flux. La charge hydraulique H et/ou la contrainte de confinement σ pourront alors être augmentées.

Lors de l'augmentation progressive de la contrainte de confinement σ ou de la charge hydraulique, chaque palier de charge mécanique sera maintenu jusqu'à stabilisation du tassement. Le tassement, les flux entrant et sortant sont mesurés au cours du temps. A la fin de chaque palier, des valeurs de flux stabilisés pourront être données (le flux total entrant et les flux sortant au niveau des deux lysimètres, correspondant au recouvrement et à la partie courante). La phase d'écoulement peut durer plusieurs mois durant lesquels plusieurs paliers de charge hydraulique et de contrainte de confinement seront appliqués.

4

Formules de calcul des flux

Ces formules de calcul sont valables dans les conditions suivantes :

- charge hydraulique très faible pendant la phase de saturation ;
- contrainte de confinement constante ;
- charge hydraulique constante, pas de perte de charge dans le matériau de confinement ;
- loi de Darcy applicable dans le GSB ;
- mesure de la perméabilité après la saturation complète des GSB ;
- température ambiante régulée à 20 °C (sinon des corrections doivent être apportées).

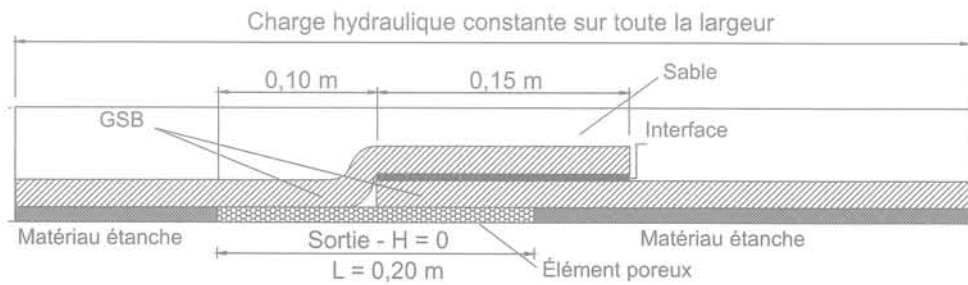


FIG. 3 **Vue sur partie recouvrement.**
View on the GCL overlap.

4.1

Flux unitaire F_{C1} traversant la partie courante et perméabilité K du GSB

Le flux unitaire F_{C1} (pour 1 m²) est calculé à partir de l'éqution (1) suivante :

$$F_{C1} = \frac{V_C}{\Delta t . A_C} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2 \quad (1) \qquad i_C = \frac{H}{e_F} \quad (2) \qquad K = \frac{F_{C1}}{i_C} \quad (3)$$

V_C volume sortant (m³) au niveau du lysimètre n° 2 pendant le temps Δt (s) ;

A_C surface du lysimètre n° 2 (0,1514 m²) ;

H charge hydraulique H appliquée, égale à la perte de charge dans le GSB ;

e_F épaisseur constante finale du GSB (partie courante) après gonflement ;

i_C gradient hydraulique dans le GSB, défini par l'équation (2).

Pour les GSB ayant une épaisseur uniforme après essai, il est possible de calculer la valeur de la perméabilité K en utilisant la loi de Darcy (équation 3).

4.2

Flux F_R traversant le recouvrement de largeur b et transmissivité globale T_R

Le flux F_R traversant un recouvrement de largeur b et de longueur unité est calculé à partir de l'équation (4). Si on suppose que ce flux passe entièrement dans l'interface entre les deux GSB du recouvrement, la transmissibilité globale T_R peut être définie par l'équation (6).

$$F_R = \frac{(V_R - 0{,}5.V_C)}{\Delta t.L} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} \quad (4) \qquad i_R = \frac{H}{b} \quad (5) \qquad T_R = \frac{F_R}{i_R} = F_R \frac{b}{H} \text{ m}^2/\text{s} \quad (6)$$

b et L respectivement largeur et longueur du recouvrement étudié en m ;

la longueur L du recouvrement est la longueur du lysimètre n° 1 (0,80 m) ;

V_R volume sortant au niveau du lysimètre n° 1 (m³) pendant le temps : Δt (s) ;

V_C volume sortant (m³) pendant le temps Δt au niveau du lysimètre n° 2, ayant une largeur de 0,20 m de section courante. Au niveau du lysimètre n° 1 correspondant au recouvrement, la section courante a une largeur de 0,10 m et la même longueur L d'où le coefficient 0,5 (équation 4) ;

i_R est le gradient hydraulique dans l'interface de largeur b (équation 5).

Si le flux traversant le recouvrement passait intégralement dans l'interface entre les deux GSB, T_R serait égal à la transmissivité propre de l'interface T_I. Nous verrons plus loin lors des simulations numériques que ce n'est pas le cas, le flux sortant F_R sera alors décomposé en deux flux, l'un horizontal F_{RH} sortant de l'interface, l'autre F_{RV}, traversant verticalement les deux GSB du recouvrement (Fig. 4). Les flux F_{RH} et F_{RV} ne peuvent être mesurés séparément au cours de l'essai.

4.3

Coefficient d'efficacité d'un recouvrement C_E

Afin d'assurer la parfaite continuité de l'étanchéité, le flux F_R, défini au paragraphe 4.2 et calculé avec l'équation (4), traversant le recouvrement sous la charge hydraulique H doit être égal ou inférieur au flux F_C traversant la même surface de la partie courante (largeur b et longueur unité) calculé avec l'équation (9). Le rapport de F_C sur F_R sera appelé coefficient d'efficacité C_E. Si ce coefficient est inférieur à 1, le recouvrement est un point faible de l'étanchéité. Le recouvrement sera efficace ou étanche si ce coefficient est égal ou supérieur à 1 :

$$C_E = \frac{F_C}{F_R} = \frac{T_C}{T_R} \quad (7) \qquad F_R = T_R \frac{H}{b} \quad (8) \qquad F_C = bK\frac{H}{e_F} = T_C \frac{H}{b} \quad (9) \qquad T_C = K\frac{b^2}{e_F} \quad (10)$$

e_F épaisseur finale du GSB en m ;

K perméabilité du GSB étudié en m/s, calculée avec l'équation (3) ;

T_R transmissivité globale du recouvrement en m²/s, calculée avec l'équation (6) ;

T_C transmissivité de continuité, en m²/s, que devrait avoir le recouvrement pour assurer l'étanchéité, c'est-à-dire pour C_E égal à 1 (équations 9 et 10).

C_E peut également être défini comme le rapport entre la transmissivité de continuité T_C et la transmissivité globale du recouvrement T_R (équation 7).

5

Essai sur recouvrement non traité et partie courante

La zone de recouvrement est en général traitée par un apport contrôlé de bentonite en vrac. Nous présentons ici les résultats d'un essai de longue durée sur un recouvrement *non traité*. Le géosynthétique bentonitique (GSB) testé est de type aiguilleté, il contient de la bentonite sodique naturelle sous forme de granulés, confinée entre un tissé en polypropylène de 90 g/m² et un non tissé également en polypropylène de 200 g/m².

