

Influence de la variabilité spatiale de la structure des sols cultivés sur les transferts de l'eau et de l'ion bromure

Y. Coquet⁽¹⁾, C. Desbourdes-Coutadeur⁽¹⁾, P. Vachier⁽¹⁾, J. Šimůnek⁽²⁾ et J. Roger-Estrade⁽³⁾

(1) INA P-G, UMR INAPG/INRA Environnement et Grandes Cultures, B.P. 01, 78850 THIVERVAL-GRIGNON, France

(2) George E. Brown, Jr. Salinity Laboratory, USDA-ARS, 450 West Big Springs Road, Riverside, CA 92507, USA

(3) INA P-G, UMR d'Agronomie INRA/INA P-G, B.P. 01, 78850 THIVERVAL-GRIGNON, France

RÉSUMÉ

L'équation de transport de l'eau de Darcy généralisée aux écoulements non saturés reste encore aujourd'hui à la base de la plupart des modèles décrivant le transport de l'eau et des solutés dans les sols agricoles. A l'échelle intra-parcellaire, il existe une hétérogénéité de la structure du sol qui est en relation avec les interventions culturales réalisées sur la parcelle. Nous avons mené une étude afin d'évaluer quel pouvait être l'impact de cette hétérogénéité sur les transferts d'eau et de soluté. Un traçage de l'eau à l'aide de l'anion bromure a été réalisé sous pluie simulée dans une parcelle cultivée incluant un labour d'automne et une reprise par hersage avant le semis au printemps. Les résultats du traçage montrent une forte hétérogénéité du front de migration du bromure qui peut être mise en relation avec la présence de mottes tassées provenant d'anciens passages de roues fragmentés et déplacés par le labour. Ces résultats montrent la forte dispersivité du sol cultivé, en relation avec sa structure issue du mode de travail du sol. Une modélisation déterministe bidimensionnelle du transport de l'eau et des solutés dans le sol étudié à l'aide du modèle HYDRUS-2D permet de rendre compte correctement des résultats observés.

Mots clés

Travail du sol, labour, infiltration, compactage, structure, modélisation

SUMMARY

INFLUENCE OF THE SPATIAL VARIABILITY OF TILLED SOIL STRUCTURE ON WATER AND BROMIDE TRANSPORT

The generalised Darcy equation is still today the basis of most models that describe water and solute transport in agricultural soils. At the field scale, soil structure is heterogeneous and largely determined by tillage practices. The study presented here aimed at understanding the effects of the heterogeneity created by tillage on water and solute transport.

Bromide was used to trace water infiltration under simulated rainfall in a cultivated plot that had been ploughed in Autumn and harrowed at the surface in Spring before sowing. Results show a large heterogeneity of the bromide migration front, which can be related to the presence of compacted clods within the ploughed layer of the soil. Such compacted clods were formerly located under ancient wheel tracks

and have been cut and displaced by the mouldboard plough. The cultivated soil that we studied had a large dispersivity, which could be related to its structure and the type of tillage. A deterministic two-dimensional model, HYDRUS-2D, was able to fairly reproduce the heterogeneous water and solute infiltration patterns observed in the field.

Key-words

Soil tillage, mouldboard ploughing, infiltration, compaction, structure, modelling.

RESUMEN

INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA ESTRUCTURA DE SUELOS CULTIVADOS SOBRE LA INFILTRACIÓN Y LA REDISTRIBUCIÓN DEL AGUA Y DE UN SOLUTO INERTE Y CONSERVATIVO, EL IÓN BROMURO. EXPERIMENTACIÓN EN UN SUELO LIMONO-ARCILLOSO Y MODELIZACIÓN

La ecuación de transporte del agua de Darcy generalizada a las circulaciones en medios no saturados esta a la base todavía de la mayor parte de los modelos describiendo el transporte del agua y de los solutos en los suelos agrícolas. A la escala intra-parcelar, existe una heterogeneidad de la estructura del suelo relacionada con las intervenciones culturales realizadas sobre la parcela. Hemos realizado un estudio para evaluar lo que podría ser el impacto de esta heterogeneidad sobre las transferencias de agua y de solutos. Un trazado del agua con el anión bromuro ha sido realizado bajo lluvia simulada en una parcela cultivada incluyendo una labranza de otoño y un gradeo antes de la siembra de primavera. Los resultados del trazado muestran una fuerte heterogeneidad del frente de migración del bromuro que puede relacionarse con la presencia de terrones comprimidos proviniendo de antiguos pasos de ruedas fragmentados y desplazados por la labranza. Estos resultados muestran la fuerte dispersividad del suelo cultivado en relación con su estructura proviniendo del modo de manejo del suelo. Una modelización determinista bidimensional del transporte de agua y de solutos en el suelo estudiado con el modelo HYDRUS-2D permite la descripción correcta de los resultados observados.

Palabras clave

Manejo del suelo, labranza, infiltración, compactación, estructura, modelización

Plusieurs études expérimentales ont montré que le transport de l'eau et des solutés dans les sols pouvait être très hétérogène (Flury *et al.*, 1994; Hammel *et al.*, 1999). Ceci est particulièrement vrai pour les sols cultivés (Petersen *et al.*, 1999) où le travail du sol et le tassement induit par la circulation des engins agricoles engendrent une forte variabilité spatiale de la structure et, partant, des conditions locales de circulation de l'eau (Roger-Estrade *et al.*, 2000). Ceci est particulièrement vrai lorsque l'itinéraire technique comprend un labour. Les variations de propriétés hydrodynamiques résultant de ces variations de la structure sont en particulier notables au voisinage de la saturation (Ankeny *et al.*, 1990; Coutadeur *et al.*, 2002). On peut dès lors s'interroger sur l'impact de ces variations d'état structural sur les phénomènes de transfert au sein du sol, et en particulier, sur l'infiltration des solutés vers la profondeur qui est un élément clé de l'évaluation du risque de contamination des eaux souterraines. L'objectif du travail présenté ici était de répondre à cette interrogation. Dans une première étape, nous avons étudié *in situ* l'infiltration de l'eau et d'un soluté inerte conservatif à l'échelle d'un profil cultural (3 m de largeur, creusé perpendiculairement au sens d'avancement du tracteur réalisant les façons culturales). Dans une seconde étape, nous avons caractérisé les propriétés hydriques du sol en distinguant les différents types de structure selon la méthode du profil cultural. Dans un troisième temps, nous avons utilisé ces caractérisations hydriques pour modéliser l'expérience d'infiltration *in situ* à l'aide d'un modèle de simulation du transport de l'eau et des solutés en 2 dimensions basé sur l'équation de Richards et l'équation de convection-dispersion.

