

# Qualité chimique et physique des sols :

## Variabilité spatiale et évolution

D. Tessier<sup>(1)</sup>, A. Bruand<sup>(2)</sup>, Y. Le Bissonnais<sup>(2)</sup> et E. Dambrine<sup>(3)</sup>

(1) Unité de Science du Sol, INRA, 78026 Versailles Cedex

(2) Unité de Science du Sol - SESCPF, INRA, Centre d'Orléans, 45160 Ardon

(3) INRA, Ecosystèmes forestiers : Microbiologie, Pathologie et Biogéochimie, 54280 Champenoux

### RÉSUMÉ

Les sols de France présentent une grande variété liée principalement à la diversité géologique et climatique du territoire. La qualité des sols au plan chimique et physique est en partie à l'origine de la différenciation des régions naturelles telles que nous pouvons les observer aujourd'hui. C'est cette qualité des sols qui a déterminé au cours de l'histoire un mode d'occupation qui est spécifique à chaque région. Cependant l'organisation du territoire a constamment évolué au cours du temps, notamment du fait de l'action de l'homme.

Durant la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, la transformation de l'agriculture a été accompagnée de travaux importants d'aménagement comme le drainage et le remembrement. Depuis le début du XIX<sup>ème</sup> siècle la surface occupée par les forêts a augmenté grâce à la reforestation des zones marginales. Dans les sols cultivés, la fertilisation a généralement permis de remédier au phénomène d'appauvrissement naturel des sols alors que sous forêt l'acidification tend à s'accroître entraînant parfois des phénomènes de carence. Cependant la question des excès de fertilisants est soulevée notamment du fait des élevages hors sols, avec les risques d'entraînement dans le réseau hydrographique.

La dégradation physique prend de nouvelles formes, des zones de grande culture dans des régions de relief peu marqué peuvent être affectées par l'érosion. Des déplacements de particules et éventuellement de produits phytosanitaires provenant des parcelles cultivées peuvent contaminer les cours d'eau et les zones côtières. Les hauts niveaux de rendement des cultures ont modifié le cycle terrestre de l'eau et sollicité au maximum la réserve en eau des sols. On a de plus en plus fréquemment recours à l'irrigation complémentaire, même dans les régions septentrionales. Les conséquences à long terme aussi bien sur les sols que pour les nappes d'eau souterraines sont encore mal connues.

La qualité des sols apparaît alors comme ayant été à la fois un facteur d'évolution de leur mise en valeur et de façon plus générale, de différenciation de nos paysages au cours du temps. Dans l'avenir, la qualité des sols sera sans aucun doute mieux prise en compte car elle est un élément essentiel de toute réflexion ayant pour objectif une agriculture durable dans le respect de l'environnement.

### Mots clés

Sols, qualité, fertilité, eau, érosion, environnement

**SUMMARY****CHEMICAL AND PHYSICAL QUALITIES OF SOIL : Spatial context and evolution**

France has a wide variety of soil types mainly due to the geological and climatic diversity of the land. Soil quality at a chemical and physical level is to some extent responsible for the differentiation of natural regions as they appear today and it has always determined the land use pattern particular to each region. Land layout, however, has evolved constantly, especially through the actions of man. During this half of the XX<sup>th</sup> century, the transformation of agricultural methods has been accompanied by large-scale land use development such as land reclamation and consolidation. Since the beginning of the XIX<sup>th</sup> century, the amount of land covered by forests has increased thanks to the reforestation of marginal zones. In cropped soil, fertilisation has overcome problems of natural soil nutrient depletion, whereas in forest land acidification is on the increase and can lead to soil deficiencies. Yet, the overapplication of fertilizers poses another problem as intensive indoor production runs the risk of contaminating the hydrographic network. Soil degradation is taking on new forms as arable crops in regions with little marked topography are subject to erosion. Particle movement and even phytosanitary products from cropped plots contaminate downstream water and coastal areas. High crop yields have modified the water cycle and drained soil water reserves. Supplementary irrigation is becoming commonplace even in northern areas. No-one really knows what the long-term consequences for the soil and groundwater will be. The notion of soil quality has evolved, bringing about changes in land development and landscape differentiation. In the future, the question of soil quality should be a key element in any considerations on how the soil should be managed in a sustainable agriculture which respects the environment.

**Key-words**

Soil, quality, fertility, water, erosion, environment

**RESUMEN****CALIDAD FÍSICA Y QUÍMICA DE SUELOS : Variabilidad espacial y evolución**

Los suelos de Francia presentan una gran variedad ligada principalmente a la diversidad climática y geológica del territorio. La calidad de los suelos desde el punto de vista químico y físico ha impuesto en cada región natural del país y a lo largo del tiempo una ocupación específica de los suelos. Sin embargo, la organización del territorio ha evolucionado constantemente a lo largo del tiempo, principalmente debido a la acción del hombre.

En la segunda mitad del siglo XX la racionalización de la agricultura ha sido acompañada de importantes trabajos de infraestructura como el drenaje y la concentración parcelaria. Desde el principio del siglo XIX la superficie ocupada por los bosques ha aumentado gracias a la reforestación de zonas marginales. En los suelos cultivados, la fertilización generalmente ha permitido remediar los fenómenos de empobrecimiento natural de los suelos, mientras que bajo el bosque la acidificación tiende a acentuarse provocando a veces fenómenos de toxicidad. La interrupción de aportes fertilizantes podría cuestionar uno de los principales logros agronómicos de estos últimos cincuenta años, a saber, la restauración de la fertilidad química de los suelos. Sin embargo la cuestión de los excesos de fertilizantes resurge debido a la crianza intensiva en estabulaciones.

Actualmente, la degradación física de los suelos se presenta bajo nuevas formas. Las zonas planas pueden ser afectadas por la erosión. Desplazamientos a gran distancia pueden contaminar cursos de agua y zonas costeras. Los altos niveles de rendimiento de los cultivos han modificado el ciclo terrestre del agua solicitando al máximo la reserva de agua de los suelos. Se utiliza la irrigación complementaria incluso en las regiones septentrionales. Las consecuencias a largo plazo tanto para los suelos como para las capas freáticas son todavía mal conocidas.

Por lo tanto, la calidad de los suelos aparece al mismo tiempo como un factor de evolución de su utilización y, de una manera general, de diferenciación de nuestros paisajes a lo largo del tiempo. En el futuro, sin ninguna duda la calidad de los suelos será mejor considerada pues es un elemento esencial de toda reflexión teniendo como objetivo la gestión de suelos en el marco de una agricultura durable respetando el medio ambiente.

**Palabras claves**

Suelos, calidad, fertilidad, agua, erosión, medio ambiente.

La qualité d'un sol a d'abord été définie comme étant son aptitude à fournir à l'ensemble de la biomasse, et en particulier aux plantes, un milieu propice à leur développement. Aujourd'hui, le concept de qualité dépasse le strict cadre de la production agricole pour s'étendre au sol dans notre cadre de vie. Il fait alors référence à la valeur esthétique des paysages, aux contraintes liées à l'aménagement du territoire, mais aussi il prend en compte la protection de la qualité des eaux.

Cette qualité dépend de multiples facteurs. Il faut distinguer ceux intrinsèques aux sols et ceux d'origine externe, avec plus spécialement ceux liés à l'environnement (climat en particulier). Au plan physique, le sol est non seulement un support pour le passage des animaux et des engins mais aussi un réservoir et un lieu de transit pour l'eau et les gaz. Son aptitude à permettre le transport de l'eau et des gaz d'un endroit à un autre conditionne le développement de l'ensemble de la biomasse et en particulier des végétaux. Au plan chimique, le sol est avant tout la source d'ions indispensables pour les plantes. La présence d'ions en excès, utiles ou non pour les plantes, peut alors être à l'origine de phénomènes de toxicité.

Cet article a pour objectif de présenter de façon aussi simple que possible quelques idées ayant trait à la qualité chimique et physique des sols. Nous ne tenterons pas d'en envisager les différents aspects de façon exhaustive. En revanche, l'accent sera mis sur l'importance de la diversité des sols à l'échelle régionale et à celle de portions de territoire de beaucoup plus petite dimension. Nous insisterons aussi sur les modifications de mode d'occupation des sols qui sont intervenues durant la période récente. Nous verrons comment qualités physique et chimique ont pu déterminer les pratiques agricoles et quelles peuvent avoir été leurs conséquences sur la qualité des sols.

## UNE MOSAÏQUE DE SOLS ORGANISÉE DONT LA MISE EN VALEUR A ÉVOLUÉ AU COURS DE L'HISTOIRE

### Une grande diversité des sols à l'échelle du territoire

Il est extrêmement difficile de rendre compte de la variabilité des sols à l'échelle d'un territoire comme celui de la France. Ainsi la légende de la carte des sols de France à 1/1 000 000<sup>ème</sup> dressée par Dupuis (1966) fait apparaître 46 unités de sols. Cette carte ne donne cependant qu'une représentation très simplifiée de la diversité des sols telle qu'on peut l'apprécier sur le terrain (Jamagne et al., 1995). Cette diversité tient d'abord à la grande variété des roches sur lesquelles les sols se sont développés.

