

## Fertilité des sols : conclusions du rapport sur l'état des sols de France

Arrouays D.<sup>1</sup>, Antoni V.<sup>2</sup>, Bardy M.<sup>1</sup>, Bispo A.<sup>3</sup>, Brossard M.<sup>4</sup>, Jolivet C.<sup>1</sup>, Le Bas C.<sup>1</sup>, Martin M.<sup>1</sup>, Saby N.<sup>1</sup>, Schnebelen N.<sup>1</sup>, Villanneau E.<sup>1</sup>, Stengel P.<sup>5</sup>

1 US 1106 Infosol, Inra, 2163 avenue de la pomme de pin, 45075 Orléans cedex 2

2 Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS), Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (MEDDTL), 5, route d'Olivet, 45061 Orléans cedex 2

3 ADEME, 20, Avenue du Grésillé, 49004 Angers Cedex 01

4 Eco&Sols, IRD, 34394 Montpellier Cedex 5

5 Inra, 147 rue de l'Université, 75338 Paris Cedex 07

Correspondance : Dominique.arrouays@orleans.inra.fr

### Résumé

Les sols constituent une ressource naturelle non renouvelable. Leurs usages et leur devenir représentent un enjeu collectif majeur, tant pour les activités agricoles ou sylvicoles que pour la préservation de la qualité de notre environnement. Après dix ans de travaux, le Groupement d'Intérêt Scientifique sur les sols, le Gis Sol, a dressé le premier bilan scientifiquement quantifié de l'état des sols de France métropolitaine et d'Outre-mer dans un rapport sur l'état des sols de France publié en 2011.

Ce rapport relève des points positifs mais également un certain nombre de préoccupations du point de vue de la fertilité. Les sols agricoles ne présentent pas d'évolution mesurable de leur acidité, ce qui indique une bonne gestion du pH à l'échelle nationale. Le rapport fait en revanche état de teneurs en phosphore relativement faibles pour de nombreux sols, et à l'inverse de situations d'excédents très préoccupantes en raison de son impact sur la qualité des eaux et l'eutrophisation des milieux. Il pose ainsi la question de la durabilité à long terme du système agricole actuel et celle d'une meilleure valorisation des effluents d'élevage. D'assez nombreuses situations pourraient également être susceptibles de provoquer des carences en oligo-éléments pour des cultures exigeantes. Enfin, une inquiétude majeure concerne la progression de l'artificialisation des sols, qui s'est accélérée durant la dernière décennie et occasionne des pertes importantes de sols agricoles.

**Mots-clés** : sol, fertilité, Groupement d'Intérêt Scientifique Sol, pH, phosphore, structure du sol, contamination, artificialisation

### Abstract: Soil Fertility: conclusions of the report on the state of the soils in France

Soils are a non-renewable, natural resource. Their uses and their future represent, therefore, a collective issue for agricultural and forestry production, as well as for the preservation of our environment. After ten years of work, the "Groupement d'intérêt scientifique sur les sols", the Gis Sol (Soils Scientific Interest Group) has presented the first appraisal of soil quality in mainland France and its overseas territories in a report on the state of the soils in France published in 2011.

This appraisal shows evidence for positive points but also highlights some concerns regarding soil fertility. Agricultural soils do not show a measurable change in their acidity, thus indicating an efficient management of pH at a national level. On the other hand, the report shows relatively low phosphorus levels for numerous soils, and inversely situations of structural excess which remain very worrying due to its impact on water quality and on the eutrophication of the environments. It also raises the questions of the long-term sustainability of current cultivation systems and of a better treatment of effluents from

livestock farming. Numerous situations also seem to be incompatible, for certain oligo-elements, with demanding cultures. At last, a major concern is the development of soil sealing, which has accelerated over the last decade and is responsible for the loss of large areas of agricultural soils.

**Keywords:** GIS Sol, pH, phosphorus, soil structure, contamination, soil sealing

## Introduction

Les sols sont à la fois le produit et le support du développement de la végétation. Ils constituent un maillon central dans la régulation des grands cycles globaux tels que ceux de l'eau, du carbone ou de l'azote. Ils sont au cœur de grands enjeux planétaires comme la sécurité alimentaire, l'atténuation du changement climatique, la disponibilité en eau de bonne qualité ou la préservation de la biodiversité.

En effet, le sol est notamment le support de la production agricole et forestière. Il est le lieu de l'ancrage des systèmes racinaires des végétaux et constitue leur réservoir d'eau et d'éléments nutritifs. Il fournit ainsi les éléments indispensables à la production végétale pour nourrir les animaux et les hommes et produire des fibres, des matériaux et de l'énergie renouvelable. Pour valoriser au mieux cette fonction de production, sans générer d'impacts négatifs sur les autres (support de production, support du paysage, source de matériaux, mémoire du passé, filtration et épuration, régulation des eaux et des cycles du carbone et de l'azote et réservoir de biodiversité), il est donc essentiel de disposer d'une connaissance objective et spatialisée de la fertilité des sols.

