

Proprietes physiques des sols et transferts (masse et energie)

R. Guennelon, Raoul Calvet

► **To cite this version:**

R. Guennelon, Raoul Calvet. Proprietes physiques des sols et transferts (masse et energie). Etudes sur les transferts d'eau dans le systeme sol-plante-atmosphere. Comptes-rendus des travaux effectues dans le cadre de l'ATP Eau, INRA, 1988. hal-02853288

HAL Id: hal-02853288

<https://hal.inrae.fr/hal-02853288>

Submitted on 7 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.

ETUDES SUR LES TRANSFERTS D'EAU DANS LE SYSTEME SOL-PLANTE-ATMOSPHERE

Comptes-rendus des travaux effectués
dans le cadre de
l'Action Thématique Programmée « Eau »

R. CALVET

Editeur

*INRA, Centre de Grignon, Laboratoire des Sols
78850 - Thiverval-Grignon*

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
147, rue de l'Université, 75007 Paris

PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS ET TRANSFERTS
(masse et énergie)

R. GUENNELON

Laboratoire de Physique du Sol - INRA - 84140 MONTFAVET

R. CALVET

Chaire de Science du Sol, INA-PG, 78850 THIVERVAL-GRIGNON

Une action coordonnée est une occasion de faire le point, à un moment donné, des tendances conceptuelles se rattachant à un thème particulier. Les méthodologies utilisées à cette occasion doivent avoir valeur d'exemples ; les résultats, même s'ils ne sont pas définitifs devraient indiquer les directions de poursuite, les voies naturelles à explorer. Il faut donc prendre connaissance des travaux relatés dans cet ouvrage, avec le souci des ouvertures possibles qu'ils renferment (au moins implicitement) et ne pas les considérer seulement comme des aboutissements ; d'ailleurs, au moment même où ils paraissent, certains d'entre eux ont déjà fait l'objet de nouveaux travaux, de nécessaires améliorations. Le but de cet article de présentation est de dégager des orientations communes et de suggérer, dans ce domaine, les champs qu'il conviendrait d'explorer.

Il apparaît que les travaux réalisés à l'occasion de cette action thématique programmée (A.T.P.) découlent de quatre préoccupations majeures qu'il faut confronter aux exigences de la finalisation de nos recherches (à savoir, entre autres, que le sol ne peut être, in fine, étudié comme un support inerte de la végétation).

Ces quatre préoccupations sont les suivantes (chacune étant une dominante, ou une composante, de l'un ou l'autre des rapports) :

1) Le sol est généralement un milieu structuré, non uniforme et hétérogène (GASCUEL et al. - F. PAPY)*.

2) Le sol présente des caractéristiques d'état et de fonctionnement variant de façon aléatoire ou, selon certaines lois, d'un site à l'autre (L.

* Sauf indications particulières, les références se rapportent aux travaux publiés dans le présent ouvrage.

BRUCKLER et al. - C. GASCUEL et al. - M. VOLTZ et al.).

3) La prévision des transferts nécessite l'élaboration de modèles (L. BRUCKLER et al. - M.C. GIRARD et al.).

4) Les propriétés fonctionnelles dépendent de caractéristiques de constitution et d'état qui devraient permettre de pouvoir caractériser et prévoir (qualitativement et quantitativement) ces propriétés. (C. GASCUEL et al. - F. PAPY - M. VOLTZ et al.).

Les travaux présentés ici répondent-ils effectivement à ces préoccupations et quelles réflexions suggèrent-ils ?

I. Le sol, Milieu structuré.

La première préoccupation consiste à prendre en compte un milieu qui, par son architecture, n'est ni homogène, ni isotrope. Bien sûr, si l'on admet certaines hypothèses "réductionnistes", le sol pourrait répondre correctement aux lois, depuis longtemps connues, des transferts de masse et d'énergie : les fonctionnements hydrostatiques et hydrodynamiques, depuis BUCKINGHAM, GARDNER, RICHARD, PHILIP (entre autres), y seraient définis et opérationnels. Or, en fait, les matériaux constitutifs n'ont pas tous les mêmes propriétés (argiles, matières organiques, minéraux plus ou moins inertes), et ils s'associent et interrassent, pour créer des organisations structurées, nombreuses et variées, en formes et en tailles ; ces organisations, de plus, peuvent se modifier dans le temps, sous l'effet de diverses contraintes dues au climat et aux techniques culturales. Cette variabilité temporelle des propriétés du sol et de son fonctionnement semble aussi importante que la variabilité spatiale évoquée plus loin. Elle paraît encore moins bien maîtrisée, d'autant plus qu'il faut décrire et apprécier ces variations non pas pour elles-mêmes, mais pour les inclure dans un système qu'elles conditionnent. Dès lors, toutes les lois utilisables ne peuvent s'appliquer qu'à un "objet équivalent" dont on pourra toujours discuter de la représentativité ; cet "objet équivalent" ne sera défini que par des paramètres apparents, grâce auxquels le comportement final du système, sous une stimulation donnée, sera identique à celui du système réel. Il est donc nécessaire, lors d'une démarche initiale, naturaliste ou analytique, de bien décrire l'objet réel, si l'on veut construire un "objet équivalent" cohérent avec le réel (F. PAPY).

