

Rôle des propriétés physiques des sols et de leur variabilité spatiale sur les flux d'eau

D. King⁽¹⁾, A. Bruand⁽²⁾, I. Cousin⁽¹⁾ et J. Hollis⁽³⁾

(1) INRA, Centre de recherche d'Orléans. Unité de Science du Sol, BP 20619, 45166 Olivet, France

(2) ISTO, Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, Université d'Orléans, Géosciences, BP 6759, 45067 Orléans Cedex, France

(3) NSRI, Cranfield University, Silsoe College, Bedfordshire, MK45 4DT Silsoe, UK

RÉSUMÉ

Les sols ont un rôle régulateur évident sur les flux d'eau au travers de leurs propriétés hydrodynamiques qui agissent sur les processus d'infiltration, de stockage et de ruissellement. Ces propriétés influencent également la qualité de l'eau puisque les échanges aux interfaces sont conditionnés par les temps de transfert. La gestion de l'eau dans les sols a longtemps été la préoccupation de la production agricole tant pour limiter les excès d'eau (drainage) que pour palier les insuffisances climatiques (irrigation). Les nouveaux objectifs environnementaux impliquent une réactualisation des connaissances sur les propriétés physiques des sols, notamment avec la prise en compte de leur variabilité spatiale aux différentes échelles.

Le présent article se focalise sur les verrous actuels et propose plusieurs champs d'étude en relation avec les nouveaux moyens de mesure désormais à notre disposition. Aux échelles détaillées, il est nécessaire de développer une approche tridimensionnelle de la porosité et des flux hydriques ainsi qu'une meilleure connaissance de l'influence de la nature et de l'histoire des matériaux sur les propriétés physiques. Aux plus larges échelles, la question demeure celle de la généralisation spatiale de mesures ponctuelles et coûteuses. Différentes pistes sont examinées : les méthodes géophysiques non destructives, les fonctions de pédotransfert établies sur des bases déterministes et les nouvelles méthodes de spatialisation numérique combinant des données ponctuelles avec des mesures spatiales et exhaustives.

Enfin, une gestion des risques de dégradation est proposée face aux menaces qui pèsent sur les propriétés physiques des sols : tout d'abord, par une intégration du suivi de ces propriétés dans les systèmes de surveillance des sols à long terme ; ensuite, par une utilisation accrue des outils de gestion de la politique agricole commune pour orienter les pratiques agricoles ; enfin, par le développement d'une modélisation capable d'intégrer des connaissances « incertaines » et peu nombreuses dans la gestion des flux d'eau aux différentes échelles d'espace et de temps. Ces orientations devraient apporter une aide aux acteurs et gestionnaires des territoires qui se trouvent confrontés à la complexité de la diversité et de la variabilité spatiale des sols.

Mots clés

Sols, propriétés physiques et hydriques, variabilité spatiale, gestion de l'eau

SUMMARY

ROLE OF SOIL PHYSIC PROPERTIES AND THEIR SPATIAL VARIABILITY ON WATER FLOWS

Soil have an obvious role in regulating the flows of water thanks to their hydrodynamic properties which play on infiltration, water holding and run-off processes. These properties also influence the water quality since exchanges at interfaces depend on transfer times. The management of groundwater has long been a preoccupation of the agricultural sector, in terms of both limiting excess water (drainage) and overcoming seasonal shortfalls (irrigation). Modern environmental objectives imply updating our knowledge of the physical properties of soil, especially the understanding of its spatial variability at different scales.

The present work focuses on current hurdles to overcome and proposes several areas of investigation in relation to new measurement resources now available. At detailed scales, it is necessary to develop a 3-dimensional approach to porosity and water flows, as well as to better understand the influence of the nature and the history of materials on physical properties. At larger scales, the question remaining is the spatial generalization of costly spot measurements. A number of possibilities are discussed, including non-destructive geophysical methods, pedotransfer functions established on deterministic bases, and new statistical methods combining spot data with spatial and exhaustive measurements.

Finally, risk management is proposed to deal with threats towards the physical properties of soil: initially by the monitoring of these properties in long-term soil surveillance systems; this will be followed by increased use of tools for managing a common agricultural policy to guide agricultural practices; finally, by the development of models that can integrate « uncertain » and sparse knowledge into the management of water flows at different scales of space and time. These orientations should provide assistance to land use managers who are challenged by the complexity of the spatial diversity and variability of soil.

Key-words

Soils, hydrological and physical properties, spatial variability, water management

RESUMEN

PAPEL DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS Y DE SU VARIABILIDAD ESPACIAL SOBRE LOS FLUJOS DE AGUA

Los suelos han un papel regulador evidente sobre los flujos de agua a través de sus propiedades hidrodinámicas que actúan sobre los procesos de infiltración, de almacenamiento y de escurrimiento. Estas propiedades influyen igualmente la calidad del agua porque los intercambios a las interfaces son condicionados por los tiempos de transferencia. La gestión del agua en los suelos fue una preocupación de la producción agrícola tanto para limitar los excesos de agua (drenaje) que para suplir las insuficiencias climáticas. Los nuevos objetivos ambientales implican una reactualización de los conocimientos sobre las propiedades físicas de los suelos, netamente con la toma en cuenta de su variabilidad espacial a diferentes escalas.

Este artículo se focaliza sobre los cerrojos actuales y proponen varios campos de estudio en relación con nuevos medios de medida actualmente a nuestra disposición. A las escalas detalladas, es necesario desarrollar un enfoque tridimensional de la porosidad y de los flujos hídricos así que un mejor conocimiento de la influencia de la naturaleza y de la historia de los materiales sobre las propiedades físicas. A escalas más largas, la pregunta queda la de la generalización espacial de medidas puntuales y costosas. Diferentes pistas son examinadas: los métodos geofísicos no destructivos, las funciones de pedotransferencias establecidas sobre bases deterministas y los nuevos métodos de especialización numérica que combinan datos puntuales y medidas espaciales y exhaustivas.

En fin, se propone una gestión de los riesgos de degradación frente a las amenazas que pesan sobre las propiedades físicas de los suelos a largo plazo; después por una utilización acrecentada de las herramientas de gestión de la política agrícola común para orientar las prácticas agrícolas; en fin, por el desarrollo de una modernización capaz de integrar conocimientos « inciertos y poco numerosos en la gestión de los flujos de agua a diferentes escalas de espacio y de tiempo. Estas orientaciones deberían llevar una ayuda a los actores y administradores de los territorios que se encuentran confrontados a la complejidad de la diversidad y de la variabilidad espacial de los suelos.

Palabras clave

Suelos, propiedades hídricas y físicas, variabilidad espacial, gestión del agua

Le sol est un élément régulateur des flux d'eau dans l'environnement terrestre. Malgré une faible épaisseur, il joue un rôle essentiel d'interface (Robert M., 1996) entre la géosphère, l'atmosphère, la biosphère et l'hydrosphère (nappes phréatiques et cours d'eau). Ses deux principales propriétés vis-à-vis de l'eau sont son aptitude à retenir l'eau (capacité de rétention en eau) et à la transmettre (conductivité hydraulique). Classiquement, ces deux propriétés sont perçues par l'intermédiaire du contrôle qu'elles exercent sur les flux d'eau. Elles agissent en effet directement sur les trois processus que sont l'infiltration, le stockage et le ruissellement. Toutefois, il faut noter que ces propriétés jouent également un rôle important sur la qualité de l'eau puisque les temps de transfert sont directement impliqués dans les variations de composition de l'eau qui se produisent au sein du sol.

Par ailleurs, l'eau qui traverse le sol agit sur ce dernier, notamment sur sa structure de surface et de profondeur (encroûtement superficiel, fissuration). Le système sol évolue ainsi sous l'action de l'eau impliquant par là même une transformation rétroactive de ses propriétés qui modifient de façon dynamique la circulation de l'eau : ruissellement à la surface (Le Bissonnais, 1996; Bajracharya *et al.*, 1999), écoulement de subsurface à composante latérale (Lamotte *et al.*, 1988; Baize, 1989), écoulement préférentiel dans la macroporosité (Ghodrati et Jury, 1992).

