

Le suivi de la qualité des sols en France, la contribution de l'Observatoire de la Qualité des Sols

S. Martin⁽¹⁾, D. Baize⁽²⁾, M. Bonneau⁽³⁾, R. Chaussod⁽⁴⁾, H. Ciesielski⁽⁵⁾, J.-P. Gaultier⁽⁶⁾,
P. Lavelle⁽⁷⁾, J.-P. Legros⁽⁸⁾, A. Leprêtre⁽⁹⁾, T. Sterckeman⁽⁵⁾

1. DIREN Ile-de-France, 18 avenue Carnot, 94234 Cachan cedex, France
2. INRA, Unité de Science du Sol/SESCPF, Ardon, 45160 Olivet, France
3. INRA, Unité Microbiologie et Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers, Champenoux, 54280 Seichamps, France
4. INRA, Unité de Science du Sol, 17 rue Sully, B.P. 1540, 21034 Dijon cedex, France
5. INRA, Laboratoire d'Analyses des Sols, 273 rue de Cambrai, 62000 Arras, France
6. INRA, Unité de Science du Sol, Route de Saint Cyr, 78026 Versailles cedex, France
7. ORSTOM, Laboratoire d'Ecologie des Sols Tropicaux, 72 route d'Aulnay, 93143 Bondy cedex, France
8. INRA, Unité de Science du Sol, place Viala, 34060 Montpellier cedex, France
9. Université de Lille 1, SN3, Laboratoire d'Ecologie Numérique, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex, France

RÉSUMÉ

De nombreuses activités humaines causent aux sols des dégradations. En général, celles-ci restent longtemps discrètes mais s'avèrent irréversibles à l'échelle humaine. A l'inverse, les nouvelles méthodes d'agriculture durable sont susceptibles de protéger et même de restaurer la qualité des sols.

C'est pourquoi, en 1985, le ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement a créé pour la France l'Observatoire de la Qualité des Sols (OQS), avec l'appui scientifique de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA).

L'OQS repose sur un réseau de sites. Ces sites sont, à leur création, décrits en détail (contexte géographique et historique, étude pédologique, fond pédogéochimique local). Ensuite, tous les cinq ans environ, sont mesurées les propriétés chimiques et physico-chimiques classiques des sols et leurs teneurs en éléments-traces métalliques.

L'OQS a impliqué l'élaboration :

1. De stratégies d'échantillonnage qui permettent d'estimer des changements à long terme de la qualité des sols en s'affranchissant le plus possible de l'hétérogénéité spatiale du milieu, des fluctuations saisonnières et des incertitudes liées aux mesures.
2. D'indicateurs de qualité des sols.
3. D'une base de données adaptée à un contexte scientifique.

Pour le futur, nous recommandons une évolution de l'OQS dans trois directions principales : (1) une extension géographique, (2) un développement thématique et (3) un renforcement du dialogue avec les utilisateurs.

Mots clés

Qualité des sols, pollution de sols, suivi des sols, agriculture durable, interdisciplinarité, utilisateurs, échantillonnage, indicateurs, base de données.

SUMMARY

SOIL QUALITY MONITORING IN FRANCE, THE CONTRIBUTION OF THE "SOIL QUALITY OBSERVATORY"

Many human activities result in soil degradation which generally remains insidious for a long time but is irreversible within human life time. On the contrary, new sustainable agricultural land management methods are likely to protect and even to restore soil quality.

This is why, in 1985, the "Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement" created the "Observatoire de la Qualité des Sols" (OQS) in France, with scientific support from the "Institut National de la Recherche Agronomique" (INRA). The objectives of the OQS are to allow early detection and monitoring of changes in soil quality.

The OQS is based on a network of sites (figure 1). Firstly, OQS sites are described in detail (geographical and historical context, soil description, assessment of the local geochemical background). Then, about every five years, standard chemical and physical soil properties and trace elements are monitored. Biological indicators are being developed. (table 1)

The OQS needed to set up :

1. Sampling strategies allowing to assess changes in soil quality soil which might be hidden by soil heterogeneity, by seasonal fluctuations or by analytical variability. (figure 2 and table 3)
2. Soil quality indicators.
3. A database fitted to a scientific context. (figure 3)

For the future, we recommend the OQS to be developed into three directions: (1) geographical coverage, (2) thematic extent, (3) dialogue with stakeholders.

Key-words

Soil quality, soil pollution, soil monitoring, sustainable agriculture, interdisciplinarity, stakeholders, sampling strategy, indicators, data base.

RESUMEN

EL SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DE LOS SUELOS EN FRANCIA, LA CONTRIBUCIÓN DEL "OBSERVATORIO DE LA CALIDAD DE LOS SUELOS"

Numerosas actividades humanas causan la degradación de los suelos. En general, éstas pasan largo tiempo desapercibidas, pero se revelan irreversibles a escala humana. Por el contrario, los nuevos métodos de agricultura sostenible son susceptibles de proteger e de mejorar la calidad de los suelos.

Es por lo que, en 1985, el ministerio del Ordenación del Territorio y del Medio Ambiente creó para Francia el Observatorio de la Calidad de los Suelos (OQS), con el apoyo científico del Instituto Nacional de la Investigación Agronómica (INRA).

El OQS se apoya sobre una red de sitios. Estos sitios están, descritos en detalle en el momento de su creación (contexto geográfico e histórico, estudio pedológico, fondo pedogeoquímico local). Después, cada cinco años más o menos, se miden las propiedades químicas y físico-químicas clásicas de los suelos y sus contenidos en elementos-trazas metálicos.

L'OQS desarrolló la elaboración:

- 1 . De estrategias de muestreos que permiten estimar cambios a largo plazo de la calidad de los suelos, tratando de disminuir lo más posible la heterogeneidad espacial del medio, las fluctuaciones estacionales y las incertidumbres ligadas a las medidas.
- 2 . De indicadores de calidad de los suelos.
- 3 . De un banco de datos adaptado a un contexto científico.

Para el futuro, recomendamos una evolución del OQS en tres direcciones principales: (1) una extensión geográfica, (2) un desarrollo temático y (3) un refuerzo del dialogo con los usuarios.

Palabras claves

calidad de suelos, contaminación de suelos, seguimiento de suelos, agricultura sostenible, interdisciplinaridad, usuarios, muestreos, indicadores, bancos de datos.

LE CONTEXTE HISTORIQUE

Au début des années 1980, la connaissance de cas patents de pollutions des sols, de phénomènes d'érosions spectaculaires côtoyait un sentiment relativement flou selon lequel les sols subissaient, en bien des endroits du territoire français, des dégradations certes en général discrètes mais que l'on savait irréversibles à l'échelle humaine. Les principales causes en étaient à peu près connues : retombées atmosphériques liées aux activités industrielles et à la circulation routière, épandages divers, certaines pratiques agricoles employées sans discernement comme l'irrigation ou le travail du sol. Il faut se rappeler qu'il y a une quinzaine d'années le sol était très souvent considéré comme une surface et non comme un milieu. Ainsi en attestent-elles nombre d'affaires de réutilisation de friches industrielles qui étaient uniquement traitées sous l'angle foncier et financier sans que soient même évoqués les problèmes de contaminations des sols par les activités antérieures. Vers 1982, à l'occasion de l'élaboration de la directive européenne relative à l'épandage des boues issues des stations de traitement des eaux usées, les pouvoirs publics se sont soudain rendus compte que l'on disposait de très peu de données fiables sur les teneurs des sols en éléments traces métalliques. Cette constatation fut le déclencheur de la création (et du financement), en 1985, d'un Observatoire de la Qualité des Sols (OQS) par le Ministère de l'Environnement, avec l'appui scientifique de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA). Dès l'origine, les objectifs de l'OQS furent explicités : permettre (1) la détection précoce des évolutions défavorables des sols, (2) l'appréciation des risques pour l'environnement, (3) l'établissement de modèles prédictifs d'évolution à caler sur les données observées, (4) la simulation de l'efficacité des moyens de protection envisagés pour prévenir ou enrayer cette évolution défavorable. L'accent fut alors fortement mis sur les éléments traces métalliques (INRA, 1983).