C'est là où réside un des intérêts des approches par traçage (C. GASCUEL et al.) qui mettent en évidence la complexité des phénomènes de transferts et permettent de révéler les localisations des "chemins préférentiels" : ce sont des voies de transport rapide qui existent à différentes échelles (fissures, crevasses, pores d'origine biologique). Leur rôle n'affecte pas que les transferts liquides : ils interviennent également dans les transferts en phase vapeur et sur la morphologie du système racinaire.

Deux ensembles de raisons font qu'il est difficile de prendre en compte ces voies de transfert privilégiées. Le premier a trait à la complexité des systèmes à décrire qui ne peut être perçue qu'en partie, en se plaçant à une échelle donnée. A l'échelle microscopique, les méthodes de la micromorphologie et les méthodes physiques d'étude de l'espace poral permettent d'accéder à certaines caractéristiques des pores eux-mêmes. A l'échelle macroscopique (centimétrique et décimétrique), la description des états structuraux dans l'horizon anthropique proposée par MANICHON (1982) constitue une base de caractérisation de la couche labourée. Par ailleurs, la complexité des systèmes structuraux est accrue par leur variabilité temporelle dues aux contraintes hydriques et mécaniques résultant de l'action du climat, de la végétation et des techniques culturales. Enfin, les vides de grandes dimensions (fissures et crevasses) peuvent se remplir de matériaux allochtones possédant des propriétés différentes de celles de la matrice et contribuant ainsi à accroître l'hétérogénéité du milieu.

Le deuxième ensemble de raisons tient à l'utilisation des descriptions géométriques qui dépend du type de démarche adopté pour la modélisation des transferts. Du point de vue de l'hydrodynamique il est douteux qu'une description à l'échelle microscopique puisse être systématiquement utilisée. En effet, les caractéristiques géométriques de l'espace poral devraient servir à définir les conditions aux limites nécessaires à la résolution des équations du transport, ce qui est difficilement envisageable, sauf dans des milieux poreux très simples. En revanche, la connaissance des caractéristiques géométriques et structurales à l'échelle macroscopique pourra probablement aider à la compréhension du fonctionnement physique du sol. Certes à cette échelle, l'application des équations du transport se heurte aux mêmes difficultés qu'au niveau microscopique. Il faut néanmoins souligner que la connaissance d'une certaine description des états structuraux permet maintenant de commencer à comprendre et à prévoir certains aspects du fonctionnement physique

de la couche de surface du sol.

Une littérature déjà abondante traite de l'influence de la structure du milieu sur les phénomènes de transport à quelque échelle que ce soit. Elle concerne, cependant, le plus souvent, bien plus la conception de modèles qu'elle n'apporte des observations devant les initier ou des mesures permettant de les valider. C'est un des intérêts des travaux de GASCUEL et al. et de PAPY de commencer à combler cette lacune en présentant simultanément une démarche et des résultats expérimentaux.

II. Le Sol : milieu variable dans l'espace.

La seconde préoccupation se situe à une autre échelle ; alors que l'existence d'une structuration, plus ou moins permanente, a déjà une réelle importance à l'échelon local, intervient, dès qu'on envisage une unité parcellaire ou même une "unité pédologique", un autre aspect de la caractérisation hydrodynamique des sols : il s'agit de la variabilité spatiale de leurs propriétés physiques et physico-chimiques. L'une des conséquences de cette variabilité est qu'un phénomène étudié localement n'est pas transposable en tout point d'une même aire considérée comme homogène des points de vue pédologique et des techniques culturales mises en oeuvre. On ne peut donc prévoir le comportement du sol en un point donné (ou plus exactement la probabilité d'un certain comportement), si l'on n'a pas auparavant étudié la distribution spatiale des valeurs des paramètres phénoménologiques.

