Mémoire de Maîtrise

MODÉLISATION DU MOUVEMENT VERTICAL DE L'EAU

EN MILIEU NON SATURÉ

par

Suzie Bélanger

INRS-Eau

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC 2800, rue Einstein Suite 105 Ste-Foy, QC G1V 4C7

Septembre 1993

La connaissance du mouvement de l'eau dans la zone non-saturée du sol est d'une importance capitale en sciences environnementales. En effet, c'est ce processus qui permet aux différents solutés (entre autres les contaminants) de se déplacer et d'atteindre la nappe souterraine. Le principal paramètre affectant le mouvement de l'eau dans le sol est la conductivité hydraulique du matériel qui dépend elle-même du contenu en eau du sol. Ce paramètre fluctue continuellement en milieu naturel en fonction des précipitations.

Le but principal de cette étude est d'évaluer l'influence du contenu initial en eau du sol ainsi que de l'intensité des précipitations sur le mouvement vertical de l'eau dans le sol. Cette évaluation sera faite d'une part à l'aide d'essais en laboratoire, et d'autre part à l'aide d'un modèle informatique (MELEF-5V). La modélisation est un outil très utile lorsque le modèle utilisé reflète bien les processus réels. Afin de déterminer la validité du modèle, les résultats des simulations seront comparés à ceux recueillis lors des essais en laboratoire. Des essais en colonne à l'aide d'un traceur (Br⁻) sont accomplis à différents taux d'humidité et régimes d'alimentation (précipitation).

Les essais en laboratoire ont permis de constater que la vitesse de migration de l'eau est dépendante du contenu initial en eau ainsi que du débit d'injection, sans toutefois y avoir de relation linéaire avec l'un de ces deux paramètres. Du même coup, ces essais démontrèrent que le type d'écoulement est dépendant du contenu initial en eau mais indépendant du débit d'injection.

En comparant les résultats des essais à ceux des simulations, on peut évaluer la précision du modèle. Les vitesses de transport de l'eau obtenues au cours des essais de laboratoire sont toutes supérieures à celles calculées à l'aide du modèle d'un facteur variant de 2 à 4. L'évaluation de l'influence du contenu initial en eau ainsi que du débit d'injection sur la précision du modèle révèle que le contenu en eau n'influence pas la précision du modèle, confirmant la constatation que le modèle ne tienne pas compte du type d'écoulement qui est lié au contenu en eau. Par contre, il semble que la précision du modèle augmente pour les valeurs de débit d'injection supérieures.

AVANT-PROPOS

La réussite de cette étude fût possible grâce à l'appui de plusieurs personnes. Je tiens à remercier plus particulièrement MM. Olivier Banton et Jean-Pierre Villeneuve qui ont dirigé mon travail. Je remercie également M. Francisco Padilla qui a bien voulu mettre à ma disposition son modèle Melef-5v ainsi que son temps. Je désire également souligner l'aide fournie par le personnel du laboratoire, du personnel de secrétariat, des services informatiques et du centre de documentation.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉi	i
AVANT-PROPOS	ii
TABLE DES MATIÈRESi	iii
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	vii

INTRODUCTION

1.1 Idée principale	1
1.2 Problématique	2
1.3 Objectifs et Méthodologie	2

1.

Théorie

2.1	Caractér	istiques de la zone non saturée	3
	2.1.1	Pression d'eau	. 3
	2.1.2	Contenu en eau	. 3
	2.1.3	Conductivité Hydraulique	5
2.2	Mouver	ent de l'eau dans la zone non-saturée	. 7
	2.2.1	Travaux antérieurs	. 7
2.3	Modèle]	MELEF-5v	14

3.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1 Montage expérimental	16
3.1.1 Échantillonnage et préparation de l'échantillon	16
3.1.2 Préparation de la colonne de sol	16
3.2 Mesures préliminaires	17
3.2.1 Masse volumique apparente	
3.2.2 Porosité totale	19

3.	.2.3 Porosité efficace	19
3.	.2.4 Frange capillaire	19
3.	.2.5 Conductivité hydraulique	20
3.	.2.6 Dispersivité	21
3.	.2.7 Contenu en eau	21
3.	.2.8 Débit d'injection	
3.3 Essai	is en laboratoire:	22
3.	.3.1 Traceur	24
3.	.3.2 Électrode	

RÉSULTATS

4.1 Granulométrie	25
4.2 Mesures préliminaires	26
4.3 Essais	27
4.3.1 Influence du contenu en eau	34
4.3.2 Influence du débit d'injection	36
4.4 Simulations	38

5.

4.

DISCUSSION GÉNÉRALE

5.1 Méthode	46
5.2 Résultats	. 46
5.2.1 Essais 5.2.1.1 Influence du contenu en eau	46 46
5.2.1.2 Influence du débit d'injection	47
5.2.2 Simulations	. 47
6. CONCLUSION	51
BIBLIOGRAPHIE	. 53
ANNEXES:	
Annexe A: Granulométrie	. 57
Annexe B: Calculs des caractéristiques physiques du sol	. 58

Annexe C:	Dispersivité
Annexe D:	Essais en colonne
Annexe E:	Calculs des vitesses d'écoulement des essais en colonne 67
Annexe F:	Données numériques de la simulation et de l'essai du numéro 168
Annexe G:	Données numériques de la simulation et de l'essai du numéro 269
Annexe H:	Données numériques de la simulation et de l'essai du numéro 470
Annexe I:	Données numériques de la simulation et de l'essai du numéro 571
Annexe J:	Données numériques de la simulation et de l'essai du numéro 672
Annexe K:	Données numériques de la simulation et de l'essai du numéro 773
Annexe L:	Données numériques de la simulation et de l'essai du numéro 874

TABLEAU III-I:	Conditions des différents essais en laboratoire
TABLEAU IV-I:	Caractéristiques physiques du sol
TABLEAU IV-II:	Conditions des différents essais en laboratoire
TABLEAU IV-III:	Vitesses moyennes d'apparition des Br
TABLEAU V-I:	Comparaison des vitesses des essais et des simulations 48

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1: Caractéristiques de l'eau des différentes zones du sol près de la			
surface	4		
Figure 2.2: Relation θ - ψ pour un sable			
Figure 2.3: Relation K- ψ pour un sable	6		
Figure 2.4: Influence de la texture du sol sur les relations K- ψ et θ - ψ	6		
Figure 2.5: Courbes typiques K-ψ pour un matériel sablonneux et un sol argileux	8		
Figure 3.1: Dispositif expérimental	18		
Figure 4.1: Courbe granulométrique du sol	25		
Figure 4.2:Comparaison des courbes de fuite de l'Essai #5 (en conditions saturées) et des simulations avec des coefficients de dispersivité variant de 0.05 à 0.4 cm	27		
Figure 4.3: Influence du contenu en eau θ : courbes de fuite des essais 1, 2 et 8, (θ différents) (a) en fonction du volume cumulatif et (b) en fonction			
Figure 4.4: Influence du débit d'injection Q: courbes de fuite des essais 1, 6 et 7, même θ (51%) et Q différents, (a) en fonction du temps et (b) en fonction du volume cumulatif	31		
Figure 4.5: Influence du débit d'injection Q: courbes de fuite des essais 2 et 4, Q différents, (a) en fonction du temps et (b) en fonction du volume			
cumulatif	32		
Figure 4.6: Courbes de fuite de l'essai #1 mesurée et simulée	39		
Figure 4.7: Courbes de fuite de l'essai #2 mesurée et simulée	40		
Figure 4.8: Courbes de fuite de l'essai #4 mesurée et simulée	41		
Figure 4.9: Courbes de fuite de l'essai #5 mesurée et simulée	42		
Figure 4.10: Courbes de fuite de l'essai #6 mesurée et simulée	43		
Figure 4.11: Courbes de fuite de l'essai #7 mesurée et simulée	44		
Figure 4.12: Courbes de fuite de l'essai #8 mesurée et simulée	45		
Figure 5.1: Précision du modèle en fonction du θ_v initial	49		
Figure 5.2: Précision du modèle en fonction du débit d'injection	49		

1.1 IDÉE PRINCIPALE:

De par ses activités, l'homme porte souvent atteinte à la qualité de son environnement. Ce dernier est fréquemment souillé par le rejet non contrôlé de substances de toxicités diverses. L'eau potable est une ressource naturelle non seulement précieuse mais vitale pour l'homme. Malheureusement, celle-ci est menacée et il est grand temps qu'une prise de conscience se fasse avant que cette richesse ne soit définitivement compromise.

A l'échelle planétaire, si on élimine l'eau salée des océans et des mers ainsi que l'eau contenue dans les calottes glaciaires et les glaciers, l'eau souterraine constitue 95% de l'eau potable utilisable. L'eau souterraine a des temps de résidence jusqu'à 260 000 fois supérieurs à ceux des rivières et 1000 fois plus grands que ceux des lacs et marais (Freeze & Cherry, 1979). Ainsi, lorsque des contaminants ont atteint une nappe d'eau souterraine, ils ont la possibilité d'y séjourner très longtemps.

De par ces faits, la protection de la qualité de l'eau souterraine prend une place de plus en plus importante non seulement chez les environnementalistes mais aussi chez ceux qui ont saisi la valeur de cette ressource précieuse.

La connaissance du mouvement de l'eau dans la zone non-saturée du sol est d'une importance capitale dans la prévention de la contamination de la nappe phréatique. En effet, ce processus permet aux différents solutés (entre autres les contaminants) de se déplacer et d'atteindre la nappe souterraine.

1.2 PROBLÉMATIQUE:

L'écoulement de l'eau est généralement exprimé par l'équation de Darcy:

$$\mathbf{v} = -\mathbf{K}(\mathbf{\psi})\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{l}}$$

où v: flux d'eau (L/T)

 $\begin{array}{l} K(\psi): \mbox{ conductivité hydraulique qui est fonction de la pression } \psi \\ \hline \frac{\partial h}{\partial l}: \mbox{ gradient hydraulique } \end{array}$

Le principal paramètre affectant le mouvement de l'eau dans le sol est la conductivité hydraulique (K) du matériel qui dépend elle-même du contenu en eau (θ = $f(\psi)$). Pour la zone saturée, le flux d'eau se calcule facilement car K est une constante. Par contre, pour la zone non-saturée, K fluctue continuellement en milieu naturel en fonction des apports d'eau.

1.3 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE:

Le but principal de cette étude est d'évaluer l'influence du contenu initial en eau du sol ainsi que de l'intensité de la précipitation sur le mouvement vertical de l'eau dans le sol. Cette évaluation sera faite d'une part à l'aide d'essais en laboratoire, et d'autre part à l'aide d'un modèle informatique (MELEF-5V). La modélisation est un outil très utile lorsque le modèle utilisé reflète bien les processus réels. Afin de déterminer la validité du modèle, les résultats des simulations sont comparés à ceux recueillis lors des essais en laboratoire. Des essais en colonne à l'aide d'un traceur (Br⁻) sont accomplis à différents taux d'humidité et régimes d'alimentation (précipitation).

2.1 CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE NON SATURÉE:

Le sol peut être séparé en trois zones principales: la zone non-saturée, la frange capillaire et la zone saturée (Figure 2.1(a) et (b)). La frange capillaire peut être considérée comme une zone intermédiaire. Les zones saturée et non saturée ont des propriétés très différentes.