Au mois de juin 1992, à Rio, le Sommet de la Planète Terre a officiellement reconnu trois priorités en matière d'environnement : les changements globaux, la biodiversité, le développement durable (Barbault, 1990 ; Lubchenco et al., 1991). L'un des principaux corollaires à ceci était la nécessité de disposer d'éléments d'appréciation des évolutions de la biosphère sous l'effet des activités humaines pour prendre en compte, en connaissance de cause, les préoccupations d'environnement dans les décisions politiques, économiques et techniques. Il devenait clair que l'OQS, au delà de son rôle vis à vis de l'agriculture, devait être considéré comme un instrument particulier de suivi des évolutions indésirables des écosystèmes (Mamy, 1993 ; Martin, 1993).

Plus récemment, avec l'évolution parfois spectaculaire du comportement du monde agricole et avec la promotion, notamment à travers l'application des mesures agri-environnementales de la Politique Agricole Commune, d'une agriculture plus res-

pectueuse de l'environnement, il est apparu que le domaine d'intervention de l'OQS ne pouvait plus se limiter au diagnostic des dégradations des sols mais devait être élargi au suivi des évolutions positives souhaitées (Legros et Martin, 1997).

Au mois d'août 1998, lors du Congrès International de Science du Sol de Montpellier, trois problématiques ont été abondamment évoquées : (1) l'agriculture durable, (2) les approches systémiques et la pluridisciplinarité (ou interdisciplinarité ?) et (3), le dialogue entre les chercheurs et les "utilisateurs" (Catizzone, 1998).

L'OQS se trouve, de fait, au cœur de ces trois problématiques :

- Agriculture durable parce que l'objectif in fine de l'OQS est de concourir à une gestion durable des sols et plus généralement de la biosphère.

- Pluridisciplinarité parce que les sols étant une partie essentielle des écosystèmes terrestres en interrelation étroite avec leurs autres composantes, l'estimation de leur état nécessite une approche systémique faisant appel à des compétences recouvrant plusieurs disciplines (Legay, 1986 ; Legay et Barbault, 1995).

- Dialogue chercheurs/utilisateurs parce que, d'un côté, l'OQS interpelle la recherche par ses questionnements (ex : la mise au point d'indicateurs de la qualité des sols, les problèmes de changement d'échelle, la nécessaire dualité entre la description d'un état et la compréhension des processus associés, etc.) et que, de l'autre côté, il doit fournir des informations utilisables par les gestionnaires de l'espace rural - essentiellement le monde agricole - et par les décideurs politiques.

Ainsi les objectifs actuels de l'OQS sont-ils (1) de détecter précocement les changements et de suivre les évolutions de la qualité des sols, (2) dans la mesure du possible, d'en comprendre les processus et d'en identifier les causes de manière à mieux gérer le futur, (3) de contribuer au dialogue entre la recherche et les gestionnaires de l'espace rural (essentiellement le monde agricole et les politiques) et (4), de constituer un réseau de laboratoires de terrain (ou sites-ateliers) susceptibles d'aider à la pluridisciplinarité et de fournir des données homogènes aux modélisateurs.

LE CONTEXTE EUROPEEN (revue bibliographique)

Conscients de l'importance de l'enjeu, nombreux sont ceux qui se demandent ce que recouvre la notion de qualité des sols. Il est certain que ce concept évoluera, se précisera dans les années à venir au fur et à mesure des réflexions et des discussions. Aujourd'hui, il semble qu'un consensus se dégage pour définir la qualité d'un sol comme la capacité du sol à fonctionner dans un écosystème donné et pour une utilisation

donnée, à supporter une production végétale, à contribuer à un environnement de qualité et à favoriser la santé des plantes, des animaux et des humains. Le concept de qualité d'un sol peut être complété par sa résilience, c'est à dire la capacité d'un système en équilibre à retrouver un nouvel équilibre "pas trop éloigné du précédent" après une perturbation. La qualité des sols constitue un des indicateurs essentiels de la gestion durable d'un territoire. A noter que les expressions "qualité des sols" ("soil quality") et "santé des sols" ("soil health") sont synonymes pour la plupart des auteurs (Acton et Gregorich, 1995; Blum et Aguilar Santelises, 1994; Chaussod, 1996; Doran, 1996; Doran et Parkin, 1994; Doran et al., 1998).

Les réseaux de suivi de qualité des sols existant en Europe se répartissent en deux grands types (Arrouays et al., 1998; Bornand, 1997) :

1. Des réseaux avec de nombreux sites (quelques centaines). Deux logiques de localisation des sites sont alors possibles : les sites (1) sont positionnés selon un schéma préétabli (ex : selon une grille régulière) ou (2) sont disposés en fonction de l'information dont on dispose déjà (type de sol, utilisation des terres, type supposé de dégradation etc.) - en Anglais : "design-based inference" par opposition à "model-based inference" (Edwards, 1998).

Un petit nombre de prélèvements de terre sont effectués en chaque site et, le plus souvent, les analyses sont réalisées sur un échantillon composite par site. C'est la manière la plus simple de couvrir le territoire. La mise en œuvre de ce type de dispositif peut être rapide si l'on dispose d'un important budget d'investissement et si une équipe nombreuse peut être mobilisée. Cette approche fournit des états des sols, notamment sous forme de cartes à l'aide de systèmes d'information géographiques informatisés (Howard et al., 1995). Cependant, elle présente un inconvénient majeur : ne pas permettre, à elle seule, le suivi précoce des évolutions des sols. En effet, les phénomènes spectaculaires que l'on peut détecter par une comparaison synchronique sommaire ne sont pas la règle pour les sols. Il s'agit le plus souvent d'évolutions suffisamment lentes et discrètes pour que leur observation exige une comparaison diachronique fine. Pour ce faire, il faut pouvoir interpréter des différences entre des résultats provenant de campagnes successives, c'est à dire pouvoir dire si les différences constatées peuvent être attribuées à une évolution véritable ou si elles sont simplement explicables par l'hétérogénéité spatiale et par la variabilité analytique. Une telle démarche exige, en chaque site, une étude statistique approfondie avec un nombre suffisant d'échantillons. On comprend aisément que, pour des raisons financières, cette option n'est généralement pas envisageable sur plusieurs centaines de sites.

