

Comportement hydraulique d'un « système multicouche » non saturé - étude numérique Application au stockage de déchets radioactifs à vie courte

Hydraulic behaviour of a unsaturated "stacking of natural
material beds". Numerical study
Application to short lived radioactive waste storage

P. BRUN

Compagnie Nationale du Rhône *

E. ALONSO PEREZ DE AGREDA

ETSCCPB/UPC **

Rev. Franç. Géotech., n° 62, pp. 35-47 (janvier 1993)

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une recherche entreprise pour le compte de l'ANDRA (Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs) et porte sur la modélisation du comportement hydraulique d'un « système multicouche » non saturé qui trouve son application dans la conception d'une couverture de stockage de déchets radioactifs de surface.

On décrit ce dispositif en précisant les paramètres et les fonctions de calage caractérisant les matériaux mis en jeu. On présente l'environnement de NOSAT, le modèle numérique utilisé.

Une série d'analyses paramétriques permet de connaître les paramètres influents et de dégager des lois de comportement hydraulique. Les simulations bidimensionnelles confirment le fonctionnement de barrière étanche d'un tel système.

On propose enfin une prospective qui permettrait d'affiner la validité des modélisations.

Abstract

This study takes place in a research program initiated by the ANDRA (Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs) and deals with the modelisation of hydraulic behaviour in a unsaturated stacking of natural material beds designed to a deposit of surface radioactive waste.

Such a scheme is described : parameters and specific functions of the materials are got into details. The numerical model used, NOSAT, is presented.

A complete parametric study allows to know influential parameters and to express laws of hydraulic behaviour. Bidimensional simulations verify the water-tight smooth working of the scheme.

We propose finally a prospective which could refine the validity of the computations.

* CNR/Direction de l'Exploitation, 2, rue André-Bonin, 69316 Lyon Cedex 04.

** ETSCCPB/UPC, Departamento de Ingenieria del Terreno, C/Gran Capitan, S/n, Modulo D2, 08034 Barcelona.

1. INTRODUCTION

L'étude porte sur une approche théorique et numérique des écoulements de l'eau météorologique au sein d'un système ayant une vocation de barrière étanche pour un stockage de déchets radioactifs à vie courte. Un tel système a été proposé par l'ANDRA (cf. fig. 1). Le rôle de barrière étanche incombe en fait à la couche constituée par un mélange argilo-sableux compacté (ANDRÉ-JEHAN, 1985).

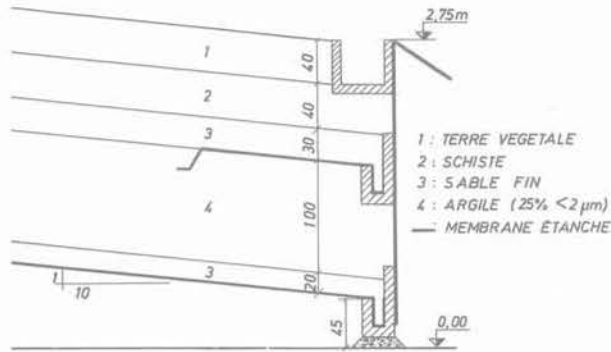


Fig. 1. — Schéma du dispositif.

Fig. 1. — Scheme of device.

La solution d'une monocouche d'argile jouant le rôle de couverture étanche ne peut être retenue par crainte de dessèchements périodiques du matériau avec création de fissures de dessiccation réduisant à néant le caractère imperméable de la couche. Une couverture multicouche a donc été envisagée : une couche de terre végétale superficielle devrait favoriser l'évapotranspiration et assurer une certaine régulation des débits, sous cette couche est prévu un mélange schisteux devant jouer un rôle de barrière biologique, et sous ce système de surface, une réduction et une régulation supplémentaires des débits d'infiltration atteignant la couche d'argile devraient être assurées par un drain sableux. A la base du système, sous la couche argileuse limitant les transferts hydrauliques est prévu un mince drain sableux.

L'ensemble de ce système multicouche est modélisé au moyen du logiciel NOSAT, mis au point au Geotechnical Engineering Department (UPC Barcelona), que l'on s'efforce de développer. On dispose, en matière de calage, de mesures de laboratoire et in situ (réalisées sur un modèle artificiel construit à Saint-Sauveur-le-Vicomte en Normandie).

Après la présentation détaillée du modèle numérique, on analysera les résultats fournis par des simulations uni- et bidimensionnelles, en tentant de dégager quelques lois de comportement hydraulique prévalant dans un tel système multicouche.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Modèle numérique

2.1.1. Géométrie - Matériaux concernés

La géométrie de ce multicouche possède une propriété importante conditionnant la construction du maillage :

les couches le constituant sont inclinées et d'épaisseur variable. On notera, de plus, la faible pente du système (1/10) et la grande extension latérale comparée à l'élévation. La construction du maillage répond aux règles classiques de resserrement dans la distribution des éléments au voisinage des limites et des intercouches (GUELLEC, 1978).

Deux des quatre matériaux constitutifs du multicouche sont parfaitement caractérisés : le sable et l'argile. Seules font défaut les relations expérimentales entre la perméabilité et la succion. En revanche, on ne possède que peu d'information pour la terre végétale et le schiste. La courbe granulométrique du schiste permet d'approximer la valeur de la perméabilité à saturation (relation de Hazen). Tant pour le schiste que pour la terre végétale, des profils tensiométriques mesurés in situ précisent la gamme de succion intervenant (Rapport BONIN - BRGM, mai 1989). La même étude fournit pour la terre végétale une courbe perméabilité - teneur en eau. On remarque a priori certaines lacunes concernant la caractérisation de fonctions qu'il est préférable de bien connaître dans le cadre d'une modélisation (DELAGE, 1987).

2.1.2. Conditions initiales et aux limites appliquées au modèle numérique

Les « strates » du multicouche sont caractérisées par des paramètres structuraux, hydrauliques et de conditions initiales très différentes. Ces schémas discontinus, existant en particulier pour les valeurs de la succion initiale et de la perméabilité à saturation, sont des sources potentielles de divergence numérique. Pour les conditions initiales, on affecte les valeurs aux pressions d'air et d'eau correspondant à l'état de succion initial du matériau concerné.

Concernant les conditions aux limites, on a choisi une condition de flux hydraulique à la surface supérieure afin de s'approcher des conditions réelles. Au niveau des drains, on impose la pression atmosphérique pour l'air et une condition de type surface de suintement ou succion pour l'eau. Partout ailleurs, on a une condition d'imperméabilité.

2.1.3. Présentation, utilisation et développement du logiciel NOSAT

Le logiciel NOSAT, construit à partir de ICFEP, existe sous plusieurs formes dont celle, évolutive, que nous avons développée. Le logiciel permet le calcul couplé des écoulements des fluides air et eau et des variations de porosité et de contrainte. Il s'agit d'un code aux éléments finis de type mécanique et hydraulique. Compte tenu de l'indéformabilité du système, nous avons utilisé la partie hydraulique. Les équations théoriques explicitées dans les récentes publications de ALONSO et al. ne sont pas développées ici. L'organigramme de NOSAT écrit par LLORET en 1982 est fourni en annexe.

**2.2. Fonctions de calage utilisées.
Paramètres d'entrée**

2.2.1. Justification

• *Fonction indice des vides*

La fonction disponible sur la version « de base » de NO-SAT est du type :

$$e = e_o + a_e (\sigma - P_a) + b_e (P_a - P_w) - c_e (\sigma - P_a) (P_a - P_w) \quad (1)$$

(ALONSO et GENS, 1987)

avec :

- σ , contrainte totale,
- P_a , pression d'air,
- P_w , pression d'eau,
- a_e, b_e, c_e , paramètres d'ajustement.