Vouloir mieux gérer les flux d'eau, en termes de quantité et de qualité, a conduit par le passé à deux logiques de gestion des sols : soit s'adapter à la nature des sols en distribuant les activités humaines selon la variabilité spatiale de leurs propriétés (exemple du choix d'un assolement), soit tenter de transformer ces propriétés afin de tamponner ou rediriger les flux d'eau (exemple du drainage, et plus généralement du travail du sol). Quelle que soit la logique adoptée, l'action s'avère d'autant plus efficace que l'on connaît les propriétés des sols mises en jeu ainsi que leur variabilité dans l'espace. Or, depuis quelques années, l'utilisation de la modélisation des phénomènes environnementaux à l'échelle des paysages (modèles de cultures, modèles hydrauliques, ruissellement...) met en évidence une insuffisance de connaissances des propriétés physiques des sols. Ces modèles sont en effet très sensibles à ces paramètres du sol alors que l'on ne dispose pas ou de très peu de références capables de rendre compte de la diversité des situations observées.

L'objectif est ici d'examiner les connaissances récemment acquises et les verrons qu'il serait nécessaire d'ouvrir pour accroître notre efficacité d'action sur la régulation des flux d'eau dans les sols en termes de quantité et de vitesse de transfert. Nous aborderons tout d'abord les relations entre les propriétés hydriques du sol et l'organisation de ses constituants. Nous présenterons ensuite l'apport et les limites de nouvelles méthodes pour la mesure et la spatialisation de ces propriétés sur de larges surfaces. Enfin, nous examinerons les menaces qui pèsent sur ces propriétés et les méthodes envisagées pour gérer les risques de dégradation.

RÔLE DES CONSTITUANTS DU SOL ET DE LEUR ORGANISATION SUR LES PROPRIÉTÉS HYDRIQUES

Le sol est un système fortement hétérogène qui présente des niveaux d'organisation emboîtés allant de l'échelle de l'assemblage des constituants élémentaires jusqu'à celle de l'assemblage des horizons pédologiques au sein du paysage. La mesure d'une propriété pose ainsi le problème de l'échelle spatiale aux plans conceptuel et métrologique (Hoosbeek et Bryant, 1992; Blöschl et Sivapalan, 1995). Il s'agit de mesurer un fonctionnement ou un comportement du sol, c'est-à-dire mesurer la variation d'une grandeur d'état en fonction du temps. Si l'on veut agir sur les propriétés du sol, il est nécessaire de comprendre les mécanismes en cause et la hiérarchie des facteurs qui sont à l'origine des gammes de variabilité observée.

Une première approche consiste à étudier les liens entre la géométrie du système poral en trois dimensions et les propriétés de rétention et de conductivité (Delerue, 2001; Cousin *et al.*, 1996). L'objectif est de mettre en évidence les gammes de diamètre de pores en jeu et de vérifier si les modèles simplifiés utilisés dans les lois de l'hydraulique sont une bonne représentation de la complexité observée. Un autre objectif, plus pragmatique, est d'évaluer le volume élémentaire représentatif (VER) qui permettra d'assurer la cohérence nécessaire entre les échelles de mesure et de modélisation (Vogel et Cousin, 2002) (*figure 1*). Dans de nombreux cas, ce sont autant les interfaces entre les volumes pédologiques qui contrôlent les flux que les propriétés intrinsèques de ces volumes. C'est le cas par exemple des croûtes de battance (Duley, 1939; Bristow *et al.*, 1995). Il est donc essentiel de privilégier une approche intégrative à l'échelle des phénomènes observés.

Une seconde approche cherche à identifier le rôle joué par les constituants du sol sur l'organisation des systèmes observés et par voie de conséquence sur les propriétés mesurées (Bruand *et al.*, 1988; Bruand *et al.*, 1994). La composition granulométrique et la teneur en matière organique sont les composants classiquement étudiés. Toutefois, la nature de ces composants (type de minéraux argileux, environnement cationique, nature des liaisons organominérales) joue un rôle essentiel sur la structure du sol et sa stabilité (*figure 2*). Enfin, l'histoire des matériaux, leur mise en place, leur évolution sous l'action des facteurs pédogénétiques et surtout leur ré-organisation sous l'action des pratiques culturelles modifient intensément la géométrie des assemblages (Richard *et al.*, 2001). L'apparente diversité des propriétés physiques des sols ne peut être comprise, encore moins maîtrisée, sans un minimum de connaissances de l'action des constituants et leur histoire.

Ces deux approches complémentaires intègrent des phénomènes rétroactifs sous l'action de l'eau. Le système poral n'est pas rigide et se déforme au cours du temps soit par retrait/gonflement, soit par réorganisation des assemblages. Dans le cas de systèmes à faible stabilité, la structure du sol peut considérablement évoluer et modifier ainsi de façon drastique les propriétés hydriques des sols

Figure 1 - Effet de la taille de l'échantillon sur la mesure de la porosité (d'après Vogel et al., 2002)