2. Les sites sont relativement peu nombreux (quelques dizaines) mais font, chacun, l'objet d'un important programme de mesures et d'observations avec, en particulier,

des analyses réalisées sur des échantillons de terre prélevés séparément. Les sites sont sélectionnés selon des critères variés. Certains de ces critères sont reliés aux processus susceptibles d'être suivis (type de sol, utilisation des terres, type d'évolution présumée etc.). D'autres critères de choix relèvent de l'opportunité à établir un site (proximité d'un laboratoire adéquat, maîtrise foncière, site déjà étudié dans un autre réseau etc.). Les stratégies d'échantillonnage à mettre en œuvre et les informations à recueillir sur chaque site sont choisies dans le but de suivre certaines évolutions des sols et de comprendre les processus correspondants. Mais une question fondamentale se pose alors : que représente chaque site à part lui-même ? On verra que l'essentiel de nos recommandations de développement de l'OQS concerneront cet aspect du problème. Dans un tout autre ordre d'idée, il convient de noter que de telles opérations sont vulnérables car leur efficacité repose sur la durée des financements et des soutiens institutionnels.

Un troisième type d'approche de la qualité des sols, très différent des deux précédents, est fondé non pas sur des réseaux de mesure mais sur des enquêtes auprès du monde agricole (fermiers, agronomes...) et sur des cartes pédologiques à large échelle. Les informations recueillies, essentiellement d'ordre qualitatif, sont fondées sur des perceptions du sol liées à des pratiques professionnelles (ex : appréciation de la fertilité compte tenu des rendements). Cette méthode de dégrossissage convient avantagement aux régions pour lesquelles on ne dispose a priori que d'une information modeste ou très hétérogène sur les sols. Elle est relativement peu onéreuse puisqu'elle permet de réduire la quantité de mesures. Et surtout, du fait de la forte implication du monde agricole qu'elle suppose, elle place directement le concept de qualité des sols dans celui, plus large, de gestion durable du territoire avec ses trois composantes - environnementale, économique, socioculturelle -. Il est certain que la mise en œuvre de telles enquêtes exige une démarche pluridisciplinaire. (Cazemier et al., 1998; Lefroy et al., 1998).

Dans bien des cas, la télédétection constitue un outil très précieux, notamment pour inventorier l'occupation des sols et estimer la nature des récoltes, du fait des couvertures exhaustives du territoire qu'elle fournit à un moindre coût. Ses limites résident dans les possibilités d'interprétation des informations qu'elle génère (King et al., 1995).

Pour l'instant, il ne semble pas y avoir, dans le monde, de systèmes mixtes qui intègrent les différents types d'approches. Outre les difficultés d'ordre institutionnel et financier inhérentes à ce genre d'opérations forcément complexes et à long terme, se posent deux vastes problèmes : (1) les changements d'échelles et (2) la mise en œuvre effective de la pluridisciplinarité. Ce sont là des défis majeurs sur lesquels nous reviendrons.

L'OQS A GRANDS TRAITES

Les choix structurants

Comme nous l'avons dit en introduction, les principaux objectifs de l'OQS ont été, depuis sa création, de détecter précocement des changements et de suivre les évolutions de la qualité des sols et, dans la mesure du possible, d'en comprendre les processus et d'en identifier les causes. Ces objectifs ont déterminé les choix fondamentaux qui ont été opérés, à savoir :

- la constitution d'un réseau de sites et le rassemblement d'un ensemble de méthodes et de connaissances permettant d'y suivre et d'y expliquer les évolutions des sols en optimisant le rapport efficacité/coût.

- le choix d'une échelle d'approche de l'ordre de l'hectare, c'est à dire qu'un site de l'OQS est constitué d'une parcelle ou d'une partie représentative d'une parcelle. Ce choix d'échelle d'approche a été dicté par la volonté d'avoir des sites (1) relativement homogènes et (2) présentant un caractère de représentativité fondé sur le type de sol, sur leur mode d'occupation, sur leur gestion (notamment les pratiques agricoles) et sur leur évolution supposée a priori.

Au fur et à mesure du développement de l'OQS, la réflexion s'est poursuivie à l'appui de l'expérience acquise et compte tenu de l'évolution du contexte scientifique et socio-politique international. Il est certain que l'état actuel de l'OQS constitue une étape et non un aboutissement.

L'OQS, tel qu'il a été mis en place jusqu'à présent, repose sur les composantes suivantes :

- un réseau de sites d'observation,
- sur chaque site, un programme de mesures et d'observations,

- un réseau de partenaires aux rôles et aux compétences complémentaires pour la gestion des sites et pour l'interprétation des résultats,

- un comité de pilotage composé de scientifiques et d'utilisateurs (précédemment un comité scientifique),

- un système d'information.

La localisation et la caractérisation des sites

Comme dit plus haut, l'OQS repose sur un réseau de sites d'environ un hectare chacun.

A leur création, les sites font l'objet d'une étude détaillée : contexte géographique, profil pédologique, fond pédogéochimique local (Baize, 1997). Puis, tous les cinq ans environ, sont mesurées les propriétés classiques des sols et leurs teneurs totales en éléments traces métalliques (tableau 1). Des bioindicateurs de la qualité des sols sont en cours de développement (microorganismes et macroinvertébrés). (Lavelle, 1988 a, 1988 b, 1993 ; Chaussod, 1996).

La plupart des sites de l'OQS ont fait l'objet de deux campagnes pendant ces dix dernières années.

La logique qui a sous-tendu le choix des sites de l'OQS, a reposé sur une quadruple volonté : (1) créer des sites dans des situations scientifiquement pertinentes, (2) correspondre à une demande ou à une préoccupation locales, (3) éviter les doublons et (4) assurer la pérennité des sites.

Cela a amené à prendre en compte quatre critères :

- le type de sol (au sens large),
- l'occupation des terres,
- le type et l'intensité des changements supposés de la qualité des sols,
- le contexte humain et le statut foncier.

Tableau 1 - Programme minimum des mesures et des observations communes à tous les sites

Table 1 - Minimum monitoring program carried out at each site

Lors de la création du site	Eléments-traces métalliques (cadmium, chrome, cobalt, cuivre, nickel, plomb, zinc).
Description générale du site (historique, contexte géographique...).	Densité apparente, épaisseur de la couche labourée en site agricole.
Etude pédologique détaillée.	Sur certains sites : Eléments radioactifs dans les sols (émetteurs gamma: potassium 40, césium 137...).
En continu	Sur certains sites
Evénements affectant le site (itinéraires techniques agronomiques, certaines entrées et sorties de produits polluants...).	Propriétés biologiques des sols (populations de vers de terre, biomasse et activité microbienne...).
Tous les cinq ans	Végétation naturelle et qualité des récoltes.
Propriétés classiques des sols (pH eau, granulométrie, carbone organique, azote total, capacité d'échange cationique, calcium, magnésium, potassium et sodium échangeables, phosphore, calcaire total).	

Le nombre de sites suivis a été fortement limité par le niveau restreint des crédits disponibles et par le manque de personnel. Aussi, certains sols très largement représentés en France n'ont-ils pas pu être inclus dans l'OQS (rendosols, calcosols, etc.) (figure 1, tableau 2).

Les stratégies d'échantillonnage

Nous appelons ici stratégie d'échantillonnage un ensemble d'opérations qui génèrent des données. Ces opérations com-

prennent l'élaboration du plan d'échantillonnage et l'échantillonnage stricto sensu mais aussi les procédures d'analyse, de conservation des échantillons et de gestion et de traitement des données. Une stratégie d'échantillonnage doit être conçue en fonction des objectifs de l'étude et des caractéristiques de l'objet étudié. (Frontier, 1983)

L'OQS a impliqué l'élaboration des stratégies d'échantillonnage qui permettent d'estimer des changements à long terme de la qualité des sols en s'affranchissant le plus possible de l'hétérogénéité spatiale du milieu, des fluctuations saisonnières et des incertitudes liées aux mesures, le tout au meilleur coût.

