

# 4

## Le sol

## Le sol : un milieu complexe, une ressource non renouvelable

**L**e sol\*, milieu complexe et multi-fonctionnel, est le support du développement humain et de la plupart des écosystèmes terrestres. Considéré autrefois surtout comme une ressource économique, son rôle environnemental s'affirme de plus en plus aujourd'hui, en raison notamment de l'abondance des études scientifiques (pédologie) qui lui ont été consacrées depuis un peu plus d'un siècle.

La grande variabilité spatiale des propriétés du sol rend encore délicate la généralisation à l'échelle nationale de résultats d'études réalisées souvent localement. Par ailleurs, le sol, contrairement à l'eau et à l'air, n'est pas ingéré par l'homme, et les vitesses de diffusion des pollutions y sont lentes.

Cela explique le peu d'intérêt porté jusqu'à maintenant à ce milieu, et donc l'absence de réseau d'observation national et un déficit de données. Les données disponibles ne permettent pas de juger directement de l'évolution de la qualité des sols à l'échelle nationale. En revanche, les modèles développés à partir de bases de données géoréférencées à vocation pédologique, agricole ou plus généraliste, permettent d'estimer au niveau national la vulnérabilité des sols face à de possibles dégradations (érosion) ou leur rôle potentiel dans des problématiques environnementales (effet de serre, recyclage des boues de stations d'épuration, etc.).

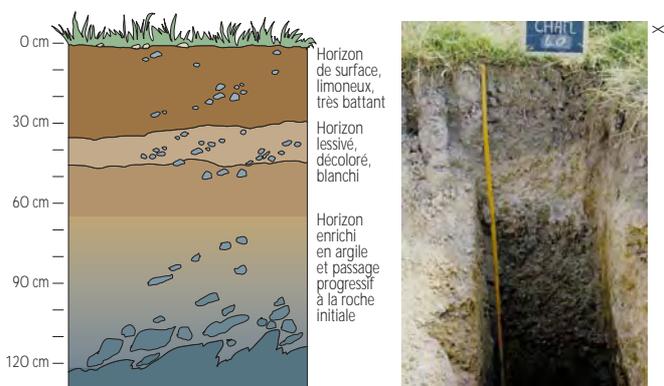
Cependant, depuis 1998, date du seizième congrès international des Sciences du sol qui s'est tenu à Montpellier, les pouvoirs publics favorisent l'émergence de systèmes d'information sur les sols à travers la mise en place d'importants programmes de recherches et de dispositifs nationaux d'observation de l'état des sols. Dans ce but, la prise en compte du caractère multi-fonctionnel des sols a conduit logiquement à la mutualisation des compétences et des moyens entre différents ministères et organismes publics.

Les sols résultent principalement de processus complexes d'altération des roches (pédogenèse), qui dépendent de la nature de la roche initiale, de l'action des climats, et des activités biologiques et humaines. La pédogenèse aboutit à une différenciation verticale en strates (horizons) aux caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques très variables [III.01]. La lenteur de cette évolution et la disparition des conditions initiales à la formation des sols (climat, végétation...) doivent les faire considérer comme une ressource non renouvelable à l'échelle de temps humaine.

### Un rôle d'interface dans l'environnement

Le sol, qui fonctionne comme un réacteur biogéochimique, est traversé par différents flux de matière (eau, éléments nutritifs...) et d'énergie, de vitesses variables, qui participent à des cycles naturels ou interviennent de façon directe ou indirecte dans des processus économiques (production agricole, production industrielle, production d'eau potable...) [III.02]. Le bilan des flux de matière (excès, déficit) peut se révéler, à échéance variable et par des enchaînements de causes à effets parfois difficiles à prévoir, défavorable à la santé et aux intérêts

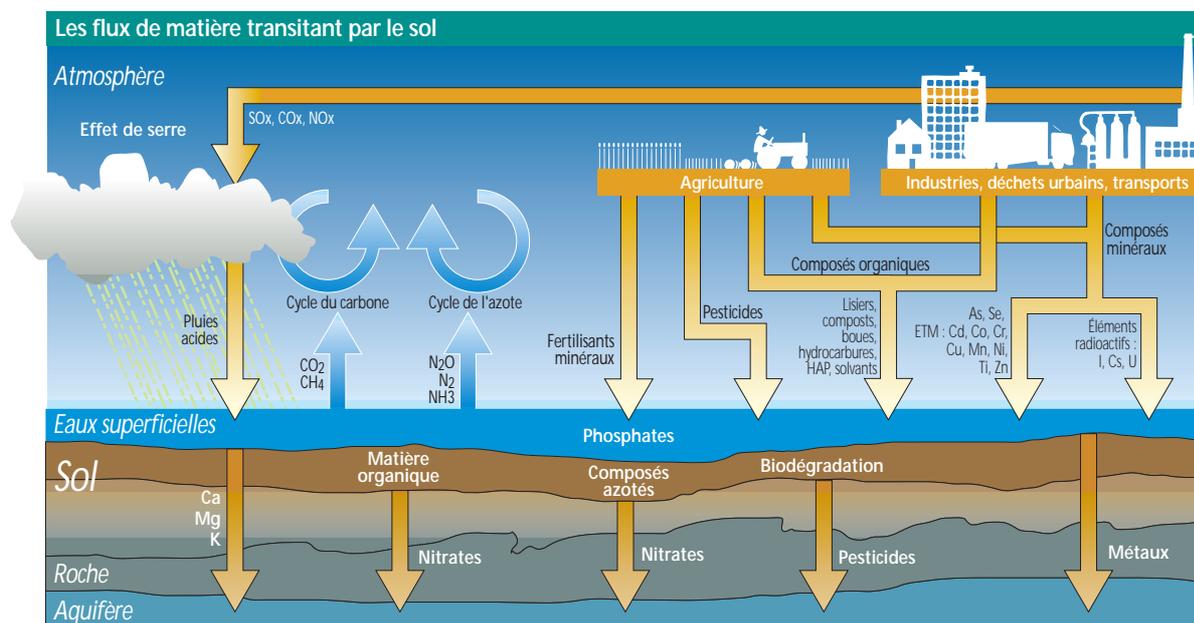
#### La différenciation verticale d'un sol en « horizons »



N.B. : Le sol, sous l'effet du climat et de l'activité biologique, se différencie verticalement, à partir d'une roche originelle, en horizons (couches de sol aux propriétés physico-chimiques homogènes).

Source : chambres d'agriculture du Cher, de l'Indre, de l'Indre-et-Loire et du Loir-et-Cher, in « Les terres de Galinès, Boischaud-Nord, Pays-Fort, Touraine-Berry », Typologie des sols, 1994.

04.01



Principaux flux de matière transitant par les sols et susceptibles d'y générer des pollutions ou de les dégrader durablement.

Source : Ifen, d'après M. Robert, in « Le sol - Interface dans l'environnement - Ressource pour le développement », édition Masson, 1996.

04.02

humains (atteintes à l'environnement). Le sol joue par conséquent un rôle fondamental d'interface en environnement.

Les processus économiques et les cycles naturels peuvent mettre en jeu différentes propriétés ou fonctions du sol : utilisation du stock d'eau et d'éléments nutritifs pour la production alimentaire, capacités d'épuration et de rétention protégeant les ressources en eau potable, richesse faunistique et floristique, etc. L'aptitude plus ou moins grande du sol à réaliser chacune de ces fonctions est une caractéristique de leur qualité. Celle-ci est une notion composite, dont les éléments physiques, chimiques et biologiques peuvent être pondérés différemment suivant les usages du sol. Les modalités de ces usages peuvent altérer la capacité du sol à remplir une ou plusieurs de ces fonctions, et porter ainsi atteinte à sa qualité.

### Les multiples fonctions du sol, à la fois interactives et interdépendantes

**Porter :** le sol est un support mécanique. La plupart des infrastructures humaines (habitations, routes) et les cultures reposent sur le sol. La construction des infrastructures implique dans la majorité des cas la destruction des sols naturels, ou du moins l'altération de certaines de leurs propriétés (impermeabilisation).

**Produire :** le sol joue un rôle majeur dans la production alimentaire. Les plantes extraient du sol l'eau et les éléments nutritifs nécessaires à leur croissance. La présence et la quantité de ceux-ci dépendent de la nature de la roche originelle, des pratiques agricoles anciennes et actuelles, et des apports atmosphériques. Un sol de bonne qualité pour la production alimentaire doit tout d'abord retenir des éléments nutritifs, puis les libérer pour répondre à la demande des plantes.

**Épurer :** véritable filtre, le sol peut, selon sa nature, fixer durablement des substances organiques ou minérales considérées comme polluantes, notamment vis-à-vis des eaux de surface ou souterraines, ou des chaînes alimentaires. Les réactions chimiques et l'activité biologique, dont il est le lieu, influent sur l'état chimique de certaines substances (spéciation), en modifie la mobilité vers les nappes d'eau ou les végétaux (biodisponibilité) et transforme des molécules organiques. La rétention de substances polluantes peut avoir pour effets une accumulation à long terme et une éventuelle libération ultérieure.

**Réguler :** l'eau des précipitations peut, soit s'infiltrer dans le sol pour y être stockée ou utilisée par les végétaux, soit migrer à travers celui-ci jusqu'aux nappes souterraines. Si elle ne peut s'infiltrer, elle ruisselle à la surface, érode les sols et vient grossir le cours des rivières, provoquant éventuellement des crues brutales. Le partage ruissellement-infiltration dépend des propriétés physiques de la sur-

face du sol. La quantité d'eau qu'il retient constitue une réserve vitale pour les végétaux, et détermine fortement la part des précipitations drainée vers les nappes souterraines.

**Stocker** : avec 1 500 milliards de tonnes de carbone contenues dans ses constituants organiques, le sol constitue le plus gros réservoir superficiel échangeant du carbone avec l'atmosphère, et il se comporte comme une source ou un puits de gaz carbonique.

**Recycler** : le sol est le lieu naturel de recyclage des matières organiques issues de la production de biomasse dans la biosphère continentale. Cette fonction, essentielle pour le fonctionnement de la part continentale des cycles biogéochimiques, a traditionnellement été exploitée par l'homme, à la fois pour éliminer économiquement ses déchets (agricoles ou urbains) et pour entretenir la fertilité des sols.