Figure 1 - Effect of the sample size on the porosity measurement

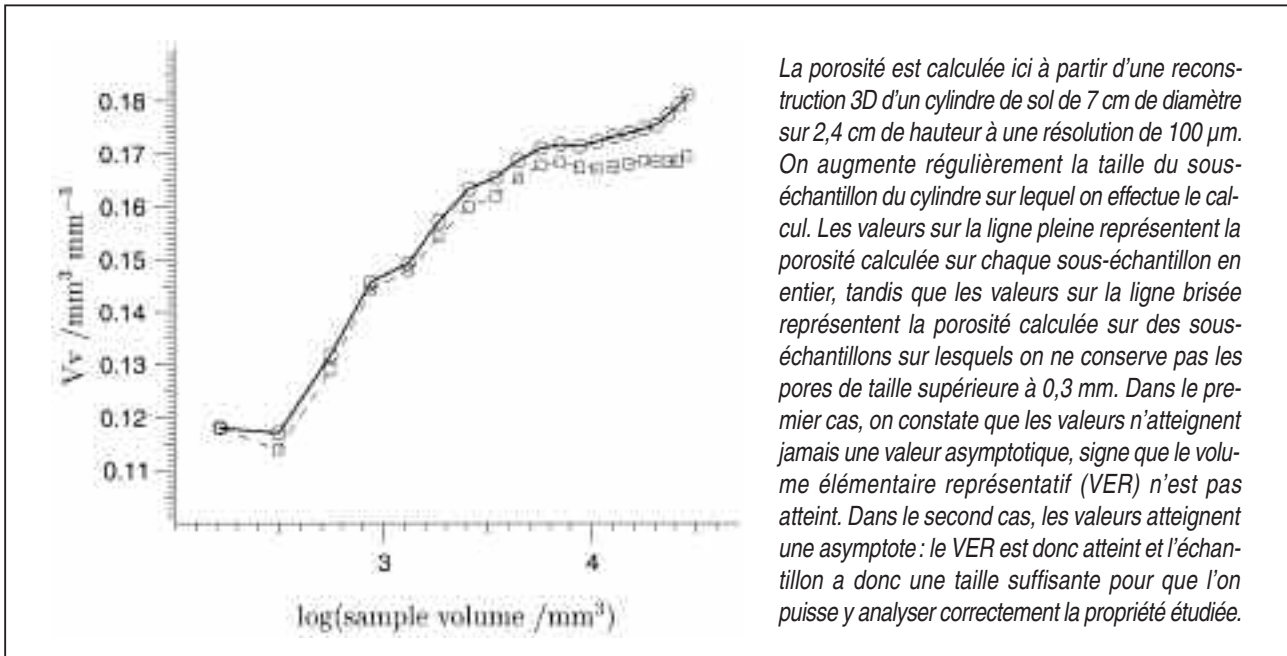
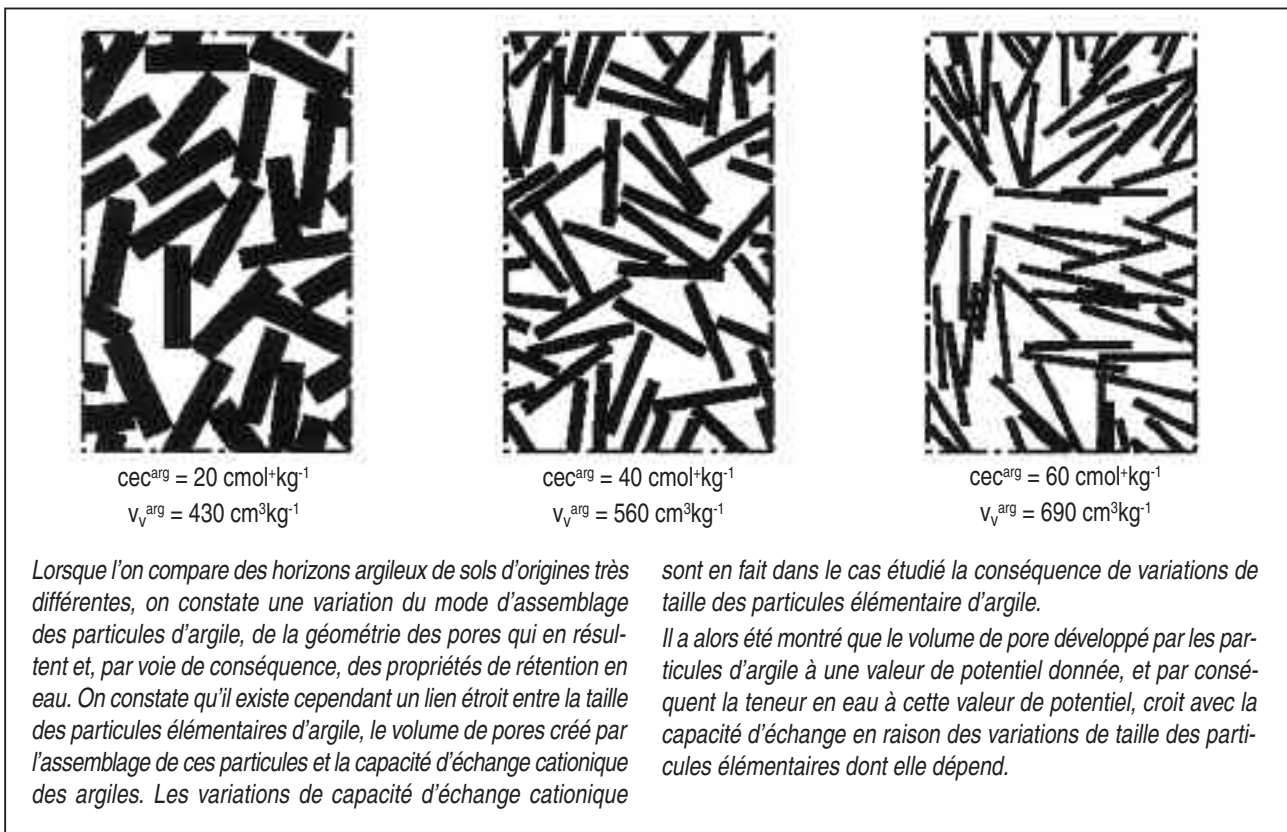


Figure 2 - Propriétés de rétention en eau des sols argileux et mode d'assemblage des particules d'argile (d'après Bruand et al., 1988).

Figure 2 - Water retention properties of clayey soils and the clay phase fabric



(cas à nouveau de la formation des croûtes de battance). Si cette cinétique des phénomènes est admise, on est encore loin de comprendre tous les mécanismes en cause et il est difficile de pouvoir les inclure dans les modèles hydrologiques (Cerdan *et al.*, 2001).

MÉTHODES DE MESURE ET D'ESTIMATION DES PROPRIÉTÉS HYDRIQUES

La prise en compte des propriétés hydriques des sols sur de grandes surfaces se heurte à la diversité et à la complexité des systèmes pédologiques. Toute décision nécessite ainsi directement ou indirectement un grand nombre de mesures. Face au coût élevé de ces mesures, on cherche évidemment à en réduire le nombre ou à trouver des méthodes palliatives. On cherche également des moyens pour spatialiser ces mesures qui sont, dans la plupart des cas, « ponctuelles » au regard des espaces à gérer. Enfin, on tente d'estimer les erreurs induites par les méthodes de généralisation.

Les principales propriétés étudiées sont mesurées à partir d'échantillons non perturbés prélevés sur le terrain et placés au laboratoire en conditions contrôlées. Par exemple, la courbe de rétention en eau et la conductivité hydraulique en régime insaturé peuvent être déterminées par la méthode évaporatoire de Wind (Wind *et al.*, 1968; Tamari *et al.*, 1993). Ce type de méthode ne permet pas de couvrir l'intégralité du domaine de potentiel qui intéresse des applications agronomiques ou environnementales mais elle permet néanmoins des comparaisons fiables et reproductibles. D'autres solutions expérimentales existent pour des potentiels plus élevés ou plus faibles (Stolte *et al.*, 1994). Mais quel que soit le choix, les mesures de laboratoire ne peuvent être répétées sur un même lieu au cours du temps puisqu'elles sont destructives. Enfin, l'échelle de mesure est limitée par la taille de l'échantillon prélevé (quelques décimètres-cubes pour la méthode Wind), posant ainsi le problème de la pertinence des mesures vis-à-vis des processus effectifs en conditions réelles de terrain (Bouma *et al.*, 1979; Kyle *et al.*, 1999). Des mesures de terrain peuvent également être réalisées (mesures d'infiltrométrie, par exemple) mais elles ne permettent pas de s'affranchir des problèmes de taille d'échantillon et de non-reproductibilité par destruction de la zone étudiée.

Pour ces raisons mais aussi et surtout pour le coût induit par ces mesures, on cherche d'autres moyens d'approche des propriétés hydriques. On distinguera ici deux types : les méthodes géophysiques et les fonctions de pédotransfert.

Les méthodes géophysiques sont basées sur l'analyse d'une onde électrique ou électromagnétique réfléchie ou émise par le sol de façon naturelle ou à partir d'une source. Les mesures sont soit réalisées au sol, soit par moyens aéroportés, soit enfin par satellites (Girard et Girard, 1999). L'avantage de ces méthodes est de fournir des mesures intégratives d'un volume beaucoup plus grand que les mesures précédentes (de quelques dm à plusieurs km). Elles se limi-

tent dans certains cas à la surface du sol (par exemple, pour le « visible » en télédétection) mais elles intègrent également des volumes parfois à des profondeurs importantes par exemple, avec la résistivité électrique (Bourenane *et al.*, 1998; Tabbagh *et al.*, 2000) ou le radar-sol (Collins et Doolittle, 1987; Huggenberger *et al.*, 1994; Benoît *et al.*, 2002). Elles sont non destructives et peuvent être répétées selon des pas de temps liés à la seule disponibilité des instruments de mesure. Elles permettent enfin d'étudier de grandes surfaces de façon quasi-continue dans l'espace. Cependant, un inconvénient majeur demeure : elles fournissent le plus souvent des informations indirectes et il est nécessaire de relier l'intensité du signal avec les caractéristiques conjoncturelles du milieu (par exemple, la teneur en eau du sol). Les propriétés des sols sont ensuite déduites de l'analyse de la dynamique du signal au cours du temps (Michot *et al.*, 2003). Si beaucoup de travaux ont été réalisés dans ces domaines, surtout en télédétection, il reste encore de nombreux développements possibles, soit au plan méthodologique selon la gamme des nouveaux outils géophysiques mis à disposition, soit au plan de la compréhension de la modification d'un signal à l'interface sol/eau/atmosphère.