Cet article résume les principales conclusions du rapport sur l'état des sols de France (Gis Sol, 2011), récemment publié par le Groupement d'intérêt Scientifique sur les Sols, en se limitant aux aspects concernant leur fertilité, ainsi qu'à la présence d'éléments indésirables ou en excès susceptibles de se transmettre dans les eaux ou dans la chaîne alimentaire.

## Les données utilisées

Les données proviennent essentiellement de deux programmes menés par le Gis Sol : le réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) et la base de données d'analyses de terre (BDAT).

**Le programme RMQS** repose sur l'installation et l'observation, à pas de temps réguliers, de près de 2 200 sites de suivi de la qualité des sols. Ils sont implantés sur des placettes géo-référencées et régulièrement réparties, selon une maille carrée de 16 km de côté. L'ensemble du territoire métropolitain et des Antilles françaises a ainsi été couvert en dix ans.

Un retour sur les sites est prévu selon un pas de temps de 10 à 15 ans. Les échantillons sont archivés dans un conservatoire national d'échantillons de sols qui permet de réaliser de nouvelles mesures en tant que de besoin.

**Le programme BDAT** collecte, pour la France métropolitaine, les résultats d'analyses effectuées pour des agriculteurs auprès de laboratoires d'analyses de terre agréés par le ministère en charge de l'agriculture. Il est informatisé et normalisé. La diffusion des statistiques cantonales réalisées pour plusieurs périodes est publique et assurée *via* un serveur web de cartographie interactive. Ce programme regroupe aujourd'hui plus de 15 millions de résultats d'analyses. Leur répartition spatiale est relativement homogène dans les principales régions agricoles françaises.

## L'état des composantes de la fertilité des sols de France

Les sols constituent le support de la production végétale. Leurs caractéristiques conditionnent l'enracinement des plantes et leur alimentation en eau et en éléments minéraux. Pour remplir cette

fonction, les propriétés des sols et leurs états physiques doivent permettre le stockage et l'infiltration de l'eau, l'aération et la croissance racinaire.

### Structure et propriétés physiques

La qualité de la structure des sols conditionne celle de l'enracinement et de l'aération. De grandes incertitudes subsistent sur l'état de tassement des sols agricoles et forestiers et sur l'évolution de leur structure à long terme. De même, l'évolution des teneurs en matières organiques des sols sensibles à la dégradation structurale reste incertaine. La connaissance des propriétés de rétention en eau des sols constitue *a priori* un outil intéressant pour gérer au mieux la ressource en eau en agriculture et pour l'adaptation au changement climatique. Ce dernier point est particulièrement important pour la production forestière dont la gestion doit se penser à très long terme.

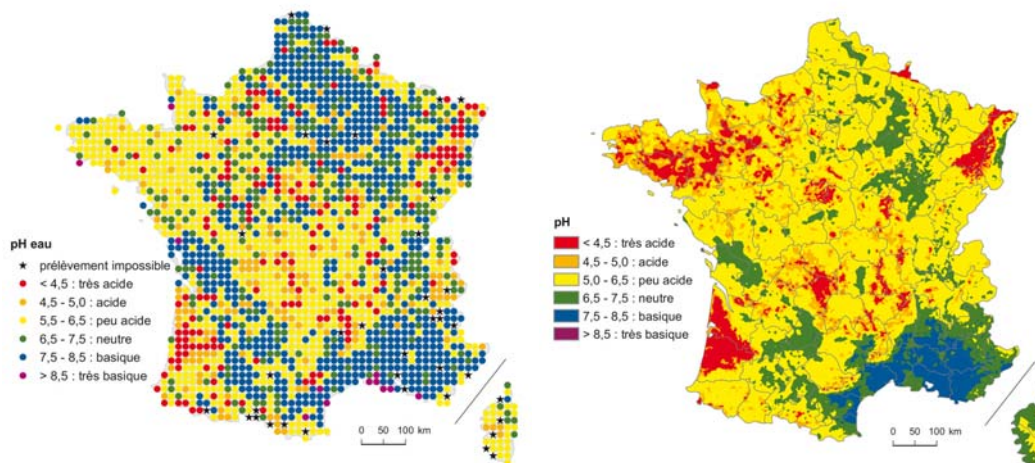
### Fertilité minérale

L'état des réserves minérales dans les sols est un bon indicateur de leur aptitude à fournir les minéraux nécessaires à la croissance et au développement des plantes. Il traduit la capacité des sols à soutenir une forte productivité végétale, tout en minimisant les apports externes.

#### Acidification

Les sols agricoles ne présentent pas d'évolution mesurable de leur acidité. Leurs pH sont restés stables durant les 15 dernières années. L'acidification des sols agricoles semble donc être gérée efficacement à l'échelle nationale, ce processus étant contrebalancé par l'apport d'amendements minéraux dans les sols non carbonatés. Toutefois, de nombreux sols présentent des pH relativement bas, ce qui montre que le maintien d'apports d'amendements reste nécessaire (Figure 1).

