



HAL
open science

Transferts de solutes et structure du sol

A.M. de Cockborne, Francois Lafolie, R. Guennelon

► **To cite this version:**

A.M. de Cockborne, Francois Lafolie, R. Guennelon. Transferts de solutes et structure du sol. 13. Congress de l'AISS, Aug 1986, Hambourg, Allemagne. hal-02783628

HAL Id: hal-02783628

<https://hal.inrae.fr/hal-02783628>

Submitted on 4 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

TRANSFERTS DE SOLUTES ET STRUCTURE DU SOL

A.M. de COCKBORNE, F. LAFOLIE et R. GUENNELON

Station de Science du Sol, I.N.R.A., (F) MONTFAVET

SUMMARY :

Data on preferential solute transport and matrix diffusion are presented by means of laboratory experiments and in situ fields measurements. Numerical and analytical models are proposed for transport through a column of porous material with an axicylindrical channel. The experiments and the simulations clearly demonstrate the influence of pore size, rate of flow and temperature. A composite model made up of numerous identical columns is used to represent an undisturbed soil. Leaching of previously NO_3^- saturated porous media is also studied. Nitrate and phosphate move to nearly equal depth during trickle irrigation in a cracked calcareous clayey field soil. The extent of lateral displacement is found to be important only for NO_3^- .

Les pores continus (plans ou cylindres) qui existent dans les sols, influent de façon significative, voire déterminante, sur les mouvements de l'eau et des substances dissoutes : les fentes, fissures, canaux agissent, en effet, en tant que chemins préférentiels ; mais les phénomènes de diffusion en direction de la matrice poreuse qui en constitue les parois, s'ajoutent au transfert convectif direct. Avec les travaux de BOUMA (1985), BEVEN et GERMANN (1985), GRISAK et PICKENS (1981) (pour ne citer que les plus spécialisés), depuis les années 60, de très nombreuses approches de modélisation ont été effectuées. Les méthodologies de ces approches diffèrent de celles utilisées pour les milieux agrégés qui, à une certaine échelle, peuvent être considérés comme isotropes. Par contre, l'existence d'une fissure ou d'un pore continu détruit totalement cette notion d'isotropie. La géométrie et la distribution de ce type d'"accidents structuraux" peuvent être à l'origine d'une certaine approche de modélisation.

Si les travaux théoriques commencent à se diversifier et se multiplier, les expérimentations au laboratoire et surtout in situ sont beaucoup moins fréquentes ; de la sorte, le calage et la vérification des modèles ne sont pas toujours réalisés. Le but de cet article est de présenter des résultats expérimentaux, ayant permis le cas échéant, la vérification d'un modèle ; les systèmes utilisés iront dans un ordre de complexité croissante.

EXPERIMENTATIONS EN LABORATOIRE.

Certaines expériences ont été conduites avec des milieux poreux artificiels dont toutes les caractéristiques (de forme, de taille, de constitution) étaient parfaitement connues. D'autres ont été réalisées avec des matériaux naturels, dont on cherchera

une représentation théorique équivalente.

1. Existence d'un pore continu unique.

Dans un milieu poreux artificiel (où la porosité totale et le coefficient de diffusion du soluté sont connus), on crée un pore axicylindrique, de différents diamètres (0.050, 0.063, 0.080, 0.120 et 0.146 cm). La surface de base de la colonne est de 4.37 cm², sa longueur de 40 cm. La porosité totale est de l'ordre de 69 %, alors que selon le diamètre du pore, la porosité de transfert, négligeable devant la porosité totale, varie de 0,045 à 0,38 %. On injecte, dans ce pore, une solution de nitrate de calcium avec différentes vitesses ; les courbes d'éluion dépendent fortement du débit et de la dimension du système poral structural.

