

Le sol, lieu d'échange et de transferts. Conséquences de leur utilisation par l'homme : un exemple français

Soil - an exchange and transfer medium. Consequences of soil use by humans: a French example

D. Tessier

Volume 15, numéro hors-série, 2002

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705483ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/705483ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Tessier, D. (2002). Le sol, lieu d'échange et de transferts. Conséquences de leur utilisation par l'homme : un exemple français. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 15, 9–26. <https://doi.org/10.7202/705483ar>

Résumé de l'article

Les sols exercent une multiplicité de fonctions de régulation entre l'atmosphère et les milieux aquatiques. Ceci est lié à leurs caractéristiques très variables dans l'espace, à la diversité des processus de nature physique, physico-chimique et biologique qui s'y déroulent, mais aussi à leur position d'interface entre l'atmosphère, le substrat géologique et les milieux aquatiques. Les échelles de temps qui président à sa genèse sont en général longues, du millier d'années au million d'années. Il s'agit donc d'une ressource non renouvelable à l'échelle humaine.

Les changements dans les pratiques agricoles ont profondément modifié le cycle de l'eau. Ainsi la perte de matières organiques des sols tend à amplifier l'encroûtement de surface et le ruissellement et conduit à une érosion importante des terres. Les prélèvements des cultures étant plus importants, la reconstitution de la réserve en eau des sols est souvent problématique les années sèches.

La science du sol doit fournir une réserve de connaissances dans laquelle la recherche appliquée puise des éléments d'interprétation de leur fonctionnement, et ce, afin de répondre aux besoins de l'agriculture et de l'environnement. Le sol doit alors être considéré comme un écosystème qui lui-même est une composante d'un écosystème plus vaste. Son étude nécessite de considérer une très large gamme d'échelles spatiales et d'échelles temporelles. Les évolutions des sols sont lentes et difficiles à déceler aisément. Les études sont donc complexes et nécessitent la durée. Elles permettent in fine d'évaluer les altérations possibles de ses diverses fonctions avec une estimation des risques résultant de cette altération. Ceci démontre qu'il convient de réévaluer le sol par rapport à ses fonctions environnementales, donc en ne se limitant pas à la seule fonction de production.

Le sol, lieu d'échange et de transferts. Conséquences de leur utilisation par l'homme : un exemple français

Soil – an exchange and transfer medium.
Consequences of soil use by humans: a French
example

D. TESSIER

SUMMARY

Soils perform a large variety of functions involved in regulation of biogeochemical fluxes between the atmosphere and the aquatic environment. Soil characteristics show significant variation spatially, in the diversity of physical, physico-chemical and biological processes. Soils also vary with respect to their location as an interface with the atmosphere, the geological substrate and aquatic environments. The time-scales governing the formation of soils are generally long, ranging from a thousands to millions of years and therefore, they are not a renewable resource from the human perspective.

The functions involved in soil regulation can be modified by various forms of stress related to farming, industrial and urban activities. In soil management, the catchment slope or watershed represents the most appropriate spatial scale for the assessment and understanding of soil distribution. Throughout history, soil use has changed drastically depending on different environmental constraints, the available technology and the requirements of the human population. In order to manage soil, it is necessary to acquire a complete understanding of the conditions under which it has been formed. The chemical evolution of soils is related to natural processes. For example, in temperate regions, the main factor dictating soil evolution is the gradual loss of cations. These reductions in cations affect soil carbonates, which are gradually dissolved. Following the dissolution of soil carbonates, there are changes in levels of exchangeable cations, initially with the calcium found on the surface of the soil components (clay, organic matter and oxides). The soil then becomes acidic, and when the acidity becomes sufficiently low, the mineral components of the soil can be partially dissolved. Free aluminum can therefore be present in the soil and water, thus creating toxic conditions for plants (cultivated soils, forests) and to fish (pond water and river water).

Institut national de la recherche agronomique, Unité de science du sol, route de Saint-Cyr, 78026 Versailles, France.

* Correspondance. E-mail : tessier@versailles.inra.fr

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 avril 2003.

Changes in soil use and the introduction of new practices often have a considerable impact on soil components and soil properties. In the soils of France today, the carbon and nitrogen balances are generally negative. This results in a widespread reduction in the levels of organic matter. Cultivated soils generally imply CO₂ emission into the atmosphere, often related to grassland cultivation and to other intensive farming practices (ARROUAYS *et al.*, 1994; RIVIÈRE, 1999). Measuring and modeling the environmental balance therefore represents a major challenge both with respect to the protection of the soil environment and also with respect to understanding the global cycle of greenhouse gases such as nitrogen and carbon compounds.

The presence of contaminants and the study of their bioavailability also represent major challenges in soil research. Certain parent rocks contain appreciable quantities of potentially toxic trace elements (Pb, Cd, Ni, Co, Cu, Zn, As). The continuous supply of substances containing pollutants results in greater inflows of trace elements than outflows. In France, there are an estimated 36000 t/yr of copper applied to French vineyards. Regions with intensive indoor husbandry, such as Brittany, are also concerned with the addition of copper and zinc in animal diets. The supply of phosphates as fertilizers has also been a source of cadmium pollution. Urban waste is also a recent source of pollution, and the effects of air-based pollution around industrial zones needs to be taken into consideration.

Human activity affects not only the storage and transfer of water and dissolved elements, but also the aeration and temperature conditions that could impact biological activity. Although the organization of solid particles and pores is partially a result of conditions under which the soil has been formed, human activity both directly (cultivation methods, soil drainage) and indirectly (influence of plant and fauna activity) influences the physical properties of soil. For example, the general trend is for the organic matter content to decrease with an increase in soil use (ploughing of grassland). This is particularly true in the case of silty soils, which contain small quantities of clay and are thus less stable structurally and are susceptible to physical erosion. Soil chemistry also affects physical properties. For example, under slightly acidic conditions, soil particles can become highly mobile in the environment. The migration of clay from the upper soil layers to the lower layers (translocation) should not be ignored. This relative loss of clay from the surface can be observed over time as the soil becomes particularly sensitive to the effects of water (incrustation, particle suspension) and, finally, erosion and run-off occur.

Soil science must provide a reservoir of knowledge in order to increase the understanding of soil functions and to meet the needs of agriculture and the environment. The study of soil must incorporate both spatial and temporal trends, as changes are often slow and difficult to detect. This demonstrates the need to reassess soil with respect to its environmental functions, without limiting the assessment to merely the function of production.