**Figure 1** : Le pH des horizons de surface des sols de France métropolitaine des sites du Réseau de mesures de la Qualité des Sols (mesuré) et celui des sols forestiers (prédit par la végétation). Sources : Gis Sol-RMQS, 2011 et © accord AgroParisTech-Engref (UMR LERFOB) - IFN n°2007-CPA-2-072.



En milieu naturel et forestier, l'acidification à long terme reste incertaine, comme d'ailleurs l'évolution de la plupart des paramètres de fertilité chimique des sols de ces milieux. La perspective d'une augmentation possible des prélèvements de biomasse en forêt (bois morts, rémanents, exportation des branches, etc.) pose par ailleurs la question du maintien d'un bilan suffisant en éléments nutritifs dans ces sols.

## **Azote**

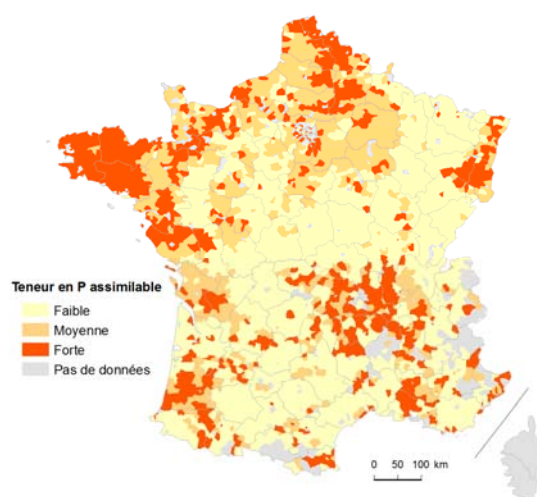
Les flux d'azote dans l'environnement s'exercent sur de courtes périodes, liées à des fluctuations climatiques ou aux périodes d'épandage des engrais. Il résulte de la complexité et de la rapidité de ces mécanismes qu'il est extrêmement difficile de faire un état global de l'azote – et de la fertilité azotée – dans les sols de France.

## **Potassium**

Les sols agricoles ne montrent pas de baisse mesurable de leurs teneurs en potassium, malgré une diminution importante des apports minéraux externes. Il faut y voir les effets des progrès en matière de gestion de la fertilisation minérale et organique, ainsi qu'une fourniture naturelle par l'altération des minéraux non négligeable dans certains sols. A long terme, la question d'une éventuelle baisse de la fertilité potassique reste cependant posée.

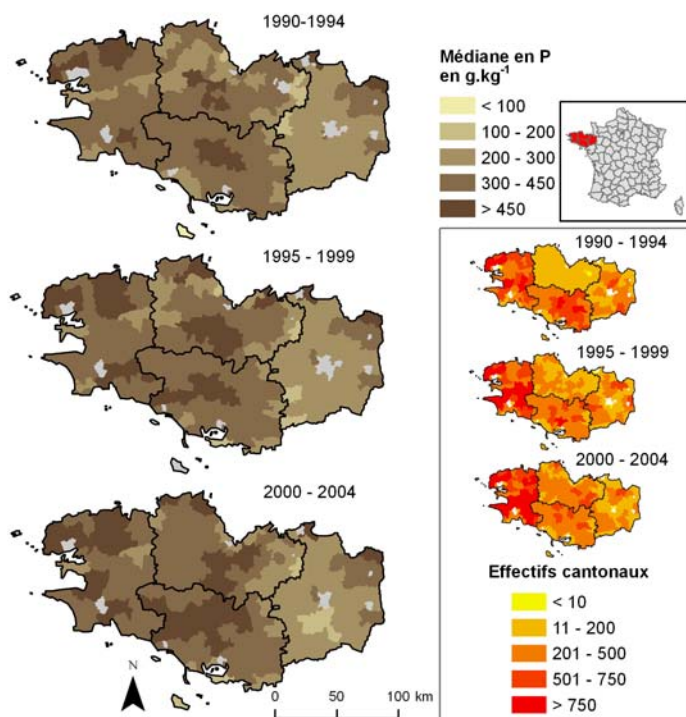
## **Phosphore**

La distribution des teneurs en phosphore assimilable par les plantes dans les sols de France (Figure 2) montre très clairement des effets régionaux (Follain *et al.*, 2009). Les régions d'élevage intensif, comme la Bretagne, sont très largement excédentaires. Il s'agit de phosphore essentiellement d'origine organique, lié aux épandages d'effluents. Les données historiques de la BDAT montrent que cette tendance à l'excédent se poursuit actuellement (Figure 3). Le phosphore en excès peut rejoindre les milieux aquatiques soit sous forme dissoute dans l'eau du sol, soit fixé sur des particules du sol arrachées par ruissellement et érosion. Conjugué aux excès de nitrates, cet afflux a contribué au développement, à partir des années 1960, des phénomènes d'eutrophisation des eaux de surface. D'importantes proliférations végétales apparaissent ainsi régulièrement : les « blooms algaux » en milieu lacustre, fluvial et estuarien.