2.1.1 Pression d'eau ψ (L):

Le principal facteur qui influence le comportement de l'eau dans le sol est la pression que subit l'eau dans les pores. A la surface de la nappe phréatique, la pression que subit l'eau est égale la pression atmosphérique (égale à zéro par définition). Dans la zone saturée, la pression est positive (tous les pores sont remplis d'eau). Dans la zone non-saturée, la pression est négative et les pores sont partiellement remplis d'eau (Figure 2.1(d)). L'eau est retenue par la tension de surface exprimée par un ménisque entre les particules du sol (Figure 2.1(c)). Le rayon de courbure de chaque ménisque reflète la tension de surface de chaque minuscule interface air-eau dans chaque pore (Freeze & Cherry, 1979).

2.1.2 Contenu en eau θ_v (%):

La quantité d'eau dans le sol peut s'exprimer de deux façons: le contenu volumique en eau θ_v et le contenu gravimétrique en eau θ_g . Le contenu volumique



Figure 2.1: Caractéristiques de l'eau des différentes zones du sol près de la surface. (Tiré de Freeze and Cherry, 1979).

4

.

en eau est le volume d'eau présent dans un certain volume de sol. Tandis que le contenu gravimétrique en eau est la masse de l'eau présente par masse de sol sec. Dans la zone saturée, le contenu en eau est égale à la porosité (Jury et al., 1991). Dans la zone non-saturée, les pores ne sont que partiellement remplis d'eau. Comme mentionné précédemment, l'eau est retenue dans les pores par la tension de surface qui est reflétée par le rayon de courbure des ménisques. On doit donc s'attendre qu'à des contenus en eau plus élevés le rayon de courbure des ménisques soit plus grand, indiquant une moins grande tension de surface (et inversement). La Figure 2.2 représente la relation θ - ψ déterminée expérimentalement pour un sable. Cette figure présente également le phénomène d'hystérèse, i.e. des relations différentes lors du sèchage et lors de l'humidification du sol.

2.1.3 Conductivité hydraulique K (L/T):

La conductivité hydraulique est la capacité d'un sol à laisser s'écouler un volume d'eau dans un certain temps. La Figure 2.3 représente la relation K- ψ pour un sable. On remarque aussi le phénomène d'hystérèse. Dans la nappe, où $\psi>0$ et $\theta = n$ = constante, la conductivité hydraulique est une constante et s'appelle la conductivité hydraulique saturée.

Vu que	$K=f(\psi),$
et que	$\theta = f(\psi),$
donc	$K=f(\theta)$.

Dans la zone non saturée, où $\psi < 0$, $\theta < n$, la conductivité hydraulique est une fonction non-linéaire de θ ou ψ .

Ces relations $K(\psi)$ et $\theta(\psi)$ sont caractéristiques pour un sol donné. La figure 2.4 démontre l'influence de la texture du sol sur les relations $K(\psi)$ et $\theta(\psi)$. A





Figure 2.2: Relation θ - ψ pour un sable. (Tiré de Freeze and Cherry, 1979).

Figure 2.3: Relation K-ψ pour un sable. (Tiré de Freeze and Cherry, 1979).



Figure 2.4: Influence de la texture du sol sur les relations K-ψ et θ-ψ.
(a) sable uniforme; (b) sable silteux; (c) argile silteuse.
(Tiré de Freeze and Cherry, 1979).

saturation, le sol grossier a une conductivité hydraulique supérieure à celle d'un matériel fin car ses pores sont plus ouverts. Par contre, dans des conditions de non saturation, les pores du matériel grossier ont une pression négative (succion) de drainage plutôt faible entraînant une forte diminution de la conductivité hydraulique. Les courbes se croisent et le sol grossier présente alors une conductivité hydraulique inférieure à celle du matériel fin (Figure 2.5). Ceci s'explique par la facilité qu'a le matériel fin à retenir plus d'eau et par le plus grand nombre de pores remplis (Jury et al., 1991). Le phénomène d'hystérèse est négligé dans les deux dernières figures pour simplification.

2.2 MOUVEMENT DE L'EAU DANS LA ZONE NON SATURÉE:

Le mouvement de l'eau en milieu non saturé est grandement différent de celui en milieu saturé. Cet écart est dû à la présence d'air dans les pores du sol en conditions de non saturation. En effet, la présence de cette phase gazeuse modifie grandement le parcours de l'eau. Lors de son passage dans la zone vadose, l'eau est en contact avec les grains du sol et avec l'air. La diminution du contenu en eau est accompagnée par une augmentation négative de la pression (succion) subie par l'eau (ψ , cf Section 2.1.1) et le parcours emprunté par l'eau devient de plus en plus étroit et tortueux (Jury et al., 1991).

2.2.1 Travaux antérieurs:

En 1856, Darcy publie un article décrivant un procédé expérimental servant à analyser l'écoulement à travers du sable. Les résultats de ses expériences peuvent être généralisés par la loi portant son nom:

$$J_w = -K \frac{\partial H}{\partial z}$$
 ou $Q = -K \frac{\partial H}{\partial z} A$ (1)



Figure 2.5: Courbes typiques de K-ψ pour un matériel sablonneux et un sol argileux. (Tiré de Jury et al., 1991).

En 1907, Buckingham est un des premiers à tenter d'analyser l'écoulement capillaire (écoulement à travers des milieux poreux). Il assume que l'attraction capillaire constitue un champ de force conservatif et définit le potentiel capillaire comme étant le gradient correspondant à la force capillaire (Buckingham, 1907). Il propose également une modification à la loi de Darcy pour décrire l'écoulement dans un sol non saturé (Jury et al, 1991):

$$J_{w} = -K(\psi)\frac{\partial H}{\partial z} = -K(\psi)\frac{\partial}{\partial z}(\psi + z) = -K(\psi)\left(\frac{\partial\psi}{\partial z} + 1\right)$$
(2)

où $H = \psi + z$ z: profondeur (cm) ψ : pression d'eau

Cette adaptation se base principalement sur les deux points suivants:

1. Dans un sol rigide, isotherme, non saturé, contenant aucun soluté, et ayant une pression d'air nulle (pression atmosphérique), la force motrice de l'écoulement de l'eau est la somme de la pression d'eau et du potentiel gravitationnel;

2. La conductivité hydraulique d'un sol non saturé dépend du contenu en eau (θ) ou de la pression d'eau (ψ) .

Quelques années plus tard, Gardner (cité par Richards, 1931) affirme que le potentiel de Buckingham était relié à la pression de l'eau et montre qu'il pouvait être mesuré à l'aide d'un appareil à cellules d'argile poreuses.

En 1928, Richards (Richards, 1931) décrit la relation entre la force capillaire et la pression de l'eau. De plus, il présente des données expérimentales qui démontrent que si un matériel poreux est mouillé mais non saturé, la pression de l'eau est inférieure à la pression atmosphérique et dépend de la quantité d'eau présente dans le milieu. Dès qu'il y a une différence de pression d'eau entre deux points, l'eau se déplace dans la direction de la plus faible pression. Il arrive également à la conclusion que l'écoulement de liquides dans des milieux poreux est similaire à l'écoulement de liquides dans des tubes fins et que dans ces deux cas, l'écoulement doit être défini en termes de gravité et gradient de pression dans le liquide.

En 1931, Richards (Richards, 1931) affirme que pour un écoulement dans un milieu poreux partiellement saturé, les plus grands pores contiennent de l'air et que la section utile à l'écoulement de l'eau en est réduite. Si ces espaces occupés par l'air étaient remplis par un solide, l'écoulement resterait inchangé et la proportion entre l'écoulement et la force motrice du déplacement de l'eau demeurerait car la loi de Darcy est indépendante de la grosseur des particules et de la compaction du matériel. De plus, il déclare que la principale différence entre l'écoulement dans un milieu poreux saturé et l'écoulement dans un milieu poreux non saturé est que dans ce dernier la pression est déterminée par des forces capillaires et que la conductivité hydraulique dépend du contenu en eau du milieu.

Si l'on combine la Loi de Buckingham-Darcy (2) à l'équation de conservation de la masse (3) (également appelée équation de continuité) pour l'écoulement vertical de l'eau à travers un sol homogène et non saturé (Jury et al., 1991):

$$\frac{\partial J_{w}}{\partial z} + \frac{\partial \theta}{\partial t} \pm P_{w} = 0 \qquad (3)$$

οù θ: contenu en eau
t: temps
P: perte (-) ou gain (+) au système

on obtient l'équation de Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \pm P \quad (4)$$
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_w(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) \right] \pm P_w \quad (5)$$
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \pm P \quad (6)$$

où

$$D_{w}(\theta) = K(\theta) \frac{d\psi}{d\theta} et C_{w}(\psi) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi}$$

Cw: capacité de l'eau

L'équation (4) représente la forme générale mais ne peut être résolue car elle contient deux inconnues θ et ψ . Les deux autres équations représentent le contenu en eau (5) et la pression d'eau (6) dans le sol durant un écoulement transitoire vertical en milieu non saturé.

En 1977, van Genuchten et Wierenga ont fait des essais en colonne de sol avec un traceur (tritium: ${}^{3}\text{H}_{2}\text{O}$) afin d'évaluer le modèle analytique de van Genuchten et Wierenga (1976) et en estimer certains paramètres (van Genuchten et Wierenga, 1977). Ce modèle simule le mouvement de solutés dans un matériel non-saturé et présentant des aggrégats. La phase liquide est divisée en deux parties distinctes: la partie mobile et la partie immobile. Cette dernière reflète la portion de l'eau présente dans les aggrégats. Le modèle de van Genuchten et Wierenga se formule ainsi:

$$\theta_{m}R_{m}\frac{\partial C_{m}}{\partial t} + \theta_{im}R_{im}\frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \theta_{m}D_{m}\frac{\partial^{2}C_{m}}{\partial x^{2}} - \theta_{m}v_{m}\frac{\partial C_{m}}{\partial x}$$
$$\theta_{im}R_{im}\frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \alpha(C_{m} - C_{im})$$

Plus précisément, ils ont voulu étudier l'impact de la vitesse d'écoulement, de la densité du matériel ainsi que la grosseur des aggrégats sur la porportion de la phase liquide appartenant à la partie immobile. Les auteurs ont obtenu les résultats suivants:

 La proportion d'eau immobile augmente généralement avec la diminution de la vitesse de l'écoulement. Des observations similaires ont été observées par Nielsen & Biggar (1962); Coats & Smith (1964); Villermaux & van Swaay (1969); et Bennet & Goodridge (1970).

2)Le coefficient de transfert de masse α , entre la partie mobile et la partie immobile de l'eau, diminue avec la vitesse de l'écoulement indiquant un mélange plus lent entre les deux fractions de l'eau lors de la diminution de la vitesse de l'écoulement. Bennet & Goodridge (1970) ainsi que Coats & Smith (1964) ont observé le même phénomène.

3)La diminution de la grosseur des aggrégats diminue la proportion de l'eau immobile dans la colonne.

4)Une réduction de la densité du matériel augmente la proportion de l'eau immobile dans la colonne. Une augmentation de la densité reflète un sol plus compacté impliquant une distribution de la grosseur des pores plus étroite, entraînant une distribution de la vitesse de pores plus étroite. 5)Le coefficient de dispersion D augmente avec la grosseur les aggrégats et la diminution de la densité.