La stratégie d'échantillonnage de l'OQS a été mise au point en effectuant des essais et des simulations, c'est à dire en testant différents schémas de prélèvement et en effectuant des traitements statistiques sur tout ou partie des résultats. Les critères de jugement concernaient aussi bien la facilité de mise en œuvre sur le terrain que la qualité des conclusions auxquelles les traitements statistiques ont permis d'aboutir pour chaque configuration. Finalement, le plan d'échantillonnage retenu est du type hiérarchisé : systématique à l'échelle du site, aléatoire aux plus petites distances. Treize placettes sont positionnées aux sommets de deux hexagones concentriques et à leur centre. Au sein de chacune de ces placettes, quatre points de prélèvement ont été localisés de manière aléatoire et une fois pour toutes. Au total, des prélèvements sont donc réalisés en cinquante deux points (figure 2). Ce plan standard a été utilisé sur 9 des 11 sites actuels de l'OQS. Sur deux sites en forêt, des plans différents ont été suivis pour des raisons historiques : à symétrie concentrique sur le site n°7 et régulier à maille carrée sur le site n°6.

La profondeur de prélèvement correspond à la couche labourée en terrain cultivé et obéit à la logique des horizons pédologiques sous forêt. Les prélèvements sont effectués avec

Figure 1 - Les sites de l'OQS en 1998.

Figure 1 - OQS sites in 1998

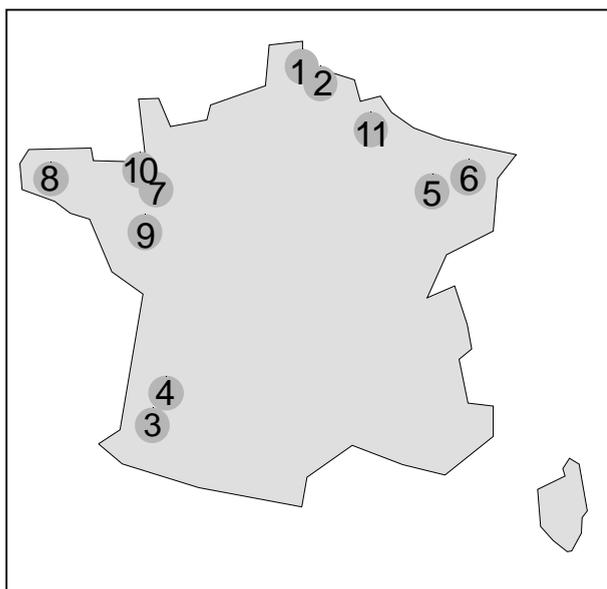


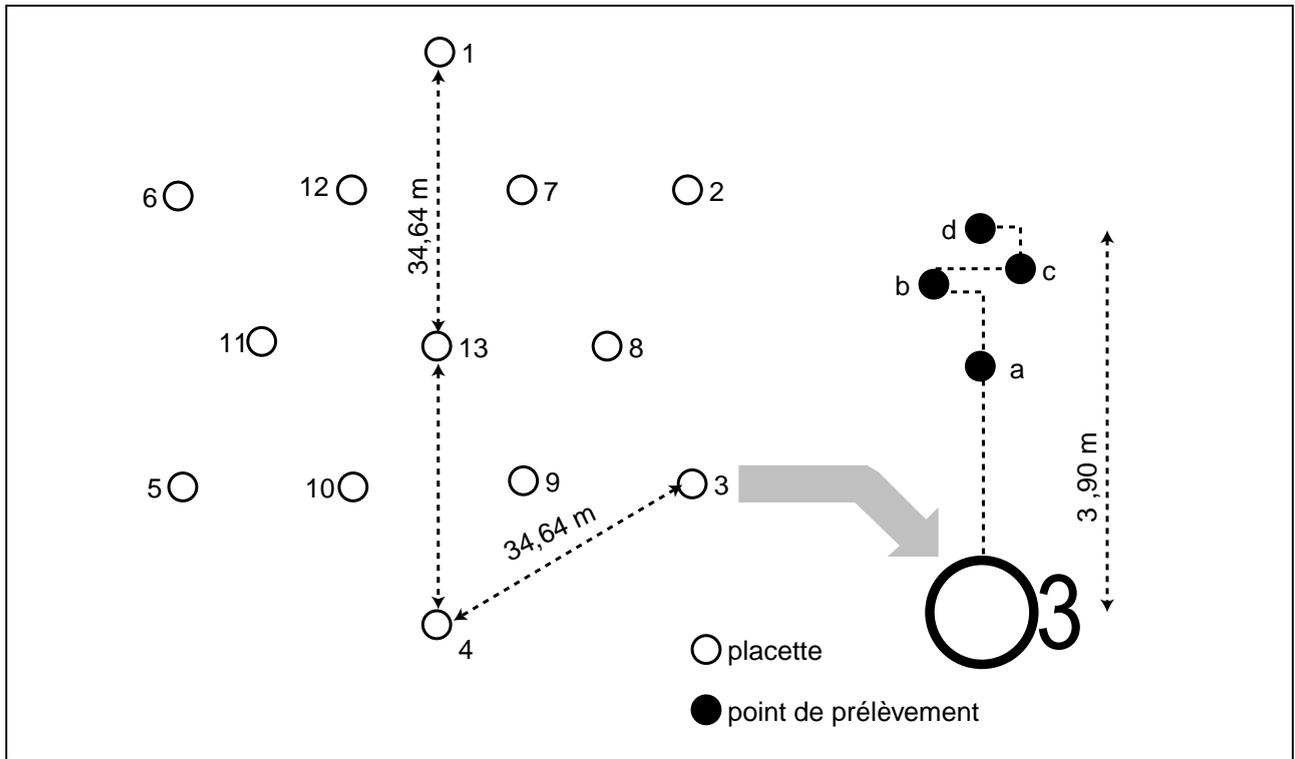
Tableau 2 - les sites de l'OQS en 1998

Table 2 - OQS sites in 1998

Département	Caractéristiques	Type de sol
1 Nord	Grandes cultures.	FLUVIOSOL BRUNIFIE argileux
2 Pas de Calais	Grandes cultures, sol très contaminé par des retombées atmosphériques	NEOLUVISOL REDOXIQUE limoneux en surface
3 Landes	Forêt.	PODZOSOL DURIQUE sableux
4 Landes	Grandes cultures.	BRUNISOL RESATURE luvique, sablo-limoneux
5 Vosges	Grandes cultures.	PSEUDOLUVISOL-PELOSOL
6 Vosges	Forêt.	ALOCRISEL TYPIQUE de brèche spillitique
7 Ille et Vilaine	Forêt.	ALOCRISEL TYPIQUE de granite à cordiérite
8 Finistère	Grandes cultures.	BRUNISOL OLIGOSATURE humifère, de schistes
9 Loire Atlantique	Grandes cultures.	BRUNISOL MESOSATURE appauvri en surface
10 Manche	Cultures maraîchères en polders.	THALASSOSOL limono-sableux, calcaire
11 Ardennes	Grandes cultures. Epandages de boues prévus.	NEOLUVISOL tronqué, argilo-limoneux, sur craie

Figure 2 - Plan d'échantillonnage sur les sites de l'OQS (13 placettes; 13x4=52 points de prélèvement)

Figure 2 - Sampling pattern at OQS sites (13 clusters; 13x4=52 sampling points)



une tarière décapée et en acier non traité. Chaque prélèvement pèse environ 2kg. (Baize, 1988).

