

# 4

## Les sols



C. Couvert - Graphies

regard des sol

À la notion familière de sol, certains scientifiques préfèrent le terme de couverture pédologique. Les couvertures pédologiques, issues de matériaux et roches diverses, se distinguent de ces matériaux originels par leur structuration spécifique en agrégats, leurs transformations géochimiques et minéralogiques et la présence en leur sein de matière organique et d'organismes vivants.

Depuis des millénaires, les hommes ont exploité les sols sans vraiment les connaître. Leur étude scientifique, la pédologie, a un peu plus de cent ans. Aujourd'hui, cette ressource doit être gérée en prenant en compte sa fonction traditionnelle de support, de réservoir et d'alimentation en eau et en éléments minéraux pour les plantes, mais aussi son rôle, primordial pour l'environnement, de filtre épurateur (plus ou moins efficace) des éléments polluants. Les sols tiennent en effet une place majeure dans les grands cycles biogéochimiques, notamment dans celui de l'eau douce (en quantité et qualité). Tout usage des sols pour assurer une production agricole ou forestière entraîne inmanquablement une modification de ces cycles. Or, le sol étant une ressource non renouvelable à l'échelle humaine, un usage intensif peut provoquer des déséquilibres irréversibles.

## Les sols français

Les sols que nous observons aujourd'hui résultent de l'altération des matériaux de l'écorce terrestre par l'action conjuguée des climats successifs et des activités biologiques et humaines. A l'échelle nationale, ils présentent une grande diversité dans laquelle le contexte géologique joue un rôle primordial. C'est pourquoi on distingue d'abord les massifs anciens (Ardennes, Massif armoricain, Massif central et Vosges), les chaînes récentes (Pyrénées, Alpes) et les grands bassins sédimentaires (bassins de Paris, d'Aquitaine et du Rhône). C'est au sein de ces unités que se différencient les principaux systèmes pédologiques.

Les **sols sur roches calcaires** (postes 1, 2 et 3) sont caractéristiques de nombreuses surfaces cultivées en régions crayeuses (Champagne), marneuses (Argonne, Woëvre), sur les calcaires durs des auréoles jurassiques des bassins sédimentaires (Bourgogne, Berry, Jura, Poitou), ainsi

que dans la région provençale. Par leur origine et leur constitution, ils sont parmi les moins sensibles à l'acidification. Selon leur granulométrie et leur structuration, ils peuvent être relativement perméables et les risques de pollution des nappes sont à contrôler.

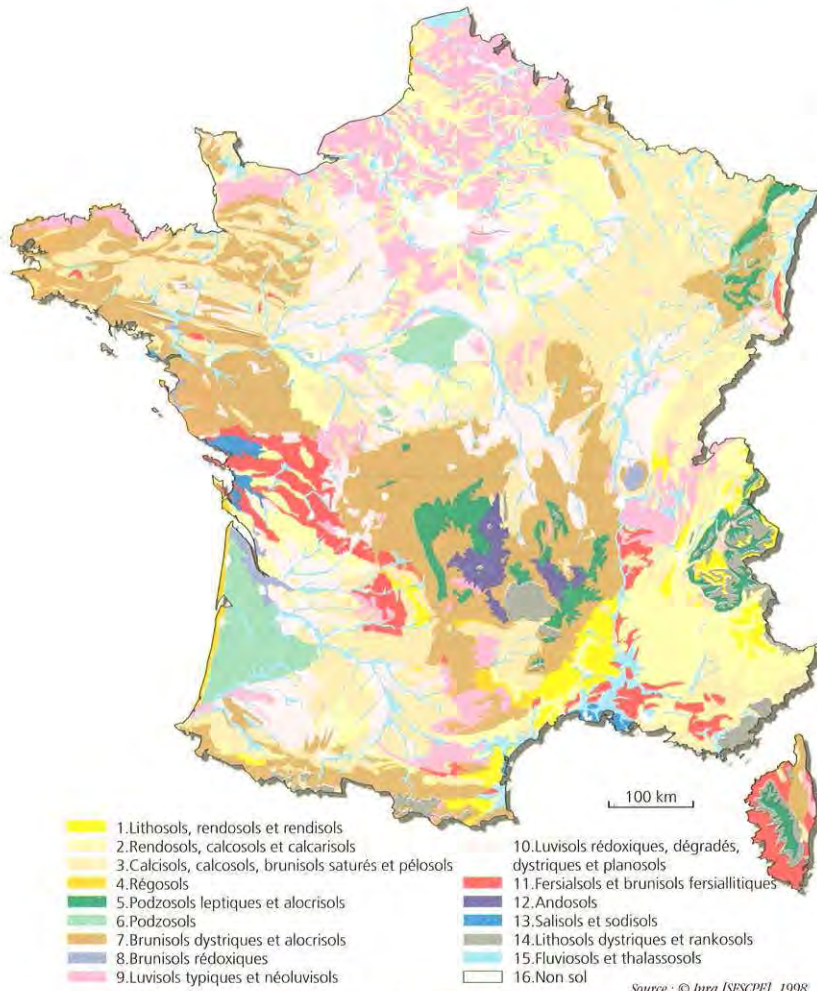
En fonction des matériaux originels, la **pédogénèse\* des sols sableux** (postes 4, 5 et 6) peut être plus ou moins rapide et intense, conduisant à différents types de sols. On les rencontre en Sologne et dans les Landes, mais aussi dans les massifs collinaires et montagneux (Vosges, Massif central, Alpes, Pyrénées). Les sols sableux ont en commun de présenter une faible capacité de fixation des éléments chimiques, ce qui les rend particulièrement sensibles à l'acidification et des propriétés d'infiltration rapide qui entraînent des risques de pollution des nappes en profondeur.

Les **sols d'altération** (postes 7 et 8) correspondent à une altération ménagée, sous les climats tempérés humides, des minéraux primaires de différentes roches mères. Une libération modérée d'oxydes de fer, ainsi que la présence d'une fraction argileuse et de matières organiques humifiées confère au sol une teinte brune caractéristique et une bonne aération. Fréquemment pauvres et peu saturés dans les massifs anciens, ils sont alors particulièrement exposés aux pollutions atmosphériques et à l'acidification. On les trouve largement répartis sur le territoire. Ils sont notamment caractéristiques de la couverture pédologique des massifs anciens : Vosges, Bretagne et Massif central.

D'une manière générale, les **sols issus des formations limoneuses** (postes 9 et 10) ont une forte capacité de rétention en eau et en éléments chimiques, et jouent donc le plus souvent un rôle de filtre épurateur satisfaisant. Ils sont cependant particulièrement sensibles à la dégradation physique, et tout particulièrement aux phénomènes d'érosion. Ces phénomènes sont mis en évidence dans la mesure où les sols limoneux, recherchés par l'agriculture, sont typiques des cultures intensives. Cet ensemble caractérise essentiellement les deux grands bassins sédimentaires de Paris et d'Aquitaine, ainsi que la partie amont du Bassin rhodanien.