On modélise le système par les équations :

$$\theta_m R_m \frac{\partial C_m}{\partial t} + \theta_{im} R_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \theta_m D_m \frac{\partial^2 C_m}{\partial z^2} - \theta_m V_m \frac{\partial C_m}{\partial z} \quad (1)$$

$$R_a \frac{\partial C_a}{\partial t} = \frac{D_a}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_a}{\partial r} \right) \quad (2)$$

$$C_{im} = \frac{2}{b^2 - a^2} \cdot \int_a^b r \cdot C_a(z, r, t) dr \quad (3)$$

où l'indice m se rapporte à l'eau mobile dans le pore, l'indice im, à l'eau immobile dans le milieu poreux, et l'indice a, au soluté dans le milieu poreux. θ , R, D sont respectivement les teneurs en eau volumiques, les facteurs de retard, les coefficients de diffusion et C les concentrations du soluté. V est la vitesse moyenne dans le pore et r est le rayon du milieu poreux (a : rayon du pore, b : rayon de la colonne). Avec les conditions aux limites appropriées, pour un système semi-infini, la solution par une méthode numérique, permet de vérifier l'adéquation aux résultats expérimentaux. La figure 1 représente une telle comparaison pour le pore de diamètre 0.120 cm, le modèle ayant été calé pour la vitesse de flux de 1.35 cm.sec⁻¹ et les simulations réalisées pour les trois autres vitesses utilisées. Pour la même expérience, une solution analytique a été proposée par VAN GENUCHTEN et al. (1984).

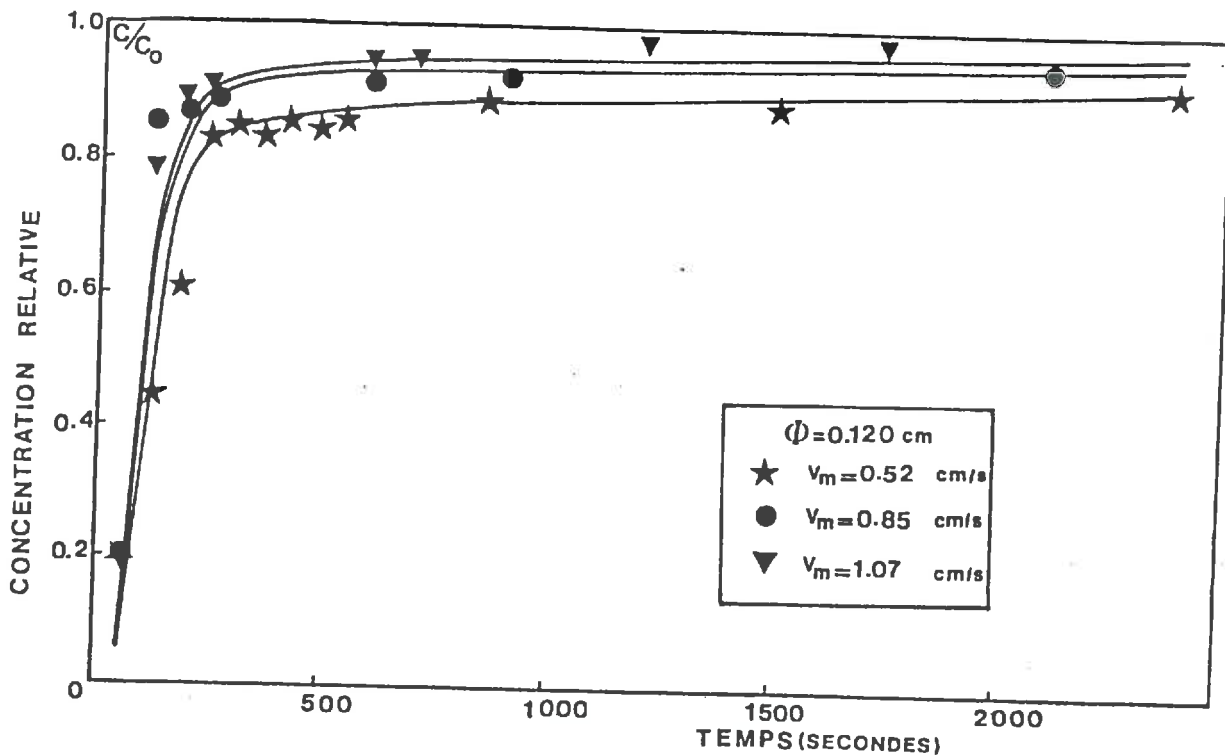


Figure 1 : Courbe d'élution pour un pore cylindrique.
Break through curve for a cylindrical pore.