6)Le modèle fournit une description réaliste du mouvement de solutés dans un matériel non-saturé et présentant des aggrégats.

En 1989, ces deux mêmes chercheurs ont voulu comparer les paramètres (coefficient de dispersion, coefficient de transfert de masse et facteur retard) de l'équation de convection-dispersion (présentée à la Section 2.3) et du modèle de van Genuchten et Wierenga (présenté précédemment), déterminés à partir d'essais en petite colonne (0.3 m de long), à ceux déterminés avec une colonne plus longue (6 m) et remplies avec le même sable fin. Leur second objectif était d'évaluer la dépendance spatiale de la dispersivité mesurée dans la longue colonne (Wierenga et Genuchten, 1989).

De l'eau contenant un traceur est injectée à la surface des colonnes qui sont en conditions de non-saturation. La concentration en traceur de l'effluent recueilli à la base des colonnes est analysée. Les concentrations mesurées en laboratoire sont comparées à celles calculées à l'aide de l'équation de convection-dispersion et à celles calculées à l'aide du modèle de van Genuchten et Wierenga. Voici les conclusions de leurs essais:

1)En comparant les distributions de concentration de l'effluent de la petite colonne avec celles de la grande colonne, il semble que le coefficient de dispersion soit supérieur dans cette dernière. Par contre, il n'y a pas d'évidence claire d'une augmentation du coefficient de dispersion avec la profondeur dans la grande colonne.

2)La dispersivité dans la grande colonne est cinq fois supérieur à celle de la petite colonne.

3)Le facteur retard est essentiellement le même dans les deux colonnes.

Également en 1989, van Ommen et al. ont utilisé l'ion bromure sur le terrain afin d'étudier et évaluer le transport du soluté dans la zone non-saturée ainsi que dans la nappe (van Ommen et al., 1989). Les résultats ont été comparés à des simultations effectués à l'aide de deux modèles différents. Le transport dans la zone non-saturée a été calculé à partir de l'équation de convection-dispersion inclue dans un modèle stochastique qui tient compte des hétérogénéités à l'échelle "au champ". Le transport dans la zone saturée est décrit par un modèle stochastique récemment développé. Les deux modèles ont assez bien décrit le comportement du traceur dans la partie supérieure du profil de sol. Par contre, les essais de terrain ont présenté des vitesses de transport supérieures dans le sous-sol. Ce phénomène est attribué à l'écoulement préférenciel digité qui se produit dans la zone non-saturée.

En 1991, Pendexter et Furbish ont voulu illustrer les instabilités de l'écoulement préférentiel digité dans un sédiment uniforme (Pendexter et Furbish, 1991). Ils ont utilisé une chambre de verre (1 cm d'épais x 60 de haut x 120 cm de large) remplie de sable ainsi qu'un arroseur simulant la pluie. Il semble que des variations dans la géométrie des pores, associées à la distribution aléatoire des grains du matériel augmente localement la force capillaire. Ces régions de forte capillarité auraient la capacité de stabiliser localement la bordure du front humide en y retenant l'eau. Ce phénomène aurait pour effet de ralentir localement le déplacement du front humide permettant aux parties adjacentes de ce dernier, de percoler plus loin. La formation de ces irrégularités évoluent jusqu'à produire de l'écoulement préférentiel digité dans la zone non-saturée.

2.3 MELEF-5V (PADILLA ET AL., 1988):

Ce modèle mathématique employant la méthode des éléments finis simule le flux d'eau vertical ainsi que la propagation de la chaleur et de solutés tant dans la zone non saturée que saturée. Il utilise des équations différentielles ainsi que des lois physiques afin de relier la température, la pression de l'eau ainsi que les composants chimiques de cette dernière.

Voici l'équation décrivant le mouvement vertical de l'eau dans les zones saturée et non-saturée:

$$\rho \mathbf{M}(\theta) \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho \frac{\mathbf{k}_{w}(\theta)}{\eta} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} \right] + q$$

 ρ : densité de l'eau M : capacité d'humidité spécifique θ : contenu en eau H : potentiel de l'eau (H = P + $\rho_w g z$) t : temps z : profondeur P : pression de l'eau k_{W} : perméabilité intrinsèque $\leftarrow k_{W} = \underline{\mu} K_{S}$, où μ : viscosité de l'eau p: densité de l'eau ρg : viscosité dynamique η : terme source (ajout) ou fuite (perte) du système q K₈ : conductivité hydraulique g : gravité

L'équation du transport des solutés (convection-dispersion) en une dimension dans un milieu non saturé ou saturé se présente ainsi:

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\theta D(\theta) \frac{\partial C}{\partial z} \right] - v \frac{\partial C}{\partial z} + (C^* - C) \frac{q}{\rho}$$

où C : concentration dissoute

où

C* : concentration dissoute dans la source en eau

 ρ^* : densité du matériel

- k : taux de dégradation du premier ordre
- D_c : coefficient de dispersion hydrodynamique

3.1 MONTAGE EXPÉRIMENTAL:

3.1.1 Échantillonnage et préparation de l'échantillon:

Le sol utilisé provient d'un site localisé à Pont-Rouge, à environ 50 km au sudouest de Québec. Il fût recueilli à l'aide d'une pelle à un endroit où aucune végétation n'était présente, entre 5 et 15 cm de profondeur. De retour au laboratoire, l'échantillon fût séché dans une étuve à 105 °C durant une nuit. Une étude granulométrique par tamissage fût faite en triplicat.

3.1.2 Préparation de la colonne de sol:

Un tuyau de pvc de 20 cm de diamètre et de 60 cm de longueur a été utilisé. Un volume de 1 litre de l'échantillon, préalablement passé au tamis de 2 mm d'ouverture, fût mis dans la colonne et compacté 30 fois à l'aide d'un pilon à main (Ghuman et al., 1975). Ces opérations furent répétées jusqu'à ce qu'il y ait 28 cm de sable dans la colonne . Quatre épaisseurs de géotextile ainsi qu'une grille fixées à la base de la colonne retiennent le matériel à l'intérieur de la colonne sans toutefois influencer l'écoulement de l'eau. Un trop-plein situé à 12 cm au-dessus de la surface du matériel fût installé afin d'être utilisé lors de la mesure de la conductivité hydraulique de la colonne (écoulement saturé à charge constante).

Une autre section de tuyau du même diamètre et d'une longueur de 20 cm sert de dispositif d'injection. Il est bouché à la base et des petits trous dans le fond permettent à l'eau de s'écouler à faible débit. Deux trop-pleins (l'un à 10 cm et l'autre à 15 cm de la base du bouchon) permettent de maintenir deux hauteurs d'eau différentes, engendrant deux débits d'écoulement différents (Figure 3.1). Il est également possible d'ajouter ou de boucher des trous à la base de ce bouchon.

3.2 MESURES PRÉLIMINAIRES:

La colonne vide fût préalablement pesée (M_c) . Une fois remplie de matériel sec, elle fût pesée de nouveau (M_3) . La colonne fût immergée presque complètement dans l'eau afin de permettre au matériel de se saturer et ce, jusqu'à l'obtention d'un poids constant indiquant que la saturation était complétée (environ 24 heures). Il est certain qu'un peu d'air fût emprisonnée à l'intérieur du matériel car la seule façon de l'éliminer totalement est d'utiliser une cloche sous vide. En milieu naturel, il reste toujours un peu d'air dans le sol. Le but ici étant de reproduire le milieu naturel, l'utilisation d'une cloche sous vide était hors de question et on laissa la nature déterminer la proportion d'air trappée dans la colonne. La colonne fût de nouveau pesée (M_1) . Après deux heures, laissant le temps à l'eau gravitaire de s'écouler, la colonne fût pesée de nouveau (M_2) . Ces différentes pesées permettent de déterminer certaines propriétés physiques du sol. Les méthodes de mesure de ce chapitre furent inspirées des méthodes décrites dans Methods of soil analysis, Part 1 (Klute et al., 1986).

3.2.1 Masse volumique apparente (g/cm³):

La densité est la masse du matériel divisée par son volume. Elle est égale au résultat de la différence entre la masse de la colonne sèche (M_3) et celle de la colonne vide (M_c) divisée par le volume de la colonne de sol.

$$\rho_{\text{matériel}} = \frac{m_3 - m_c}{v}$$



Figure 3.1: Dispositif expérimental.

3.2.2 Porosité totale (%):

La porosité totale se définit comme la quantité totale d'espaces vides entre les grains du sol. Cette valeur est égale au résultat de la différence entre la masse de la colonne saturée en eau (M_1) de la masse de la colonne sèche (M_3) , divisée par le produit du volume de la colonne de sol et de la densité de l'eau (Castany, 1968).

$$n_{\text{totale}} = \frac{m_1 - m_3}{v^* \rho_{\text{eau}}}$$

3.2.3 Porosité gravitaire ou efficace (%):

La porosité gravitaire est la quantité d'espaces entre les grains où l'eau (ou autre liquide) peut se déplacer librement sous le seul effet de la gravité. Elle est calculée à l'aide de la masse de la colonne après essuyage (M_2) et de celle de la colonne saturée en eau (M_1) (Castany, 1968).

$$n_{\text{efficace}} = \frac{m_1 - m_2}{v^* \rho_{\text{eau}}}$$

3.2.4 Frange (hauteur) capillaire (cm):

La frange capillaire est également appelée "zone saturée par tension" qui exprime bien le phénomène particulier qui se produit à cet endroit. Dans cette zone, le matériel est saturé comme dans la nappe mais la pression d'eau ψ est négative comme dans la zone non-saturée. C'est la région intermédiaire entre la zone non saturée et la nappe. Elle est représentée par ψ_A aux Figures 1.1 et 1.2. La valeur de ψ_A étant fonction de la granulométrie et de l'arrangement des particules, ψ_A aura une valeur négative plus grande pour un matériel argileux, entraînant une frange capillaire plus épaisse comparativement à celle d'un sol plus grossier (Freeze and Cherry, 1979). Pour mesurer la frange capillaire de la colonne de sol, il s'agit de saturer le matériel et d'abaisser graduellement le niveau de la nappe jusqu'à ce qu'une diminution du poids de la colonne de sol soit détectée. Ceci indiquera que la partie supérieure de la colonne commence à se désaturer. La distance entre le sommet de la nappe et le sommet du matériel est la hauteur capillaire.

Voici les différentes étapes de la mesure de la frange capillaire:

1. Peser la colonne contenant le sol sec (Msec);

2. Mettre la colonne dans un bassin, la saturer doucement par le bas, vérifier qu'il n'y ait pas d'air emprisonné sous la colonne en la basculant légèrement, taper sur la colonne afin d'aider à évacuer les bulles d'air qui pourrait être emprisonnées dans le sol, laisser équilibrer 24 heures et peser;

3. Baisser le niveau d'eau de quelques cm, laisser équilibrer 24 heures et peser de nouveau. Répéter ces étapes jusqu'à ce qu'une baisse en poids soit détectée. (Pour plus de sûreté, il est possible de continuer les mesures afin d'être certain que la baisse de poids soupçonnée comme indicatrice de la hauteur capillaire soit bien la bonne.)