Outre les **sols argileux** issus de l'altération de roches calcaires (poste 3), il existe également des sols à teneur en argile élevée développés





Les sols

Source : © Inra [SESCPE], 1998.

dans des matériaux sédimentaires. Leur capacité de rétention en eau et en éléments chimiques est généralement élevée, et la protection des nappes y est donc le plus souvent satisfaisante.

D'autres types de sols, moins fréquents en France, sont liés à des processus de formation plus spécifiques. On trouve en bordure du Bassin rhodanien, en Corse, mais aussi en aurole du Bassin aquitain, des fersialsols 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 salisols et sodisols (poste 13) sont issus de processus de salinisation ou de sodisation. Ils caractérisent essentiellement les zones à influence maritime comme les marais de l'Ouest et la Camargue. Enfin, les derniers postes représentés sur la carte sont les sols bruts (poste 14), observés au contact d'une roche peu altérée (essentiellement en altitude) et l'ensemble des

formations alluviales, de texture variable en fonction du contexte régional (poste 15).

## Les pressions sur les sols

### La destruction

Le territoire français est composé de 56,2 % de terres agricoles, 27,8 % de surfaces boisées, 7,9 % de surfaces sans usage ou destinées à la protection des milieux naturels et enfin 8,1 % de milieux artificialisés (Scees). Les tendances actuelles mettent en évidence un rythme d'artificialisation de près de 40 000 ha par an. Cette destruction totale et irréversible au profit des routes ou voies ferrées, de l'implantation de nouvelles usines ou aéroports et de l'extension de l'urbanisation constitue la principale menace pesant sur les sols français.

### L'érosion

L'érosion constitue un risque important pour les espaces agricoles et les zones situées à proximité. Elle provoque pertes en terre, coulées de boue, turbidité et pollution des eaux. Au-delà de l'érosion bien connue, qui existe en montagne et dans les vignobles de coteaux, des phénomènes érosifs ont été mis en évidence plus récemment dans les régions de grande culture où de vastes parcelles agricoles sont imperméabilisées par la battance\* et le tassement des sols. Ce phénomène nouveau résulte de l'interaction entre de nombreux paramètres. Certains sont



Source : M. Robert, in Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour l'environnement, Masson, 1996.





## **Les moyens d'observation et d'étude des sols**

### **Les programmes de cartographie des sols**

Différents programmes d'inventaire des sols sont menés en France depuis plus de trente ans. Leur objectif est à la fois de délimiter dans l'espace les différents types de sols et d'en fournir une description détaillée. Le principal programme est conduit par le Service d'étude des sols et de la carte pédologique de France (SESCPF) de l'Inra qui procède à l'élaboration et à la publication de cartes pédologiques au 1/100 000. Fin 1997, 24 feuilles étaient publiées (représentant 8,6 % de la surface du pays) et 20 feuilles supplémentaires étaient en préparation (soit 6,6 % du territoire).

D'autres institutions mènent des programmes de cartographie des sols à des échelles plus détaillées : au 1/25 000 (département de l'Aisne - superficie complète) et 1/50 000 (départements du Cher, de l'Indre, de l'Indre-et-Loire, de la Vienne, de l'Yonne).

Depuis 1990, le programme Inventaire, gestion et conservation des sols (IGCS - ministère de l'Agriculture et Inra) incite à la réalisation coordonnée de banques de données régionales impliquant des synthèses cartographiques au 1/250 000. Des synthèses cartographiques sont déjà accessibles au public pour les deux régions Languedoc-Roussillon et Île-de-France, et plusieurs départements : Côte-d'Or, Oise, Mayenne et Yonne.

Enfin, une synthèse du territoire français à l'échelle graphique du 1/1 000 000 a été réalisée dans un cadre européen. Elle est disponible auprès du SESCOF à Orléans.

### **L'Observatoire de la qualité des sols (OQS)**

Créé en 1984 par le ministère de l'Environnement, cet observatoire étudie l'effet à long terme des pratiques agricoles courantes sur la qualité des sols. Il repose sur un réseau de sites d'observations d'environ un hectare, choisis pour leur représentativité, et sur lesquels sont étudiés tous les cinq ans environ l'évolution des propriétés physico-chimiques de sept éléments traces\* métalliques et de quelques radioéléments.

### **Le programme Renecofor**

Le Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers a été créé par l'ONF en 1992 afin de compléter le système de surveillance sanitaire des forêts. Il constitue la partie française d'un ensemble de placettes permanentes installées dans trente-quatre pays européens. Renecofor couvre des opérations et des domaines très variés. Le réseau prévoit la description de deux profils de sol

par placette et un suivi de la fertilité. Dans le cadre du sous-réseau Cataenat (Charge acide totale d'origine atmosphérique dans les écosystèmes naturels terrestres), les dépôts atmosphériques sont mesurés dans 27 placettes depuis 1993, et des mesures sont effectuées sur les solutions de sol à 20 et à 70 cm de profondeur dans 17 placettes.

### **Le programme Inra - Aspitet**

L'Inra a lancé en 1994 un programme de recherche intitulé Apports d'une stratification pédologique pour l'interprétation des teneurs en éléments traces (Aspitet) dont l'objectif principal était d'acquies des références sérieuses sur les concentrations naturelles en éléments traces dans les sols. Ce travail a été réalisé en tenant le plus grand compte des types de sols et des matériaux géologiques parentaux, en privilégiant les sites forestiers, supposés pratiquement indemnes d'apports d'origine humaine, et en analysant l'ensemble des horizons\* constituant les sols (pas seulement la couche de surface).

### **La synthèse nationale des analyses de terre**

A la demande du ministère de l'Agriculture, une base de données cantonale a été construite par traitement statistique des résultats d'analyse correspondant à 297 000 échantillons d'horizons de surface de sols cultivés, prélevés sur une période de cinq ans. Plusieurs paramètres agronomiques usuels ont été pris en compte (granulométrie, pH, matières organiques, calcaire, capacité d'échange cationique, phosphore extractible, oligo-éléments\*). Leur distribution a pu être décrite pour environ 2 000 cantons suffisamment renseignés (plus de dix analyses) sur les 3 511 existants.