Chaque site est doté de repères fixes (bornes en granit, angles de murs), rattachés à la représentation Lambert. Les prélèvements sont localisés avec une précision de l'ordre de dix centimètres.

Dans un souci d'économie, des analyses ne sont réalisées que sur 23 prélèvements. Les 29 autres sont stockés pour le cas où des informations supplémentaires seraient nécessaires. Pour trois prélèvements (parmi les 23), les analyses sont réalisées sur trois prises d'essai. Ainsi, au total, cela fait-il

systématiquement 29 ensembles d'analyses à chaque campagne (tableau 3).

Après la réalisation des analyses, les échantillons sont conservés, en bocaux de verre, dans une pédothèque.

Pour chaque variable, la moyenne et la variance sont calculées à l'échelle globale du site (l'hectare) et à l'échelle locale (de un à quelques mètres). L'homogénéité à l'échelle du site des variances locales peut également être testée. En outre, la variabilité interne au laboratoire est gérée de deux manières : (1) en estimant la variabilité à court terme ou répétabilité (dans une série analytique donnée) en réalisant, dans la même

Tableau 3 - Ensemble des prélèvements faisant systématiquement l'objet d'analyses sur une seule prise d'essai (x) ou sur trois prises d'essai (xxx)

Table 3 - Set of samples which are always analysed with one replicate (x) or with three replicates (xxx)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
a	x	x	x		x				x			x	x
b	x	x		x		x						x	
c	x	x				x				x		x	
d	x	x					xxx	xxx			xxx	x	

séquence de mesure, des analyses sur plusieurs prises provenant du même échantillon, (2) en s'affranchissant de la variabilité à long terme ou reproductibilité (entre deux séries analytiques correspondant à deux campagnes successives) en réanalysant les échantillons provenant de la première campagne en même temps que les échantillons de la deuxième campagne. Du fait que les prélèvements sont effectués à chaque campagne au même endroit en zone agricole ou à des emplacements très proches en forêt, il est possible de comparer les résultats de deux campagnes successives en procédant par tests appariés – c'est à dire par paire de prélèvements analogues - (Leprêtre et Martin, 1994 ; Ciesielski et al., 1997 ; Ciesielski et al., en prep.).

Les analyses sur les prélèvements fournissent des informations en termes de teneurs. Des raisonnements en termes de bilans demandent de disposer de données en termes de stocks dans le sol par unité de surface. C'est pourquoi les campagnes de prélèvement comprennent des mesures de la densité apparente du sol et de l'épaisseur de la couche labourée. Comme pour les prélèvements, ces mesures sont localisées précisément sur le terrain et donnent lieu à des analyses statistiques.

Les premiers résultats des deuxième campagnes permettent d'ores et déjà de tirer les enseignements suivants :

ζ Les niveaux élevés de variabilité spatiale des propriétés des sols, horizontales et avec la profondeur, que nous avons constatés sur les différents sites de l'OQS, ont confirmé que l'observation des évolutions lentes des sols exigeait de réaliser les prélèvements avec beaucoup de soin (localisation précise dans la parcelle, choix de la profondeur de prélèvement), ce qui a conforté les choix techniques initiaux (modalités de prélèvement, implantation de repères sur les sites...).

ζ Il est apparu très important de se méfier d'un problème dont l'ampleur était largement sous-estimée : une dérive à long terme (d'une campagne à une autre) des résultats d'analyses pour certaines variables. Cette variabilité s'expliquerait par l'emploi de nouvelles méthodes de mesure ou tout simplement par de légères modifications des conditions de laboratoire. Ce phénomène, quand il se produit, représente un biais systématique dont il est impératif de maîtriser les conséquences. C'est ce qui nous a conduits, comme nous l'avons expliqué plus haut, à compléter la stratégie d'échantillonnage de l'OQS en refaisant, à chaque campagne, des analyses sur des échantillons de la campagne précédente.

ζ Au total, la stratégie d'échantillonnage utilisée par l'OQS permet d'explorer de manière satisfaisante la variabilité des résultats à chaque campagne (variabilité analytique et variabilité spatiale à différentes échelles) et de déceler de faibles évolutions, d'une campagne à une autre, des paramètres mesurés.

La base de données de l'OQS

La base données de l'OQS a été élaborée en appliquant la méthode MERISE qui est basée sur la formulation "entité-association" (Tardieu et al., 1984). Cette base de données constitue une représentation particulière (ou un modèle) de l'OQS. Ainsi le modèle conceptuel des données de la base (figure 3) reproduit-il les concepts de "site", de "campagne", de "prélèvement", "d'ensemble d'analyses" sur un prélèvement donné, de "paramètre analysé", etc.

A noter que nous avons introduit le concept "d'ensemble de prélèvements" pour pouvoir traduire que certaines données se rapportent, pour une campagne donnée, à une partie seulement des prélèvements. Cela est le cas quand on calcule des moyennes et des variances pour des grappes du plan d'échantillonnage.

Le concept de "site multiple" a également été créé car la notion de site telle qu'elle est définie dans l'OQS sous-entend une homogénéité du site, en particulier au niveau du classement typologique. Or, un site peut devenir hétérogène et devoir être divisé si un changement de pratique culturale intervient sur une partie seulement de la parcelle (ex : épandage de boues sur la moitié de la parcelle). On peut aussi avoir besoin d'exprimer que plusieurs sites possèdent une propriété commune (ex : être situés sur un gradient de pollution dans le voisinage d'une source importante de fumées toxiques).

La base données de l'OQS a été développée et est gérée avec le logiciel ORACLE sous système UNIX. Les requêtes et l'actualisation des données sont réalisées sur PC en mode client-serveur en utilisant le logiciel Microsoft ACCESS.

Les descriptions des profils pédologiques sont conservées séparément dans la base existante DONESOL qui fonctionne aussi sous UNIX (Gaultier et al., 1993 ; Legros, 1996). Seules les références des profils pédologiques sont stockées dans la base de données de l'OQS.

Une base de données qui fonctionne dans un contexte scientifique doit pouvoir être facilement adaptée quand les concepts évoluent. Cela signifie que les investissements correspondant aux parties de la base susceptibles de changer souvent doivent être minimaux. Ainsi les procédures automatisées de traitement des données sont-elles volontairement succinctes. Il a été choisi de laisser les utilisateurs répondre eux-mêmes à leurs besoins de traitement. La base de données de l'OQS est un réservoir destiné à alimenter des traitements spécifiques, voire des modèles de simulation eux-mêmes sous forme de programmes informatiques. Il est actuellement prévu de réserver l'utilisation de la base aux partenaires de l'OQS et d'étudier séparément les demandes provenant de l'extérieur (Gaultier et al., en prep.)