**Héberger** : support de la végétation, qui y déploie son système racinaire, le sol abrite une communauté de micro-organismes (bactéries, champignons...) essentiels au recyclage des éléments nutritifs et à la croissance des végétaux. Il sert d'habitat à de nombreuses espèces d'insectes au stade larvaire ou adulte, ou d'animaux supérieurs (reptiles, mammifères...) constituant des écosystèmes. Certaines espèces comme les lombrics jouent un rôle déterminant dans l'évolution des sols et leurs propriétés. Par la diversité et la densité des organismes qu'il abrite, le sol constitue une véritable réserve génétique.

**Archiver** : parce qu'il conserve la trace des activités humaines du passé, le sol est une véritable mémoire historique. Matière première de l'archéologie, son étude peut renseigner sur l'évolution de certains paramètres environnementaux comme le climat ou la végétation.

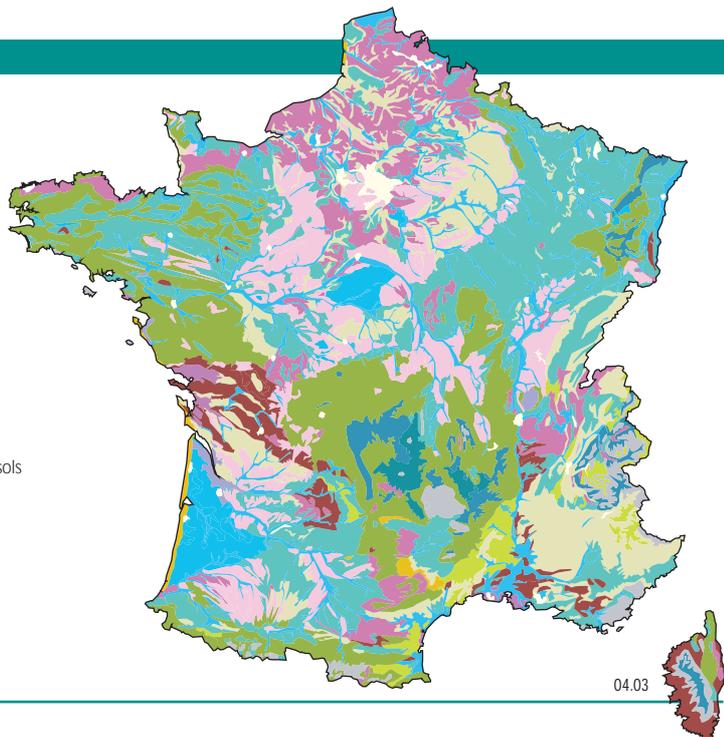
## Six grands ensembles de sols en France

La France dispose d'une grande variété de sols dont la répartition se calque approximativement sur sa structure géologique : massifs anciens (Ardennes, Massif Armoricaire, Massif central et Vosges), chaînes récentes (Pyrénées, Alpes) et grands bassins sédimentaires (Bassin parisien, Bassin aquitain et Bassin rhodanien). Cette diversité implique de grandes différences dans leur qualité agricole, l'efficacité de leurs fonctions environnementales ou leurs capacités à résister aux dégradations. Les sols peuvent être groupés en six grands ensembles pédologiques, dont il faut cependant garder à l'esprit la grande variabilité interne [III.03].

Les sols sur roches calcaires (postes 1, 2, 3) : ils caractérisent de nombreuses zones cultivées en régions crayeuses (Champagne), marneuses (Argonne,

### Les six grands ensembles de sols en France

- Sols des roches calcaires**
  - 1. Lithosols, rendosols et rendisols
  - 2. Rendosols, calcosols, calcarisols et calsisols
- Sols des matériaux argileux**
  - 3. Calcisols, calcosols, brunisols saturés, pélosols
- Sols des matériaux sableux**
  - 4. Régosols
  - 5. Podzosols leptiques, alocrisols
  - 6. Podzosols
- Sols d'altération peu différenciés**
  - 7. Brunisols dystriques, alocrisols
  - 8. Brunisols rédoxiques
- Sols de formations limoneuses**
  - 9. Luvisols typiques, néoluvisols
  - 10. Luvisols rédoxiques, dégradés, dystriques et planosols
- Autres sols**
  - 11. Fersialisols, brunisols fersiallitiques
  - 12. Andosols
  - 13. Salisols, sodisols
  - 14. Lithosols dystriques, thalassosols
  - 15. Fluviosols, rankosols
  - 16. Non sol



Source : Inra, 1998.

04.03

Woevre), sur les calcaires jurassiques des bassins sédimentaires (Bourgogne, Berry, Jura, Poitou), et en Provence. Par leur origine et leur constitution, ils sont parmi les moins sensibles à l'acidification. Selon leur granulométrie, leur structuration et leur épaisseur, ils peuvent avoir en général une perméabilité élevée. Un suivi de la qualité des nappes d'eau doit être mis en place pour prévenir tout risque de pollution.

Les sols développés sur des matériaux sableux (postes 4, 5, 6) : on les rencontre en Sologne et dans les Landes, mais aussi dans les massifs collinaires et montagneux (Vosges, Massif central, Alpes, Pyrénées). Leur faible capacité de fixation des éléments chimiques les rend particulièrement sensibles à l'acidification. Ils peuvent, s'ils ne sont pas associés à des argiles, laisser rapidement filtrer des pollutions menaçant les nappes d'eau.

Les sols d'altération peu différenciés (postes 7, 8) : développés sur les roches cristallines, sous les climats tempérés humides, ils se caractérisent par une faible teneur en argile et une bonne aération. Largement répartis sur le territoire, fréquents dans les massifs anciens (Vosges, Bretagne et Massif central), ils sont en général pauvres en calcium, ce qui les rend particulièrement vulnérables aux pollutions atmosphériques et à l'acidification.

Les sols issus des formations limoneuses (postes 9, 10) : d'une manière générale, ils ont une forte capacité de rétention en eau et en éléments chimiques. Ils jouent le plus souvent un rôle de filtre épurateur, mais ils sont cependant très sensibles à la dégradation physique (érosion...). Propices à l'agriculture, ils sont caractéristiques du Bassin parisien, du Bassin aquitain et de la partie amont du Bassin rhodanien.

Les sols argileux : outre ceux qui sont issus de l'altération de roches calcaires (poste 3), il existe également des sols à teneur en argile élevée développés dans des matériaux sédimentaires ou alluviaux. Leur capacité de rétention en eau et en éléments chimiques, généralement élevée, assure le plus souvent une protection satisfaisante des nappes. Mais dans les zones humides où ils sont fréquemment représentés, le drainage peut réduire ce rôle protecteur.

Autres types de sols : moins fréquents en France, ils sont liés à des processus de formation plus spécifiques. On trouve en bordure du Bassin rhodanien, en Corse et autour du Bassin aquitain, des sols riches en fer, silice et aluminium aux couleurs rouges assez vives (poste 11). On peut observer dans le Massif central, des sols noirs développés à

partir de matériaux volcaniques (poste 12). Les sols salés et sodiques (poste 13) sont caractéristiques des marais de l'Ouest et de la Camargue. Enfin, restent des sols minces et peu fertiles à substrat de roches inaltérées (ou dures) (poste 14), fréquents en altitude, et l'ensemble des sols des alluviaux (poste 15).

## Les pressions sur les sols

Les différents types de dégradation de la qualité des sols (érosion, pollutions chimiques, baisse des teneurs en matières organiques, etc.) sont à l'origine de problèmes environnementaux de mieux en mieux identifiés. Ils donnent lieu, de plus en plus souvent, à la mise en place de programmes de recherches ou de dispositifs d'observation. Ces problèmes sont fréquemment abordés en France et dans de nombreux pays européens mais de façon sectorielle (sols agricoles, industriels, urbains). Cela rend parfois difficile la perception, par le public, de l'importance du sol en tant que milieu et ressource à protéger.

### Les principales dégradations du sol

Dégradations	Problèmes	Conséquences
Physiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Artificialisation</li> <li>• Imperméabilisation</li> <li>• Compaction</li> <li>• Erosion</li> </ul>	Pertes en récoltes et terres agricoles, pertes des fonctionnalités épuratrices, baisse de productivité agricole, pollution des cours d'eau, modification du fonctionnement hydrique.
Chimiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acidification</li> <li>• Pollution industrielle</li> <li>• Pollution agricole</li> <li>• Salinisation</li> </ul>	Modification des fonctionnalités du sol et remobilisation des métaux, pollutions des eaux de surface et des aquifères, restriction d'usage des sols, risques pour la santé humaine, toxicité du sol et de ses produits, pertes en terres agricoles
Biologiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pesticides</li> <li>• Perte de matière organique</li> </ul>	Perturbation de l'activité biologique, perte de biodiversité, aggravation des dégradations chimiques et physiques, flux de gaz à effet de serre...

Source : Ifen, d'après M. Robert, in « Le sol - Interface dans l'environnement - Ressource pour le développement », édition Masson, 1996.

04.04

### La destruction et la stérilisation des sols : une situation appelée à s'aggraver

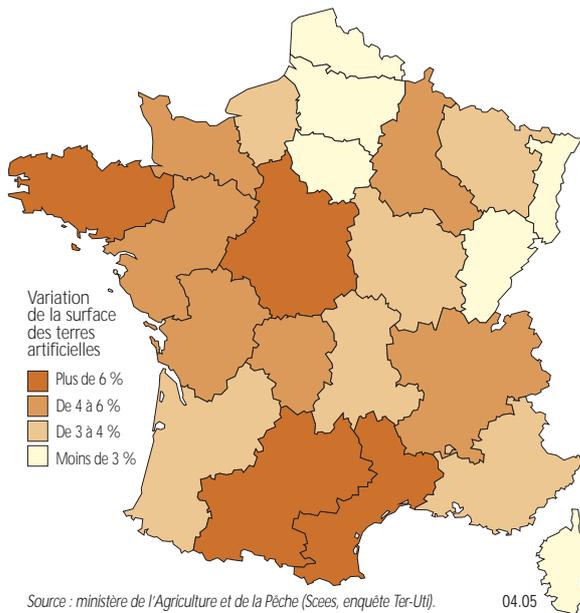
De 1997 à 2000, l'enquête Ter-Uti montre que les surfaces artificialisées ont crû de 4 % environ, essentiellement à partir de terres agricoles. Cette augmentation est particulièrement importante (plus de 6 %) en Languedoc-Roussillon, Midi-Pyrénées, Centre et Bretagne. Elle est importante pour les régions de la façade atlantique (4 % à 6 %). Elle est moins sensible dans les régions du Nord ou en Île-de-France. L'artificialisation est forte dans les

zones périurbaines et concerne préférentiellement les sols de meilleure qualité agricole, lieux historiques de l'urbanisation. Les sols des espaces naturels sont également affectés par le développement d'infrastructures (réseaux de transport, pistes de ski).

