

## La simulation mathématique

### Une méthode d'étude des sols salés

Michel RIEU

*Pédologue O.R.S.T.O.M. Mission O.R.S.T.O.M. en Bolivie, Casilla 1199, Cochabamba, Bolivie*

#### RÉSUMÉ

*Une brève évocation des principes de la simulation mathématique du comportement physico-chimique des sols salés ainsi qu'une rapide revue bibliographique sont présentées. A titre d'exemple, la simulation de l'infiltration d'une petite pluie est analysée.*

#### ABSTRACT

*The principles of the mathematical simulation of the physico-chemical processes in saline soils and a short survey of the most important recent works are presented. As an example, the simulation of a little rain infiltration is analysed.*

#### RESUMEN

*Se presentan los aspectos básicos de la simulación matemática de la evolución físico-química de los suelos salinos y los principales estudios recientes al respecto. El ejemplo de la simulación de la infiltración de una pequeña lluvia es analizado.*

La plupart des processus de la pédogenèse se développent trop lentement pour que nous puissions les appréhender autrement qu'en observant leurs effets sur la morphologie des sols.

Le phénomène de la salinisation des sols des zones arides, par contre, peut s'effectuer beaucoup plus rapidement : c'est à l'échelle de l'année que l'on peut constater l'accumulation des sels dans le sol,

la détérioration de sa structure et l'altération de ses argiles. Suivre de près et bien saisir le fonctionnement des mécanismes responsables de l'évolution des sols salés est donc une opération possible.

Mais ce qui est source de connaissances pour le pédologue est aussi cause de préoccupation pour l'agronome qui sait bien qu'une fausse manœuvre peut compromettre définitivement le fragile équilibre

d'un sol situé dans un milieu hostile. Dans des régions où la mise en place d'une infrastructure d'irrigation et de drainage est souvent très onéreuse, la prévision du devenir des sols en matière de salinité est souvent une nécessité.

Ce n'est pas le hasard qui a donné naissance aux premiers modèles de simulation de la salinisation des sols en Arizona avec DUTT en 1962 et en Israël avec BRESLER en 1967.

## 1. LA DÉMARCHE DU MODÉLISATEUR

Ces premières tentatives procédaient d'une démarche restée inchangée jusqu'aux modèles perfectionnés d'aujourd'hui, comme ceux de BRESLER et DAGAN (1979) ou de KOVDA et SZABOLCS (1979) : à la suite de l'étude détaillée du comportement d'un sol, on cherche à le reproduire grâce à un ensemble de calculs exécutés à partir des paramètres du sol étudié et de ceux de son milieu naturel. Ces calculs définissent, en fonction du temps, les mouvements de l'eau dans le sol et les transferts des éléments qu'elle contient en solution.

Dans une deuxième étape, ils permettent d'établir, à intervalles de temps simulé réguliers et pour des strates de sol dont la superposition constitue le profil, l'état salin du sol. Cet état est défini par :

- la composition chimique de la solution du sol,
- le stock de sels cristallisés,
- la composition du complexe échangeable.

La validité des calculs est alors testée en reproduisant des processus réels, observés et mesurés sur le terrain. Une fois le « calage » du modèle réalisé, on procède à la simulation proprement dite, soit en faisant de la prévision à long terme, soit en se livrant à l'étude détaillée d'un mécanisme difficilement observable sur le terrain.

## 2. LE MODÈLE ET SON OBJET

Les modèles de simulation de l'évolution des sols salés sont donc de type convectif, basés sur la circulation des flux hydriques à travers un substrat poreux. Ils font en outre intervenir le calcul de l'équilibre thermodynamique entre une solution d'électrolytes et une masse minérale, ainsi que celui de l'échange de cations entre cette même solution et le complexe absorbant. L'analyse mathématique de ces mécanismes est complexe mais les principes en sont connus et la puissance de calcul de l'ordinateur permet d'en venir à bout.

Bien que la mise en équations de l'évolution d'un sol représente une abstraction, réalisée au prix d'approximations nombreuses, le sol lui-même intervient aux trois étapes du modèle : par ses caracté-

ristiques hydrauliques, conductivité hydraulique et diffusivité, qui sont la base de l'étude des flux hydriques, par sa composition minéralogique et les propriétés de ses argiles, dont la connaissance est indispensable au calcul de l'état salin du sol. La mesure, sur le terrain ou au laboratoire, de ces données ainsi que l'évaluation des paramètres agro-climatiques du milieu sont souvent délicates mais doivent être effectuées avec la plus grande précision possible : la validité des calculs de simulation sera toujours fonction de la qualité des données initiales.