Alors que l'on maîtrise de mieux en mieux l'exploitation mathématique et numérique des lois de l'hydrodynamique des milieux poreux, on prend conscience de la relativité de la connaissance ponctuelle d'un phénomène ; le problème se pose alors de savoir comment accéder à la connaissance de la distribution spatiale des paramètres, assortis de leur écart-type, qui permettrait la généralisation de la connaissance locale. On aboutit à la conclusion qu'un grand nombre de mesures est nécessaire, ce qui engendre parfois des impossibilités techniques ou économiques. On peut, dès lors, s'interroger sur la faisabilité de certaines opérations : cette variabilité spatiale est-elle une limitation à des études de détail lourdes et onéreuses ? Interdit-elle la recherche de modèles opérationnels, c'est-à-dire utilisables, avec estimation de la précision sur tout le domaine dont on cherche à étudier le fonctionnement ? "Should we continue to develop sophisticated measurement techniques or devices in order to apply the existing conceptual models in a predictive way

or should we develop other theories and models being able to interpret the field data as they are ?" (M. VAUCLIN : Infiltration in unsaturated soils, Publ. Univ. of Delaware, July, 1982).

Certes, un modèle déterministe, calé en un site, sera opérationnel sur ce site ; mais, même dans des cas favorables de faible variabilité, la précision ne semble envisageable que pour un site expérimental particulier, et "physiquement très bien caractérisé" (L. BRUCKLER et al.).

III. Modélisation des transferts

La troisième préoccupation explicitée est celle de la conception de modèles prévisionnels déterministes, dont on vient de voir à quelles limitations ils étaient soumis. Il existe bien sûr divers degrés, dans la qualité du déterminisme utilisé. Lorsque la conception du modèle est basée sur les équations de transfert (L. BRUCKLER et al.), cela justifie une étude poussée des divers paramètres du modèle ; lorsque le modèle est un modèle à compartiments (réservoir), les valeurs précises des paramètres sont parfois remplacées par des seuils de fonctionnement définis de façon plus ou moins qualitatives (M.C. GIRARD et al.).

En fait, la connaissance des lois de transfert, la vérification, parfois indirecte des lois de l'hydrostatique et de l'hydrodynamique des milieux poreux sur une très grande masse d'observations et d'expérimentations, justifieraient plutôt l'utilisation d'un formalisme mathématique aussi rigoureux que possible : la puissance de l'informatique actuelle autorise, en ce domaine, les constructions les plus sophistiquées (mais ne les justifie, sans doute, pas a priori).

Cependant il faut noter que la connaissance du milieu sol reste souvent bien imparfaite ; ou plus précisément, pour appliquer les théories et les lois "idéales", nous sommes acculés à une attitude réductionniste ; le sol est encore trop souvent présenté comme un milieu isotrope, homogène, indéformable, accessible en tout point vide d'eau, à la pression atmosphérique, etc... ; ce n'est que, grâce à toutes ces simplifications, que les modèles peuvent être conçus ; certes, on peut envisager une certaine hétérogénéité, en couches superposées horizontales ou quasi-horizontales (cf. le travail de L. BRUCKLER et al., et celui de M.C. GIRARD et al.), mais les autres types d'hétérogénéités spatiales ou temporelles restent encore un obstacle majeur à la construction de modèles déterministes complexes. Et ce qui est vrai pour les transferts gazeux, hydriques ou thermiques, l'est, encore bien plus

pour les transferts de substances en solution.

Même avec ces simplifications drastiques, les modèles déterministes sont encore dépendants de plusieurs paramètres (ou de relations paramétriques), qu'il faut identifier par calage. Cette opération, réalisée localement, peut être en défaut à quelque distance du site de calage de par la variabilité des propriétés des sols, même sur des systèmes réputés homogènes (cf. paragraphe précédent).

Comme la finalité de l'étude des transferts n'est pas nécessairement et uniquement le comportement du sol, il faut compter avec la complexité supplémentaire, introduite par le système racinaire et le fonctionnement des plantes (dépendant aussi bien du climat que de nombreux autres paramètres : cf. M. SEBILLOTTE, article de présentation).

On doit donc, tout en notant l'intérêt des travaux réalisés pour élaborer des modèles déterministes, s'interroger sur la nécessité de nouvelles approches de la modélisation des transferts.

