

SIMULATION DU COMPORTEMENT HYDRIQUE DU SOL: D'UN MILIEU POREUX CONTINU À UNE STRUCTURE FRACTALE

E. PERRIER, C. MULLON
Laboratoire d'Informatique Appliquée.
ORSTOM, 70-74 route d'Aulnay, 93143 Bondy

Résumé : Deux logiciels de simulation des écoulements de l'eau dans le sol sont présentés. Le premier est basé sur la résolution numérique d'une équation différentielle connue, régissant les transferts hydriques dans un milieu poreux continu. Le second permet de réaliser des "expériences numériques" sur des questions encore ouvertes, à savoir l'influence des propriétés morphologiques et structurales du sol sur son comportement hydrique : le sol est modélisé comme un ensemble d'agrégats et de pores organisés en une structure fractale ; de la simulation de règles élémentaires de comportement sur un grand nombre d'objets au niveau microscopique émergent des propriétés globales, à comparer avec l'expérience en laboratoire. Ces deux aspects de l'informatique scientifique, outil de calcul et outil d'aide à la recherche, s'appuient sur une animation graphique permanente qui confère à ces logiciels une dimension pédagogique certaine.

PREMIER TYPE DE MODELISATION : LOGICIEL ECOUL

La circulation des fluides dans un milieu poreux est un problème de mécanique enseigné depuis longtemps dans les écoles d'ingénieurs, notamment en hydrogéologie. Elle est régie par des équations différentielles en termes de pression, de conductivités hydrauliques et de teneur en eau. La résolution numérique de cette approche analytique a été possible et rendue opérationnelle grâce aux moyens de calcul informatique. Elle nécessite la connaissance de deux fonctions caractéristiques du comportement hydrodynamique d'un sol donné (relation pression de l'eau/teneur en eau, et relation conductivité hydraulique/teneur en eau), obtenues sur le terrain ou en laboratoire par le suivi d'expériences d'infiltration préalables.

Dans le logiciel ECOUL, on entre les paramètres obtenus, puis un état hydrique initial sur un profil vertical de sol et enfin les conditions aux limites (nature de l'apport d'eau en surface, pression de l'eau en profondeur). La simulation des écoulements d'eau est alors effectuée. La résolution sous-jacente de l'équation différentielle est visualisée par la représentation graphique de l'évolution du profil hydrique à chaque itération. Les discrétisations spatiales et temporelles deviennent concrètes et didactiques.

Par exemple, sur la figure 1, cliché instantané d'une simulation, on voit la succession de plusieurs profils d'humidité (largeur proportionnelle au pourcentage de teneur en eau) obtenus à la suite de l'apport en surface d'une charge d'eau constante. La courbe d'intensité de l'infiltration au cours du temps est tracée.

Le logiciel peut être utilisé en phase de validation par comparaison entre profils d'humidité théoriques et observés sur une expérience de contrôle, puis en termes prévisionnels lorsque les résultats sont jugés satisfaisants.