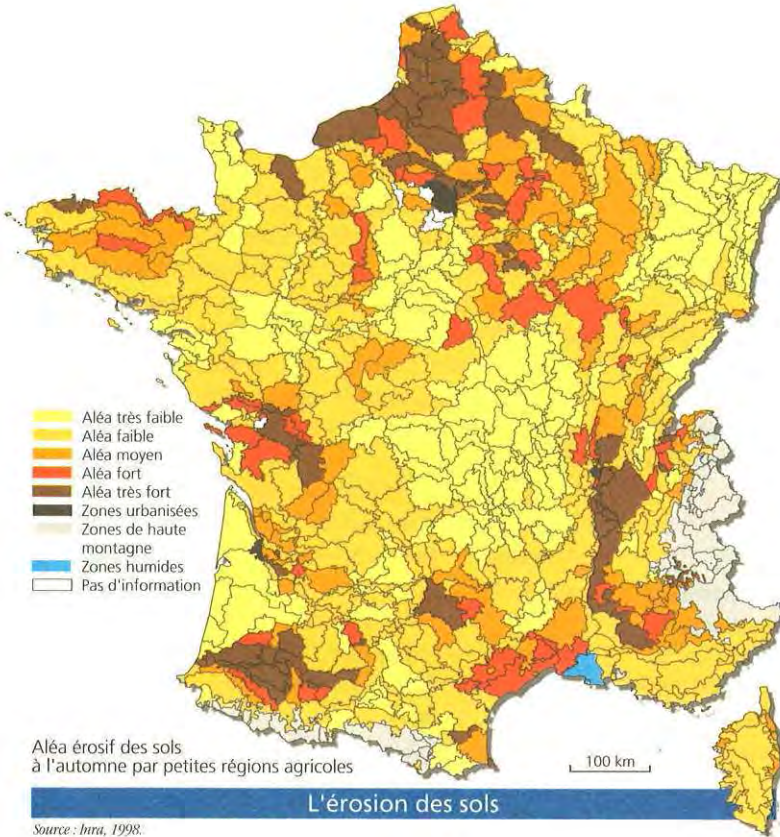
### **Le programme Ademe - Inra**

De très nombreuses analyses de métaux lourds\* ont été réalisées dans les sols à l'occasion des plans d'épandage de boues de stations d'épuration. L'exploitation statistique de ces analyses, commencée en 1997 et dont la fin est prévue au quatrième trimestre 1998, permet de se faire une bonne idée de la qualité générale des sols agricoles français et de faire apparaître des zones d'anomalies naturelles ou des cas de pollutions localisées.

### **Le programme Gessol (évaluation des fonctions environnementales des sols et gestion durable du patrimoine sol)**

Ce programme a été lancé au cours de l'année 1998 par le ministère de l'Environnement. Il vise à compléter les connaissances sur le rôle du sol dans l'environnement et sur les mécanismes de dégradation de sa qualité.

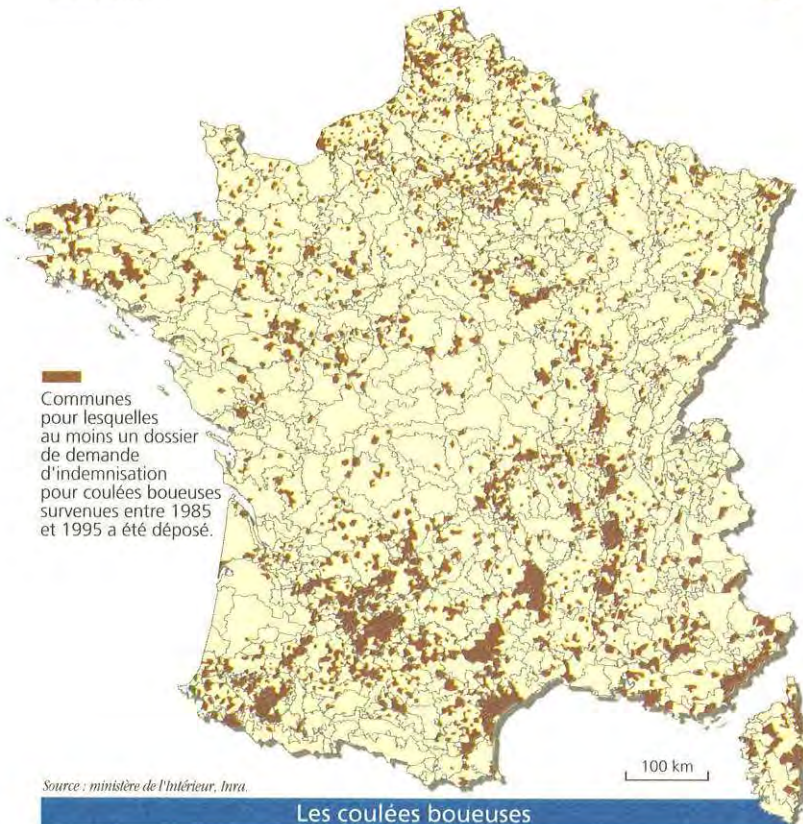




permanents, liés au sol ou à la topographie, d'autres varient dans le temps, comme l'occupation du sol ou les précipitations. Ces principaux paramètres explicatifs ont été combinés dans un modèle afin de cartographier l'aléa érosif et son intensité pour chaque saison à l'échelle de la France. Les résultats sont représentés par petites régions agricoles dont les contours sont déterminés par les pratiques agricoles prédominantes.

Les régions les plus fortement touchées par l'aléa érosif, en toutes saisons, sont le nord-ouest et l'est du Bassin parisien, qui sont des zones de grande culture sur des sols sensibles à la battance, ainsi que la vallée du Rhône et le Sud-Ouest, régions dans lesquelles se combinent des cultures de printemps et des vignobles. Le pourtour méditerranéen, la Bourgogne, le Poitou-Charentes, le sud du Massif central et la Bretagne sont des régions où le risque d'érosion est modéré ou n'existe que pour certaines saisons seulement.

Un inventaire des coulées boueuses basé sur les dossiers de demande d'indemnisation pour catastrophe naturelle a été dressé pour la période 1985-1995. Les coulées boueuses causent deux types de dégâts : en amont, elles emportent le sol agricole et à l'arrivée, elles submergent les cultures, les infrastructures (réseaux de transports), voire les zones d'habitation, causant parfois, bien que rarement sur le territoire français, des pertes en vies humaines.





Cet inventaire est officiellement la seule source d'information sur les coulées boueuses, mais les informations souvent trop vagues contenues dans les dossiers de demande d'indemnisation ne permettent pas de pousser très loin l'analyse du phénomène. La synthèse obtenue reflète surtout l'efficacité de la diffusion de l'information sur la procédure de demande d'indemnisation.

Dans l'état actuel des systèmes d'information sur le sol et des connaissances sur les processus d'érosion, il n'est pas possible de corrélérer de façon fiable les modèles cartographiques de l'aléa d'érosion et les cartes de répartition des coulées boueuses.