**Figure 2 :** Les teneurs en phosphore assimilable des horizons de surface des sols agricoles de France par canton Source : *Gis Sol, BDAT, 2011 ; IGN, Geofla®, 2006.*

Les autres secteurs où le phosphore apparaît en excédent sont principalement l'Alsace et le Nord-Pas-de-Calais. Dans ces régions, des usages anciens (apport de craie phosphatée ou de scories issues de l'activité sidérurgique) ont contribué aux teneurs en phosphore mesurées aujourd'hui dans les sols. A l'inverse de la tendance observée en Bretagne, les teneurs y sont actuellement en baisse.



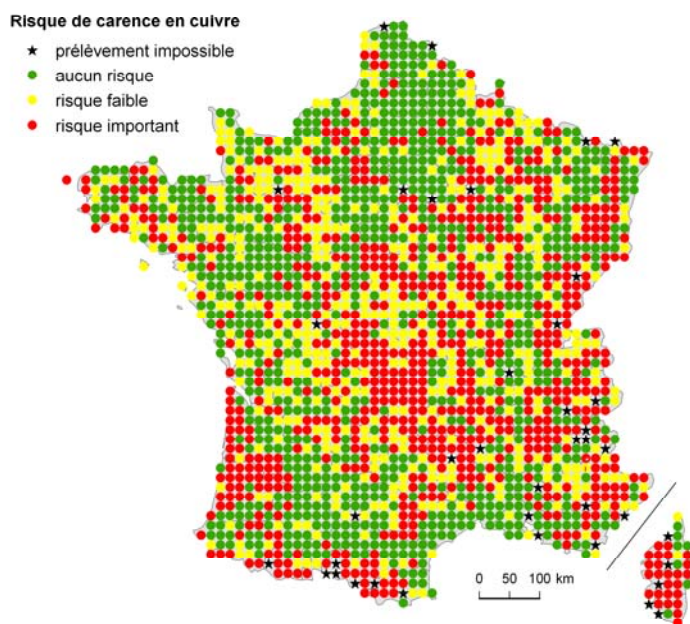
**Figure 3 :** L'évolution des teneurs médianes cantonales en phosphore assimilable des horizons de surface des sols agricoles de Bretagne (Lemerrier et al., 2008). *Source : Gis Sol, BDAT, 2011 ; IGN, Geofla®, 2006*

Dans de nombreuses régions, la majorité des sols présente des teneurs faibles. Dans certains sols cultivés de façon relativement intensive, la pratique « d'impasses » de fertilisation phosphatée a pu s'effectuer sans perte de rendement dans un premier temps, mais sa poursuite entraînerait inévitablement au regard des mutations actuelles une réduction de la fertilité des sols. A l'inverse, de nombreuses teneurs plutôt faibles pourraient être liées à des besoins limités des cultures, comme par exemple dans le cadre de productions fourragères et prairiales peu intensives. La juxtaposition de situations d'excédents et d'insuffisances potentielles, dans le contexte de raréfaction à long terme de la ressource en phosphore minéral, soulève la question d'une meilleure valorisation des effluents d'élevage pour corriger les unes et les autres.

### **Carences en oligo-éléments**

De nombreuses situations semblent incompatibles, pour certains oligo-éléments (bore, cuivre, etc.), avec des cultures exigeantes comme le montre l'exemple du cuivre (Figure 4). Ceci n'est pas étonnant, dans la mesure où la pratique de bilans en ces éléments est beaucoup plus récente, et beaucoup moins répandue que pour les trois éléments majeurs que sont l'azote, le phosphore et le potassium.



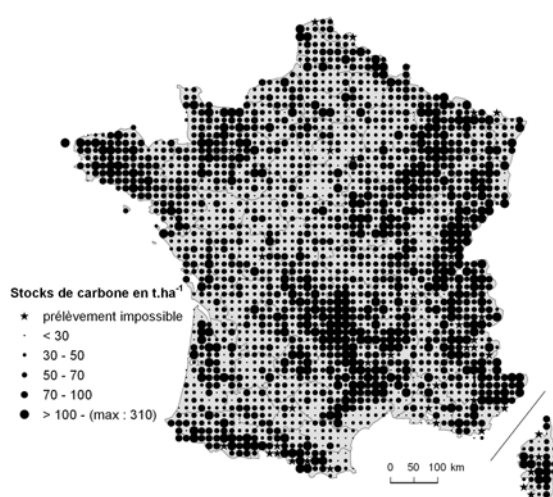


**Figure 4** : Le risque de carence en cuivre pour une culture exigeante. Note de lecture : l'évaluation du risque de carence en cuivre est fondée sur le rapport entre la teneur en cuivre extrait à l'EDTA et la teneur en matière organique du sol.