2. Influence de la température sur le transfert diffusif.

Le coefficient de diffusion D_a régit la quantité de soluté ayant pénétré dans le milieu poreux. Ce coefficient dépend de la température. La variation de la quantité retenue dans la microporosité en fonction de la durée du transit et de la température (4° , 20° et 36°), correspond bien à la variation du coefficient de diffusion, en fonction du facteur température.

On obtient également un bon accord avec les résultats expérimentaux en introduisant dans la modélisation les valeurs de ce coefficient, mesuré par ailleurs, à ces températures sur des blocs constitués par le même matériau poreux.

3. Lessivage d'un massif poreux.

On peut également mettre en évidence l'importance relative des phénomènes de diffusion par une expérience de lessivage. Le massif poreux cylindrique comporte 8 pores verticaux distribués régulièrement autour de l'axe du cylindre. Il est saturé au préalable, par un soluté $((NO_3)_2 Ca)$ et l'on fait circuler de l'eau pure par ces pores, en dosant l'ion NO_3^- élué ; chaque lessivage est réalisé avec environ 25 ml d'eau et un temps de redistribution de 24 heures est respecté entre chaque passage. La quantité extraite de la microporosité diminue à chaque passage, 10 % seulement de la quantité totale initiale de soluté étant enlevé après cinq lessivages. Cette quantité est néanmoins plus importante que celle qu'aurait déplacée un seul lessivage de 5 fois 25 ml. (fig. 2).

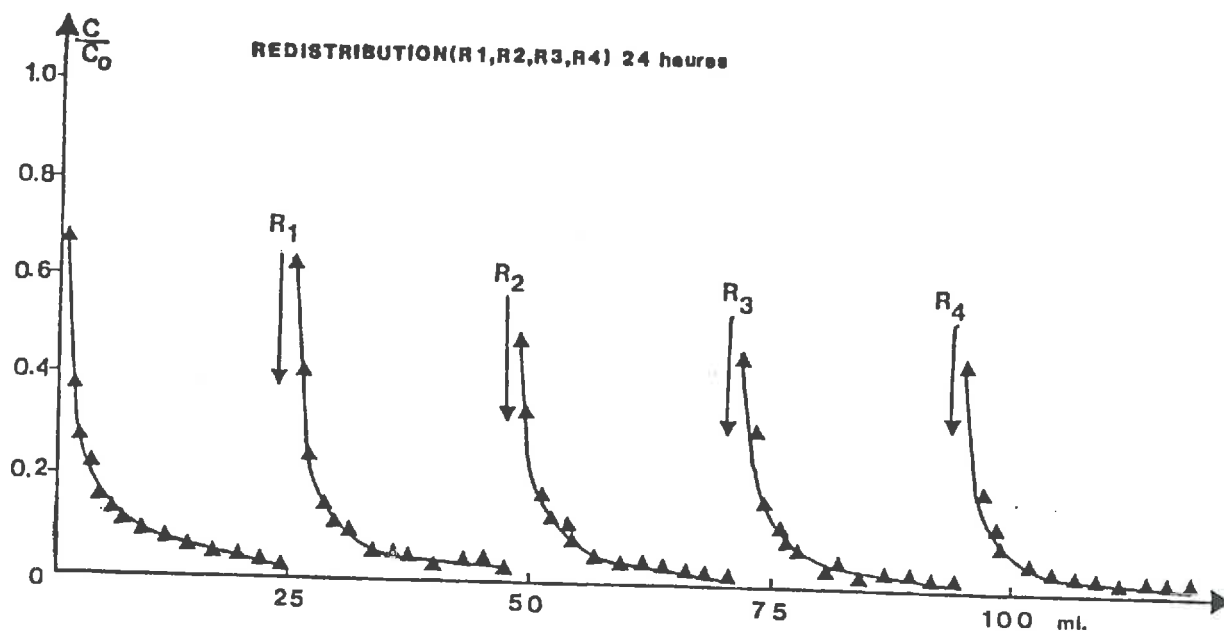


Figure 2 : Lessivages par de l'eau d'un massif saturé en NO_3^- .
Leachings of NO_3^- saturated material, by water.