L'accroissement de la population étant un des facteurs de la croissance urbaine, les projections sur trente ans réalisées par l'Insee laissent prévoir une aggravation de la destruction des sols dans certaines régions, comme le Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côtes d'Azur et Midi-Pyrénées où une croissance de la population est envisagée (respectivement 31 %, 18 % et 16 %).

La loi SRU du 13 décembre 2000 devrait, en principe, freiner les pertes en favorisant la densification des espaces urbains (reconquête de friches urbaines et industrielles, limitation à l'extension des zones pavillonnaires). Elle impose en effet la réalisation de documents territoriaux assurant « *les équilibres entre le développement urbain, la préservation des espaces affectés aux activités agricoles et forestières, et la protection des espaces naturels et des paysages, en respectant les objectifs du développement durable* ». Ces documents doivent refléter un souci « *d'utilisation économe de l'espace urbain et de l'espace naturel* » et de préservation des milieux.

#### L'évolution des surfaces artificialisées de 1997 à 2000



#### L'érosion, souvent liée à la présence de l'Homme et à ses activités

L'érosion est à l'origine d'un grand nombre de dégâts, dans les terrains cultivés et les milieux naturels, dans les zones urbanisées et sur les réseaux routiers : ravines, entraînement de particules des sols, turbidité et pollution des eaux, coulées boueuses endommageant bâtiments et infrastructures. Au-delà de l'érosion bien connue en montagne et dans les vignobles de coteaux, des phénomènes érosifs étendus ont été mis en évidence dans les régions de grande culture à relief peu contrasté. Ils résultent de l'interaction entre de nombreux paramètres permanents (type de sol, topographie...), évolutifs (usage du sol, dimension des parcelles, destruction des réseaux d'écoulement...) ou aléatoires (précipitations). Cette érosion peut être diffuse ou concentrée en rigoles. Elle a pour origine la formation, sous l'effet des pluies, d'une croûte superficielle peu perméable (battance\*) ou le tassement des sols par des engins agricoles.



Ravinement et ruissellement boueux sur une parcelle cultivée dans le pays de Caux

De 1985 à 2001, 18 213 coulées boueuses catastrophiques ont été dénombrées [1], soit, en moyenne, 3,8 coulées par 100 km<sup>2</sup>. Les trois quarts d'entre elles se sont produites depuis 1994, les années 1994, 1995, 1999 et 2000 cumulant à elles seules presque 50 % des coulées.

Dans certaines zones agricoles, des polluants (produits phytosanitaires, par exemple) fixés sur les particules érodées sont transportés par l'eau qui peut être rendue impropre à la consommation humaine ou animale. Le phosphore ainsi véhiculé contribue à l'eutrophisation des milieux aquatiques.

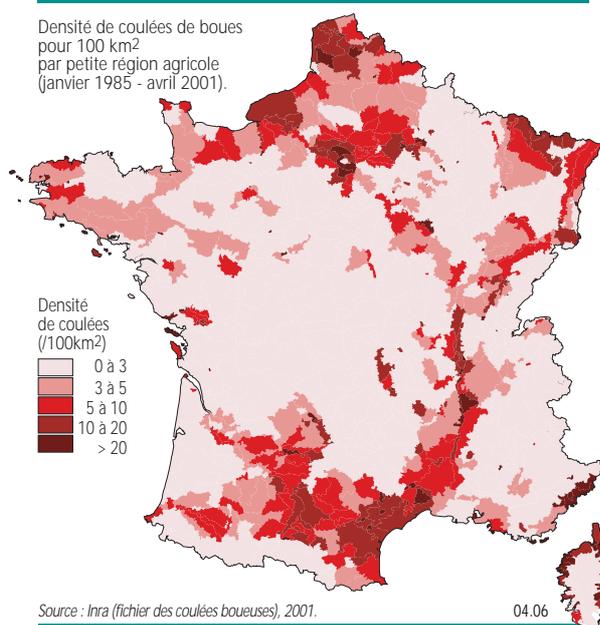
Pour cartographier les manifestations de l'érosion à l'échelle nationale, deux approches sont

1 - Source : Inra.

possibles : le traitement de l'inventaire des coulées de boues redistribuées par petites régions agricoles (régions homogènes du point de vue du paysage agricole) [ill.06] ou l'utilisation d'un modèle de l'aléa d'érosion en zone cultivée, calé sur des résultats de recherches menées par l'Inra, et produisant une cartographie nationale de l'aléa d'érosion pour chaque saison [ill.07]. La convergence des résultats cartographiques produits par les deux approches permet

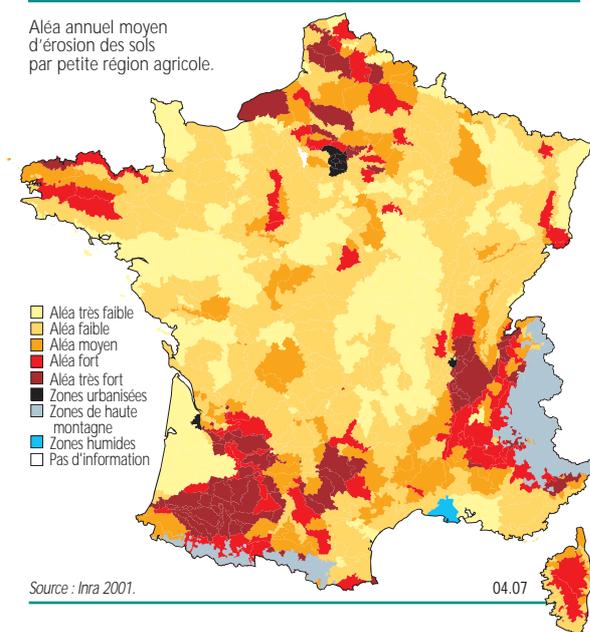
### Les coulées boueuses

Densité de coulées de boues pour 100 km<sup>2</sup> par petite région agricole (janvier 1985 - avril 2001).



### L'aléa d'érosion des sols

Aléa annuel moyen d'érosion des sols par petite région agricole.



d'esquisser un panorama de l'érosion des sols et de ses manifestations actuelles en France.

Les régions les plus fortement touchées (plus de cinq coulées par 100 km<sup>2</sup>) par l'érosion des sols sont le Nord-Pas-de-Calais, la Haute-Normandie, le Languedoc-Roussillon, l'Île-de-France et la Picardie. Il s'agit de zones densément peuplées, de cultures intensives sur des sols sensibles à la battance\*.

Un deuxième ensemble de régions très touchées (de 3,4 à 4,4 coulées par 100 km<sup>2</sup>) est constitué par Midi-Pyrénées, l'Alsace, la Lorraine, la Franche-Comté, la Basse-Normandie et Rhône-Alpes. Ce sont des régions, soit à relief marqué, soit fortement urbanisées. Les raisons des coulées y sont probablement diverses.

Les régions peu ou pas affectées par les coulées (moins de trois coulées par 100 km<sup>2</sup>) ont en général un relief peu marqué et sont caractérisées par de larges zones herbagères ou boisées. Localement, on constate que les parcelles agricoles riches en matière organique offrent une meilleure résistance à l'érosion.

L'utilisation d'un modèle de la susceptibilité des sols à l'érosion est un premier pas pour tenter de prévenir les dégâts éventuels de l'érosion, lors de la mise en œuvre de politiques impliquant par exemple des changements d'usage des sols. Ce modèle a été utilisé avec des données plus précises au niveau régional. Il est en cours d'extension pour dresser une cartographie européenne du phénomène.

Pour limiter et supprimer les effets gênants de l'érosion, des mesures de prévention et de protection peuvent être appliquées, en particulier dans les zones cultivées : zones enherbées pour piéger les particules en bordure de parcelle et en fond de valon, modification des pratiques culturales (orientation du travail du sol et des plantations perpendiculairement à la pente, enherbement des cultures), implantation de fossés ou de haies, etc.

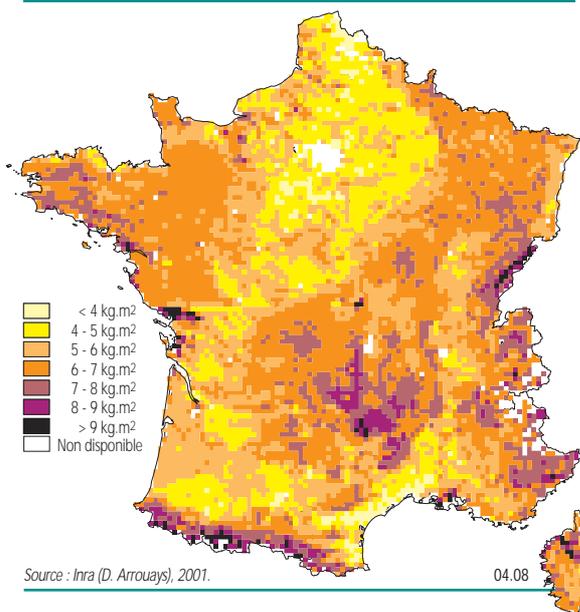
### La matière organique du sol, les échanges avec l'atmosphère

La matière organique du sol est constituée par les organismes vivants (végétaux, bactéries, etc.) qui y vivent et, majoritairement, par leurs résidus organiques. Composante importante de la fertilité, elle joue un rôle environnemental de premier plan : elle contribue à préserver les sols de l'érosion en intervenant dans la stabilité structurale des couches de surface, elle participe aux cycles de l'azote et du carbone, elle protège la ressource en eau en piégeant les polluants.