Dans le cadre de notre étude on aura toujours :

$$e = e_o \quad (2)$$

• *Fonction degré de saturation*

$$S_r = f (S_{ro}, \sigma - P_a, P_a - P_w)$$

La fonction disponible sur la version « de base » de NO-SAT est du type :

$$S_r = S_{ro} - [1 - \exp [-a_s (P_a - P_w)]] \cdot [b_s + c_s \cdot (\sigma - P_a)] \quad (3)$$

(ALONSO et GENS, 1987)

avec les mêmes notations que précédemment, et a_s, b_s, c_s , paramètres d'ajustement. On a implanté deux autres types de fonction :

$$S_r (P_c) = S_{irr} + \frac{S_{rsn} - S_{irr}}{(1 + (\alpha \cdot P_c)^\beta)^\delta} \quad (4)$$

(VAN GENUCHTEN, 1980)

avec :

- $P_c = P_a - P_w$ et $\delta = 1 - 1/\beta$,
- S_{irr} , degré de saturation irréductible,
- S_{rsn} , degré de saturation correspondant à la saturation naturelle,
- α et β , paramètres d'ajustement indépendants.

$$S_r (P_c) = S_{irr} + \frac{(S_{rsn} - S_{irr}) \cdot A}{A + (C \cdot P_c)^B} \quad (5)$$

(VAUCLIN, 1976)

avec :

- $P_c = P_a - P_w$,
- S_{irr} , degré de saturation irréductible,
- S_{rsn} , degré de saturation correspondant à la saturation naturelle,
- A, B et C, paramètres d'ajustement indépendants.

Ces deux relations (4) et (5) ont été préférées aux relations empiriques données par VISER en 1966 ou celles de BROOKS et COREY (1966) ou GARDNER et al. (1966) regroupées par HILLEL (1980) pour des raisons de validité sur un domaine de définition étendu.

• *Fonction perméabilité à l'eau*

$$K_w = f (S_r, e) \text{ ou } K_w = f (P_c)$$

Les fonctions disponibles sur la version de base de NO-SAT sont du type :

$$K_w = \left[\frac{S_r - 0,25}{0,75} \right]^3 \cdot a_w \cdot e \cdot b_w \quad (6)$$

(ALONSO et al., 1987)
(1.D) ou (2.D)

avec (a_w) coefficient, (e) indice des vides et (b_w) coefficient (1D), ou matrice 2*2 des perméabilités,

$$K_w = b_w \text{ (1.D)} \quad (7)$$

Un autre type de fonction a été implanté sur NOSAT ; il est analogue à celui des fonctions regroupées par HILLEL (1980) :

$$K_w = \frac{A_w \cdot K_{ws}}{A_w + (C_w \cdot P_c)^{B_w}} \quad (8)$$

(HILLEL, 1980)
(1.D ou 2.D)

avec $P_c = P_a - P_w$, (A_w), (B_w) et (C_w) paramètres d'ajustement et (K_{ws}) perméabilité à saturation naturelle.

On aurait pu aussi proposer une fonction empirique de type puissance (GARDNER, 1956), mais les coefficients sont déterminés expérimentalement pour une relation de type (8).

• *Fonction perméabilité à l'air*

$$K_a = f (S_r, e, P_a) \text{ ou } K_a = f (P_c)$$

Les versions de cette fonction existantes sur la version de base de NOSAT sont du type :

$$K_a = \beta \cdot (P_a + P_{atm}) \cdot \frac{g}{\mu_a} (e \cdot (1 - S_r)) A_a \cdot b_a \quad (9)$$

(ALONSO et al., 1987)
(1.D) ou (2.D)

avec (β) coefficient de compressibilité de l'air, (e) indice des vides, (S_r) degré de saturation, (g) accélération de la pesanteur, (μ_a) viscosité de l'air, (A_a) coefficient et (b_a) coefficient ou matrice 2*2 des perméabilités ;

$$K_a = b_a \text{ (1.D)} \quad (10)$$

Comme précédemment, on a procédé à une implantation supplémentaire :

$$K_a = \frac{A_a \cdot K_{as}}{A_a + (C_a \cdot P_c)^{B_a}} \quad (11)$$

(BRUN, 1989)
(1.D ou 2.D)

avec $P_c = P_a - P_w$, (A_a), (B_a) et (C_a) paramètres d'ajustement et (K_{as}) perméabilité à saturation naturelle.

Des relations empiriques multiparamétriques donnent l'expression de la perméabilité relative à l'air en fonction des caractéristiques du matériau (SHTYKOV et DAISHEV, 1986) mais on ne peut les utiliser compte tenu de la méconnaissance des paramètres d'identification spécifiques.

On adopte, pour les matériaux sable, terre végétale et schiste la fonction ($S_r - P_c$) du type (5) et pour l'argile la fonction de type (4). Pour tous les matériaux du multicouche, on adopte les fonctions perméabilités de type (8) pour l'eau et de type (11) pour l'air.

Ces choix sont dictés par la bonne qualité de l'ajustement des courbes expérimentales aux lois. Toutefois, les paramètres intervenant dans ces relations ne sont pas systématiquement expérimentaux, ils peuvent être expérimental-numériques ou numériques. C'est en particulier le cas pour les matériaux schiste et terre végétale, pour lesquels on possède peu de données expérimentales.

Pour satisfaire l'étude paramétrique, on utilise pour la terre végétale, deux types de relation perméabilité à l'eau-succion : la relation expérimentale et une relation de type sable fin.

On fournit, figures 2 et 3, les courbes représentatives des relations « degré de saturation-pression capillaire » et « perméabilité relative-pression capillaire », pour les matériaux constitutifs du multicouche.

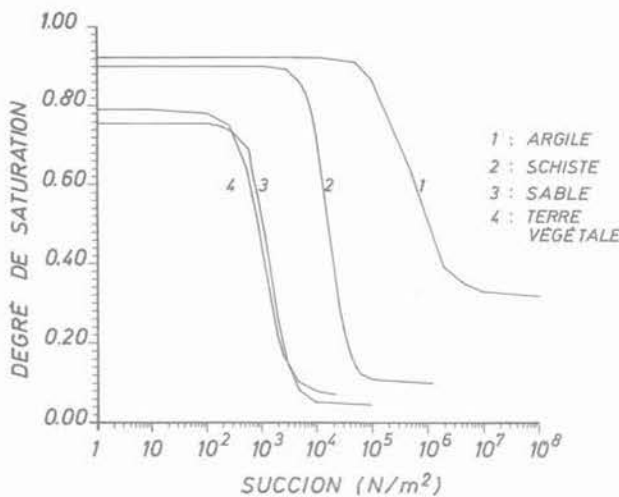


Fig. 2. — Courbes succion-degré de saturation.
Fig. 2. — Curves suction-degree of saturation.

2.2.2. Présentation synthétique des paramètres d'entrée

On a regroupé dans un tableau l'ensemble des paramètres d'entrée (paramètres structuraux, hydrauliques, coefficients des fonctions de calage) ainsi que les paramètres caractérisant l'état initial. Les valeurs précédées du symbole « ■ » sont issues d'expériences de laboratoire.

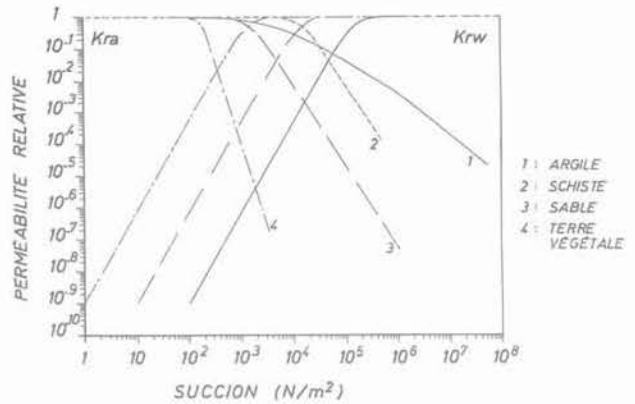


Fig. 3. — Courbes perméabilité relative - succion.
Fig. 3. — Curves relative permeability - suction.

2.3. Validation du modèle

2.3.1. Analyse paramétrique

On a analysé sur une colonne (2.D) verticale de sol homogène l'influence quantitative comparée des paramètres de calage structuraux et des conditions aux limites sur les résultats des simulations. On présente les résultats de l'étude sans son support graphique.

On a vérifié l'influence de la teneur en eau irréductible : le choix de faibles valeurs pour cette quantité entraîne des fronts d'infiltration plus marqués et ce, d'autant plus que l'état de succion initial du matériau correspond à une plus faible humidité volumique.

Le paramètre d'entrée perméabilité à saturation naturelle est, bien évidemment, primordial et conditionne très fortement les résultats de la cinétique d'infiltration.