Depuis 15 ans, les différents aspects des modèles de simulation des sols salés ont fait l'objet de très nombreuses études qui ont permis de perfectionner tant l'approche théorique des mécanismes que la mesure des paramètres du sol. Je citerai en particulier les travaux de DUTT, TANJI, PAUL, TERKELTOUB *et al.* (1966, 1967 a, 1967 b, 1971, 1972 a, 1972 b, 1972 c); BIGGAR, NIELSEN, WARRICK *et al.* (1967, 1971, 1972, 1973, 1976, 1977); BRESLER, DAGAN, HANKS *et al.* (1969 a, 1969 b, 1973, 1975, 1979); STAPLE (1969); HILLEL et GARDNER (1970), OSTER et MC NEAL (1971); SAWHNEY, STARR et PARLANCE (1974, 1976).

Les publications en langue française, de leur côté, tiennent une place de haut niveau : FEODOROFF (1969, 1973), VACHAUD, DAIAN, ROYER, VAUCLIN, GAUDET *et al.* (1967, 1971 a, 1971 b, 1972, 1974, 1976, 1977), ont réalisé des études fondamentales sur la dynamique de l'eau et les propriétés hydrauliques des sols. Avec les travaux de FRITZ, DROUBI, GAC, DOSSO, TARDY *et al.* (1975, 1976 a, 1976 b, 1976 c, 1976 d, 1977, 1980) nous disposons de modèles très élaborés pour la simulation de l'équilibre des solutions au contact d'une masse minérale. Les études de LAUDELOUT, DUFÉY, CHATTAOUI, *et al.* (1965 a, 1965 b, 1968, 1970, 1977 a, 1977 b, 1979) sur la thermo dynamique des réactions d'échange et la mesure des coefficients de sélectivité nous donnent enfin le moyen de simuler les équilibres d'échange.

## 3. EXEMPLE DE SIMULATION MATHÉMATIQUE

A l'O.R.S.T.O.M. aussi, nous travaillons à la mise au point d'un modèle mathématique permettant de simuler la salinisation et l'alcalinisation du sol, sous végétation naturelle ou culture irriguée.

C'est aussi un modèle de type convectif, très proche de celui publié par DUTT en 1972, mais d'une écriture plus simple afin que des non-spécialisés puissent l'utiliser sans trop de difficultés (RIEU, 1978). Il est encore incomplet : sous sa forme actuelle, il permet seulement de rendre compte de l'évolution de la teneur en eau et de la composition chimique brute de la solution du sol. Le double volet de calculs

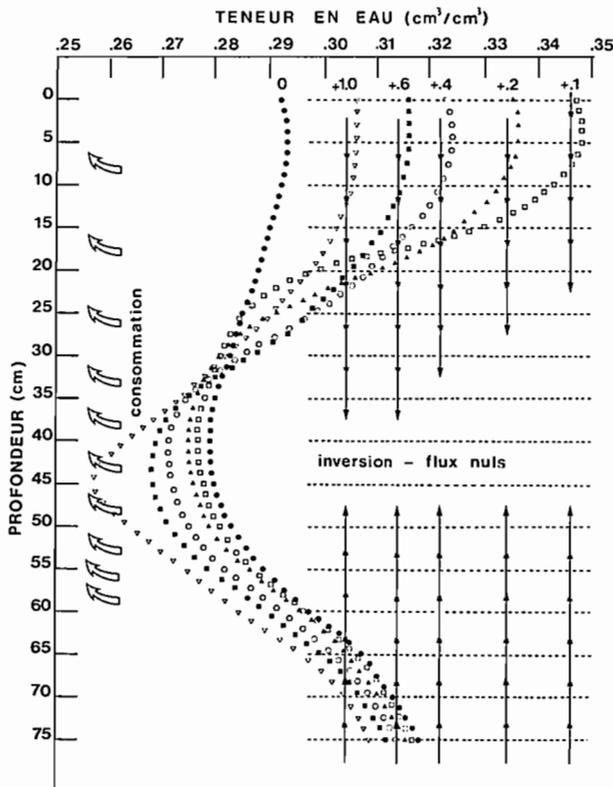


Fig. 1. — Simulation de l'infiltration d'une pluie de 2,6 mm (Polders de Bol). +.1; +.2; +.4; +.6; +1.0 : respectivement 0,1; 0,4; 0,6 et 1,0 jour après la pluie.

permettant de traiter l'équilibre thermo-dynamique de cette solution avec le sol lui-même n'est pas encore intégré au programme.