La matière organique du sol qui contient, à l'échelle du globe, environ 1 500 milliards de tonnes de carbone, dans le premier mètre d'épaisseur, constitue le plus gros réservoir superficiel de carbone échangeable avec l'atmosphère. Comme source ou puits potentiel de gaz carbonique, le sol joue un rôle important dans l'effet de serre : « une augmentation de ce réservoir de 0,4 % par an stockerait autant de carbone que la combustion de carbone fossile en émet » [2]. La quantité de carbone stockée dans le sol peut être influencée par des variations spontanées du milieu ou par l'action directe ou indirecte de l'homme sur l'atmosphère, la végétation ou le sol. Par exemple, les mises en cultures de prairies en zones tempérées, ces dernières décennies, ont fortement contribué aux émissions de gaz carbonique, par la minéralisation induite du carbone du sol. L'évaluation des stocks et des flux de carbone du sol revêt, par conséquent, une importance majeure.

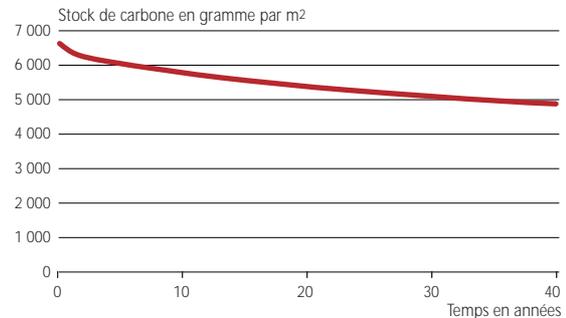
Au niveau national, des modèles de l'Inra ont permis, en 2000, une estimation globale des stocks de carbone des sols et une évaluation des incidences de quelques changements d'usage de sols sur celui-ci. Pour la couche de 0 à 30 cm, le stock global en carbone des sols de France peut être estimé à 3,1 milliards de tonnes au moins, soit 1/500<sup>e</sup> des stocks mondiaux. Les stocks les plus faibles sont observés en Languedoc-Roussillon et dans quelques zones de cultures très intensives, les stocks faibles dans les grandes plaines de cultures intensives, les

#### Le stock des sols en matière organique

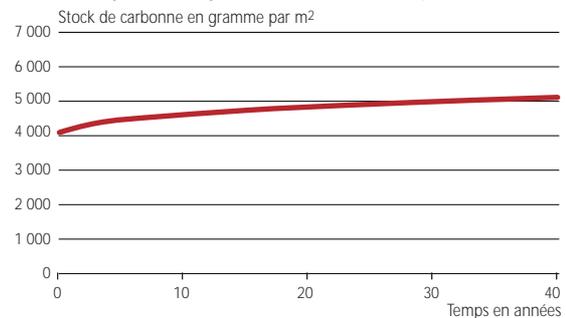


#### La matière organique dans le sol

De la prairie aux terres labourées (décroissance du stock de matière organique lors d'un changement d'usage de la prairie vers les terres labourées).



Des terres labourées à la prairie (croissance du stock de matière organique lors d'un changement d'usage des terres labourées vers la prairie).



Source : Inra, 2001.

04.09

stocks moyennement élevés dans les régions forestières ou fourragères et les stocks les plus élevés en zones montagneuses ou marécageuses [III.08].

Les émissions annuelles de carbone en France sont estimées à cent millions de tonnes par an, soit 3,2 % du stock du sol. Une augmentation de ce stock de 1,3 ‰ par an permettrait de compenser 4 % des émissions annuelles de carbone, soit l'équivalent des émissions d'origine agricole.

Lors d'un changement d'usage des sols de prairie en terre arable (céréales), on observe une chute rapide du stock de carbone, puis une décroissance plus lente et une stabilisation au bout d'une centaine d'années [III.09]. Le passage inverse permet un stockage du carbone, mais selon une vitesse plus lente (plus d'un siècle). Sous réserve d'études plus poussées et d'une validation nationale, les outils de simulation permettraient d'évaluer les effets du changement d'usage du sol ou de techniques de culture visant à compenser une partie des émissions de carbone. Mais la lenteur de la reconstitution des stocks de matière organique doit inciter en priorité à protéger cette matière organique, gage de fertilité des sols.

2 - D'après Jérôme Balesdent et al. in Comptes rendus de l'Académie de l'Agriculture de France, 1999.

### La richesse biologique des sols : un patrimoine qui reste à explorer

La qualité biologique des sols peut se définir de manière générale par l'abondance, la diversité et l'activité des organismes vivant dans les sols (faune et flore). Elle influe sur la fertilité de ce sol et dépend de son usage, des techniques qui lui sont appliquées, de la présence de produits écotoxiques. Les études de références font aujourd'hui encore cruellement défaut.

Le sol se caractérise à la fois par une grande diversité et une grande densité d'êtres vivants : sur une épaisseur de trente centimètres, on considère qu'un hectare de sol recèle en moyenne vingt-cinq tonnes d'organismes, dont dix tonnes de bactéries, réparties entre plusieurs milliers d'espèces, dix tonnes de champignons, quatre tonnes de vers de terre et une tonne d'organismes divers. Un très grand nombre d'insectes sont dépendants du sol pour une partie au moins de leur cycle de vie. L'inventaire exhaustif des populations de micro-organismes du sol (notamment bactéries) s'avère encore impossible à dresser : on estime qu'un peu moins de 10 % sont aujourd'hui connus. Tous ces organismes, et plus particulièrement les micro-organismes, jouent un rôle primordial dans la formation des sols et leur évolution, en décomposant les résidus animaux et végétaux, en les minéralisant et en les incorporant au sol, participant ainsi au recyclage du carbone et des nutriments minéraux. Certains d'entre eux comme les vers de terre ont également un rôle déterminant dans le maintien de la structure et de la circulation de l'eau dans le sol. En outre, de nombreux micro-organismes peuvent être utilisés dans les processus de dépollution des sols.

Beaucoup d'espèces de micro-organismes utilisées par l'homme ont été initialement isolées à partir du sol. Celles qui restent à découvrir constituent un immense patrimoine génétique à explorer.

Les impacts potentiels des actions anthropiques sur ces populations sont multiples. La diminution des teneurs en matières organiques ou la contamination par certains métaux, normalement présents à l'état de trace, peuvent induire un appauvrissement quantitatif et qualitatif de certaines populations. Par ailleurs, l'impact biologique de certains pesticides est encore mal connu.

L'évaluation de la qualité biologique des sols et ses sujets connexes restent pour l'essentiel des questions de recherche, à travers lesquelles on tente d'évaluer les effets des activités anthropiques.

### L'acidification des sols par les retombées de la pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique [3] par le SO<sub>2</sub>, les NO<sub>x</sub>, le NH<sub>3</sub> et le HCl génère des acides susceptibles de se déposer au sol, parfois à plusieurs centaines de kilomètres des sources d'émission. Les sols à tendance naturelle acide représentent environ 26 % des sols français. Une faible augmentation de l'acidité due aux activités humaines peut modifier les équilibres chimiques et biologiques et affecter les écosystèmes.

Sous l'effet des dépôts acides, le calcium, le magnésium, le potassium, le sodium contenus dans les sols sont libérés et lessivés, entraînant l'appauvrissement chimique et l'affaiblissement de la structure des sols. Ces modifications peuvent déclencher des phénomènes de carences minérales conduisant à un dépérissement forestier (Massif vosgien). Dans les cas d'acidification extrême, des quantités importantes d'éléments chimiques aux effets toxiques, comme l'aluminium dissous, drainées vers les eaux de surface, peuvent entraîner la disparition d'espèces animales.

Le concept de charge critique (pollution maximale admissible pour la protection d'un écosystème) peut permettre de mieux rendre compte de l'impact des retombées atmosphériques, notamment sur les écosystèmes.

### La salinisation et la sodisation : des phénomènes localisés

La salinisation correspond à une accumulation de sels dans le sol, susceptible de gêner l'alimentation en eau des plantes. La salinisation primaire a une origine naturelle, liée à une source bien définie de sels (proximité de la mer ou de dépôts salins actuels ou géologiques). La superficie concernée en France par ce type de salinisation est faible et bien localisée (Camargue, marais de l'Ouest, Wateringues, baie de Somme...). Ces zones sont en général protégées, car elles sont occupées par des écosystèmes particuliers (végétation d'halophytes) et présentent un intérêt écologique. La salinisation secondaire liée en particulier à l'irrigation ne concerne également que des zones limitées.

Autre phénomène d'accumulation de sels, la sodisation correspond à la fixation de sodium sur les minéraux argileux du sol et peut conduire à une

3 - Voir le chapitre « L'air ».

dégradation de certaines propriétés physiques des sols. Ceux-ci peuvent être traités par des apports de calcium facilement solubilisé (gypse). Ce phénomène concerne en France d'anciens sols de bord de mer dessalés par l'action du climat ou de l'homme (marais Breton, Nantais, Vendéen et Charentais). Très localement, on observe une autre forme de sodisation, liée à l'épandage sur les terrains agricoles d'effluents liquides riches en sodium, comme ceux des laiteries.

L'ensemble des superficies de sols concernés par l'un ou l'autre des deux processus représente moins de cent mille hectares.

### Le rôle du sol dans la pollution par les pesticides

En 1999, la production française de pesticides était de 109 097 tonnes de matières actives\* [4], dont une majorité de fongicides (58 %), suivie par les herbicides (39 %) et par les insecticides (3 %) et autres produits [5]. Lors du traitement, une partie seulement du produit atteint sa cible. Les quantités résiduelles qui atteignent le sol peuvent dans certains cas s'y fixer ou être dégradées par la biomasse. L'aptitude à fixer et dégrader les pesticides varie suivant les sols et les caractéristiques des molécules. La fixation des molécules sur les particules de sol par adsorption ou rétention dans les matières organiques étant en partie réversible, les pesticides peuvent être libérés longtemps après un traitement. C'est le cas par exemple pour l'atrazine (herbicide du maïs) et ses dérivés que l'on retrouve plus de dix ans après une culture de maïs. Les molécules diluées dans les eaux sont entraînées vers les cours d'eau par ruissellement ou en profondeur vers les nappes phréatiques. Entraînées à l'état adsorbé sur les particules de sol, elles peuvent également s'accumuler dans les sédiments, puis générer ultérieurement de nouvelles pollutions.