L'examen des cartes pédologiques à une échelle plus détaillée comme celle du 1/100 000<sup>ème</sup> et de leurs notices permet de mieux prendre la mesure de la diversité de sols à l'échelle du territoire. La couverture systématique du territoire est envisagée depuis quelques années à l'échelle de 1/250 000<sup>ème</sup> [programme actuel Inventaire, Gestion et Conservation des Sols, (IGCS) élaboré par l'INRA et le Ministère de l'Agriculture]. Il faut préciser que la valorisation des travaux déjà réalisés et de ceux en cours passe maintenant par leur intégration à des bases de données. Les cartes de sols et a fortiori les cartes thématiques (pente, réserve en eau, charge en cailloux, acidité, ...) qui en étaient traditionnellement dérivées ne sont plus aujourd'hui que l'expression graphique à une échelle donnée et à un moment donné de la connaissance des sols et de leurs propriétés sur un territoire déterminé (Arrouays et al., 1989 ; King et al., 1991 et 1992 ; Girard et al., 1993 ; Bornand et al., 1994 ; Roque et Hardy, 1997).

### Une distribution des sols en étroite relation avec la géologie et la topographie

C'est fréquemment à l'échelle du versant que la variété et la logique de distribution des sols peut être la mieux perçue. La figure 1 donne un exemple simple de la répartition des sols à cette échelle ainsi que de leur mode d'occupation tel qu'on pouvait encore l'observer au début des années 60. Dans cet exemple des sols du Perche, à la lisière de la Beauce et de la Normandie, les différents types de sols varient depuis le plateau jusqu'au fond de la vallée. La dénivelée peut atteindre une centaine de mètres. Dans cette région où le Crétacé inférieur affleure en majorité, chaque unité lithologique ne dépasse pas quelques dizaines de mètres en épaisseur. On rencontre alors successivement les principales formations suivantes :

- en position de plateau et au sommet des collines, les argiles à silex. Elles sont issues de l'altération au cours de l'ère tertiaire de la craie sénonienne. Contrairement à la craie, le matériau d'altération ne contient plus de carbonates. Il s'agit d'un résidu argileux renfermant une forte charge en cailloux ;
- en haut de pente on rencontre les sables du Perche qui appartiennent au Cénomaniens ;
- à mi pente on trouve des niveaux crayeux, marneux ou argileux décarbonatés (argiles vertes) du Cénomaniens inférieur ;
- sous les argiles et les marnes se trouve le Jurassique inférieur qui peut affleurer dans certaines dépressions ;

La géologie de cette région illustre l'importance de la nature du substratum dans le type de séquence de sols (séquence pédologique) qui en dérive (Isambert, 1974). Ainsi à l'échelle du paysage on trouve la séquence de sols suivante :

- au sommet des collines des PLANOSOLS appauvris en argile en surface dont la teneur en argile de la fraction fine (< 2 mm), dépasse souvent 70 % en profondeur. La charge en cailloux peut dépasser 50 %. Bien qu'en position sommitale, ces sols

sont mal drainés et présentent un excès d'eau en hiver. Ils deviennent aussi rapidement secs en saison estivale. La présence de cailloux et leur caractère très argileux, ainsi que leur pauvreté au plan chimique les a réservés à la forêt. Aujourd'hui les futaies sont suffisamment anciennes pour être exploités en bois d'œuvre ;

- les sols de haut de pente sont des BRUNISOLS MÉSOSATURÉS, sableux et filtrants, mais cependant profonds et généralement bien exposés (sud à sud est). Les archives locales nous indiquent qu'ils sont cultivés depuis plusieurs siècles. Il s'agit pourtant de sols originellement acides et ils ont de ce fait été amendés, au moins depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle, comme l'atteste la présence de nombreuses marnières, soit à ciel ouvert en bordure de parcelle, soit au milieu des parcelles dans des carrières souterraines ;

- les sols développés sur matériau crayeux et sur marnes sont soit des BRUNISOLS, soit des CALCISOLS, soit encore des CALCOSOLS. Ce sont des sols limoneux à limono-argileux en surface, donc relativement légers se trouvant généralement en position de replat. Ils ont souvent été consacrés aux plantes sarclées, aux céréales, mais aussi à des légumineuses comme par exemple le sainfoin. Cette plante riche en calcium a d'ailleurs joué un rôle important dans la nourriture des chevaux ;

Jusqu'aux années 60, les sols argileux fortement structurés (BRUNISOLS VERTIQUES) développés sur argiles vertes trop difficiles à travailler, ainsi que les sols hydromorphes des fonds de vallée à excès d'eau temporaire ou permanent étaient réservés à la prairie.

L'occupation des sols, telle qu'elle vient d'être décrite met clairement en évidence les principaux facteurs qui ont déterminé dans la passé la mise en valeur des sols. Les sols présentant peu de contraintes physiques (pente faible, réserve en eau suffisante, travail du sol aisé, riches en calcium ou ayant reçu des amendements calcaires) étaient consacrés aux cultures. Les sols trop difficiles à travailler ou ayant un excès d'eau étaient réservés aux prairies, on les trouve généralement en fond de vallée. Là où les contraintes physiques et chimiques étaient les plus fortes, les sols sont restés en forêt. Dans cette région de bocage, les parcelles étaient entourées de haies et le parcellaire respectait assez bien la distribution des sols à l'échelle du paysage. De plus la taille réduite des parcelles limitait le plus souvent les éventuels transferts de particules par ruissellement à de courtes distances.

Cette distribution des sols et leur occupation telle que nous venons de la décrire ne saurait être considérée comme générale dans notre pays. Elle illustre cependant l'adéquation à laquelle on pouvait aboutir dans une région donnée et à une époque donnée entre les contraintes du milieu et une agriculture à base de polyculture et d'élevage dans l'ouest de la France.

Suivant les cas, l'adaptation de l'agriculture au milieu a

conduit à une spécialisation de l'activité agricole. C'est ainsi que sont nés les terroirs dont l'illustration la plus connue est celle des terroirs viticoles. Dans un travail de synthèse en Anjou, Morlat et Asselin (1992) ont montré l'importance du substratum, du type de sol, ainsi que des composantes du paysage dans la notion de terroir. En Champagne le substrat de prédilection est la craie avec des sols de pente exposés Sud-Sud Est (Pomerol, 1990 ; Ballif et al., 1995). Des constatations analogues peuvent être faites dans d'autres régions de France (Alsace, Bourgogne, Médoc, Côte du Rhône, etc.)

## Une évolution permanente du mode d'occupation du territoire

Comme la rappelle Boulaïne (1996), l'occupation des sols a constamment évolué au cours de l'histoire. On sait par exemple que depuis le Néolithique et le début du défrichement des forêts, la population de notre pays est passée de quelques dizaines de milliers d'habitants à une dizaine de millions au Moyen Âge, et à 60 millions aujourd'hui. C'est la déforestation des terres les plus faciles à cultiver qui a été le lieu de départ de l'activité agricole et par voie de conséquence de l'évolution démographique. La déforestation a ensuite concerné des zones considérées comme plus marginales car plus difficiles à cultiver. Ceci a été rendu possible par différents sauts technologiques. On peut citer l'introduction de la culture attelée avec le bœuf puis du cheval, de nouveaux outils de travail du sol, la mise au point de systèmes de rotation des cultures, l'acclimatation et la sélection de nouvelles plantes, des techniques de restitution puis de fertilisation de plus en plus élaborées, mais aussi des travaux d'aménagement par exemple pour palier à l'excès d'eau (drainage) ou au manque d'eau (irrigation).

Cependant, c'est au cours des cinquante dernières années que l'occupation des sols a le plus évolué. Pour résumer, on peut dire que les techniques de fertilisation et des travaux d'aménagement ont permis de lever certaines contraintes alors qu'ils en ont dans le même temps introduit de nouvelles. On a assisté en outre à une spécialisation des exploitations et même des régions. A cet effet, on conseillera au lecteur de se reporter au Grand Atlas de la France Rurale (de Monza, 1989). Cet ouvrage collectif 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.

Le grand tournant s'est produit fin des années 50 avec le remplacement de la traction attelée par le tracteur. Il s'est immédiatement traduit par une augmentation du troupeau laitier qui a été amplifiée du fait de la révolution fourragère. Beaucoup de prairies naturelles ont été retournées et remplacées par des cultures et des prairies temporaires en alternance. C'est à cette époque que le maïs grain ou fourrager (pour l'ensilage) a été introduit dans la partie septentrionale de la France.

L'exemple donné figure 2 illustre la situation actuelle dans la région Perche. Les sols jusqu'alors réservés à la prairie ont été mis en culture. On a souvent retourné toutes les prairies permanentes et drainé les sols 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 20 quintaux par hectare en 1950 à environ 70 quintaux et plus en 1996. 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...

On remarque aussi que cette spécialisation de l'agriculture s'est la plupart du temps traduite par une augmentation des surfaces cultivées en céréales et de nouvelles cultures (pois protéagineux, colza, tournesol en particulier). D'un autre côté, l'élevage bovin a été remplacé ou complété par des ateliers hors sols (porcs, volailles).

Il est indéniable que cette évolution de l'agriculture est très perceptible au travers de la transformation des paysages. Les changements paysagers sont liés à l'usage agricole et sont pour l'essentiel imputables à la mécanisation et à la restructuration foncière. Le remembrement en particulier est responsable de l'augmentation de la taille des parcelles et de la suppression de nombreux éléments linéaires qui participaient à la structuration du paysage.