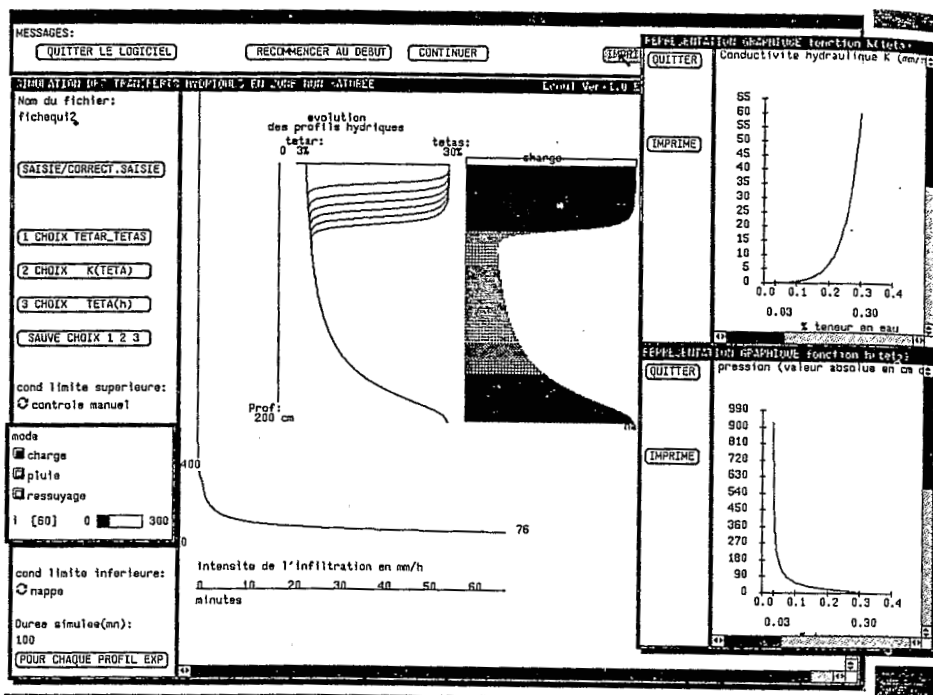


Fig.1. Infiltration d'une charge d'eau dans un profil vertical de sol (ECOUL).

DEUXIEME TYPE DE MODELISATION : LOGICIEL VOROSOL

Deux problèmes ouverts sont sources de limitations pour l'approche traditionnelle précédente. D'une part la détermination concrète des deux fonctions caractéristiques précitées est difficile et coûteuse, et plusieurs pédologues pensent qu'elle pourrait être déduite des nombreuses observations morphologiques et structurales dont ils disposent. D'autre part le premier type de modélisation n'est valable que dans un sol rigide, alors que la déformabilité du sol en fonction de sa teneur en eau est un phénomène reconnu. En particulier, un dispositif de laboratoire a récemment été mis au point au laboratoire d'hydrophysique de l'ORSTOM à Bondy pour le suivi en temps réel du retrait d'échantillons de sol au cours du dessèchement (acquisition automatique des mesures des capteurs sur ordinateur). La forme des courbes de retrait et de pression obtenues indique au chercheur des phases nettes de comportement hydrique distincts. De nouvelles hypothèses sont émises, sur l'organisation du milieu et sur son fonctionnement (BRAUDEAU, 1988).

L'ordinateur devient alors un outil d'aide à la recherche de nouveaux modèles de fonctionnement.

Si les caractéristiques hydrodynamiques d'un sol sont essentiellement déterminées par la structure du sol, il convient de prendre sa loupe. La quantification étant malaisée à l'échelle microscopique, une alternative consiste à réaliser des "expériences numériques" pour déterminer les conditions d'émergence des processus hydrodynamiques constatés macroscopiquement au laboratoire.

Une représentation informatique du milieu poreux particulier que constitue le sol est alors proposée. Le modèle présenté crée des objets informatiques reproduisant schématiquement les principaux éléments structurants du sol, en l'occurrence des agrégats de terre et des pores (cavités remplies d'air ou d'eau). L'organisation du sol étant pressentie comme fractale (Rieu, 1990), différents niveaux d'emboîtements sont réalisés, suivant un principe d'auto-similarité interne. Comme on le voit sur la figure 2, une partition de l'espace est obtenue à partir de germes aléatoires ou non (algorithme de Voronoi).