L'entraînement des matières actives dépend de l'état structural de la surface du sol (croûte de battance) et de l'abondance des pluies qui suivent le traitement. Les modèles de susceptibilité à l'érosion des sols, utilisés à l'échelle locale, pourraient trouver ici un intérêt particulier. Par ailleurs, il est recommandé aux agriculteurs d'éviter les traitements lorsqu'un épisode pluvieux est prévu.

L'entraînement des matières actives en profondeur est moins intense (environ 1 % de la dose apportée) mais plus continu. Les quantités entraî-

nées sont cependant suffisantes pour que l'eau des aquifères libres situés à faible profondeur et à l'aplomb des régions de grande culture, présente des teneurs en pesticides [6] qui la rendent réglementairement impropre à la consommation humaine.

La plupart des sols sont sensibles à ce phénomène. Les situations les plus vulnérables correspondent à des sols peu épais, très perméables, situés sur des formations géologiques perméables (Champagne crayeuse, Petite Beauce, Champagne berrichonne, plateau Lorrain, etc.). Les sols très peu perméables ne sont cependant pas épargnés, car ils ont fréquemment été drainés pour les rendre propres à la culture. Les molécules présentes dans la solution du sol sont alors interceptées par le réseau de drainage et rapidement dirigées vers les eaux superficielles. Les sols les moins sensibles sont les sols profonds dans lesquels les processus de dégradation des molécules sont plus aboutis.

### Le rôle du sol dans la pollution des eaux par les nitrates et les phosphates

Il n'y a pas à proprement parler de pollution du sol par les nitrates et les phosphates. Celui-ci ne joue en effet qu'un rôle de « réserve » vis-à-vis des plantes qui utilisent l'azote et le phosphore, éléments essentiels à leur croissance. En revanche, de ses propriétés dépend la migration de ces éléments vers les eaux souterraines ou superficielles, dont l'eutrophisation [7] est une conséquence préoccupante. Celle-ci résulte pour partie d'apports excessifs de phosphore et d'azote, dont l'excédent s'accumule dans le sol. Il peut y être mobilisé par l'eau d'infiltration et atteindre les eaux souterraines (cas des nitrates), ou par l'eau de ruissellement superficiel sous forme dissoute ou fixée sur des particules de sol (cas du phosphore) et contaminer les eaux de surface. On estime à 9 % la part de l'azote incorporé dans les sols agricoles qui n'est pas utilisé par les cultures [8].

Dans le cas des composés azotés, la nature du sol et celle du sous-sol jouent un rôle essentiel. Les situations les plus vulnérables à court terme, en cas d'excédent temporaire d'azote, sont celles où le sol est mince (moins de 40 cm), très filtrant (textures sableuses), et où le matériau géologique sous-jacent est perméable (roches filtrantes ou largement fissurées).

4 - Source : Union des industries pour la protection des plantes (UIPP).

5 - Voir le chapitre « L'agriculture ».

6 et 7 - Voir le chapitre « Les eaux continentales ».

8 - Source : Scce. Voir le chapitre « L'agriculture ».

En tout état de cause, à long terme, la capacité de protection des sols doit surtout être perçue comme celle d'accumuler de l'azote sous forme organique. Elle a pour effet de retarder, pour des années et peut-être des décennies, des fuites qui sont inéluctables si l'azote du sol et l'azote apporté excèdent durablement les quantités exportées par les récoltes.

La vulnérabilité du sol vis-à-vis de l'érosion, et donc la stabilité de la structure de l'horizon de surface, constituent le critère déterminant la capacité du sol à immobiliser le phosphore, car celui-ci est plus facilement entraîné avec les particules de sol.

### Les éléments traces métalliques : des anomalies naturelles et quelques contaminations

Présents dans les sols à des teneurs inférieures à 100 mg/kg (hors zones industrielles, les éléments traces métalliques (ETM, appelés improprement « métaux lourds ») résultent soit de l'altération des roches originelles, soit d'apports naturels ou anthropiques. Certains de ces éléments sont toxiques (bore, zinc, cuivre, molybdène...). D'autres sont nécessaires à la vie (oligo-éléments) en quantité infinitésimale, mais deviennent toxiques lorsqu'ils sont ingérés en quantité plus importante via les chaînes alimentaires. Leur toxicité dépend également de leur état chimique (spéciation), qui conditionne leur mobilité dans le sol ou leur capacité à être absorbés par les végétaux (phyto-disponibilité).

#### Les teneurs naturelles des éléments traces métalliques dans les sols

La concentration « naturelle » d'un ETM dans le sol varie grandement en fonction de la nature de la roche qui lui donne naissance ; mais elle peut aussi être influencée par des pratiques agricoles comme le labour profond qui fait remonter les éléments en surface. Les teneurs en ETM mesurées aujourd'hui dans les horizons de surface des sols agricoles français résultent beaucoup plus de l'héritage des matériaux parentaux transformés par la pédogenèse que des activités humaines [9]. Certains secteurs du territoire présentent des anomalies naturelles marquées : les sols des bordures sédimentaires du Massif central pour tous les métaux, certains sols de Bourgogne, du Jura et des Charentes, développés sur calcaires jurassiques et particulièrement riches en cadmium. Les teneurs en plomb sont élevées dans les sols du

9 - Source : Inra et Ademe.

#### Les éléments traces métalliques dans les sols

Teneurs en éléments traces métalliques des sols de France et valeurs limites (\*), fixées par le décret du 8 janvier 1998, au-delà desquelles l'épandage des boues sur les sols est interdit.

Éléments	Moyenne	Médiane	Maximum	Seuil épandage des boues (*)
en mg/kg de sol sec				
Cadmium	0,42	0,16	6,99	2
Chrome	75	66,3	691	150
Cuivre	14,9	12,8	107	100
Nickel	41,3	31	478	50
Plomb	64,8	34,1	3 000	100
Zinc	149	80	3 820	300

Source : Inra, in « Le Courrier de l'Environnement », février 2001.

04.10

Poitou et certains sols de Guyane sont chargés en mercure. Ces anomalies excèdent souvent le seuil réglementaire français pour l'épandage des boues d'épuration, qui ne peut être alors pratiqué qu'avec précautions et après dérogation [ill. 10].

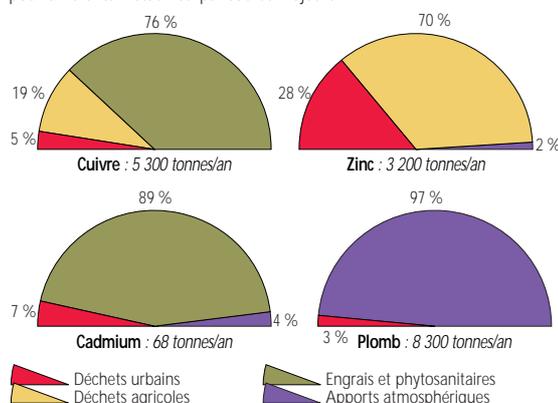
#### Les apports en éléments traces métalliques

Sur des surfaces d'extension géographique limitée, les teneurs naturelles des sols en ETM ont été parfois fortement augmentées par des apports liés aux activités humaines : épandages d'engrais phosphatés (cadmium) et de lisiers de porcs (cuivre et zinc), épandages de boues des stations d'épuration, pollutions industrielles, pollutions liées au trafic automobile (zinc, plomb), etc. Les métaux des apports anthropiques, généralement sous des formes chimiques plus mobiles, peuvent induire des risques très supérieurs aux métaux naturels, présents le plus souvent sous des formes chimiques inertes et à l'équilibre avec les conditions physico-chimiques locales.

En zones rurales, il semble que le degré général de contamination en ETM demeure très faible, le

#### Les apports de métaux dans les sols

Estimation des apports annuels sur les sols en France, pour différents métaux et par source majeure.



04.11

plus souvent imperceptible. Les teneurs provenant de retombées atmosphériques d'origine lointaine sont en général faibles par rapport aux teneurs naturelles des sols. Localement, on constate des contaminations d'origine anthropique plus nettes : cuivre à des degrés divers dans les zones de vignes et d'arboriculture, zinc, mercure, plomb, arsenic, cuivre (contenus dans des produits phytosanitaires) ou cadmium (usage intensif d'engrais) dans certaines parcelles agricoles très exploitées. Une contamination est parfois observable sur les parcelles qui ont reçu dans le passé des épandages de boues très chargées en ETM, à des doses cumulées excessives (cadmium, plomb, cuivre, zinc, mercure).

Enfin, les sols situés à proximité immédiate d'installations polluantes telles que les établissements métallurgiques ou de traitement de minerais (métaux non ferreux), les centrales thermiques ou les usines d'incinération, peuvent être pollués.