Key-words: *soil, water, land use, environment, ecosystem, anthropogenic activity, atmosphere.*

RÉSUMÉ

Les sols exercent une multiplicité de fonctions de régulation entre l'atmosphère et les milieux aquatiques. Ceci est lié à leurs caractéristiques très variables dans l'espace, à la diversité des processus de nature physique, physicochimique et biologique qui s'y déroulent, mais aussi à leur position d'interface entre l'atmosphère, le substrat géologique et les milieux aquatiques. Les échelles de temps qui président à sa genèse sont en général longues, du millier d'années au million d'années. Il s'agit donc d'une ressource non renouvelable à l'échelle humaine.

Les changements dans les pratiques agricoles ont profondément modifié le cycle de l'eau. Ainsi la perte de matières organiques des sols tend à amplifier l'encroûtement de surface et le ruissellement et conduit à une érosion importante des terres. Les prélèvements des cultures étant plus importants, la reconstitution de la réserve en eau des sols est souvent problématique les années sèches.

La science du sol doit fournir une réserve de connaissances dans laquelle la recherche appliquée puise des éléments d'interprétation de leur fonctionnement, et ce, afin de répondre aux besoins de l'agriculture et de l'environnement. Le sol doit alors être considéré comme un écosystème qui lui-même est une composante d'un écosystème plus vaste. Son étude nécessite de considérer une très large gamme d'échelles spatiales et d'échelles temporelles. Les évolutions des sols sont lentes et difficiles à déceler aisément. Les études sont donc complexes et nécessitent la durée. Elles permettent *in fine* d'évaluer les altérations possibles de ses diverses fonctions avec une estimation des risques résultant de cette altération. Ceci démontre qu'il convient de réévaluer le sol par rapport à ses fonctions environnementales, donc en ne se limitant pas à la seule fonction de production.

Mots clés : *sol, eau, usage, environnement, écosystème, activité anthropique, atmosphère.*

1 – INTRODUCTION

Le sol est en premier lieu issu d'un matériau parental au sein duquel la végétation, le monde animal et microbien ont pu se développer, notamment grâce à la présence d'eau et d'oxygène au contact de l'atmosphère. Au cours de sa genèse, un matériau meuble et poreux tend à se former. Les échelles de temps qui président à sa genèse sont en général longues, du millier au million d'années. Il s'agit donc d'une ressource non renouvelable à l'échelle d'une vie humaine.

Dans le sol les constituants minéraux les plus réactifs sont les argiles et les oxydes. Ces constituants possèdent la particularité de développer une grande surface spécifique au contact avec les fluides. La présence d'une charge électrique superficielle confère au sol la possibilité de retenir des ions, en particulier les cations nécessaires au développement des plantes. Ce sont pourtant les organismes vivants du sol, notamment les bactéries qui, en décomposant les matières organiques en une très large gamme de variétés chimiques, sont à l'origine des principaux flux d'éléments.

Les processus qui se déroulent dans les sols sont complexes. Ainsi, un cation arrivant sur le sol est le plus souvent retenu à la surface des argiles ou des matières organiques. Ce cation peut par la suite être absorbé par la racine d'une plante et être incorporé dans la matière vivante. Par voie de conséquence, il peut se propager dans la chaîne alimentaire. Il peut aussi rester adsorbé à la surface d'un constituant ou être immobilisé dans la structure d'une particule minérale ou organique. Par la suite, son transfert pourra s'effectuer à de longues distances, par exemple être transporté sur des particules en suspension dans l'eau et devenir ainsi mobile dans l'environnement.

2 – CADRE SPATIAL DE DISTRIBUTION DES SOLS ET IMPLICATIONS

2.1 Versant, échelle de référence

Le profil de sol reste encore l'échelle à laquelle on se réfère pour classer et définir le type de sol. Cependant, pour la gestion des sols, qu'elle soit agronomique ou environnementale, le versant ou le bassin versant constitue certainement l'échelle spatiale la plus pertinente pour percevoir la variété et la logique de distribution des sols.

Nous donnerons ici l'exemple cité par TESSIER *et al.* (1996) sur la distribution des sols dans le Perche c'est-à-dire une région à la lisière de la Beauce et de la Normandie (*figure 1*).

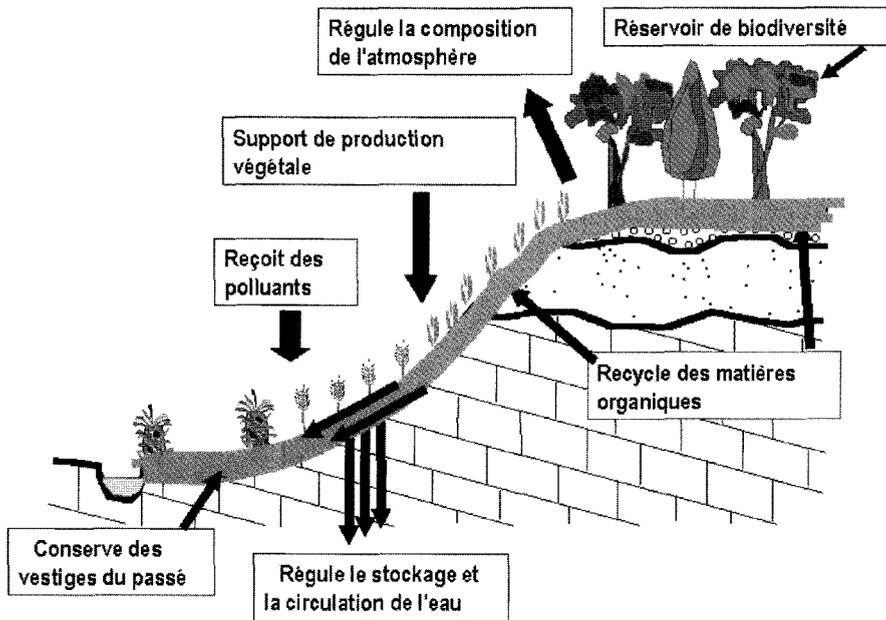


Figure 1 Répartition des sols et leur occupation à l'échelle du paysage dans la région Perche (France) jusque vers 1960 avec les principales fonctions des sols.

Schematic spatial distribution of soils in the landscape in the Perche area (France) up to near 1960 and the main soil functions.

Au sommet des collines on trouve des sols très argileux et caillouteux. Ces sols sont développés sur des argiles d'altération d'âge tertiaire dont les minéraux argileux sont à base de kaolinite. La présence de cailloux et leur pauvreté au plan chimique les ont toujours réservés à la forêt.

Les sols en haut de pente à caractère sableux comme les sols développés à mi-pente sur marnes ont toujours été cultivés car faciles à travailler. Originel-

lement acides, les sols sableux ont été amendés depuis le XIX^e siècle. Jusque dans les années soixante, les sols argileux en fonds de vallée à excès temporaire ou permanent d'eau étaient réservés à la prairie.