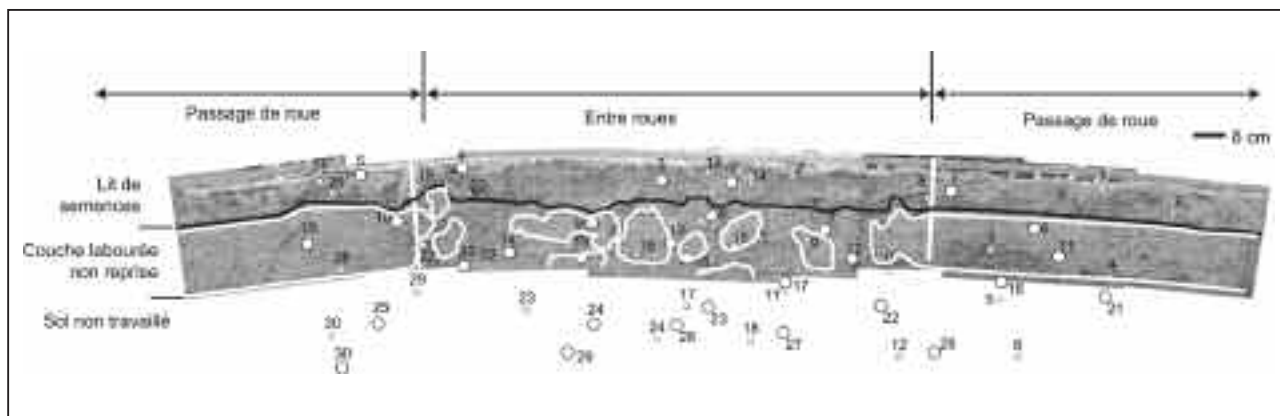
MATÉRIELS ET MÉTHODES

Expérimentation de terrain

Au sein d'une parcelle conduite depuis une dizaine d'années en monoculture de maïs du domaine expérimental INRA de Grignon (Yvelines), une surface de 4 m sur 2 m a été soumise à une pluie simulée de 21 mm/h pendant 4 h 20 min. Une fois un régime hydrodynamique permanent établi dans la couche de sol travaillée, une solution de KBr à la concentration de 0,85 g/L de Br⁻ a été appliquée pendant 2 h à une intensité de pluie de 26 mm/h. Le sol, limono-argileux de 90 cm de profondeur, avait été labouré à l'aide d'une charrue à 3 corps sur une profondeur de 30 cm en novembre. Ce labour d'hiver a été repris au printemps par deux passages de herse rotative sur une profondeur de 12 cm et une largeur de 3 m pour la préparation du lit de semences, avant l'expérimentation proprement dite. La structure créée par le travail du sol est illustrée par la *figure 1*, qui représente la couche labourée de cette parcelle. Au sein de la couche labourée non reprise par les façons superficielles (sous le lit de semences), on distingue deux zones compactées qui correspondent au passage des roues du tracteur tirant la herse rotative. Entre ces zones tassées sous les passages de roues, la structure du sol est hétérogène et présente des mottes tassées (entourées de lignes blanches sur la *figure 1*), appelées « mottes Δ » par Manichon (1982) résultant de zones tassées par d'anciens passages de roue puis fragmentées et déplacées par le labour, parmi des zones de sol macroporeuses (« mottes Γ ») et agrégats de taille inférieure à 2 cm).

Figure 1 - Profil cultural du sol montrant les différentes structures présentes dans la couche travaillée (le sol non travaillé n'apparaît pas sur la photo). Les zones tassées (Δ) sont délimitées par des lignes blanches. La localisation des sondes TDR (grands cercles) et des tensiomètres (petits carrés) est indiquée. La courbure de la photo est due à un effet de parallaxe non rectifié et ne représente pas la topographie (plane) de la parcelle.

Figure 1 - Tilled soil profile showing the various structures within the tilled layer (the untilled soil is not shown on the photograph). The compacted (Δ) zones are delimited by white lines. The location of TDRs (large circles) and tensiometers (small squares) are shown. The bending of the photograph is due to an uncorrected parallax effect and do not correspond to the (flat) topography of the field plot.



Les variations de l'infiltration et de la redistribution de l'eau dans le profil ont été analysées à partir de suivis tensiométriques (30 mini tensiomètres munis d'une bougie en céramique de 6 mm de diamètre et de 2 cm de long, modèle SMS2080S1 de SDEC) et de suivis de la teneur en eau volumique (sondes TDR de 20 cm de long, modèle 6005L2 de Soil Moisture, *figure 1*). Les mesures par sondes TDR reliées à une centrale d'acquisition TRASE ont tour à tour été enregistrées toutes les 11 minutes pendant la période d'infiltration (6 heures), puis à pas de temps croissant progressivement de 4 heures à 14 jours de juin à septembre. Les mesures tensiométriques ont été enregistrées manuellement par lecture sur des échelles à mercure aux mêmes dates que les mesures TDR. Les sondes et tensiomètres ont été installés horizontalement à partir d'une fosse creusée 30 cm en avant de la zone d'observation des états structuraux. Cette fosse a ensuite été rebouchée pour éviter toute perte d'eau par évaporation. Douze heures après la fin de l'infiltration, une fosse de 3 m de large sur 70 cm de profondeur a été ouverte à l'opposé de la fosse d'installation des TDR et tensiomètres et le sol échantillonné à l'aide de petits cylindres (4 cm de diamètre, 2 cm de long) tous les 4 ou 8 cm de distance (597 échantillons au total). La concentration résidente en bromure a ensuite été déterminée au laboratoire par HPLC. Pour faciliter la visualisation des résultats, une carte continue de la répartition du bromure a été dressée en interpolant par krigeage entre les valeurs mesurées en chacun des 597 points de mesure.

Caractérisation des propriétés hydriques du sol

Les caractéristiques hydriques du sol $\theta(h)$ et $K(h)$ ont été obtenues expérimentalement pour les 4 types de structure rencontrées dans le profil cultural, à savoir le lit de semences, le sol tassé (sous le passage de roues ou mottes Δ), le sol labouré non tassé (mottes Γ) et le sol non travaillé, de façon indépendante de l'expérimentation de terrain.

La conductivité hydraulique au voisinage de la saturation, entre les potentiels de l'eau -1 et 0 kPa, a été mesurée à l'aide d'un infiltromètre sous succion muni d'un disque de 8 cm de diamètre (Coutadeur *et al.*, 2002). Huit à neuf mesures par potentiel ont été réalisées pour le lit de semences, 15 à 18 pour le sol non travaillé et 7 à 9 pour la couche labourée non reprise localisée sous les passages de roues. Au sein de la couche labourée non reprise située entre les passages de roues, 6 à 8 mesures par potentiel ont été réalisées sur des mottes Γ et 1 à 3 mesures par potentiel sur des mottes Δ .

Les relations $\theta(h)$ et $K(h)$ ont été obtenues au laboratoire sur cylindres de sol de diamètre 20 cm et hauteur 7 cm par la méthode de Wind entre pF 1 et 3 (Bertuzzi *et al.*, 1999). Seulement une répétition, *i.e.* sur un seul cylindre, par type de structure a pu être réalisée. Des valeurs de K_s ont été mesurées sur cylindre (diamètre 20 cm, hauteur 7 cm) par la méthode de la charge constante. Là aussi, un seul cylindre a été prélevé par type de structure. Enfin,

des valeurs de θ ont été mesurées sur mottes provenant des différents types de structure pour différents potentiels de l'eau (pF 3, 3,5, 4 et 4,2) fixés par presses de Richards. Chaque valeur de teneur en eau est déterminée sur 12 mottes, en moyenne.

Les caractéristiques hydriques $\theta(h)$ et $K(h)$ ont été décrites par les fonctions analytiques de van Genuchten et Mualem :

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases}$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2$$

où θ_r et θ_s sont les teneurs en eau volumiques résiduelle et à saturation [$L^3 L^{-3}$], K_s est la conductivité hydraulique à saturation [LT^{-1}], α [L^{-1}] et n [-] sont des facteurs de forme, $m = 1 - 1/n$, S_e est le taux de saturation en eau de la porosité du sol [-], et l est un paramètre relié à la connectivité de l'espace poral du sol ayant une valeur de 0,5 pour de nombreux sols. Les caractéristiques $\theta(h)$ et $K(h)$ ont été simultanément ajustées aux données expérimentales à l'aide du logiciel RETC (van Genuchten *et al.*, 1991) avec d'une part pour la rétention en eau les données obtenues par la méthode de Wind, celles obtenues par les presses de Richards et la teneur en eau à saturation mesurée sur le terrain sous l'infiltromètre, d'autre part pour la conductivité hydraulique les données obtenues par infiltrométrie, celles obtenues par la méthode de Wind et la conductivité hydraulique à saturation obtenue par la méthode de la charge constante.