Source : Gis Sol-RMQS, 2011

### Carbone et matière organique

Les sols de France métropolitaine abritent un stock de carbone organique considérable évalué à 3,2 milliards de tonnes dans les 30 premiers centimètres (Inra, 2002 ; Martin *et al.*, 2011) (Figure 5). Ce stock de carbone est en baisse dans un certain nombre de situations agricoles bien identifiées (Bretagne (Lemerrier *et al.*, 2008), Franche-Comté (Saby *et al.*, 2008), sols cultivés des Landes de Gascogne (Jolivet *et al.*, 2003) et du piémont pyrénéen (Arrouays *et al.*, 1995)) le plus souvent en raison de changements d'usages ou de pratiques qui se sont produits depuis quelques décennies.



**Figure 5** : Le stock de carbone organique dans les 30 premiers centimètres des sols de France métropolitaine. Source : Gis Sol-RMQS, 2010, Inra - RMQS, 2010

Note de lecture : la distribution des stocks de carbone est principalement contrôlée par des paramètres climatiques (par exemple, effets de l'altitude), d'occupation du sol (stocks élevés dans les régions bocagères ou forestières, faibles dans les régions de grande culture et sous vigne), ainsi que par la texture du sol (stocks d'autant plus élevés que les sols sont plus argileux).

Dans d'autres situations, il semble être stabilisé, voire en légère augmentation. Le potentiel national de stockage additionnel sous l'effet de changements d'usages ou de pratiques a été estimé dans une fourchette comprise entre 1 et 3 millions de tonnes de carbone par an, sur une durée de 20 ans. La

gestion du carbone des sols représente donc un levier temporaire d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre. En revanche, ce stockage ne constitue pas une solution à long terme. Sa durabilité est très incertaine et les effets du changement climatique à long terme sur le cycle du carbone dans les sols restent très imprévisibles.

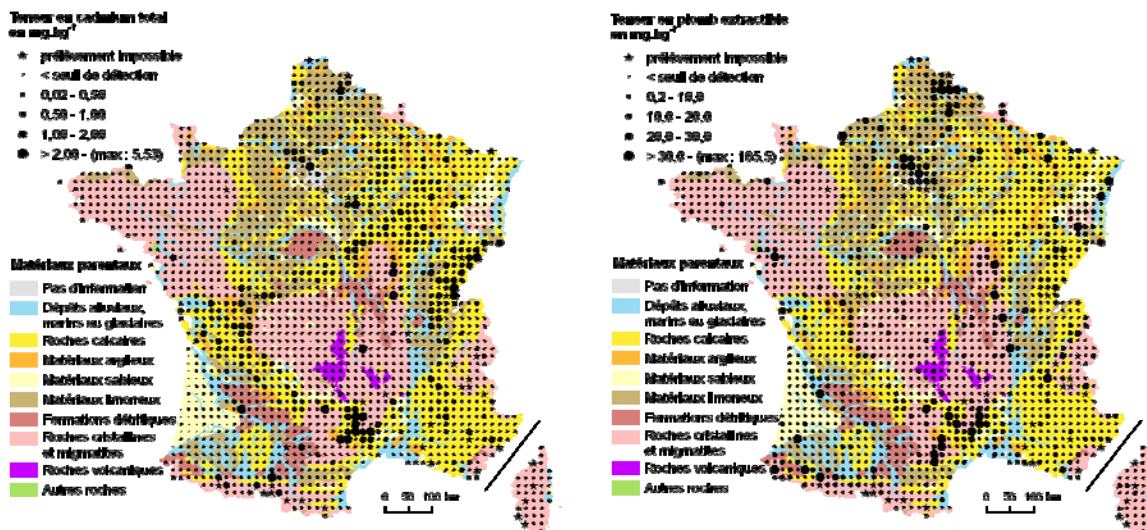
### Fertilité biologique

Les organismes du sol contribuent notamment à l'entretien de la structure des sols et au recyclage de la matière organique fournissant ainsi des nutriments aux organismes du sol. Si cet article se concentre sur la fertilité minérale des sols, les premières mesures de l'état biologique des sols réalisées sur le RMQS mettent en évidence l'intérêt d'un tel suivi et engagé à poursuivre cet effort (Cluzeau *et al.*, 2011, Dequiedt *et al.*, 2011).

### Toxicités et contaminations

Les sols sont susceptibles de recevoir ou d'émettre un certain nombre de contaminants. Ces derniers peuvent se révéler préjudiciables à la santé humaine, *via* leur ingestion directe ou leur transfert dans les eaux, les plantes et la chaîne alimentaire, et se transmettre dans l'ensemble des écosystèmes. Ils peuvent également provoquer des toxicités pour les plantes. Les distributions géographiques de certains éléments traces métalliques (ETM), comme le plomb ou le cadmium, peuvent être reliées à des phénomènes de contamination diffuse (Saby *et al.*, 2006 & 2011) (Figure 6).