Cette distribution des sols et leur occupation illustrent l'adéquation à laquelle on pouvait aboutir, dans une région donnée, entre les contraintes du milieu et une agriculture à base de polyculture et d'élevage. Suivant les situations et les régions, l'adaptation de l'agriculture au milieu a conduit à une spécialisation plus ou moins importante de l'activité agricole. C'est ainsi que sont nés en France les terroirs viticoles ou encore les zones de production de produits d'appellation contrôlée. Ainsi en Champagne, le substrat de prédilection est la craie avec des sols de pente exposés Sud à Sud-Est.

Cet équilibre entre les contraintes du milieu et l'usage des sols a été profondément modifié avec les pratiques liées à l'intensification de l'agriculture. Dans la plupart des régions de France, le grand tournant s'est produit fin des années soixante. Pour résumer, on peut dire que les techniques de fertilisation et des travaux d'aménagement ont permis de lever certaines contraintes alors qu'ils ont induit des transformations importantes du milieu. On a assisté à une spécialisation des exploitations et même des régions. Le grand Atlas de la France rurale (MONZA, 1989) fait le point en France sur l'évolution des surfaces en prairie, en cultures et en forêts, sur les différents types d'élevage et sur l'évolution de la structure des exploitations agricoles durant la période récente.

Dans l'exemple cité auparavant, les sols humides jusqu'alors réservés à la prairie ont été mis en culture. On a labouré les prairies permanentes et drainé les zones humides de fond de vallée. Pour agrandir le parcellaire on a aussi supprimé des haies et des talus à la périphérie des parcelles. En même temps le rendement moyen des céréales est passé en cinquante ans de 30 quintaux par hectare en 1950 à environ 80 quintaux et plus en 2000. Compte tenu des rendements recherchés notamment en céréales, la quantité d'eau nécessaire pour assurer une production régulière et optimale des cultures n'a plus été suffisante. Les sols drainés sont aussi irrigués les années déficitaires.

Cette intensification de l'agriculture s'est traduite par une augmentation des surfaces cultivées en céréales et l'apparition de nouvelles cultures (maïs, pois protéagineux, colza, mais aussi soja et tournesol). D'un autre côté, l'élevage bovin a été supprimé ou complété par des ateliers hors sols (porcs, volailles).

Il est indéniable que cette évolution est très perceptible au travers de la transformation des paysages qui sont pour l'essentiel imputables à la mécanisation et à la restructuration foncière. En France, le remembrement est pour partie responsable de l'augmentation de la taille des parcelles et de la suppression des haies et talus qui participaient à la structuration du paysage et contrôlaient ainsi le parcours de l'eau.

2.2 Bilans environnementaux

L'évolution de l'usage des sols et l'introduction de pratiques nouvelles ont souvent eu un impact important sur les sols, notamment sur les teneurs en matières organiques et, en conséquence, sur les bilans de carbone et d'azote. La *figure 2* donne une représentation schématique du cycle du carbone à l'échelle planétaire. Les sols représentent une part plus importante du stock de carbone planétaire que la végétation. Ainsi après la déforestation l'évolution de

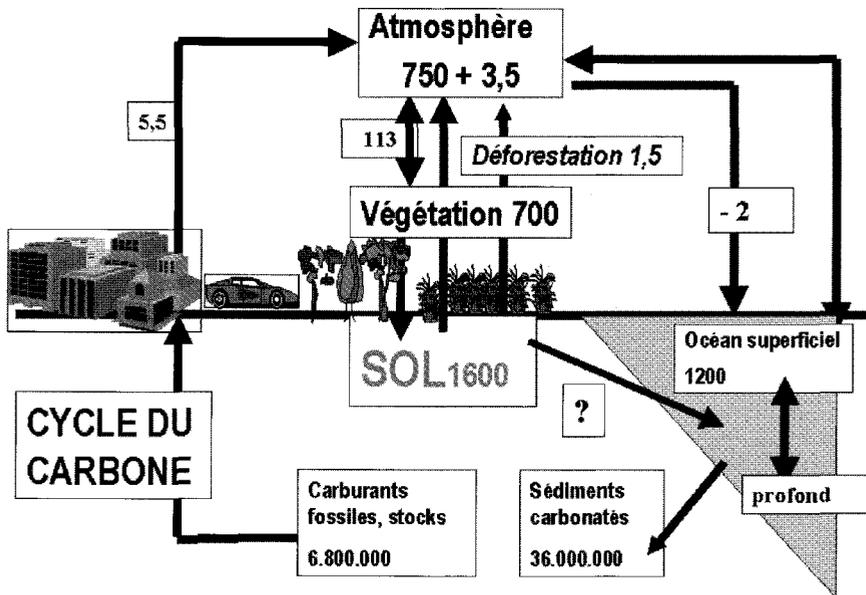


Figure 2 Représentation schématique du cycle du carbone planétaire.

Les résultats sont donnés en Giga Tonnes. La quantité de carbone contenue dans les sols est supérieure à celle de la végétation et à celle des océans. Le carbone des sols est donc une composante importante du statut du carbone planétaire.

Schematic representation of the planetary carbon cycle.

The data are given in Giga Tons. The amount of soil carbon is higher than that in the vegetation or in the oceans. Soil carbon is thus an important component of the planetary carbon.

la teneur en carbone des sols représente une part un enjeu important par rapport à l'émission de CO_2 dans l'atmosphère et in fine dans le bilan de carbone planétaire.

Avec une augmentation constante de la surface couverte par les forêts, la sylviculture constitue globalement un puits de CO_2 très important pour la France (152 millions de tonnes en 1997). En revanche, les sols cultivés représentent globalement une émission de CO_2 avec une perte liée à la mise en culture de nombreuses prairies et aux pratiques de l'agriculture intensive (ARROUAYS *et al.*, 1994 ; RIVIÈRE, 1999). Les incertitudes attachées à ces résultats peuvent être très importantes en raison des données et des hypothèses utilisées dans les calculs. Il est impératif de poursuivre les efforts entrepris afin de mieux appréhender les bilans de carbone dans les sols, notamment en fonction de leur usage, des pratiques culturales (travail ou non-travail du sol) (DE KIMPE, 1999).

Quoi qu'il en soit, la mesure et la modélisation du bilan environnemental constituent un enjeu majeur à la fois au niveau de la protection du milieu et en terme de connaissance et de modélisation des sources de pollution (GERMON *et al.*, 1999). D'après GABRIELLE (1997), pour l'émission des oxydes d'azote et de l'ammoniac des sols vers l'atmosphère, le point faible des modèles est

d'abord la modélisation des émissions gazeuses. Le principal enjeu reste ensuite la paramétrisation des modèles qui détermine largement leur précision.