### Le tassement

La mécanisation de l'agriculture moderne et l'utilisation de matériels de culture et de récolte de plus en plus lourds ont contribué à accentuer les problèmes de tassement. Ce phénomène provoque une diminution de la porosité. Les pores de grande taille, permettant une bonne aération du sol et la circulation rapide de l'eau, disparaissent. Cela entraîne

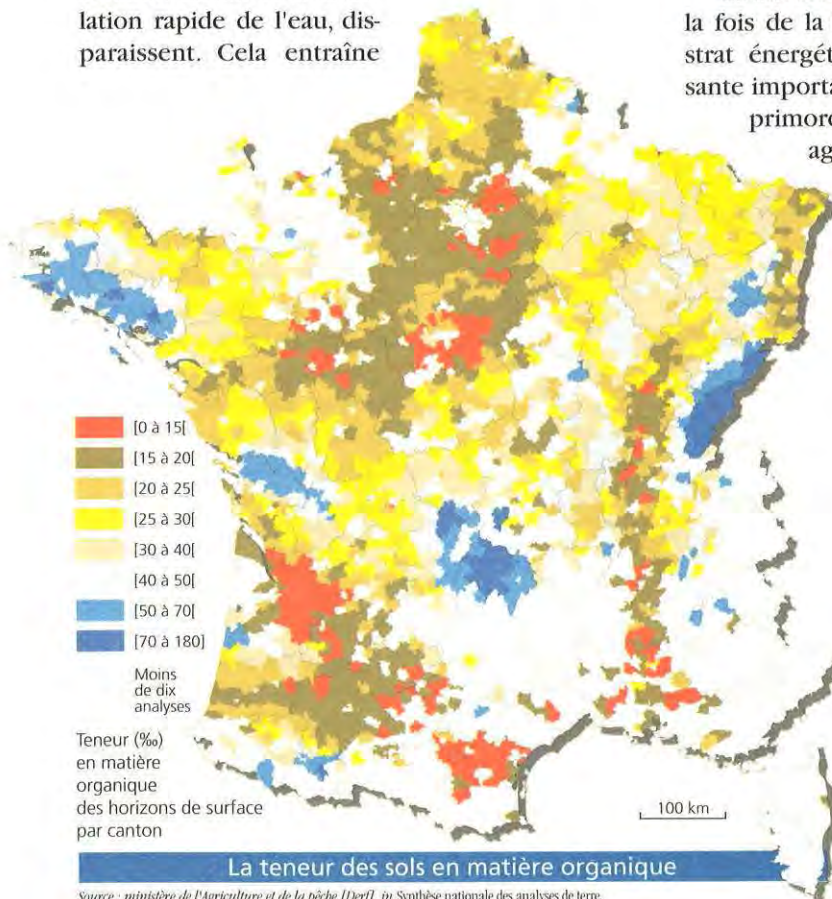
un déficit d'oxygène, une stagnation de l'eau et des risques d'asphyxie pour les organes souterrains des plantes. L'ensemble de l'activité biologique du sol peut être affectée. La diminution de la porosité augmente la résistance à la rupture : les racines pénètrent plus difficilement les volumes de sols tassés. Les ressources en eau de ces volumes ainsi que les ressources minérales et organiques ne sont plus alors que partiellement accessibles. La sensibilité des sols au tassement varie en fonction de leur composition granulométrique mais aussi de leur humidité ; le climat joue donc un rôle important dans le phénomène.

Il est aujourd'hui impossible d'évaluer l'importance des surfaces de sols ainsi dégradés. Néanmoins, les agronomes s'intéressent de plus en plus à l'état structural des couches travaillées, et réfléchissent à des itinéraires techniques et des systèmes de cultures adaptés, pour mieux maîtriser ce phénomène.

### La baisse des taux de matière organique

La matière organique du sol est constituée à la fois de la biomasse microbienne et du substrat énergétique de cette biomasse. Composante importante de la fertilité, elle joue un rôle primordial dans les écosystèmes et les agrosystèmes. Elle occupe également des fonctions environnementales de premier plan. En intervenant dans la stabilité structurale des couches de surface et la rétention des polluants organiques ou métalliques, elle intervient dans les cycles de l'azote et du carbone (absorption du CO<sub>2</sub> atmosphérique).

Plusieurs études locales montrent une baisse significative des taux de matière organique des sols cultivés au cours des dernières décennies. L'intensification du travail du sol, l'irrigation, la diminution des surfaces fourragères pérennes au profit des fourrages annuels ou de céréales, et l'accélération de la rotation de l'usage des terres semblent être les principales explications des baisses



Source : ministère de l'Agriculture et de la pêche [Derf], in Synthèse nationale des analyses de terre.



observées. En milieu forestier, en revanche, il n'a pas été observé de baisse significative. La reforestation des terres agricoles peut d'ailleurs aider au maintien du stock global en carbone organique des sols. A l'opposé, la jachère nue, pratiquée pendant quelques années après la réforme de la PAC de 1992, a probablement contribué à abaisser significativement les réserves. Les durées et la faible réversibilité d'évolution des processus (il faut plus de cent ans pour qu'un sol gagne la quantité de carbone qu'il est susceptible de perdre en trente ans de culture intensive) doivent pourtant faire considérer les matières organiques du sol comme un véritable patrimoine.

La carte ci-contre résulte du traitement de 275 000 déterminations de carbone organique effectuées lors d'analyses de terre durant la période 1990-1994. Les régions de culture intensive comme la Beauce, la Brie, l'Aquitaine ou le Roussillon présentent des teneurs relativement basses, traduisant l'épuisement des sols, tandis que les zones d'agriculture traditionnelle (Massif central) présentent des teneurs élevées. Le pouvoir plus ou moins stabilisateur des sols (taux d'argile, en particulier) et le gradient climatique jouent également un rôle.



C. Couvert - Graphies

La quantité d'organismes varie considérablement d'un type de sol à un autre. Leur diversité et leur importance dépasse de très loin ce que l'on peut imaginer. On estime que les seules bactéries représentent plus de dix millions d'individus par gramme de sol. Sur une épaisseur de trente centimètres, un hectare de sol recèle en moyenne vingt-cinq tonnes d'organismes, dont dix tonnes de bactéries, dix tonnes de champignons, quatre tonnes de vers de terre et une tonne d'organismes divers. De telles estimations correspondent le plus souvent à des valeurs par défaut, car il est encore impossible de dresser un inventaire exhaustif des populations de micro-organismes du sol. Proportionnellement à leur masse, ces micro-organismes possèdent une activité considérablement plus élevée que celle des organismes supérieurs. Ils sont capables d'effectuer des transformations biochimiques extrêmement variées.

Les impacts potentiels des actions anthropiques sur ces populations sont multiples. La diminution des teneurs en matières organiques ou l'enrichissement en phosphore peuvent induire un effet biologique d'appauvrissement quantitatif et qualitatif de certaines populations. Par ailleurs, les effets biologiques des pesticides ne sont pas toujours très bien maîtrisés, même si des progrès ont été réalisés. Enfin, la contamination\* par certains métaux lourds semble avoir des effets quasi irréversibles sur la qualité biologique des sols.

De nombreuses questions restent soulevées sur la biodiversité et sur son rôle dans le fonctionnement et la stabilité des écosystèmes. Les études biologiques sont particulièrement utiles pour tenter d'évaluer les effets des facteurs anthropiques sur la qualité des sols et pour aider à choisir les itinéraires techniques qui seront capables de la conserver.