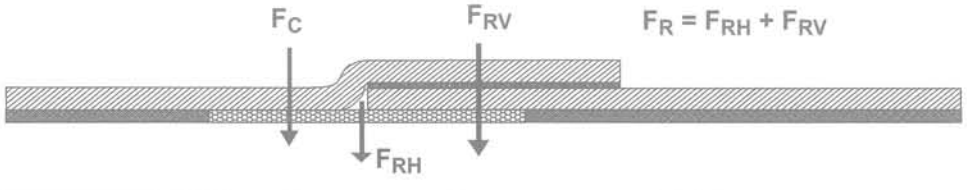


FIG. 4 **Différents flux traversant le recouvrement de GSB.**
Different flows through GCL overlap.

TABLEAU I **Caractéristiques initiales du GSB étudié.**
Initial properties of the tested Geosynthetic Clay Liner (GCL).

Masse surfacique totale (kg/m²)	Masse surfacique de bentonite (kg/m²)	Teneur en eau (%)	Épaisseur sous 2 kPa (mm)	Épaisseur sous 20 kPa (mm)	Gonflement libre (m³/kg)
5,40	5,10	27,0	5,64	5,17	0,00125

Le tableau I donne quelques caractéristiques initiales (état sec) du GSB utilisé. La largeur testée de recouvrement est de 0,15 m. Le matériau de confinement pour cet essai est un sable siliceux à granulométrie uniforme de 2 à 5 mm. On a utilisé l'eau du réseau ayant un pH de 7,6 et une conductivité de 500 µS/cm. Cet essai comporte une phase de saturation et une phase d'écoulement à l'eau. Le GSB est confiné. La pression d'équilibre développée pendant la phase de saturation est égale à 15 kPa. Lors de cet essai, nous voulions empêcher (partiellement) le gonflement du GSB durant la phase de saturation après mise en place de confinement. Cette situation peut se rencontrer quand le GSB est utilisé en étanchéité d'ouvrage dans la nappe. L'objectif est de qualifier dans ces conditions le comportement du recouvrement en déterminant son coefficient d'efficacité C_E.

5.1 Influence de la charge hydraulique *H*

Après stabilisation de la pression d'équilibre à 15 kPa, nous avons fait varier la charge hydraulique, la contrainte de confinement σ restant constante et égale à cette valeur de 15 kPa.

5.1.1 Partie courante

L'évolution du flux unitaire F_{C1} traversant la partie courante du GSB en fonction de la charge hydraulique H est présentée (Fig. 5). L'augmentation de la charge hydraulique conduit à une augmentation linéaire du débit de fuite ce qui montre que la loi de Darcy est applicable, et permet de calculer, en prenant 8,6 mm comme épaisseur du GSB, un coefficient de perméabilité K de 2,6 x 10^{-11} m/s.

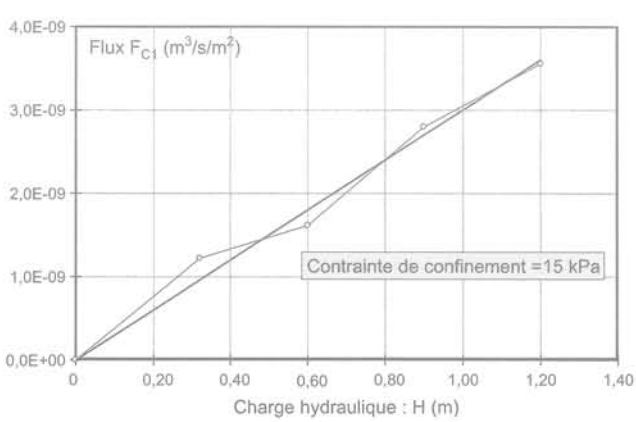


FIG. 5 **Flux unitaire F_{C1} en partie courante en fonction de la charge hydraulique.**
Unit flow through regular part of GCL *versus* hydraulic head.

5.1.2 Recouvrement

La figure 6 montre l'évolution du flux F_R traversant le recouvrement en fonction de la charge hydraulique *H*. On constate une évolution linéaire de ce flux jusqu'à un seuil au-delà duquel l'augmentation de cette charge conduit au claquage du recouvrement.

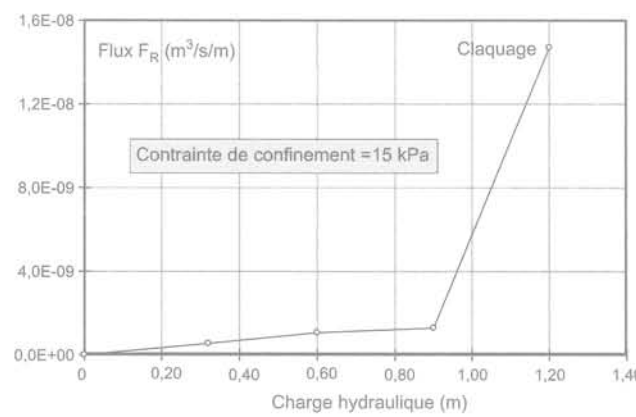


FIG. 6 **Flux F_R traversant le recouvrement en fonction de la charge hydraulique.**
Flow through GCL overlap part *versus* hydraulic head.

Le tableau II donne les transmissivités T_C et T_R et le coefficient d'efficacité C_E. Ces valeurs sont sensiblement constantes lors de l'augmentation de la charge hydraulique jusqu'à la charge limite du claquage du recouvrement. Cette charge limite se situe entre 0,90 m et 1,20 m pour le recouvrement étudié (non traité) sous une contrainte de confinement de 15 kPa.

TABLEAU II **Valeurs des transmissivités et efficacité pour σ = 15 kPa.**
Experimental transmissivity and performance values.

	Charge hydraulique (m)			
	0,30	0,60	0,90	1,20
Transmissivité T_C (m²/s)	0,69 x 10^{-10}	0,60 x 10^{-10}	0,70 x 10^{-10}	0,67 x 10^{-10}
Transmissivité T_R (m²/s)	2,88 x 10^{-10}	2,67 x 10^{-10}	2,15 x 10^{-10}	18,3 x 10^{-10}
Efficacité C_E	0,24	0,22	0,33	0,04

Le coefficient d'efficacité C_E est de l'ordre de 0,25, ce qui signifie que la continuité de l'étanchéité n'est pas rigoureusement assurée au niveau du recouvrement, le flux traversant le recouvrement est quatre fois supérieur au flux traversant la même surface de partie courante.

5.2

Influence de la contrainte de confinement σ

Dans cette phase de l'essai, réalisée avec une charge hydraulique constante de 0,30 m, nous avons évalué l'influence de la contrainte de confinement sur la partie courante et le recouvrement du GSB. Ainsi, quatre paliers de la contrainte σ ont été progressivement effectués. Pour chaque palier, le tassement et les flux entrant et sortant ont été suivis. Le tableau III donne les tassements du GSB et du sable pour chaque palier de contrainte de confinement. La stabilisation du tassement du GSB et des flux détermine la fin de chaque palier et le passage au palier suivant.