4. Mesurer la distance entre le sommet de la nappe et le sommet du matériel. Cette valeur est la hauteur capillaire.

3.2.5 Conductivité hydraulique (cm/s):

A la suite de la saturation préalable de la colonne, une hauteur d'eau constante de 12 cm est maintenue au-dessus du sol à l'aide du trop-plein placé à cet effet. On recueille le volume d'eau V s'écoulant à la base durant un certain temps t. La conductivité hydraulique est calculée à l'aide de la formule suivante:

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{V}^* \mathbf{L}}{\mathbf{A}^* \mathbf{t}^* (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1)}$$

20

où, L: hauteur de sol : 28 cm

A : section de la colonne de sol : 314.16 cm²

H₂ -H₁: distance entre le sommet du niveau d'eau et le niveau de sortie de l'eau (ici la base de l'échantillon) :40 cm

Des essais ont été exécutés à différents moments afin de surveiller le changement de conductivité hydraulique de la colonne dû à la compaction ou à tout autre phénomène naturel (Richards, 1931). Les premières mesures furent effectuées au tout début. La deuxième série de mesures fût faite après l'essai #4 des bromures et les dernières mesures de la conductivité hydraulique de la colonne furent faites juste avant l'essai #6 des bromures.

3.2.6 Dispersivité (cm):

La méthode utilisée ici est similaire à celle employée pour la mesure de la conductivité hydraulique de la colonne sauf que l'eau d'alimentation à la surface du sol contient une certaine concentration en Br⁻ (traceur) connue. L'évolution de la concentration en bromure de la solution à la base de la colonne (courbe de fuite) permet d'évaluer la dispersivité (Freeze and Cherry, 1979 et Todd, 1959). Ceci est réalisé dans notre cas en comparant ces valeurs avec les valeurs des simulations effectuées à l'aide du programme *Solute* (Beljin, 1985). Ce programme utilise une résolution analytique l'équation d'advection-dispersion.

3.2.7 Contenu en eau (%):

Le contenu massique en eau est le rapport entre la masse d'eau présente dans un échantillon et la masse de l'échantillon sec. Le contenu volumique en eau est le volume d'eau présent dans un échantillon d'un certain volume. Les équations permettant de calculer les contenus massique et volumique en eau sont:

$$\theta_{\rm m} = \frac{m_{\rm eau}}{m_{\rm \acute{e}ch.\,sec}} = \frac{m_{\rm col.\,humide} - m_3}{m_3 - m_c}$$
$$\theta_{\rm v} = \left[\frac{\rho_{\rm sol}}{\rho_{\rm eau}}\right] * \theta_{\rm m}$$

οù, θm : contenu massique en eau
 θv : contenu volumique en eau
 o : densité

3.2.8 Débit d'injection (cm/j):

Le débit d'injection est la quantité d'eau précipitée au-dessus du sol de la colonne durant une période de temps. Il est contrôlé par la quantité de trous à la base du bouchon et par la hauteur d'eau maintenue dans le bouchon. Il est calculé à partir du volume total de solution recueilli à la base de la colonne, calculé pour une durée de un jour et divisé par la section du bouchon, pour donner une valeur de flux d'entrée exprimée en cm/j.

3.3 ESSAIS EN LABORATOIRE:

Le but principal des essais de laboratoire est d'étudier l'impact des diverses conditions de non saturation du sol et de différents débits d'injection sur le mouvement de l'eau dans le sol. Idéalement, il faudrait pouvoir suivre le cheminement d'une goutte d'eau depuis son entrée dans la colonne jusqu'à sa sortie. Pour ce faire, il faut identifier cette goutte afin de la différencier des autres. Une technique simple et peu coûteuse est l'utilisation d'un traceur.

L'eau qui est présente dans la colonne avant le début de chaque essai est de l'eau déminéralisée. L'eau injectée en surface durant les essais contient une concentration connue de traceur. En recueillant l'eau qui s'écoule à la base de la colonne, en dosant la concentration en traceur et en portant ces résultats sur un graphique (courbe de fuite: C/Co vs temps ou volume injecté), il est possible de déterminer la vitesse de l'eau dans le sol. Il s'agit alors de répéter l'expérience avec des contenus en eau (θ_v) et des débits d'entrée (Q_{entrée}) différents. Le Tableau I (page suivante) présente les différentes conditions utilisées pour les essais en laboratoire.

Essai	Qinjection (cm/j)	θ _v (%)
1	12.1	51
2	12.1	45
3	4.8	45
4	4.8	45
5	conditions saturées	51
6	9.1	51
7	3.6	51
8	9.1	30

TABLEAU III-I: Conditions des différents essais en laboratoire

3.3.1 Traceur (Davis et al., 1985):

L'ion bromure a été choisi pour des raisons pratiques:

•il est très soluble, ne précipite pas et représente bien le mouvement de l'eau
•il ne s'adsorbe pas
•il ne se dégrade pas (conservatif)
•il est peu coûteux
•il n'est pas toxique
•il est facile à doser

3.3.2 Électrode:

Le dosage de l'ion Br⁻ a été réalisé à l'aide d'une électrode spécifique pour l'ion Br⁻. L'électrode utilise un détecteur composé de Ag-AgBr ou AgBr-Ag₂Br. Lorsque l'électrode est placée dans la solution à doser, la réaction suivante s'équilibre:

$$AgBr = Ag^+ + Br^-$$

La valeur obtenue (en mV) dépend de l'activité de Ag⁺. Une augmentation de Br⁻ activera la réaction vers la gauche, abaissant l'activité de Ag⁺ et donnera une valeur (mV) plus faible. La procédure expérimentale utilisée est celle détaillée dans Adriano et Doner, (1982).

4.1 GRANULOMÉTRIE:

La courbe granulométrique moyenne obtenue pour les trois échantillons est présentée à la Figure 4.1. Les données sont reportées à l'Annexe A. Ce matériel est classé comme étant un sable mal trié (SP) selon ASTM (Gee & Bauder, 1986).



Figure 4.1: Courbe granulométrique du sol.

4.2 MESURES PRÉLIMINAIRES:

Les principales caractéristiques physiques du sol sont présentées dans le Tableau IV-I. Les calculs sont détaillés dans l'Annexe B.

Masse volumique	1.42 g/cm^3	
Porosité totale	51.2 %	
Porosité gravitaire	11.4 %	
Capacité en colonne	39.8%	
Frange capillaire	13 cm	
Conductivité hydraulique	0.92 10 ⁻³ cm/s	
Dispersivité	0.05 cm	

TABLEAU IV-I: Caratéristiques physiques du sol

L'évaluation de la dispersivité est réalisée en comparant la courbe de fuite expérimentale à celle simulée à l'aide du programme *Solute* (Beljin, 1985). La Figure 4.2 présente la superposition de la courbe obtenue à l'aide du programme *Solute* sur la courbe expérimentale (Essai #5) effectuée en conditions saturées. Selon Pickens et Grisak (1981), la dispersivité longitudinale obtenue à l'aide de la courbe de fuite d'une colonne de sol, se situe entre 0.01 et 1 cm. La courbe simulée se rapprochant le plus de la courbe expérimentale est celle présentant un coefficient de dispersivité de 0.05 cm. Les résultats de l'expérimentation sont présentés à l'Annexe C.



Figure 4.2: Comparaison des courbes de fuite de l'Essai #5 (en conditions saturées) et des simulations avec des coefficients de dispersivité variant de 0.05 à 0.4 cm.

4.3 ESSAIS:

Le Tableau IV-II présente les différentes conditions des essais en laboratoire. L'Annexe D contient les données expérimentales des essais.

L'essai effectué en conditions saturées (#5) a un contenu initial en eau de 51% (porosité totale). Ce contenu en eau est maintenu tout au long de l'essai en appliquant une hauteur d'eau constante au-dessus du sol (voir le chapitre matériel et méthode). Les essais #1, 6 et 7 sont effectués en conditions saturées au début de l'expérience (contenus initiaux en eau de 51%) mais deviennent en conditions non saturées par la

suite, car le débit d'injection à la surface du sol est inférieur à la conductivité hydraulique et il n'y a pas d'accumulation d'eau à la surface du sol.

Essai	K _s (cm/j)	Q _{injection} (cm/j)	θ _v initial (%)
1	94.0	86.9	51
2	94.0	50.6	45
3	94.0	21.4	45
4	94.0	10.3	45
5	77.8	108.6 (saturé)	51
6	67.4	19.5	51
7	67.4	7.7	51
8	67.4	7.5	30

TABLEAU IV-II: Conditions des différents essais en laboratoire

Les essais ayant une condition initiale de saturation différente seront comparés entre eux afin d'évaluer l'impact de cette condition sur l'écoulement. Les essais ayant des débits d'injection différents et un même contenu initial en eau sont les essais #1, 6 et 7 (θ =51%) et les essais #2, 3 et 4 (θ =45%). Pour les essais ayant des contenus initiaux en eau différents, l'influence des débits d'injection différents est éliminée en exprimant les courbes de fuite en fonction des volumes cumulatifs de solution recueillis à la base de la colonne. Il s'agit des essais #1, 2 et 8. L'essai #3 est négligé car la colonne était contaminée en ion bromure dès le début de l'essai, ce qui perturbe le suivi du mouvement de l'eau dans la colonne. L'essai #5 n'est pas considéré car il représente l'écoulement en conditions saturées.
La Figure 4.3 présente les essais ayant des contenus initiaux en eau différents et un même débit d'injection. Les Figures 4.4 et 4.5 illustrent les essais ayant des débits d'injection différents et un même contenu initial en eau.

Les vitesses d'écoulement calculées à partir des graphiques sont présentées au Tableau IV-III. Chaque vitesse est obtenue en divisant la longueur de la colonne de sol (28 cm) par le temps que prend le rapport C/Co à atteindre 0.5 qui représente le centre de masse du front de propagation. Pour les essais où la valeur de C/Co n'atteint pas 0.5, ce temps est évalué à partir du temps d'atteinte de C/Co = 0.25 et du rapport entre le temps C/Co = 0.5 et C/Co = 0.25 obtenus pour les autres essais. Le détail de ces calculs est présenté à l'Annexe E.



(a)



(b)

Figure 4.3 Influence du contenu en eau θ : courbes de fuite des essais 1, 2 et 8, (θ différents) (a) en fonction du temps et (b) en fonction du volume cumulatif.



(a)



(b)

Figure 4.4 Influence du débit d'injection Q: courbes de fuite des essais 1, 6 et 7, Q différents, (a) en fonction du temps et (b) en fonction du volume cumulatif.



(a)



(b)

Figure 4.5 Influence du débit d'injection Q: courbes de fuite des essais 2 et 4, Q différents, (a) en fonction du temps et (b) en fonction du volume cumulatif.

	Essai	Conditions	Vitesse (cm/j)
	1	θ=51%	294
θ différents	2	θ=45%	157
	8	θ=30%	-
	1	Q=86.9 cm/j	294
θ=51%	6	Q=45 cm/j	138
	7	Q=7.7 cm/j	-
θ=45%	2	Q=50.6 cm/j	157
	4	Q=10.3 cm/j	*210/79

TABLEAU IV-III: Vitesses moyennes d'apparition des Br-

* La valeur de 210 cm/j est obtenue par le calcul du temps d'atteinte de C/C0=0.25 (voir Annexe E). La valeur de 79 cm/j est calculée à partir de la vitesse d'écoulement de l'essai #2 et du rapport des pentes des courbes de fuite des deux essais (voir section 4.3.2.2).