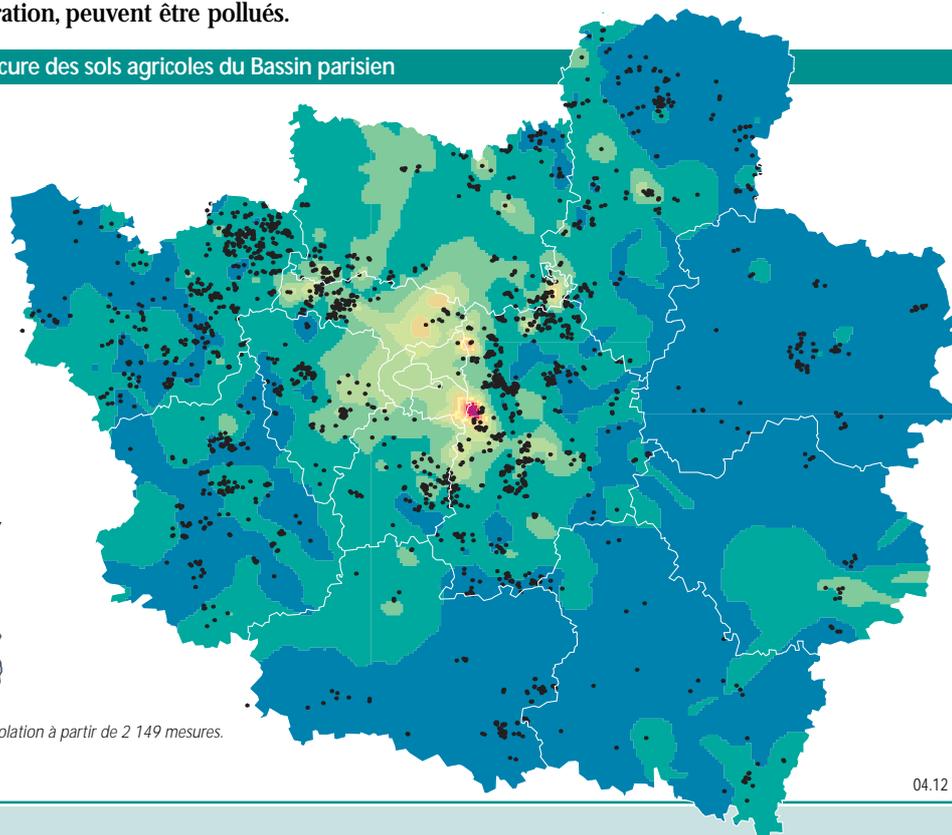
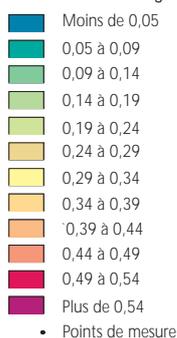
## La contamination radioactive : un suivi des retombées de Tchernobyl

La radioactivité est naturellement présente dans les sols depuis leur formation. C'est particulièrement vrai pour les sols issus de roches granitiques, qui affleurent notamment en Bretagne et dans le Massif central. Les éléments rencontrés sont le potassium-40 ainsi qu'une dizaine d'éléments appartenant aux familles de l'uranium et du thorium.

Mais on relève aussi dans les sols une contamination radioactive d'origine artificielle, liée aux retombées des explosions d'engins nucléaires réalisées entre 1945 et 1980 dans l'atmosphère et aux rejets accidentels comme ceux de Tchernobyl [III.13]. Les retombées désignent les poussières atmosphériques radioactives qui ont rejoint le sol : essentiellement les césium 137 et 134, le strontium 90 et le

### Les teneurs en mercure des sols agricoles du Bassin parisien

Teneurs totales en mg / kg



N.B. : Cartographie par interpolation à partir de 2 149 mesures.

Source : Inra (D. Baize), 2001.

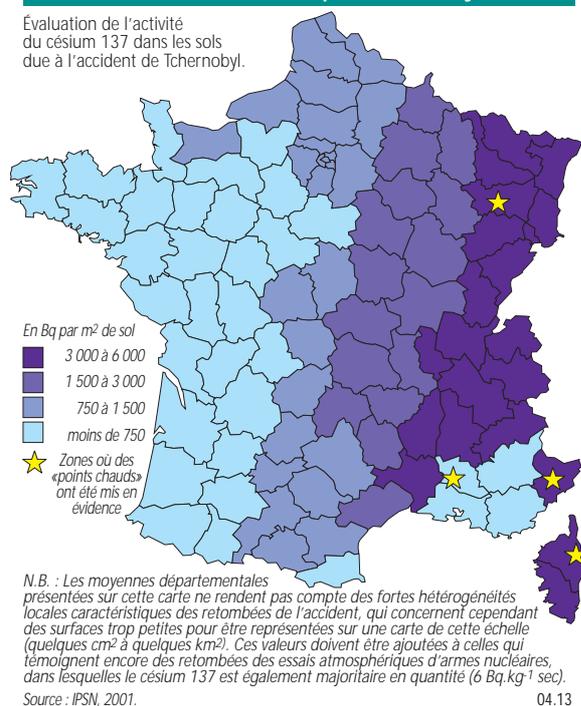
04.12

Une étude a été menée par l'Inra dans quatorze départements du Bassin parisien sur les teneurs en mercure dans les horizons de surface des sols agricoles (terrains maraichers exclus). Pour les 2 149 analyses rassemblées, la médiane s'établit à 0,05 mg/kg de sol sec. Seules vingt-huit valeurs excèdent 0,40 mg/kg.

Ces très faibles teneurs en mercure sont surprenantes. Les retombées atmosphériques ont-elles été surestimées ou le mercure apporté a-t-il migré vers le compartiment atmosphérique par volatilisation ? Très localement, on décèle des concentrations relativement importantes, par exemple dans certains sites du département des Yvelines, sans cause connue.

### Le césium 137 dans les sols après Tchernobyl

Évaluation de l'activité du césium 137 dans les sols due à l'accident de Tchernobyl.



plutonium 239+240. Les autres radionucléides (ruthénium 103 et 106, antimoine 125, argent 110) ont disparu du fait de leur période relativement courte.

Cette radioactivité se répartit différemment à la surface des sols, selon l'éloignement par rapport à la source de production, la nature même du sol, la teneur en matières organiques, le couvert végétal, l'exposition aux pluies et aux vents, etc. En principe, la teneur en éléments radioactifs artificiels décroît rapidement en profondeur dans les premiers cinquante centimètres de sol. Mais la répartition en profondeur dépend aussi de la capacité des constituants du sol à fixer les différents types de radionucléides, de leur lessivage par les pluies et de l'usage des sols, notamment par l'agriculture. Les radionucléides peuvent en outre être entraînés en adsorption sur les particules de sol lors de l'érosion.

L'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN) étudie sur le terrain et en milieux contrôlés (serres) le devenir des éléments radioactifs déposés sur les sols. Pour évaluer la radioactivité artificielle encore présente sur notre territoire, il dispose depuis 1993 d'un observatoire permanent de la radioactivité [10]. Le volet consacré au milieu terrestre repose sur des prélèvements réguliers de sol, d'herbes et de produits alimentaires, ainsi que sur

des bio-indicateurs comme les mousses et les lichens. Les recherches concernent également les interactions entre les différents facteurs physico-chimiques. Un atelier d'études a été installé dans le parc du massif du Mercantour sur un petit bassin versant où des « points chauds » de quelques centimètres carrés à quelques mètres carrés présentent une contamination en césium 137, dix à vingt fois supérieure à ce qui est observé sur le reste de la zone. L'objectif est de retracer le comportement de la radioactivité au fil des saisons, et éventuellement d'extrapoler les renseignements obtenus à d'autres écosystèmes montagnards de dimensions supérieures.

### La pollution industrielle des sols : la menace du « relargage »

La pollution des sols par l'industrie est généralement ponctuelle. Elle peut cependant être transportée par l'air ou l'eau, et concerner des volumes de sols plus importants en profondeur ou en surface. Son origine peut être très variée. Elle peut avoir des conséquences directes ou indirectes, à plus ou moins long terme, sur la santé humaine. Outre sa pollution directe, le sol peut jouer aussi le rôle de réservoir de polluants qui sont susceptibles, sous certaines conditions, de devenir mobiles (on parle alors de « relargage » des pollutions) et d'atteindre les écosystèmes, les ressources en eau, puis la chaîne alimentaire. Ces pollutions ont pour effet de stériliser durablement les sols pour certains usages. Ce relargage, qui peut être très lent, évoque l'image d'une bombe à retardement. Face à cette menace, les pouvoirs publics ont adopté une politique mettant l'accent sur la prévention.

#### Prévenir, réhabiliter, informer

La politique française en matière de sites et sols pollués s'appuie sur trois axes d'actions : prévenir, traiter-réhabiliter, connaître.

La prévention est prise en charge par les dispositions réglementaires concernant les installations classées. Depuis 1996, environ 1 300 sites industriels en activité font l'objet d'une surveillance, avec des diagnostics initiaux et des évaluations simplifiées des risques.

Les traitements visent à réduire tous risques pour l'homme et son environnement et à contenir toute propagation de la pollution : d'abord par des mesures d'isolement ou d'enlèvement de déchets,

10 - Voir le chapitre « L'air ».

ensuite, par d'éventuelles actions plus lourdes pour restaurer le site en fonction de l'usage auquel on le destine. Il faut aussi s'assurer que le site ne sera pas ultérieurement affecté à un usage incompatible avec l'état de son sol.

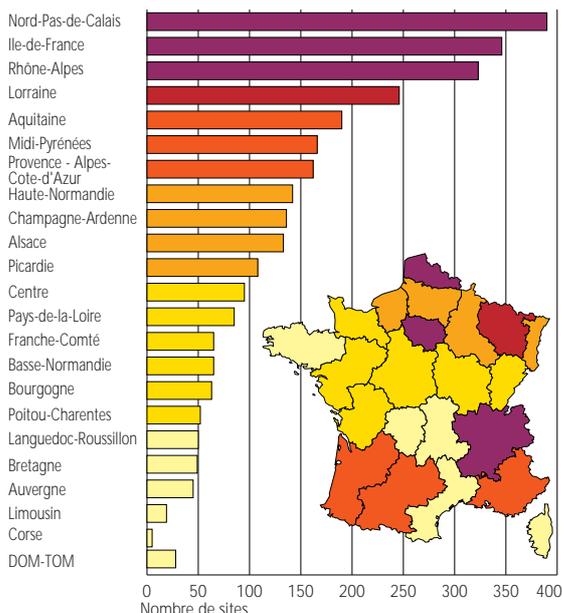
La connaissance de l'état de pollution des sites, et des risques qui leur sont liés, passe par la réalisation d'inventaires et une diffusion de l'information la plus large possible.

### *Inventorier les sites pollués : Basol et Basias*

Mis en place en 1978, l'inventaire des sites et des sols pollués (Basol) comprenait 2 963 sites en mai 2001. Un peu plus de la moitié est localisée dans six régions qui totalisent 44 % de la population métropolitaine [ill. 14]. 77 % sont situés dans des zones urbaines ou périurbaines, 23 % dans des zones essentiellement rurales, 5 % dans des communes affectées par de nombreux changements du sol.