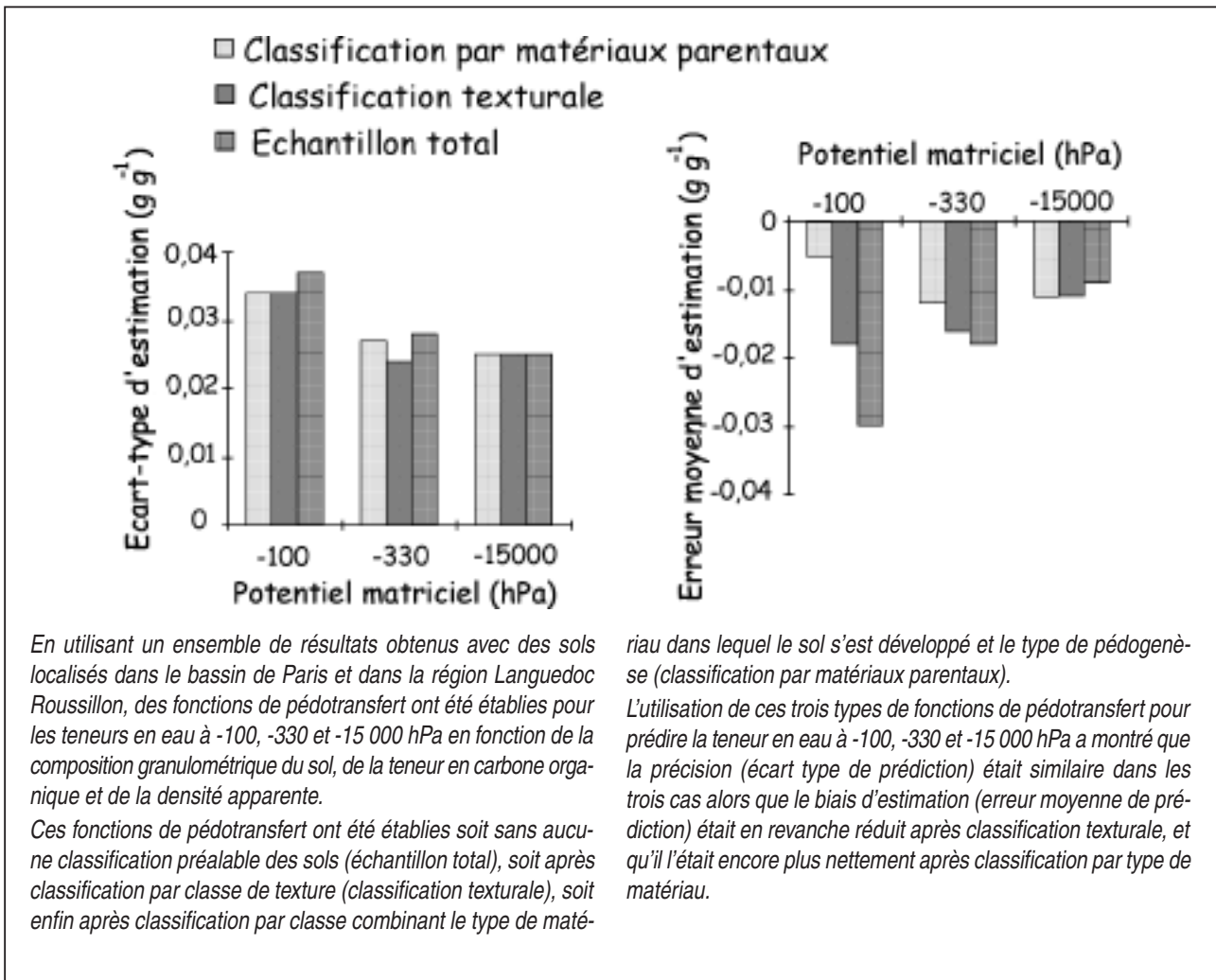
Les fonctions de pédotransfert sont basées sur la recherche de relations mathématiques permettant de déduire les propriétés hydriques des sols à partir des caractéristiques connues ou aisément mesurables des sols. Dans beaucoup de bases de données, on dispose d'informations sur de nombreuses caractéristiques des sols mais très peu sur leurs propriétés physiques. L'idée est donc de rechercher des fonctions simples qui permettent d'estimer une variable dite d'intérêt à partir de ces données faciles d'accès. Des premiers travaux ont établi des fonctions sur la base d'analyses statistiques et ont proposé à la communauté internationale des outils qui sont désormais largement utilisés (Gupta & Larson, 1989; Hall *et al.*, 1977; Vereecken *et al.*, 1989). Toutefois, si ces relations sont efficaces dans les régions où elles ont été mises en place, elles sont rarement généralisables sur tous les milieux (Bruand *et al.*, 1997). Ceci est facile à comprendre au vu du rôle de l'histoire des matériaux souligné précédemment. Un nouvel objectif est donc d'élaborer des fonctions de pédotransfert désormais fondées sur le déterminisme des relations entre propriétés, constituants et histoire des matériaux (*figure 3*). Une voie possible est de proposer une stratification du milieu qui tienne compte des facteurs pédogénétiques et qui permettent l'élaboration de fonctions adaptées à chacun des espaces ainsi découpés (Bastet *et al.*, 1999; Bruand *et al.*, 2002).

MÉTHODES DE SPATIALISATION DES PROPRIÉTÉS HYDRIQUES

La plupart des mesures hydrodynamiques sont réalisées à partir de volumes extrêmement petits comparés aux espaces pour lesquels on souhaite une gestion rationnelle des ressources en eau. Les méthodes de généralisation spatiale sont alors un moyen pour estimer les propriétés en des lieux où elles n'ont pas été mesurées.

Figure 3 - Qualité de la prédiction des quantités d'eau retenues lorsque l'on tient compte du type de sol (d'après Bastet *et al.*, 1999).