La vitesse de l'essai #5 calculée en conditions saturées est de 426 cm/j. La courbe de fuite de cet essai est présentée à la Figure 4.2.

4.3.1 Influence du contenu en eau:

4.3.1.1 Essais 1, 2 et 8:

La Figure 4.3(b) représente les courbes de fuite des Essais #1, 2 et 8 en fonction du volume cumulatif écoulé à la base de la colonne. On remarque que les trois courbes de fuite ont la même allure. La courbe de fuite de l'Essai #2 débute à des valeurs de C/Co supérieures (environ 0.2) par rapport aux deux autres essais. Ce phénomène pourrait s'expliquer par la présence probable de résidus de bromure de l'essai précédent, et que le début de cette courbe devrait être situé à des valeurs de C/Co plus faibles. Cependant, ceci peut également correspondre à une arrivée rapide d'eau bromée en sortie de colonne. En effet, dans l'Essai #1 la colonne est saturée et l'écoulement est nécessairement de type piston (First In First Out). Alors que dans l'Essai #2, le contenu initial en eau est proche de la capacité au champ et l'eau entrée en tête de colonne peut rapidement s'écouler dans la colonne sans nécessairement déplacer l'eau présente initialement (Last In First Out). Pour ce qui est de l'Essai #8, l'écoulement à la base de la colonne ne débute qu'après 170 minutes (Figure 4.3(b)) car le contenu initial en eau du sol doit dépasser la capacité au champ avant qu'il n'y ait écoulement gravitaire. Par la suite, l'écoulement est de type LIFO, car les conditions deviennent similaires à celles de l'Essai #2.

Une façon d'évaluer le temps de résidence de l'eau dans le sol est d'utiliser "the queueing theory" (Gamble, 1990). Afin d'appliquer cette théorie au mouvement de l'eau dans le sol, il faut considérer le comportement de cette dernière comme celui d'une série de boîtes (éléments) entraînées sur un tapis roulant. Une des extrémités du tapis est la surface du sol (sommet de la colonne) et l'autre extrémité représente le socle rocheux sous le sol (base de la colonne). Chaque boîte sur le tapis roulant correspond à une goutte d'eau qui conserve ses qualités (composition) tout au long de son transport à travers le système étudié. Les éléments peuvent traverser le système de deux façon: FIFO ou LIFO. L'ordre FIFO (First In First Out) implique que le premier élément introduit dans le système (le plus vieil élément) sera le premier à en

sortir. Dans la comparaison avec le tapis roulant, les boîtes suivant cet ordre sont mises à une extrémité du tapis et enlevées à l'autre extrémité sans qu'il n'y ait de changement dans la direction du mouvement du tapis. Dans le sol, l'eau introduite à la surface du sol et se comportant de cette manière correspond à l'écoulement de type piston. D'après les résultats de l'Essai #1, ce type d'écoulement se produit lorsque le sol est saturé. L'ordre LIFO (Last In First Out) implique que les derniers éléments introduits dans le système sont les premiers à en sortir. Dans la comparaison avec le tapis roulant, les boîtes suivant cet ordre sont mises à une extrémité alors que le tapis se déplace dans une direction. Par la suite, le mouvement du tapis est inversé et les boîtes sont enlevées à la même extrémité où elles furent introduites. Dans le sol, ce type de comportement peut correspondre au cas où l'eau provenant de la plus récente précipitation traverse la colonne de sol en évitant l'eau présente initialement dans le sol. Evidemment, ce type d'écoulement ne semble possible que si le contenu initial en eau du sol est voisin de la capacité au champ comme dans le cas de l'Essai #2.

On remarque que pour un même volume cumulatif, la courbe de fuite de l'Essai #2 se situe à des valeurs de C/Co supérieures à celles de l'Essai #1 (Figure 4.3(b)). Ceci renforce l'idée qu'au cours de l'Essai #2, l'eau contenant du traceur s'écoule prioritairement par rapport à l'eau initialement dans la colonne (LIFO), comparativement à l'Essai #1 où l'écoulement est de type piston (FIFO). De plus, on remarque que les deux courbes se rejoignent après environ 2000 ml de volume cumulatif de solution indiquant que le régime permanent est atteint. Pour l'Essai #8, on aurait dû s'attendre à des valeurs C/Co supérieures à celles observées car c'est l'eau bromée qui a comblé le manque d'eau du contenu initial en eau (30%) jusqu'à la capacité au champ (40%) afin de rendre l'écoulement gravitaire possible. Il semble cependant que les concentrations en Br⁻ croissent plus rapidement que pour l'Essai #1, bien que l'Essai #8 s'arrête à des volumes cumulés plus faibles. Le sol étant à un contenu en eau inférieur à la capacité au champ, l'écoulement est alors régi par des forces de tension et le mouvement de l'eau dans la colonne suit une dynamique différente que dans le cas de l'écoulement gravitaire.

A la Figure 4.3(a), on remarque que la pente de la courbe de fuite de l'Essai #1 est la plus abrupte, suivie de celle de l'Essai #2 et celle de l'Essai #8 est la plus inclinée. La pente d'une courbe de fuite étant fonction de la vitesse d'écoulement, on peut affirmer que cette dernière est dépendante du contenu initial en eau.

On peut donc conclure que le type d'écoulement est fortement dépendant du contenu initial en eau. Les courbes de fuite représentant l'écoulement d'un traceur en milieu initialement saturé débutent à des valeurs C/Co près de zéro, indiquant un écoulement de type FIFO (piston). Les courbes de fuite illustrant la propagation des bromures dans une colonne de sol ayant un contenu en eau voisin de la capacité au champ débutent à des valeurs C/Co élevées indiquant un écoulement de type LIFO. Les courbes de fuite résultant d'essais en colonne de sol où le contenu en eau est inférieur à la capacité au champ débutent plus tard, indiquant le temps que prend le sol à atteindre la capacité au champ avant qu'il n'y ait écoulement.

4.3.2 Influence du débit d'injection:

4.3.2.1 Essais 1, 6 et 7:

Ces trois essais ont tous un contenu initial en eau de 51% mais des débits d'injection différents. L'allure des trois courbes de fuite est très différente. Le rapport entre la pente de la courbe de fuite de l'Essai #1 et celle de l'Essai #6 est de 2.4 (Figure 4.5(a)). La vitesse d'apparition des bromures de l'Essai #1 est supérieure à celle de l'Essai #6 d'un facteur de 2.1. La vitesse d'apparition des bromures de l'Essai #7 ne peut être calculée mais on peut affirmer qu'elle est inférieure à celles des deux autres essais car la pente de sa courbe de fuite est la moins abrupte.

On constate que la vitesse d'écoulement du bromure est dépendante du débit d'injection.

L'échantillonnage de l'Essai #6 a été réalisé à une fréquence constante (tous les 10 minutes). Des problèmes techniques ont de plus entraîné une certaine

méconnaissance au niveau des volumes écoulés. Pour cet essai, la courbe de fuite en fonction du volume cumulatif est ainsi approximée (Figure 4.4(b)). Pour cette approximation, le volume total recueilli à la fin de l'essai a été divisé par le nombre d'échantillons recueillis au cours de l'essai et répartis à intervalles réguliers. Il faut donc considérer cette courbe de fuite avec beaucoup de réserve.

On remarque que les trois courbes de fuite débutent à des valeurs C/Co similaires, indiquant un même type d'écoulement. L'écoulement des trois essais est de type piston (FIFO) car la colonne de sol est saturée au début des trois essais. La courbe de fuite de l'Essai #7 suit celle de l'Essai #1. Le débit d'injection de l'Essai #7 est probablement trop faible pour la durée de l'essai afin que l'eau bromée injectée en surface ait le temps d'atteindre la base de la colonne. Le fait qu'un même type d'écoulement (FIFO) se soit produit pour trois essais ayant des débits d'injection différents indique que le type d'écoulement est indépendant du débit d'injection.

4.3.2.2 Essais 2 et 4:

On retrouve ici les mêmes caractéristiques pour les deux essais (Figure 4.5(a)): début de la courbe de fuite à des valeurs de C/Co supérieures (près de 0.2) et contenu initial en eau (45%) près de la capacité au champ de 39.8%. Ceci correspond à un écoulement de type LIFO. Lorsque l'on illustre les courbes de fuite en fonction du volume cumulatif (Figure 4.5 (b)), l'influence des débits d'injection différents est éliminée. On remarque que les deux courbes sont similaires. On peut conclure que le débit d'injection n'influence pas le type d'écoulement. On remarque également qu'à environ 260 minutes, la courbe fuite l'Essai #4 redescend sensiblement indiquant l'arrivée, à la base de la colonne, d'eau à plus faible concentration en traceur. Il semble donc que l'eau injectée à la surface de la colonne se mélange avec le temps à l'eau présente initialement dans la colonne (eau exempte de traceur).

4.4 SIMULATIONS:

La modélisation est un outil très utile lorsque le modèle utilisé reflète bien les processus réels. Afin de déterminer la validité du modèle, des simulations ont été réalisées avec des données d'entrée semblables aux conditions expérimentales des essais. Les résultats des simulations sont comparés à ceux recueillis lors des essais en laboratoire. Les données d'entrée imposées pour chaque simulation sont (1) la perméabilité intrinsèque de la colonne calculée à l'aide de la conductivité hydraulique saturée, (2) le débit d'injection au sommet de la colonne, (3) le contenu volumique initial en eau exprimé à l'aide de la hauteur capillaire de la colonne et du potentiel de pression (ϕ) correspondent, ainsi que (4) la concentration en traceur de la solution injectée au sommet de la colonne. D'autres caractéristiques constantes pour toutes les simulations (caractéristiques de la colonne et du sol) furent introduites dans le modèle. Ces propriétés sont (1) la porosité totale du sol, (2) la dispersivité longitudinale de la colonne, (3) la diffusion moléculaire du traceur dans l'eau, (4) la hauteur capillaire, (5) la température et la pression ambiante, et finalement (6) le nombre d'éléments constituant la colonne. Les résultats détaillés des simulations sont présentés aux annexes F à M.

4.4.1 Numéro 1:

L'allure de la courbe de fuite de l'essai en laboratoire est différente de celle prévue par la simulation (Figure 4.6). La première monte rapidement à des valeurs C/Co élevées (pente très abrupte) tandis que celle de la simulation atteint le plateau en 1020 minutes. La progression réelle du traceur dans la colonne de sol ($v_{essai} = 294$ cm/j) est donc plus rapide que celle prévue par la simulation ($v_{sim} = 156$ cm/j).

Il semble que le modèle sous-estime la progression du bromure pour l'écoulement de type FIFO de l'Essai # 1.



Figure 4.6: Courbes de fuite de l'Essai #1 mesurée et simulée.

4.4.2 Numéro 2:

Les deux courbes de fuite sont différentes (Figure 4.7), particulièrement au début. Il semble que le modèle ne tienne pas compte du fait que l'Essai #2 soit de type LIFO. En effet, l'écoulement de ce type est caratérisé par des valeurs C/Co élevées dès le début de l'essai. C'est ce qu'on retrouve pour la courbe de fuite de l'essai en laboratoire mais pas pour celle de la simulation.