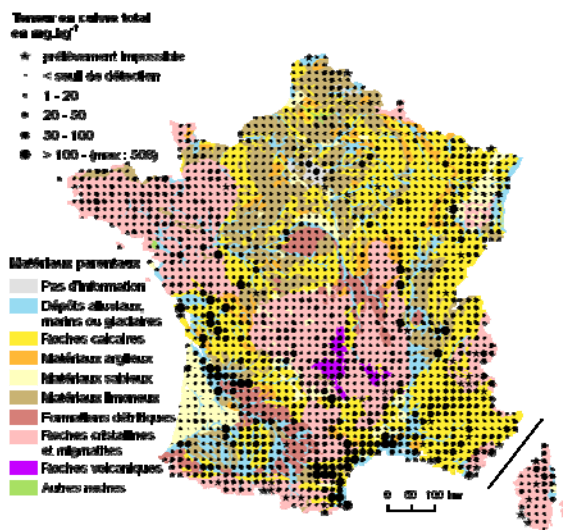
**Figure 6** : Les teneurs en cadmium total et en plomb extractible à l'EDTA des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France métropolitaine. *Source : Gis Sol-RMQS, 2011*



*Note de lecture : la distribution du cadmium et du plomb dans les sols de France dépend à la fois des facteurs naturels comme les roches mères et la pédogenèse (cas du cadmium dans les sols issus de roches calcaires jurassiques et du plomb et du cadmium en bordure et au sud du Massif central) et des contaminations diffuses d'origine anthropique (cas en région parisienne et dans le Nord-Pas-de-Calais pour les deux éléments).*

Ces contaminations touchent principalement les zones urbaines et industrielles et montrent parfois des gradients affectant les secteurs situés en périphérie, voire des auréoles beaucoup plus larges comme

en région parisienne et dans le Nord-Pas-de-Calais. Certains sols urbains montrent d'ailleurs ponctuellement des teneurs très élevées en certains ETM. En zone agricole, à l'exception des zones périurbaines et péri-industrielles, les sources principales de contamination dans les sols sont liées aux usages et aux pratiques agricoles (engrais, traitements phytosanitaires, effluents d'élevage). En particulier, la contamination en cuivre est omniprésente dans les sols viticoles (Figure 7). Si elle ne présente *a priori* pas de danger pour la vigne elle-même, elle est susceptible de générer des transferts par érosion et elle pourrait devenir un handicap majeur en cas de changement d'usage des sols.



**Figure 7 :** Les teneurs en cuivre total des échantillons de surface (0-30 cm) des sols du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols. *Source : Gis Sol – RMQS, 2011.*

Malgré ces contaminations avérées, la grande majorité des sols de France présente des teneurs en ETM plutôt faibles (en règle générale, moins de 2% des valeurs sont supérieures aux seuils retenus pour les épandages de boues de station d'épuration) ou d'origine naturelle.

Pour la majorité des situations, le risque de transfert de ces éléments dans la chaîne alimentaire reste donc très faible. Certaines contaminations diffuses peuvent être considérées comme historiques. La contamination diffuse en plomb des sols dans les espaces périurbains est, par exemple, très probablement à relier à l'addition de cet élément comme antidétonant dans les carburants avant la commercialisation de l'essence sans plomb en 1990. De même, le contrôle des émissions industrielles à la source est un facteur de diminution du flux d'entrée des contaminants dans les sols. La distribution géographique de certains contaminants reste toutefois aujourd'hui inconnue. C'est le cas, par exemple, pour l'arsenic, le mercure et le sélénium.

De nombreux polluants organiques ne sont pas - ou ne sont que très rarement - observés dans les sols. Compte tenu de la taille de la maille d'observation, ceci ne signifie pas qu'il n'existe pas localement de contaminations ponctuelles. Inversement, certains contaminants sont relativement ubiquistes dans les sols, les exemples types étant le DDT et le lindane, deux insecticides organochlorés interdits en Europe mais fortement rémanents (Villanneau *et al.*, 2009).

Les concentrations restent néanmoins faibles, souvent proches des limites de détection. En revanche, un exemple extrême de contamination avérée par un polluant organique particulièrement persistant et préoccupant est le cas de la chlordécone dans les sols de bananeraies des Antilles (Cabidoche *et al.*, 2009).

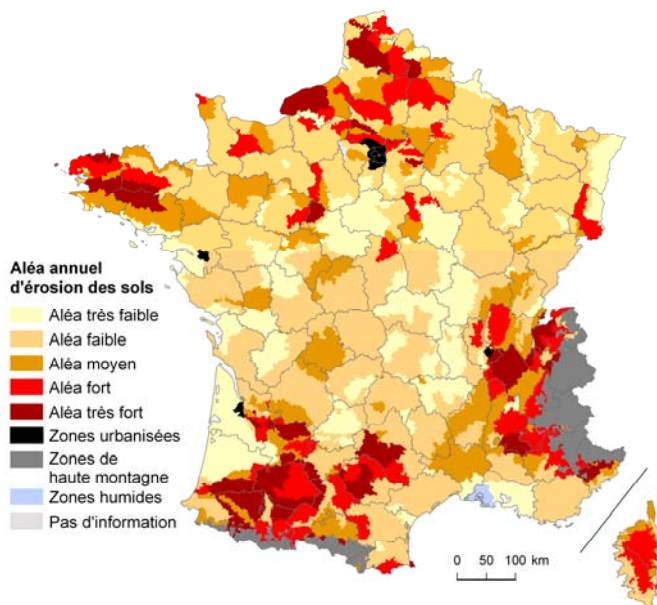


## Perte en sol

L'ensemble des services rendus par les sols nécessite le maintien d'un « volume de sol » suffisant, tant en surface qu'en épaisseur. Ce maintien est menacé par diverses pressions naturelles ou anthropiques : artificialisation, érosion, extraction, glissements de terrain, etc.