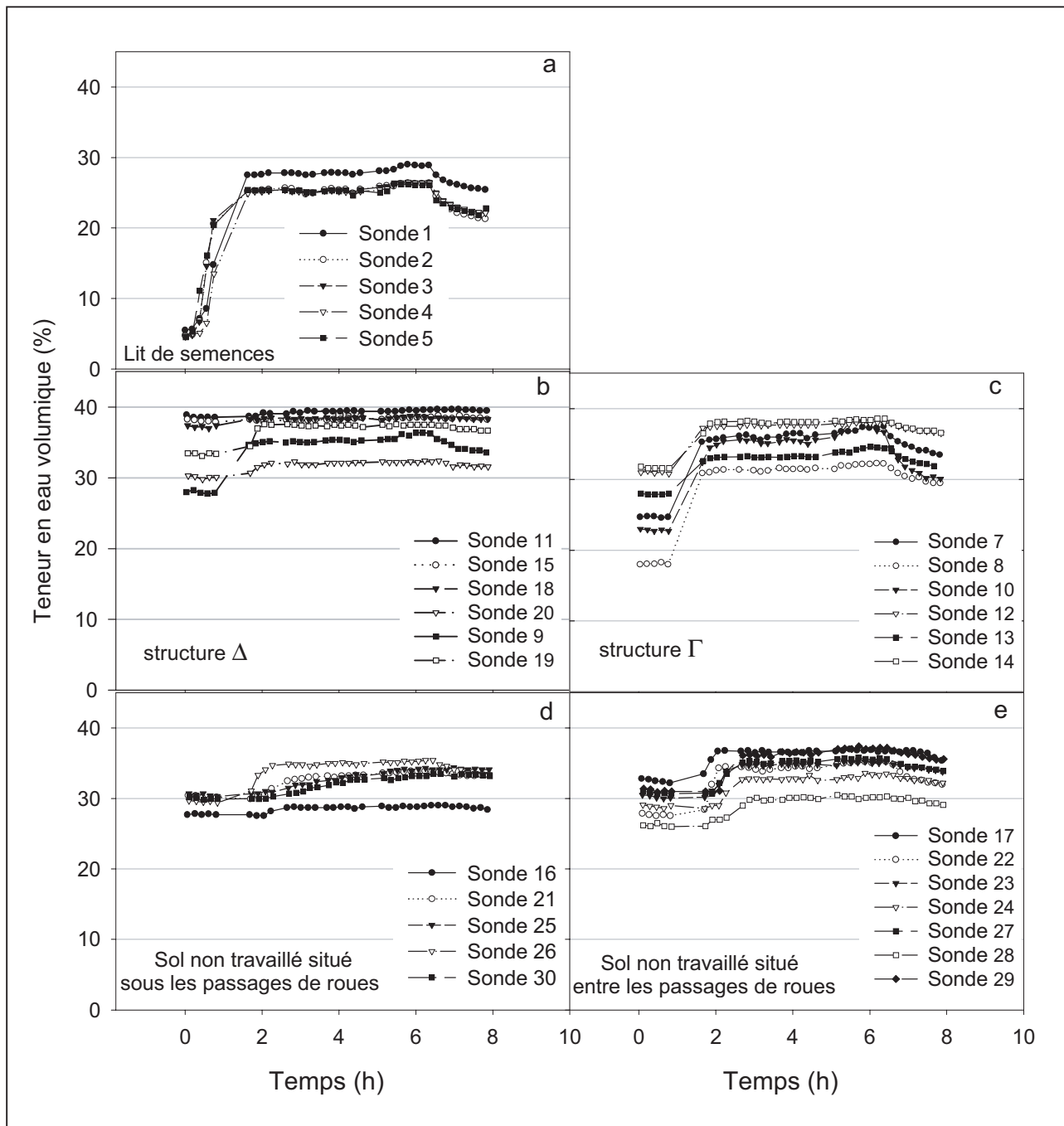
La caractéristique de rétention $\theta(h)$ obtenue a été aussi comparée à celle établie *in situ* à partir des mesures de θ par sondes TDR et de h par tensiométrie. Pour établir la caractéristique $\theta(h)$ au champ, nous avons fait correspondre à chaque sonde TDR le tensiomètre le plus proche à condition que la sonde TDR et le tensiomètre soient situés dans la même structure de sol (même zone Γ ou même zone Δ , en particulier).

Modélisation

L'expérimentation décrite ci-dessus a été simulée à l'aide du modèle bidimensionnel HYDRUS-2D (Simunek *et al.*, 1999). Ce modèle décrit le transport de l'eau et des solutés en résolvant numériquement par la méthode des éléments finis l'équation de Richards et l'équation de convection-dispersion. À l'aide d'un maillage triangulaire paramétré par l'utilisateur, on peut définir, dans le plan 2D vertical, des régions présentant des propriétés hydriques différentes. Nous l'avons fait pour simuler les résultats de cette expérimentation en reproduisant, grâce à un maillage de 16 145 éléments, la géométrie des zones Δ et Γ observée sur le terrain. Les flux d'eau et le transport du soluté ont été décrits dans un domaine correspondant à un rectangle de 300 x 100 cm, centré sur l'axe du tracteur tirant la herse rotative. Les conditions initiales ont été fixées en prenant la moyenne des valeurs de potentiel mesurées par niveau de profondeur.

Figure 2 - Mesure de la teneur en eau volumique du sol par les sondes TDR pendant l'infiltration.

Figure 2 - Volumetric water content measurements by TDR probes during infiltration.



La pression initiale variait ainsi linéairement de -50 kPa sous le fond de labour à -22,5 kPa en surface. Les conditions aux limites fixées comprenaient un flux variable en surface (reproduisant les conditions de la pluie simulée), une concentration nulle de soluté au départ, un drainage libre en profondeur et l'absence de flux latéraux. La dispersivité longitudinale a été prise égale à 5 cm,

la dispersivité latérale étant 10 fois plus faible. L'ordre de grandeur pour la dispersivité longitudinale des sols varie typiquement entre 0,5 et 2 cm pour des colonnes de sol remaniées, et entre 5 et 20 cm *in situ* (Jury *et al.*, 1991 ; Warrick, 2003). Les études de terrain sur les relations entre dispersivités longitudinale et transversale sont rares. Le rapport entre ces deux grandeurs varie

généralement entre 6 et 20 (Fetter, 1979). Enfin, la valeur de diffusion moléculaire retenue pour l'anion bromure était égale à $0,0675 \text{ cm}^2 \text{ h}^{-1}$.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dynamique de l'eau et du bromure