3 – PROPRIÉTÉS CHIMIQUES ET PRÉSENCE D'ÉLÉMENTS-TRACE

3.1 Appauvrissement et acidification

Il est d'abord important de préciser que le sol fonctionne avant tout comme un système chimique ouvert. Cela signifie qu'une bonne partie des éléments chimiques du sol peut être exportée du fait des récoltes et/ou éliminés par les eaux. Dans le bilan des éléments, il est nécessaire de prendre en compte les réserves naturelles du sol. Les apports atmosphériques mais aussi les pratiques humaines peuvent contribuer à enrichir le sol au plan chimique.

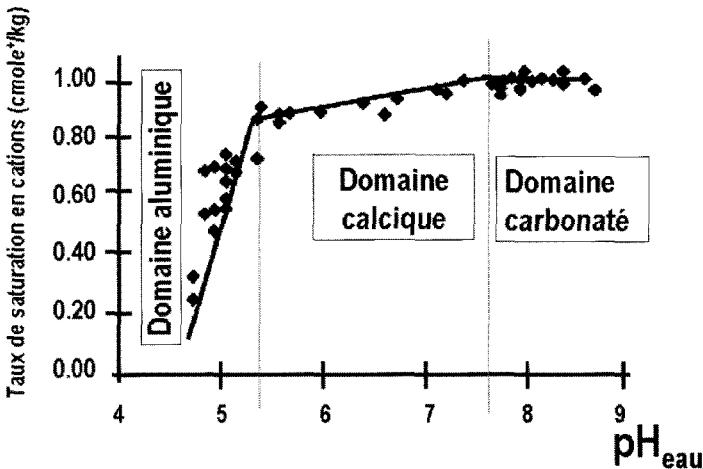


Figure 3 Taux de saturation en cations (Ca, Mg, K, Na) de la capacité d'échange en cations des sols. Les trois grands domaines correspondent aux trois grands groupes géochimiques des sols de France.

Saturation rate in cations (Ca, Mg, K, Na) of the cation exchange capacity of soils. The three main domains are also the main geochemical soil groups in France.

Du fait des seuls processus naturels, dans les régions tempérées, le sol perd progressivement une partie de son stock en cations, notamment les métaux alcalins (K, Na) et alcalinoterreux (Ca, Mg). Pour plus de précision on pourra se référer à ROBERT (1996). Ainsi dans les sols développés sur loess du bassin de Paris, la perte progressive en ces cations affecte d'abord les carbonates du sol, puis concerne les cations échangeables retenus à la surface des constituants. Le sol devenant acide, sa capacité d'échange en cations (CEC) diminue. Les données obtenues montrent que la valeur de la CEC peut dimi-

nuer de moitié entre $\text{pH} = 7,0$ et $\text{pH} = 5,5$ (TESSIER *et al.*, 1999). Lorsque l'acidité devient suffisamment basse, les constituants minéraux des sols peuvent être partiellement dissous et de l'aluminium libre peut être présent dans le sol (figure 3) et les eaux. Il apparaît alors des phénomènes bien connus de toxicité dans l'environnement pour les plantes (sols cultivés, forêts) et pour les poissons (eaux des étangs et des rivières).

Pour les sols, un indicateur de l'évolution chimique des sols consiste en la mesure de la capacité d'échange en cations des sols mesurée au pH du sol comparée à celle mesurée à $\text{pH} = 7,0$. En France, l'acidification est toujours d'actualité dans les sols qui n'ont jamais été amendés comme les pâtures extensives et sous les forêts, mais cet outil prend aussi toute son importance dans les sols cultivés comme l'ont montré les analyses de sols réalisées en France ces dernières années (WALTER *et al.*, 1997).

Le maintien à long terme de la fertilité des sols exige de gérer au mieux les pratiques de fertilisation et d'amendement. Aujourd'hui, la question des excès structurels de fertilisants est soulevée notamment du fait des apports de lisiers et de fumiers d'élevages hors sols. Jusqu'à quelle valeur peut-on laisser s'accumuler des éléments dans les sols, même les éléments indispensables pour les plantes comme le potassium et le phosphore ? La question de la gestion des apports azotés dans les zones d'élevage et de leur impact sur la qualité des eaux est aussi un enjeu important pour l'environnement. Un exemple de maîtrise des intrants azotés a été réalisé sur le périmètre d'alimentation de la source des eaux minérales de Vittel en Lorraine (Académie Agriculture, 1998). D'après les derniers résultats, en dix ans, la concentration en nitrates dans l'eau minérale a pu baisser de moitié. Jusqu'à quel point les solutions appliquées par un industriel sont-elles transposables à l'ensemble d'une région ?

Sur le sujet, la recherche agronomique tente d'élaborer de nouvelles pratiques basées sur des systèmes de cultures moins intensifs, mais qui restent économiquement viables. Il s'agit d'optimiser les apports d'intrants et les traitements phytosanitaires grâce à un ajustement précis et en temps réel des apports aux cultures. Dans tous les cas de figure ces essais exigent la durée, car comme toute production agricole, ils doivent tenir compte de fortes variations interannuelles, mais aussi de synergies ou d'antagonismes entre les pratiques pour connaître leur effet à long terme sur les sols.

3.2 Origine et flux de polluants dans les sols

Les contaminants en traces qui se retrouvent dans les sols ont différentes origines. Une origine naturelle, constitue le fonds géochimique. La pollution industrielle ou liée aux transports se fait essentiellement par voie atmosphérique. Pour les pratiques agricoles, les apports répétés et cumulatifs conduisent à ce que les flux d'entrée des éléments-traces soient supérieurs aux flux de sortie.

Selon JUSTE et ROBERT (2000), les terroirs viticoles français ont reçu en moyenne 30 kg/ha/an de cuivre destiné à lutter contre le mildiou. On estime à 36 000 t/an le flux de cuivre appliqué sur les 1 200 000 ha du vignoble français. Des teneurs de l'ordre de 300 à 500 mg/kg de cuivre dans les sols sont fréquemment mesurées. Les zones d'épandage des effluents d'élevage sont aussi concernées dans les régions comportant des élevages intensifs hors sols

comme en Bretagne. Un enrichissement continu en cuivre et zinc (1,2 à 7,0 kg/ha/an) provient des additifs alimentaires ajoutés à l'alimentation des porcs. La question posée est de savoir dans quelle mesure cette pratique pourrait conduire à l'apparition de phytotoxicités imputables à l'excès de ces métaux. L'apport de fertilisants minéraux est aussi une source non négligeable d'éléments-trace pour les sols, en particulier le cadmium des phosphates. Enfin les déchets d'origine urbaine représentent une source récente et, semble-t-il, d'importance croissante d'éléments-traces pour les sols agricoles.