Toutefois, l'on peut déjà simuler le comportement hydraulique du sol pendant une année reproductible, en prenant en compte, pour chaque demi-heure de temps simulé en moyenne, tous les événements agronomiques ou climatiques qui peuvent survenir, aussi infimes soient-ils (Programme TRASOL; RIEU, 1980).

L'exemple présenté ici concerne une petite pluie de 2,6 mm tombant sur les polders de Bol, sur la rive N.-E. du lac Tchad pendant la culture du coton. Le sol est meuble et très perméable jusqu'à environ 50 cm de profondeur. Au-dessous, sa compacité augmente et sa conductivité hydraulique est beaucoup plus faible.

Trois faits, prévisibles mais difficilement observables sur le terrain pour un apport d'eau aussi faible, sont précisés dans le temps et l'espace par les calculs de la simulation (fig. 1) :

(a) La pluie n'affecte que les 35 premiers cm du sol :

— Le front d'humectation atteint 20 cm de profondeur, 0,1 jour (2 h 24') après l'apport d'eau, 30 cm au bout de 0,4 jour (9 h 36') et enfin la profondeur maximum de 35 cm après 0,6 jour (14 h 24').

— On note que, pendant que le front d'humectation se propage en profondeur, les 20 cm supérieurs se dessèchent progressivement.

(b) Il ne se passe rien que de très normal au-dessous de 50 cm. En raison de la consommation d'eau de la végétation, le sol se dessèche régulièrement, mais très lentement, du fait de la faible conductivité hydraulique de la partie inférieure du sol.

(c) On distingue nettement une zone où les flux changent de sens et s'annulent. (on a considéré comme négligeables les flux inférieurs à 0,1 cm/jour, soit 0,1 mm/0,1 jour, en valeur absolue).

— L'emplacement de la zone de flux nul traduit la morphologie du sol simulé : les flux descendants traversent rapidement la partie supérieure du sol et viennent buter contre la partie inférieure qui fonctionne indépendamment comme une mèche à partir de la nappe phréatique située 1,5 m plus bas.

— La zone de flux nul traduit aussi un fait agronomique : en raison de la compacité des horizons inférieurs, le système racinaire des cotonniers a tendance à se développer à la limite entre les deux niveaux, vers 50 cm de profondeur.

Or, à partir de 0,6 jour après l'apport d'eau, les flux calculés à 40 et 45 cm de profondeur sont strictement nuls. On notera qu'à ce niveau, la teneur en eau est alors devenue inférieure à 0,27 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> : c'est le point de flétrissement mesuré pour le sol étudié, qui est évidemment atteint d'abord là où la consommation en eau est la plus élevée. Or le texte du programme de calcul ne contient aucune instruction tendant à annuler les flux si la teneur en eau est inférieure au point de flétrissement.

Les calculs de simulation confirment ainsi qu'au-delà de pF 4,2 il n'y a plus d'échange d'eau sous forme de flux hydriques : on entre alors dans le domaine de la diffusion et de la vaporisation.

Enfin, l'existence, au sein du profil, d'un niveau desséché où confluent les solutions provenant de la surface et de la nappe laisse prévoir une accumulation de sels à moyenne profondeur. Il suffit de creuser un profil sur les polders pour le constater à l'œil nu.

Ainsi un modèle de simulation permet non seulement de prévoir à long terme le degré de salinité des sols d'un périmètre irrigué mais il facilite aussi des études détaillées à l'échelle du profil.

## Conclusion

La modélisation est-elle la solution d'avenir pour l'étude des sols salés? Certes, les résultats obtenus sont prometteurs. Mais réduire un sol, dont la variabilité latérale ne peut être négligée, à une série d'équations est tout de même une opération hasardeuse.

Sans doute s'orienté-t-on actuellement vers l'analyse statistique des paramètres des sols dont on envisage la simulation (BRESLER et DAGAN, 1979; BIGGAR et NIELSEN, 1976; NIELSEN *et al.* 1973).