IV. L'utilisation de caractéristiques de constitution et d'états

Enfin, presque tous les travaux relatés dans cet ouvrage, présentent une tendance commune, plus ou moins explicite : comment, à partir d'observations ou de mesures relativement simples, va-t-on pouvoir prévoir (et utiliser) un paramètre ou une loi de comportement ? Quelle va être la validité, la représentativité de ce paramètre, de cette loi ?

Etant conscient du caractère aléatoire des propriétés fonctionnelles du sol peut-on, au prix de la perte d'une certaine précision, remplacer un paramètre phénoménologique (la conductivité hydraulique en milieu saturé, par exemple) par une combinaison de variables de constitution ou d'arrangement, facilement accessibles en routine (granulométrie, densité apparente,...)?

Existe-t-il des indicateurs globaux simples, opérationnellement liés à un type, ou une caractérisation quantitative, de fonctionnement ?

Le problème n'est pas neuf, et plusieurs relations statistiques (parfois étayées par un soupçon de déterminisme) ont été proposées. GUPTA et LARSEN (1979) ont proposé une représentation de la courbe de rétention par des combinaisons linéaires des fractions granulométriques, de la teneur en matières organiques et de la densité apparente. Déjà en 1968, PETERSEN et al. avait

traité, mais un peu différemment le même problème et en 1985, POCKETT et al. proposent des relations pour décrire les relations potentiel matriciel/teneur en eau et la conductivité hydraulique en milieu saturé.

COSBY et al. (1984) avait abordé cette question à l'aide de méthodes statistiques telles que l'analyse discriminante, la régression linéaire multiple.

Des travaux sur le même thème, mais introduisant des variables transformées (rayons des pores par exemple), tentent également de proposer de telles relations, comme l'ont fait ARYA et PARIS (1981), HAVERKAMP et PARLANGE (1982) ; cet aperçu bibliographique n'a, dans le cadre de cet article de présentation, aucune raison d'être exhaustif : il s'agit simplement de faire ressortir le fait que les préoccupations des travaux réalisés, à l'occasion de cette action commune, ne sont en rien déconnectées de celles de la collectivité scientifique internationale.

Sans vouloir réduire son travail à ce seul aspect, on peut noter que, pour F. POPY, un examen visuel de critères morphologiques, à l'échelle centimétrique, peut donner quelques indications sur des propriétés hydriques, par exemple, sur une allure générale de la courbe de rétention. Pour M. VOLTZ et M. BORNAND, la géostatistique, et diverses autres méthodes statistiques, permettent une étude critique des approches citées ci-dessus pour l'obtention des paramètres hydrodynamiques à l'aide des seules variables granulométriques.

La même préoccupation a conduit L. BRUCKLER et al. à l'analyse critique du modèle de DE VRIES concernant l'estimation de la conductivité thermique apparente.

On peut donc conclure en affirmant que les travaux sur l'état hydrique et les transferts réalisés au cours de cette A.T.P. ont abordé des problèmes finalisés par des approches multiples, nouvelles, ou tout au moins cohérentes avec les grandes tendances méthodologiques du moment.

Les réponses aux questions posées ne sont pas toutes (tant s'en faut) définitives, mais elles permettent de tirer quelques enseignements sur les orientations à développer et sur les méthodes à mettre en oeuvre.

Le premier enseignement, qui ressort de ces travaux, est que le fonctionnement du sol étant sous l'influence de nombreux paramètres, de plusieurs mécanismes élémentaires, il importe de savoir s'il faut tous les identifier; s'il faut tous les introduire dans l'explication et la prévision de ce fonctionnement ; on doit donc tester, de prime d'abord, l'influence exacte de tel paramètre, de tel mécanisme.

Pour cela, une phase de conception "exhaustive" du modèle est nécessaire : on ne doit rejeter a priori aucune hypothèse explicative. En débordant un peu du cadre des travaux présentés, on peut citer à l'appui de cette attitude méthodologique, le travail d'A. PASSERAT DE SILANS (1986) réalisé grâce aux expérimentations présentées par L. BRUCKLER et al.. Cet auteur a élaboré un modèle de transfert de masse et de chaleur en milieu stratifié ; grâce à une étude de la sensibilité du modèle "exhaustif", il a montré que, sur plus de 10 paramètres introduits, le modèle n'était extrêmement sensible qu'à un seul paramètre : il s'agit, en l'occurrence, de la relation entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau, $K(\theta)$ de l'horizon inférieur du sol stratifié : ceci démontre la nécessité (ce qui ne signifie pas qu'il faille négliger totalement les autres paramètres) d'approfondir la connaissance de tout modèle représentatif de cette fonction $K(\theta)$. Cette étude de sensibilité étant réalisée, on peut passer à la phase "économique" de la modélisation qui consiste à investir dans la détermination des paramètres les plus significativement efficaces ou à concevoir un modèle simplifié opérationnel.