Il apparaît ainsi que l'on connaît mieux aujourd'hui les sources et les teneurs en éléments-trace dans les sols, mais des zones d'ombre subsistent encore. Plus que la quantité présente dans le sol, la forme de l'élément (spéciation) et sa disponibilité ou biodisponibilité en fonction du contexte géochimique et de l'activité biologique restent des domaines de connaissance à développer pour prendre la mesure des phénomènes et maîtriser la pollution. Selon VASSEUR et MOREL (2000), les études écotoxicologiques et les méthodes d'évaluation des dangers et les modèles de risques prenant en compte les caractéristiques des écosystèmes terrestres n'en sont qu'à leur début.

4 – PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES SOLS

4.1 Évolution de la constitution

Excepté l'érosion, les flux les plus importants de matières solides concernent les matières organiques (BALESDENT, 1996). Les matières organiques possèdent une charge électrique superficielle, en moyenne huit fois supérieure à celles des argiles. À pH = 7,0, BIGORRE *et al.* (2000) ont pu établir la relation suivante pour les sols de l'Est de la France :

$$CEC_{sol} = 0,37_A + 2,75_{MO} ;$$

avec CEC en cmole+/kg de sol, et Argile (A) et Matière Organique (MO) en g pour 100 g de sol.

Les liaisons électrostatiques communes à tous les constituants combinées à des liaisons faibles propres aux matières organiques contribuent à assurer la cohésion entre les divers autres constituants des sols. Tout changement du statut organique des sols est donc potentiellement à l'origine de modifications de leurs propriétés physiques.

Aujourd'hui en Europe, la tendance générale est une baisse systématique des taux de matières organiques dans les sols (BALESDENT, 1996). Ainsi, à partir de systèmes natifs ARROUAYS *et al.*, (1994) ont montré que la baisse est de 50 % en 35 ans. Des tendances similaires ont été observées dans d'autres régions de France de l'ordre de 10 % en 10 ans.

Ces résultats montrent l'importance de l'histoire de l'usage des sols, avec la disparition des prairies et des pratiques de travail du sol de plus en plus traumatisantes (BALESDENT, 1996). Les travaux actuels s'orientent vers l'étude de la protection physique des matières organiques contre la biodégradation par les

phases minérales. Un autre aspect concerne l'étude des interactions spécifiques avec l'eau, notamment en raison du caractère plus ou moins hydrophile des matières organiques (CHENU *et al.*, 2000). Enfin, de nombreuses études portent sur la stabilité structurale des sols limoneux, pauvres en argile et à faible teneur en matières organiques.

4.2 Importance de la structure

Le stockage et le transfert de l'eau et des éléments dissous déterminent une grande partie des fonctions du sol. La présence de pores permet l'infiltration et la redistribution de l'eau. Les conditions d'aération et de température conditionnent le développement de l'activité biologique. Qu'il s'agisse des propriétés de stockage et de transfert, les propriétés des sols sont étroitement liées à leur structure, c'est-à-dire à la façon dont les constituants minéraux et organiques sont assemblés les uns par rapport aux autres. Au niveau le plus fin, la structure dépend de l'arrangement intime des particules élémentaires. À des échelles plus macroscopiques, on peut identifier différents niveaux d'organisation depuis l'agrégat millimétrique résultant directement de l'assemblage de particules élémentaires jusqu'à des assemblages de taille décimétrique à parfois métrique.

Une partie de la structure du sol est un héritage des conditions de formation des sols. La distribution en taille des particules joue un rôle sur la porosité mais, dans les sols cultivés, c'est l'action de l'homme qui est la plus visible (labour, lit de semence, passages de roues, etc.). L'action de l'homme se traduit directement (pratiques culturales) mais aussi indirectement (action de la plante et de l'activité de la faune) par une évolution de la structure (ROBERT et STENGEL, 1999). Avec le temps, cette évolution peut aller dans le sens d'une dégradation ou d'une régénération. La stabilité de la structure, c'est-à-dire sa permanence sous l'action de divers agents d'agression (pluie, vent, tassement par les engins et les animaux), est un aspect important des propriétés physiques des sols. La présence de liants et ciments entre les particules du sol comme les matières organiques et la mise en œuvre de pratiques culturales adaptées (travail du sol, couvert végétal) permettent d'améliorer la structure.

4.3 Histoire du matériau et intensification de l'agriculture

L'étude du bilan de l'eau repose sur la prise en compte simultanée des propriétés du sol, de l'action du climat et du rôle de la végétation (*figure 4*).

Pour le sol, la porosité du sol est un élément déterminant de ses propriétés de stockage et de transfert. On considère aujourd'hui que la densité apparente du sol est un excellent indicateur de la teneur en eau maximale retenue par le sol, c'est-à-dire à sa *capacité au champ*. C'est en général la capacité d'échange en cations, qui permet le mieux d'estimer la teneur en eau, au point de flétrissement permanent des plantes (TESSIER *et al.*, 1998). Ces deux paramètres permettent de calculer la réserve en eau utile des sols, paramètre d'entrée de la plupart des modèles de bilan hydrique.

Indépendamment de l'évolution de la constitution, il est d'abord apparu que la porosité des sols et en conséquence leur réserve utile varie énormément en fonction de l'origine des sols (BRUAND et TESSIER, 2000). Ces travaux ont aussi

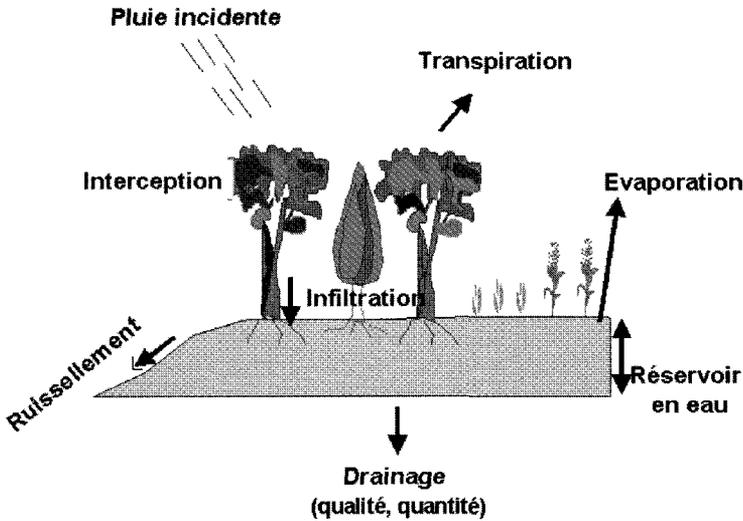


Figure 4 Représentation schématique du cycle de l'eau avec un couvert végétal.
Schematic water cycle with a plant cover.

montré que l'organisation du sol peut varier considérablement en fonction des contraintes que le sol a subies au cours de son histoire, en particulier du fait de leur usage. Ainsi BIGORRE (2000) constate que la densification des sols cultivés sous agriculture intensive peut diminuer la réserve utile de plus de 30 % par rapport aux sols forestiers. Il est donc important de tenir compte de l'usage des sols dans le calcul de leur réserve utile (*figure 5*).