TABLEAU III **Tassements du sable et du GSB.**
Sand and GCL settlements.

	Contrainte de confinement σ (kPa)		
	15 ⇒ 33,8	33,8 ⇒ 62,5	62,5 ⇒ 91
Tassement du sable (mm)	1,5	1,25	1,1
Tassement du GSB (mm)	0,4	0,4	0,3
Épaisseur du GSB (mm)	8,6	8,2	7,9

5.2.1

Partie courante

La figure 7 donne l'évolution de la perméabilité de la partie courante en fonction de la contrainte de confinement σ. Cette perméabilité diminue de façon continue avec l'augmentation de la contrainte de confinement.

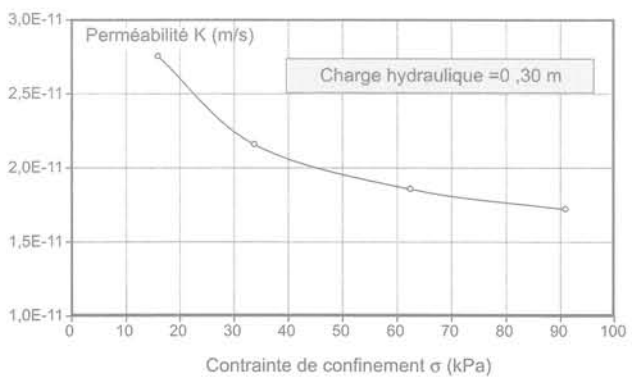


FIG. 7 **Perméabilité de la partie courante en fonction de la contrainte σ.**
Hydraulic conductivity of GCL regular part *versus* confining stress.

5.2.2

Recouvrement

La figure 8 montre les évolutions des transmissivités T_R et T_C en fonction de la contrainte de confinement σ. Le tableau IV donne les valeurs du flux F_R traversant le recouvrement, des transmissivités T_C et T_R et du coefficient d'efficacité C_E pour chaque valeur de la contrainte de confinement σ pour une charge hydraulique H de 0,30 m. La transmissivité globale T_R du recouvrement étudié diminue lors de l'augmentation de cette contrainte. De plus, nous observons que l'influence de la contrainte de confinement dans l'intervalle (15-60 kPa) est beaucoup plus forte que celle dans l'intervalle (60-100 kPa). Cette influence dépend donc de la valeur initiale de σ et de son accroissement ; elle devient plus faible lorsque la contrainte σ initiale est forte. L'augmentation de la contrainte de confinement améliore l'étanchéité du recouvrement du GSB aiguilleté étudié ; ce dernier devient efficace ($C_e > 1$) pour une contrainte σ supérieure à 60 kPa. Théoriquement, si ce recouvrement est confiné par une contrainte de confinement supérieure à cette valeur, il ne serait pas nécessaire de le traiter pour assurer la continuité de l'étanchéité.

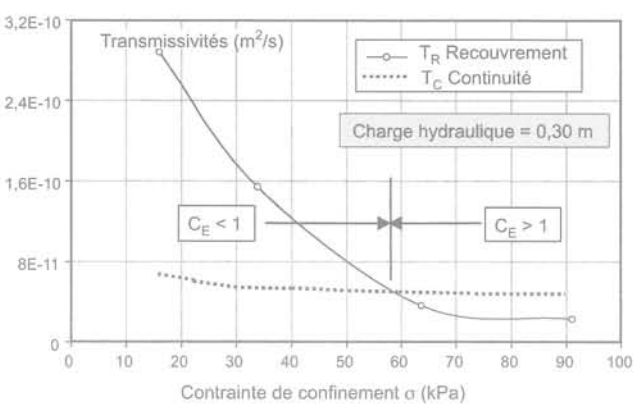


FIG. 8 **Transmissivités expérimentales T_R et T_C en fonction de la contrainte σ.**
Experimental transmissivities *versus* confining stress.

TABLEAU IV **Valeurs expérimentales du flux, des transmissivités et efficacité (recouvrement).**
Over lap experimental flow, transmissivity and performance values.

	Contrainte de confinement (kPa)			
	15	33,8	62,5	91
Flux F_R (m³/s/m)	$5,90 \times 10^{-10}$	$3,17 \times 10^{-10}$	$7,47 \times 10^{-11}$	$4,77 \times 10^{-11}$
Transmissivité T_C (m²/s)	$6,88 \times 10^{-11}$	$5,64 \times 10^{-11}$	$5,1 \times 10^{-11}$	$4,9 \times 10^{-11}$
Transmissivité T_R (m²/s)	$28,8 \times 10^{-10}$	$15,4 \times 10^{-11}$	$3,64 \times 10^{-11}$	$2,32 \times 10^{-11}$
Efficacité C_E	0,24	0,37	1,4	2,1

Lors de l'augmentation de la contrainte de confinement, deux phénomènes peuvent expliquer la diminution du flux traversant le recouvrement. Ces phénomènes sont la diminution de l'épaisseur de l'écoulement à l'interface entre le géotextile tissé et non tissé et l'extrusion de la bentonite présente aux bords du recouvrement. Cette bentonite gonflée peut fermer l'entrée supérieure et la sortie inférieure du recouvrement. La taille des vides du sol de confinement pour la partie supérieure du recouvrement et dans le sol support pour la partie inférieure joue un rôle très important dans la cicatrisation du recouvrement par la bentonite extrudée aux bords. Lorsque la taille des vides est grande, la bentonite extrudée sur les bords risque d'avoir des teneurs en eau très fortes fragilisant la cicatrisation du recouvrement (Al Nassar, 2002).

6 Simulation numérique avec le logiciel EAUSOL

Le logiciel EAUSOL (Mathieu, 1987) a été utilisé pour réaliser l'étude numérique. Il permet de calculer les écoulements dans les milieux poreux hétérogènes (multicouche) et anisotropes. Il se limite aux écoulements permanents présentant soit un plan, soit un axe de symétrie vertical. Le fluide est incompressible et suit la loi de Darcy. Le milieu poreux est indéformable (pas de couplage hydromécanique). Ce logiciel peut également déterminer la position de la surface libre même discontinue.

La plupart des logiciels d'écoulement en milieu poreux calculent uniquement la fonction « charge hydraulique » H(M), de laquelle on déduit les équipotentielles, gradients hydrauliques et débits d'eau entrant et sortant du domaine. Mais seule la détermination de la fonction « courant » ψ(M), avec le tracé des tubes de courant correspondant aux isovaleurs de la fonction ψ(M), permet de savoir où l'eau circule réellement à l'intérieur du domaine.

Ce logiciel calcule indépendamment les deux fonctions « charge hydraulique » ψ(M) et fonction « courant » ψ(M) mais vérifie la compatibilité des conditions aux limites. EAUSOL utilise la méthode des éléments finis pour résoudre les équations différentielles des fonctions H(M) et ψ(M). La résolution se ramène à deux systèmes d'équations :

$$[T]\{H\} = \{Q \text{ ou } \Delta\psi\} \quad (11) \quad \text{et} \quad [T^*]\{\psi\} = \{\Delta H\} \quad (12)$$

Les matrices de transmissibilité [T] et [T*] ne dépendent que des perméabilités et du maillage. [T*] se déduit de [T] en remplaçant toutes les perméabilités par leurs inverses (Mathieu, 1987).