Dans les zones marginales, c'est-à-dire d'altitude avec de fortes pentes, la reforestation des terres abandonnées par l'activité agricole a profondément changé l'aspect des paysages. A l'échelle du territoire national, la transformation de l'agriculture et l'exode rural, ont conduit à une progression globale des surfaces couvertes en forêts (Figure 3). Cette évolution n'est pas récente puisqu'elle a commencé dès le début du XIX<sup>ème</sup> siècle, c'est-à-dire depuis le début de l'exode rural. En moins

Figure 1 - Exemple de répartition des sols à l'échelle d'un paysage et de leur occupation au début des années 60 dans la région du Perche (adapté de Isambert, 1984).

**Figure 1** - Schematic spatial distribution of soils in the landscape and their occupation at the beginning of sixties in Perche area (adapted from Isambert, 1984)

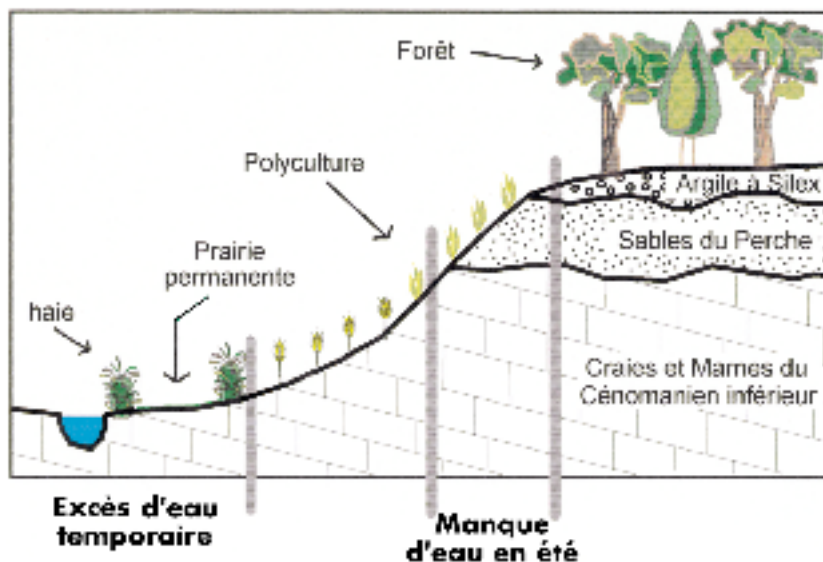


Figure 2 - Représentation schématique de l'occupation actuelle des sols dans la région du Perche (adapté de Isambert, 1984).

**Figure 2** - Schematic spatial distribution of soils in the landscape and their occupation at the present time in Perche area (adapted from Isambert, 1984).

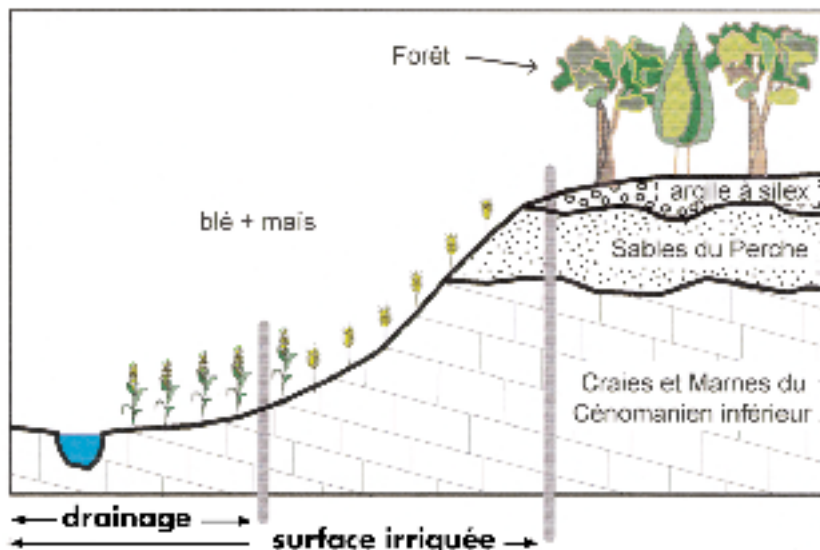
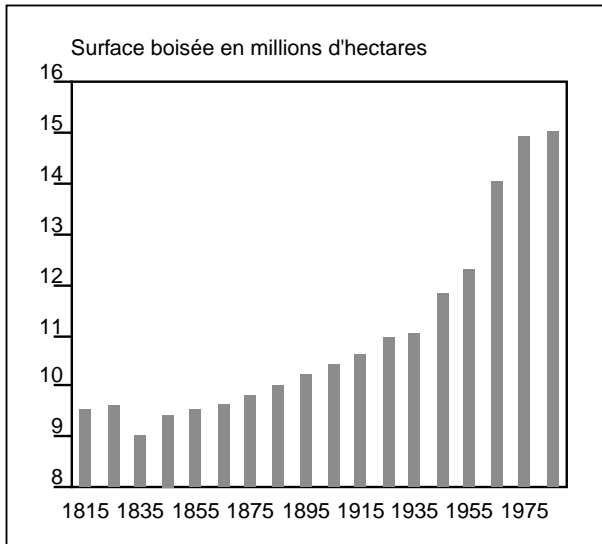


Figure 3 - Progression globale des sols couverts en forêts depuis le début du XIX<sup>ème</sup> siècle. La statistique agricole, graphe forêt-bois, (1994).

**Figure 3** -Global evolution of soils under forest from early XIX<sup>th</sup> century.



de deux siècles, la surface forestière est passée de 10 % à environ 25 % du territoire avec une évolution considérable du volume de bois exploitable et des essences forestières, notamment des résineux.

En revanche, en zones de plaines de nouvelles terres, des territoires jusqu'alors occupés par des bois, ont été mises en culture. Ce fut le cas en Champagne et, dans une moindre mesure, sur les plateaux calcaires de l'est du Bassin de Paris (Ballif et al., 1995). Ici c'est la levée de contraintes liées à la fertilisation (apport de phosphates solubles) qui a permis le développement d'une agriculture intensive.

Enfin, il faut souligner le processus irréversible d'urbanisation et d'équipement du territoire qui n'a cessé de modifier les paysages (routes et autoroutes, lotissements, lignes à haute tension, aéroports). Les zones urbanisées occupent souvent les meilleures terres du pays (environ 5 %) et modifient à leur contact l'occupation du territoire (Thinon et al., 1996).

### Un espace à mieux gérer et valoriser

Il ressort de ce qui précède que l'évolution de l'agriculture s'est accélérée ces cinquante dernières années. Un type d'occupation des sols avec une agriculture à base de polyculture élevage a perduré dans les régions de plaines au cours du XIX<sup>ème</sup> et jusqu'à la moitié du XX<sup>ème</sup> siècle. Dans la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle la mécanisation de l'agriculture, accompagnée de travaux importants d'aménagement comme le

drainage et le remembrement, ainsi que le perfectionnement de la fertilisation, a profondément modifié leur potentialité initiale. Cependant, les grands terroirs produisant des cultures bien valorisées (vins, fruits) ont largement préservé leur identité malgré le contexte général d'internationalisation qui tend à l'uniformisation des produits. Ainsi la notion de terroir devrait être mieux utilisée à l'avenir pour gérer la production avec un souci d'aboutir à des produits de qualité et de typicité marquée en respectant mieux l'environnement.

## LA QUALITÉ CHIMIQUE DES SOLS

### Un héritage pédologique

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 peuvent soit être exportés du fait des récoltes, soit éliminés des sols par les eaux. Les apports atmosphériques mais aussi les pratiques humaines peuvent contribuer à enrichir le sol au plan chimique. Dans le bilan des éléments, il est nécessaire de prendre en compte les réserves naturelles du sol. Du fait des seuls processus naturels, dans les régions tempérées, le sol perd progressivement une partie de son stock en bases, notamment les métaux alcalins (K, Na) et alcalino-terreux (Ca, Mg). Pour plus de précision on pourra se référer à Duchaufour (1995) et Robert (1996). Cette perte progressive affecte d'abord les carbonates du sol, puis concerne les cations fixés à la surface des argiles. Le sol devient de ce fait acide. Lorsque l'acidité devient suffisamment forte les constituants minéraux des sols peuvent être partiellement dissous et de l'aluminium libre peut être présent dans le sol et les eaux. Il apparaît alors des phénomènes bien connus de carence et de toxicité.

Un indicateur très précis de l'évolution chimique des sols consiste en la mesure de leur taux de saturation (S) en cations (Ca, Mg, Na et K) par rapport à la capacité d'échange totale du sol (T). T exprime la quantité maximale de cations qui est fixée à la surface des argiles et des matières organiques. Le taux de saturation en bases S/T ainsi que le pH donnent une information très précise sur l'état d'acidification du sol.