Le second enseignement est que les caractéristiques d'un sol quant à son fonctionnement, ne devraient pas être abordées d'un seul point de vue statistique (M. VOLTZ et M. BORNAND, C. GASCUEL et P. MEROT), ni d'un seul point de vue conceptuel (L. BRUCKLER et al.).

S'attacher au seul aspect statistique peut conduire à des taux faibles d'explication de la variance, par suite d'un grand nombre de variables explicatives (toutes plus ou moins déterminantes) et de l'utilisation d'un modèle abusivement simplifié (modèle linéaire par exemple). Réduire la démarche au seul modèle conceptuel ou mécaniste, peut conduire à une impossibilité de décrire correctement et complètement le phénomène, et de prendre en compte tout ce qui détermine la caractéristique du sol envisagée. C'est pourquoi, on peut, par exemple, s'interroger sur la nécessité d'une description détaillée de l'espace poral, opération très complexe, et il n'est pas évident que l'on soit toujours

en mesure d'en tirer parti. Le problème reste posé, du passage de l'échelle microscopique à l'échelle du matériau complexe in situ : "How does the microscopic or the molecular behavior of water in soil lead to macroscopic transport equations and to the observed values of macroscopic transport coefficients ? An abundant literature relating to this question already exists, but it is neither rigorous nor comprehensive enough to provide a satisfactory answer" (G. SPOSITO 1986).

Toutefois, la variabilité temporelle induite par les variations d'état hydrique du système peut bénéficier d'une approche microscopique. Les mécanismes de retrait et de gonflement macroscopique peuvent être, dans leur causalité, leur amplitude, leur réversibilité, expliqués par des examens microscopiques au niveau de la phase argileuse et de son arrangement avec les éléments du squelette.

Le troisième enseignement est que, par rapport à un objectif appliqué des critères simplifiés et des paramètres semi-quantitatifs peuvent permettre des appréciations et des prévisions de comportement ou de fonctionnement. Ainsi, l'élaboration de typologies comme par exemple celle proposée par MANICHON (1982) pour décrire l'état structural de la couche labourée présente-t-elle un double intérêt en constituant une base d'interprétation et de prévision (voir les travaux de F. PAPY et F. TARDIEU dans cet ouvrage) et en permettant de définir des situations "test" pouvant être utilisées pour l'ajustement et la validation de modèles. La description de la couverture pédologique dans son ensemble peut aussi faire l'objet d'une approche typologique (M.C. GIRARD). D'une façon générale, il faut que ce type d'approche semi-quantitative conserve un sens physique et ne soit pas une construction a priori. Si cette condition est réalisée, il reste toutefois, pour que ces applications aient une portée suffisamment générale, à "calibrer" le modèle ou les modèles qui en sont issus sur un grand nombre de situations. Cette opération permettra alors de préciser les domaines d'utilisation des modélisations ainsi élaborées et notamment de définir leur capacité de prévision.

Même dans le cas de modèles simplifiés utilitaires, la précision des sorties ne doit pas être négligée ; le critère à considérer alors, doit être l'utilisation que l'on va faire de ces sorties : la précision à rechercher sur l'évolution d'un profil hydrique n'est pas la même s'il s'agit, par exemple, de l'exploitation

du profil par un couvert végétal pendant toute une période végétative donnée, ou s'il s'agit de déterminer le profil hydrique des couches de surface, compatible avec une prise de décision de traficabilité ; dans le premier cas, la variable temps et la distribution spatiale du système racinaire introduit une certaine pondération ; dans le second cas, la précision à rechercher dépend d'une valeur seuil de l'état hydrique, conditionnant une propriété mécanique déterminée, valeur qui peut n'être maintenue que pendant un laps de temps court autorisant une intervention d'engins mécaniques. La signification du modèle n'exclut pas une adéquation optimale au problème pour lequel il a été conçu.