Une inquiétude majeure concerne la progression de l'artificialisation des sols qui s'est accélérée durant la dernière décennie. Elle constitue une menace évidente pour la plupart des fonctions des sols, excepté celle de support des infrastructures. Selon l'enquête Teruti-Lucas, l'artificialisation des sols s'est accélérée entre 2003 et 2009, affectant l'équivalent d'un département français moyen (6 100 km<sup>2</sup>) en sept ans, contre la même surface en dix ans entre 1992 et 2003 (Agreste, 2010). Les espaces artificialisés se sont étendus principalement au détriment des sols agricoles et pour plus d'un tiers d'entre eux, il s'agit de sols de très bonne qualité agronomique (SOeS, 2011).

Une autre inquiétude majeure est relative à l'érosion des sols, qui constitue une perte souvent considérée comme irréversible. Elle affecte principalement les sols agricoles limoneux des grands Bassins parisien et aquitain, ainsi que certaines situations de piémont et certains secteurs méditerranéens (Figure 8) (Le Bissonnais *et al.*, 2002 ; Ifen, 2005 ; BRGM, 2006).



**Figure 8 :** L'aléa annuel d'érosion des sols en France métropolitaine, intégré par petites régions agricoles. *Source :* Gis Sol-Inra-SOeS, 2011.

*Note :* L'aléa d'érosion des sols par petite région agricole est estimé à l'aide du modèle Mesales (Modèle d'évaluation spatiale de l'aléa d'érosion des sols), développé par l'Inra. Il combine plusieurs caractéristiques du sol (sensibilité à la battance et à l'érodibilité), du terrain (type d'occupation du sol, pente) et climatiques (intensité et hauteur des précipitations). L'aléa est caractérisé par cinq classes représentant la probabilité qu'une érosion se produise.

Dans de nombreux cas, les pertes en sol provoquées par l'érosion sont supérieures aux volumes de sol formés par l'altération naturelle des roches. Au-delà des dommages parfois spectaculaires qu'elle entraîne en aval des zones érodées, l'érosion des sols est donc susceptible de remettre en cause la durabilité à long terme de certains agro-écosystèmes. Elle pourrait de plus se trouver amplifiée par une augmentation des événements climatiques extrêmes.

## Conclusion

Au plan de la fertilité chimique, l'évaluation de l'état des sols de France ne fait pas apparaître la nécessité d'une alerte générale, même si certains points restent préoccupants et nécessiteraient une analyse approfondie des flux en entrée et en sortie. La juxtaposition de situations d'excédents et

d'insuffisances potentielles, en particulier en ce qui concerne le phosphore, soulève la question d'une meilleure valorisation des effluents d'élevage pour corriger les unes et les autres.

La majorité des contaminants qui ont été analysés n'est présente qu'en très petites quantités dans les sols. Si certains pourraient poser des problèmes sanitaires, la plupart d'entre eux ne présentent qu'un très faible risque de transfert dans la chaîne alimentaire.

Des incertitudes et des interrogations dues à un manque de connaissances subsistent encore. Elles portent, par exemple, sur le stockage du carbone et son devenir sous l'effet du changement climatique, sur l'évolution de la biodiversité ou celle de l'état physique des sols.

Certaines de ces incertitudes sont tout simplement liées à l'absence de données. On ne dispose pas, par exemple, d'un inventaire national de la distribution de certains contaminants (arsenic, mercure, sélénium, etc.). Pour certains de ces paramètres, le conservatoire d'échantillons de sols, mis en place dans le cadre des programmes du Gis Sol, constitue une véritable mémoire des sols et devrait permettre de reconstituer *a posteriori* certaines évolutions.

D'autres incertitudes sont liées à celles qui concernent l'évolution des pressions. Par exemple, les incertitudes sur l'évolution climatique future, et sur son impact sur la dynamique des matières organiques des sols, ne permettent pas de réaliser aujourd'hui un pronostic spatialisé de l'évolution des stocks de carbone des sols. La plupart des effets directs attendus du changement climatique sur les sols restent cependant très inférieurs aux effets liés aux actions volontaires de l'Homme. Ces dernières, comme par exemple les changements d'occupation, d'usages ou de pratiques, représentent des facteurs majeurs d'évolution des pressions sur les sols, et dépendront de contingences économiques ou politiques qui restent en grande partie imprévisibles.