Différentes situations peuvent ainsi être identifiées dans notre pays où les conditions acidifiantes dominent (~ 60 %). Selon Pédro et Scherrer (1974) on peut distinguer :

- le domaine aluminisé à acidification intense. Il correspond aux affleurements de roches filtrantes favorables au lessivage des cations et/ou siliceuses, c'est à dire faiblement pourvues en minéraux altérables susceptibles de réapprovisionner le stock du sol en cations basiques. C'est le cas des sables, des grès, et des zones granitiques ;

- le domaine des sols désaturés où l'acidification reste modérée. Il intéresse principalement les formations limoneuses

des Bassins Parisien et Aquitain ;

- le domaine des sols saturés par du calcium en excès sur les marnes et les roches calcaires tendres, par du calcium et du magnésium sur les roches dolomitiques ;

- les dépôts récents des bords de mer, des marais peuvent être influencés par la mer (présence de sodium) et les zones alluvionnaires sont sous la dépendance des affleurements géologiques environnants.

### Une amélioration de la fertilité grâce à la fertilisation

Nous avons vu que la réserve chimique des sols dépend de la nature du matériau sur lequel le sol s'est développé ; elle est aussi fonction de l'âge du sol, ainsi que des exportations dues à la végétation. Les plantes prélèvent les éléments qui leur permettent d'assurer leurs fonctions vitales. Sans entrer dans le détail il s'agit en premier lieu de l'azote, du phosphore et du potassium, mais aussi de quelques autres comme le calcium, le fer, le soufre et le magnésium, ainsi que des oligo-éléments. Si le sol est un système ouvert qui a tendance à perdre une partie des éléments, la première cause d'appauvrissements des sols au plan chimique est l'agriculture.

Boulaine (1995a et b, 1996) rappelle que les unités de production agricoles ont, dans le passé, toujours été déficitaires du point de vue chimique car la consommation des plantes est, en l'absence de fertilisation, largement supérieure à la fourniture par l'altération des roches. Ainsi au XIX<sup>ème</sup> siècle les sols étaient tellement appauvris en éléments fertilisants qu'ils ne permettaient de nourrir que 20 millions d'habitants, et ce malgré les progrès réalisés par les agronomes et généticiens.

Le remède à cette dégradation a été l'introduction des pratiques d'amendement et de fertilisation. Des amendements calcaires ont été pratiqués dès l'époque romaine dès lors que des carrières se trouvaient à proximité des sites à amender. Les amendements organiques ainsi que l'utilisation des légumineuses fixatrices d'azote ont permis de palier à cet appauvrissement. Il a cependant fallu attendre l'arrivée des phosphates, l'utilisation des potasses d'Alsace ainsi que la synthèse industrielle des engrais azotés pour que la fertilisation des sols en ces éléments se généralise. Les consommations actuelles en éléments fertilisants illustrent les disparités régionales de fertilisation. Les apports sont importants dans les zones de culture intensive puisqu'ils dépassent en moyenne les 100 kg/ha/an de potassium ( $K_2O$ ) et phosphore ( $P_2O_5$ ) et parfois 200 kg d'azote (N) dans les régions de grande culture (source FNIE-SCEES). En revanche, dans les régions où les prairies permanentes dominent (Massif Central, Vosges, Alpes), le niveau de fertilisation est souvent inférieur en moyenne à 20 kg de  $K_2O$  et  $P_2O_5$  par hectare et par an. Globalement l'utilisation d'amendements calcaires a augmenté dans la même proportion que celle des éléments fertilisants

(source CELAC). Quant aux forêts, on peut considérer à quelques exceptions près (Landes) qu'elles n'ont pas encore été fertilisées jusqu'à aujourd'hui, exceptées les terres qui sont retournées à la forêt.

A partir des analyses de sols effectuées dans toutes les régions de France il apparaît que dans les régions de grande culture, les apports actuels sont généralement supérieurs aux pertes. Cependant, les situations sont très contrastées (Schwartz et al., 1996). La réduction, voire l'arrêt complet de la fertilisation potassique et phosphatée et des amendements calcaires n'est envisageable qu'au cas par cas, avec un suivi précis de la fertilité, notamment sur la base d'analyses de sols. L'arrêt complet de la fertilisation, en ne compensant pas les pertes avec les niveaux de rendement que l'on connaît en système intensif, pourrait remettre en cause le statut chimique favorable de nombreux sols, notamment au plan de leur pH et de leur taux de saturation en ions.

Par rapport aux autres éléments, la situation de l'azote est très différente. La fertilisation azotée a faiblement accru le stock d'azote des sols, car l'azote apporté et non consommé par les plantes est rapidement drainé hors des sols. Dans les zones de grande culture, des fertilisations excessives ont entraîné un drainage d'azote nitrique. En raison du délai lié à la lente infiltration des nitrates vers les nappes, les fortes pollutions actuelles de nappe peuvent refléter l'excès de fertilisations azotées au cours des dernières décennies.

### Une tendance à la perte de fertilité avec ses conséquences

La pauvreté chimique et en conséquence l'acidification des sols est toujours d'actualité dans les sols qui n'ont jamais été amendés comme certaines pâtures extensives ou les forêts, mais aussi dans les sols cultivés (Cheverry, 1995). L'acidification se traduit par de faibles teneurs en cations alcalino-terreux échangeables et des teneurs élevées en aluminium. A l'exception de certaines espèces très frugales, les plantes souffrent alors de carences en Ca et Mg ou de toxicité aluminique, en particulier les plantes cultivées. Ce phénomène d'acidification en forêt, largement étudié dans les Vosges par les équipes de l'INRA et du CNRS de Nancy et Strasbourg, est impliqué avec la sécheresse dans le dépérissement de la forêt vosgienne (Landmann et Bonneau, 1995).

L'acidification des sols est aggravée par les dépôts atmosphériques acides (« pluies acides »), qui accentuent les pertes de cations alcalino-terreux et la solubilisation de l'aluminium. A l'extrême, l'aluminium ionique solubilisé dans les sols apparaît dans les ruisseaux, entraînant la mortalité des salmonidés (Probst et al., 1990).

La toxicité aluminique est aussi un phénomène endémique des sols tropicaux acides. Dans tous les cas, seules des pra-

tiques raisonnées d'amendements permettent de revenir à des pH plus élevés et donc de remédier à ce processus de dégradation des sols. La restauration de la fertilité chimique des sols se pose d'ailleurs avec une certaine acuité dans les sols forestiers hyperacidifiés. Faut-il intervenir sur ce milieu écologique complexe et en quelque sorte le réhabiliter ? La réponse des forestiers est affirmative (Bonneau, 1996).

Un exemple de recalcalcification des sols nous est donné en comparant les situations actuelles de sols cultivés fertilisés et de sols sous forêt qui n'ont jamais été fertilisés ni amendés. Pour des raisons didactiques, nous reprenons l'exemple des sols du Perche et en particulier celui des sols sableux, c'est-à-dire ayant au départ de très faibles réserves en bases (tableau 1). Ces résultats ont été extraits des profils types de la carte pédologique de Châteaudun respectivement sous forêt et sous culture (Isambert, 1974). Il apparaît que l'ambiance chimique des sols est totalement différente puisque le sol sous forêt a un pH voisin de 4 et que son taux de saturation en cations basiques peut descendre jusqu'à 10 % de la capacité d'échange. En revanche, sous culture, grâce aux pratiques d'amendement et de fertilisation le pH atteint la neutralité et son taux de saturation atteint 100 %.

Ce cas d'étude illustre l'importance de la fertilisation dans la préservation de la qualité des sols. Il est conforté par d'autres études réalisées sur la fertilisation et l'amendement des sols à long terme comme celle des 42 parcelles de Versailles. En 1928, sous l'impulsion de Demolon, Burgevin et Hénin ont mis

en place une expérience de fertilisation de longue durée au Centre National de la Recherche Agronomique de Versailles. On applique chaque année sur la même parcelle le même engrais ou amendement (SNST, 1978). Les résultats illustrent de manière spectaculaire l'effet positif ou négatif de certaines pratiques de fertilisation à long terme. Représentatif des Luvisols développés sur loess du Nord de la France (LUVISOLS sur limons des plateaux), ce sol était au départ quasi saturé en ions (figure 4). L'effet des traitements peut se résumer de la façon suivante :

- on peut observer une remontée du pH et du taux de saturation en cations (fumier, carbonates, chaux vive, scories de déphosphoration) ;
- une acidification spectaculaire peut se produire. Après 60 ans, le taux de désaturation peut être analogue à celui d'une forêt sur substrat très pauvres en bases (sulfate d'ammoniaque, nitrate d'ammoniaque) ;
- la parcelle témoin sans apport d'amendement ou de fertilisant s'est notablement acidifiée.

Associées à cette évolution de la qualité chimique, on a enregistré des modifications considérables de propriétés physiques. Par exemple les parcelles ayant reçu du nitrate de sodium, du chlorure de potassium et de la sylvinite (KCl + NaCl) ont totalement perdu leur structure grumeleuse initiale. On constate l'apparition d'une croûte de surface avec des phénomènes d'engorgement temporaire dès les premières pluies après un travail du sol. Le changement de statut cationique du sol n'a donc pas

Tableau 1 - Evolution du pH et du taux de saturation en bases Na, K, Mg, et Ca<sup>-</sup> de sols développés sur sables du Perche, et de sols développés sur gaize dans la région du Perche. (d'après Isambert, 1974).