La pente de l'essai en laboratoire est plus abrupte que celle de la simulation, indiquant que la simulation a prévu une vitesse du mouvement du traceur trop faible par rapport à la vitesse réelle calculée à partir de l'essai en laboratoire. La vitesse d'écoulement du bromure dans la colonne de sol est de 157 cm/j comparativement à 97 cm/j pour celle de la simulation. On remarque également que la courbe de fuite représentant la simulation atteint le plateau en 1710 minutes.



Figure 4.7: Courbes de fuite de l'Essai #2 mesurée et simulée.

4.4.3 Numéro 4:

Les deux courbes de fuite sont très différentes. La courbe de fuite de l'essai débute à des valeurs C/Co = 0.13, indiquant un écoulement de type LIFO. La courbe de fuite de la simulation débute à C/Co=0, monte abruptement et atteint le plateau en 6510 minutes. Il semble, une fois de plus, que le modèle ne prenne pas en considération le type d'écoulement LIFO.

La vitesse de transport du bromure dans la colonne de sol est de 79 cm/j. La vitesse d'écoulement prévue par le modèle est de 20 cm/j.



Figure 4.8: Courbes de fuite de l'essai #4 mesurée et simulée.

4.4.4 Numéro 5:

La courbe de fuite prévue par le modèle monte et atteint le plateau vers 780 minutes. La courbe de fuite de l'essai monte plus rapidement que celle de la simulation, subit une inflexion autour de C/Co = 0.30 entre 34 et 60 minutes et poursuit sa montée.

Le calcul des vitesses, $v_{sim}=200$ cm/j et $v_{essai}=429$ cm/j, indique que la progression du traceur dans la colonne est plus rapide que celle prévue par la simulation d'un facteur de 2. Il semble que le modèle ne simule pas de façon adéquate l'écoulement de type FIFO dans les conditions de saturation.



Figure 4.9: Courbes de fuite de l'Essai #5 mesurée et simulée.

4.4.5 Numéro 6:

La comparaison des deux courbes est délicate car la courbe de fuite de l'essai en laboratoire est incomplète. On peut tout de même remarquer que les deux courbes débutent à zéro et que la montée de la courbe de l'essai est plus rapide et plus abrupte que celle de la simulation. La courbe de fuite de la simulation atteint le plateau en 4950 minutes. La vitesse prévue par la simulation (38 cm/j) est inférieure à celle de l'expérimentation (138 cm/j) d'un facteur de 4.



Figure 4.10: Courbes de fuite de l'Essai #6 mesurée et simulée.

4.4.6 Numéro 7:

La portion de la Figure 4.11 où les deux courbes de fuite sont représentées simultanément est de courte durée. Durant ce court laps de temps, les deux courbes sont similaires sauf vers la fin où la courbe de fuite de l'essai semble plus abrupte que celle de la simulation, indiquant une vitesse supérieure de la propagation du traceur. La vitesse d'écoulement prévue par la simulation est de 15 cm/j. Malheureusement, la courbe de fuite de l'essai ne permet pas le calcul de cette vitesse. Il semble que la simulation ne soit pas adéquate pour cet écoulement de type FIFO. La courbe de fuite atteint le plateau en 8910 minutes.



Figure 4.11: Courbes de fuite de l'Essai #7 mesurée et simulée.

4.4.7 Numéro 8:

La pente de la courbe de fuite de la simulation étant plus inclinée (Figure 4.12), on peut conclure que la vitesse d'écoulement du bromure calculée par le modèle (63.6 cm/j) est supérieure à celle dans la colonne de sol au cours de l'essai. Malheureusement, la courbe de fuite de l'essai ne permet pas le calcul de cette vitesse. La courbe de fuite de la simulation atteint le plateau en 2760 minutes. On peut donc conclure que la simulation n'est pas adéquate pour les conditions de cet essai.





5.1 Méthode:

L'usage de ce type de colonne de sol et d'un traceur est bien adapté à l'étude en laboratoire de l'écoulement de l'eau dans un sol non saturé. Il y aurait cependant deux améliorations majeures à apporter. Il serait conseillé d'utiliser autant de colonnes que d'essais afin d'éviter la présence possible de résidus de traceur provenant des essais précédents. Toutefois, il faudrait porter une attention particulière à ce que toutes les colonnes aient des propriétés semblables. Il serait également conseillé d'utiliser des échantillonneurs automatiques afin d'augmenter la durée des essais et d'obtenir des courbes de fuite complètes (jusqu'à C/Co = 1). De plus, il serait utile de répéter ces différents tests plus d'une fois afin de vérifier le caractère répétitif des différents phénomènes permettant d'identifier le type d'écoulement (valeur C/Co égale ou supérieure à zéro au premier échantillonnage, temps de latence avant le début de l'écoulement à la sortie de la colonne).

5.2 RÉSULTATS:

5.2.1 Essais:

5.2.1.1 Influence du contenu en eau sur le mouvement de l'eau dans la colonne de sol:

D'après la comparaison des résultats des essais ayant les mêmes conditions expérimentales, sauf le contenu en eau (voir section 4.3.1), il ressort clairement que le

type d'écoulement est dépendant du contenu initial en eau. Les courbes de fuite représentant l'écoulement d'un traceur en milieu initialement saturé débutent à des valeurs C/Co près de zéro, indiquant un écoulement de type FIFO (piston). Les courbes de fuite illustrant la propagation des bromures dans une colonne de sol ayant un contenu en eau voisin de la capacité au champ débutent à des valeurs C/Co élevées indiquant un écoulement de type LIFO. Les courbes de fuite résultant d'essais en colonne de sol où le contenu en eau est inférieur à la capacité au champ débutent plus tard, indiquant le temps que prend le sol à atteindre la capacité au champ avant qu'il n'y ait écoulement. De plus, il fût démontré que la vitesse d'écoulement est dépendante du contenu initial en eau.

5.2.1.2 Influence du débit d'injection sur le mouvement de l'eau dans la colonne de sol:

D'après la comparaison des résultats des essais ayant les mêmes conditions expérimentales, sauf le débit d'injection (voir section 4.3.2), on remarque que la vitesse de migration de l'eau est dépendante du débit d'injection. De plus, le fait qu'un même type d'écoulement se soit produit pour trois essais ayant des débits d'injection différents indique que le type d'écoulement est indépendant du débit d'injection.

5.2.2 Simulations:

Il semble que le modèle ne tienne pas compte du type d'écoulement. En effet, les différents types d'écoulement présentent des courbes de fuite caractéristiques. Les premières valeurs des courbes de fuite correspondant à l'écoulement de type FIFO se situent près de 0. Par contre, les courbes de fuite illustrant l'écoulement de type LIFO débutent à des valeurs supérieures à celles de l'autre type d'écoulement. En consultant les figures où les résultats des simulations sont représentées, on constate que toutes les courbes de fuite simulées débutent à C/Co=0, contrairement aux courbes de fuite des essais.

La précision du modèle est évaluée en calculant le rapport de la vitesse d'écoulement de l'eau de l'essai sur la vitesse calculée par la simulation. Ces dernières sont calculées à partir des graphiques présentés au chapitre précédent. Ces rapports fluctuent de 2 à 4 et sont présentés au Tableau V-I. On remarque que le modèle prévoit toujours des vitesses inférieures à celles obtenues au cours des essais de laboratoire sauf pour l'Essai #8. Les vitesses qui ne purent être calculées avec précision ne sont pas présentées dans le tableau mais elles furent tout de même évaluées qualitativement (Sections 4.4.6 et 4.4.7).

VITESSES du Br-									
#	Essai	Simulation	Rapport						
1	294	156	2						
2	157	97	2						
4	79	20	4						
5	429	200	2						
6	138	52	3.6						

TABLEAU V-I: Comparaison des vitesses des essais et des simulations

Les Figures 5.1 et 5.2 présentent la précision du modèle en fonction des deux paramètres étudiés, soit θ_v et Q.



Figure 5.1: Précision du modèle en fonction du $\theta_{\rm V}$ initial.



Figure 5.2: Précision du modèle en fonction du débit d'injection.

Le contenu en eau n'influence pas la précision du modèle car le graphique ne révèle aucune tendance particulière. Cette observation confirme que le modèle ne tient pas compte du contenu initial en eau pour le type d'écoulement (LIFO ou FIFO). Par contre, il semble que la précision du modèle augmente (rapports des vitesses diminuent) pour les valeurs de débit d'injection supérieures.

La connaissance de la vitesse de migration verticale de l'eau au-dessus de la nappe souterraine est d'une importance capitale. En effet, l'eau est le moyen de transport de tout soluté (entre autre les contaminants) vers la nappe. Selon les équations mathématiques des modèles, cette vitesse de transport est dépendante de la conductivité hydraulique du matériel qui dépend elle-même du contenu en eau du sol. Ce paramètre fluctue donc continuellement en milieu naturel en fonction des apports d'eau. L'influence du contenu en eau du sol ainsi que de l'intensité des précipitations fût évaluée. Pour ce faire, des essais en colonne à l'aide d'un traceur (Br⁻) ont été accomplis à différents taux d'humidité et régime d'alimentation. Les résultats de ces essais furent comparés à ceux obtenus lors des simulations effectuées dans les mêmes conditions.

Il ressort clairement que la vitesse de migration de l'eau est dépendante du contenu en eau. Par contre, il ne semble pas y avoir de relation linéaire entre cette vitesse et le contenu en eau. Dans le cas d'essais ayant des contenus en eau différents, on remarque que (1) les deux courbes de fuite ont la même allure, (2) que la montée de la courbe de fuite de l'essai ayant un contenu en eau inférieur est un peu plus tardive et que (3) la pente de ce même essai est légèrement plus faible.

De plus, le type d'écoulement est dépendant du contenu initial en eau. Les courbes de fuite représentant l'écoulement d'un traceur en milieu initialement saturé débutent à des valeurs près de zéro, indiquant un écoulement piston de type FIFO (First In First Out). Les courbes de fuite illustrant la propagation des bromures dans une colonne de sol ayant un contenu en eau voisin de la capacité au champ débutent à des valeurs élevées indiquant un écoulement de type LIFO (Last In First Out). Les courbes de fuite résultant d'essais en colonne de sol où le contenu en eau est inférieur à

la capacité au champ débutent plus tard, indiquant le temps que prend le sol à atteindre la capacité au champ avant qu'il n'y ait écoulement.

On peut également conclure que la vitesse de migration de l'eau est dépendante du débit d'injection. Cette dépendance ne semble cependant pas suivre de relation linéaire. De plus, le fait qu'un même type d'écoulement se soit produit pour trois essais ayant des débits d'injection différents indique que le type d'écoulement est indépendant du débit d'injection.

En comparant les résultats des essais à ceux des simulations, on peut évaluer la précision du modèle. Les vitesses de migration du Bromure obtenues au cours des essais de laboratoire sont toutes supérieures à celles calculées à l'aide du modèle d'un facteur variant de 2 à 4, exception faite de l'Essai #8. L'évaluation de l'influence du θ_V initial ainsi que du débit d'injection sur la précision du modèle fût faite. Il ressort que le contenu en eau n'influence pas la précision du modèle, confirmant que le modèle ne tienne pas compte du contenu en eau pour le type d'écoulement. Par contre, il semble que la précision du modèle augmente pour les valeurs de débit d'injection supérieures.