Les sondes TDR localisées dans le lit de semence réagissent très rapidement, moins d'une heure après le début de l'infiltration (*figure 2a*). La teneur en eau se stabilise en régime permanent à une valeur d'environ $0,26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, valeur qui augmente légèrement lorsque l'on passe d'une intensité de pluie de 21 à 26 mm/h. Les sondes TDR localisées dans l'horizon situé sous le lit de semences ont réagi très différemment en fonction de leur localisation dans le profil. Les sondes situées sous les passages de roues ont à peine réagi à l'infiltration (*figure 2b*, sondes 11 et 15). De même, parmi les sondes situées entre les roues, le comportement a varié suivant qu'elles se situaient dans des zones Δ ou dans des parties macroporeuses (mottes Γ et terre fine) du sol. Les premières ont peu réagi à l'infiltration (*figure 2b*, sondes 9, 18, 19 et 20), les secondes au contraire ont indiqué une augmentation sensible de la teneur en eau entre 1 et 2 heures après le début de l'infiltration (*figure 2c*). Par conséquent, le front d'infiltration apparaît à différentes dates dans la partie du profil située sous le fond de labour, à partir de 2 heures après le début de l'infiltration. Dans cette zone, certaines sondes, situées à une dizaine de cm sous le fond du labour et au droit des passages de roue, ont réagi très lentement, mais ont toutefois montré une augmentation très progressive de la teneur en eau tout au long de l'expérience (*figure 2d*). Cette augmentation est peut-être due à une diffusion latérale de l'eau qui s'est infiltrée dans la partie du profil située entre les roues. Ces différences de comportement entre états structuraux et la dynamique du front d'infiltration qui en a résulté ont été confirmées par les résultats obtenus à l'aide des tensiomètres.

La carte des concentrations en bromure mesurées 12 heures après la fin de l'infiltration (*figure 3b*) montre une très forte hétérogénéité du front d'infiltration. On constate que le bromure n'a quasiment pas pénétré le sol tassé sous les passages de roue, tandis qu'il a atteint la profondeur maximale d'échantillonnage (64 cm) entre les passages de roue au voisinage immédiat de ceux-ci. La répartition du bromure est très hétérogène entre les passages de roue. Ceci est dû à la présence au sein de la couche labourée des mottes tassées (Δ) dont la faible conductivité hydraulique force l'eau d'infiltration à les contourner exerçant sur le flux d'eau un effet comparable à celui d'un parapluie. Ainsi, en observant, dans l'encart de la *figure 3*, la motte localisée à $x = 120 \text{ cm}$, on constate que la concentration en bromure est plus faible dans la motte Δ elle-même, mais également en dessous. Ainsi, la variabilité spatiale de la concentration en bromure se conserve une fois franchi le fond de labour, lorsque la solution pénètre dans l'horizon non travaillé dont la structure est,

à l'opposé de celle des horizons travaillés, peu variable dans l'espace. Sous les passages de roue, on observe une concentration beaucoup plus homogène, mais qui présente toutefois quelques irrégularités : c'est le cas par exemple sous la roue droite de la *figure 3*, aux alentours de la cote $x = 260$. Or cette zone correspond exactement à la partie du profil située sous l'espace (d'une dizaine de cm) compris entre la roue du tracteur et la roue jumelée. A cet endroit, la pression appliquée au sol par les pneumatiques est plus faible et le tassement moins intense.

Compte tenu du rôle important des zones tassées non seulement sous les passages de roues mais aussi entre les passages de roues, la dynamique de l'eau et du bromure dans le sol travaillé a été modélisée en utilisant un modèle 2-D prenant en compte explicitement l'hétérogénéité spatiale de la structure du sol.

Propriétés hydriques

Les caractéristiques hydriques du sol ont été déterminées pour les quatre types de structure reconnus par la méthode du profil cultural : le lit de semences, les zones tassées (Δ) de la couche labourée non reprise par les façons superficielles, les zones non tassées (Γ) de cette même couche et le sol non travaillé. En effet, Desbourdes-Coutadeur (2002) a pu montrer que les caractéristiques hydriques $\theta(h)$ et $K(h)$ des zones Δ situées sous les passages de roues et celles des zones Δ situées entre les passages de roue n'étaient pas significativement différentes.

Les fonctions analytiques de Mualem-van Genuchten ont été ajustées, pour chacune des quatre structures, aux données de Wind et des presses de Richards, y compris la teneur en eau à saturation mesurée *in situ* sous l'infiltromètre, pour la rétention, et aux données de Wind, d'infiltrométrie, et de conductivité hydraulique à saturation, pour la conductivité hydraulique (*figure 4*). Les valeurs obtenues pour les différents paramètres sont indiquées dans le *tableau 1*. Toutefois, un certain nombre de paramètres ont dû être modifiés afin de pouvoir rendre compte de la dynamique de l'eau et du bromure effectivement mesurée sur le terrain.

En premier lieu, nous avons pu observer un décalage entre les caractéristiques de rétention mesurées au laboratoire et celles mesurées *in situ* à l'aide des sondes TDR et des tensiomètres, en particulier pour le lit de semences (*figure 5*). Nous avons vu en effet que la teneur en eau volumique du lit de semences ne dépassait pas $0,29 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ lors de l'infiltration (*figure 2a*), ce qui est très nettement inférieur à la teneur en eau à saturation estimée par la méthode de Wind ($0,42 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Une telle différence est vraisemblablement due à la difficulté d'échantillonner un lit de semences frais à l'aide d'un cylindre sans en perturber la structure. Afin de pouvoir rendre compte de l'évolution de la teneur en eau du lit de semences et de la vitesse de migration du bromure dans celui-ci, il a donc été nécessaire de modifier les paramètres de la rétention θ_r , θ_s et n (*tableau 1*). Seul θ_s a dû être légèrement modifié pour les autres structures afin de mieux rendre compte des valeurs de teneur en eau mesurées *in situ*. De plus, la valeur de K_s du sol tassé a été diminuée de 4 cm h^{-1} à $0,1 \text{ cm h}^{-1}$ afin de pouvoir entraîner la formation

Figure 3 - Profil cultural du sol et concentrations en bromure. (a) profil cultural, (b) carte des concentrations en bromure mesurées, (c) carte de concentrations en bromure simulées à l'aide d'HYDRUS-2D.

Figure 3 - Tilled soil profile and bromide concentrations. (a) tilled soil profile, (b) map of the measured bromide concentrations, (c) map of the bromide concentrations simulated by using HYDRUS-2D.