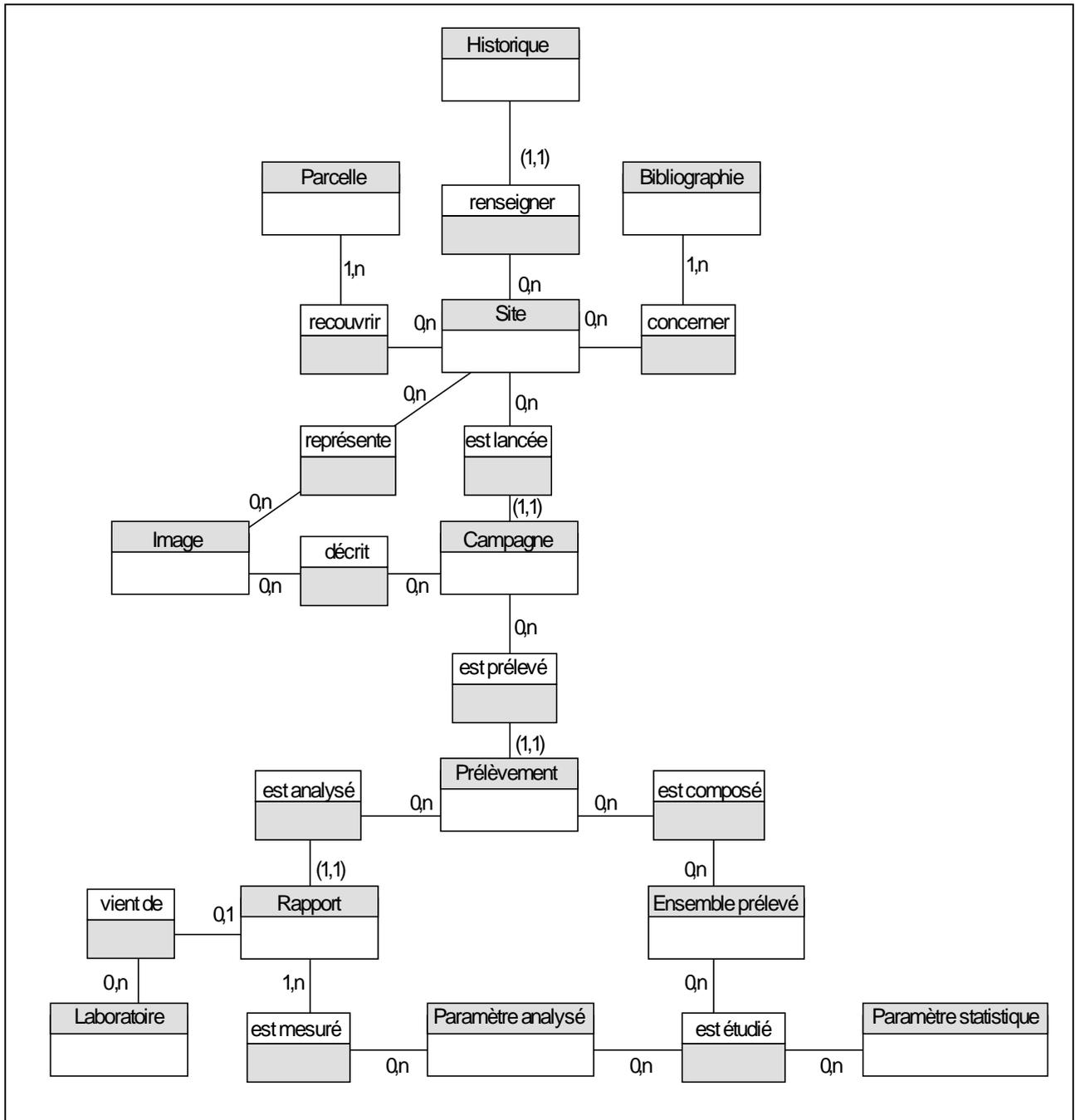
Exemples de résultats

Variabilité spatiale

Les estimations de plusieurs grandeurs statistiques obtenues

Figure 3 - Modèle conceptuel des données simplifié de la base de données de l'OQS

Figure 3 - Simplified conceptual model of the OQS data base.



nues pour le site n°2 de l'OQS sont portées au tableau 4. Il s'agit d'une parcelle agricole dans le voisinage d'une usine métallurgique et qui reçoit, depuis environ 70 ans, des poussières chargées en éléments traces métalliques.

Pour le cadmium et pour le plomb, il n'y a pas de diffé-

rences significatives entre les trois types de variance. Cela signifie que la variabilité liée à la mesure peut cacher une éventuelle variabilité spatiale des teneurs en cadmium et en plomb.

Pour l'argile, la variance globale est statistiquement plus gran-

Tableau 4 - Quelques estimations obtenues avec la stratégie d'échantillonnage de l'OQS sur le site n°2 (teneurs totales en cadmium, en plomb : mg.kg^{-1} ; teneur en argile : g.kg^{-1})

Table 4 - Some parameter estimates obtained with the OQS sampling strategy (cadmium and lead total contents in soil: mg.kg^{-1} ; clay content in soil: g.kg^{-1})

OQS 2	Cadmium	Plomb	Argile
Minimum	7,6	490	174
Maximum	9,5	584	192
Moyenne globale (site)	8,8	530	181
Variance globale	0,24	554	37
Coefficient de variation	0,056	0,044	0,034
Variance locale	0,26	376	8
Var, interne au laboratoire (répétabilité)	0,11	423	9

de que la variance locale. Cela indique que la répartition des teneurs en argile est autocorrélée, c'est à dire spatialement dépendante.

Evolution temporelle

Les estimations de plusieurs grandeurs statistiques obtenues pour le site n°8 de l'OQS sont portées au tableau 5. Il s'agit d'une parcelle agricole en Bretagne qui reçoit du lisier de porc.

On observe une augmentation significative des teneurs totales en cuivre et en zinc entre la première campagne en 1989 et la seconde en 1997 (Legros et al., en prep).

TENTATIVE DE BILAN ET REGARDS VERS LE FUTUR

Les principales avancées scientifiques et méthodologiques dues à l'OQS

Stratégies d'échantillonnage

L'objectif de suivi des évolutions des sols a requis l'élabora-

tion de stratégies d'échantillonnages adéquates. On s'est rendu compte à cette occasion qu'il n'était pas possible de proposer une stratégie polyvalente unique, une sorte de mécanique qu'il suffirait de mettre en route à chaque campagne. Seuls les plans de prélèvement peuvent relever d'un modèle standard à condition que les objectifs ne changent pas. Le reste de la procédure d'échantillonnage (choix des analyses, traitements statistiques, conclusions) doit être conduit à chaque fois par un statisticien en liaison étroite avec un pédologue.

Le patron standard, présenté à la figure 2, répond à l'objectif de suivi de propriétés abiotiques du sol à l'échelle d'une parcelle. Il permet de détecter l'existence d'éventuelles structures spatiales (taches, gradients, coupures...), ce qui est nécessaire dans l'optique d'un suivi. En revanche, si l'on souhaite connaître la répartition des propriétés abiotiques sur le site, le patron utilisé n'est pas forcément optimal. Il permet des investigations simples comme celles qui consistent à chercher si les prélèvements forment des groupes par une Analyse en Composantes Principales puis, tout simplement, à procéder à une analyse visuelle du plan du site sur lequel on a reporté les résultats des mesures. Le patron standard de prélèvement

Tableau 5 - Quelques estimations obtenues avec la stratégie d'échantillonnage de l'OQS sur le site n°8 (teneurs totales en cuivre et en zinc : mg.kg^{-1})

Table 5 - Some parameter estimates obtained with the OQS sampling strategy (copper and zinc total contents in soil: mg.kg^{-1})

OQS 98	Teneur moyenne en 1989	Teneur moyenne en 1997	Différence moyenne 1989 - 1997	Intervalle de confiance à 95 % de la différence
Cuivre (mg.kg^{-1})	31,83	35,28	3,45	2,65 - 4,25
Zinc (mg.kg^{-1})	96,86	107,10	10,24	8,34 - 12,14

n'autorise les géostatistiques avec krigeage que d'une manière limitée pour deux raisons : (1) aucune distance entre les prélèvements n'est inférieure à 70 cm ce qui risque d'induire un important "effet pépite" et (2) la densité de points de prélèvement est trop réduite pour fournir une connaissance spatiale détaillée du site. Si l'on souhaite adapter le patron standard de prélèvement à l'établissement de semi-variogrammes pertinents et au krigeage, il faut le compléter, au minimum, par des ensembles de prélèvements à plus courte distance, voire joints (Arrouays et al., 1996; Wopereis et al., 1988).