Concernant l'influence des paramètres des perméabilités relatives, on constate que :

- l'augmentation du paramètre (A_w) (de la perméabilité à l'eau) engendre une cinétique d'infiltration plus forte, le phénomène étant plus net pour des faibles valeurs de la teneur en eau irréductible ;
- l'influence des variations de (B_a) (paramètre de la perméabilité à l'air) peut être négligée.

On a par ailleurs évalué l'influence du paramètre structural porosité ; les variations de l'indice des vides affectent peu les résultats des simulations d'infiltration.

On peut en conclusion énumérer les paramètres conditionnant les résultats de la cinétique d'infiltration, par ordre d'importance décroissante, la perméabilité à saturation naturelle, le coefficient (A_w) de la perméabilité relative à l'eau et la teneur en eau irréductible.

2.3.2. Analyse comparative des résultats fournis par LOGINF et NOSAT.

Validation du modèle NOSAT avec une solution analytique

Nous avons comparé les résultats fournis par NOSAT à ceux fournis par le logiciel LOGINF. Ce logiciel, mis au point au Centre de Géologie de l'Ingénieur de

	Argile	Sable	Terre VEG	Schiste
Type de fonction S_r-P_c	4 Van Genuchten	5 Vauclin	5 Vauclin	5 Vauclin
$S_{r,irr}$	■ 0,32	■ 0,0043	0,07	0,1
$S_{r,sn}$	■ 0,92	■ 0,757	0,79	0,9
a ou c	■ $5 \cdot 10^{-6}$	■ 10^{-2}	10^{-2}	10^{-1}
β ou B	■ 2,0	■ 2,2	2,0	2,5
A		304	100	1 000
Type de fonction K_w-P_c	8 Hillel	8 Hillel	8 Hillel	8 Hillel
A_w	(10 – 200)	■ 1 623	■ 1 000	(10 – 200)
B_w	1,0	■ 2,6	■ 4,6	1,0
C_w	10^{-2}	■ 10^{-2}	■ 10^{-2}	10^{-3}
Type de fonction K_a-P_c	11 Brun	11 Brun	11 Brun	11 Brun
A_a	10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}
B_a	(2,3-2,9)	2,8	2,8	2,8
C_a	10^{-2}	10^{-1}	1,0	10^{-2}
Indice des vides	■ 0,53	0,54	0,60	0,55
Succion initiale	■ 196/80 kN/m ²	■ 50,0 kN/m ²	■ 20,0 kN/m ²	■ 70,0 kN/m ²
θ initiale	■ 0,26	■ 0,015	0,20	0,048
S_{rw} initial	■ 0,75	■ 0,043	0,29	0,12
K_{wsn} (m/s)	■ 10^{-10}	■ 10^{-6}	10^{-4}	10^{-7}

l'École Nationale Supérieure des Mines de PARIS, se réfère à un formalisme de calcul identique à celui utilisé à l'IMG par TOUMA (1984).

On constate que les profils de teneur en eau volumique dans l'espace, calculés par LOGINF sont relativement « en avance » par rapport à ceux calculés par NOSAT, tous paramètres d'entrée étant par ailleurs égaux. Ces différences de résultats sont constatées pour un grand nombre de cas de figures.

Une analyse précise montre que les conditions imposées à la limite supérieure ne s'appliquent pas exactement dans les mêmes conditions pour les deux modèles, ce qui explique les différences de résultats calculés.

Dans le but de comparer les résultats fournis par NOSAT à ceux obtenus par une solution analytique, on a mis en œuvre la programmation d'une solution théorique à partir d'un formalisme d'équations type « transferts de chaleur ». Les calculs sont effectués pour une colonne verticale finie ou semi-infinie soumise à une condition de charge ou de flux au sommet. On obtient

dans tous les cas de figure, un ajustement parfait des résultats fournis par le modèle numérique aux courbes théoriques calculées.

Cette validation permet d'accorder une confiance optimale aux résultats fournis par NOSAT.

3. RÉSULTATS

3.1. Simulations unidimensionnelles

3.1.1. Comportement hydraulique du multicouche

On a effectué les calculs sur une verticale coïncidant avec le milieu du système multicouche (voir dessin du maillage fig. 4). Trois séries de simulations ont été réalisées. La figure 5 regroupe les profils calculés correspondants.

Les profils de la série A correspondent au choix de coefficients de la fonction perméabilité de la terre vé-

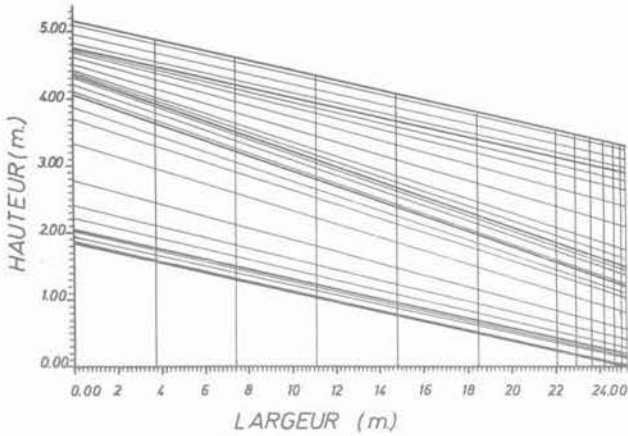


Fig. 4. — Discretisation du domaine.
Fig. 4. — Discretisation of the domain.

gétale, obtenus in-situ. Ils sont obtenus pour quatre valeurs distinctes du flux d'infiltration. Si on examine les résultats de cette série, on note dans un premier temps (cf. A2) pour des durées inférieures à 15 jours, l'apparition de fronts d'infiltration dans la couche de terre végétale associée à des rééquilibrages de succion pour les couches inférieures, et, dans un deuxième temps, toujours des fronts d'infiltration dans la terre végétale mais associés à un décalage des profils de succion vers la saturation dans la couche de schiste. Cela signifie

que l'on a un écoulement en régime non saturé dans la terre végétale et que l'eau d'infiltration atteint rapidement le schiste. Le phénomène d'infiltration prédomine donc sur celui de rééquilibrage des pressions capillaires dans une deuxième phase. On remarque le même phénomène sur la courbe (A1), alors que pour la courbe (A3), le flux d'infiltration est trop faible pour permettre à l'eau d'atteindre la couche de schiste. On a tracé (cf. courbe A0), pour illustrer le phénomène d'équilibrage des pressions capillaires dans l'espace, les profils de succion obtenus avec un flux d'infiltration nul sur dix ans.

On a par ailleurs réalisé la même étude avec une perméabilité constante pour la couche de terre végétale (série B) et avec des coefficients de la perméabilité dans la terre végétale caractéristiques d'un milieu très perméable (série C).

Les résultats de la série (B), non présentés ici, montrent que la valeur du flux d'entrée est déterminante quant à la cinétique d'infiltration : on obtient la saturation des couches supérieures en deux jours pour une forte valeur du flux d'infiltration (10^{-8} m/s). Pour des flux d'infiltration plus faibles, on note un alignement subvertical des profils de pression capillaire pour les couches supérieures qui traduit un écoulement en régime non saturé dans un milieu à faible succion. Pour un flux faible de (10^{-9} m/s) on met en valeur l'influence prédominante de l'équilibrage des succions dans le domaine, au détriment de celle due aux apports hydriques à la