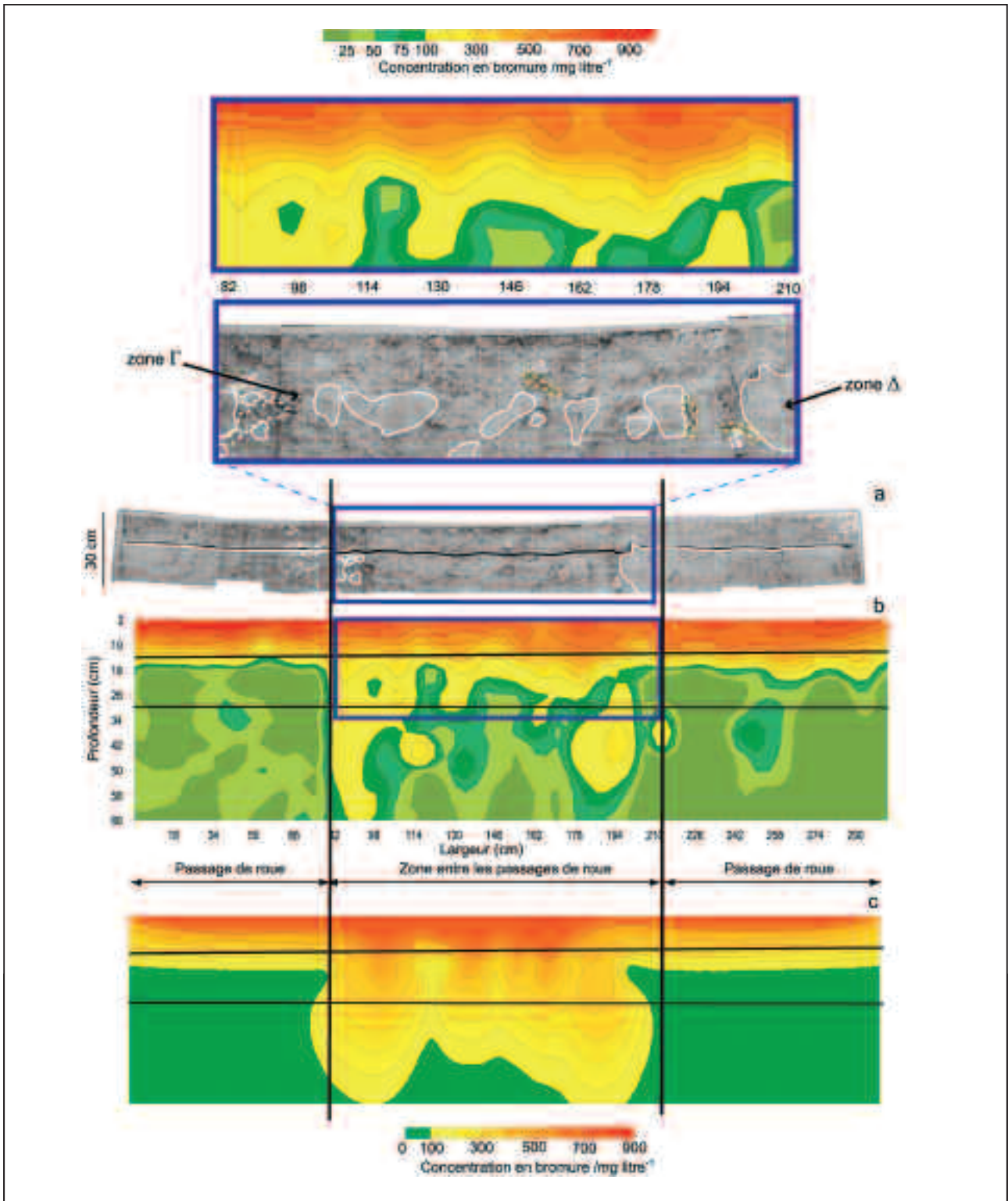


Tableau 1 - Paramètres hydrodynamiques des différents états structuraux. Les valeurs des paramètres modifiées figurent en italique et leurs valeurs originales sont indiquées entre parenthèses.

Table 1 - Hydraulic parameters of the various soil structures. The modified parameter values are shown in italics and their original values are in parenthesis.

Structure	θ_r (cm^{-1})	θ_s	α	n	K_s (cm^{-1})
Lit de semences	<i>0,02 (0,06)</i>	<i>0,30 (0,42)</i>	0,104	<i>1,60 (1,18)</i>	42,2
Mottes Γ	0,00	<i>0,38 (0,44)</i>	0,0752	1,12	24,4
Mottes Δ et passages de roue	0,00	<i>0,39 (0,40)</i>	0,0287	1,11	<i>0,1 (4,09)</i>
Sol non travaillé	0,06	<i>0,38 (0,42)</i>	0,107	1,14	29,6

dans le profil de zones de saturation, nécessaires à la reproduction de l'hétérogénéité du front d'infiltration de l'eau et du bromure dans le sol. Les valeurs originales des paramètres modifiés figurent entre parenthèses dans le *tableau 1*.

Modélisation

Lorsque l'on utilise les paramètres hydriques obtenus de façon indépendante de l'expérimentation de terrain, il n'est pas possible de rendre compte convenablement de la dynamique d'infiltration de l'eau et des solutés à l'aide d'HYDRUS-2D (*figure 6*). La profondeur de pénétration est peu affectée par la présence des zones tassées. L'eau qui s'infiltre pénètre dans les zones tassées alors que ce n'est pas ce qui est observé *in situ*. En revanche, lorsque l'on utilise le jeu de paramètres modifiés (*tableau 1*), il est alors possible de rendre compte correctement des phénomènes observés : faible infiltration sous les passages de roue, redirection des flux d'eau et de solutés vers les zones adjacentes aux passages de roue, effet « parapluie » des mottes Δ dans la couche labourée, temps d'arrivée du front d'infiltration dans les différentes parties du profil (*figure 3*). Le développement des écoulements préférentiels le long des passages de roue est particulièrement sensible à la valeur de K_s des zones tassées. Il est en effet nécessaire que cette valeur soit inférieure au flux d'infiltration apporté à la surface du sol (ici 21 à 26 mm h⁻¹). En revanche, la simulation des écoulements préférentiels autour des zones Δ est relativement peu sensible aux valeurs de dispersivités.

Si l'approche de modélisation 2D que nous proposons permet de bien rendre compte des phénomènes observés de façon qualitative ainsi que l'on peut s'en rendre compte en comparant les parties b et c de la *figure 3*, on constate que l'ensemble des profils de concentration n'est pas toujours correctement décrit (*figure 7*, à $x = 90$ ou $x = 146$ cm, par exemple). Plusieurs raisons permettent d'expliquer ce constat. Tout d'abord, malgré l'avantage d'un maillage non structuré dans HYDRUS-2D qui permet de s'adapter à toute géométrie, il n'a pas été possible de multiplier le nombre d'éléments finis comp-

te tenu de la taille du domaine de simulation et de nos ressources de calcul limitées. Donc la description géométrique des mottes Δ dans l'entre roues reste une approximation. De plus, il reste une incertitude de quelques centimètres entre la position en x, z des échantillons prélevés pour l'analyse des concentrations en bromure et celle des structures du profil cultural enregistrée par dessin et photos. Enfin, la modélisation réalisée reste bidimensionnelle, tandis que les mottes Δ localisées dans l'entre roues, issues de passages de roues anciens, fragmentées et déplacées, ont une taille limitée dans les 3 dimensions de l'espace. L'acquisition de cette 3^e dimension reste difficile à l'aide de techniques destructives. Cependant, l'utilisation de méthodes géophysiques (Michot *et al.*, 2001) devrait pouvoir permettre cette acquisition.

Les résultats présentés montrent qu'il est possible, par une approche purement déterministe, de rendre compte de l'hétérogénéité du transport de l'eau et des solutés dans ce sol labouré. Le plus souvent, ce type de modélisation relève d'une approche stochastique (Roth *et al.*, 1991; Feyen *et al.*, 1998), les modélisateurs faisant varier aléatoirement les propriétés hydriques (sur la base de leur moyenne, leur variance...). Lorsque la modélisation est déterministe, ce sont les propriétés des horizons successifs qui varient, chaque horizon étant lui-même considéré comme étant homogène. Ces résultats sont donc encourageants quant à la possibilité de relier les pratiques culturales aux risques de pollution des nappes d'eau souterraines, via l'hétérogénéité de la structure qu'elles engendrent. En particulier, comme les observations de terrain, ils soulignent l'importance de l'effet sur les transferts des zones et mottes Δ , de faible conductivité hydraulique. La proportion de ces zones (proportion qui peut par ailleurs être utilisée comme un révélateur de l'effet à moyen et long terme des systèmes de cultures sur le sol, (Roger-Estrade *et al.*, 2004, dans ce volume) est très variable entre systèmes de culture, dépendant beaucoup des types d'opérations pratiquées, de la nature des équipements employés et du calendrier des interventions.