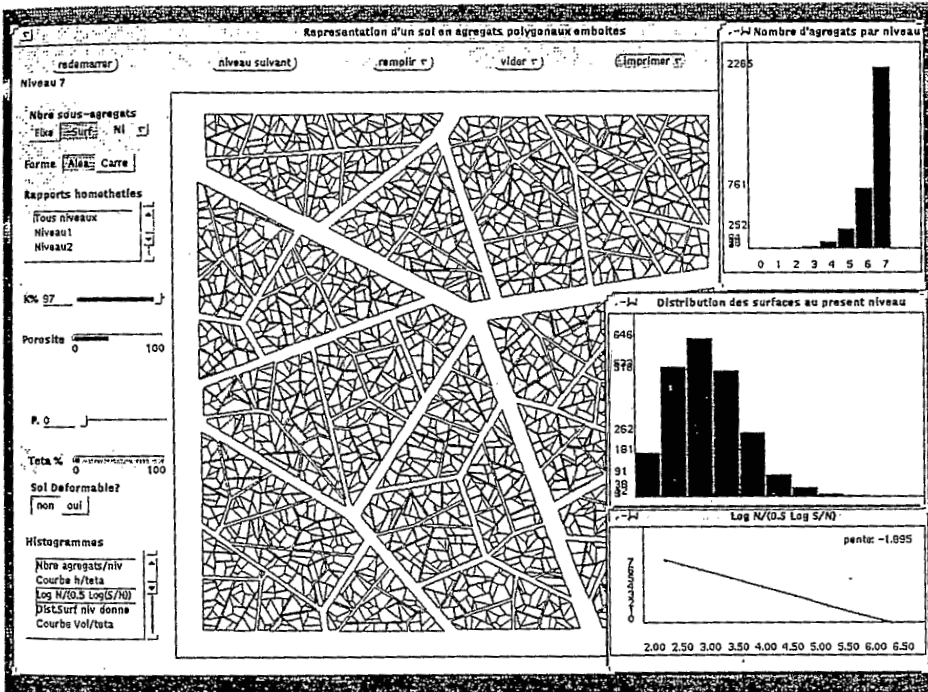


Fig. 2. Représentation fractale de la structure microscopique du sol.

Différentes formes d'agrégats peuvent être ainsi générées. Puis, l'éclatement de chaque agrégat en sous agrégats est réalisé suivant le même principe. A chaque niveau de décomposition, des pores sont générés par une réduction (homothétie) des agrégats initiaux. La plausibilité d'une telle représentation peut être discutée au vu d'un certain nombre d'indicateurs, histogrammes des distributions de la porosité et des tailles d'agrégats.

Des règles élémentaires régissent le comportement des différents objets aux différents niveaux de la structure. La simulation d'un grand nombre d'objets va permettre de faire apparaître un comportement global du système, et de tester ainsi la cohérence des hypothèses de comportement émises. Pour une pression de l'eau dans le sol donnée, les pores d'une taille donnée sont susceptibles ou non d'être remplis (Loi de Laplace en physique des fluides).

Suivant la connectivité du réseau de pores et les conditions aux limites, des chemins préférentiels, conducteurs d'eau, s'établissent. D'ores et déjà, la simulation de plusieurs cycles d'humidification et de dessèchement fait apparaître un phénomène d'hystérésis pour la relation pression-teneur en eau. Cette différence entre les courbes obtenues en drainage et en imbibition est un phénomène bien connu expérimentalement.

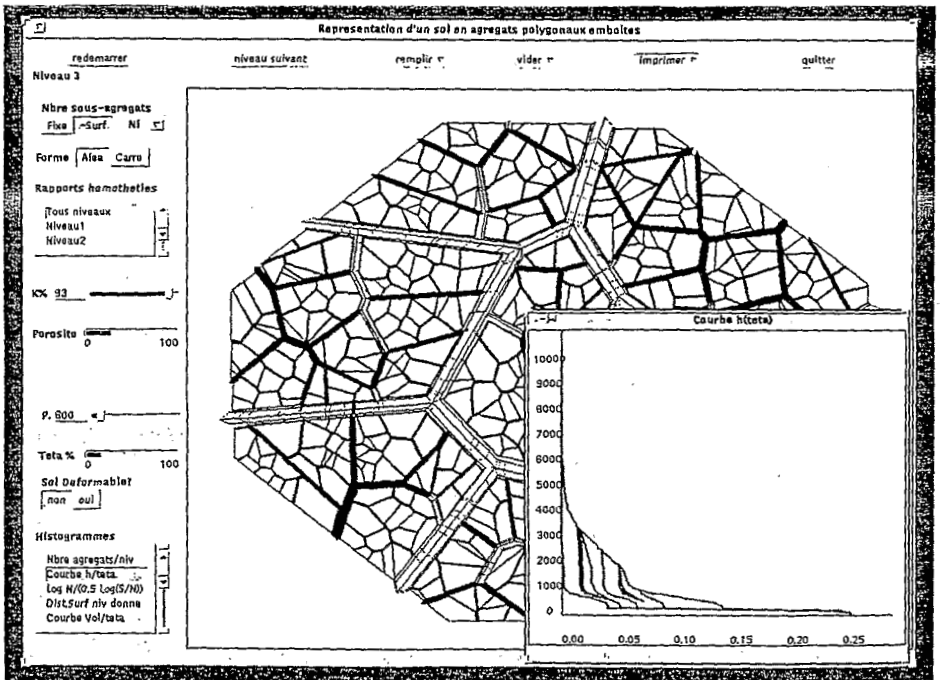


Fig. 3. Simulation de l'hystérésis de la relation pression-teneur en eau.