{H}, {Q ou $\Delta\psi$}, {ψ} et {ΔH} sont des vecteurs contenant les valeurs, en chaque nœud I du maillage, des charges hydrauliques H_I, débits Q_I (ou $\Delta\psi_I$), valeurs de la fonction courant ψ_I et pertes de charge ΔH_I, respectivement. Les dimensions des matrices et vecteurs sont liées au nombre de nœuds.

Après avoir créé le maillage d'élément finis (quadrilatères à quatre nœuds ou triangles à trois nœuds), il faut également écrire les conditions aux limites à tous les nœuds :

• Pour tous les nœuds intérieurs I : le débit Q_I au nœud I est nul pour le calcul de la fonction H(M) (équation 11) et la perte de charge ΔH_I au nœud I est nulle pour le calcul de la fonction ψ(M) (équation 12).

• Sur tous les nœuds I des frontières extérieures au domaine d'écoulement, il faut préciser :

– soit le débit Q_I, soit la charge H_I pour le calcul de la fonction H(M),

– soit la perte de charge ΔH_I, soit la valeur de ψ_I pour le calcul de la fonction ψ(M).

• On ne peut fixer à la fois H_I et Q_I au même nœud I d'une frontière dans l'équation (11) ou ψ_I et ΔH_I dans l'équation (12). Si l'un et l'autre sont connus, il vaut mieux fixer H_I ou ψ_I, valeur de la fonction au nœud I, plutôt que $\Delta\psi_I$ (c'est-à-dire Q_I) ou ΔH_I, variation de la fonction.

L'écoulement à travers un recouvrement de GSB est un problème présentant un plan de symétrie vertical, où le liquide d'écoulement peut traverser les lés de GSB verticalement et à l'interface GSB (tissé)-GSB (non tissé) horizontalement. Le pourcentage d'écoulement horizontal et d'écoulement vertical dépend fortement de la contrainte de confinement appliquée sur le recouvrement. Au vu des résultats expérimentaux, nous ne savons pas *a priori* comment se passe l'écoulement à travers un recouvrement. C'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser EAUSOL pour simuler l'écoulement à travers un recouvrement de GSB. Le problème peut être facilement résolu par l'utilisation de ce logiciel à condition de connaître la perméabilité de tous les éléments, y compris ceux modélisant l'interface.

7 Simulation de l'essai de recouvrement réalisé

Une première simulation représentant l'ensemble du dispositif avec les deux lysimètres n° 1 (recouvrement) et n° 2 (partie courante) a confirmé l'indépendance des deux écoulements. Nous pouvons donc simuler uniquement par la suite la partie du dispositif expérimental concernant le recouvrement testé et les résultats obtenus seront présentés.

Dans cette simulation, on distingue quatre domaines en fonction de leurs perméabilités supposées isotropes :

• *domaine 1 :* les matériaux perméables entourant le GSB, c'est-à-dire le géocomposite de drainage sous le GSB au niveau du lysimètre (épaisseur 2 mm) et le sol de confinement (sable standard). Ces matériaux sont très perméables par rapport aux GSB. Leur perméabilité est forte ($K = 1 \times 10^{-3}$ m/s) et n'influence pas le flux traversant le recouvrement. L'épaisseur simulée du sol de confinement pourra être réduite à 15 mm ;

• *domaine 2 :* le GSB, sa perméabilité est mesurée dans la même cellule par le lysimètre n° 2 au cours de l'essai. L'épaisseur de chaque GSB est fixée à 8 mm (valeur moyenne). Les variations de la perméabilité du GSB en fonction de la contrainte de confinement sont connues ;

• *domaine 3 :* l'interface du recouvrement, sa transmissivité T_I est inconnue (seule la transmissivité globale du recouvrement T_R a été déterminée expérimentalement et ne peut être utilisée ici) : $T_I = K_I \times e_I = ?$ (K_I est la perméabilité de l'interface, e_I est son épaisseur). Pour cal-

culer cette transmissivité T_I nous avons supposé une épaisseur constante de 1 mm pour l'interface et nous allons déterminer sa perméabilité par calage numérique. Le principe du calcul est de faire varier la perméabilité de l'interface jusqu'à ce que la valeur calculée du flux total F sortant du lysimètre soit égale à celle mesurée expérimentalement dans la cellule ;

• *domaine 4 :* le matériau étanche du fond de la cellule hors lysimètre. Nous utiliserons une perméabilité de 10^{-16} m/s pour ce domaine.

Ainsi, un maillage d'élément finis (quadrilatères et triangles) de 1 400 nœuds et 1 311 éléments a été fait sachant que l'épaisseur du GSB et celle de l'interface sont relativement faibles, ce qui impose un maillage très fin avec des mailles de l'ordre de 1 mm et une perméabilité définie pour chaque élément en fonction du domaine. Domaines et maillage sont présentés sur la figure 9, avec une échelle verticale doublée par rapport à l'horizontale (ainsi que dans les figures suivantes), vu les très faibles épaisseurs des matériaux.

Pour une charge hydraulique de 0,30 m, nous étudierons l'influence de la contrainte de confinement sur la valeur de la transmissivité T_I de l'interface du recouvrement étudié et sur la distribution des tubes de courant. Nous comparerons la transmissivité globale T_R déterminée expérimentalement et la transmissivité de l'interface T_I calculée par le logiciel (Fig. 10). On constate que la transmissivité T_I calculée avec le logiciel est toujours plus faible que la transmissivité globale T_R qui englobe la totalité du flux traversant le recouvrement.

La configuration simulée dans le logiciel concerne le lysimètre n° 1 de 0,20 m de large avec un recouvrement de 0,15 m de largeur et une partie courante de 0,10 m de largeur (Fig. 9) correspondant à l'essai présenté. La longueur simulée est de 1 m. Nous distinguerons les trois flux sortant de ce lysimètre, F_C pour la partie courante, F_{RH} passant par l'interface entre les deux GSB, et F_{RV} traversant verticalement les deux GSB au niveau du recouvrement (Fig. 4). La somme de ces trois flux est égale au flux total F pour 1 m de longueur traversant le lysimètre n° 1. Nous rappelons qu'expérimentalement, il n'est pas possible de distinguer les deux flux F_{RH} et F_{RV} dont la somme est F_R.

Le tableau V donne les valeurs des perméabilités du GSB utilisées dans le calcul en fonction de la contrainte

TABLEAU V **Valeurs expérimentales et calculées par EAUSOL des flux (lysimètre n° 1).**
Experimental and computed flows through lysimeter n° 1.