Figure 4 - Propriétés hydriques du sol (rétention en haut - conductivité hydraulique en bas) pour les 4 structures identifiées par le profil cultural : a) lit de semences, b) structure Γ , c) structure Δ , d) sol non travaillé. Les données sont issues de l'infiltrométrie sous succion (Δ), de la méthode de Wind (\diamond), de la méthode à charge constante (\square) et des presses de Richards (\circ). Les courbes représentent l'ajustement des fonctions de Mualem-van Genuchten. Les valeurs de θ_s et K_s ont été placées à $pF = -1$ et -2 , respectivement.

Figure 4 - Soil hydraulic properties (retention at the top – hydraulic conductivity at the bottom) of the 4 structures identified within the tilled soil profile : a) seed bed, b) Γ structure, c) Δ structure, d) untilled soil. The data were generated by using tension infiltrometry (Δ), the Wind method (\diamond), constant head method (\square) and the Richards pressure plates (\circ). The lines show the Mualem-van Genuchten functions fitted to the data. The θ_s and K_s values have been placed at $pF = -1$ and -2 , respectively.

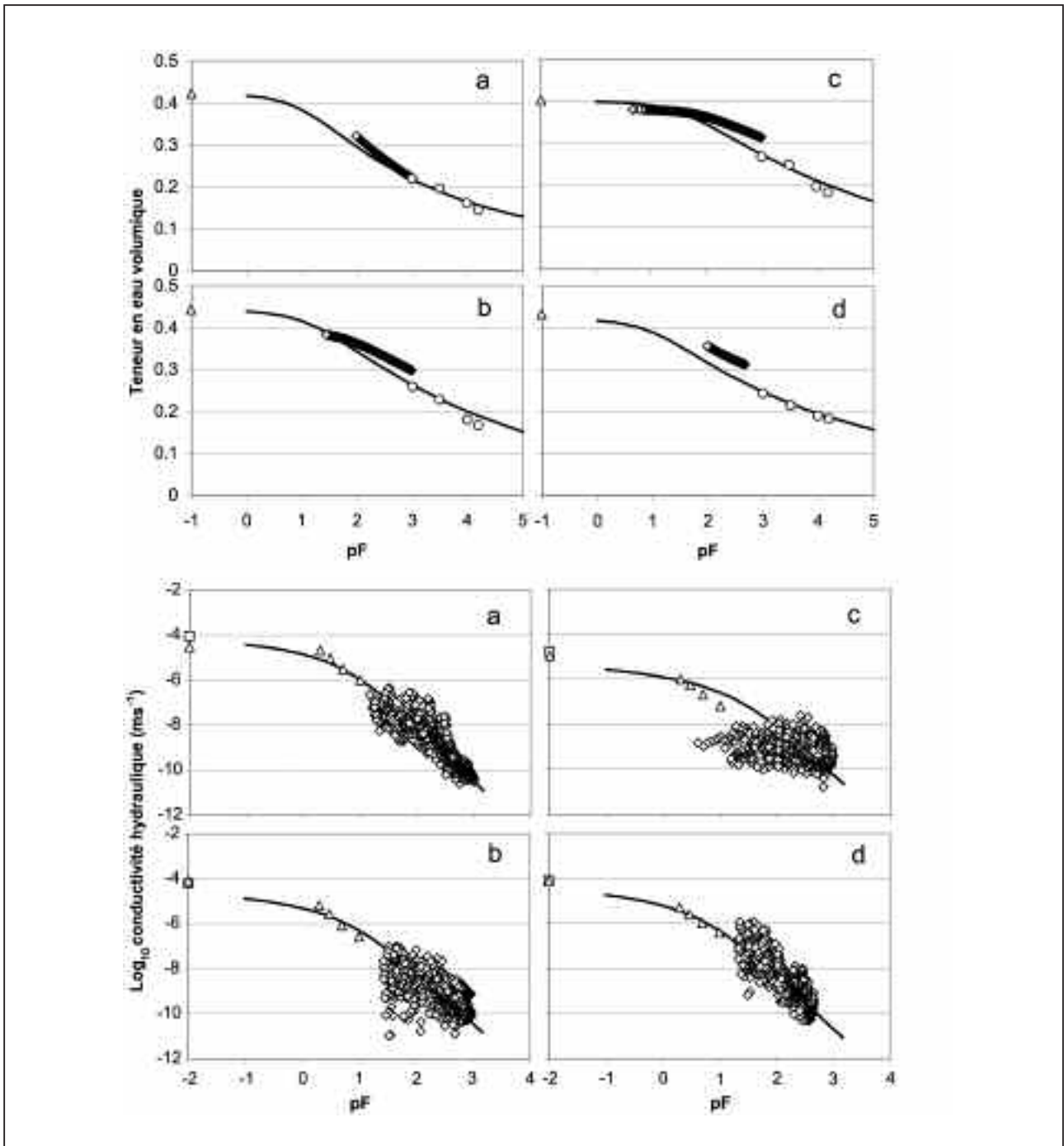


Figure 5 - Caractéristique de rétention du lit de semences.
Ligne continue : fonction de van Genuchten ajustée aux données de laboratoire (cf. figure 4a) ; points : mesures *in situ* à l'aide de sondes TDR et de tensiomètres.

Figure 5 - Retention characteristics of the seed bed.
Continuous line : van Genuchten function fitted to laboratory data (see figure 4a) ; points : *in situ* measurements taken by TDR probes and tensiometers.

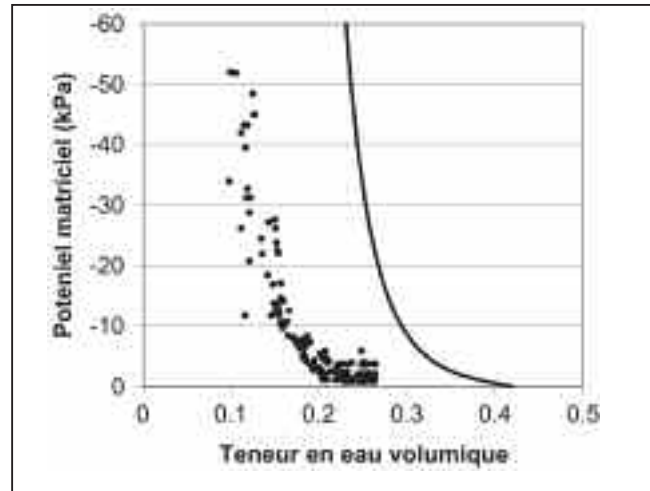


Figure 6 - Concentrations en bromure mesurées (a) et simulées à l'aide d'HYDRUS-2D en utilisant directement les paramètres hydrodynamiques obtenus de façon indépendante (b).

Figure 6 - Bromide concentrations measured (a) and simulated using HYDRUS-2D and the hydraulic parameters obtained independently from the field experiment (b).