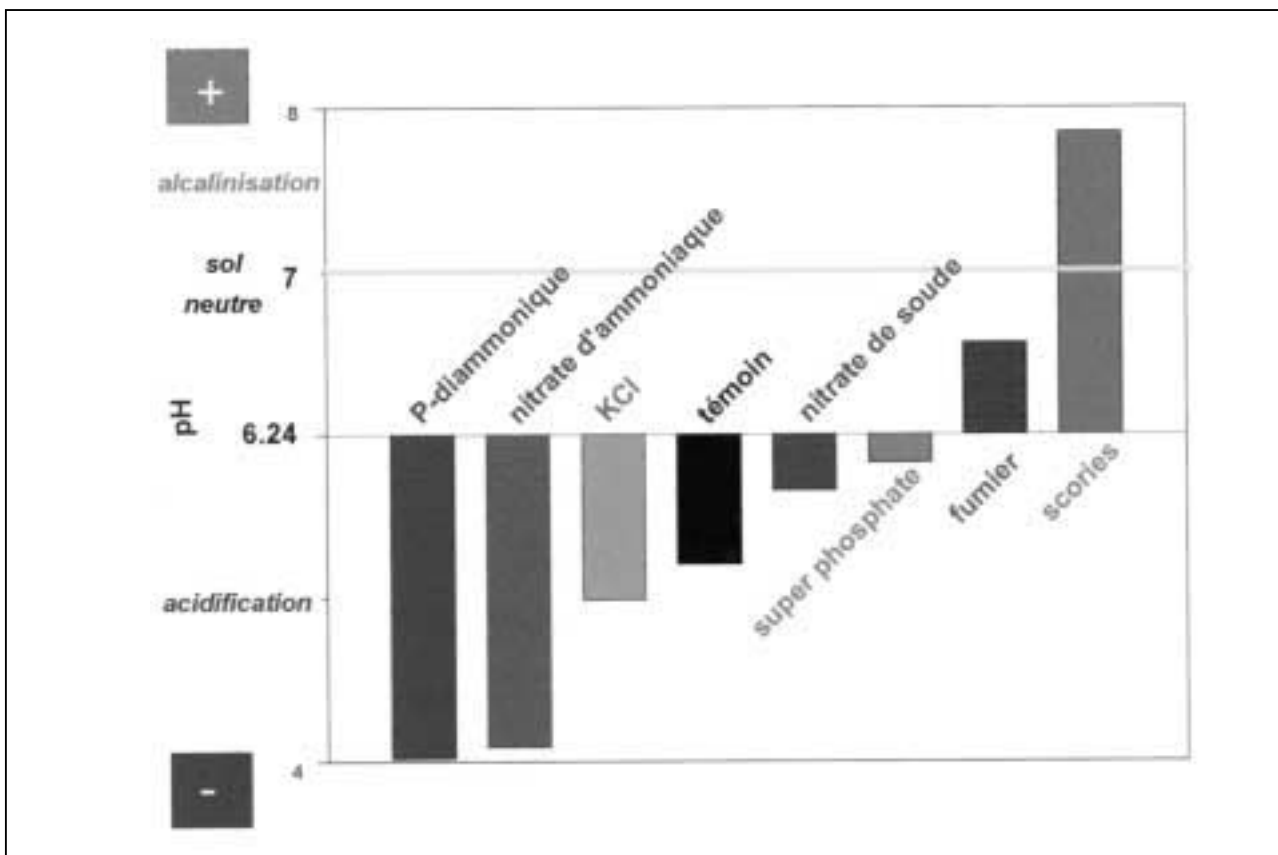
**Table 1** -Evolution of pH and saturation rate (Na, K, Mg, Ca) in sandy soils and soils developed on gaize in Perche area (from Isambert, 1974).

	Sous Forêt		Sous Culture	
	pH	Taux de saturation (%)	pH	Taux de saturation
(%)				
SOLS SUR SABLES DU PERCHE				
	3,8	14	6,8	91
	4,2	14	7,2	99
	4,2	14	6,9	100
	3,9	42	7,1	100
SOLS SUR GAIZE				
	4,5	36	7,7	100
	4,1	49	7,6	100
	5,3	86	7,4	100
	4,6	85	6,8	100



Figure 4 - Effet des pratiques de fertilisation et d'amendements sur l'acidité des sols du dispositif des 42 parcelles de Versailles.

**Figure 4** -Effect of fertilization practices and amendments on soil acidity in 42 plot experiment of Versailles.



seulement des répercussions au plan chimique mais induit des changements considérables de propriétés physiques.

### Un patrimoine à mieux gérer au plan chimique

Les sols cultivés sont beaucoup plus sollicités qu'autrefois au plan chimique, mais aussi biologique (recyclage des éléments). Le suivi à long terme du statut chimique des sols est donc une nécessité impérieuse. Sur quelques sites, l'Observatoire de la Qualité des Sols effectue un suivi, mais son action mériterait d'être élargie.

Le maintien à long terme de la qualité chimique des sols exige de gérer au mieux les pratiques de fertilisation et d'amendement en fonction de l'utilisation du sol. Les situations sont très contrastées et prennent une acuité plus ou moins grande en fonction du type de sol. La question des excès de fertilisants est soulevée notamment du fait des apports de lisiers et fumiers d'élevages hors sols. Jusqu'à quelle valeur peut-on laisser s'accumuler les éléments dans la partie superficielle des sols ? Les risques d'entraînement dans le réseau

hydrographique, donc d'eutrophisation des cours d'eau sont importants (Chevry, 1995). Sont en premier lieu concernés les éléments indispensables pour les plantes, comme le potassium et le phosphore. Il faut ajouter l'azote dont le statut relève de la gestion des matières organiques (cf. J. Balesdent, ce numéro). Sont enfin impliqués les éléments métalliques utilisés dans les aliments comme additifs des rations (zinc et cuivre notamment). A contrario, pour les sols possédant de faibles réserves, les apports organiques seuls ne sont généralement pas suffisants pour compenser les pertes. Dans une perspective de gestion à moyen terme des sols, l'arrêt complet des apports pourrait remettre en question l'un des acquis agronomiques de ces cinquante dernières années à savoir une certaine restauration de la fertilité chimique des sols.

## LA QUALITÉ PHYSIQUE DES SOLS

Un milieu favorable à l'activité biologique

La qualité physique d'un sol est étroitement liée à sa structure, c'est-à-dire à la façon dont les constituants minéraux et organiques sont assemblés les uns par rapport aux autres. C'est en effet dans les différentes catégories de vides ménagés par cet assemblage que l'eau, les solutés et les gaz circulent ou sont stockés et que les êtres vivants peuvent se développer.

Au niveau le plus fin, la structure dépend de l'arrangement intime des particules élémentaires les unes par rapport aux autres. A 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 (Stengel, 1990 ; Tessier, 1994).

Une partie de la structure du sol est un héritage des conditions de formation et d'évolution des sols à long terme. Dans les sols cultivés, c'est l'action de l'homme qui est la plus visible (labour, lit de semence, passages de roues, etc.) (Boiffin et al., 1990 ; Coulomb et al., 1990). L'action de l'homme se traduit directement (pratiques culturales) mais aussi indirectement (action de la plante) par une évolution de la structure. Avec le temps, cette évolution peut aller dans le sens d'une dégradation ou d'une régénération (Guérif, 1990). La stabilité de la structure, c'est-à-dire la permanence de structures sous l'action de divers agents d'agression (pluie, vent, tassement par les engins et les animaux), est un aspect très important de la qualité physique des sols. Ce sont généralement les sols argileux qui sont les plus stables alors que les sols limoneux sont nettement moins stables (Hénin et al., 1969). 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'augmenter la stabilité de la structure (cf. J. Balesdent ce numéro). La qualité chimique des sols a aussi une influence sur leur stabilité structurale. Ainsi la présence d'ions monovalents (Na) sur le complexe d'échange a une forte influence négative.

Dans ce qui suit nous passerons successivement en revue deux grands aspects de la qualité physique des sols, à savoir les relations avec l'eau et en particulier leur aptitude à retenir l'eau disponible pour les plantes, ainsi que la stabilité de la structure à la surface des sols. Si celle-ci est trop faible, on peut assister à l'apparition de phénomènes de ruissellement lors des pluies avec ses conséquences en terme de transport de matériaux terreux et de produits associés (fertilisants, pesticides, etc).

### Un rôle essentiel dans le cycle de l'eau

Le sol est un passage obligé pour les eaux qui alimentent les nappes souterraines. Pour les végétaux, le sol n'est pas seulement ce lieu de passage pour l'eau mais aussi le milieu dans lequel les plantes vont puiser l'essentiel de l'eau et des ions nécessaires à leur développement. L'eau effectivement

disponible pour les plantes dépend en premier lieu de l'énergie avec laquelle elle est retenue. En effet, le sol est un milieu poreux à l'intérieur duquel l'eau est liée (par capillarité) d'autant plus fortement que la taille des vides est plus petite. La quantité d'eau retenue dépend notamment de la dimension du réservoir en eau qu'est le sol, c'est-à-dire à la fois de sa porosité et de sa profondeur. L'extension du système racinaire des végétaux et la demande déterminée par le climat (évapotranspiration) sont aussi des facteurs importants à prendre en compte pour étudier la disponibilité de l'eau pour le développement des plantes (figure 5).