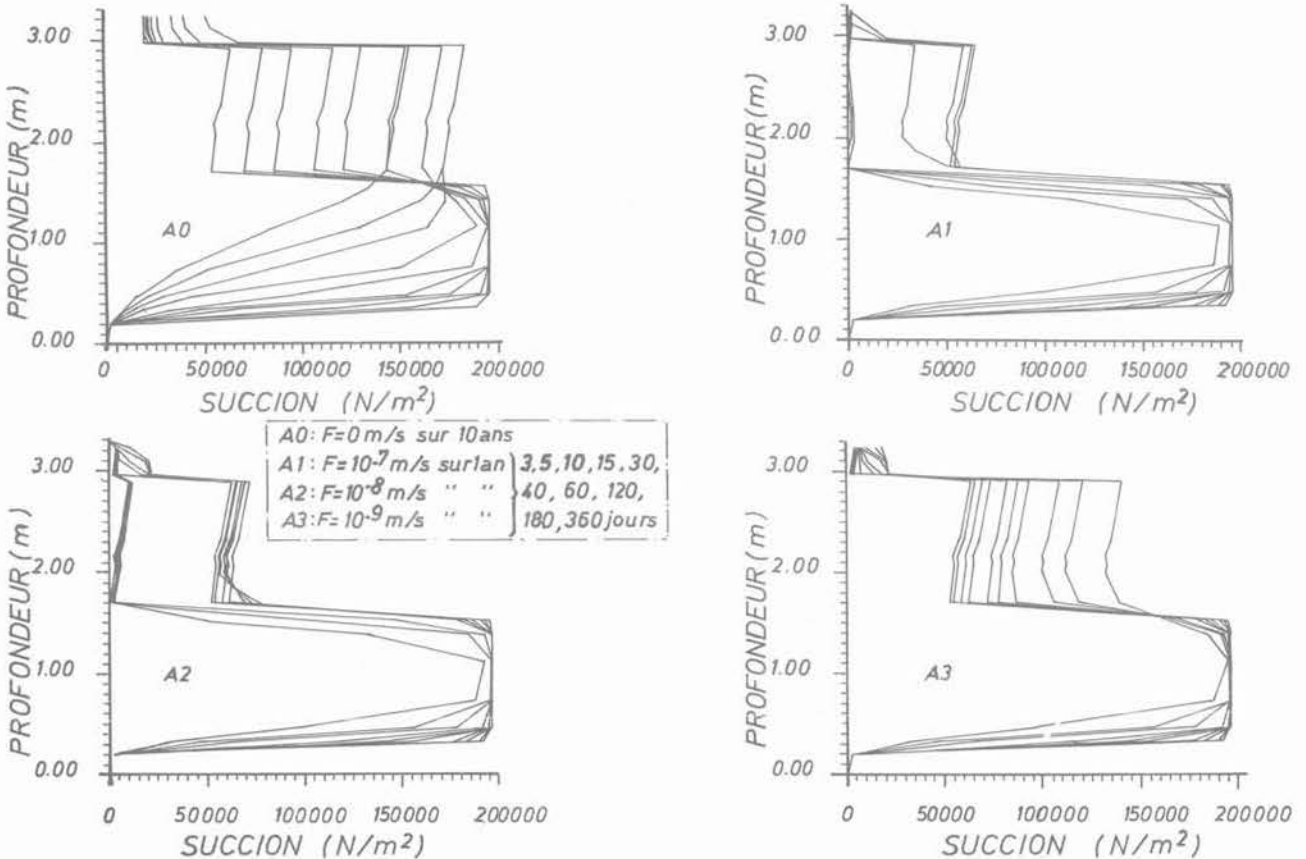


Fig. 5. — Simulations A Profils de succion.
Fig. 5. — Simulations A Curves of suction.

surface supérieure. Par conséquent, compte tenu de son fort état de succion, l'argile joue le rôle d'une pompe.

Les résultats de la série (C), non présentés graphiquement, conduisent aux mêmes remarques que celles énoncées pour la série (B); toutefois, dans ce cas, la cinétique d'infiltration est nettement plus faible que pour la série (B).

Cette première étude met donc en évidence le caractère dual du comportement hydraulique en régime non saturé d'un multicouche formé de matériaux dont l'état initial est différent et soumis à un flux d'entrée. L'interprétation des profils de pression capillaire doit tenir compte de la superposition entre le phénomène d'écoulement induit par une sollicitation extérieure et le phénomène de transfert lié à l'équilibrage des succions dans l'espace. Le cas particulier d'un régime transitoire associé à des conditions à la limite variables est particulièrement concerné par cette remarque.

3.1.2. Influence de la variation temporelle de la condition à la limite supérieure

On présente les résultats de deux simulations, chacune caractérisée par une fonction perméabilité relative propre pour la terre végétale : une fonction perméabilité de type sable (simulation P1) et une fonction perméabilité de type expérimental (simulation P2). Pour ces

calculs on a imposé un flux variable correspondant au flux météorique moyen mensuel mesuré en 1988 à Saint-Sauveur-le-Vicomte (cf. fig. 6). Les graphes (profils de succion dans l'espace) issus de ces calculs sont regroupés sur la figure 7.

Pour la simulation (P1), les résultats sont à comparer à ceux des simulations (C1) et (C2); on note de grosses différences entre les profils. Au vu de la non affectation

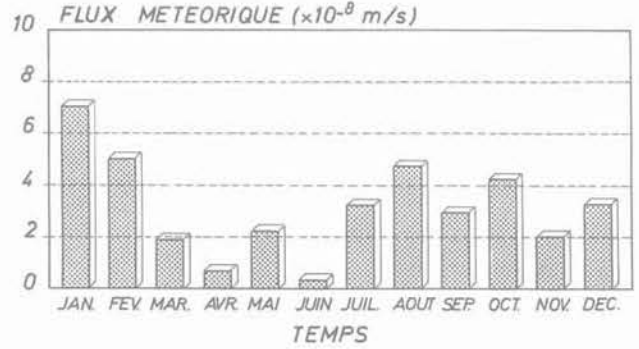


Fig. 6. — Flux moyen mensuel de l'année 1988. (Valeurs obtenues d'après les relevés pluviométriques de Saint-Sauveur-le-Vicomte.)

Fig. 6. — Medium monthly flow of 1988 year. (Values obtained by pluviometrics measurement of Saint-Sauveur-le-Vicomte.)

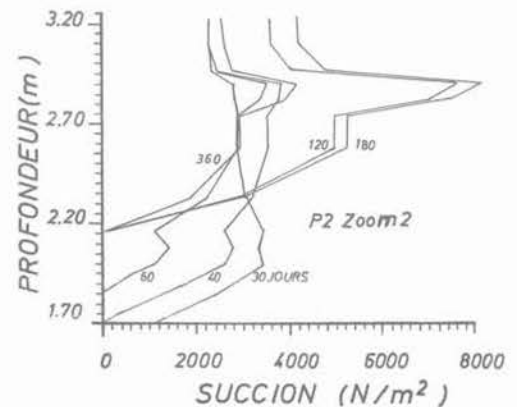
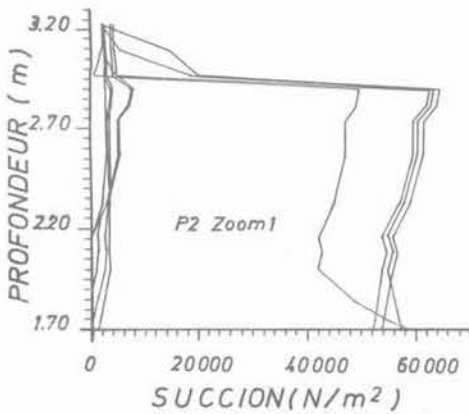
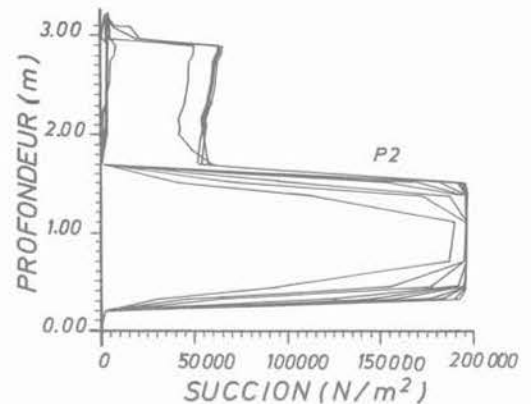
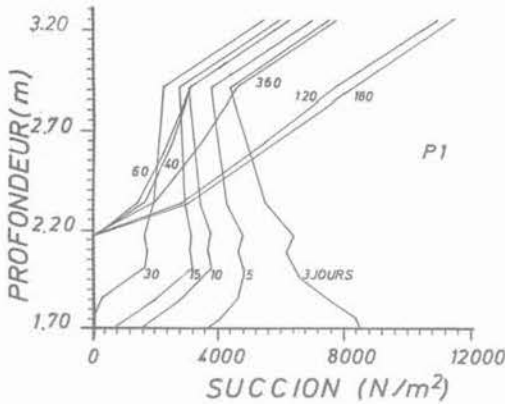


Fig. 7. — Profils de succion pour 3, 5, 10, 15, 30, 40, 60, 120, 180 et 360 jours. Flux = Flux mensuel moyen de l'année 1988.