Au-delà de ce diagnostic national, l'amélioration et le maintien de la qualité des sols nécessitent une gestion plus locale par les acteurs concernés. A ce titre, les opérations régionales d'inventaire cartographique des sols, en voie d'achèvement, devraient constituer des outils précieux d'aide à la décision pour une gestion des sols garantissant le maintien de leurs services écosystémiques.

## Références bibliographiques

Agreste, 2010. Service de la statistique et de la prospective (SSP), 2010. L'utilisation du territoire entre 2006 et 2009 : L'artificialisation atteint 9 % du territoire en 2009. Agreste Primeur, n° 246, juillet 2010. 4 p.

Arrouays D., Balesdent J., Mariotti A., Girardin C., 1995. Modelling organic carbon turnover in cleared temperate forest soils converted to maize cropping by using <sup>13</sup>C natural abundance measurements. *Plant & Soil*, 173(2), 191-196 p. Brgm, 2006. Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport n° 1, 2 et 3 (Rapports : BRGM/RP-55049-FR et BRGM/RP-55103-FR et BRGM/RP-55104-FR).

Cabidoche Y.M., Achard R., Cattan P., Clermont-Dauphin C., Massat F., Sansoulet J., 2009. Long-term pollution by chlordecone of tropical volcanic soils in the French West Indies: A simple leaching model accounts for current residue. *Environmental Pollution* 157, 1697-1705.

Cluzeau D., Guernion M., Chaussod R., Martin-Laurent F., Villenave C., Cortet J., Ruiz-Camacho N., Pernin C., Mateille T., Philippot L., Bellido A., Rougé L., Arrouays D., Bispo A., Pérès G., 2011. Integration of biodiversity in soil quality monitoring: Baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types. *European Journal of Soil Biology*. doi:10.1016/j.ejsobi.2011.11.003

Dequiedt S., Saby N.P.A., Lelievre M., Jolivet C., Thioulouse J., Toutain B., Arrouays D., Bispo A., Lemanceau P., Ranjard L., 2011. Biogeographical patterns of soil molecular microbial biomass as influences by soil characteristics and management. *Global Ecology and Biogeography*. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2010.00628.x

- Follain S., Schwartz C., Denoroy P., Villette C., Arrouays D., Walter C., Lemerrier B., Saby N.P.A., 2009. From quantitative to agronomic assessment of soil available phosphorus content of French arable topsoils. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 371-380
- Gis Sol. 2011. Rapport sur l'état des sols de France. Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Sols, 188 p.
- Gis Sol. 2011. Synthèse sur l'état des sols de France. Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Sols, 24p.
- Ifen, 2005. L'érosion des sols, un phénomène à surveiller. Le 4 pages de l'Ifen, n°106, septembre 2005. 4 p.
- Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P. (eds), 2002. *Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?* (rapport d'expertise scientifique collective. Synthèse du rapport d'expertise réalisé par l'Inra à la demande du ministère de l'Ecologie et du Développement durable). Paris, 32 p.
- Jolivet C, Arrouays D., Lévêque J., Andreux F., Chenu C., 2003. Organic carbon dynamics in soil particle-size separates of sandy Spodosols when forest is cleared for maize cropping. *Eur. J. Soil Sci.* 54, 257-268.
- Le Bissonnais Y., Thorette J., Bardet C., Daroussin J., 2002. L'érosion hydrique des sols en France. Rapport Ifen-Inra. 106 p.
- Lemerrier B., Gaudin L., Walter C., Aurousseau P., Arrouays D., Schwartz C., Saby N.P.A., Follain S., Abrassart J., 2008. Soil phosphorus monitoring at the regional level by means of a soil test database. *Soil Use and Management* 24, 131-138.
- Martin M.P., Wattenbach M., Smith P., Meersmans J., Jolivet C.C., Boulonne L., Arrouays D., 2011. Soil organic carbon stocks distribution in France. *Biogeosciences* 8, 1053-1065.
- Saby N., Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Pochot A., 2006. Geostatistical assessment of lead in soil around Paris, France. *Sci. Tot. Env* 367, 212-221.
- Saby N.P.A., Arrouays D., Antoni V., Foucaud-lemerrier B., Follain S., Walter C., Schwartz C., 2008. Changes in soil organic carbon content in a French mountainous region, 1990-2004. *Soil Use and Management* 24, 254-262.
- Saby N.P.A., Marchant B.P., Lark R.M., Jolivet C.C., Arrouays D., 2011. Robust geostatistical prediction of trace elements across France. *Geoderma* 162, 303-311.
- Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS), 2011. L'artificialisation des sols s'opère aux dépens des terres agricoles. *Le point sur*, n° 75. 4p.
- Villanneau E., Saby N.P.A., Arrouays D., Jolivet C.C., Boulonne L., Caria G., Barriuso E., Bispo A., Briand O. 2009. Spatial distribution of lindane in topsoil of northern France. *Chemosphere* 77, 1249-1255