A la différence des propriétés abiotiques (ex : les teneurs en éléments traces métalliques) dont la répartition spatiale sur une parcelle donnée n'évolue, sauf cas particulier, que très faiblement d'une campagne à une autre, le suivi des propriétés biologiques des sols demande de comprendre les processus de structuration spatiale et de fluctuation dans le temps des populations. Ces processus peuvent parfois se produire selon des dynamiques d'auto-organisation, internes aux populations (Bascombe, 1998; Ranta et al., 1997). Les méthodes par krigeage s'avèrent alors très utiles. C'est le cas des populations microbiennes qui présentent des structures en taches susceptibles d'évoluer au cours du temps (Görres et al., 1997). Ainsi sur les sites 1 et 2 de l'OQS, des mesures de biomasse et d'activité microbienne ont-elles été effectuées en respectivement 92 et 29 points. Pour ce qui est du suivi des populations de vers de terre, les méthodes couramment utilisées, à base d'applications répétées d'une solution de formol sur quelques placettes de plusieurs mètres carrés, se sont révélées lourdes à mettre en œuvre, relativement destructrices pour l'environnement et surtout inopérantes lorsque les distributions des populations sont très agrégées ou lorsque les biomasses sont faibles comme en milieu cultivé (de l'ordre de 50 kg/ha de vers de terre en parcelle cultivées contre plus de 500 kg/ha en prairie). Une stratégie d'échantillonnage des populations de vers de terre a dû être mise au point : un grand nombre de prélèvements de sol sont effectués à la fourche et triés sur place. Les individus rencontrés sont comptés et séparés entre adultes et juvéniles. Le traitement des résultats comprend une procédure de krigeage qui permet de localiser les taches et les inter-taches dans la structure spatiale des populations (Rossi, 1992; Lavelle et al., 1998).

Variabilité analytique à long terme.

Certaines différences entre les résultats issus des deuxièmes campagnes sur les sites de l'OQS et les résultats obtenus lors des premières campagnes se sont avérés difficiles à expliquer (ex. : une baisse de 25 % en huit ans des teneurs en cobalt sur le site n°8). En réalisant de nouvelles analyses sur les échantillons issus de la première campagne, nous avons mis le doigt sur un phénomène dont l'ampleur était sous-estimée et à propos duquel la littérature est très discrète (voire muette) : une éventuelle dérive à long terme, d'une cam-

pagne à une autre, des résultats d'analyses pour certaines variables. Comme nous l'avons dit plus haut, la stratégie d'échantillonnage de l'OQS a dû être complétée en conséquence (Bonneau, 1997; Ciesielski et al. en prep). A noter que si ce phénomène est apparu de manière manifeste, c'est justement grâce à la précision de la méthodologie de l'OQS. On peut supposer que ce problème ne se pose pas seulement pour l'OQS mais chaque fois qu'il s'agit de suivre l'évolution des propriétés chimiques et physiques des sols. Il se posera en particulier pour le futur réseau européen de suivi des sols (Armstrong-Brown et al., 1998) ou dans le cadre du suivi des conséquences de l'épandage des boues de stations de traitement des eaux.

Indicateurs de qualité des sols

Dès sa création, l'OQS a posé de facto la problématique des indicateurs de qualité des sols. Le rapport de faisabilité parlait en 1983 de "critères permettant de caractériser l'état d'un sol et son évolution" (INRA, 1983). Le Comité Scientifique de l'OQS a précisé, en 1986, un programme minimum de mesures et d'observations à réaliser sur chaque site de l'OQS, en prenant en compte :

- l'état général des connaissances sur la structure et le fonctionnement des sols,
- ce que l'on savait a priori des problèmes de dégradation des sols,
- les possibilités techniques de mesure et d'observation,
- les capacités scientifiques à interpréter les résultats,
- les contraintes financières (Observatoire de la Qualité des Sols, 1988).

Il est évident que ce programme est provisoire et qu'il doit être complété et amélioré au fur et à mesure des avancées scientifiques et méthodologiques.

Il a été considéré que certaines recherches constituées en grande partie de mises au point méthodologiques pouvaient être supportées par l'OQS. C'est ainsi qu'en 1987 un groupe de travail constitué de biologistes du sol, d'écologistes et d'éco-toxicologistes, a été réuni sous l'égide de l'OQS sur le thème des indicateurs biologiques, avec la mission de préciser les directions à explorer par l'OQS. En considérant "qu'un indicateur biologique (ou bioindicateur) est un organisme ou un ensemble d'organismes qui – par référence à des variables biochimiques, physiologiques, éthologiques ou écologiques – permet, de façon pratique et sûre, de caractériser l'état d'un écosystème ou d'un écosystème et de mettre en évidence aussi précocement que possible leurs modifications, naturelles ou provoquées" (Blandin, 1986), le groupe de travail a estimé que, dans un premier temps, les efforts devaient porter sur les microorganismes du sol, sur les populations de vers de terre et, dans la mesure du possible, sur l'ensemble des macroinvertébrés du sol (Lavelle, 1988 a; Lavelle, 1988 b; Lavelle et al., 1998; Leprêtre, 1991).

Pour d'autres domaines, on a jugé que l'activité de l'OQS était subordonnée à des programmes de recherche extérieurs. C'est en particulier le cas des éléments traces métalliques dont seules les teneurs totales sont dosées dans le cadre de l'OQS alors que l'on sait que cette information, bien que nettement préférable à l'absence totale de mesure, ne suffit pas pour estimer les risques de transfert dans les végétaux et dans les eaux. Des déterminations plus riches en information que les teneurs totales en éléments traces devront être intégrées au programme de mesures de l'OQS quand les avancées scientifiques le permettront. D'autres domaines, comme le suivi des effets des molécules organiques toxiques, la qualité et la dynamique de la matière organique (Gregorich et al., 1994) ou le suivi de l'évolution des propriétés physiques des sols, n'ont pas encore été abordés par l'OQS.

La principale difficulté rencontrée : inscrire l'OQS dans la durée

En 1993, le rapport de l'expertise de l'OQS, réalisée à la demande du Ministère de l'Environnement, affirmait dans sa conclusion "que les difficultés rencontrées apparaissent plus comme résultant d'un contexte politique imprécis et mouvant et à des conditions de coordination difficiles faute de moyens suffisants, que comme le résultat d'une mauvaise gestion scientifique ou technique de l'OQS." (Mamy et al., 1993)

Suite à ce rapport, en décembre 1995, la gestion de l'OQS a été confiée à l'INRA par voie de convention. Un Comité de Pilotage, constitué à parts égales de représentants des pouvoirs publics, de scientifiques et de personnalités qualifiées extérieures a été mis en place à cette occasion. Parmi ses recommandations, le Comité de Pilotage de l'OQS a considéré que "compte tenu du fait que l'OQS s'inscrit nécessairement dans la durée, il faut mettre en place un système assurant la pérennité des hommes et des moyens, au moins pour 10 ans, et en visant 20 ans. Il est donc évident que le système actuel, provisoire, est particulièrement inadapté puisqu'il est basé sur une convention renouvelée tous les 18 mois." (Comité de Pilotage de l'OQS, 1997).