C. Couvert - Graphies

### La diminution de la qualité biologique

La qualité biologique d'un sol se définit par l'abondance, la diversité et l'activité des organismes vivants. Cette qualité s'exprime au travers de la fertilité de ce sol et de son état sanitaire. Toutefois, il n'y a pas aujourd'hui de véritable consensus autour du concept de qualité biologique des sols et les outils de mesure ne sont pas standardisés. Les références pour l'interprétation font encore cruellement défaut.





## L'acidification

La pollution atmosphérique par le  $\text{SO}_2$ , les  $\text{NO}_x$ , le  $\text{NH}_3$  et le  $\text{HCl}$  génère des acides susceptibles de se redéposer au sol, à plusieurs centaines de kilomètres, parfois, des sources d'émission. Si les sols à tendance naturelle acide sont assez fréquents en France (environ 26 % des sols français), l'augmentation de l'acidité due aux activités humaines peut modifier les équilibres chimiques et biologiques et affecter gravement les écosystèmes.

Sous l'effet des dépôts acides, le calcium, le magnésium, le potassium, le sodium mais aussi l'aluminium (phytotoxique aigu) contenus dans les sols sous forme ionique sont libérés, ce qui contribue à leur lessivage, et, par suite, à l'appauvrissement chimique et à l'affaiblissement de la structure des sols. Ces modifications de la composition chimique des sols peuvent déclencher des phénomènes de carences minérales souvent incriminés dans le dépérissement forestier (défoliation et jaunissement des feuilles). Par ailleurs, dans les cas d'acidification extrême, des quantités importantes d'éléments chimiques libérés peuvent être drainés vers les cours d'eau et les lacs et sont susceptibles d'entraîner de profondes modifications de la faune, allant jusqu'à la disparition de groupes d'invertébrés et de salmonidés.

De nombreux efforts ont été réalisés, depuis le début des années quatre-vingts afin de limiter les émissions des gaz responsables de l'acidification. Parallèlement, des réseaux de mesure performants ont été développés à l'échelle européenne et nationale afin de disposer d'une meilleure évaluation du phénomène. Le concept de charge critique (pollution maximale admissible pour la protection d'un écosystème) a été développé dans cette optique.

La France, du fait de sa position géographique - les vents dominants orientés ouest-est la placent à l'abri des émissions en provenance d'Europe centrale, en particulier -, est un des pays d'Europe les moins touchés par la pollution acide. Des pluies acides sont cependant parfois constatées dans l'Est.



## Le coût des analyses de sols

Les prix sont variables suivant les laboratoires. Les fourchettes fournies ici constituent des ordres de grandeur.

### Analyses agronomiques

Elles permettent de caractériser l'état instantané de fertilité de l'horizon de surface labouré d'une parcelle agricole afin de gérer au mieux sa fertilisation :

- carbone organique, capacité d'échange cationique, cations échangeables, calcaire, pH, azote total, phosphore assimilable :
  - 200 à 300 francs par échantillon,
  - 230 000 analyses environ sont réalisées chaque année en France ;
- oligo-éléments (bore, cuivre, zinc, manganèse) :
  - 120 à 150 francs supplémentaires par échantillon,
  - 70 000 analyses environ sont réalisées chaque année en France.

### Analyses de caractérisation pédologique d'un horizon

Elles permettent de caractériser les horizons par leurs propriétés permanentes (granulométrie, teneurs en calcaire, teneurs en fer) et leurs propriétés plus variables (pH, état de saturation du complexe d'échange, carbone organique) :

- 300 à 400 francs par horizon, à multiplier par 2 à 5 pour un sol, selon l'épaisseur totale de ce sol et du nombre d'horizons, soit 600 à 2 000 francs.

### Analyses des métaux lourds

Elles servent à quantifier le stock total de chaque élément trace dans l'échantillon :

- cadmium, cuivre, chrome, mercure, nickel, plomb, sélénium, zinc,...
- 700 à 1 000 francs par échantillon.
- 2 000 analyses seraient réalisées chaque année en France, pour préparer des plans d'épandage de boues d'épuration dans le cadre de la réglementation.

### Analyses des pesticides

- Atrazine, isoproturon, diuron, lindane, dieldrine, endrine, aldrine, heptachlore, DDT, alachlore, simazine, etc.
- 350 à 600 francs par molécule et par échantillon.



## La salinisation

Le phénomène de **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. Elle est 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, etc.). 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 est liée à différentes actions anthropiques, en particulier l'irrigation. Elle ne concerne pas de superficies significatives en France, où les eaux d'irrigation sont en général très peu minéralisées.

La **sodisation**, autre aspect du phénomène, correspond à la fixation de sodium sur les minéraux argileux du sol. Ce processus peut conduire à une dégradation des propriétés physiques des sols concernés, surtout s'ils sont de texture lourde. Il faut alors traiter les sols par des apports de calcium aisément solubilisable, de gypse en particulier. Ce phénomène concerne en France les anciens sols salés de bord de mer, qui ont été dessalés par l'action du climat ou de l'homme. De nombreux sols sont concernés dans l'ensemble des marais de l'Ouest (marais bretons, nantais, vendéen, charentais). On observe depuis peu, très localement, une autre forme de sodisation, liée à l'épandage sur les terrains agricoles d'effluents liquides riches en sodium, comme les effluents de laiterie.

L'ensemble des superficies de sols concernés par l'un ou l'autre des deux processus, salinisation et sodisation, représente moins de 100 000 hectares en France.

## La pollution par les pesticides

En 1995, la production française de pesticides était de 84 000 tonnes de matières actives (UIPP) dont une majorité de fongicides (50,7 %), suivie par les herbicides (32,6 %) et par les insecticides (8,4 %) et autres produits. Lors du traitement effectué par l'agriculteur, une partie seulement du produit atteint sa cible (parties aérienne ou souterraine des végétaux, ravageurs des plantes cultivées, etc.). Les quantités

résiduelles atteignent le sol et s'y fixent, ou sont dégradées par la biomasse. L'aptitude à fixer et dégrader les pesticides varie suivant les sols et les caractéristiques des molécules actives. Le phénomène d'adsorption\* est en outre en partie réversible, ce qui peut entraîner un relargage des pesticides longtemps après un traitement. C'est le cas par exemple pour l'atrazine (herbicide du maïs) et ses métabolites que l'on retrouve plus de dix ans après une culture de maïs. Les molécules qui quittent le sol sont entraînées à sa surface par les eaux de ruissellement (pollution des eaux de surface) ou en profondeur par les eaux d'infiltration (pollution des nappes phréatiques).