		Contrainte de confinement (kPa)			
		15	33,8	62,5	91
Recouvrement	Flux F_R ($m^3/s/m \times 10^{10}$) (Valeurs expérimentales)	5,90	3,17	0,75	0,48
	Flux relatif F_R/F	87 %	81 %	52 %	42 %
	Flux relatif F_R/F	81 %	74 %	40 %	34 %
	Flux relatif F_{RH}/F	71 %	58 %	11 %	3 %
	Flux relatif F_{RV}/F (Résultats logiciel EAUSOL)	10 %	16 %	29 %	31 %
Partie courante	Flux F_C ($m^3/s/m \times 10^{10}$) (Valeurs expérimentales)	0,90	0,75	0,68	0,65
	Flux relatif F_C/F	13 %	19 %	48 %	58 %
	Flux relatif F_C/F (Résultats logiciel EAUSOL)	18 %	26 %	60 %	66 %
GSB	Perméabilité K ($m/s \times 10^{10}$) pour une épaisseur de 8 mm	0,27	0,21	0,18	0,17
Flux total du lysimètre F ($m^3/s/m \times 10^{10}$)					
Valeur expérimentale (valeur de calage)		6,8	3,9	1,43	1,13
Résultats logiciel EAUSOL		6,89	3,76	1,54	1,24
Précision du calage		1 %	4 %	8 %	10 %

normale. Il permet également de comparer les valeurs expérimentales et celles calculées par le logiciel EAUSOL des différents flux sortant du lysimètre de recouvrement pour chaque valeur de la contrainte de confinement et pour une charge hydraulique de 0,30 m. On constate qu'entre les flux traversant la partie courante F_C et le recouvrement F_R, les écarts entre les mesures expérimentales et la simulation numérique se situent entre 5 % et 12 % du flux total F traversant le lysimètre. Les flux traversant le recouvrement, calculés par EAUSOL, sont également présentés graphiquement (Fig. 11). L'augmentation de la contrainte σ diminue sensiblement le flux F_R traversant ce recouvrement conformément au résultat expérimental. Cela se traduit par une diminution sensible du flux horizontal F_{RH}, le flux vertical F_{RV} restant approximativement constant. Pour une contrainte de confinement supérieure à 70 kPa, le flux horizontal F_{RH} traversant l'interface du recouvrement devient négligeable. Ainsi, l'augmentation progressive de la contrainte de confinement

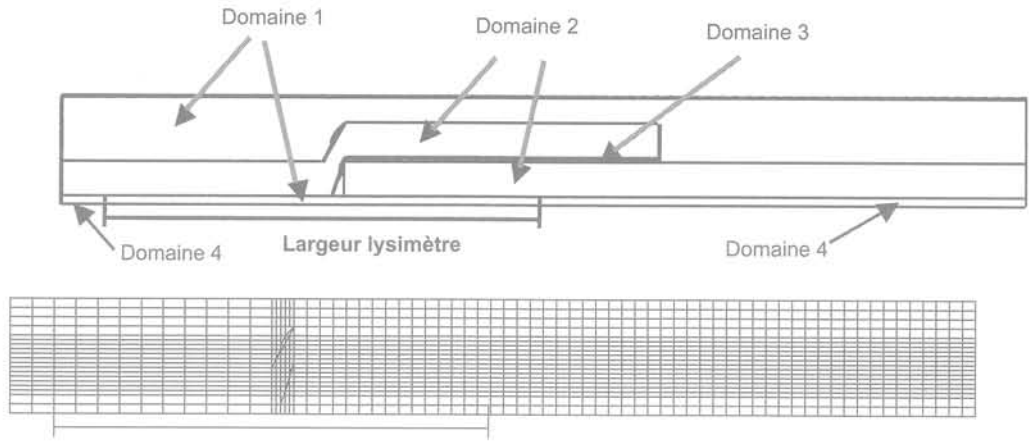


FIG. 9 **Définition des domaines et maillage utilisé avec le logiciel EAUSOL.**
Domains and mesh used for numerical computation.

change progressivement le sens de l'écoulement d'un écoulement principalement horizontal à travers l'interface du recouvrement vers un écoulement essentiellement vertical à travers les GSB supérieur et inférieur de ce recouvrement.

La figure 12 montre les tubes de courant (résultats EAUSOL) traversant le recouvrement étudié pour une charge hydraulique de 0,30 m et pour des contraintes σ variant de 15 à 91 kPa. Les flux partiels (F_C, F_{RH}, F_{RV}) ont été estimés par le décompte des tubes de courant, le flux de chaque tube étant le même et égal à F/n, n étant le nombre total de tubes, fixé à trente dans toutes nos simulations.

La simulation numérique réalisée dans cette partie considère une transmissivité de l'interface T_I moyenne prenant en compte la transmissivité de l'interface proprement dite et la transmissivité de la bentonite extrudée sur les bords. Cette bentonite a déjà influencé les valeurs des débits mesurés et utilisés pour la simulation, donc le calcul de T_I.

8

Simulation de différentes largeurs de recouvrement

Nous allons maintenant étudier numériquement l'influence de la largeur du recouvrement sur le débit de fuite traversant ce recouvrement avec les mêmes conditions que l'essai expérimental réalisé. Nous avons supposé que pour une valeur donnée de la contrainte de confinement σ, la valeur de la transmissivité de l'interface T_I reste constante sous cette contrainte et ne change pas avec la largeur du recouvrement.

Pour une contrainte σ donnée, avec la valeur de la transmissivité T_I connue, nous faisons varier la largeur du recouvrement de 0,05 m à 0,30 m en l'augmentant de 0,025 m chaque fois et pour chaque valeur de cette largeur nous calculons le flux traversant le recouvrement.

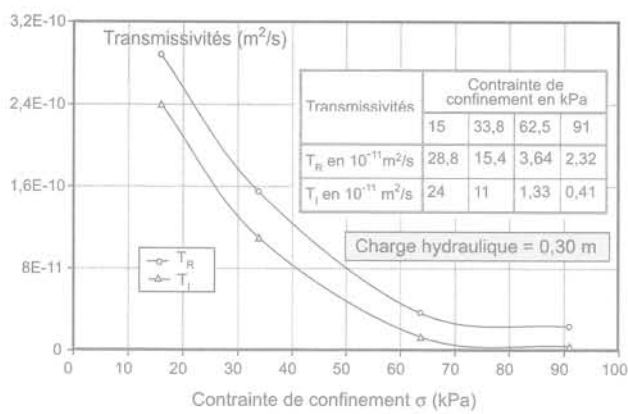


FIG. 10 **Transmissivités en fonction de la contrainte de confinement.**
Influence of the confining stress on the transmissivity values.