Figure 3 - Quality estimation of soil water retention according to soil types



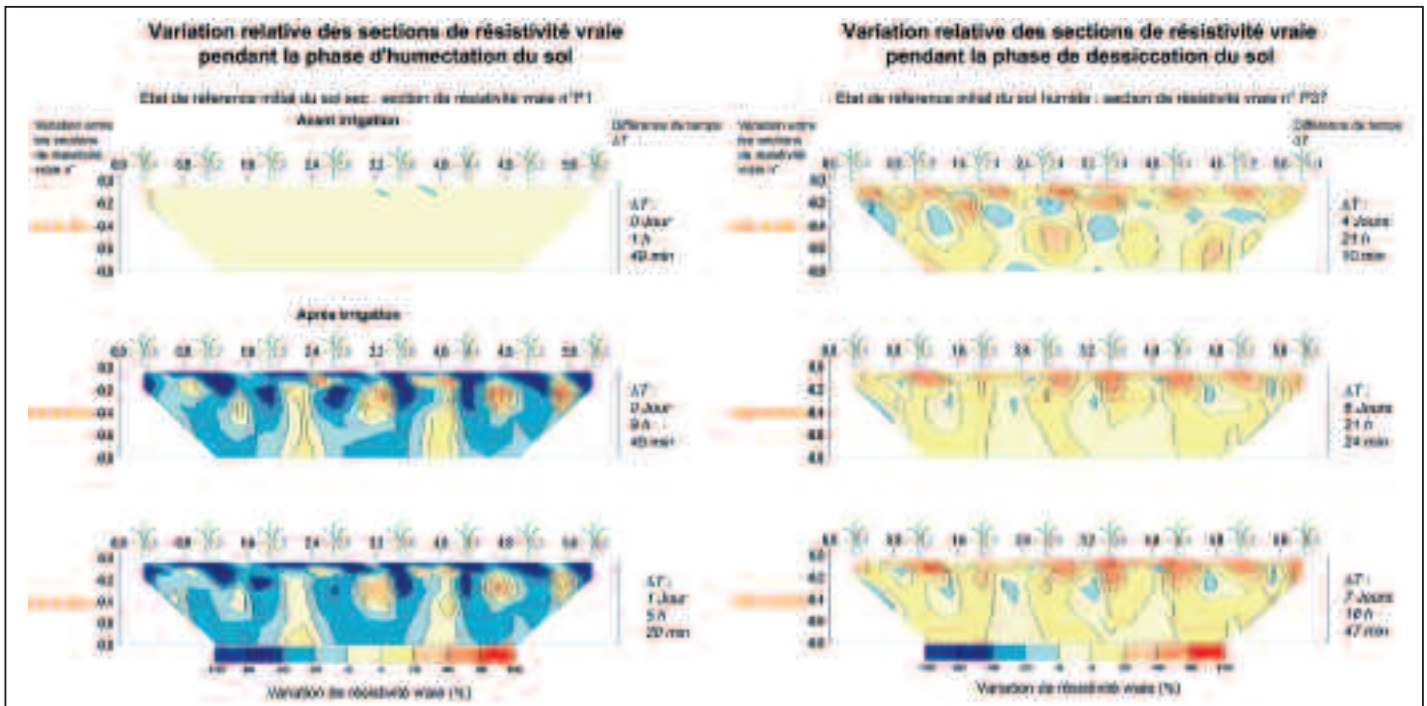
Elles cherchent ainsi à optimiser le nombre de mesures et à rendre plus efficaces les plans d'échantillonnage. Les premières de ces méthodes ont privilégié, comme pour les fonctions de pédotransfert, les connaissances pédologiques disponibles. En effet, à partir des cartes de sols, on peut faire l'hypothèse que les unités typologiques sont représentatives de la variabilité spatiale des propriétés hydriques et ainsi privilégier un échantillonnage de mesures selon le découpage proposé. Ce type d'approche est apparu souvent insuffisant au vu de la variabilité spatiale de ces propriétés (Voltz, 1997). Les méthodes de géostatistique ont permis une autre approche plus rigoureuse de l'analyse de cette variabilité. La géostatistique mono-variable orientée uniquement sur l'analyse d'une seule propriété a confirmé la très forte variabilité des propriétés (Vauclin, 1994). Une nouvelle voie est désormais offerte grâce à une analyse multi-variables combinant ces différentes approches, c'est-à-dire la

connaissance cartographique préalable du milieu, la nature des relations entre les différentes caractéristiques des sols, et le type de structure spatiale des caractéristiques du milieu (Lagacherie et Voltz, 2000; Moussa *et al.*, 2002).

La composante temporelle est insuffisamment prise en compte dans ces travaux de spatialisation. Or les mesures, en géophysique comme en télédétection, permettent désormais d'avoir accès à une vision multi-temporelle de la variabilité spatiale des teneurs en eau (figure 4). Ces approches fournissent d'une part les bases d'un modèle dynamique des flux sur de grands espaces et permettent d'autre part un accès aux propriétés physiques des sols par inversion de ces modèles aux mêmes échelles. L'assimilation de données dans des modèles de cultures est déjà largement engagée en télédétection (Guérif et Duke, 1998). Le même type d'approche devrait se développer dans les années à venir pour les modèles environ-

Figure 4 - Suivi de la dynamique hydrique d'un profil pédologique en deux dimensions par résistivité électrique de surface (méthode des panneaux électriques, d'après Michot *et al.*, 2003).

Figure 4 - Hydric fluxes monitoring by 2D electrical resistivity monitoring



La figure 4 montre six sections de résistivité mesurées à différentes dates sur un même profil pédologique selon une phase d'humectation (à gauche) et de dessiccation (à droite) suite à une irrigation contrôlée d'une parcelle de maïs. Les cartes représentent la différence de résistivité par rapport à la situation initiale. Cette figuration permet de tirer plusieurs conclusions: (1) en phase d'humectation, la diminution de la résistivité s'observe de la surface vers la profondeur, tout particulièrement au droit des pieds de maïs; par ailleurs, on constate deux zones verticales dont la résistivité varie peu et qui correspondent en surface

au passage de roues de tracteur. En phase de dessiccation, la résistivité du sol croît de façon généralisée sur l'ensemble du profil, les valeurs les plus élevées correspondant à la zone racinaire des plants de maïs. Ces mesures de résistivité ont été accompagnées par des mesures de teneurs en eau. Les comparaisons ont montré que la méthode du panneau électrique était un moyen efficace et non destructif du suivi des flux hydriques en profondeur à l'échelle décimétrique

nementaux avec des données soit de télédétection (King C. *et al.*, 2003), soit de géophysique de surface.

EVOLUTION DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET RISQUE DE DÉGRADATION

Les sols subissent une pression environnementale croissante même si l'ampleur des impacts reste très variable d'un lieu à l'autre. Cette pression agit sur les différentes propriétés chimiques et biologiques des sols ainsi que sur leurs propriétés physiques. Nous avons vu que ces dernières conditionnent directement les flux d'eau

dans les sols et leur répartition vers les autres compartiments. Elles conditionnent également les ambiances hydrique et physico-chimique des sols (aérobie, oxydo-réduction) ainsi que l'activité microbienne. Les interactions sont souvent complexes et il est très difficile, en conditions naturelles, d'isoler l'effet d'un facteur sur une propriété. Par exemple, la pression mécanique liée au passage d'une roue de tracteur induit, selon les conditions hydriques du moment et la nature du matériau, une modification de l'espace poral (figure 5). Mais l'impact sera d'autant plus conséquent que les facteurs biogéochimiques qui assurent la stabilité structurale auront été préalablement dégradés, cette dégradation pouvant elle-même provenir des mauvaises pratiques antérieures...

En se basant sur les échelles de temps et la rémanence des

Figure 5 - Effet du compactage sur les propriétés hydriques (d'après Richard *et al.*, 2001)