Fig. 7. — Curves of suction for 3, 5, 10, 15, 30, 40, 60, 120, 180 and 360 days. Flow = monthly medium flow of 1988 year.

de la couche d'argile par l'infiltration, on a réalisé un zoom sur les trois couches supérieures. Celui-ci montre que dans un premier temps (jusqu'à 30 jours), les profils se décalent vers les suctions nulles et qu'ensuite (entre 40 et 180 jours), le sable se sature malgré une augmentation de succion dans la terre végétale et dans la partie sommitale du schiste. On peut interpréter ces augmentations de succion vers la surface si l'on remarque la diminution du flux imposé jusqu'en juin.

On serait donc en présence durant cette période d'un écoulement en régime non saturé au sein de la terre végétale et du schiste, insuffisant toutefois pour conduire à une diminution de succion dans ces matériaux. Au cours des six derniers mois de l'année, le flux augmente globalement, ce qui pourrait expliquer que le profil à 360 jours matérialise à nouveau une diminution de succion dans le schiste.

La courbe globale (P2) est à rapprocher, vu les valeurs des flux d'entrée, des graphes (A1) et (A2) pour la première durée d'infiltration (inférieure à 60 jours) ; ce graphe apparaît à première vue comme une combinaison des graphes (A1) et (A2). En revanche, pour des temps compris entre deux mois et un an, les profils sont totalement incomparables à ceux de (A1) et (A2).

Le premier zoom réalisé à partir du graphe global (P2) sur les trois couches supérieures du système permet de vérifier pour les temps compris entre 3 et 15 jours les constatations (A2) et (A3) ; fronts d'infiltration marqués dans la couche de terre végétale et profils d'équilibrage des suctions dans le schiste et dans le sable dans un premier temps, puis arrivée de l'eau dans ces matériaux inférieurs signalée par le décalage des profils de succion vers les suctions nulles, dans une deuxième phase.

L'aspect des profils correspondant aux temps compris entre 30 et 360 jours étant peu net sur le premier zoom, on a agrandi celui-ci afin de représenter les profils sur un intervalle réduit de succion ($0-8\ 000\ \text{N/m}^2$). On retrouve globalement le phénomène précédemment décrit pour la simulation (P1), avec un décalage dans le temps pour l'apparition de ce phénomène.

Toutefois, il faut noter que chaque profil pris séparément diffère par sa forme pour les simulations (P1) et (P2), les profils étant sub-verticaux pour la simulation (P2) dans la couche de terre végétale. Ce matériau subit de faibles variations de succion dans le temps (en fonction des variations du flux d'entrée), et surtout la valeur de cette succion demeure presque constante dans l'espace, pour un temps donné. Par ailleurs, les profils sont singulièrement tourmentés, et cela, nous l'avons vérifié, n'est pas dû à des phénomènes de divergence numérique. On peut donc affirmer en conclusion, même si l'analyse des profils s'avère délicate, que les variations du flux d'entrée influencent fortement les résultats des calculs.

3.1.3. Influence des conditions initiales sur le comportement hydraulique du multicouche

On a réalisé une série de simulations pour différents flux imposés en conservant les paramètres d'entrée précédemment utilisés, excepté l'état de succion initiale de l'argile imposé à $80\ \text{kN/m}^2$. Cette valeur correspond à un matériau argileux assez humide et/ou moins

compacté que celui choisi comme référence pour l'étude basée sur les expérimentations de laboratoire.

Cette succion est par ailleurs plus proche de celle du matériau mis en place sur le chantier et nous la conserverons pour effectuer les calculs des simulations (2.D).

Les résultats de cette série des simulations (1.D), dont les représentations graphiques ne sont pas présentées ici, permettent de conclure que l'état initial de la couche « imperméable » influence fortement les résultats fournis par la modélisation, un état de succion faible favorisant une cinétique d'infiltration forte.

3.1.4. Evolution de la succion dans la couche superficielle du multicouche pour un flux imposé variable dans le temps

On a cherché à visualiser l'influence d'un flux d'entrée variable sur l'évolution de la succion au cours du temps dans la couche de terre végétale. Pour ce faire, on a imposé le flux mensuel moyen correspondant à la pluviométrie de l'année 1988 mesurée à Saint-Sauveur-le-Vicomte.

On a représenté en figure 8 l'évolution de la succion dans le temps à la base et au sommet de la couche de terre végétale.

On remarque tout d'abord que la succion, même si elle est faible, ne s'annule pas en surface. Cela est dû, nous l'avons vérifié en imposant des flux plus forts, à l'intensité de cette condition à la limite imposée. Par ailleurs, les courbes de succion présentent des allures très caractéristiques de régime transitoire. On a vérifié qu'il s'agissait d'un phénomène physique et non d'un artefact numérique.

Un aspect du comportement hydraulique de la terre végétale au cours du temps est à noter : on ne peut raisonnablement pas déceler de retard de la réponse (suction) à la sollicitation entre le sommet et la base de la couche. On peut expliquer ce phénomène par la faible épaisseur et la forte perméabilité de la couche considérée. Lorsque le flux imposé est plus faible, on note une amplitude des variations de la succion plus petite.

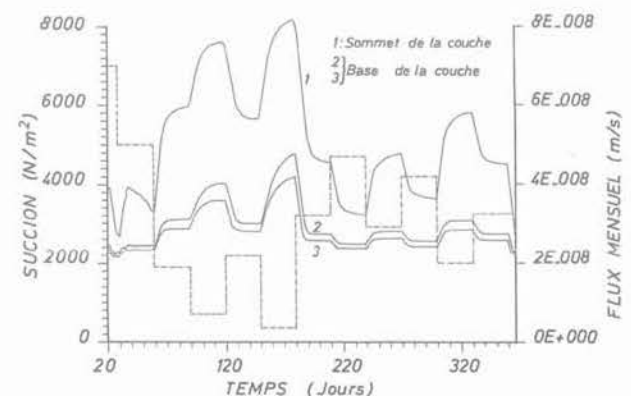


Fig. 8. — Evolution de la succion dans la terre végétale.
Fig. 8. — Evolution of suction in loam.

3.2. Simulations bidimensionnelles

3.2.1. Tests de convergence

Dans le cadre de la procédure de tests de convergence, on a réalisé une série de calculs en imposant des conditions à la limite supérieure de type charge ou flux d'intensités différentes. Tous les tests de convergence se sont avérés positifs.

Les constatations énoncées pour les simulations unidimensionnelles, en particulier en ce qui concerne le comportement hydraulique du multicouche, s'appliquent aux simulations bidimensionnelles. Il faut, toutefois, noter l'effet quantitatif d'échelle existant entre les simulations des deux types et l'effet de drain dans le sable n'apparaissant que dans le cas des simulations bidimensionnelles (cf. fig. 9).

Les profils de succion tracés jusqu'à 300 ans sur la verticale centrale du multicouche pour un flux imposé nul montrent le temps important (50 ans) nécessaire à l'établissement de l'état d'équilibre (cf. fig. 10).

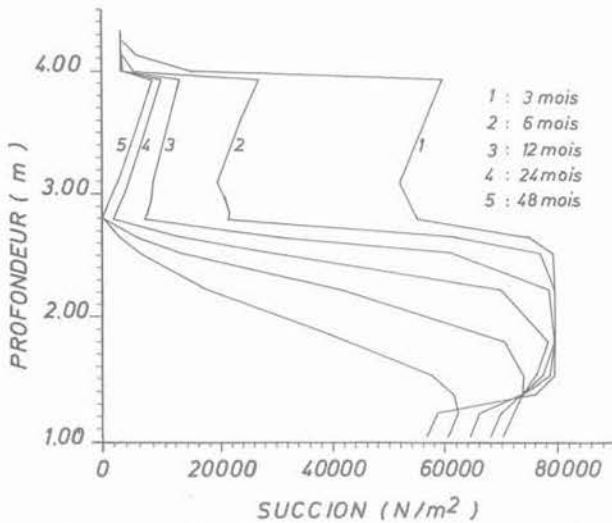


Fig. 9. — Profils d'infiltration sur la verticale centrale pour un flux de 10^{-8} m/s.

Fig. 9. — Infiltration curves on the central vertical for a flow of 10^{-8} m/s.