L'usage de ce type de colonne de sol et d'un traceur est bien adapté à l'étude en laboratoire de l'écoulement de l'eau dans un sol non saturé. Il y aurait cependant deux améliorations majeures à apporter. Il serait conseillé d'utiliser autant de colonnes que d'essais afin d'éviter la présence possible de résidus de traceurs provenant des essais précédents. Toutefois, il faudrait porter une attention particulière à ce que toutes les colonnes aient des propriétés semblables. Il serait également conseillé d'utiliser des échantillonneurs automatiques afin d'augmenter la durée des essais et d'obtenir des courbes de fuite complètes (jusqu'à C/Co = 1). De plus, il serait utile de répéter ces différents tests plus d'une fois afin de vérifier le caractère répétitif des différents phénomènes permettant d'identifier le type d'écoulement (valeur C/Co égale ou supérieure à zéro au premier échantillonnage, temps de latence avant le début de l'écoulement à la sortie de la colonne)

BIBLIOGRAPHIE

- ADRIANO, D.C. & DONER, H.E., "Bromide, Chlorine, and Fluorine", in Page,
 A.L. & Miller, R.H. & Keeney, D.R. (éd.) <u>Methods of Soil Analysis, Part.</u>
 <u>2</u>, 2^e édition, Madison (Wisconsin), ASA & SSSA, 1982, 1159 pages.
- BELJIN, M.S. <u>A program Package of Analytical Models for Solute Transport</u> <u>in Groundwater "SOLUTE"</u>, IGWMC Groundwater Modeling Softwares, Version: IBM-PC 1.0, 1985, 163 pages.
- BENNET, A., & GOODRIDGE, F. "Hydrodynamic and mass transfer studies in packed adsorption colums: I. Axial liquid dispersion", <u>Trans. Inst.</u> <u>Chem. Eng.</u>, 48(1970) 232-244.
- BUCKINGHAM, E. "Studies on the movement of soil moisture", <u>U.S. Dept.</u> <u>Ag. Bur. of Soils</u>, Bul. 38, (1907).
- CASTANY, G. Prospection et exploitation des eaux souterraines, Paris, Dunod, 1968, 717 pages.

а

- COATS, K.H. & SMITH, B.D. "Dead-end pore volume and dispersion in porous media", <u>Soc. Pet. Eng. J.</u>, 4(1964) 73-84.
- DAVIS, S.N. et al. <u>Introduction to groundwater tracer</u>, Tucson, University of Arizona, 1985, 201 pages.
- FREEZE, R.A. and CHERRY, J.A. <u>Groundwater</u>, Englewood Cliffs (NJ), Prentice-Hall, 1979, 590 pages.

- GAMBLE, B.F., ECKSTEIN,Y. and EDWARDS, W.M. "Principles of evaluation of soil water residence time using queueing disciplines with water budget data (theorical background-I)", <u>Journal of Hydrology</u>, 113(1990) 1-25.
- GEE, G.W. & BAUDER, J.W. <u>Particle-size Analysis</u> in Klute, A. (éd.) Methods of soil Analysis, Part 1, 2^e édition, Madison (Wisconsin), ASA & SSSA, 1986, 1188 pages.
- GHUMAN, B.S., VERMA, S.M., PRIHAR, S.S. "Effect of Application rate, Initial Soil Wetness, and Redistribution Time on Salt Displacement by Water", <u>Soil Sci. Soc. Am. Proc.</u>, 39(1975) 7-10.
- JURY, W.A., GARDNER, W.R. and. GARDNER, W.H. Soil Physics, New York, John Wiley & Sons, 5^e édition, 1991, 328 pages.
- KLUTE, A. <u>Methods of soil Analysis</u>, Part 1, 2^e édition, Madison (Wisconsin), ASA & SSSA, 1986, 1188 pages.
- NIELSEN, D.R. & BIGGAR, J.W. "Miscible displacement: III. Theoretical considerations", Soil Sci. Soc. Am. Proc. 26(1962) 216-221.
- PADILLA, F., LAFRANCE, P., ROBERT, C., VILLENEUVE, J.P. "Modeling the transport and the fate of pesticides in the unsaturated zone considering temperature effects", <u>Ecological Modeling</u>, 44(1988) 73-88.
- PENDEXTER, W.S. & FURBISH, D.J. "Development of a heterogeneous moisture distribution and its influence on the evolution of preferred pathways of flow in an unsaturated sandy soil", in Gish, T.J. & Shirmohammadi, A. (éd) <u>Préférencial Flow: Proceedings of the National Symposium</u>, St-Joseph, MI, ASAE, 1991, 104-172.
- PICKENS, J.F. and GRISAK, G.E. "Scale-dependent dispersion in a stratified granular aquifer", <u>Water Res. Res.</u>, 17, 4(1981) 1191-1211.

- RICHARDS, L.A. "Capillary conduction of liquids through porous mediums", <u>Physics</u> 1, 5 (1931) 318-333.
- RICHTER, J. <u>The Soil as a Reactor</u>, Cremlingen-Destedt (West Germany), Catena Verlag, 1987, 192 pages.
- RICHTER, J. Models for Processes in the Soil, Cremlingen-Destedt (West Germany), Catena Verlag, 1990, 227 pages.
- TODD, D.K. <u>Ground water hydrology</u>, New York, John Wiley & Sons, 3^e édition, 1959, 336 pages.
- VAN GENUCHTEN, M. TH. & WIERENGA, P.J. "Mass transfer studies in sorbing porous media: I. Analytical solutions", <u>Soil Sci. Soc. Am. Proc.</u>, 40(1976) 473-480.
- VAN GENUCHTEN, M.TH. & WIERENGA, P.J. "Mass Transfert Studies in Sorbing Porous Media: II. Experimental Evaluation with Tritium (³H₂O)", <u>Soil Sci. Amer. J.</u>, 41(1977) 278-285.
- VILLERMAUX, J. & VAN SWAY, W.P.M. "Modèle représentatif de la distribution des temps de séjour dans un réacteur semi-infini à dispersion axiale avec zones stagnantes", <u>Chem. Eng. Sci.</u>, 24(1969) 1097-1111.
- VAN OMMEN, H.C. & al. "Experimental and theoretical analysis of solute transport from a diffuse source of pollution", <u>Journal of Hydrology</u>, 105(1989) 225-251.
- WIERENGA, P.J. & GENUCHTEN, TH. VAN. "Solute transport through small and large unsaturated soil colums", <u>Ground Water</u>, 27, 1(1989) 35-42.

ANNEXES

ANNEXE A

Granulométrie

#		Ouverture du tamis poids du matériel retenu (g)												
	Masse totale (g)	6.3 mm	4.0 mm	2.0 mm	1.0 mm	710 μm	500 μm	425 μm	250 μ m	180 μm	150 μm	125 μm	63 μm	53 μm
A	507.7	1.1	1.9	8.2	44.2	54.8	92.7	22.9	181.6	56.7	9.93	10.8	14.7	2.1
B	497.4	0.7	2.8	8.0	43.7	51.3	84.6	26.1	171.3	62.0	12.8	11.6	14.5	1.8
С	498.6	0.0	1.7	9.5	47.6	56.2	89.5	25.5	175.7	52.6	9.90	11.3	13.4	1.7
							Valeu	rs en %	6					
A	0.2	0.4	1.6	8.7	10.8	18.3	4.5	35.8	11.2	2.0	2.1	2.9	0.4	0.3
B	0.2	0.6	1.6	8.8	10.3	17.0	5.3	34.4	12.5	2.6	2.3	2.9	0.4	0.4
С	0.0	0.3	1.9	9.6	11.3	17.9	5.1	35.2	10.5	2.0	2.3	2.7	0.4	0.4
moyenne	0.1	0.4	1.7	9.0	10.8	17.7	5.0	35.2	11.4	2.2	2.2	2.8	0.4	0.4
% g-f	0.1	0.5	2.3	11.3	22.0	39.7	44.7	79.9	91.3	93.6	95.8	98.6	99.0	99.4

ANNEXE B

Calculs des caractéristiques physiques du sol

Masse de la colonne vide M_c	4.5 g
Masse de la colonne saturée M ₁	21.5 kg
Masse de la colonne égoutée M ₂	20.5 kg
Masse de la colonne sèche M3	17.0 g
Volume de sol v	8796.46 cm ³

B.1 Densité:
$$\rho_{matériel} = \frac{m_3 - m_c}{v} = 1.42 \text{ g/cm}^3$$

B.2 Porosité totale: $\eta_{totale} = \frac{m_1 - m_3}{v^* \rho_{eau}} = 51.2 \%$
B.3 Porosité gravitaire: $\eta_{efficace} = \frac{m_1 - m_2}{v^* \rho_{eau}} = 11.4 \%$
B.4 Capacité au champ: Cap. champ = $\eta_{totale} - \eta_{efficace} = 39.8\%$

B.5 Frange capillaire:

Masse de la colonne + assiette	(kg)
niveau eau à 28 cm	20.201
niveau eau à 23 cm	20.092
niveau eau à 18 cm	20.090
niveau eau à 13 cm	20.050
niveau eau à 8 cm	20.038

B.6 Conductivité hydraulique:

Essai	temps (min.)	Volume d'eau recueilli (ml)	K _{sat.} calculée (x10-3cm/s)
A (au début)	300	8795	1.09
B (après essai #4)	217	5250	0.90
C ₁ (après essai #5)	89	1830	0.76
C ₂ (après essai #5)	143	2980	0.77
C ₃ (après essai #5)	128	2790	0.81

B.7 Débit d'entrée:

Essai	Temps (min.)	Volume d'eau recueilli (ml)	Q _{entrée} (cm/j)		
1	180	3412	86.9		
2	308	3400	50.6		
3	419	1960	21.4		
4	480	1082	10.3		
5	182	4311	108.6		
6	405	1700	19.5		
7	505	845	7.7		
8	442	720	7.5		

ANNEXE C

CONCENTRATIONS EN [Br⁻] (ppm)

		Dispersivité (cm)									
Temps (jour)	Essai	α=0.05	α=0.1	α=0.2	α=0.3	α=0.4	α=0.5				
0	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2				
0.01	8.4	3.2887	4.1809	6.86	9.1638	10.9721	12.4121				
0.03	11.5	5.995	9.5056	13.523	15.8108	17.3479	18.4791				
0.04	8.8	11.5855	14.9976	18.1242	19.7894	20.8942	21.7066				
0.06	12	17.1294	19.2468	21.2541	22.3803	23.1534	23.7356				
0.07	18	21.521	22.3732	23.4724	24.1936	24.7246	25.1414				
0.08	18.5	24.7201	24.6658	25.1044	25.5291	25.8825	26.1778				
0.1	23	26.9704	26.3606	26.3414	26.5498	26.7713	26.9752				
0.11	25	28.5296	27.627	27.3015	27.3521	27.4742	27.6083				
0.13	39	29.6036	28.5835.	28.0608	27.9965	28.0431	28.1231				

Les valeurs de dispersivité sont exprimées en cm.