Cette expérience met donc à nouveau en évidence le rôle du trajet direct n'intéressant qu'une faible fraction de la porosité totale et l'importance de la réserve microporale qui échappe au lessivage rapide. Ce phénomène est à prendre en compte lors des études géochimiques, et particulièrement pour l'étude de la composition chimique des eaux du drainage circulant rapidement durant la phase de crue et de débit de pointe.

4. Etude d'un bloc non perturbé.

Afin d'augmenter la généralité de l'étude, on a procédé à une expérience sur un bloc cubique de sol argilo-calcaire de 0.50 m de côté. Ce bloc a été prélevé en place, dans une armature, en respectant autant que faire se peut, sa fissuration naturelle. Après passage d'une solution de phosphate d'ammonium (10 litres), puis de nitrate d'ammonium (10 litres), séparés par un lessivage d'eau pure (10 litres), on a découpé le bloc en 125 petits cubes de 10 cm de côté. Les solutions étaient marquées au ^{32}P et ^{15}N . On a dosé le phosphore et l'azote dans les 125 échantillons, ainsi que dans les liquides élués. Le phosphore retenu représente 58,2 % de l'apport, et l'azote 25 %, mais les variations, par couches, des quantités retenues, sont parallèles. Le transfert s'effectue par les mêmes voies préférentielles, mais le phosphore est plus retenu au passage, et moins déplacé par un lessivage supplémentaire.

Une autoradiographie des faces d'un des cubes extraits du bloc, à la base, montre bien la localisation de cet élément au niveau des trous et des fissures et une faible diffusion dans la matrice elle-même.

Sur un tel système (milieu fissuré complexe, dont la perméabilité en saturé est limitée par une couche fine superficielle déstructurée), il a été tenté une modélisation utilisant le code numérique établi pour la colonne à pore unique. On a utilisé ainsi les résultats d'un travail récent (CARLIER, 1986), démontrant qu'il est possible théoriquement de réduire un milieu fissuré à des systèmes de fissures et de pores orthogonaux. Pour cela, utilisant les données de la porosité structurale du bloc de sol, la vitesse de percolation de la solution de nitrate utilisée, on cherche à apprécier le comportement hydrodynamique du système, en le comparant à un faisceau de colonnes cylindriques à pore axial unique.

Plusieurs paramètres représentent ce système :

- le pourcentage de porosité de transfert (utilisée par la percolation),
- les diamètres des colonnes et des pores équivalents,
- la vitesse moyenne de transfert dans ces pores.

Le comportement hydrodynamique permet de sélectionner, par estimation, des intervalles de valeurs pour ces paramètres et l'on a recherché l'ensemble de paramètres qui donne le meilleur ajustement sur la quantité de nitrate non retenu (soit 75 % de la quantité apportée). On aboutit alors à un système "équivalent" de 2050 colonnes de 1.14 cm de diamètre avec un pore axial de 0.146 cm de diamètre. En utilisant ces caractéristiques "apparentes", on peut simuler la quantité retenue dans chaque niveau. On observe des écarts pour la première et la seconde couche par rapport aux résultats expérimentaux. Ces écarts peuvent provenir du fait que la seconde couche a une densité apparente plus faible que la densité uniforme moyenne utilisée pour le modèle.

EXPERIMENTATIONS AU CHAMP.

Des essais similaires ont été conduits au champ, en sol nu, en utilisant aussi un ion mobile (NO_3^-) et un ion interactif avec la matrice argilo-calcaire (PO_4^{3-} - ^{32}P). Des bulbes d'irrigation localisée sont mis en fonctionnement pendant trois semaines avec un débit de $4\text{l}\cdot\text{h}^{-1}$ pendant 8 heures par jour. Puis on introduit dans l'eau d'irrigation du nitrate de calcium et du phosphate d'ammonium, pendant une journée. L'apport de sels est réalisé soit pendant les 4 premières heures (début de l'irrigation), soit pendant les 4 dernières heures (fin de l'irrigation, figure 3). Après une nuit de redistribution de l'eau et des sels, on prélève, dans un plan, des échantillons de sol de 10 en 10 cm, longitudinalement et verticalement ; on dose l'ion NO_3^- par ionométrie et on mesure le transfert de l'ion PO_4^{3-} par radiométrie de ^{32}P .