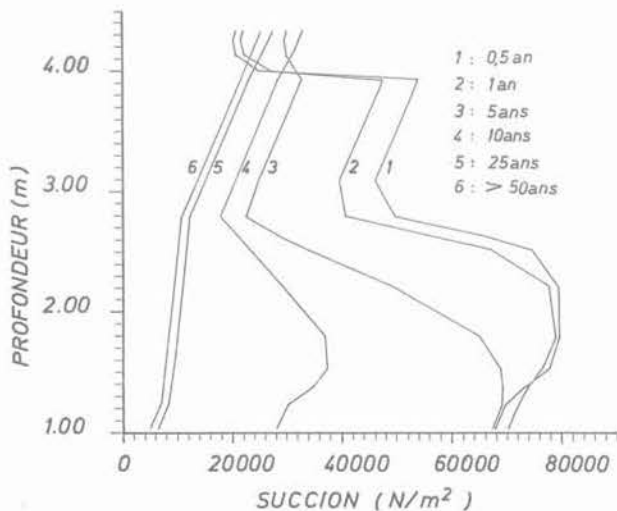


Fig. 10. — Profils d'équilibre de succion (verticale centrale).

Fig. 10. — Equilibrium curves of suction (central vertical).

3.2.2. Résultats : critique de la validité des conditions aux limites des drains

Une première série de simulations fait intervenir des conditions aux limites des drains de type surface de suintement pour l'eau et pression atmosphérique pour l'air.

Les résultats des simulations sont représentés par une cartographie des vecteurs vitesse réelle (direction et intensité).

Si l'on applique la condition de surface de suintement sur la totalité de l'épaisseur des drains, on constate des phénomènes de flux entrant de forte intensité, quelque soit le temps d'infiltration, au droit des niveaux sableux.

En revanche, si l'on applique la condition de surface de suintement sur la maille basale de sortie des drains sableux, on obtient un résultat positif quelque soit le temps d'infiltration. La figure 11 illustre un tel résultat, elle correspond à une simulation effectuée sur quatre ans pour un flux imposé de $(10^{-8}$ m/s). On notera le bon fonctionnement du drain sableux supérieur, à l'exception de la présence d'un phénomène d'appel capillaire de l'eau du drain par le sommet d'argile. Ce phénomène est mis en évidence par la direction sub-verticale des flux hydrauliques calculés à la base de la couche sableuse.

Les vecteurs vitesse de l'eau étant représentés en intensité réelle sur la figure 11, seuls les flux dans le sable apparaissent nettement, compte tenu de leur magnitude. Le flux de sortie valant $(5.10^{-7}$ m/s), un rapide calcul de bilan a été effectué et permet de s'assurer de la cohérence des résultats numériques obtenus.

Ces premiers essais montrent le caractère restrictif de la validité des conditions à la limite de type surface de suintement.

3.2.3. Cartographie des flux avec des conditions à la sortie des drains de type succion

On a tout d'abord réalisé des calculs avec différentes valeurs pour la succion imposée à la sortie des drains. Ces valeurs sont obtenues à partir d'une relation exprimant la succion en fonction du logarithme de l'humidité relative. Compte tenu du haut niveau de valeurs de la succion, obtenu quelque soit l'humidité relative, les résultats des calculs ne sauraient être interprétés. On constate en effet des phénomènes de flux sortant de très forte intensité au niveau des drains sableux, que l'on peut évidemment expliquer par le contraste entre la succion du sable et la forte succion imposée à la limite de celui-ci. On peut remarquer que la relation succion-humidité relative choisie, ne faisant pas intervenir les caractéristiques de rétention et l'état de succion du sol ne saurait traduire le phénomène physique réel. En effet, au niveau de l'interface sol-atmosphère, il existe un équilibre régi par les propriétés du sol, son état de succion, la pression de vapeur, la température, l'humidité relative de l'atmosphère et les autres caractéristiques des phénomènes d'évaporation (albedo, vitesse du vent, paramètres de forme du système).

Cet état d'équilibre impose la continuité de valeur de la succion à la limite sol-atmosphère. Le modèle nu-

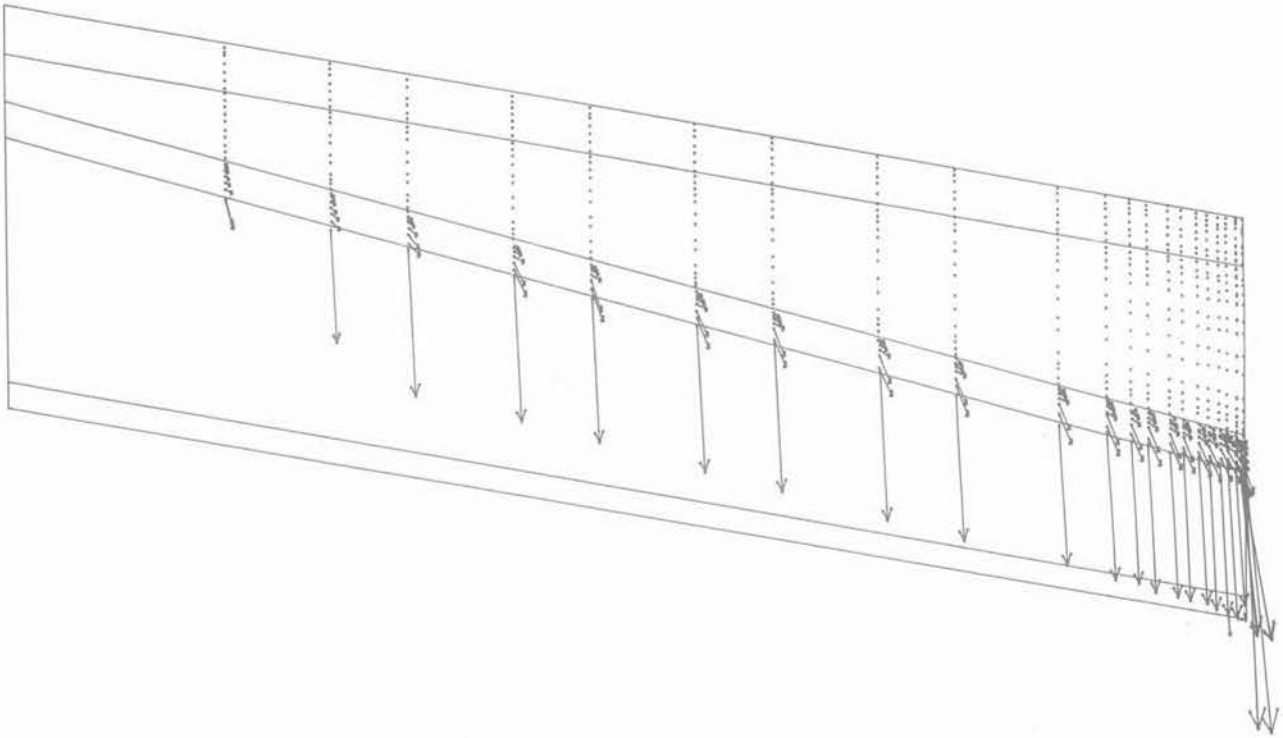


Fig. 11. — Représentation des flux hydrauliques dans le domaine. Simulation avec une condition de surface de suintement à la sortie des drains sableux. Flux = 10^{-8} m/s sur 4 ans.

Fig. 11. — Representation of hydraulic flows in the domain. Simulation with seeping boundary conditions on the exit of sandy drains. Flow = 10^{-8} m/s during 4 years.

mérique impose une condition à la limite de type succion constante malgré la variabilité affectant ce paramètre dans le temps. Le choix de ce type de condition à la limite n'est donc pas parfait, et il faudrait, en fait, greffer à NOSAT un micro-modèle d'évaporation permettant de calculer l'état de succion à l'interface sol-atmosphère à chaque instant.

On a ensuite fixé une condition de succion constante, à la sortie des drains, égale à la succion du sable.

Afin de mettre en évidence les phénomènes de rééquilibrage dans le temps, on a programmé une simulation à flux imposé nul sur une période de 300 ans. Au vu des cartes de flux, on retrouve un résultat déjà énoncé à partir des profils de succion : l'équilibre est atteint au bout de 50 ans et plus aucun flux n'est décelable dans le système à ce stade. De plus, les flux mis en jeu entre l'instant initial et l'équilibre sont relativement faibles et une décomposition ne s'impose nullement pour interpréter les résultats des modélisations à flux imposé non nul.