L'entraînement des matières actives dépend de l'état structural de la surface du sol (battance, existence de croûtes superficielles) et de l'abondance des pluies qui suivent le traitement. Des pluies arrivant juste après un apport et sur un sol battu vont en partie ruisseler et peuvent entraîner jusqu'à 20 % ou 30 % de la dose apportée. La sensibilité des sols à ce type de phénomène est directement liée à leur capacité à demeurer perméables, même sous l'action de pluies répétées. Ainsi, de forts ruissellements sont souvent observés à la fin de l'hiver et au printemps (périodes de fortes précipitations) dans les zones de sols limoneux, peu perméables, du nord de la France (nord du Bassin parisien, pays de Caux, etc.), qui sont aussi des zones de cultures intensives. On constate également ce phénomène, (de façon plus indépendante de la nature du sol et de la période de l'année) dans le Sud de la France où l'intensité des pluies peut être forte. Les pentes (culture de la vigne) constituent en outre un facteur aggravant. Afin de limiter l'entraînement des pesticides dans les eaux de ruissellement, les codes de bonne pratique conseillent aux agriculteurs d'éviter les traitements lorsqu'un épisode pluvieux est prévu.





L'entraînement des matières actives en profondeur est moins intense mais plus continu. Les quantités qui s'infiltrent ne correspondent qu'à environ 1 % de la dose apportée, mais sont 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 qui la rendent impropre à la consommation humaine (valeur limite de 0,1 µg/l par matière active). Quelles que soient leurs caractéristiques, 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 substrats 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 matières actives sont plus aboutis.

### La pollution par les nitrates et phosphates

L'eutrophisation des eaux superficielles (lacs, rivières) est un phénomène préoccupant. Elle résulte pour partie d'apports excessifs de phosphore et d'azote d'origine agricole. Ces deux éléments, essentiels pour la croissance des plantes, sont épandus en quantités importantes sur les sols cultivés. L'excédent, c'est-à-dire la différence entre les apports et les quantités prélevées par les plantes, peut s'infiltrer à travers le sol jusqu'aux eaux souterraines (cas des nitrates) ou bien ruisseler sous forme dissoute ou adsorbée sur des particules de sol et



### L'épandage agricole des boues d'épuration

L'épandage agricole des boues d'épuration constitue un mode de valorisation de ces déchets, qui consiste à les utiliser comme matières fertilisantes. Les initiatives de valorisation sont a priori positives, mais la question de la dissémination dans l'environnement de substances potentiellement polluantes se pose de plus en plus alors que les tonnages de boues épandues augmentent. En effet, l'application des directives européennes sur l'assainissement devrait amener d'ici dix ans la production française de boues d'épuration à 1,5 million de tonnes de matière sèche environ. Or la loi sur les déchets de 1992 prévoit l'interdiction de leur mise en décharge à partir de 2002, ce qui accroît l'intérêt de l'épandage, solution quatre à six fois moins coûteuse que l'incinération. Certes, ces boues ont des qualités fertilisantes, mais elles peuvent également contenir des métaux traces à des teneurs importantes, en particulier lorsqu'elles proviennent des stations d'épuration des grandes agglomérations ou de villes industrielles.

Les sols jouent-ils un rôle d'immobilisation des métaux ? Observe-t-on un transfert dans les plantes, puis les animaux, donc dans notre chaîne alimentaire (biodisponibilité) ? Ou une migration rapide (mobilité) vers les nappes phréatiques profondes ou vers les cours d'eau ? Quel est l'impact de ces métaux lourds sur les bactéries, champignons et toute la microfaune des sols, dont l'importance majeure sur le fonctionnement et la fertilité est

désormais reconnue ? Un effet « bombe à retardement » (relargage des métaux précédemment accumulés sous l'influence d'un changement environnemental majeur, comme l'augmentation d'acidité des pluies) est-il à redouter à moyen ou long terme ?

Actuellement, il n'y a pas de réponses claires et universelles à ces questions, et pour certains experts, le respect de la réglementation n'est pas une garantie, même si le décret du 8 décembre 1997 et son arrêté du 8 janvier 1998 vont dans le sens d'un renforcement des normes (les valeurs limites autorisées pour la teneur en métaux dans les boues ont été divisées par deux par rapport à la norme NF U 44-041). La teneur totale permet d'évaluer le stock d'un métal à un moment donné mais ne donne aucun renseignement sur la mobilité de cet élément dans le sol, ni sur sa biodisponibilité vis-à-vis des organismes vivants (plantes, animaux, micro-organismes).

Des études approfondies sont donc indispensables pour déterminer l'origine des métaux (naturelle ou résultant de contaminations), préciser leurs formes chimiques (plus ou moins réactives) et leur mode d'association aux phases organiques ou minérales. Le dosage direct des métaux effectivement absorbés dans les organes comestibles des plantes cultivées et le développement de tests biologiques pour savoir si ces plantes voient ou non leur physiologie perturbée par la présence de métaux dans les sols constituent des pistes de recherche prometteuses.



16

venir contaminer les cours d'eau superficiels. On estime ainsi à 9 % la part de l'azote incorporé dans les sols agricoles qui n'est pas utilisée par les cultures (Scées).

Dans le cas des composés azotés, la nature du sol et celle du sous-sol géologique jouent un rôle essentiel. La texture des différents horizons et leur épaisseur totale déterminent une capacité de rétention plus ou moins grande. Les situations les plus vulnérables sont celles où le sol est

mince (moins de 40 cm) et/ou très filtrant (textures sableuses) et où le matériau géologique sous-jacent est perméable (roches filtrantes ou largement fissurées).

Pour le phosphore, c'est la stabilité de la structure des horizons de surface, et donc la vulnérabilité du sol vis à vis de l'érosion superficielle, qui constitue le critère déterminant.



### Métaux lourds dans les sols : les normes en vigueur à l'étranger

Il existe dans les différents pays d'Europe et sur le continent nord-américain des valeurs-limites indicatives ou contraignantes relatives aux métaux lourds dans les sols. Elles ont souvent été définies pour limiter les épandages de boues d'épuration. Les pays scandinaves, et notamment la Suède, ont fixé des seuils très bas. C'est en grande partie parce que les sols de ces pays, acides et développés à partir de roches cristallines, sont pauvres en argile, en fer et donc en métaux lourds. S'ils étaient appliqués en France, de tels seuils seraient susceptibles d'interdire tout épandage de boues d'épuration dans plus de 90 % de nos sols.

	Cd	Cr	Co	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
France	2	150	-	100	1	50	100	10	300
Communauté européenne	3	200	-	140*	1,5	75*	300	-	300*
Canada	3	750	40	150	0,8	150	375	2	600
Grande Bretagne	3	400	-	135	1	75	300	3	300
Pays Bas (A)	0,8	100	20	36	0,3	35	85	-	140
Pays Bas (C)	20	800	300	500	10	500	600	-	3000
Pays Bas (N)	12	380	240	190	10	210	530	-	720
Suède	0,4	30	-	40	0,3	30	40	-	75
Suisse	0,8	75	25	50	0,8	50	50	-	200

En mg/kg de matière sèche (Cd : cadmium, Cr : chrome, Co : cobalt, Cu : cuivre, Hg : mercure, Ni : nickel, Pb : plomb, Se : sélénium, Zn : zinc).