De telles expériences ont été réalisées pendant trois années consécutives. Dans tous les cas, la pénétration en profondeur des ions nitrate et phosphate est très importante, puisqu'elle atteint au moins 100 cm en quatre heures. La pénétration n'est pas nécessairement liée à la position du goutteur, mais il apparaît clairement qu'elle peut emprunter des chemins obliques, pour ensuite utiliser des fissures verticales. Par contre, l'extension latérale des bulbes de distribution montre la différence entre les deux ions utilisés : la pénétration de l'ion phosphate est quasi-uniquement verticale, alors que l'ion nitrate se distribue aussi latéralement, en même temps que l'eau d'irrigation. Selon des travaux antérieurs (HABIB et al., 1983) sur le sol utilisé, le coefficient de diffusion apparent de PO_4^{3-} est de l'ordre de $0.3 \text{ à } 3.6 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$, n'autorisant donc dans la matrice que des trajets lents, très courts.

Les résultats expérimentaux obtenus pour ces essais in situ, montrent que l'on peut espérer faire descendre rapidement des solutions fertilisantes jusqu'aux zones d'absorption racinaire, mais que, par contre, des pertes par lessivage vers les niveaux inférieurs sont à craindre, dans les sols fissurés.

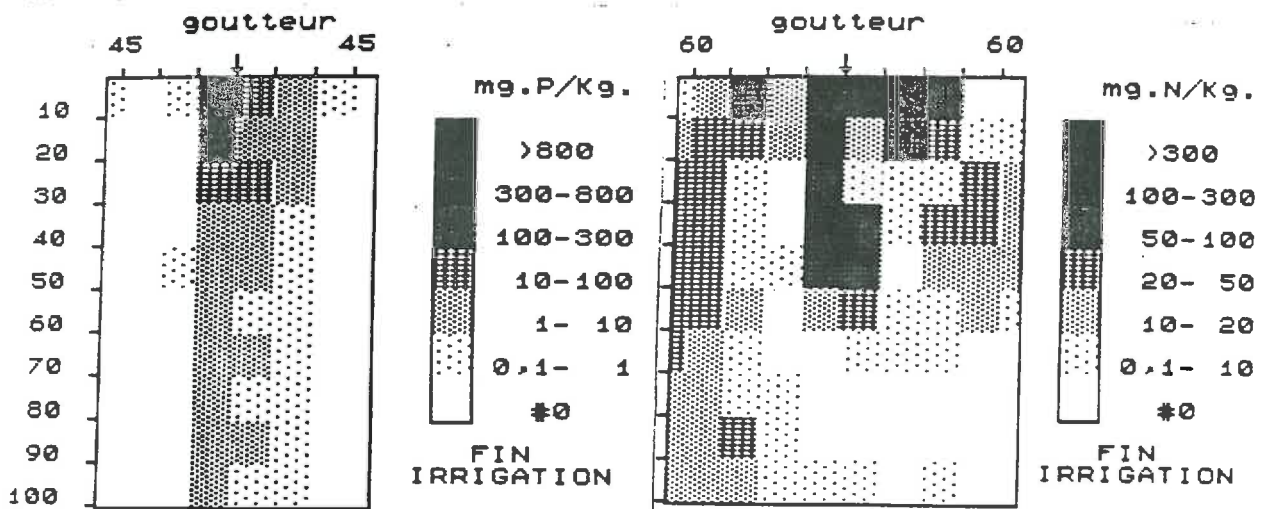


Figure 3 : Répartition de NO_3^- et PO_4^{3-} en irrigation localisée.
 NO_3^- and PO_4^{3-} distribution in trickle-irrigation.

CONCLUSIONS (Modélisation - Prévisions).