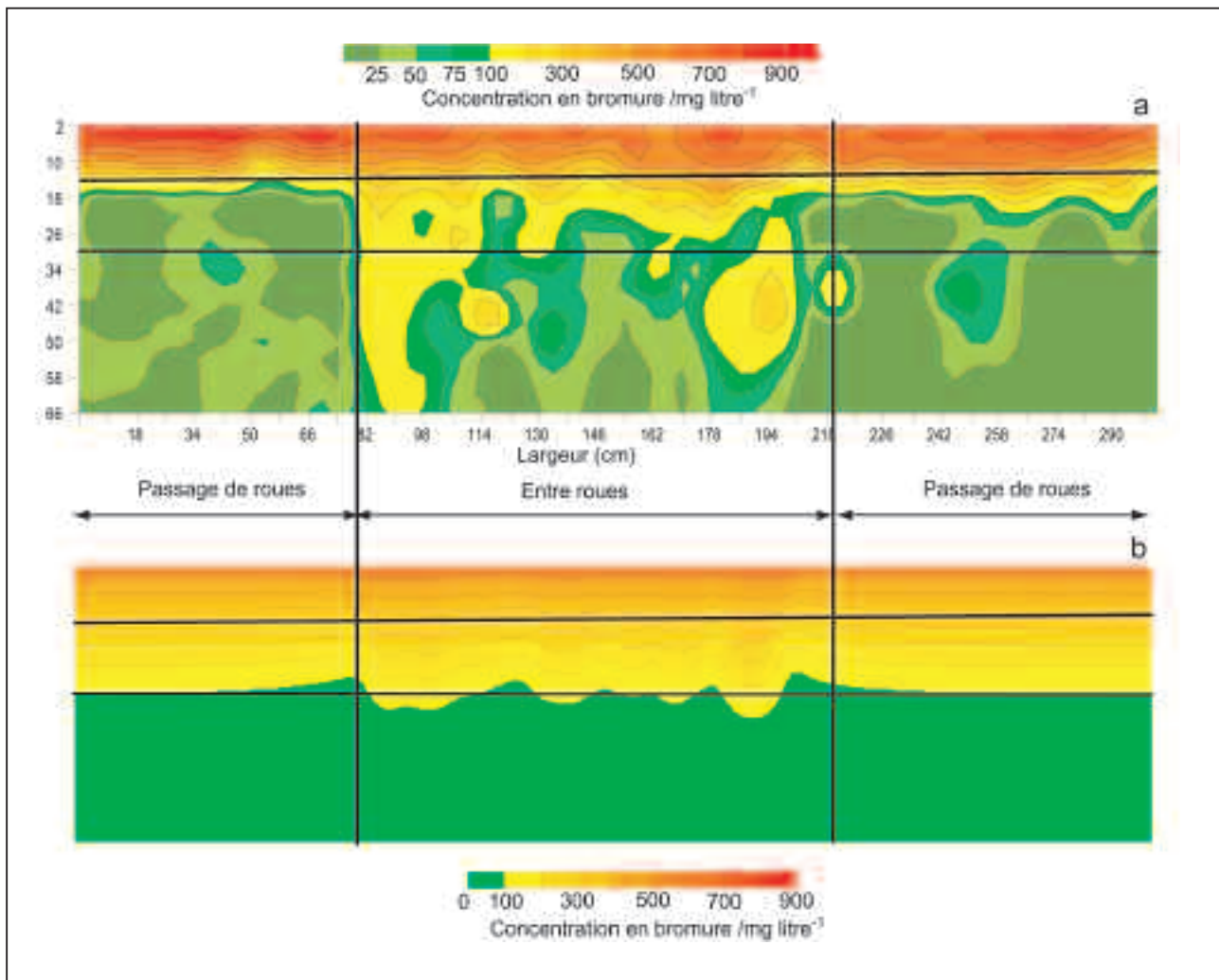
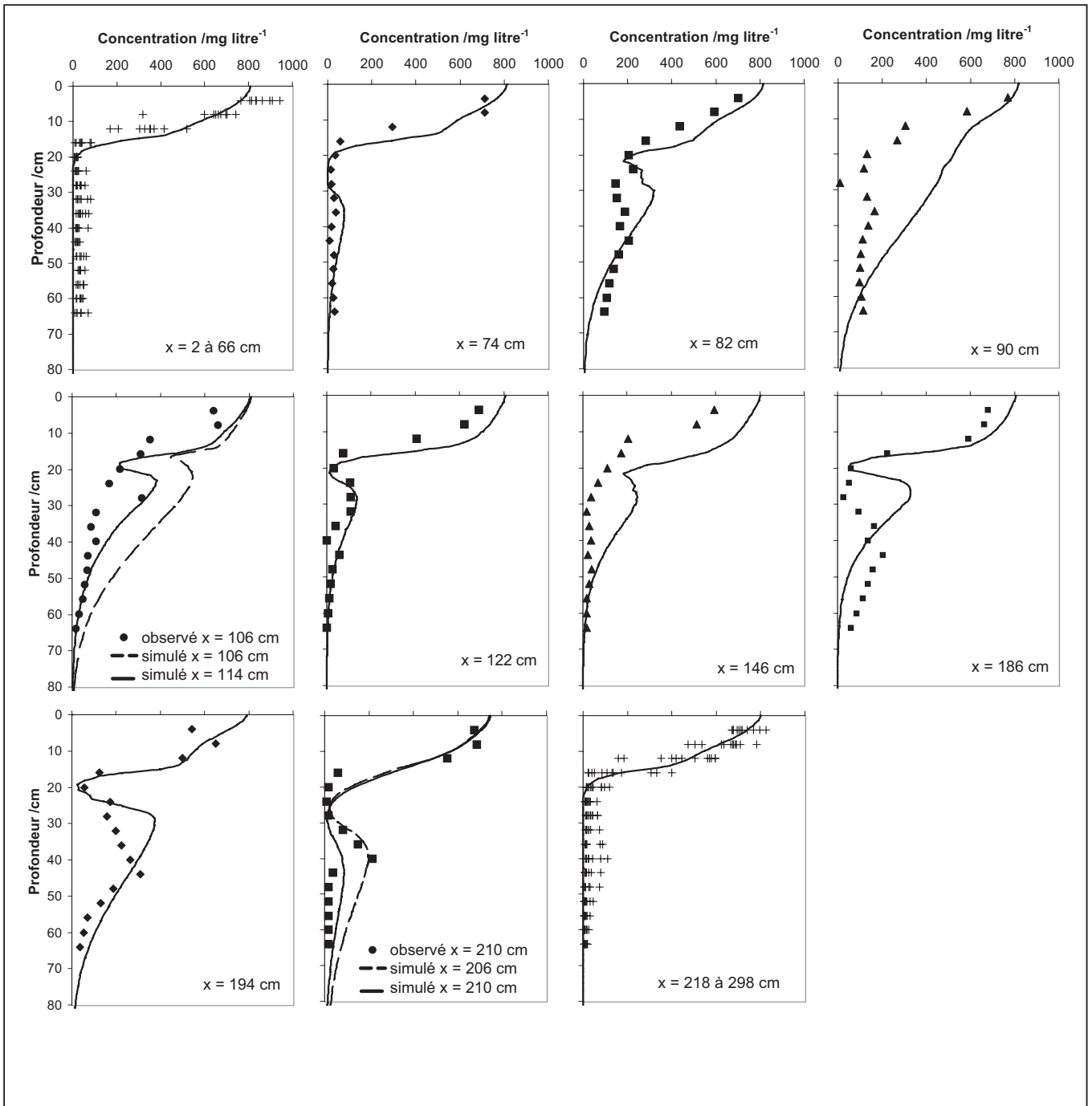


Figure 7 - Profils de concentration en bromure mesurés, comparés aux profils simulés à l'aide d'HYDRUS-2D et en utilisant les paramètres hydriques modifiés (tableau 1).

Figure 7 - Measured bromide concentration profiles compared to profiles simulated using HYDRUS-2D and the modified hydraulic parameters (table 1).