Cette remarque permet de vérifier le bien-fondé du choix de la représentation des résultats (cartographie des flux plutôt que profils de succion).

Pour une condition de succion constante (égale à la succion du sable) imposée à la sortie des drains, on a effectué deux calculs : l'un sur quatre ans avec un flux imposé de (10^{-8} ms $^{-1}$) et l'autre sur un an avec un flux imposé variable dont la moyenne sur un an vaut

(10^{-8} ms $^{-1}$). Les résultats sont respectivement représentés en figures 12 et 13.

On retrouve sur la figure 12 le phénomène observé sur la figure 11 : une répartition triangulaire des vecteurs vitesses sur une verticale du drain sableux supérieur et au niveau de la base de celui-ci des flux plus forts subverticaux traduisant plus un « pompage capillaire » de l'argile qu'un écoulement dans cette couche. Ce « pompage capillaire » devient inexistant à la sortie du système, en basse pente, où l'écoulement dans le drain est plus rapide. Dans le cas de la figure 13, les flux verticaux dirigés vers l'argile à la base du drain sableux sont inexistantes.

On ne peut comparer les modélisations des figures 12 et 13, car celle de la figure 13 a été calculée sur un an, avec des flux variables. On a calculé dans les mêmes conditions que celles de la figure 13 le champ des vitesses au bout d'un an pour un flux imposé de (10^{-8} ms $^{-1}$). Le résultat graphique non présenté ici est très comparable, les flux intervenants dans la couche de sable supérieur sont presque identiques. Ceci signifie que, même si l'imposition d'un flux variable a une influence sur le comportement hydraulique des couches supérieures du système, celle-ci n'est pas notable au niveau du drain supérieur en terme de débits. La partie supérieure du multicouche joue donc le rôle régulateur pour lequel elle a été conçue.

Pour être parfaitement rigoureux, il faudrait comparer les résultats sur une période correspondant à une année hydrologique ou à un cycle d'années hydrologiques et non sur une année civile.

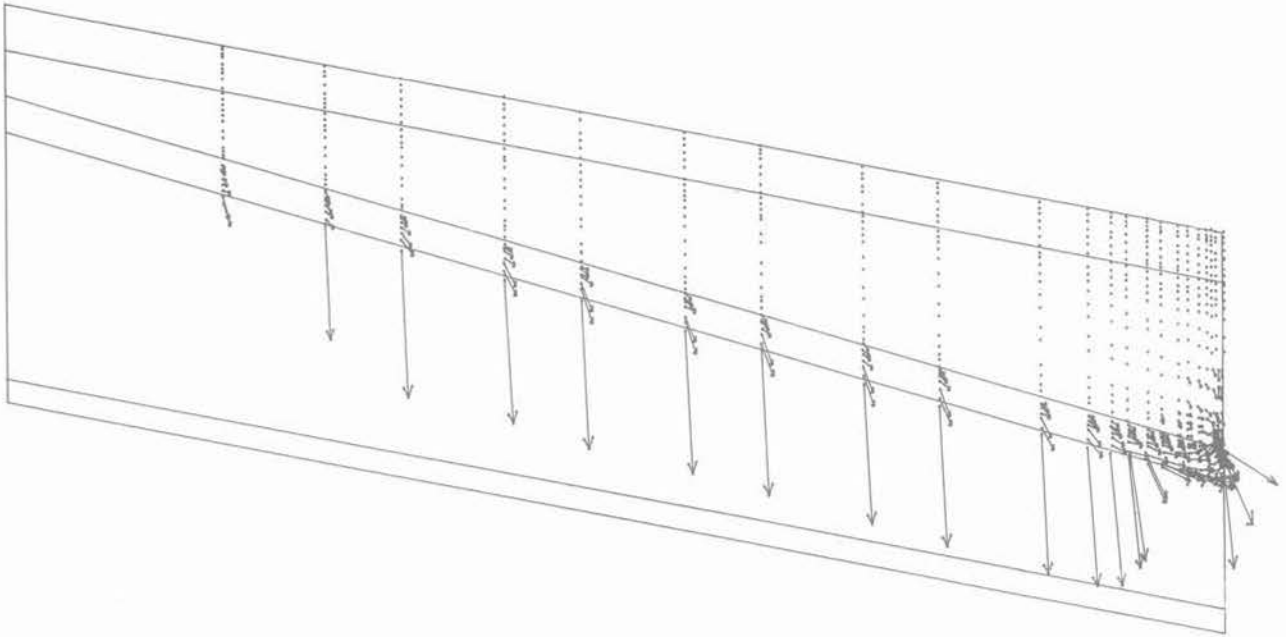


Fig. 12. — Représentation des flux hydrauliques dans le domaine. Simulation avec une condition de succion à la sortie des drains sableux. Flux = 10^{-8} m/s sur 4 ans.

Fig. 12. — Representation of hydraulic flows in the domain. Simulation with suction boundary conditions on the exit of sandy drains. Flow = 10^{-8} m/s during 4 years.