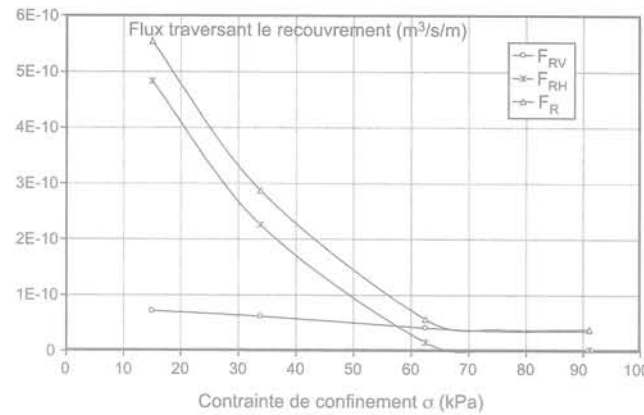
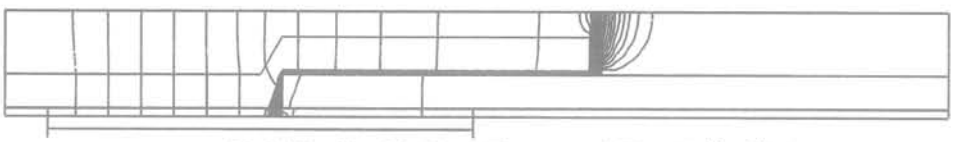
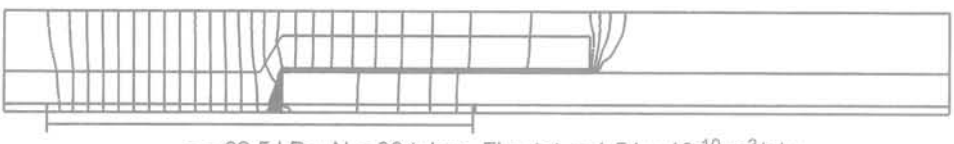


FIG. 11 **Influence de la contrainte de confinement sur les flux (EAUSOL).**
Overlap flows *versus* confining stress (computer program results).

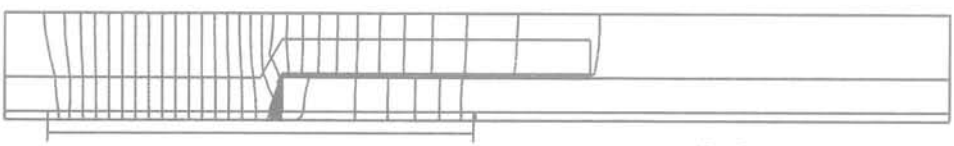
σ = 15 kPa, N = 30 tubes, Flux tot. = 6,89 × 10^{-10} $m^3/s/m$



σ = 33,8 kPa, N = 30 tubes, Flux tot. = 3,76 × 10^{-10} $m^3/s/m$

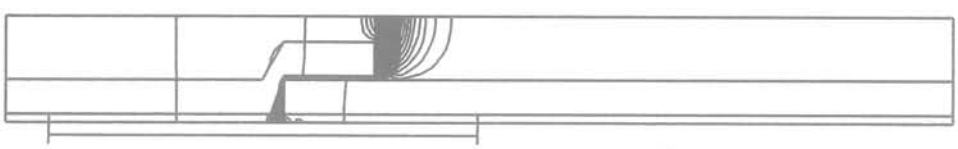


σ = 62.5 kPa, N = 30 tubes, Flux tot. = 1,54 × 10^{-10} $m^3/s/m$

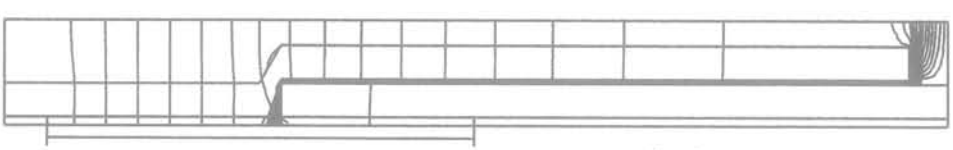


σ = 91 kPa, N = 30 tubes, Flux tot. = 1,24 × 10^{-10} $m^3/s/m$

FIG. 12 **Écoulement au droit du recouvrement en fonction de la contrainte σ.**
Flow lines in the GCL overlap with different confining stresses.

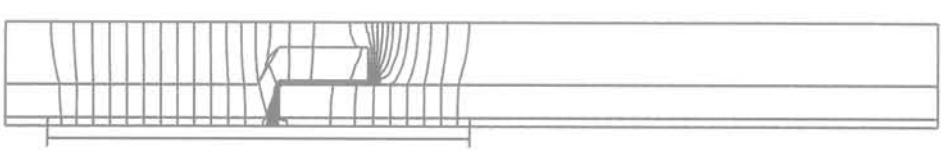


Largeur du recouvrement = 0,05 m, Flux tot. = 19,27 × 10^{-10} $m^3/s/m$, N = 30 tubes

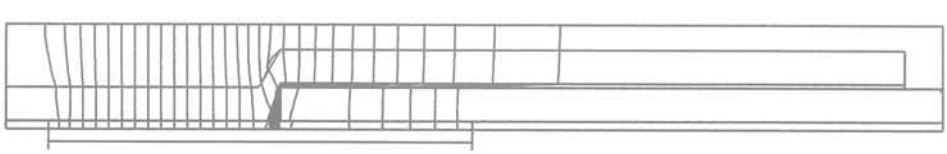


Largeur du recouvrement = 0,30 m, Flux tot. = 4,69 × 10^{-10} $m^3/s/m$, N = 30 tubes

FIG. 13 **Influence de la largeur du recouvrement à faible contrainte ; σ = 15 kPa.**
GCL overlap width influence on flow nets with low confining stress.



Largeur du recouvrement = 0,05 m, Flux tot. = 1,59 × 10^{-10} $m^3/s/m$, N = 30 tubes



Largeur du recouvrement = 0,05 m, Flux tot. = 1,23 × 10^{-10} $m^3/s/m$, N = 30 tubes

FIG. 14 **Influence de la largeur du recouvrement à forte contrainte ; σ = 91 kPa.**
GCL overlap width influence on flow lines with high confining stress.

Nous montrons (Figs. 13 et 14) les tubes de courant pour la contrainte de confinement la plus faible (15 kPa) et la plus forte (91 kPa) et pour le recouvrement le moins large (0,05 m) et le plus large (0,30 m). A faible contrainte, pour toutes les largeurs, on constate que le flux sortant du recouvrement passe essentiellement par l'interface. Pour un recouvrement de 0,30 m, une partie du flux traverse verticalement le GSB supérieur puis s'écoule dans l'interface. Par contre, à forte contrainte, pour toutes les largeurs, on constate dans le recouvrement, outre un écoulement dans l'interface, un écoulement vertical traversant les deux GSB supérieur et inférieur (correspondant au flux F_{RV}), comme cela avait déjà été constaté sur la figure 12.

Pour chaque valeur de la contrainte de confinement, la figure 15 montre l'évolution du flux F_R traversant le recouvrement en fonction de sa largeur. Pour une contrainte de confinement donnée, nous observons que la relation entre le flux F_R traversant le recouvrement et sa largeur n'est pas linéaire. Au-delà d'une largeur du recouvrement de 0,10 m, pour des contraintes de 62,5 à 91 kPa, ce flux F_R varie peu en fonction de la largeur du recouvrement. Pour des contraintes plus faibles, l'évolution de ce flux F_R est plus sensible à la valeur de la largeur du recouvrement.