Figure 5 - Effect of soil compaction on hydric properties

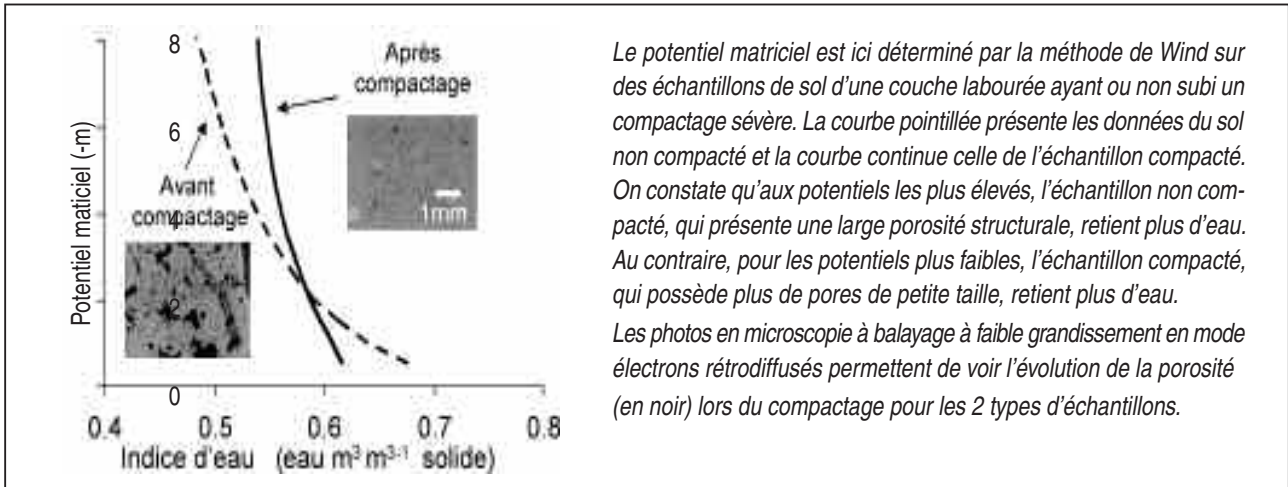
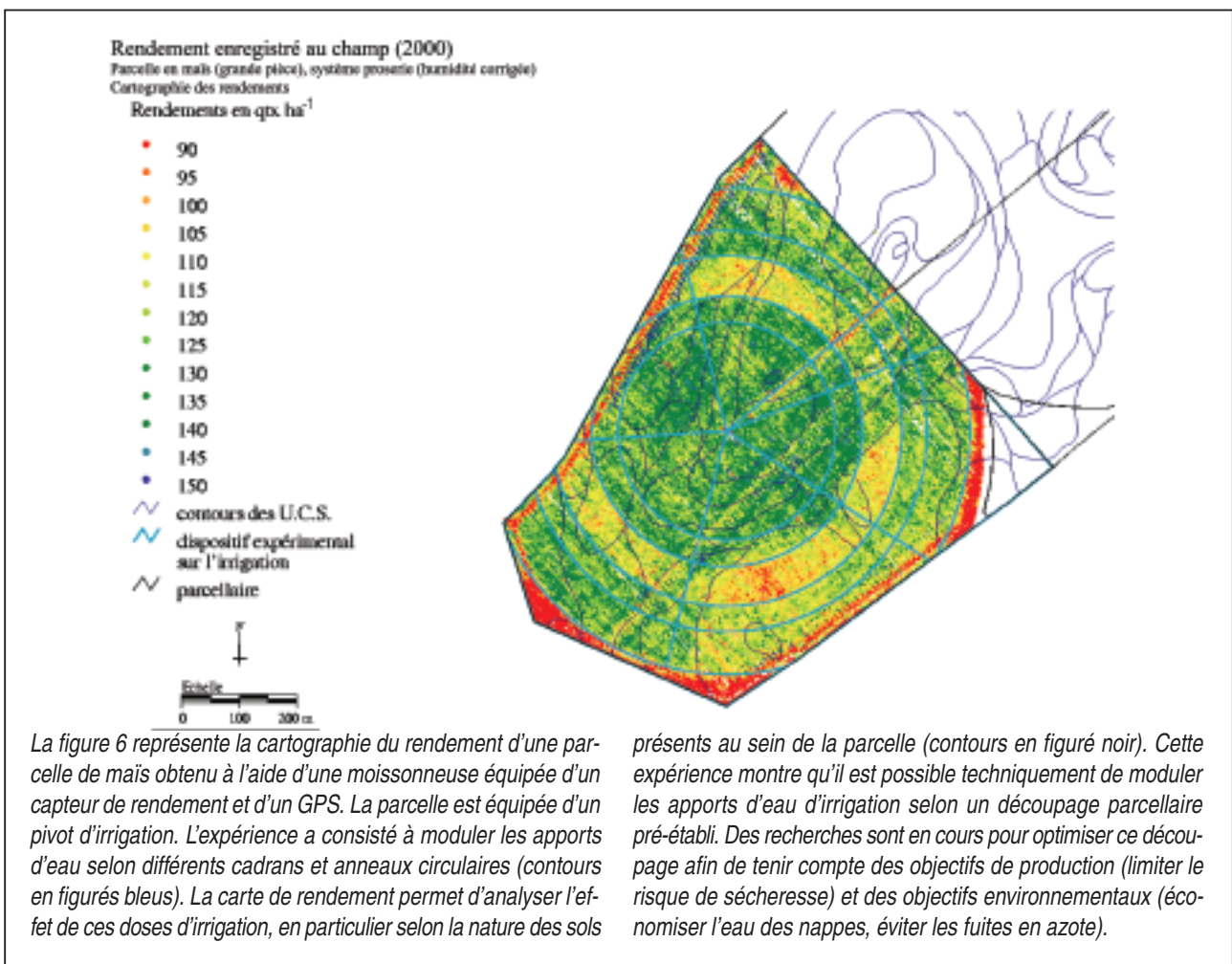


Figure 6 - Modulation des apports d'eau en fonction de la nature des sols : exemple de l'irrigation de précision (Nicoulaud *et al.*, 2002)

Figure 6 - Water supply rates according to soil types: example of the precision irrigation



milieux, on propose de classer les pressions environnementales sur les propriétés physiques selon trois catégories. Les premières ont un effet à court terme et sont liées aux caractères conjoncturels de plusieurs facteurs. C'est le cas de l'exemple cité ci-dessus d'un travail du sol effectué dans de mauvaises conditions hydriques (Richard *et al.*, 2001). Les secondes n'ont pas d'effets visibles à court terme mais elles peuvent, par un effet cumulatif d'événements répétés, modifier durablement les conditions physiques du milieu. La présence d'une semelle de labour est un exemple fréquent mais la baisse des teneurs en matière organique en est un autre avec des conséquences sur la stabilité structurale (Chenu *et al.*, 2000). Enfin, des événements catastrophiques extrêmes peuvent bouleverser la structure des sols, voire même conduire à l'ablation d'une partie du sol par érosion (Cerdan *et al.*, 2002). Ces événements, même s'ils sont rares, sont susceptibles d'imprimer des effets difficilement réversibles à long terme.

Afin de gérer les menaces qui pèsent sur les sols et leurs fonctions, trois pistes de réflexion sont proposées : (1) mettre en place des systèmes de surveillance à moyen et long termes, (2) promouvoir ou dissuader certaines actions sur les sols, notamment au travers des pratiques culturales, (3) disposer de méthodes permettant de prévoir et de cartographier les risques environnementaux liés à la dégradation physique des sols.

Examinons en premier lieu les programmes de surveillance actuellement mis en place, notamment en France et en Europe (Arrouays *et al.*, 2001 ; King et Montanarella, 2002). Force est de constater que la plupart de ces programmes ne prennent pas (ou peu) en compte le suivi des propriétés physiques. Il est vrai que la forte variabilité spatiale de ces propriétés ainsi que le coût élevé des mesures au laboratoire ne facilitent pas leur intégration dans les dispositifs d'observation. Toutefois, il est urgent de constituer de tels dispositifs en recherchant des stratégies d'échantillonnage adaptées, des indicateurs faciles à mesurer, ou des méthodes de surveillance utilisant les nouveaux outils de la géophysique et de la télédétection.

En second lieu, il est essentiel d'agir sur ces évolutions en conseillant ou en orientant l'usage des sols ainsi que les pratiques agricoles (Boiffin et Stengel, 1999). Cela concerne directement le choix des différentes méthodes de travail du sol. Les mesures agro-environnementales sont un premier outil disponible pour favoriser ou non certaines pratiques. Un autre type d'action est de proposer une gestion du milieu qui oriente le choix des systèmes de culture et donc leur distribution spatiale en fonction des contraintes du milieu et des besoins collectifs de l'environnement. Cette seconde action est plus difficile à mettre en œuvre car les limites pédologiques correspondent rarement à des limites de décisions, qu'elles soient agronomiques (les exploitations agricoles), ou environnementales (par exemple, les bassins versants) (King et Le Bissonnais, 1992). Envisager une gestion des sols par unité fonctionnelle implique des conséquences économiques et sociologiques qu'il serait important d'aborder de façon pluridisciplinaire. Le découpage du parcellaire s'envisage lors du remembrement ou même désormais de façon annuel-

le au sein de très grandes parcelles en régions céréalières. A la condition de connaître la variabilité spatiale des propriétés physiques d'un espace donné, ce peut être un moyen pour privilégier d'une façon simple certaines fonctions du sol selon ses propriétés intrinsèques. C'est déjà le cas par exemple pour la localisation de zones enherbées dans le cas de la lutte contre l'érosion (Lecomte *et al.*, 2003), ou de zones de bas-fonds dans le cas des programmes de dénitrification (Durand *et al.*, 2000). Enfin, un dernier moyen apparaît avec l'émergence des techniques dites d'agriculture de précision (Boisgontier, 1997). Cette nouvelle approche implique une demande forte en matières de connaissances spatialisées des propriétés des sols. L'objectif est encore ici de moduler les activités en fonction de la nature et de la variabilité spatiale de ces propriétés (Robert P.C., 1999) et ainsi d'adapter les techniques aux contraintes du milieu (*figure 6*).