Mais on ne pourra pas aller très loin dans cette direction : à quoi bon concevoir des modèles très élaborés si l'on ne dispose pas de moyens de mesure, sur le terrain et au laboratoire, à la hauteur des édifices de calcul que l'on construit?

Enfin, l'on ne simulera bien que ce que l'on a bien observé. Loin d'être la panacée, les modèles de simulation de l'évolution des sols salés ne sont qu'un instrument d'étude et de prévision, précieux certes, mais qui sera toujours précédé par l'œil et le doigt du pédologue devant son profil.

## interventions des participants

J. H. DURAND : Dans l'étude des sols salés, je n'ai pas entendu parler de l'origine des sels solubles. C'est important, car lorsqu'un aménagement a été réalisé, il serait désolant que les sels soient constamment renouvelés.

D<sup>r</sup> HALLSWORTH : Le problème des sols salés d'Australie est étroitement associé à l'âge des surfaces où les sels se sont accumulés depuis de nombreuses années. La déforestation qui accompagne la mise en valeur entraîne une forte augmentation des quantités d'eau infiltrées dans le sol, qui vont entraîner les sels solubles vers les vallées, provoquant ainsi une salinisation. En Australie Occidentale, 150 000 ha ont été perdus sous l'effet de ce processus.

Un autre problème est celui de l'affleurement de couches géologiques salines sur les flancs des vallées. Il conduit à la formation de « measles » (= rougeole), taches de sols salés sur lesquelles aucune plante cultivée ne peut se développer, et qui sont fréquemment le point de départ du ravinement.

RÉPONSE DE G. AUBERT : Dans les régions d'Afrique du Nord où les sols salsodiques ont été étudiés, il existe des situations analogues à la 2<sup>e</sup> qui vient d'être indiquée par le D<sup>r</sup> HALLSWORTH : dans les parties moyennes sinon sommitales des collines bordant des vallées comme le Bas-Chelif, la Moyenne-Medjerda, etc., se trouvent des niveaux de marnes salées, qui, directement, en fournissant une partie des alluvions de la vallée, ou indirectement, en livrant du sel aux oueds qui y prennent leur source, enrichissent en éléments salins les sols et les nappes phréatiques de ces zones basses.

J. VIELLEFON : Il faut insister sur l'intérêt du dialogue entre les concepteurs des modèles de simulation et les pédologues confrontés aux techniques de mesure sur le terrain.

En particulier, il convient de dimensionner les compartiments des modèles à l'échelle des méthodes de contrôle paramétrique utilisées.

M. GIRARD : Vous avez parlé de durée de calculs de 5 heures. Quels sont les ordinateurs utilisés?

Réponse : Il s'agit de petits ordinateurs de 24 K de mémoire centrale.

G. AUBERT : Malgré tout ce qui a été déjà réalisé comme recherches sur ces sols salsodiques et dont le dernier état vient de nous être exposé par C. CHEVERRY et M. RIEU, ainsi qu'au cours de la discussion qui a suivi, certains points doivent encore être approfondis, me semble-t-il. J'en vois trois : la structure des sols à alcali, l'influence édaphique des sols salsodiques et les méthodes à utiliser pour leur amélioration.

### 1. *Structure des sols à alcali.*

Trop souvent, nous savons mal la reconnaître, ainsi que ses variations aux différentes périodes de l'année; il nous faut étudier plus en détail l'influence des divers sels, des types d'argile, sur le plan minéralogique et sur celui de leur environnement cationique, et des différentes matières organiques qui peuvent s'y développer, comme cela a été fait en Tunisie par le D<sup>r</sup> GALLALI. Cela nécessite des observations de terrain, en de nombreux points, comme des expérimentations en parcelles et au laboratoire. Une meilleure compréhension de la dynamique structurale de ces sols concourra certainement à l'établissement de modèles mathématiques encore plus proches de la réalité.