Sur l'ensemble des sites, 32 % sont des sites industriels en activité pour lesquels une pollution est probable : l'administration a demandé qu'ils fassent l'objet d'un diagnostic et d'une étude simplifiée des risques. Pour 54 %, la pollution est avérée : des travaux ou des études d'évaluation ont été engagés. Pour 32 %, la pollution résiduelle rend leur usage possible pour certaines activités : leur réutilisation fait l'objet d'une surveillance. Enfin, pour 7 %

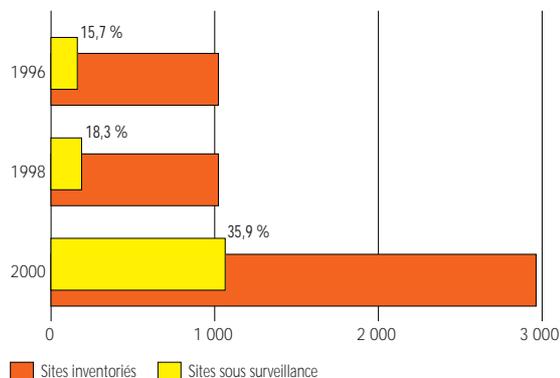
### Les sites pollués sur le territoire français



Source : ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement (Basol), mai 2001.

04.14

### L'accroissement de l'effort de surveillance des sites



Source : ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement (Basol), mai 2001.

04.15

### Les recommandations du comité de la Prévention et de la Précaution

Dans le cadre de son avis du 19 juillet 2000 relatif à la surveillance des risques sanitaires liés aux sols pollués par une activité industrielle, le comité de la Prévention et de la Précaution a recommandé notamment les points suivants :

- améliorer le dispositif réglementaire sur les sols et son application, notamment à travers le développement du recensement et du diagnostic des sites pollués et de leurs impacts sur la santé des populations ;
- développer les moyens techniques d'appui aux politiques publiques, en complétant par exemple les inventaires Basol et Basias et en mettant à disposition du public l'ensemble des données ;
- développer la recherche et la formation en intégrant les dimensions sociales et économiques.

des sites, les travaux permettent une utilisation libre de toute restriction.

La politique de prévention s'est traduite par un doublement du nombre de sites placés sous surveillance entre 1996 et 2000 recensés dans Basol [ill. 15]. Consultable sur le serveur Internet du ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, la base de données Basol est mise à jour en permanence. Depuis 1994, le ministère a chargé le BRGM de la réalisation d'un inventaire des anciens sites industriels et activités de service. Cet inventaire s'est concrétisé par la mise en place de Basias, base de données des anciens sites industriels et d'activités de service, consultable sur le site Internet du BRGM.

## L'épandage de boues de stations d'épuration municipales sur les sols

De nombreux effluents issus de l'agriculture, de l'industrie ou des zones urbaines aboutissent, après traitement, sur les sols. En particulier, 60 % du million de tonnes de boues produites (matière sèche) en 1998 [9] par les stations d'épuration des eaux usées municipales ont été épandues sur environ 2 % de la surface agricole utile, comme matière fertilisante.

Cette pratique suscite des questions sur le comportement à long terme des ETM, toujours présents dans les boues, et leurs risques éventuels sur la qualité des eaux, la faune et la flore. Les directives européennes sur l'eau ont pour conséquence l'augmentation du tonnage de boues : celui-ci devrait atteindre, d'ici 2005, 1,3 million de tonnes de matière sèche [10]. Il sera, en principe, impossible de mettre ces boues en décharge à partir de 2002 (loi sur les déchets de 1992).

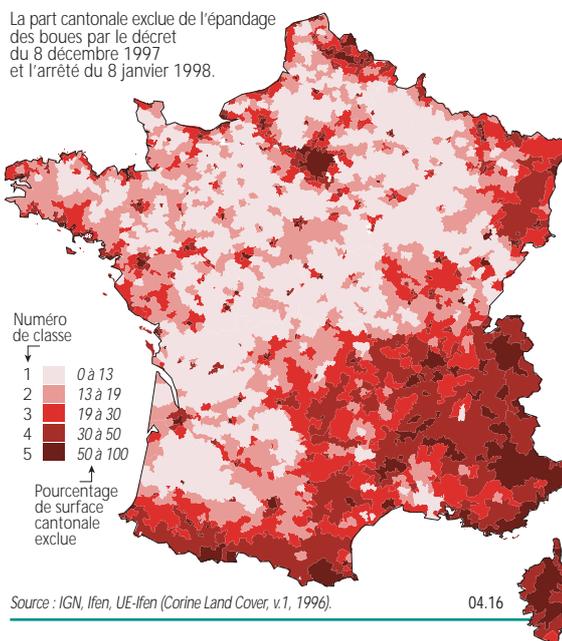
Faire appel aux capacités d'épuration du sol apparaît, aujourd'hui, comme la solution la moins coûteuse. Mais si les boues offrent des qualités fertilisantes, elles n'en demeurent pas moins des déchets sur le plan juridique. Leur épandage implique donc des précautions réglementaires qui tiennent compte de leur composition et des propriétés physico-chimiques des sols. En attendant des réponses définitives, pour garantir l'innocuité des épandages de boues vis-à-vis des sols et de la chaîne alimentaire, la France s'est dotée d'un dispositif réglementaire qui va au-delà des normes européennes [11].

## Où sont les sols potentiellement utilisables pour le recyclage des boues ?

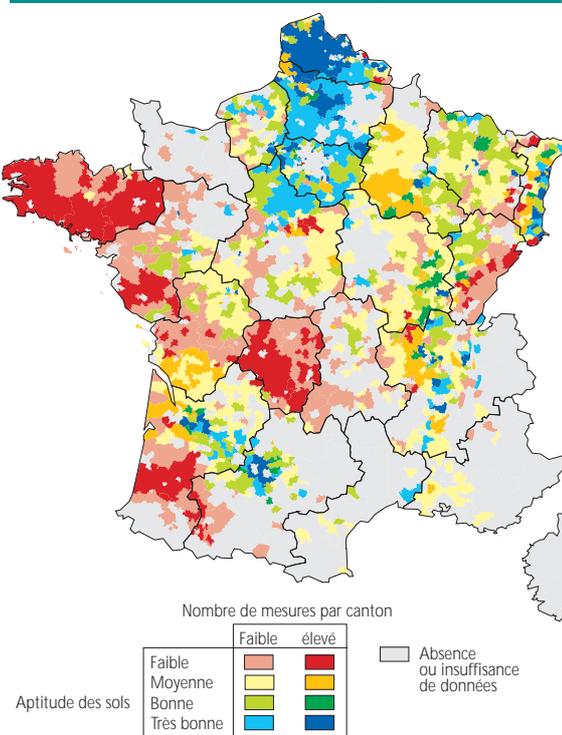
Un traitement informatique tenant compte des distances d'isolement définies par l'arrêté du 8 janvier 1998 a permis de constater que, indépendamment de la nature des sols, 22 % de la surface du territoire doivent être exclus de l'épandage des boues. Les statistiques régionales et cantonales révèlent une grande hétérogénéité dans la répartition de ces zones. La moyenne nationale de surface non épandable dans les cantons s'établit à 63 %. Les surfaces sont restreintes dans les zones les plus fortement urbanisées (Île-de-France, départements du Nord) et dans les massifs montagneux (quart Sud-est, Vosges, Pyrénées) ; 69 % des cantons ont moins de 35 % de leur surface exclus [ill. 16].

### Les zones exclues de l'épandage des boues

La part cantonale exclue de l'épandage des boues par le décret du 8 décembre 1997 et l'arrêté du 8 janvier 1998.



### L'indice d'aptitude des sols à l'épandage des boues (IAE)



9 - Source : enquête Eau, Ifen, Scea, agences de l'Eau.

10 - Voir le chapitre « Les émissions ».

11 - Décret du 8 décembre 1997 et arrêté du 8 janvier 1998

Un modèle attribuant par canton un indice d'aptitude des sols à l'épandage des boues a été développé par l'Institut supérieur d'agriculture (ISA) de Lille, à la demande de l'Ifen. Il utilise les informations de la base des données d'analyses de terres (BDAT). Les zones présentant des contraintes à l'épandage correspondent, d'une part, à des formations sableuses (Landes, Sologne) et d'autre part, aux massifs anciens constitués de roches de type granitique et à leurs piémonts (Massif armoricain, Massif central, Vosges), qui donnent des sols acides. Dans ce dernier cas, l'utilisation de boues chaulées (30 % de la production) hygiénisées est recommandée [ill. 17].

L'examen de ces deux cartes montre que la France dispose d'un potentiel important de sols aptes à l'épandage, mais inégalement réparti. Dans les régions méditerranéennes, le manque de terrains est un facteur limitant l'épandage : le compostage des boues devrait s'y développer. À l'Ouest, c'est la nature des terrains qui restreint l'épandage : le chaulage y est une solution bien adaptée. Localement, il faudra envisager des transferts vers des zones plus favorables ou mettre en place des solutions alternatives viables. Il est impératif, pour disposer de boues de qualité acceptable à l'épandage de veiller à ce que des polluants ne puissent être introduits dans les réseaux de collecte des eaux usées.

Si la loi du 13 juillet 1979 permet de considérer les boues comme une matière fertilisante, le décret du 8 décembre 1997 et l'arrêté du 8 janvier 1998 confirment que celles-ci sont des déchets régis par la loi du 15 juillet 1975. Ces dispositions interdisent l'épandage de boues ne présentant pas un « intérêt pour les sols ou la nutrition des cultures et des plantations », et fixent les précautions d'usage vis-à-vis de la qualité des boues et des propriétés des sols. Les producteurs de boues doivent obtenir l'accord du préfet pour une « étude préalable », et mettre en place un dispositif de gestion et de suivi. Pour les stations de grande taille, une enquête publique doit être réalisée afin d'obtenir une « autorisation ». L'avis du conseil départemental d'Hygiène est requis. Ces dispositions sont d'une manière générale plus rigoureuses que ce que prévoit la législation européenne.