En troisième lieu, il est important de prévoir les conséquences des transformations du sol non seulement pour le sol lui-même mais sur les flux d'eau vers les autres compartiments de l'environnement. Cette action est déjà largement initiée avec le développement de la modélisation et la mise en place de simulations selon différents scénarios liés par exemple à l'évolution de la politique agricole commune (Moussa *et al.*, 1995) ou au changement du climat (Brinkman et Sombroek, 1997). L'intégration de modèles au sein de systèmes d'informations géographiques a déjà donné des résultats encourageants. Toutefois, ces expériences se heurtent à deux problèmes : d'une part, le manque de données sur les propriétés physiques dans ces systèmes d'information et d'autre part, l'inaptitude de beaucoup de modèles à être opérationnels face à la diversité des situations. Il existe donc un champ d'investigation toujours ouvert pour le développement de modèles adaptés à la disponibilité des données existantes et couplant les différents processus de façon équilibrée et cohérente, c'est-à-dire avec un même niveau de prise en compte de la complexité de la réalité pour chaque processus. Ces modèles doivent également décrire explicitement les inter-actions spatiales entre les différents éléments du milieu. De tels modèles interfacés avec des bases de données géographiques ré-actualisées en permanence, devraient être capables de fournir des cartographies de risques potentiels (Le Bissonnais *et al.*, 2001), de transmettre en temps réel un tableau de bord, et d'élaborer des simulations selon différents scénarios.

CONCLUSION

Le sol joue, au travers de ses propriétés physiques, un rôle fondamental dans la régulation des flux d'eau (infiltration, stockage, ruissellement), ainsi que dans la qualité des eaux en sortie, qualité dépendante des milieux physico-chimiques traversés et des vitesses de transfert. Or nous constatons que différentes menaces pèsent sur le devenir des propriétés physiques des sols : dégradation de la stabilité structurale sous l'effet de facteurs chimiques et biologiques, contraintes mécaniques trop élevées, flux d'eau excessifs... L'une

des plus grandes menaces est évidemment la disparition partielle ou totale du sol par érosion qui affecte le rôle tampon joué par le sol et entraîne un re-directionnement et une accélération des flux d'eau. Mais une « menace » d'une autre nature existe : c'est celle de la non prise en compte de la variabilité spatiale des propriétés des sols. Si la gestion des flux est pratiquée depuis longtemps par les agriculteurs selon une approche privilégiant l'échelle de la parcelle, le besoin d'une gestion environnementale met en évidence la nécessité d'un raisonnement à l'échelle d'unités fonctionnelles que sont les bassins versants, les nappes profondes ou les systèmes fluviaux. Une dégradation des propriétés physiques à ces échelles peut induire de nouveaux flux (par exemple, augmentation du ruissellement en certaines zones) qui, eux-mêmes, peuvent accélérer en retour la dégradation des propriétés physiques, voire éroder le sol. Dégradations des sols et des eaux sont donc intimement liées selon un cercle vicieux inévitable.

Depuis plusieurs années, les acquis scientifiques ont permis d'identifier les propriétés « clés » (rétention, conductivité, stabilité structurale) à partir desquelles on peut développer les raisonnements et établir des modèles. De nouvelles techniques de mesure avec la géophysique et la télédétection ouvrent des perspectives d'acquisition de données sur de larges surfaces. Le développement de fonctions de pédotransfert, de méthodes de spatialisation et de modèles intégrés débouche d'ores et déjà sur des systèmes opérationnels d'aide à la décision selon des échelles allant de la parcelle agricole jusqu'au bassin versant.

Ces acquis ne doivent pas masquer un besoin de connaissances sur ces propriétés connues de façon trop éparse face à la diversité des sols. On note tout d'abord un manque évident de cartographie ou de mesures géoréférencées au sein des bases de données. Un véritable défi pour la recherche est la quantification de la variabilité spatiale des propriétés à l'aide de nouvelles méthodes de mesure et leur intégration dans des modèles spatiaux adaptés aux échelles de décision. Ensuite, les connaissances restent insuffisantes pour des conditions aux limites (par exemple proche de la saturation) ou particulières (événements exceptionnels). Ces conditions sont pourtant des cas de figure très importants dans la gestion des flux. Enfin, l'absence d'observatoire à moyen et long termes sur l'évolution des propriétés physiques des sols est à souligner. Si un tel dispositif est difficile à mettre en œuvre, on ne peut ignorer les phénomènes de dégradation actuellement observés de façon dispersée. Il y a donc nécessité d'un investissement scientifique dans ce domaine afin d'aboutir à un élargissement des systèmes actuels de surveillance des sols.

Les moyens pour éviter ou corriger une dégradation physique des sols existent. Ils peuvent être mis en œuvre à l'échelle de la parcelle au travers des pratiques agricoles. Toutefois, on ne connaît pas toujours les conséquences de l'introduction de nouvelles techniques (par exemple, travail du sol simplifié, agriculture de précision). Les effets de ces techniques selon différents pas de temps devront donc être approfondis. D'autres voies existent pour orienter les décisions à

approfondis. D'autres voies existent pour orienter les décisions à l'échelle des territoires et notamment à l'échelle d'unités fonctionnelles que sont les bassins versants. La politique agricole commune et les outils agri-environnementaux qui l'accompagnent sont des moyens qui devraient permettre d'orienter le choix des systèmes de culture vers une gestion durable des propriétés physiques des sols. Mais cela nécessite une prise de conscience des effets positifs ou négatifs de ces propriétés sur la production agricole et sur les fonctions environnementales. Cela nécessite également une gestion collective de l'espace qui intègre la diversité spatiale des sols.

BIBLIOGRAPHIE

- Arrouays D., Thorette J., Daroussin J., King D., 2001 - Analyse de représentativité de différentes configurations d'un réseau de sites de surveillance des sols. *Etude et Gestion des Sols*, 8, 7-17.
- Baize D., 1989 - Planosols in the « Champagne humide » region, France. A multi-approach study. *Pedology*, 39(2), 119-151.
- Bajracharya, R.M. and Lal R., 1999 - Land use effects on soil crusting and hydraulic response of surface crusts on a tropical Alfisol. *Hydrological Processes*, 13(1): 59-72.
- Bastet G., Bruand A., Voltz M., Bornand M., Quetin P., 1999 - Performance of available pedotransfer functions for predicting the water retention properties of French soils. In : M. Th. Van Genuchten, F.J. Leij, L. Wu (eds), *Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*, Riverside, California, October 22-24, 981-992.
- Benoît P, Grisoni J.M., Piwaskowski B., 2002 - Failles quaternaires des environs de Longueville-sur-Aube et relation avec les pollutions de l'aquifère crayeux. Intérêt de la géophysique de sub-surface. *Bull. Inf. Bass. Paris*, 39 (4), 21-34.
- Blöschl P. & Sivapalan M., 1995 - Scale issues in hydrological modelling : a review. *Hydrological processes*, 9, 69-81.
- Boiffin J. et Stengel P., 1999 - Réapprendre le sol : nouvel enjeu pour l'agriculture et l'espace rural. In : *Déméter 2000. Economie et stratégies agricoles*. Armand Colin, Paris, 147-211.
- Boisgontier, 1997 - L'agriculture du vingt et unième siècle, l'agriculture de précision. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 83 (7), 17-26.
- Bouma J., Jongerius A., Schoonbeek D., 1979 - Calculation of saturated hydraulic conductivity of some pedal clay soils using micromorphometric data. *Soil Science Society of America Journal*, 43, 261-264.
- Bourennane H., King D., Le Parco R., Isambert M. and Tabbagh A., 1998 - Three-dimensional analysis of soils and surface materials by electrical resistivity survey. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 3, 5-23.
- Brinkman R. et Sombroek W.G., 1997 - Les effets du changement global sur les conditions du sol en relation avec la croissance végétale et la production animale. In : *Changements du climat et production agricole*, Bazzaz F. et Sombroek W.G. *FAO Polytechnica*, 57-74.
- Bristow K.L., Cass A., Smettem K.R.J., Ross P.J., 1995 - Water entry into sealing, crusting and hardsetting soils : a review and illustrative simulation study. In : *Sealing, Crusting and Hardsetting Soils: Productivity and Conservation*, Brisbane, Australia, 183-203.
- Bruand A., Tessier D., Baize D., 1988 - Contribution à l'étude des propriétés de rétention en eau des sols argileux : importance de la prise en compte de l'organisation de la phase argileuse. *C.R. Académie des Sciences, Paris*, t. 307, Série II, 1937-1941.