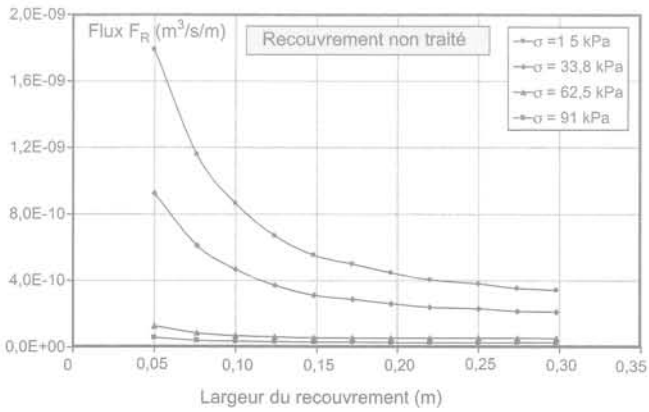


FIG. 15 **Flux F_R traversant le recouvrement en fonction de sa largeur (EAUSOL).**
Computed GCL overlap flow *versus* overlap width.

9

Étude numérique des conditions d'essai

Le logiciel EAUSOL permet de simuler l'influence de certaines conditions expérimentales. Dans l'essai sur recouvrement, l'extrémité du GSB inférieur est placée au milieu du lysimètre de 0,20 m de large, avec une largeur de 0,10 m de partie courante et la même largeur de recouvrement sous le lysimètre. Le fond de la cuve a été étanché jusqu'au bord du lysimètre, y compris sous le recouvrement lorsque celui-ci a une largeur supérieure à 0,10 m. Nous avons simulé, dans le cas d'un recouvrement de 0,15 m de large, sous une charge hydraulique de 0,30 m et sous les différentes contraintes de confinement, l'influence d'une zone très perméable de largeur variable L_{YS} au droit du lysimètre et sous le recouvrement. Cette zone perméable s'étend partiellement sous le recouvrement (cas de l'essai où

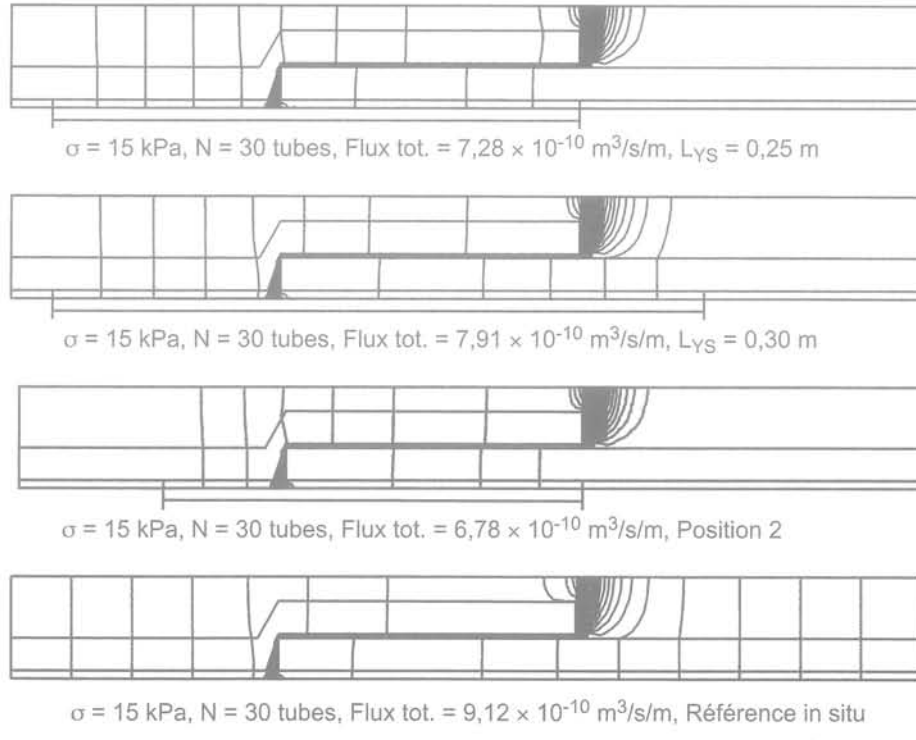


FIG. 16 **Influence de la largeur perméable sous le GSB, σ = 15 kPa (EAUSOL).**
Below GCL pervious width influence at low confining stress on flow lines.

L_{YS} vaut 0,20 m correspondant au lysimètre seul) ou totalement (L_{YS} = 0,25 m) ou va au-delà du recouvrement (L_{YS} = 0,30 m). Nous étudions également un positionnement différent du recouvrement au-dessus du lysimètre laissant seulement 0,05 m de partie courante (position 2). Enfin, nous simulons le cas dit de référence correspondant à une situation fréquemment rencontrée *in situ* lorsque le sol support inférieur est perméable sur toute la longueur. Nous présentons (Fig. 16) les tubes de courant correspondant à la contrainte la plus faible et ceux correspondant à la contrainte la plus forte (Fig. 17). Le cas correspondant à L_{YS} = 0,20 m a déjà été présenté (Fig. 12). Par décompte des tubes de courant, on constate que le flux relatif F_{RV}/F_R est sous-estimé pour L_{YS} = 0,20 m, lorsque cette largeur perméable ne couvre pas la largeur du recouvrement, ce flux relatif restant sensiblement constant dans les autres cas. Dans le tableau VI, outre le flux traversant spécifiquement le recouvrement F_R, nous indiquons l'écart en pourcentage par rapport à la référence in situ et la valeur du coefficient d'efficacité C_E calculée correspondant à la référence. On constate que, lorsque le recouvrement est efficace, c'est-à-dire sous une contrainte de confinement supérieure à 62,5 kPa dans le cas d'un recouvrement non traité de 0,15 m de large, il serait nécessaire lors de la réalisation de l'essai, de ne pas avoir un niveau étanche sous le recouvrement sinon le flux F_R concernant le recouvrement pourrait être sous-estimé de 20 à 30 % (cas de l'essai avec une largeur perméable de 0,20 m correspondant au lysimètre seul).

10

Conclusion

L'utilisation du dispositif expérimental destiné à mesurer les flux d'eau traversant un GSB aiguilleté nous a permis de mettre en évidence les points suivants :

– les essais nécessitent une phase de saturation du GSB suivie d'une phase d'écoulement. Pour la phase de saturation, ces essais ont montré qu'après quelques jours, les cinétiques d'absorption et de gonflement ou de la pression d'équilibre de tous les échantillons testés obéissent à des lois hyperboliques en fonction du temps, ce qui permet de calculer ces valeurs pour un temps infini et de vérifier qu'on a atteint l'équilibre hydrique du GSB fixé à 90 % des valeurs infinies ;

– dans la phase d'écoulement, les essais montrent que l'augmentation de la charge hydraulique, avec une contrainte de confinement constante, conduit généralement à une croissance quasi linéaire des flux traversant le recouvrement et la partie courante. Des valeurs élevées de la charge hydraulique par rapport à la contrainte de confinement peuvent provoquer le claquage du recouvrement étudié non traité se traduisant par une augmentation importante du flux traversant le recouvrement ;

– l'augmentation de la contrainte de confinement conduit toujours à une diminution sensible du flux traversant le recouvrement. Un recouvrement non traité pourrait assurer la continuité de l'étanchéité si la contrainte de confinement est suffisamment élevée.