Plus généralement ceci pose le problème de l'impact de l'usage sur les propriétés physiques des sols. Les conséquences de telles évolutions, en particulier leur impact sur la fertilité des sols et le cycle de l'eau sont encore mal perçues.

4.4 Importance de la chimie du sol dans les propriétés physiques

Les sols de France sont soumis depuis la fin de l'âge glaciaire à un climat favorable à l'activité biologique. On constate avec le temps un phénomène d'appauvrissement chimique à l'origine de carences en éléments majeurs, mais aussi d'une baisse importante du réservoir chimique qu'est le sol (CHARLET et SCHLEGEL, 1999). Ceci n'est pas sans répercussions sur les propriétés physiques. En conditions légèrement acides et sous l'action de l'eau, les interactions du sol avec l'eau sont modifiées, avec par exemple une affinité plus ou moins grande pour l'eau (*figure 6*).

En outre, dans les mêmes conditions, les particules du sol peuvent devenir très mobiles dans l'environnement. Dans les régions tempérées un des phénomènes importants est celui du lessivage (*translocation*) : les argiles migrent de la partie supérieure vers la partie inférieure du sol. Cette perte relative d'argile en surface se manifeste par une sensibilité particulière à l'action de l'eau



Figure 5 Carte des réserves utiles des sols du Dogger lorrain dans la région de Nancy.

Cette carte tient compte du type de sol et de son usage.

Soil map of the available water content in Dogger soils of Nancy area.

Soil map includes data from soil type and use.

(encroûtement, mise en suspension des particules). En profondeur elle se traduit par des phénomènes d'engorgement et la densification.

Aujourd'hui, sous agriculture intensive, l'acidification a tendance à progresser en raison de l'accélération des cycles biologiques liée aux restitutions orga-

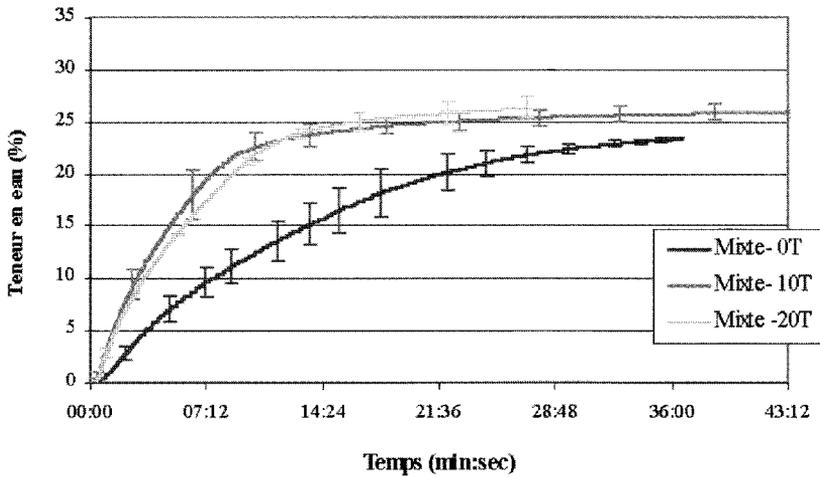


Figure 6 Importance du contexte géochimique sur l'affinité du sol pour l'eau. Le mouvement de l'eau est fortement affecté par le chaulage (0, 10 et 20 t/ha).
Importance of the geochemical context in soil water relationship. Liming (0, 10 and 20 t/ha) strongly affects water movement.

niques, comme à l'apport d'engrais ammoniacaux. La contribution des dépôts atmosphériques ne doit pas non plus être négligée. La vigilance s'impose donc quant à ce phénomène, d'où la nécessité de maintenir les sols à un pH satisfaisant par des apports d'amendements basiques (chaulage).

4.5 Érosion, un phénomène nouveau en régions tempérées

Dans de nombreuses régions de France le cycle de l'eau a été profondément modifié ces dernières années. Sur des sols limoneux, lorsque des pluies intenses surviennent, une dégradation de la surface du sol peut se produire rapidement (LECOMTE *et al.*, 1997). Sous le choc des gouttes, des particules du sol peuvent alors passer en suspension. Le ruissellement peut entraîner les plus fines d'entre elles. Nous avons l'érosion diffuse par ruissellement en nappe telle qu'elle a pu être décrite dans les plaines du Nord de la France (TESSIER *et al.*, 1996). On admet en général que dans les sols limoneux (< 15 % d'argile, teneur en matières organiques < 1,5 %), une pluie cumulée de 60 à 100 mm suffit à faire passer le sol d'un état fragmentaire en surface au stade ultime de la dégradation, c'est-à-dire la formation d'une croûte de battance (figure 7).

À ce stade l'infiltration devient très faible (quelques millimètres par jour) et la moindre pluie provoque le ruissellement. L'eau peut alors acquérir une vitesse suffisante dans les lignes de concentration du ruissellement et ainsi être à l'origine de rigoles et de ravines localisées de façon très spécifique dans le paysage.

L'étude des modalités de l'érosion indique qu'il s'agit de processus complexes faisant intervenir à la fois la quantité de pluie, la pente, la longueur du parcours de l'eau, mais également l'état du sol en début de pluie, sa stabilité



Figure 7 Exemple de phénomène d'érosion dans le bassin de Paris après la période hivernale montrant la présence d'une croûte de surface (d'après TESSIER *et al.*, 1996).

*An example of sheet erosion in the Paris Basin area after winter showing surface crusting (from TESSIER *et al.*, 1996).*

structurale et la succession des événements climatiques. L'accroissement de la taille du parcellaire, la disparition des prairies et l'introduction de nouvelles cultures nécessitant d'affiner le sol en surface, avec d'autres systèmes de rotations et des sols sans couvert végétal en hiver sont à l'origine de problèmes d'érosion. Les conséquences sont multiples car la partie la plus fine du sol est aussi la plus riche en nutriments minéraux (phosphore, azote, potassium) et en produits sanitaires associés (herbicides, pesticides). Excepté les nitrates, la majorité de ces produits est fixée sur les particules solides contribuant ainsi à la pollution des cours d'eau et des rivages. L'érosion avec ses implications dépasse largement le cadre agricole.

4.6 Modélisations couplées des propriétés et établissement de bilans

Ce qui précède démontre l'importance de réaliser des recherches portant sur le fonctionnement des sols et de développer des modèles intégrant les différents aspects des propriétés de transport de masse et d'énergie dans les sols.