- Bruand A., Baize D., Hardy M., 1994 - Prediction of water retention properties of clayey soils: validity of relationships using a single soil characteristic. *Soil Use and Management*, 10, 3, 99-103.
- Bruand A., Perez Fernandez P., Duval O., Quetin P., Nicoullaud B., Gaillard H., Raison L., Pessaud J.F., Prud'homme L., 2002 - Estimation des propriétés de rétention en eau des sols: Utilisation de classes de pédotransfert après stratifications texturale et texturo-structurale. *Etude et Gestion des Sols*, 9, 105-125.
- Bruand A., Duval O., Wösten J.H.M., Lilly A., 1997 - The use of pedotransfer in soil hydrology research in Europe. Proceedings of the second workshop of the project 'Using existing soil data to derive hydraulic parameters for simulation modelling in environmental studies and in land use planning'. 10-12/10/1996, Orléans, France. INRA Orléans and EC/JRC Ispra, 211 p.
- Cerdan O., Souchère V., Lecomte V., Couturier A., Le Bissonnais Y., 2001 - Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and transfer by runoff and erosion related to agricultural management. *Catena*, 46, 189-205.
- Cerdan O., Le Bissonnais Y., Couturier A., Bourennane H., Souchère V., 2002 - Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France. *Soil & Tillage Research*, 67, 99-108.
- Chenu C., Le Bissonnais Y., Arrouays D., 2000 - Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 1479-1486.
- Collins M.E. and Doolittle J.A., 1987 - Using ground-penetrating radar to study soil microvariability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, 491-493.
- Cousin I., Levitz P., Bruand A., 1996 - Three-dimensional analysis of a loamy-clay soil using pore and solid chord distributions. *European Journal of Soil Science*, 47, 439-452.
- Delerue J.F., 2001 - Segmentation 3D: application à l'extraction de réseaux de pores et à la caractérisation hydrodynamique des sols. Thèse de l'Université de l'INRIA, 194 p.
- Duley F.L., 1939 - Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, 4, 60-64.
- Durand P., Gascuel-Oudou C., Kao C., Merot P., 2000 - Une typologie des petites zones humides ripariennes. *Etude et Gestion des Sols*, 7 (3), 207-218.
- Ghodrati, M. and Jury W.A., 1992 - A field study of the effects of soil structure and irrigation method on preferential flow of pesticides in unsaturated soils. *Journal of Contaminant Hydrology*, 11: 101-125.
- Girard M.C. & Girard C.M., 1999 - Traitement des données de télédétection. *Dunod*, 330p.
- Guérif M. & Duke C.L., 1998 - Calibration of the SUCROS emergence and early growth module for sugar beet using optical remote sensing data assimilation. *European Journal of Agronomy*, 9, 127-136.
- Gupta, S.C. and Larson W.E., 1979 - Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent and bulk density. *Water Resources Research*, 15(6): 1633-1635.
- Hall D.G., Reeve M.J., Thomasson A.J., Wright V.F., 1977 - Water retention, porosity and density of field soils. Technical Monograph n°9, Harpenden, Survey of England and Wales.
- Hoosbeek M.R. & Bryant R., 1992 - Towards the quantitative modelling of pedogenesis - A review. *Geoderma*, 55, 183-210.
- Huggenberger P., Meier E. and Pugin A., 1994 - Ground-probing radar as a tool for heterogeneity estimation in gravel deposits: advances in data-processing and facies analysis. *J. of Applied geophysics*, 31, 171-184.
- King C., Lecomte V., Le Bissonnais Y., Baghdadi N., Souchère V., Cerdan O., 2003 - Use of remote sensing data as alternative inputs in the STREAM runoff model. *Catena* (sous presse)
- King D. & Le Bissonnais Y., 1992 - Rôle des sols et des pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux. Exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe. *C.R. Acad. Agric.*, 6, 91-105.
- King D. & Montanarella L., 2002 - Inventaire et surveillance des sols en Europe. *Etude et Gestion des Sols*, 9, 2, 137-148.
- Kyle R., Giménez D., Rawls W.J., Lauren J.G., 1999 - Scaling properties of saturated hydraulic conductivity in soil. *Geoderma* 88(3), 205-220.
- Lagacherie, P. & Voltz M., 2000 - Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area and digital elevation data: a conditional approach. *Geoderma*, 97: 187-208.
- Lamoote M., Bruand A., Duval O., Humbel F.X., 1988 - Un système planosol - sol hydromorphe en forêt d'Orléans. *Science du Sol*, 26(3), 139-155.
- Le Bissonnais Y., Montier C., Jamagne M., Daroussin J., King D., 2001 - Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena*, 46, 207-220.
- Le Bissonnais Y., 1996 - Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47, 425-437.
- Lecomte V., Cerdan O., Le Bissonnais Y., 2003 - Effect of vegetated filter strips on runoff and erosion. *Agronomie*. (sous presse)
- Michot D., Benderitter Y., Dorigny A., Nicoullaud B., King D., Tabbagh A., 2003 - Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using electrical resistivity tomography. *Water Resour. Res.* (sous presse).
- Moussa R., Lagacherie P., Voltz M., Andrieux P., Bouzigues R., 1995 - The impact of environmental change and land management on the hydrology of a rural Mediterranean catchment. *Computer methods and water resources CMWR* 95, Beyrouth (LBN); 1995/09/25-28 8 p.
- Moussa R., Voltz M., Andrieux P., 2002 - Effects of spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes*, 23 (sous presse).
- Richard G., Cousin I., Sillon J.F., Bruand A., Guérif J., 2001 - Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52, 49-58.
- Robert M., 1996 - Le sol: interface dans l'environnement, ressource pour le développement. *Collection Sciences de l'Environnement*, Masson, 244p.
- Robert P.C., 1999 - Precision agriculture: research needs and status in the USA. 2nd European Conference on Precision Agriculture. Odense, Denmark. 11-15 July 1999. 19-34.
- Stolte J., Freijer J.I., Bouten W., Dirksen C., Halbertsma J., Van Dam J.C., Van den Berg J.A., Veerman G.J., Wösten H., 1994 - A comparison of six methods to determine unsaturated soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1596-1603.
- Tabbagh A., Dabas M., Hesse A and Panissod C, 2000 - Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horizonation, *Geoderma*, 97 (3-4), 393-404
- Tamari S., Bruckler L., Halbertsma J., Chadoeuf J., 1993 - A simple method for determining soil hydraulic properties in the laboratory. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 642-651.
- Vauclin M., 1994 - Modélisation du transport de solutés dans la zone non saturée du sol. *Revue des Sciences de l'Eau*, 1: 81-102.
- Vereecken H.J., Maes J., Feyen J., Darius P., 1989 - Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. *Soil Science*, 148 (6), 389-406.
- Vogel H.J. & Cousin I., 2002 - Quantification of pore structure and gas diffusion as a function of scale. *European Journal of Soil Science*, 54: 465-473.
- Voltz M., 1997 - Predicting soil properties over a region. *European Journal of Soil Science*, 48, 19-30.
- Wind G.P., 1968 - Capillary conductivity data estimated by a simple method. *Water in the unsaturated zone. Vol 1. Proc. Wageningen Symp. June 1966.* H.W. P.E. Ritsema. Gentbrugge, UNESCO, Paris.