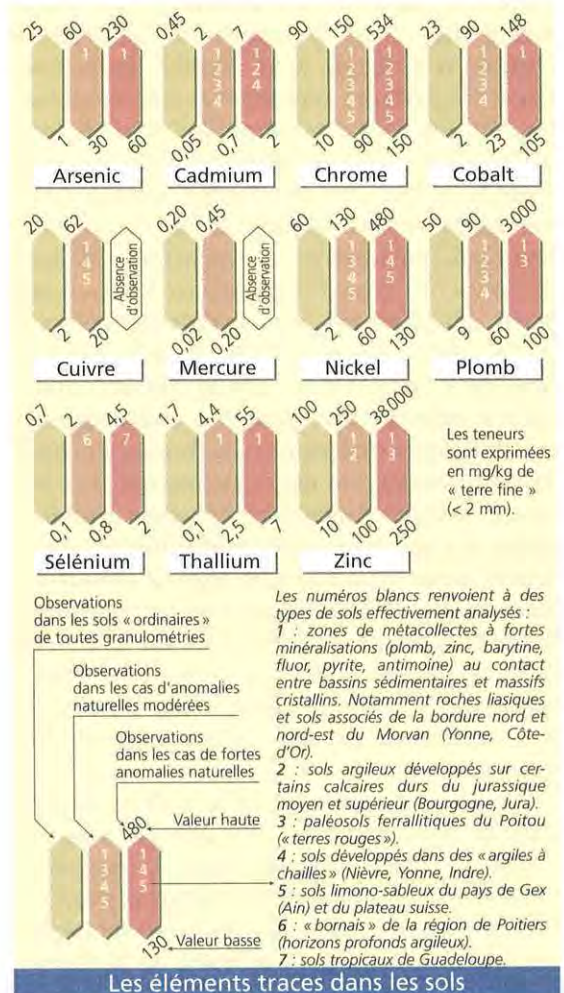
- France : norme AFNOR U 44-041 (1985) - Teneurs limites des sols récepteurs pour l'épandage de boues d'épuration - pH du sol inférieur à 6,0.
- Communauté européenne : directive européenne n°86/278 CEE (1986) - Valeurs maximales pour l'épandage de boues. Les valeurs notées « \* » peuvent être augmentées de 50% si le pH du sol est supérieur à 7.
- Canada : Interim remediation criteria for agricultural land (CCME, 1991).
- Grande Bretagne : exemple pour les terres labourables ayant un pH compris entre 6 et 7 (1989).
- Pays Bas : valeur de référence A, risque considéré comme négligeable (1987).
- Pays Bas : valeur d'intervention C, décontamination urgente nécessaire (1987).
- Pays Bas : proposition pour une nouvelle valeur d'intervention C (1993), risque jugé intolérable, décontamination obligatoire.
- Suède : teneurs limites des sols récepteurs de boues d'épuration.
- Suisse : valeurs indicatives de l'ordonnance OSOL (1987) - Mise en solution par HNO<sub>3</sub> 2N.

### Normes de contamination des éléments traces

Source : Inra.

### La contamination par les métaux lourds

Les teneurs en métaux lourds mesurées dans les sols résultent d'abord de processus naturels : composition chimique initiale héritée de la roche mère, plus ou moins modifiée par l'évolution pédologique. Elles sont très variables d'un point à un autre du territoire. Ces teneurs naturelles ont cependant été parfois modifiées par des apports directs ou indirects liés aux activités humaines : épandages d'engrais phosphatés (cadmium) et



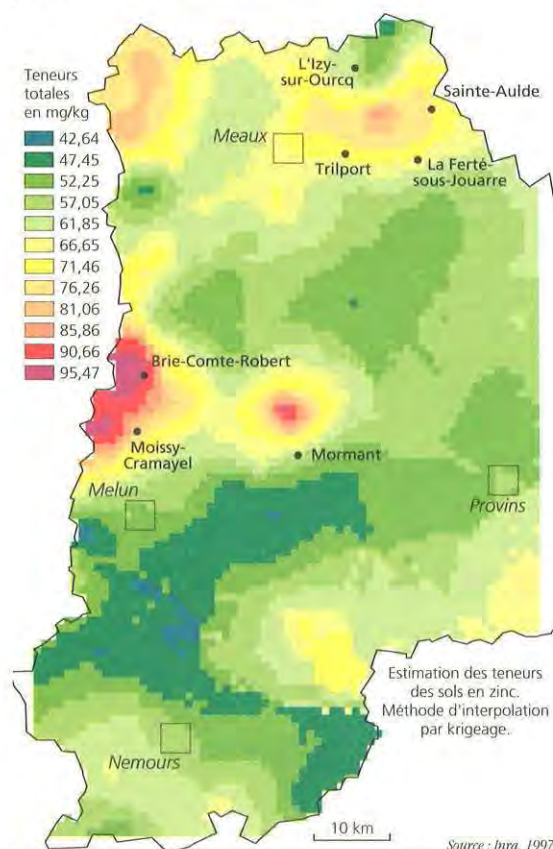


de lisiers de porcs (cuivre et zinc), épandages de boues des stations d'épuration, pollutions industrielles, pollutions liées au trafic automobile (plomb), etc. Les métaux des apports anthropiques sont sous des formes assez réactives et entraînent de ce fait des risques très supérieurs aux métaux naturels qui sont le plus souvent immobilisés sous des formes chimiques inertes et depuis longtemps en équilibre avec l'environnement physico-chimique local.

Les deux principaux programmes d'étude et d'observation des éléments traces dans les sols (Inra - Aspitet et Ademe - Inra) ont révélé que certains secteurs présentent de fortes teneurs naturelles en métaux, qui excèdent souvent le seuil réglementaire français pour l'épandage des boues d'épuration. Très localement, on constate de nettes contaminations d'origine anthropique. Ainsi, les zones de vignes et d'arboriculture sont presque toujours contaminées par du cuivre, parfois très fortement (Bordelais, Bourgogne). C'est le résultat de traitements répétés des vignes à la bouillie bordelaise. Certaines parcelles exploitées de manière intensive ont été contaminées par les produits phytosanitaires (zinc, mercure, plomb, arsenic, cuivre) ou par une fertilisation intense (cadmium). On observe également une contamination sur les parcelles qui ont reçu des épandages de boues très chargées en métaux lourds, à des doses cumulées excessives (cadmium, plomb, cuivre, zinc, mercure). Enfin, les sols situés à proximité immédiate d'installations industrielles peuvent être pollués : établissements métallurgiques (traitements de surface, affinage) ou de traitement de minerais (métaux non ferreux), centrales thermiques ou usines d'incinération. Il s'agit alors d'une contamination atmosphérique de source proche. Partout ailleurs, en zones rurales, le degré général de contamination en métaux lourds demeure très faible, le plus souvent imperceptible. Les retombées atmosphériques d'origine lointaine sont en général peu importantes par rapport aux teneurs naturelles des sols.