Lorsqu'une pluie arrive à la surface du sol, une partie est interceptée par la végétation et peut être évaporée directement dans l'atmosphère. Dans des cas extrêmes, sous forêt de résineux par exemple, moins de 65 % des pluies arrive au sol (Granier et al., 1995). Sous culture, l'interception est généralement bien moindre (< 10 %). La part de l'eau qui arrive au sol peut soit s'infiltrer si la perméabilité du sol est suffisante, soit encore ruisseler à la surface du sol. La part relative d'infiltration et de ruissellement dépend à la fois de la structure du sol en surface et du type de précipitation. Ainsi avec des intensités de plusieurs dizaines de mm/h durant quelques minutes ou dizaines de minutes, le ruissellement est quasi inévitable alors qu'avec un crachin breton (moins de quelques mm/h), la vitesse d'infiltration est généralement suffisante sauf en présence de croûtes de battance très développées.

Durant la période estivale, les sols ont globalement tendance à se dessécher. La recharge en eau des sols se produit généralement en automne et en hiver, c'est-à-dire au moment où, par rapport à une hauteur de pluie donnée, la proportion d'eau évaporée à la surface du sol ou évapotranspirée par les végétaux est minimale. Au cours de l'hiver, la teneur en eau à la capacité au champ est généralement atteinte, c'est-à-dire le maximum d'eau que peut retenir le sol. Certains hivers très déficitaires, la capacité au champ peut néanmoins ne pas être reconstituée. Par la suite, dès les beaux jours, la transpiration des végétaux participe à la mobilisation de la réserve en eau. Le sol peut se dessécher jusqu'à ce que la plante atteigne son point de flétrissement. Ce dernier correspond à la succion maximale que peut exercer la plante sur le sol. Pour les plantes cultivées le point de flétrissement est de l'ordre de 1,6 MPa (16 bars). Cette limite peut largement être dépassée sous forêt car certains arbres sont bien adaptés à de forts stress hydriques.

On considère aujourd'hui que la densité apparente du sol, c'est-à-dire une expression de la porosité, peut être un bon estimateur de la teneur en eau à la capacité au champ (Bruand et al., 1996). Par ailleurs, la densité apparente ou la capacité d'échange en cations peuvent conduire à une estimation satisfaisante de la teneur en eau au point de flétrissement à la différence de la composition granulométrique qui s'est révélée être un estimateur médiocre (Bruand et al., 1988). La réserve

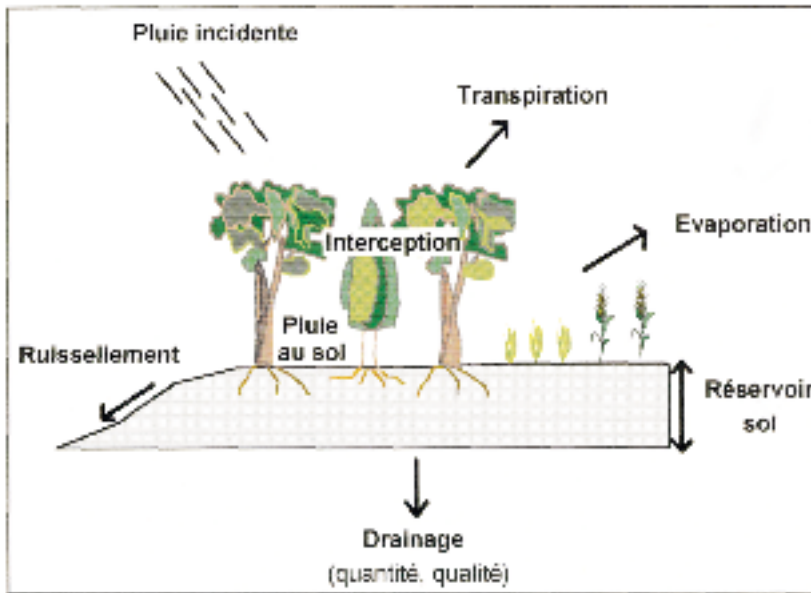


Figure 5 - Schéma général du cycle de l'eau dans les sols avec un couvert végétal.  
**Figure 5** -Schematic water cycle in soils with a vegetal cover.

Figure 6 - Capacité générale de stocker l'eau (CSE) des sols de France (D'après King et al., 1995)  
**Figure 6** -Water storage capacity of soils (After King et al., 1995)

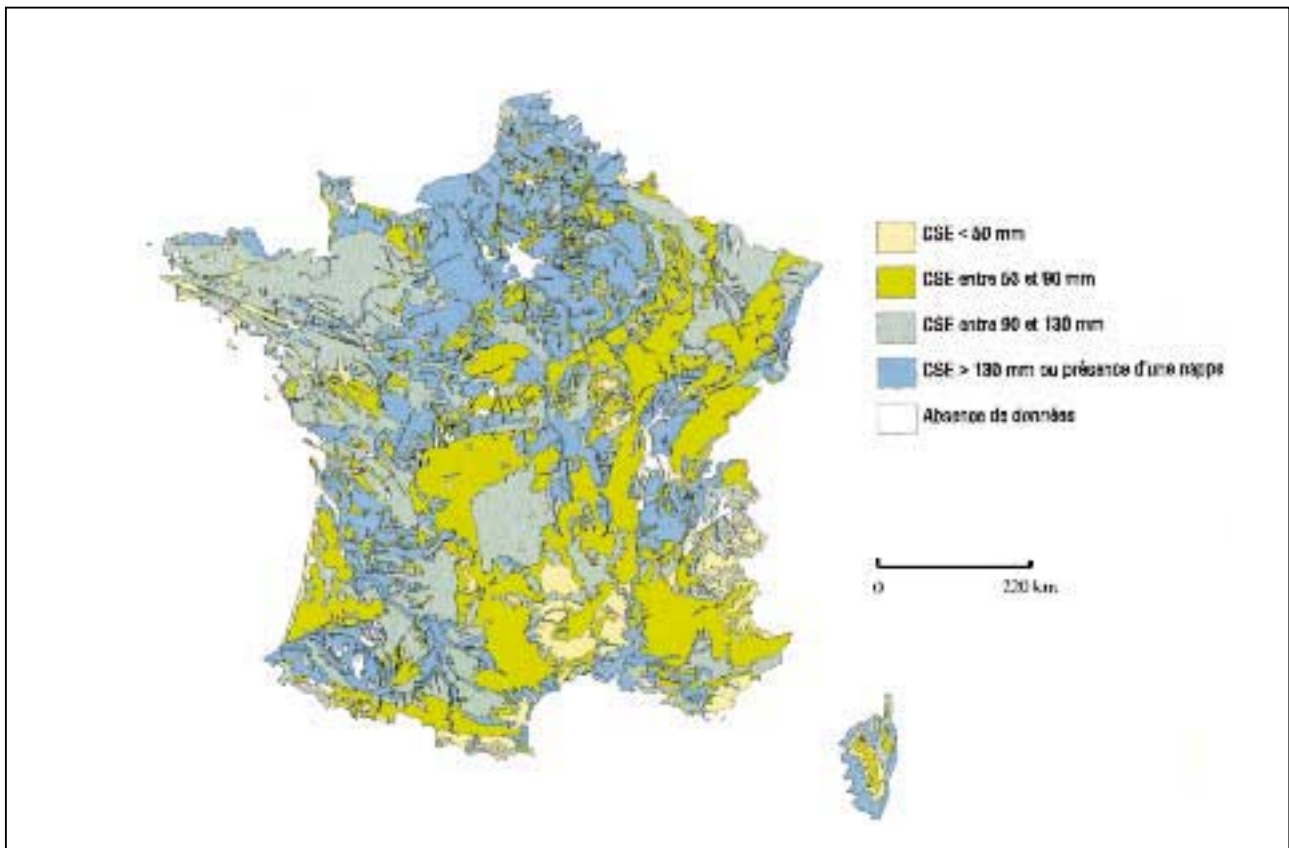


Photo 1 - Exemple d'érosion diffuse dans le pays de Caux (photo Y. Le Bissonnais).

**Photo 1** -An example of sheet erosion in pays de Caux area (Photo Y. Le Bissonnais).



en eau des sols, qui correspond par conséquent à la différence entre la teneur en eau à la capacité au champ et celle au point de flétrissement, est encore assez mal connue bien qu'elle fasse l'objet de nombreux travaux (Jamagne et al., 1977). A l'échelle du territoire, les documents cartographiques qui ont été établis reposent encore pour l'essentiel sur des dire d'expert. Les réserves varient de quelques millimètres pour les sols grossiers et peu épais jusqu'à des réserves supérieures à 300 mm pour les sols profonds et à granulométrie équilibrée (Figure 6). Ces sols ont de fortes potentialités et sont majoritairement utilisés pour les grandes cultures. Il est intéressant de voir que les sols à faible réserve en eau sont fréquemment aussi ceux qui sont les plus pauvres au plan chimique (sols développés sur matériaux granitiques, grès et sables). Pour ces deux raisons il n'est pas surprenant qu'ils aient toujours été réservés à la forêt.