L'exemple traité concernant un bloc non perturbé (III, 4) montre qu'une modélisation déterministe sur un "objet équivalent" au système physique réel peut donner quelques résultats. Pour un même milieu, l'"objet équivalent" peut varier selon l'objectif que l'on se fixe ; on peut, par exemple, privilégier les trajets par les fissures, en négligeant la diffusion vers la microporosité, s'il s'agit de prévoir, lors de chaque apport d'éléments fertilisants dans l'eau d'irrigation, la possibilité d'amener ces éléments le plus rapidement possible vers les zones d'absorption racinaire. Cette pénétration peut se faire dans des pores ou des fissures saturés, ou par déplacement d'une couche liquide de faible épaisseur sur les parois. La pénétration du fluide vecteur à une profondeur donnée, peut être appréciée, à quelques minutes près, par des capteurs appropriés, sur les plantes elles-mêmes (microvariations des tiges, des troncs, des fruits). Par contre, s'il s'agit de problèmes de pollution (et selon l'élément considéré, et les caractéristiques de ses réactions avec le sol), on ne peut plus négliger les quantités stockées dans la matrice. Ces quantités peuvent se cumuler, évoluer sous l'action de phénomènes biologiques ou physico-chimiques, ou à nouveau repasser en solution et être entraînées en profondeur. La technique de la recherche d'un "objet équivalent" peut permettre de concevoir des modèles simplifiés, pouvant avoir une utilité pratique, pour des résultats semi-quantitatifs.

Par contre, la mise en oeuvre de modèles déterministes prenant en compte tous les aspects du transfert, doit tenir compte :

- de la structure de la distribution des pores et des fissures,
- de la variabilité dans le temps du dimensionnement de ces pores,
- des coefficients de diffusion des solutés, qui varient avec la densité et l'humidité de la matrice...

Compte tenu de cette variabilité des caractéristiques du milieu de transfert considéré, le calage et la vérification de ces modèles doivent, pour qu'ils soient représentatifs de phénomènes "en vraie grandeur", s'appuyer sur un très grand nombre de résultats expérimentaux. Les approches telles que celles de JURY (1982), ou de SUDICKY et al. (1982) introduisent, dans l'étude de ces problèmes, une dimension stochastique qui répond aux exigences de cette variabilité.

BIBLIOGRAPHIE

BEVEN (K.) et GERMANN (P.) (1985) .- A distribution function model of channelling flow in soils, based on Kinematic wave theory. I.S.S.S. Symposium on "Water and solute movement in heavy clay soils" pp. 89-100. Wageningen, The Netherlands.

BOUMA (J.) (1985) .- Using soil morphology to develop measurement methods and simulations techniques for water movement in heavy clay soils. I.S.S.S. Symposium on "Water and solute movement in heavy clay soils" pp. 298-315. Wageningen, The Netherlands.

CARLIER (E.) (1986) .- Représentation d'un milieu poreux anisotrope (anisotropie de perméabilité) par un ensemble de fractures et par un ensemble de conduits cylindriques à directions orthogonales. Hydrogéologie (Revue du B.R.G.M.) n° 1 pp. 25-28.

GRISAK (G.E.) et PICKENS (J.F.) (1981) .- An analytical solution for solute transport through fractured media with matrix diffusion. J. of Hydrology 52, n° 1/2 pp. 47-57.

HABIB (R.) et GUENNELON (R.) (1983) .- Evaluation du coefficient de diffusion du phosphore en sol de limon argileux calcaire. Agronomie 3(2) pp. 113-121.

JURY (W.A.) (1982) .- Simulation of solute transport using a transfer function model. Wat., Resour. Res., 18 pp. 363-368.

SUDICKY (E.A.) et FRIND (E.O.) (1982) .- Contaminant transport in fractured porous media : Analytical solutions for a system of parallel fractures. Wat. Resour. Res., 18 pp. 1634-1642.

VAN GENUCHTEN (M.T.), TANG (D.H.) et GUENNELON (R.) (1984) .- Some exact solutions for solute transport through soil containing large cylindrical macropores. Wat, Resour. Res. 20 pp. 335-346.