L'analyse des teneurs en zinc des sols agricoles de Seine-et-Marne (450 points de mesure) a mis en évidence quatre zones à concentrations anormales (plus de 80 mg/kg). Il s'agit du Pays de France (extrémité nord-ouest du département), d'un secteur de la vallée de la Marne,

du secteur de Brie-Comte-Robert et de Moissy-Cramayel (limite ouest du département) et d'un secteur au nord de Mormant, situé en pleine Brie, un peu à l'est du précédent. Les deux dernières zones d'anomalies, clairement suspectes de contaminations, se retrouvent aussi très nettement sur les cartes d'estimation du cuivre et du plomb. L'origine de cette contamination remonte aux années soixante, lorsque des composts d'ordures ménagères brutes, en provenance de l'agglomération parisienne, étaient épanchés à proximité des points de débarquements : les gares de Brie-Comte-Robert, Moissy-Cramayel, Coubert et Mormant.



Les teneurs en zinc des sols de Seine-et-Marne

### La contamination radioactive

L'Opri surveille la radioactivité du sol en neuf points du territoire métropolitain. Cette surveillance a permis en particulier de mettre en évidence les retombées en France de l'accident de Tchernobyl, marquées par l'apparition de concentrations en  $^{134}\text{Cs}$  plus élevées dans les stations de Viomenil (Vosges) et de Méaudre



(Isère), par exemple. L'effet n'a en revanche pas été perceptible à la station du Vésinet située en région parisienne.

## Perspectives

En vingt ans, les connaissances sur le fonctionnement des sols et les processus de dégradation ont beaucoup progressé. On bénéficie aujourd'hui d'une amélioration spectaculaire des méthodes analytiques et d'un abaissement des seuils de détection qui permet de doser des substances présentes en très faibles quantités dans les sols ou les eaux. Cela n'implique pas nécessairement que l'état de notre environnement se soit dégradé, mais plutôt que les pressions qui s'exercent et leurs impacts sont mieux connus. Les sols sont de plus en plus placés au cœur des problèmes d'environnement en milieu rural, interfaces entre la croûte terrestre, l'atmosphère, le monde biologique et les activités humaines. On sait maintenant que la qualité des eaux continentales (cours d'eau et nappes souterraines) dépend étroitement de la nature des sols et des activités qu'ils supportent. Fait révélateur de cette prise de conscience, l'année 1998 a été déclarée « Année du sol » par les ministères de l'Environnement et de l'Agriculture.

Aujourd'hui, les types de pollution des sols liés aux sources ponctuelles sont en recul. Mais l'héritage des pollutions générées depuis plus d'un siècle par les activités minières, industrielles, urbaines ou automobiles est lourd. La recherche des sites pollués, menée systématiquement depuis quelques années, a débouché sur le recensement de plusieurs milliers de points noirs : anciennes stations service, usines à gaz, mines, anciennes zingeries, fabriques de produits chimiques, usines traitant des minerais, ateliers de raffinage des métaux, décharges sauvages, etc. Des études approfondies vont être nécessaires pour définir la nature des polluants, connaître le contexte pédologique, hydrologique et humain, afin de pouvoir estimer les risques encourus par les populations riveraines et établir les priorités de traitement. En dehors de ces sites ponctuels, la destruction progressive par l'urbanisation, le mitage industriel, la construction de grandes infrastructures (aéroports), etc. demeure un grand péril pour les sols français. On s'interroge également de plus en plus sur l'impact des pollutions

émergentes : la présence en concentrations croissantes des PCDD (dont la dioxine) et des HAP dans les sols pourrait poser problème, tout particulièrement en zones périurbaines et péri-industrielles.



C. Couvert - Graphies

La dégradation des sols liée aux pratiques agricoles s'avère enfin très préoccupante. L'érosion de la partie superficielle des sols des plateaux limoneux du Nord (grandes cultures) occasionne parfois des accidents spectaculaires, tels que ravines ou coulées de boues, mais son plus grand impact est probablement la pollution directe des ruisseaux par les fertilisants ou les pesticides associés aux particules déplacées. L'épandage des boues urbaines sur les terrains agricoles est un autre sujet d'actualité brûlante. Les recherches manquent cependant pour fournir des réponses décisives aux questions légitimes que posent agriculteurs et consommateurs. Enfin, l'accumulation dans les sols des pesticides et de leurs métabolites, et leur devenir à long terme demeurent des objets de préoccupation. ■



## Glossaire

**Adsorption** : phénomène par lequel une substance gazeuse ou liquide se fixe sur les parois d'un solide.

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

**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. En revanche, l'emploi du mot **pollution** est préconisé lorsque des apports liés à des activités humaines ont des effets négatifs visibles.

**Éléments traces** : éléments chimiques, présents naturellement en très faibles quantités dans les roches et les sols (moins de 0,1 % ou 1 000 mg/kg pour chacun d'entre eux).

**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, etc. L'horizon est l'unité d'échantillonnage en pédologie. La plupart des sols doivent être décrits comme des superpositions de 2, 3, 4 horizons (ou plus) dont les caractères et les propriétés sont différents.

**Métaux lourds** : l'expression métaux lourds est souvent employée dans le langage courant pour désigner le cadmium, le cuivre, le chrome, le nickel, le plomb, le mercure, le sélénium, etc. En fait, certains de ces éléments chimiques ne sont pas des métaux (l'arsenic, le sélénium sont des non-métaux) alors que d'autres présentent une masse volumique relativement faible, et ne peuvent donc être taxés de lourds. C'est pourquoi il vaut mieux employer l'expression éléments traces ou éléments traces métalliques.

**Oligo-élément** : élément trace indispensable au bon déroulement des processus biologiques animaux ou végétaux (exemples : cuivre, manganèse, bore, zinc, molybdène). Certains oligo-éléments sont potentiellement toxiques.

**Pédogenèse** : processus de différenciation d'un sol à partir de matériaux géologiques.

## Pour en savoir plus...

- *Le sol, un patrimoine à préserver*, supplément au n° 856 de la revue *Chambres d'agriculture*, juin 1997.
- Baize D., 1997, *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France) - Références et stratégies d'interprétation*, Inra.
- Robert M., 1996, *Le sol - Interface dans l'environnement - Ressource pour le développement*, Masson.
- Schwartz Ch., Walter Ch., Claudot B., Bouédo Th. et Arousseau P., 1997, *Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994 - Constitution d'une banque de données cantonale*. in *Étude et gestion des sols*, 4, 3, p. 191-204.
- Walter Ch., Schwartz Ch., Claudot B., Bouédo Th. et Arousseau P., 1997, *Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994 - Descriptions statistique et cartographique de la variabilité des horizons de surface des sols cultivés*, in *Étude et gestion des sols*, 4, 3, p. 205-220.