### 2. *Influence édaphique des sols salsodiques.*

Elle est relativement bien connue, grâce aux travaux de nombreux agronomes, phytosociologues et physiologistes, vis-à-vis des principales cultures, encore qu'elle puisse varier en fonction des conditions climatiques et que l'effet de la dégradation de la structure n'ait pas été très travaillé. Par contre, assez peu de recherches ont été consacrées aux modifications qu'ils provoquent dans l'activité de leurs micro-organismes et de leur mésofaune dont le rôle se révèle, de plus en plus, très important dans la dynamique des sols. Avec les nouvelles connaissances que nous avons sur la circulation des sels dans ces sols, en particulier à la suite de la mise au point de modèles par les professeurs LAUDELOUT et TARDY, KOVDA et SZABOLCS, par M. RIEU, et que nous obtiendrons sur l'évolution de leur structure et de leur influence édaphique, nous devrons pouvoir apporter plus de précisions dans la typologie de ces sols et dans leur classification.

### 3. *Amélioration des sols salsodiques.*

Les possibilités et modes d'utilisation d'amendements minéraux riches en Ca ou en Fe, ou même d'acide sulfurique et à un moindre degré d'amendements organiques sont assez bien connus (travaux des professeurs SZABOLCS et PETROSSIAN par exemple). Les méthodes de drainage ou d'assainissement par planches bombées nécessitent encore bien des recherches pour les adapter au mieux à chaque type de sols, en particulier dans le cas de sols salsodiques vertiques, très riches en argile du type des smectites, plus ou moins salés et alcalisés à faible ou moyenne profondeur.

Elles dépendent plus spécialement du type de sol, des sels qu'ils contiennent ainsi que de la nature, de la profondeur et des variations de leur nappe phréatique. Sur ce dernier point, les nouvelles méthodes de drainage expérimentées en U.R.S.S. — sous pression ou avec l'emploi de courant électrique — semblent devoir être essayées dans un plus grand nombre de cas, et, probablement propagées. Cette recherche sera mieux réalisée en coopération avec hydrologues et ingénieurs du génie rural que par les pédologues seuls.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BIGGAR (J. W.), NIELSEN (D. R.), 1967. — Miscible displacement and leaching phenomena. In HAGAN (R. M.), HAISE (H. R.) and EDMINSTER (T. W.), « Irrigation of agricultural lands » *Agronomy*, 11 : 254-274 (American Society of Agronomy, Madison, Wisc.).
- BIGGAR (J. W.), NIELSEN (D. R.), 1976. — Spacial variability of leaching characteristics of a field *Soil. Water Resour. Res.*, 12 : 78-84.
- BRESLER (E.), 1967. — A model for tracing salt distribution in the soil profile and estimating the efficient combination of water quality and quantity under varying field conditions. *Soil Sci.*, 104 : 227-233.
- BRESLER (E.), KEMPER (W. A.), HANKS (R. J.), 1969. — Infiltration, redistribution and subsequent evaporation of water from soil as affected by wetting rate and hysteresis. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 33 : 832-840.
- BRESLER (E.), 1973. — Simultaneous transport of solutes and water under transient unsaturated flow conditions. *Water Resour. Res.*, 9 : 975-986.
- BRESLER (E.), 1975. — Two-Dimensional transport of solutes during non-steady infiltration from a trickle source. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 39 : 604-613.