L'intensification de l'agriculture a de plus en plus sollicité le sol au plan de ses propriétés physiques. On peut en effet admettre que la quantité d'eau nécessaire pour produire une masse donnée de matière sèche est comprise entre 300 et 900 g d'eau pour 1 g de matière sèche, avec de l'ordre de 500 g pour le blé (Chamayou et Legros, 1989). On mesure alors combien le passage d'un rendement de 10 quintaux à l'hectare au Moyen Âge, à 20 quintaux au début du siècle, jusqu'à environ 100 quintaux aujourd'hui, sollicite la réserve hydrique des sols de manière différente. Les conséquences d'une telle évolution en sont encore mal connues. L'action de la sécheresse a été bien mise en évidence dans nos forêts, notamment sur les sols à faible réserve en eau des Vosges. On attribue le dépérissement des arbres en partie aux fortes sécheresses successives des années 80 et 90.

Une réserve en eau trop faible a été à l'origine du dévelop-

Photo 2 - Exemple d'érosion concentrée avec ravine dans le pays de Caux (Photo Y. Le Bissonnais).

**Photo 2** -Example of rill erosion in pays de Caux area (Photo Y. Le Bissonnais)



pement de l'irrigation. Celle-ci a entraîné une extension des surfaces cultivées en maïs, plante permettant de rentabiliser l'investissement dans des conditions satisfaisantes mais aussi très consommatrice d'eau. Dans plusieurs régions de grande culture, on a ainsi assisté à une augmentation conjointe des surfaces irriguées et de la hauteur de la lame d'eau apportée. Dans ces régions, les problèmes de gestion de l'eau qui en résultent sont aujourd'hui très préoccupants.

### Un milieu fragile en surface

Durant les cinquante dernières années la taille moyenne des exploitations a été considérablement augmentée et elle s'est accompagnée d'un accroissement de la taille du parcellaire. L'état, en favorisant les opérations de remembrement, les agriculteurs, en procédant à l'arrachage de haies, à l'échange de parcelles ainsi qu'à la suppression des talus et des fossés, ont contribué à cette évolution. Certes, la mécanisation a permis une augmentation considérable de la productivité du travail, mais les changements radicaux du parcellaire, la disparition des prairies et l'introduction de nouvelles cultures avec d'autres systèmes de rotation ont été la source d'une aggravation de problèmes comme l'érosion diffuse ou linéaire (Monnier et al., 1986 ; King et Le Bissonnais, 1992 ; Papy et al., 1996).

Dans les phénomènes d'érosion il est important de considérer l'unité spatiale de base, le bassin versant élémentaire. Celui-ci peut être défini comme étant un territoire isolé au plan hydraulique et qui débouche sur un seul exutoire. Le ruissellement se déclenche lorsque l'infiltrabilité de la surface du sol est plus faible que l'intensité de la pluie. Ce sont les sols à dominante limoneuse qui présentent les plus forts risques d'érosion du fait de leur sensibilité à la battance qui est d'autant plus forte que le taux de matières organiques est bas. La dégradation de l'état de surface des sols est d'autant plus rapide que les pratiques culturales affinent les agrégats du sol, et que le sol est nu (Boiffin et Sebillotte, 1976). Ainsi les lits de semences constituent souvent des surfaces potentiellement ruisselantes. Interviennent aussi la pente, la géométrie et la nature du réseau de circulation de l'eau qui ruisselle au sein du bassin versant.

Lorsque des pluies intenses surviennent, une dégradation de la surface peut se produire alors que la surface du sol n'est pas complètement fermée (Photo 1). 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 alors de l'érosion diffuse par ruissellement en nappe (King et Le Bissonnais, 1992 ; Gallien et al., 1995). On admet en général que dans les sols les plus fragiles, c'est-à-dire de type limoneux, et contenant de faibles teneurs en matières organiques (< 1,5 %), une pluie cumulée de 60 à 100 mm suffit à faire passer un état fragmentaire de lit de semence au stade ultime de la dégradation, c'est-à-dire la formation d'une croûte sédimentaire en surface (croûte de battance) (Le Bissonnais et

Le Souder, 1995 ; Bresson et Boiffin, 1990). A ce stade, l'infiltrabilité du sol devient très faible (de l'ordre de 1 à quelques mm/h) et la moindre pluie peut provoquer le ruissellement. Si le sol comporte peu de mottes en surface et s'il est couvert par une végétation, l'eau qui ruisselle est peu chargée. L'eau peut cependant acquérir une vitesse suffisante dans les lignes de concentration du ruissellement et être ainsi à l'origine de rigoles et de ravines localisées de façon très spécifique dans le paysage (érosion concentrée - Ludwig et al. 1996) (Photo 2).

L'étude des modalités d'érosion et de ruissellement indique qu'il s'agit de processus très 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 au début de la pluie (Monnier et al., 1986 ; Le Bissonnais et al., 1990). L'état initial est lui-même dépendant de la succession des événements pluvieux précédents qui ont entraîné une évolution de la structure du sol en surface. Il apparaît ainsi que la compréhension globale des phénomènes passe par la prise en compte de la succession des événements pluvieux au cours d'un cycle cultural (Boiffin et Sebillotte, 1976 ; King et Le Bissonnais, 1992).

Les conséquences de l'érosion sont multiples. Pour l'agriculteur il faut considérer le recouvrement des semis et les pertes de peuplement végétal, préjudiciables au rendement des cultures. Il faut bien sûr envisager la perte en terres arables et en particulier des fractions fines du sol les plus importantes pour la qualité des sols (argile et matières organiques). L'érosion contribue donc à la perte irréversible en sols. Actuellement, l'accent est mis sur les conséquences de l'érosion au plan environnemental : inondations et colmatage des réseaux de collecte des pluies, recouvrement des routes, crues catastrophiques.

Les implications à un niveau plus général sont nombreuses. La partie du sol entraînée est aussi la plus superficielle et la plus fine. Elle est donc la plus riche en nutriments minéraux (phosphore, potassium, azote) et en produits phytosanitaires associés (herbicides, pesticides) (Lecomte et al., 1997). 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 et ses implications dépasse donc largement le cadre agricole.

### Pour une gestion agro-environnementale des sols

Si la fertilisation a permis de remédier à l'inadéquation sans cesse croissante entre ce que peut fournir le sol au plan chimique et les besoins d'une plante cultivée, c'est aussi la levée des contraintes physiques qui a permis les hauts niveaux d'intensification de l'agriculture. Nous n'avons pas abordé ici les questions relatives au drainage et à l'irrigation qui auraient mérité une large place. Le drainage en particulier peut selon les cas et selon l'échelle d'observation entraîner une accéléra-

tion ou au contraire un ralentissement du ruissellement et de l'érosion. Il ressort cependant de ce qui précède que les systèmes culturels actuels concernent des paysages largement transformés. L'intensification de l'agriculture a modifié le cycle terrestre de l'eau. Bien qu'encore mal connus, certains effets sont déjà perceptibles comme l'érosion et ses conséquences au plan environnemental, notamment les phénomènes de crues et de pollution des eaux (Papy et Douyer, 1991 ; Lecomte et al, 1997).

D'autres effets ont été moins étudiés mais leurs conséquences à long terme méritent une grande attention. On peut citer le changement à long terme des propriétés physiques des sols consécutifs à de fortes dessiccations et à l'emploi de machines de plus en plus lourdes et puissantes. La question de la recharge des nappes souterraines et de leur qualité sera sans doute un problème de grande acuité dans le futur, car la réserve en eau des sols est de plus en plus sollicitée, ce qui affecte la ressource globale en eau, aussi bien en quantité qu'en qualité.

## CONCLUSIONS

La variété des sols à l'échelle d'un pays comme la France implique que la gestion du patrimoine sol par rapport aux problèmes d'environnement ne peut avoir de réponse unique. La maîtrise des pratiques de fertilisation et d'amendement est une condition essentielle au maintien de la qualité des sols à long terme. Elle passe par un suivi de la qualité chimique des sols afin d'ajuster les apports. Il ne faut cependant pas éluder la question des excès de fertilisants à l'échelle régionale, notamment du fait des élevages hors sols, ni celui de l'amélioration de la fertilité des sols sous forêt et sous prairie.

Ces cinquante dernières années ont vu la transformation de nos paysages due à des travaux importants d'aménagement comme le drainage et le remembrement. D'une façon générale la potentialité initiale des sols a été améliorée mais cette évolution n'a pas été sans inconvénients. Dans de nombreuses régions de sols sur limons connus pour leur fragilité structurale, l'extension du parcellaire et la spécialisation de l'agriculture avec disparition des prairies a engendré un type d'érosion jusqu'alors peu marqué dans ces régions de plaine à relief et climat modérés. L'impact sur le milieu n'affecte pas seulement la parcelle mais un périmètre beaucoup plus large puisque le réseau hydrographique peut être concerné. Les remèdes ne doivent pas seulement être recherchés au travers des pratiques de l'agriculteur mais à un niveau plus global dans la gestion des bassins versants. On suggère actuellement surtout un réenherbement localisé de zones sensibles (chemins d'eau, thalwegs, bordures de parcelles ou de ruisseaux), une certaine diversification des cultures, et l'aménagement des zones sensibles pour préserver les sols et diminuer les nuisances, mais

là encore, les solutions proposées ne sont pas toutes aussi potentiellement satisfaisantes sur le long terme.