Au départ, les modèles d'écoulement de l'eau et de transfert des solutés, et les modèles de la chimie des sols ont été développés séparément. Depuis une quinzaine d'années, des efforts ont été déployés afin d'associer les modèles hydrologiques d'écoulement de l'eau et ceux de transport des solutés. Les tra-

vaux se sont concentrés à la fois sur la zone du sol saturée en eau et sur la zone non saturée. Aujourd'hui les modèles incluent le transport multi-espèces de solutés dans des conditions variables de saturation en eau. La modélisation de la chimie des éléments majeurs dans le sol exige la conjugaison d'un modèle de calcul des équilibres chimiques à un modèle d'écoulement de l'eau en conditions plus ou moins saturées. La combinaison de différents modèles a par exemple conduit au code de calcul LEACHM développé par WAGENET et HUTSON (1987).

Ces modèles sont d'une importance particulière dans les sols irrigués sujets à la salinisation. Ils permettent aussi de discuter et prévoir les conditions optimales d'irrigation en fonction de la quantité et de la qualité des eaux afin de gérer à la fois le taux des différents cations adsorbés sur les phases solides, le taux de sels présent dans la solution du sol après lessivage et d'estimer la précipitation d'une phase saline. Sur ce point les travaux initiés par LAUDELOUT font encore référence en Europe (LAUDELOUT et CHIANG, 1995).

Devant la complexité des phénomènes chimiques et physicochimiques des sols et la nécessité de répondre à de nombreuses questions qui se posent en matière d'environnement, les modèles s'orientent vers la prise en compte simultanée d'aspects biologiques dans les processus et mécanismes d'évolution des propriétés des sols. Il en est par exemple ainsi du cycle de l'azote dans l'alimentation minérale et ses conséquences sur la qualité des nappes souterraines. En France, les équipes Inra ont adapté des modèles tels que CERES (BRISSON *et al.*, 1998) et STICS (POPOVA *et al.*, 2000) afin de répondre à des préoccupations environnementales.

Des modules spécifiques sont actuellement développés afin d'évaluer les risques de transfert de polluants principalement pour les composés azotés, carbonés (GOSSÉ *et al.*, 1999), les pesticides (ABDELHAFID *et al.*, 2000), les éléments-trace métalliques et les matières organiques exogènes. Il a été démontré qu'il est important de considérer des échelles spatiales variées prenant en compte les caractéristiques spécifiques de chaque unité de sol en fonction de son usage (GAULTIER *et al.*, 2000). Si la constitution du sol notamment en matières organiques est prise en compte, il reste manifestement beaucoup à faire pour modéliser les propriétés aux interfaces des constituants des sols (charges électriques superficielles variables, adsorption des cations), et leur impact sur les propriétés de rétention et de transfert, de l'eau et des solutés, mais aussi des particules en suspension dans les eaux.

La question de l'utilisation des données sols en vue de mieux répondre aux défis actuels se pose et fait l'objet d'une réflexion plus globale sur les fonctions dites de pédotransfert (BASTET *et al.*, 1998). Dans quelle mesure ne doit-on pas revoir les modalités d'acquisition des données pédologiques pour les adapter aux questions qui se posent sur le fonctionnement des sols ?

Pour la recherche, les défis sont d'intégrer des échelles temporelles intégrant plusieurs cycles de végétation, notamment dans le cadre de pratiques agronomiques visant réduire l'émission de CO₂ vers l'atmosphère. Ces travaux nécessitent notamment la mise en place de dispositifs expérimentaux de longue durée, gérés par des équipes pluridisciplinaires. Il s'agit de prendre en compte simultanément des aspects chimiques, physiques et biologiques, ce qui inclut pour ces derniers le rôle de la plante, de la faune et des micro-organismes du sol.

Le but de telles études est spécialement d'optimiser les intrants, c'est-à-dire aussi bien les engrais, les amendements, les résidus d'élevage et/ou les produits phytosanitaires dans les systèmes de cultures en vue d'effectuer des bilans environnementaux. Les études se focalisent actuellement sur l'émission de composés azotés gazeux et de pesticides dans l'environnement, mais aussi la dispersion de particules biotiques par le vent et la pluie, par exemple les pollens provenant d'organismes génétiquement modifiés.

L'importance des cycles d'oxydoréduction est mise en avant dans les zones humides et les périmètres irrigués notamment vis-à-vis de la réduction des nitrates et l'émission de gaz à effet de serre (HENAULT et GERMON, 2000). Dans ce cas de figure, la dissolution/précipitation de nouvelles phases minérales implique un changement de la réactivité du sol vis-à-vis des cations et leur redistribution dans les sols (FAVRE *et al.*, 2002). La prise en compte de ces mécanismes est d'une importance primordiale dans la prévision de l'émission de gaz à effet de serre comme les oxydes d'azote ou le méthane.

5 - CONCLUSIONS

Au XX^e siècle et notamment après la Seconde guerre mondiale, les sols ont trop souvent été considérés comme un moyen de production à maîtriser et à adapter en vue d'intensifier la production agricole. Ceci a conduit à négliger le sol et divers types de dégradations sont apparus. Il en est ainsi de l'érosion diffuse et de l'acidification. Les sols cultivés ont souvent perdu une forte proportion de leur teneur en matières organiques. L'agriculture intensive avec des pratiques culturales traumatisantes a aussi modifié le milieu écologique. Les rejets des élevages posent des problèmes structurels de pollution liés aux surplus de fertilisants. Les rejets industriels et ménagers ont parfois conduit à des pollutions irréversibles métalliques ou en produits organiques.

La gestion des systèmes agricoles intensifs impose d'évaluer, pour les prévenir, les menaces qui pèsent sur les sols, en particulier les altérations de leurs diverses fonctions. L'action de l'homme n'est pas limitée au seul impact d'une activité individuelle et à l'échelle locale, mais doit prendre en compte des effets globaux et cumulatifs à d'autres échelles.

Dans les études actuelles, il ne faut pas négliger la valorisation du patrimoine sol, en particulier la typicité des produits (aspect terroir). Pour ces questions, la production fromagère de qualité reposant sur le contrôle d'une filière de production, depuis la définition de la zone de production (terroir), le type d'alimentation, la race laitière, le procédé de fabrication et jusqu'à la méthode d'affinage, peut servir d'exemple.