## Les réponses

Les politiques nationales en matière de protection des sols visent à combler les lacunes en données sur les sols. Un effort important a donc été entrepris pour développer des programmes de recherche, mettre en place des réseaux de mesures, élaborer des méthodes d'évaluation des risques et de réhabilitation, constituer des bases de données et informer.

### *Le groupement d'intérêt scientifique sur les sols (GIS Sol)*

Mis en place en 2001 par le ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement et le ministère de l'Agriculture et de la Pêche, s'appuyant sur l'Ifen, l'Inra et l'Ademe, le GIS Sol s'intéresse particulièrement aux sols non industriels ou non urbains. Sa mission est d'optimiser et de développer des programmes d'inventaire et d'observation des sols à l'échelle nationale, dans le but de dresser un état des sols, d'en prévenir les dégradations et d'informer le public. Il repose sur :

L'inventaire Gestion et Conservation des sols (IGCS), conduit conjointement par les régions, le ministère chargé de l'Agriculture et l'Inra depuis 1990, est intégré au GIS Sol. Son objectif est de construire un outil de gestion et de conservation des sols conforme aux exigences de protection de l'environnement et de conservation du patrimoine sol. Toutes les données régionales recueillies, selon un protocole déterminé, sont intégrées dans une base de données (Donesol).

Le réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS), dont la mise en place a débuté en 2001, comptera, d'ici 2004, environ 2 000 sites repérés, installés sur la base d'une maille de 16 km de côté, en coïncidence avec le réseau européen de surveillance des forêts. Des échantillons de sol y seront prélevés tous les cinq ans afin d'évaluer l'évolution quantitative des dégradations des sols à l'échelle du territoire français (en particulier, l'évolution de paramètres « sensibles » au plan environnemental : matière organique, ETM, etc.). Ce dispositif sera complété ultérieurement par un réseau de sites dédiés à l'étude des processus d'évolution de la qualité des sols.

La base de données des analyses de terre (BDAT) regroupe environ 300 000 analyses de terre sur des échantillons collectés entre 1990 et 1994. Elle bénéficiera du soutien du GIS Sol et sera remise

à jour. Elle permettra de compléter et d'actualiser les cartes cantonales, réalisées à la demande du ministère chargé de l'Agriculture en 1998, pour une dizaine de propriétés des sols agricoles (acidité, matières organiques, etc.), afin de détecter les évolutions régionales.

Les échantillons de sol du GIS Sol seront stockés et gérés dans un conservatoire, qui constituera ainsi une source de matériaux de référence, utilisables pour la recherche et la réalisation d'analyses répondant à des demandes nouvelles.

### *Le programme de recherches Gessol*

Lancé en 1998 par le ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, Gessol a pour finalité de fournir des outils scientifiques (métrologie, modélisation) et des méthodes pour évaluer, surveiller, voire restaurer la qualité du sol.

### *L'activité « Recherche et développement » sur les sites et sols pollués*

Plusieurs institutions publiques (ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, Ademe, BRGM, CNRSSP, Ineris) ont intensifié leurs efforts dans cette direction. Elles ont identifié un certain nombre d'axes de recherche où elles peuvent capitaliser réflexion, expérience et innovation. À terme, la mise en place d'une structure permettra de rassembler compétences et moyens au sein de projets communs (mesure et diagnostic des pollutions des sols, comportement et devenir des polluants et leur mode de transferts entre milieux, évaluation des risques vis-à-vis de l'homme et des milieux naturels, techniques de réhabilitation, etc.).

### *Le groupement d'intérêt scientifique Sol urbain du CNRS*

Géré par le centre d'Histoire des techniques du conservatoire national des Arts et Métiers, il s'intéresse aux sols des zones urbanisées, supports de fondations et de plantations (parcs, jardins). De tels sols conservent de façon indélébile la trace des activités humaines dans leurs différentes strates et peuvent contenir des pollutions récentes ou anciennes. Milieux organiques ou sur-consolidés, l'extrême hétérogénéité des sols urbains nécessite d'associer des domaines de recherches variés.

## Perspectives

Aujourd'hui, le sol est de plus en plus souvent placé au cœur des problématiques environnementales en contexte rural ou urbain, et sa qualité devient un enjeu de santé publique important, au travers notamment de la qualité des eaux. L'évolution des législations aux niveaux européen (avec la perspective d'une directive sur les sols) et national devrait avoir pour effet de limiter les pollutions industrielles ponctuelles, et prévenir toute dégradation de la qualité des sols par les épandages des déchets agricoles ou urbains. Il reste cependant à gérer les pollutions du passé, en évaluant leur volume, leur extension, leur toxicité éventuelle et leur évolution possible en fonction des modifications d'autres paramètres environnementaux, économiques ou sociologiques.

La mise en place de programmes de recherche sur les fonctions environnementales des sols et sur les flux de polluants qui les traversent, le renforcement ou le déploiement de réseaux d'observation et d'inventaire à l'échelle locale, nationale ou européenne, la sensibilisation du public et des décideurs aux problèmes du sol sont donc plus que jamais à l'ordre du jour et constituent les enjeux des années à venir. Cet ensemble d'outils devrait permettre de dresser en 2005 un état national des sols. Cette démarche s'inscrit dans la volonté affichée par la communauté des sciences du sol, au congrès international de Montpellier en 1998, de mieux valoriser et diffuser les connaissances accumulées sur les sols. Il reste à mieux faire prendre en compte la composante sol, à tous les échelons territoriaux, dans des débats tels que l'aménagement du territoire ou la santé publique.

Au niveau européen, le sixième programme d'action en matière d'environnement, qui a débuté sous la présidence espagnole au premier trimestre 2002, réaffirme l'importance de la place du sol dans le développement durable. Il préconise en effet le développement d'une stratégie pour la protection des sols contre l'érosion et la pollution, et la mise en œuvre de programmes de recherche permettant de mieux comprendre l'importance du sol dans les changements climatiques. Le 22 janvier 2002, l'Espagne a proposé de créer une politique communautaire visant la protection intégrée de sols. ■

## Glossaire

**Adsorption** : phénomène par lequel un élément chimique se fixe à la surface d'un solide.

**Contamination** : en matière de sols, le terme contamination est employé dans les cas où des apports anthropiques importants ont été constatés, mais sans que l'on observe d'effet apparent pour les êtres vivants ou l'environnement.

**Croûte de battance** : couche lisse et imperméable de 1 cm à 2 cm, formée par dégradation de la structure des horizons de surface du sol sous l'action des pluies.

**Horizon** : couche du sol sensiblement homogène, dont l'épaisseur varie de quelques centimètres à plusieurs décimètres. L'horizon est défini par sa texture, sa structure, son taux de calcaire, sa couleur, par l'abondance et la nature des éléments grossiers... Un sol est en général constitué de plusieurs horizons superposés.

**Éléments traces métalliques (ETM)** : cette expression désigne des métaux présents en faible concentration dans les sols (moins de 0,1 % ou 1 mg/kg pour chacun d'entre eux) : cadmium, césium, cuivre, nickel, plomb, zinc, etc.

**Matière active** (ou substances actives) : molécules constituant la part efficace des pesticides, susceptibles de migrer après libération des produits dans le milieu.

**Matière organique** : ensemble des êtres vivants et des résidus organiques issus de la faune et de la flore, ou apportés par l'homme.

**Site pollué** : site présentant un risque pérenne, réel ou potentiel, pour la santé humaine ou l'environnement du fait d'une pollution de l'un ou l'autre des milieux, résultant de l'activité actuelle ou ancienne.

**Sol** : selon l'Organisation internationale de normalisation (ISO, 1994), le sol correspond à « la couche supérieure de la croûte terrestre, composée de particules minérales, de matière organique, d'eau, d'air et d'organismes vivants (racines, faune, micro-organismes) ».

## Pour en savoir plus...

■ Académie d'Agriculture de France, 1999. *Bilan et gestion des gaz à effet de serre dans l'espace rural*, Comptes-rendus de l'académie d'Agriculture de France, vol. 85, n° 6, juin 1999, pp.1-392.

■ Académie des Sciences, 1998. *Contamination des sols par les éléments en traces : les risques et leur gestion*. Paris, Tec & Doc Lavoisier, 440 p. (coll. *Rapport de l'Académie des Sciences*, 42).

■ Ademe, 2001. *Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture - Dossier documentaire* (21 fiches). Paris, Ademe, 60 p.

■ Barles S., Breyse D., Guillaume A., et coll. , 1999. *Le sol urbain*. Paris, Economica, 278 p. (coll. Villes).

■ BRGM, 2000. *Gestion des sites (potentiellement) pollués*. Orléans, BRGM, 600 p.

■ BRGM, 2000. *Gestion des sites pollués*. Orléans, BRGM, 400 p.

■ Ifen, 1998. *Cartographie de l'aléa « érosion des sols » en France*. Orléans, Ifen, 63 p. (coll. *Études et travaux*, 18).

■ Ifen, 1998. *Le sol, un patrimoine à ménager*. Orléans, Ifen, 4 p. (coll. *Les Données de l'environnement*, 38).

■ Institut de protection et de sûreté nucléaire, 139. *Le césium-137 : de l'environnement à l'homme*. Fontenay-aux-Roses, IPSN, 288 p.

■ Stengel P., Gelin S., 1998. *Sol : interface fragile*. Paris, Inra, 214 p.

■ Walter C., Schwartz C., Claudot B., et coll. , 1998. *Synthèse nationale des analyses de terre : périodes 1990 et 1994*. Rennes, Association française pour l'étude des sols, 90 p.

### Sites Internet

■ Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) : [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

■ Institut national de la recherche agronomique (Inra) : [www.inra.fr](http://www.inra.fr)

Voir aussi : Inventaire Gestion Conservatoire des Sols (IGCS) : <http://websol.orleans.inra.fr/fr/igcs.htm>

■ Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement (DPPR, base de données Basol) : [www.basol.environnement.gouv.fr](http://www.basol.environnement.gouv.fr)

■ Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN) : [www.ipsn.fr](http://www.ipsn.fr)