CONCLUSION

Les résultats de cette expérimentation mettent en évidence l'importance de l'hétérogénéité de la structure du sol induite par les passages d'engins et le travail du sol sur les transferts d'eau et de soluté. La vitesse d'infiltration est principalement contrôlée par la présence de zones fortement tassées, non seulement localisées sous les passages de roues mais également dans la partie du profil située entre ces passages. La présence de blocs tassés dans cette zone tient à la persistance des états internes Δ créés lors des cultures précédentes. Dans le type de sol limoneux argileux sur lequel l'expérimentation a été conduite, ces états peuvent perdurer plusieurs années. Ces résultats montrent également que la variabilité dans l'espace des transferts qui se crée dans la partie travaillée du profil persiste lorsque l'eau atteint les horizons situés sous le fond de labour, dont la structure est homogène : cela suggère de prendre en compte la variabilité spatiale de la structure pour évaluer les risques de lixiviation sous les parcelles agricoles.

Les essais de modélisation reproduisent les différences de fonctionnement hydrique entre les zones poreuses et les zones tassées, ce qui devrait permettre à terme de tester les conséquences de conditions climatiques particulières (orages...) ou de différents états structuraux du profil (quantités plus ou moins importantes de zones tassées) correspondant à différents systèmes de culture. Enfin, il faut souligner que la forte variabilité spatiale de l'infiltration telle que nous l'avons observée dans notre expérience est souvent attribuée à l'existence de transports préférentiels dans le sol dus à la présence soit de macropores, soit d'une fraction d'eau immobile dans la porosité du sol. Nous montrons que le transport préférentiel observé peut être décrit de façon déterministe en utilisant l'équation classique de convection-dispersion et sur la base d'une description explicite et géométrique de la variabilité de la structure telle qu'on peut l'observer sur le terrain par la méthode du profil cultural.

BIBLIOGRAPHIE

- Ankeny M.D., Kaspar T.C. et Horton R., 1990 - Characterization of tillage and traffic effects on unconfined infiltration measurements, *Soil Science Society of America Journal*, pp. 54, 837-840.
- Bertuzzi, P., Morath, D., Bruckler, L., Gaudu, J.C. et Bourlet M., 1999 - Wind's evaporation method : experimental equipment and error analysis. *In* : Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media. Part 1., Eds M.Th. van Genuchten, F.J. Leij et L. Wu, University of California, Riverside, CA, pp. 323-328.
- Coutadeur C., Coquet Y. et Roger-Estrade J., 2002 - Variation of hydraulic conductivity in a tilled soil, *European Journal of Soil Science*, 53, pp. 619-628.
- Desbourdes-Coutadeur C., 2002 - Etude du transport de l'eau dans un sol labouré. Modélisation 2-D de l'infiltration et de la redistribution dans un sol à structure hétérogène. Thèse de doctorat de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris.
- Fetter C.W., 1979. *Contaminant hydrogeology*. MacMillan Publ. Co., New York.
- Feyen J., Jacques D., Timmerman A. et Vanderborght J. 1998 - Modelling water flow and solute transport in heterogeneous soils : a review of recent approaches. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 70, pp. 231-256.
- Flury M., Flüher H., Jury W.A. et Leuenberger J., 1994 - Susceptibility of soils to preferential flow of water : A field study, *Water resources research*, 30, pp. 1945-1954.
- Hammel K., Gross J., Wessolek G. et Roth K., 1999 - Two-dimensional simulation of bromide transport in a heterogeneous field soil with transient unsaturated flow. *European journal of soil science*, 50, pp. 633-647.
- Jury W.A., Gardner W.R., Gardner W.H., 1991 - *Soil physics*. John Wiley & Sons, Inc.
- Manichon H., 1982 - Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse de doctorat de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, INAPG, Paris.
- Michot D., Dorigny A., Benderitter Y., 2001 - Mise en évidence par résistivité électrique des écoulements préférentiels et de l'assèchement par le maïs d'un Calciol de Beauce irrigué. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série IIA*, 332, pp. 29-36.
- Petersen C.T., Hansen S. et Jensen H.E., 1999 - Depth distribution of preferential flow patterns in a sandy loam soil as affected by tillage. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4, pp. 769-776.
- Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H., Boiffin J., Caneill J. et Manichon H., 2000 - Modelling structural changes in tilled topsoil over time as a function of cropping systems. *European Journal of Soil Science*, 51, pp. 455-474.
- Roth K., Jury W.A., Flüher H. et Attinger W., 1991 - Transport of chloride through an unsaturated field soil. *Water Resources Research*, 27, pp. 2533-2541.
- Šimůnek J., Šejna M. et van Genuchten M. Th., 1999 - The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 2.0, IGWMC -TPS-53, Colorado School of Mines, Golden, CO.
- van Genuchten M. Th., Leij F. J. et Yates S. R., 1991 - The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. EPA/600/2-91-065, US EPA, Office of Research and Development, Washington, DC.
- Warrick A.W., 2003 - *Soil water dynamics*. Oxford University Press.

PUBLICATIONS ET DOCUMENTS PUBLIÉS PAR L'AFES

REVUES

SCIENCE DU SOL

Revue scientifique publiée de 1952 à 1993.
Elle comporte 300 à 400 pages par an. Un index est présenté tous les ans dans le quatrième numéro.
A cessé de paraître fin 1993. Certains numéros disponibles.

LA LETTRE DE L'ASSOCIATION

Publiée quatre fois par an, ce journal annonce les nouvelles de l'association, les réunions nationales et internationales ; il donne des critiques d'ouvrages, de thèses, de la documentation, etc.

La Lettre est envoyée à chaque adhérent de l'association : elle accompagne l'adhésion.

Rédacteur en chef : J.P. Rossignol, ENITH, Angers.

ÉTUDE ET GESTION DES SOLS

Revue trimestrielle, francophone traitant de la connaissance et de l'usage des sols.

Rédacteur en chef : M. Jamagne.

Secrétariat de rédaction : Micheline Eimberck et J.P. Rossignol.

Le Comité Éditorial est composé de trente membres de France et de pays francophones.

OUVRAGES

LE LIVRE JUBILAIRE (1984)

Point sur les acquis à cette date en matière de science du sol et de pédologie.

FONCTIONNEMENT HYDRIQUE ET COMPORTEMENT DU SOL (1984)

PODZOLS ET PODZOLISATION

par D. Righi et A. Chauvel : ouvrage publié en coédition par l'AFES et l'INRA, avec le concours du CNRS, de l'ORSTOM, et de la région Poitou-Charentes (1987).

MICROMORPHOLOGIE DES SOLS/SOIL MICROMORPHOLOGY

par N. Fédoroff, L.M. Bresson, Marie Agnès Courty, publié par l'AFES avec le concours du CNRS, de l'INAPG, de l'INRA, du Ministère de l'Environnement et de l'ORSTOM (1985) (épuisé).

CARTE MONDIALE DES SOLS ET SA LÉGENDE

Présentée sous forme de deux diapositives (1984).

LE RÉFÉRENTIEL PÉDOLOGIQUE

Principaux sols d'Europe, deuxième édition 1995.
Ouvrage collectif publié par l'AFES et l'INRA.

SYNTHÈSE NATIONALE DES ANALYSES DE TERRE : PÉRIODE 1990-1994

par C. Walter, C. Schvartz, B. Claudot, P. Arousseau et T. Bouedo, avec le concours du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

ACTES DU XVI^E CONGRÈS MONDIAL DE SCIENCES DU SOL, MONTPELLIER - AOÛT 1998