- BRESLER (E.) and DAGAN (G.), 1979. — Solute dispersion in unsaturated heterogeneous soil at field scale : II. Applications. *Soil Sci. Soc. Amer. Jour.*, 43 : 467-472.
- CHATTAOUI (T.), DUFÉY (J. E.), LAUDELOUT (H.), 1977. — Simulation physique et mathématique du mouvement des sels dans les sols de la haute vallée de la Medjerdah de Tunisie. *Sols de Tunisie*, 9 : 108-147.
- DAGAN (G.), BRESLER (E.), 1979. — Solute dispersion in unsaturated heterogeneous soil at field scale : I. Theory. *Soil Sci. Soc. Amer. Jour.*, 43 : 461-467.
- DAIAN (J. F.), VACHAUD (G.), 1971. — Méthode d'évaluation du bilan hydrique *in situ* à partir de la mesure des teneurs en eau et des succions. Trans. of Symposium on isotopes and radiation in soil-plant relationships. I.A.E.A. Vienne, 1971 : 649-668.
- Dosso (M.), 1980. — Géochimie des sols salés et des eaux d'irrigation. Aménagement de la basse vallée de l'Euphrate en Syrie. Thèse Doct. Ing., Toulouse, 181 p.
- DROUBI (A.), 1976. — Géochimie des sols et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermo dynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. Thèse Doct. Ing. Strasbourg et *Mém. Sci. Géol.*, 46, 177 p.
- DROUBI (A.), FRITZ (B.), TARDY (Y.), 1976. — Équilibres entre minéraux et solutions. Programmes de calcul appliqués à la prédiction de la salure des sols et des doses optimales d'irrigation. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, vol. XIV : 13-38.
- DROUBI (A.), CHEVERRY (Cl.), FRITZ (B.), TARDY (Y.), 1976. — Géochimie des eaux et des sels dans les sols des polders du lac Tchad : Application d'un modèle thermodynamique de simulation de l'évaporation. *Chemical Geology*, 17 : 165-177.
- DUFÉY (J. E.), PETIT (C.-M.), GOBLET (Y.), LAUDELOUT (H.), 1979. — Modélisation des équilibres physico-chimiques d'échange et de précipitation dans les systèmes sol-eau-électrolyte. *Ann. Agro.*, 30 : 53-62.
- DUTT (G. R.), 1962. — Prédiction of the concentration of solutes in soil solutions for soil systems containing Gypsum and exchangeable Ca and Mg. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 26 : 341-343.
- DUTT (G. R.), TERKELTOUB (R. W.), RAUSCHKOLB (R. S.), 1972. — Prediction of gypsum and leaching requirement for sodium affected soils. *Soil Sci.* 114 : 93-103.
- DUTT (G. R.), SHAEFFER (M. J.), MOORE (W. J.), 1972. — Computer simulation model of dynamic bio-physico-chemical processes *en soils*. *Univ. of Ariz., Techn. Bul.* 196, Tucson 1972.
- FEODOROFF (A.), BALLIF (J. I.), 1969. — Étude de l'infiltration de la pluie *in situ* à l'aide de tensiomètres. *Ann. Agro.*, 20 : 475-594.
- FEODOROFF (A.), GALULA (E.), 1973. — Conductivité hydrique d'un sol non saturé. *Science du Sol*, 3 : 163-175.
- FRITZ (B.), 1975. — Étude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. Thèse Doct. Ing. Strasbourg et *Mém. Sci. Géol.*, 41, 152 p.
- GAC (J. Y.), DROUBI (A.), FRITZ (B.) et TARDY (Y.), 1977. — Geochemical behaviour of silica and magnesium during the evaporation of waters in Chad. *Chemical Geology*, 19 : 215-228.
- GAUDET (J.-P.), HEGAT (H.), VACHAUD (G.), WIERENGA (P.-J.), 1977. — Solute transfer, with exchange between mobile and stagnant water, through unsaturated sand. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 41 : 665-671.