Le dernier enseignement à tirer de cette analyse est, en fait, de pouvoir définir une démarche qui réalise en quelque sorte la synthèse des trois précédentes remarques. Il faut répondre à la question : Comment tenir compte de tous les paramètres, de tous les mécanismes intervenant dans le fonctionnement d'un système, sans être contraint de réaliser un travail considérable, voire impossible, de mesures et d'identification (que peut remettre en cause la variabilité de ces paramètres ?). Dès que l'on quitte l'expérimentation en laboratoire, le système devient généralement trop complexe pour qu'une étude fine locale puisse déboucher sur un modèle généralisable, de coût d'établissement raisonnable. On peut donc envisager une autre démarche, qui sera d'utiliser conjointement une attitude déterministe locale, assortie d'une généralisation statistique, mais le modèle local sera déjà au départ un modèle très simplifié à très faible nombre de paramètres (au plus 2). Cette préoccupation relative à l'élaboration de nouvelles méthodes, face à la grande variabilité des systèmes, a été bien définie par V. JURY et al. (1986) :

"Such extreme variability would vitiate attempts based on conventional methods to estimate accurate mean values of transport coefficients at the field scale. This situation has led to the view that mass transport phenomena in field soils are intrinsically erratic processes susceptible to quantitative characterization only with mathematical techniques for describing random processes".

Ces nouvelles approches de modélisation ou de représentation des phénomènes de transferts doivent être largement explorées, ainsi que l'utilisation de théories élaborées dans d'autres domaines que celui de la science du sol : (cf. aussi l'utilisation de la théorie des ondes cinématiques, développée en 1955 par M.J. LIDTHILL et G.B. WHITMAN, et appliquée par plusieurs auteurs : K. BEVEN (1979), F. GERMANN et K. BEVEN (1985) entre autres).

L'analyse des travaux réalisés à l'occasion de cette A.T.P., débouche donc non seulement sur l'évaluation de l'intérêt de ces recherches et des résultats obtenus, mais aussi sur la nécessité d'une prospective constante des techniques et des méthodes à employer. La solution d'un problème ne doit pas toujours aller dans le sens de l'augmentation de la complexité de ce problème, mais il faut parallèlement rechercher les possibilités de simplification ou de globalisation que peut fournir l'utilisation de nouveaux concepts (ou la réactualisation de concepts anciens). Les améliorations ou innovations métrologiques ne sont pas non plus à négliger car l'application des méthodes statistiques ne dispense pas pour autant de la recherche de la minimisation des erreurs expérimentales.

BIBLIOGRAPHIE

- ARYA L.M. et PARIS J.F., 1981 - A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *S.S.S. Amer. Journ.* 45, 1023-1030.
- BEVEN K., 1982 - On subsurface flow : Predictions with simple kinematic theory for saturated and unsaturated flows. *Wat. Resour. Res.* 18, 6, 1627-1633.
- COSBY B.J., HORNBERGER G.M., CLAPP R.B. et GINN T.R., 1984 - A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Wat. Resour. Res.* 20, 6, 682-690.
- GERMANN P.F. et BEVEN K., 1985 - Kinematic wave approximation to infiltration into soils with sorbing macropores. *Water Resour. Res.* 21, 7, 990-996.
- GUPTA S.C. et LARSEN W.E., 1979 - Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter per cent and bulk density. *Wat. Resour. Res.* 15, 6, 1633-1639.
- HAVERKAMP R. et PARLANGE J.Y., 1982 - Predicting water retention curves from particle size distributions. *Soil Sciences*.

- JURY W.A. et SPOSITO G., 1986 - A transfer function model of solute transport through soil I. Fundamental concepts. *Wat. Resour. Res.* 22, 2, 243-247.
- LIGHTHILL M.J. et WHITHAM G.B., 1955 - On kinematic waves. I. Flood movement in long rivers. *Proc. R. Soc. London Ser. A*, 229. 281-316.
- MANICHON H., 1982 - Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : Elaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse de Doct. Ing. INA-PG, 311 p.
- PASSERAT de SILANS A., 1986 - Transferts de masse et de chaleur dans un sol stratifié soumis à une excitation en atmosphère naturelle. Thèse Institut Polytechnique de Grenoble.
- PETERSEN G.W., CUNNINGHAM R.L. et MATELSKI R.P., 1968 - Moisture characteristics of pennsylvania soils : I. Moisture retention as related to texture. *S.S.S. Amer. Proc.* 32, 271-275.
- PUCKETT W.B., DANE J.H. et HAJEK B.F., 1985 - Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. *Soil. Sc. S. Amer. Journ.* 49, 831-836.
- SPOSITO G., 1986 - The "physics" of soil water physics. *Wat. Resour. Res.* 22, 9, 835-885.
- VAUCLIN M., 1982 - Infiltration in unsaturated soils. Lecture at NATO. Univ. of Delaware, July 18-27, 50 pages.