Par ailleurs des règles de déformation du milieu en fonction de sa teneur en eau sont introduites aux différents niveaux de la structure fractale. Plusieurs hypothèses sont émises par les chercheurs du domaine. Plusieurs scénarios possibles vont être envisagés. Les premières simulations témoignent que l'allure des courbes globales de variation de volume en fonction de la teneur en eau (figure 4) varie fortement avec le scénario envisagé. On peut donc espérer être en mesure de faire sans tarder des discriminations instructives.

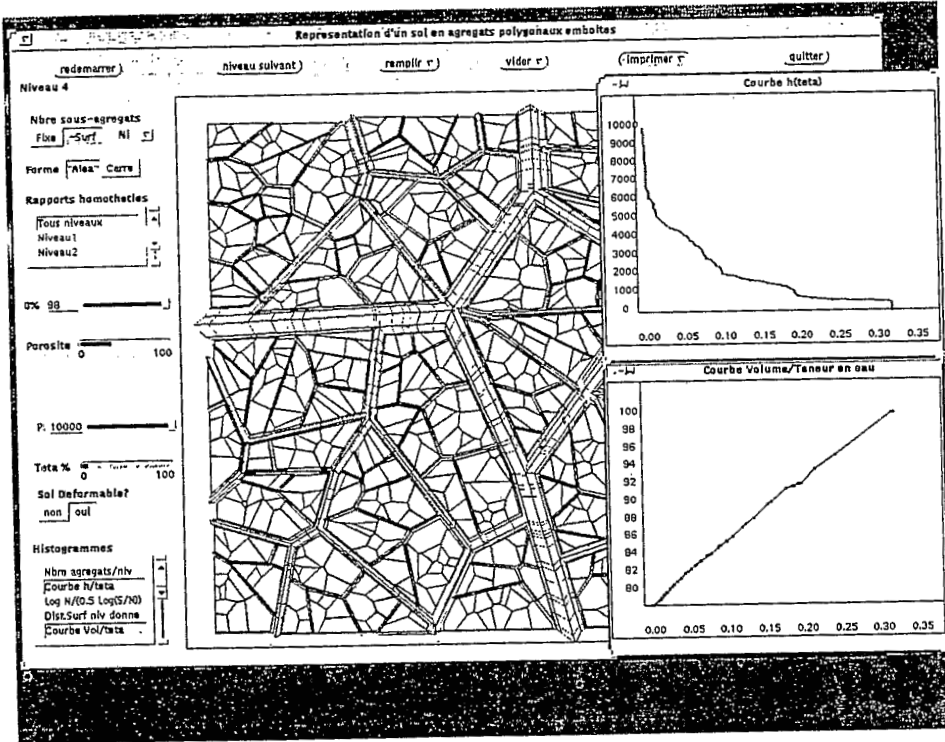


Fig. 4. Simulation du retrait d'un échantillon de sol au cours de son dessèchement.

CONCLUSION

Ces logiciels se veulent une démonstration du caractère didactique des simulations utilisant des animations graphiques. L'esprit dans lequel ils ont été conçus, à savoir la recherche de communication entre le modélisateur mathématique et le chercheur de terrain, semble pouvoir être à l'origine d'applications similaires en géologie ou biologie, adaptées au transfert des connaissances au lycée. De plus, le second logiciel VOROSOL est l'illustration d'une nouvelle façon de modéliser le réel, issue de développements récents de l'informatique. On représente un milieu comme un ensemble d'objets autonomes, dotés d'un comportement propre, interagissant entre eux et avec leur environnement. Les simulations recréent et permettent d'étudier une dynamique globale qui peut être complexe. Le pouvoir explicatif de telles simulations nous permet d'envisager leur utilisation systématique dans l'enseignement, la création d'outils adaptés (éventuellement un langage informatique) et une transformation du domaine de l'E.A.O.

Références

- E. PERRIER (1989). ECOUL.version 1.0. Simulation numérique et graphique des transferts hydriques dans un sol non saturé. (Mode d'emploi).
M. RIEU et G. SPOSITO (1990) . Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties. (Soumis à *Soil Sci. Soc. Amer. J.*).
E. BRAUDEAU (1988). Essai de caractérisation quantitative de l'état structural d'un sol basé sur l'étude de la courbe de retrait. *C.R. Acad. Sci. Paris, t.307, Série II, 1933, 1936.*