Les travaux de l'INRA dans ce domaine se sont attachés à comprendre les mécanismes et phénomènes à la base de l'évolution des propriétés des sols. Le bilan de ses travaux fournit une description des processus qui sont en œuvre, des outils de diagnostic et les éléments actuels d'appréciation des risques. Cependant, l'inventaire des sols et de leurs propriétés à l'échelle du territoire n'est encore que partiel. Les travaux doivent être poursuivis afin d'adapter au mieux les réponses aux défis actuels et à venir de l'agriculture en tenant compte des caractéristiques du milieu dans l'optique d'une agriculture durable et de la préservation de l'environnement. Ceci représente un enjeu essentiel pour l'agriculture et ses relations avec la société.

## BIBLIOGRAPHIE

- Arrouays D., Duval O., et Renaux B., 1989 - Esquisse des paysages pédologiques du Loiret à 1 : 250 000<sup>ème</sup>. Inra-Chambre d'Agriculture du Loiret, 1 Notice 1 carte, 182 p.
- Ballif J.L., Guérin H., Muller J.C., 1995 - Connaissance des Sols en Champagne Crayeuse, INRA éd. 100 p.
- Boiffin J., Sébillotte M., 1976 - Climat, stabilité structurale et battance - Essai d'analyse d'un comportement du sol au champ. *Annales agronomiques* 27 (4) : 447-463.
- Boiffin J., Guérif J., Stengel P., 1990 - Les processus d'évolution de l'état structural du sol : quelques exemples d'études expérimentales récentes. In : La structure du sol et son évolution : conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur. Les Colloques INRA, n° 53, 37-70.
- Bonneau M., 1996 - Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. ENGREF éd., 367 p.
- Bornand M., Legros J.P., Rouzet C., 1994 - Les banques régionales de données sols. Exemple du Languedoc Roussillon - *Étude et Gestion des Sols*, 1, 67-82
- Boulaine J., 1995a - Quatre siècles de fertilisation Première partie - *Étude et Gestion des Sols* 2 3 -, 201-211
- Boulaine J., 1995b - Quatre siècles de fertilisation Seconde partie - *Étude et Gestion des Sols*. 2 4 -, 219-226
- Boulaine J., 1996 - Histoire de l'Agronomie en France, Lavoisier Tec & Doc, 437 p.
- Bresson L-M., Boiffin J., 1990. Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma*, 47, 301-325.
- 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. Acad. Sci., Paris* 307, Série II, 1937-1941.
- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darhout R., Jamagne M., 1996 - Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. *Étude et Gestion des Sols*, 3 1 -, 27-40
- Chamayou H., Legros J.P., 1989 - Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la Science du Sol, Techniques vivantes, P.U.F. éd., 594 p.
- Chevry C., 1995 - La dégradation chimique des sols en Bretagne. *Étude et Gestion des Sols*, 1-1, 7-23
- Coulomb I., Manichon H., Roger-Estrade J., 1990 - Evolution de l'état structural sous l'action des systèmes de culture. In : La structure du sol et son

- évolution : conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur. Les Colloques INRA, n° 53, 137-156.
- Duchauffour Ph., 1995 - Pédologie, Sol, Végétation, Environnement. Abrégés 4<sup>ème</sup> édition, Masson éd. 324 p.
- Dupuis J., 1966 - Carte pédologique de la France à l'échelle du 1/1 000 000<sup>ème</sup>. INRA éd.
- Gallien E., Le Bissonnais Y., Eimberck M., Benkhara H., Ligneau L., Ouvry J.F., Martin P., 1995 - Influence des couverts végétaux de jachère sur le ruissellement et l'érosion diffuse en sol limoneux cultivé. Cahiers Agricultures, 4, 171-183
- Girard M.C., Soyeux E., Bornand M., Yongchalerichai C., 1993 - Structuration de l'espace régional et protection des ressources naturelles. C.R. Acad. Agric. Fr. 93-79, 5, 37-50.
- Granier A., Badeau V., Bréda N., 1995 - Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. Rev. For. Fr., 47, 59-68
- Guérif J., 1990 - Conséquences de l'état structural sur les propriétés et les comportements physiques et mécaniques. In : La structure du sol et son évolution : conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur. Les Colloques INRA, n° 53, 71-90.
- Hémin S., Gras R., Monnier G., 1969 - La profil cultural. 2<sup>ème</sup> édition, Masson éd.
- Isambert M., 1974 - Carte pédologique de France à 1/100 000 de Châteaudun. Notice explicative. INRA éd. 250 p.
- Jamagne M., Bétrémieux R., Bégon J.C., Mori A., 1977 - Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. Bull. Tech. Inf. 324-325, 627-641.
- Jamagne M., Hardy R., King D., et Bornand M., 1995 - La base de données géographique des sols de France, Étude et Gestion des Sols, 2-3, 153-172
- King D., Le Bissonnais Y., Hardy R., Eimberck M., Maucorps J., King C., 1992 - Spatialisation régionale de l'évaluation des risques de ruissellement. Exemple du Nord-Pas de Calais. Revue des sciences de l'information géographique et de l'analyse spatiale, 2-2, 229-246.
- King D., Daroussin J., Jamagne M., 1991 - Contribution to geographical information systems concepts to soil mapping. The soil map of the European Communities. 2<sup>ème</sup> conf. G.I.S.-SISM, Ottawa, 5-8/03/90, 731-744
- 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., 78 (6), 91-105.
- Landmann H-G, Bonneau M., 1993 - Pollution atmosphérique et dépérissement dans les montagnes françaises. Rapport au Ministère de l'Environnement. 365 p.
- Le Bissonnais Y., Bruand A., Jamagne M., 1990 - Étude expérimentale sous pluie simulée de la formation des croûtes superficielles. Cahiers de l'ORSTOM, Pédologie, 25, 31-40.
- Le Bissonnais Y., Le Souder Ch., -1995 - Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. Étude et Gestion des Sols. 2, 43-55.
- King D., Le Bas C., Daroussin J., Thomasson A.J., Jones R.J.A., 1995 - The EU map of Soil Water Available for Plants. In : European Land Information Systems for Agro-Environmental Monitoring (Eds D. King, R.J.A. Jones and A.J. Thomason). JRC European Commission. ISPRA. 43-60.

- Lecomte V., Le Bissonnais Y., Renaux B., Couturier A., Ligneau L., 1997 - Erosion hydrique et transfert de produits phytosanitaires dans les eaux de ruissellement. Cahiers Agricultures, 6, (à paraître)
- Ludwig B., Auzet A.V., Boiffin J., Papy F., King D., Chadœuf J., 1996 - Etats de surface, structure hydrographique et érosion en rigole des bassins versants cultivés du Nord de la France. Étude et Gestion des Sols, 3-1, 53-70
- Monnier G., Boiffin J., Papy F., 1986 - Réflexion sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées : Cas des systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest. Cahiers ORSTOM, Série Pédologie. Vol. XXII, n° 2, 123-131.
- Monza (de) J. P., 1989 - Le Grand Atlas de la France Rurale, INRA/SCEES éd., 494 p.
- Morlat R., Asselin C., 1992 - L'effet terroir et sa gestion. Application en val de Loire. Revue française d'Oenologie, 139, 43-52.
- Papy F., Douyer C., 1991 - Influence des états de surface du territoire agricole sur le déclenchement des inondations catastrophiques. Agronomie 11 : 201-215.
- Papy F., Martin Ph., Bruno J.-F., 1996 - Comment réduire les risques d'érosion par les pratiques agricoles ? S'adapter aux systèmes érosifs et au contexte économique. Forum «Sécheresse, pollution, inondation, érosion ; que fait la recherche ?», Futuroscope Poitiers, 29 sept.-1<sup>er</sup> oct. 1996, 13 p.
- Pédro G., Scherrer S., 1974 - Essai d'interprétation géochimique de la carte pédologique de France échelle 1/1 000 000 - Ann. Agron. 25, 25-48
- Pomerol Ch., 1990 - Terroirs et vins de France, BRGM éd., 350 p.
- Probst A., Massabuau J.C., Probst J.L., Fritz B., 1990. Acidification des eaux de surface sous l'influence des précipitations acides : rôle de la végétation et du substratum, conséquences pour les populations de truites. Le cas des ruisseaux des Vosges. C. R. Acad. Sci. Paris 311, 405-411.
- Robert M., 1996 - Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Masson éd. 244 p.
- Roque J., Hardy R., 1997 - Carte des pédopaysages de l'Île de France à 1/250 000 ; base de données géométrique et sémantique sur support informatique INRA (à paraître).
- S.N.S.T., 1978 - Influence des engrais et amendements sur la structure et le pH du sol. Expérience des 42 parcelles de l'INRA Versailles 1928-1978.
- Schwartz C., Walter C., Claudot B., Arousseau P., Bouedo T., 1995 - Synthèse nationale des analyses de terres. Document AFES/Ministère de l'Agriculture, Direction espace Rural et Forêt, 43 p.
- Stengel P., 1990 - Caractérisation de l'état structural du sol. Objectifs et méthodes. In : La structure du sol et son évolution : conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur. Les Colloques INRA, n° 53, 15-36.
- Tessier D., 1994 - Rôle de l'eau sur les propriétés physiques des sols. Sécheresse, 3 (5), 143-150
- Thinon P., Savini I., Defontaine J.F., 1996 - Relations Territoire, Agriculture et Urbanisation. Recherche d'unités de gestion territoriale. La cas du Vexin Français. INRA SAD éd., 80 p.