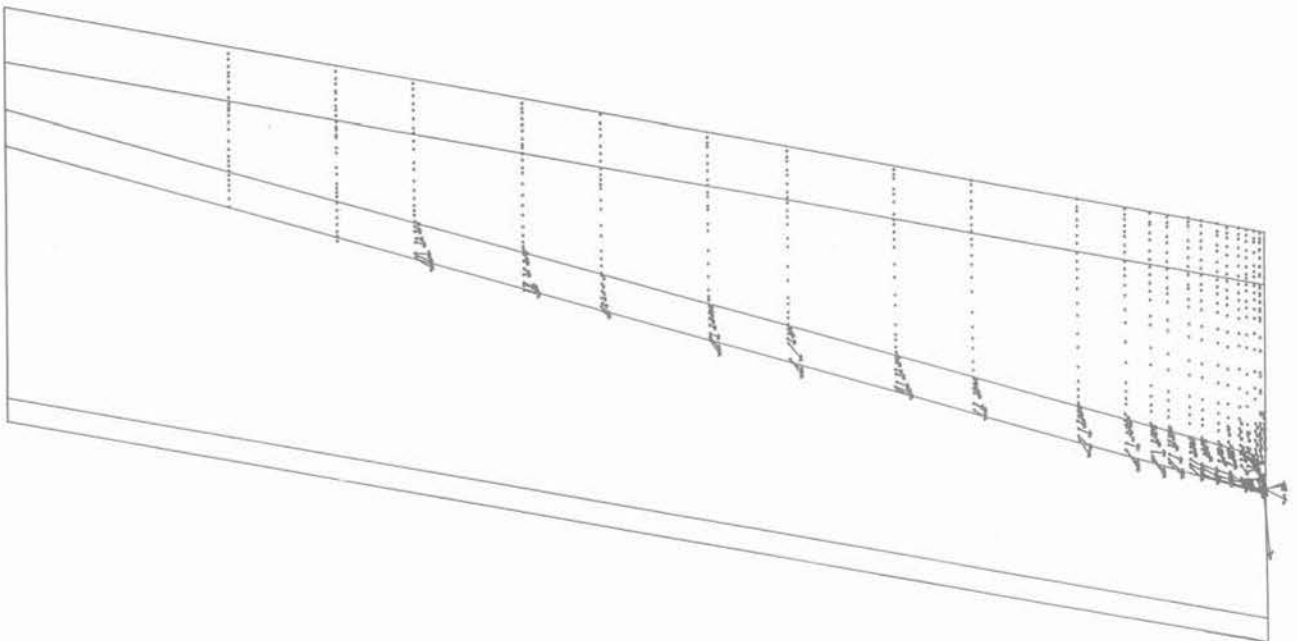


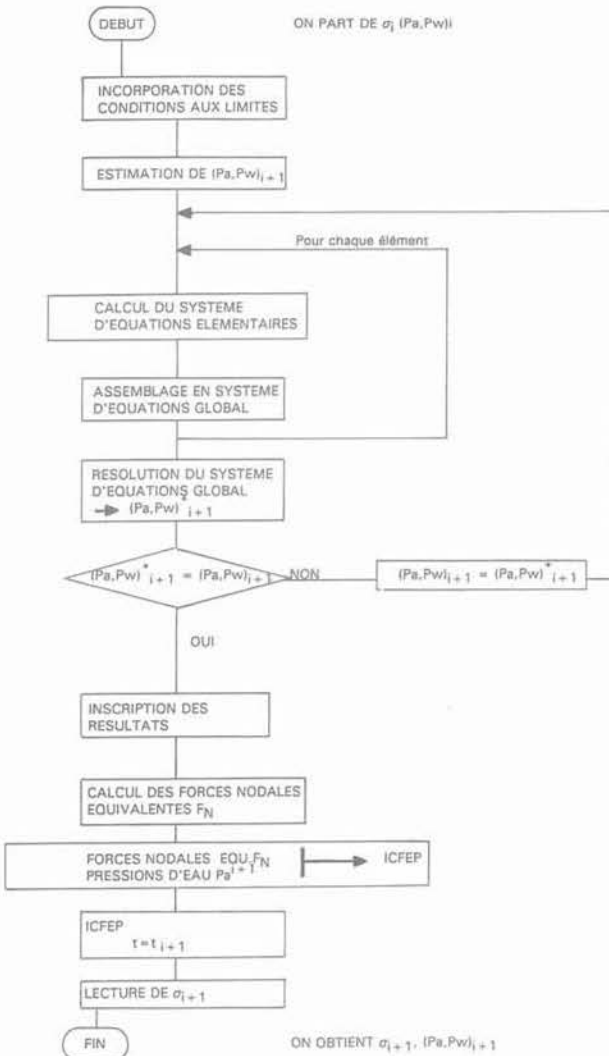
Fig. 13. — Représentation des flux hydrauliques dans le domaine. Simulation avec une condition de succion à la sortie des drains sableux. Flux = Flux mensuel moyen de l'année 1988.

Fig. 13. — Representation of hydraulic flows in the domain. Simulation with suction boundary conditions on the exit of sandy drains. Flow = Monthly medium flow of 1988 year.

4. CONCLUSIONS - PROSPECTIVE

Cette étude a permis de montrer la dualité du comportement hydraulique d'un système multicouche non saturé soumis à un flux imposé. L'interprétation des profils

de succion issus du calcul doit donc prendre en compte la superposition du phénomène d'écoulement hydraulique et du phénomène d'équilibre des succions dans le domaine. Une décomposition graphique est donc toujours nécessaire. Cette dualité de comportement intervient particulièrement dans le cas d'un régime tran-



siteur pour lequel les conditions à la limite imposées au sommet, de type NEUMAN, sont variables dans le temps.

Par ailleurs, il a été montré qu'il est primordial de connaître les caractéristiques de la fonction perméabilité dans les matériaux du multicouche et, tout particulièrement, dans la couche supérieure (terre végétale) et dans la couche argileuse.

De plus, il a été mis en évidence l'impact des variations de sollicitation hydraulique sur les profils de succion calculés. Cette influence dépend aussi des coefficients de la fonction perméabilité de la couche supérieure, et apparaît nettement sur les courbes d'évolution de la succion dans le temps. L'importance quantitative de l'état de succion initial dans la couche d'argile a de plus été remarquée.

Les résultats des simulations (2D) recourent ceux des simulations (1D), mais permettent en outre de visualiser l'effet de drain et confirment l'effet d'échelle existant entre les modélisations uni- et bidimensionnelles.

Les essais de calculs réalisés avec des conditions aux limites des drains de type surface de suintement ont permis de conclure au caractère restrictif de ce choix.

Avec des conditions aux limites des drains de type succion (correspondant à la succion du drain sableux), les résultats sont positifs. Ils illustrent le comportement satisfaisant du drain sableux supérieur et montrent le rôle régulateur de débit de la partie supérieure du multicouche.

Afin de compléter cette étude, il serait nécessaire de mieux connaître certaines relations intervenant comme fonctions de calage dans le modèle, en particulier la fonction perméabilité-succion dans le matériau argileux. Un certain nombre d'expérimentations complémentaires s'avère donc indispensable si l'on souhaite affiner la validité des simulations.

Par ailleurs, des simulations supplémentaires permettant de mener à bien une analyse de sensibilité exhaustive apporterait de précieux renseignements quant au comportement hydraulique du système.

Enfin, un module satellite de NOSAT devrait être construit et greffé au logiciel, de manière à imposer des conditions aux limites des drains plus proches de la réalité physique.

Remerciements

Cette étude a pu être menée à bien grâce au soutien financier de l'ANDRA (Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs). Nous remercions Madame ANDRÉ-JEHAN, chef de la division Etude des Sites, pour la confiance qu'elle nous a témoignée en nous proposant ce travail, ainsi que Messieurs ANDRÉ et DEWIÈRE (DESI) pour leur suivi technique.

Le « Geotechnical Engineering Department » (UPC) de Barcelone, dirigé par le professeur ALONSO, nous a réservé le meilleur accueil, un support informatique performant (ALLIANT FX 40) et ses chercheurs nous ont prodigué des conseils scientifiques fructueux. Francisco BATTLE (UPC), auteur de la version actuelle de NOSAT nous a permis d'utiliser et de développer son logiciel.

BIBLIOGRAPHIE

- ALONSO E., GENS A. (1987), *Special problem soils. General report. Session 5, Ninth European Conference of International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Dublin, Irlande, 70 p., 31 Aug.-3 Sept.
- ANDRÉ-JEHAN R., ARNOULD M., BILLIOTTE J., DEVEUGHELE M., ROUSSET G. (1985), *A natural protective device against meteoric water seepage. The capillary barrier. Principle. Water transfert modelisation. International Symposium on Management of hazardous chemical waste sites. Winston Salem*.
- BATTLE F. (1990), *Programa NOSAT. Manual del usuario, Doc. Geotechnical Engineering Department, UPC Barcelona*.
- BONIN H. (1989), *Mesures tensiométriques effectuées sur les planches d'essais de Saint-Sauveur-le-Vicomte*. Rapport BRGM-Orléans, mai 1989.

- BROOKS R.M., COREY A.T. (1966), *Properties of porous media affecting fluid flow*. Jnl Irrig. Drain. Dic. ASCE 92 (IR2), pp. 61-68.
- BRUN P. (1989), *Cinétique d'infiltration au sein d'une couche d'argile compactée. Etude expérimentale et numérique*. Thèse présentée à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, soutenue le 21 décembre 1989, pour obtenir le titre de Docteur en Géologie de l'Ingénieur.
- DELAGE P. (1987), *Quelques aspects du comportement des sols non saturés*. Revue Française de Géotechnique, n° 40, pp. 33-48.
- GARDNER W.R. (1956), *Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data*. Proceedings of the Soils Science Society of America, 20, pp. 317-320.
- GUELLEC (1978), *Calcul des écoulements en milieu poreux par la méthode des éléments finis*. Proceeding of Second International Conference on Finite Element, Water Ressources, Imperial College, London, 34 p.
- HILLEL D. (1980), *Fundamentals of Soil Physics*, Academic Press, 415 p.
- JACQUARD C. (1988), *Etude expérimentale d'une barrière capillaire avec un modèle de laboratoire*. Thèse présentée à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, soutenue le 24 novembre 1988, pour obtenir le titre de Docteur en Géologie de l'Ingénieur.
- LLoret A. (1982), *Comportamiento deformacional del suelo no saturado bajo condiciones drenadas y no drenadas*. D. Thesis, Technical University of Barcelona.
- SHTYKOV V.I., DAISHER T. (1986), *Determination of air permeability*. Pochvovedeniye, n° 8, pp. 120-127.
- TOUMA J. (1984), *Etude critique de la caractérisation hydrodynamique des sols non saturés, rôle de l'air, influence de l'écoulement multidimensionnel de l'eau*. Thèse présentée à l'IMG, soutenue le 16 octobre 1984, pour obtenir le titre de Docteur es sciences physiques.
- TOUMA J., VAUCLIN M. (1986), *Experimental and numerical analysis of two phase infiltration in a partially saturated soil*. Transport in porous media, vol. 1, n° 1, pp. 27-55.
- VAN-GENUCHTEN M.Th. (1980), *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Sci. Soc. Am. Jnl. 49 (5), pp. 892-898.
- VAUCLIN M., KHANJI D., VACHAUD G. (1976), *Etude expérimentale et numérique du drainage et de la recharge des nappes à surface libre, avec prise en compte de la zone non saturée*. Journal de Mécanique, vol. 15, n° 2, pp. 307-348.