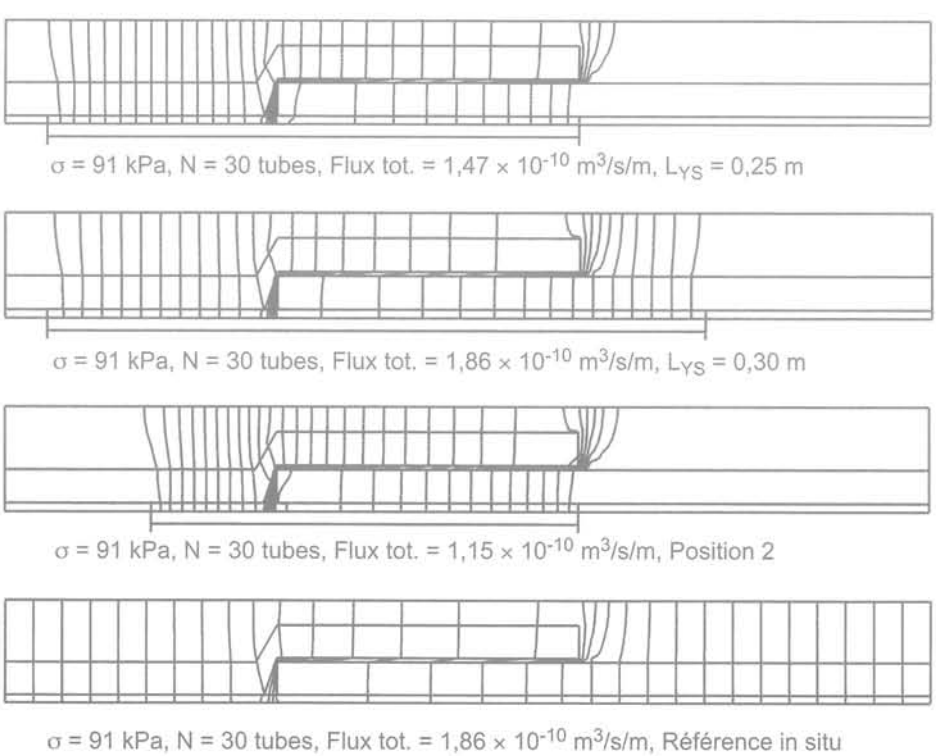


FIG. 17 **Influence de la largeur perméable sous le GSB, σ = 91 kPa (EAUSOL).**
Below GCL pervious width influence at high confining stress on flow lines.

TABLEAU VI **Influence de la largeur perméable pour un recouvrement de 15 cm (EAUSOL).**
Pervious width influence on flows with normal stress values.

Contrainte de confinement (kPa)	Largeur L_{YS} perméable (m)	Flux F_R traversant le recouvrement ($m^3/s/m \times 10^{-10}$)	Écart en % avec référence *in situ*	Efficacité C_E (référence)
15	L_{YS} = 0,20 m	5,74	– 6 %	
	L_{YS} = 0,25 m	6,08	0 %	
	L_{YS} = 0,30 m	6,20	+ 2 %	
	Position 2	6,10	0 %	
	L_{YS} = infinie	6,08	Référence	0,26
33,8	L_{YS} = 0,20 m	2,88	– 8 %	
	L_{YS} = 0,25 m	3,05	– 2 %	
	L_{YS} = 0,30 m	3,16	+ 1 %	
	Position 2	2,94	– 6 %	
	L_{YS} = infinie	3,12	Référence	0,38
62,5	L_{YS} = 0,20 m	0,77	**– 20 %**	
	L_{YS} = 0,25 m	1,02	+ 6 %	
	L_{YS} = 0,30 m	1,03	+ 7 %	
	Position 2	1,07	+ 11 %	
	L_{YS} = infinie	0,96	Référence	1,18
91	L_{YS} = 0,20 m	0,55	**– 30 %**	
	L_{YS} = 0,25 m	0,74	– 4 %	
	L_{YS} = 0,30 m	0,74	– 4 %	
	Position 2	0,74	– 4 %	
	L_{YS} = infinie	0,77	Référence	1,30

La simulation numérique de l'écoulement à travers un recouvrement de GSB apporte un éclairage sur les points suivants :

– l'utilisation du logiciel EAUSOL permet la détermination de la transmissivité propre de l'interface T_I entre les deux GSB par calage numérique. Ce paramètre ne peut pas être déterminé expérimentalement ;

– le tracé des tubes de courant à débit constant permet de mieux connaître la circulation de l'eau. Le flux traversant un recouvrement non traité se situe essentiellement à l'interface sous faible contrainte de confinement. La proportion traversant verticalement le GSB supérieur puis inférieur augmente avec la largeur du recouvrement et surtout avec la contrainte de confinement et rend le recouvrement plus efficace ;

– tous les paramètres hydrauliques étant déterminés (perméabilités et transmissivités) et uniquement dans ce cas, on peut alors simuler numériquement des largeurs de recouvrement différentes et également optimiser le mode opératoire sans recourir à l'expérimentation.

Bibliographie

Al Nassar M. – *Performances des discontinuités présentes dans les dispositifs d'étanchéité par Géosynthétiques Bentonitiques. Étude des perforations et recouvrements*. Thèse, INSA de Lyon, 2002, 292 p.

Al Nassar M., Didier G. – « Water or gas flow through geosynthetic clay liner overlaps ». *Proceed. of the seventh international conference on geosynthetics*, 7 ICG, Nice, France, September 22-27, vol. 2, 2002, p. 541-544.

Cooley B.H., Daniel D.E. – « Seam performance of overlapped GCLs ». *Proceed. Conference Geosynthetics '95*, Nashville, Tennessee, USA, February 21-23, Industrial Fabrics Association International, Minnesota, USA, 1995, p. 691-705.

Daniel D.E., Trautwein S.J., Goswani P.K. – « Measurement of hydraulic properties of GCL liners using a flow box ». *Testing and acceptance criteria for GCL*, ASTM SPT 1308, Ed. Larry Well, USA, 1997, p. 196-207.

Didier G., Al Nassar M. – « Hydraulic performances of Geosynthetic Clay Liners. Some French laboratory test results ». *Geosynthetic Clay Barriers*, International Symposium Nuremberg, April 16-17, Germany, 2002.

Estornell P.M., Daniel D.E. – « Hydraulic conductivity of three GCLs ». *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 118, n° 10, 1992, p. 1592-1606.

Garcin P. – *Étude expérimentale du comportement hydraulique et mécanique des géosynthétiques bentonitiques*. Thèse, Université Joseph-Fourier, Grenoble I, 1997.

Mathieu Ph. – « Calcul des écoulements dans les milieux poreux anisotropes hétérogènes par la méthode des éléments finis : détermination de la fonction courant ». 3es Journées universitaires de Géotechnique, Saint-Nazaire, 28-30 janvier 1987, 7 p.

Norme NFP 84706 – *Détermination du flux de liquide par unité de longueur de recouvrement des géosynthétiques bentonitiques*, 2002.