ANNEXE D

Essais en colonne

Temps	[Br]								
cumulatif	(ppm)	C/Co							
(min)			Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 6	Essai 7	Essai 8
0	1,55	0,04							0,04
0	0,75	0,03						0,03	
0	8,4	0,25					0,25		
5	2,3	0,07	0,07						
5									
10	2,1	0,06					0,06		
11	2,8	0,08	0,08						
14	5	0,15		0,15					
15	1,1	0,04						0,04	
15	2,8	0,08	0,08						
16	29	0,83			0,83		·····		
20	0,9	0,03					0,03		
20	2,6	0,07	0,07						
22	8,6	0,25		0,25					
24	3	0,09	0,09						
25									
29	7,2	0,21		0,21					
29	3	0,09	0,09						
30	1,3	0,04						0,04	
30	0,7	0,02					0,02		
33	2,8	0,08	0,08						
35									
37	7,8	0,23		0,23					
38	3	0,09	0,09						
40	0,64	0,02					0,02		
42	3,6	0,10	0,1						
43	34	0,97			0,97				
45	7,6	0,22		0,22					
46	3	0,09	0,09						
50	1,5	0,05						0,05	
50	2,8	0,08					0,08		
51	2,8	0,08	0,08						
53	8,2	0,24		0,24					
55									

56	2,7	0,08	0,08						
60	5	0,15					0,15		
61	7,8	0,23		0,23					
61	3,3	0,09	0,09						
65	4,2	0,13				0,13			
69	7,8	0,23		0,23					
69	36	1,03			1,03				
70	1,6	0,05						0,05	
71	3,8	0,11	0,11						
75	6	0,18					0,18		
77	7,8	0,23		0,23					
78	4,4	0,13	0,13						
80									
81	4,6	0,13	0,13						
85	6,6	0,2					0,2		
86	7,6	0,22		0,22					
86	5,2	0,15	0,15						
90									
91	5,2	0,15	0,15						
93	8,6	0,25		0,25					
95	7,2	0,22					0,22		
96	6	0,17	0,17			1			
97	38	1,09			1,09				1
100									
101	9	0,26		0,26					
102	7,2	0,21	0,21						
105	7,4	0,22					0,22		
106	5,8	0,18				0,18			
107	8,8	0,25	0,25						
110	6,8	0,20		0,2					
112	9,4	0,27	0,27						
115	1,4	0,05						0,05	
115	4,1	0,12				100 14 100 Erte 3	0,12		
117	11	0,31	0,31						
119	7,2	0,21		0,21					
120									
123	12	0,34	0,34						
125	6,2	0,19					0,19		
125	42	1,20			1,2				
128	7,2	0,21		0,21					
128	14	0,40	0,4						
130									
134	16	0,46	0,46						
135	6,2	0,19					0,19		
138	6,8	0,20		0,2					
140	1,15	0,04						0,04	
140	19	0,54	0,54						
143	8,6	0,27				0,27			

145	4,7	0,14							
145	19	0,54	0,54						
146	6,6	0,19		0,19					
150									
151	22	0,63	0,63						
155	6,2	0,19					0,19		
155	43	1,23			1,23				
156	7,6	0,22		0,22					
157	22	0,63	0,63						
160									
162	25	0,71	0,71						
165	6,5	0,2							
165	8,6	0,25		0,25					
166	2,1	0,06							0,06
168	27	0,77	0,77						
170									
174	29	0,83	0,83						
174	7,8	0,23		0,23					
175	1,4	0,05						0,05	
175	6,4	0,19					0,19		
180	30	0,86	0,86						
183	9	0,28				0,28			
184	7.8	0,23		0,23					
185	7	0,21					0,21		
186	45	1,29			1,29				
190									
191	2,4	0,07							0,07
192	9	0,26		0,26					
195	7,6	0,23					0,23		
200									
201	9	0,26		0,26					
205	1,4	0,05						0,05	
205	8,6	0,26					0,26		
210	10,5	0,31		0,31					
215	9,4	0,28					0,28		
216	48	1,37			1,37				
219	14	0,41		0,41					
220									
223	9	0,28				0,28			
225	2,6	0,07							0,07
225	10	0,3					0,3		
228	12	0,35		0,35			for the second sec		
230									
235	10,1	0,31					0,31		
235	3,5	0,1							0.1
238	16	0,47		0,47					
240									
245	1,5	0,05						0,05	
245	10,2	0.31				0,31			
-----	------	------	------------------------------------	------------------------	------	------	------	------	
247	15	0,44	0,44						
247	50	1,43		1.43		1	1	1	
250	3	0,08						0,08	
255	10,3	0,31				0,31			
262	18	0,53	0,53						
265	10,1	0,31				0,31		1	
266	8,6	0,27			0,27				
267	18,5	0,54	0,54						
273	3,7	0,1						0,1	
275	10,5	0,32				0,32			
277	20	0,59	0,59						
280	50	1,43		1,43					
285	10,7	0,32				0,32	1		
288	21	0,62	0,62						
290	0,62	0,02					0,02		
293	4,2	0,12						0,12	
295	10,7	0,32		- Come Strains and The		0,32	[
298	24	0,71	0,71				I		
305	10,9	0,33	11 AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA			0,33			
308	24,5	0,72	0,72						
308	9,6	0,3			0,3				
313	52	1,49		1,49					
315	11	0,33				0,33			
316	4,4	0,12						0,12	
325	11	0,33				0,33			
335	0,7	0,02				-	0,02		
335	11	0,33				0,33			
339	4,4	0,12						0,12	
345	11,1	0,34				0,34			
348	50	1,43		1,43					
351	9,6	0,3	-0-00000		0,3				
355	11,1	0,34				0,34			
361	4,6	0,13						0,13	
365	11,2	0,34				0,34			
375	11,3	0,34				0,34			
383	52	1,49		1,49					
385	4,8	0,13						0,13	
385	1,3	0,04							
385	11,3	0,34				0,34			
391	9	0,28			0,28				
395	11,4	0,35				0,35			
405	11,4	0,35				0,35			
411	5,2	0,14						0,14	
419	52	1,49		1,49					
437	7,6	0,24			0,24				
442	4,8	0,13						0,13	
445	1,3	0,04					0,04		

480	7,2	0,23	0,23		
505	1,8	0,06		0,06	

ANNEXE E

Temps (minutes) où C/Co=0.1, 0.25 ou 0.5 Rapport Rapport Vitesse Essai 0.1 0.25 0.5 des temps des temps (cm/j) (0.25/0.1)(0.5/0.25)294.0 1 65 107 138 1.29 1.6 2 10 165 257 16.5 157 1.56 49 210.2* 132 2.7 4 --429 5 0 20 94 4.7 6 53 202 3.8 138* --** ** 7 ** ** 8 270

CALCUL DES VITESSES D'ÉCOULEMENT DES ESSAIS EN COLONNE

* Vitesse évaluée pour un rapport $\frac{C/Co = 0.5}{C/Co = 0.25} = 1.43$ (moyenne de 1.29 et 1.56). Le rapport de 4.7 n'est pas considéré car il concerne un essai en conditions saturées.

** Ne peut être évalué.

ANNEXE F

Simulation #1:

Temps (jours)	Temps (minutes)	[Br-] (ppm) Sim	C/Co Sim
0,00	0	0,04	0,00
0,10	150	6,3	0,18
0,20	288	21,35	0,61
0,30	432	29,75	0,85
0,40	570	32,55	0,93
0,50	720	33,95	0,97
0,60	870	34,65	0,99
0,70	1008	34,84	0,99
0,80	1152	35,00	1,00
0,90	1290	35,00	1,00
1,00	1440	35,00	1,00
1,10	1590	35,00	1,00
1,20	1728	35,00	1,00
1,30	1872	35,00	1,00

ANNEXE G

Simulation #2:

Temps (jours)	Temps (minutes)	[Br-] (ppm) Sim	C/Co Sim
0,00	0	0,00	0,00
0,10	150	1,02	0,03
0,20	288	8,16	0,24
0,30	432	18,36	0,54
0,40	570	24,14	0,71
0,50	720	28,22	0,83
0,60	870	30,60	0,90
0,70	1008	31,62	0,93
0,80	1152	32,64	0,96
0,90	1290	32,98	0,97
1,00	1440	33,32	0,98
1,10	1590	33,66	0,99
1,20	1728	35,00	1,00
1,30	1872	35,00	1,00

ANNEXE H

Simulation #4:

Temps (jours)	Temps (minutes)	[Br-] (ppm) Sim	C/Co Sim
0,00	0	0,00	0,00
0,50	720	0,96	0,03
0,75	1080	4,16	0,13
1,00	1440	8,96	0,28
1,25	1800	13,76	0,43
1,50	2160	18,24	0,57
1,75	2520	21,44	0,67
2,00	2880	24,00	0,75
2,50	3600	27,52	0,86
3,00	4320	29,44	0,92
3,50	5040	30,72	0,96
4,00	5760	31,36	0,98
4,50	6480	31,68	0,99
5,00	7200	32,00	1,00

ANNEXE

Simulation #5:

Temps (jours)	Temps (minutes)	[Br-] (ppm) Sim	C/Co Sim
0,00	0	0,00	0,00
0,05	75	1,28	0,04
0,10	150	10,88	0,34
0,15	210	18,24	0,57
0,20	288	24,64	0,77
0,25	360	27,84	0,87
0,30	432	29,44	0,92
0,35	510	30,40	0,95
0,40	570	31,04	0,97
0,45	648	31,36	0,98
0,50	720	31,68	0,99
0,55	792	32,00	1,00
0,60	870	32,00	1,00
0,65	930	32,00	1,00

ANNEXE J

Simulation #6:

Temps (jours)	Temps (minutes)	[Br-] (ppm) Sim	C/Co Sim
0,00	0	0,00	0,00
0,25	360	0,70	0,02
0,50	720	8,40	0,24
0,75	1080	17,85	0,51
1,00	1440	24,50	0,70
1,25	1800	28,70	0,82
1,50	2160	31,15	0,89
1,75	2520	32,20	0,92
2,00	2880	33,25	0,95
2,25	3240	33,60	0,96
2,50	3600	33,95	0,97
2,75	3960	34,30	0,98
3,00	4320	34,65	0,99
3,25	4680	35,00	1,00

ANNEXE K

Simulation #7:

Temps (jours)	Temps (minutes)	[Br-] (ppm) Sim	C/Co Sim
0,00	0	0,00	0,00
0,50	720	0,33	0,01
1,00	1440	6,77	0,13
0,75	1080	2,43	0,08
1,50	2160	18,58	0,35
2,00	2880	29,52	0,56
2,50	3600	37,57	0,71
3,00	4320	42,99	0,81
3,50	5040	46,52	0,88
4,00	5760	48,82	0,92
4,50	6480	50,34	0,95
5,00	7200	51,39	0,97
6,00	8640	52,67	0,99
6,50	9360	53,09	1,00

ANNEXE L

Simulation #8:

Temps (jours)	Temps (minutes)	[Br-] (ppm) Sim	C/Co Sim
0,00	0	0,00	0,00
0,20	293	2,64	0,07
0,40	570	16,52	0,43
0,60	870	27,71	0,72
0,80	1152	33,03	0,85
1,00	1440	35,57	0,92
1,20	1728	36,87	0,95
1,40	2010	37,61	0,97
1,60	2310	38,08	0,98
1,80	2592	38,39	0,99
2,00	2880	38,59	1,00
2,20	3168	38,73	1,00