- HANKS (R. J.), KLUTE (A.), BRESLER (E.), 1969. — A numeric method for estimating infiltration, redistribution drainage and evaporation of water from soil. *Water Resour. Res.*, 5 : 1064-1069.
- HILLEL (D.), GARDNER (W. R.), 1970. — Transient infiltration into crust topped profiles. *Soil Sci.*, 109 : 69-76.
- KOVDA (V. A.), SZABOLCS (I.), 1979. — Modelling of soil salinization and alkalization. *Agrokemia es Talajtan* 28 (Suppl.), 208 p.
- LAUDELOUT (H.), THOMAS (H. C.), 1965. — The effect of water activity on ion exchange selectivity. *J. Phys. Chem.*, 69 : 339-340.
- LAUDELOUT (H.), 1965. — A unified treatment of two ion-exchange formulations commonly used in soil science, in plant nutrient supply and movement. *Techn. Rep.*, ser. Mo 48, I.A.E.A., Vienne 1965 : 20-24.
- LAUDELOUT (H.), VAN BLADEL (R.), BOLT (G. H.), PAGE (A. L.), 1968. — Thermodynamics of heterovalent cation exchange reaction in a montmorillonite clay. *Trans. Faraday Soc.*, 64 : 1477-1488.
- LAUDELOUT (H.), 1970. — Cation exchange in soils. In *Sorption and Transport Processes in Soils, S.C.J. Monogr.*, 37 : 33-39.
- LAUDELOUT (H.), DUFÉY (J. E.), 1977. — Analyse numérique des expériences de lixiviation en sol homogène, *Ann. Agron.*, 28 : 65-73.
- NIELSEN (D. R.), BIGGAR (J. W.), COREY (J. C.), 1972. — Application of flow theory to field situations. *Soil Sci.* 113 : 254-263.
- NIELSEN (D. R.), BIGGAR (J. W.) and ERH (K. T.), 1973. — Spatial variability of field measured soil-water properties. *Hilgardia*, 42 : 215-260.
- OSTER (J. D.), Mc NEAL (B. L.), 1971. — Computation of soil solutions composition variation with water content for desaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 35 : 436-442.
- PAUL (J.-L.), TANJI (K. K.), ANDERSON (W. A.), 1966. — Estimating soil and saturation extract composition by a computer method. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 30 : 15-17.
- RIEU (M.), 1978. — Éléments d'un modèle mathématique de prédiction de la salure dans les sols irrigués. Application aux polders du Tchad. Thèse Doct. Spec. Toulouse, 134 p.
- RIEU (M.), 1980. — Simulation mathématique des flux hydriques et prédiction de la salinité dans les sols irrigués. Initiations et Documents Techniques O.R.S.T.O.M. (sous presse).
- ROYER (J.-M.), VACHAUD (G.), 1974. — Détermination de l'évapotranspiration et de l'infiltration par mesure des teneurs en eau et des suctions. *Bull. Sciences Hydrol.*, 19 : 319-336.
- SAWHNEY (Bl.), PARLANGE (J. Y.), 1974. — Two dimensional water infiltration, a trench in unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 38 : 867-871.
- STAPLE (W. J.), 1969. — Comparison of computed and measured moisture redistribution following infiltration. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 33 : 840-847.
- STARR (J. L.), PARLANGE (J. Y.), 1976. — Solute dispersion in saturated soil columns. *Soil Sci.*, 121 : 364-372.
- TANJI (K. K.), DUTT (G. R.), PAUL (J.-L.), DONEEN (L. D.), 1967. — Quality of percolating water : II. A computer method for predicting salt concentrations in soils at variable moisture contents. *Hilgardia*, 38 : 307-318.
- TANJI (K. K.), DONEEN (L. A.), PAUL (J.-L.), 1967. — Quality of percolating water. III : Prediction of the quality of waters percolating through stratified substrata, as predicted by computer analyses. *Hilgardia*, 38 : 319-347.
- TANJI (K. K.), DONEEN (L. D.), FERÉY (G. V.), AYERS (R. S.), 1972. — Computer simulation analysis on reclamation of salt-affected soils in San Joaquin Valley, California. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36 : 127-133.
- TARDY (Y.), GARRELS (R.), 1976. — Prediction of Gibbs energies of formation. I. Relationships among Gibbs energies of formation of hydroxydes, oxydes and aqueous ions. *Geochem. et Cosmochem. Acta*, 40 : 1051-1056.
- TERKELTOUB (R. W.), BABLOCK (K. L.), 1971. — A simple method for predicting salt movement through soil. *Soil Sci.*, 111 : 182-187.
- VACHAUD (G.), 1967. — Determination of the hydraulic conductivity of unsaturated soils from an analysis of transient flow data. *Water Resour. Res.*, 3 : 697-705.
- VACHAUD (G.), THONY (J. L.), 1971. — Hysteresis during infiltration and redistribution in a soil column at different initial water content. *Water. Resour. Res.*, 7 : 111-127.
- VACHAUD (G.), VAUCLIN (M.), WAKIL (M.), KHANJI (D.), 1972. — Effects of air pressure during water flow in an unsaturated, stratified vertical column of soil. *Proc. of 2nd Sympos. IAHR-ISSS, Univ. of Guelph, Ontario, Canada 1* : 357-377.
- VAUCLIN (M.), KHANJI (D.), VACHAUD (G.), 1976. — Étude expérimentale et numérique du drainage et de la recharge des nappes à surface libre avec prise en compte de la zone non saturée. *J. Mec.*, 15 : 307-348.
- WARRICK (A. W.), BIGGAR (J. W.), NIELSEN (D. R.), 1971. — Simultaneous solute and water transfer for an unsaturated soil. *Water Resour. Res.*, 7 : 1216-1225.
- WARRICK (A. W.), MULLEN (G. J.), NIELSEN (D. R.), 1977. — Prediction of the soil water flux based upon field measured soil water properties. *Soil Sci. Soc. Amer. Jour.*, 41 : 14-19.