Au total, les travaux réalisés science du sol doivent fournir une réserve de connaissances dans laquelle la recherche appliquée puise des éléments d'interprétation du fonctionnement des sols et ce afin de répondre aux besoins de l'agriculture et de l'environnement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDELHAFID R., HOUOT S., BARRIUSO E., 2000. How increasing availabilities of carbon and nitrogen affect atrazine behaviour in soils. *Biology and Fertility of Soils*, 30, 333-340.
- Académie Agriculture de France, 1998. Gestion des sols et qualité des eaux. Situation et examen des actions menées en Lorraine. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 84, 5-201.
- ARROUAYS D., KICIN J.L., PÉLISSIER P., VION I., 1994. Évolution des stocks de carbone des sols après déforestation : analyse spatiotemporelle à l'échelle d'un paysage pédologique. *Étude et Gestion des Sols*, 1-2, 7-15.
- BALESDENT J., 1996. Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France. *Étude et Gestion des Sols*, 3-4, 245-260.
- BASTET G., BRUAND A., VOLTZ M., BORNAND M., QUÉTIN P., 1998. Prediction of water retention properties: Performance of available pedotransfer functions and development of new approaches. A. Ruellan ed., *16th International Congress of Soil Science, Montpellier*, 20-26.
- BIGORRE F., 2000. Influence de la pédogenèse et de l'usage des sols sur leurs propriétés physiques. Mécanismes d'évolution et éléments de prévision. Thèse Univ. Nancy, Inra Versailles éd., 148 p.
- BIGORRE F., TESSIER D., PÉDRO G., 2000. Contribution des argiles et des matières organiques à la rétention de l'eau dans les sols. Signification et rôle fondamental de la capacité d'échange en cations. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 330, 245-250.
- BRISSON N., MARY B., RIPOCHE D., JEUFROY M.H., RUGET F., NICOUILLAUD B., GATE P., DEVIENNE-BARRET F., ANTONIOLETTI R., DURR C., RICHARD G., BEAUDOIN N., RECOUS S., TAYOT X., PLENET D., CELLIER P., MACHET J.M., MEYNARD J.M., DELÉCOLLE R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. 1. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311-346.
- BRUAND A., TESSIER D., 2000. Water retention properties of the clay in soils developed on clayey sediments: significance of parent material and soil history. *European Journal of Soil Science*, 51, 679-688.
- CHARLET L., SCHLEGEL L., 1999. La capacité d'échange des sols. Structures et charges à l'interface eau/particule. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 85 (2), 7-24.
- CHENU C., LE BISSONNAIS Y., ARROUAYS D., 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 1479-1486.
- DE KIMPE C., 1999. Bilan des gaz à effet de serre dans l'espace rural canadien et stratégie de réduction. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 85, 329-343.
- FAVRE F., TESSIER D., ABDELMOULA M., GÉNIN M., GATES W.P., BOIVIN P., 2002. Iron reduction and changes in cation exchange capacity in intermitently waterlogged soil. *European Journal Soil Science*, 53, 1-9.
- GABRIELLE B., 1997. Mesure et modélisation du bilan environnemental du colza. *Fondamental*, 4 (3), 220-227.
- GAULTIER J.P., LORENZATI S., BIGORRE F., TESSIER D., 2000. Spatialisation du bilan de l'eau dans les sols du Dogger lorrain. Influence du type de sol et de son usage. *Géomatique, SIG et simulations*, 10, 19-38.
- GERMON J.C., HÉNAULT C., GARRIDO F., REAU R., 1999. Mécanismes de production, régulation et possibilité de limitation des émissions de N₂O à l'échelle agronomique. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 85, 148-162.
- GOSSE G., CELLIER P., DENOROY P., GABRIELLE B., LAVILLE P., LEVIEL B., JUSTES E., NICOLARDOT B., MARY B., RECOUS S., GERMON J.C., HÉNAULT C., LEECH P.K., 1999. Water, carbon and nitrogen cycling in a rendzina soil cropped with winter oilseed rape: the Châlons Oilseed Rape. *Agronomie*, 19, 119-124.
- HÉNAULT C., GERMON J.C., 2000. NEMIS, a predictive model of denitrification on the field scale. *European Journal of Soil Science*, 51, 247-270.
- JUSTE C., ROBERT M., 2000. Les apports et les sources de contaminants en traces. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 86, 13-24.

- LAUDELOUT H., CHIANG C., 1995. Modélisation du mouvement des sels dans les sols du Maroc. *Homme Terre Eaux*, 25, 57-61.
- LECOMTE V., LE BISSONNAIS Y., RENAUX B., COURTURIER A., LIGNEAU L., 1997. Érosion hydrique et transfert de produits phytosanitaires dans les eaux de ruissellement. *Cahiers Agricultures*, 6, 175-183.
- MONZA (de) J.P., 1989. Le grand atlas de la France rurale, Inra/SCEES éd., 494 p.
- POPOVA Z., LEVIEL B., MITOVA T., GABRIELLE B., KERCHEVA M., 2000. CERES-Wheat model calibration/validation and use for risk assessment of impact of fertilisers in Bulgaria. In: MERMOUD A., MUSY A., PEREIRA L.S., RAGAB R. (ed.), *Control of adverse impacts of fertilizers and agrochemicals*, ICID, International Commission on Irrigation and Drainage, (IND), 139-153, *Workshop, Cape Town, South Africa*.
- RIVIÈRE E., 1999. Les bilans des sources et des puits de gaz à effet de serre : la part de l'agriculture et de la forêt en France. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 85, 64-67.
- ROBERT M., 1996. Le sol : une interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Masson éd., 241 p.
- ROBERT M., 1999. Impacts des changements climatiques sur l'évolution des sols et conséquences sur le bilan hydrique. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 85 (4) 35-44.
- ROBERT M., STENGEL P., 1999. Sols et agriculture : ressource en sol, qualité et processus de dégradation. *Cahiers Agricultures*, 8, 301-308.
- TESSIER D., BIGORRE F., BRUAND A., 1999. La capacité d'échange outil de prévision des propriétés physiques des sols. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 85 (2), 37-50.
- TESSIER D., BRUAND A., LE BISSONNAIS Y., DAMBRINE E., 1996. Qualité physique et chimique des sols, implications pour l'agriculture et l'environnement. *Étude et Gestion des Sols*, 3 (4), 229-244.
- VASSEUR P., MOREL J.L., 2000. Contamination des milieux par les éléments-traces. Les conséquences sur la plante et les écosystèmes. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 86, 39-48.
- WAGENET R.J., HUTSON J.L., 1987. LEACHM: Leaching Estimation and Chemistry Model. A process-based model of water and solute movement transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone, Continuum 2. Dpt of Agronomy, Cornell University, Ithaca, New York.
- WALTER Ch., SCHVARTZ Ch., CLAUDOT B., AUROUSSEAU P., 1997. Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994. Descriptions statistiques et cartographie de la variabilité des horizons de surface des sols cultivés. *Étude et Gestion des Sols*, 4, 205-219.