Malheureusement, l'OQS n'est toujours pas stabilisé et, qui plus est, la convention n'a pas été renouvelée à l'échéance. Six ans après leur publication, les conclusions du rapport d'expertise de 1993 semblent toujours d'actualité.

A l'opposé d'une attitude polémique stérile, il y a lieu de s'interroger sur les raisons des difficultés à doter une opération comme l'OQS d'une assise institutionnelle et de moyens financiers et humains suffisamment durables. Ce problème n'est pas propre à l'OQS mais semble le lot de nombre d'opérations à long terme décidées par les pouvoirs publics. Les réponses seraient probablement à chercher dans une analyse des mécanismes des prises de décisions administratives, du fonctionnement des institutions, des relations entre les institutions, des conséquences des

impératifs budgétaires, etc. Nous n'aborderons pas ce sujet qui demanderait d'autres compétences que les nôtres et relèverait, à lui seul, d'un autre article. Nous nous contenterons de raisonner en termes de conséquences.

Ainsi, comme nous l'avons dit, l'OQS se trouve-t-il par essence engagé dans trois problématiques de plus en plus d'actualité : (1) l'agriculture durable, (2) les approches systémiques et la pluridisciplinarité (ou interdisciplinarité?) et (3) le dialogue entre les chercheurs et les "utilisateurs". Or, chacune de ces questions réclame du temps :

- L'agriculture durable, parce qu'on ne connaît pas a priori de recette reproductible à l'infini, mais qu'il va falloir agir de manière progressive. On aura besoin de disposer de repères fiables sur l'évolution des milieux exploités par l'homme dans un contexte donné. Un exemple très concret : la loi d'Orientation Agricole du 9 Juillet 1999 introduit sur le plan juridique, fait nouveau en France, le concept de développement durable de l'agriculture. Il en résulte que les Contrats Territoriaux d'Exploitation, prévus par ce projet de loi, devront comprendre un volet environnemental. Comment y fera-t-on figurer la préservation des sols en termes d'objectifs? Comment utilisera-t-on de manière opérationnelle la notion de territoire?

- L'interdisciplinarité, parce que "au delà de la nécessité institutionnelle ou scientifique de l'interdisciplinarité, la volonté et le désir des chercheurs de participer au travail interdisciplinaire est un facteur essentiel de réussite de la démarche" (Zanoni et al., 1998). La motivation des chercheurs impliqués dans l'OQS, même si elle s'est avérée très forte, finit par s'émousser sur des remises en cause récurrentes de l'opération.

- Le dialogue entre les chercheurs et les utilisateurs, parce que "on aimerait trouver une démarche linéaire qui aille de l'inquiétude à la question sociale, de la question sociale à la question de recherche, de la question de recherche aux résultats de recherche. Malheureusement on a constaté qu'on se trouve dans un système d'interaction, dans le temps, entre différents acteurs (associations, élus, services publics, bureaux d'études, groupes professionnels, chercheurs, ingénieurs, techniciens, tous les métiers de la recherche) [...]" (Le Bars, 1994). Depuis l'origine, l'OQS a été immergé dans la profession agricole. Ainsi, cinq des onze sites actuels de l'OQS, sont-ils gérés par une Chambre d'Agriculture ou par un lycée agricole. Ces situations suscitent de fréquentes rencontres de terrain entre chercheurs et professionnels de l'agriculture. Ainsi également, en mars 1992, une journée "Qualité des sols" était-elle organisée conjointement par l'Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture et le Ministère de l'Environnement à partir de l'expérience de l'OQS. Des conférenciers issus de la recherche, de la profession agricole et de l'administration se sont succédé lors de cette réunion. Et ainsi, bien entendu, les Chambres d'Agriculture participent-elles au Comité de Pilotage de l'OQS. Ces multiples interactions entre différents acteurs sont fragiles. Elles supposent (1) du temps car ce sont des pro-

cessus relativement lents qui réclament des périodes de maturation, (2) une confiance de la part des uns et des autres en la volonté politique qui soutient l'opération et (3) du respect envers les différents points de vue exprimés.

Par ailleurs, il est facile d'imaginer les difficultés de gestion de l'OQS engendrées par l'instabilité du soutien institutionnel. Un exemple particulièrement significatif est donné par les sites de l'OQS dont la pérennité, en l'état actuel des choses, dépend exclusivement de la bonne volonté des propriétaires ou des gestionnaires des terrains concernés, faute de pouvoir établir les conventions adéquates. Et le problème se pose aussi bien pour les terrains privés que pour les terrains publics. Quant à la base de données de l'OQS, l'outil est opérationnel mais les modalités de fonctionnement ne peuvent en être fixées faute d'en connaître le cadre institutionnel et de savoir quel personnel lui sera affecté.

Vers un élargissement des missions et un développement de l'OQS ?

Jusqu'à présent, l'OQS a été conçu avec pour objectif principal la détection précoce et le suivi de l'évolution des sols dans un certain nombre de situations bien définies. Les travaux du Comité de Pilotage de l'OQS (1997) et des discussions internes à l'INRA permettent de proposer un élargissement des objectifs et des fonctions de l'OQS et de préciser quel devrait en être le développement correspondant. En supposant résolus les problèmes institutionnels, les problèmes de personnel et les problèmes financiers, les fonctions de l'OQS pourraient être les suivantes :

1. Diagnostiquer le plus tôt possible d'éventuelles évolutions défavorables des sols alors que celles-ci sont souvent masquées par une variabilité spatiale et par des fluctuations saisonnières naturelles (rôle de veille),

2. Apprécier l'ampleur géographique des phénomènes de dégradation, localiser les surfaces en cause, estimer la gravité des problèmes, prévoir les risques si les pratiques agricoles actuelles se perpétuent ; à l'inverse, évaluer les effets des efforts déployés dans le souci d'une agriculture durable (rôle d'expert),

3. Fournir aux responsables, à intervalles réguliers, une estimation de la qualité des sols du Pays et des tendances évolutives (rôle d'information sur l'état général des sols).

4. Favoriser l'interdisciplinarité (rôle d'animation scientifique). L'observation des évolutions puis l'analyse des causes, des modalités et des conséquences des évolutions constatées nécessitent de coupler approches holistiques et approches réductionnistes (Bouma, 1997). L'OQS ne peut pas prendre en charge, directement, l'étude de tous les problèmes rencontrés car cela voudrait dire qu'on lui donne le statut et les moyens d'un véritable organisme de recherche ! Mais, il lui appartient d'attirer à lui les chercheurs sur les problèmes qu'il a identifiés

comme importants et de favoriser l'étude des sites qu'il considère comme "modèles".

5. Rassembler et gérer l'information relative à la qualité des sols (fonction mémoire n°1). Compte tenu des objectifs de l'OQS, il est évident que sauvegarder, sur le long terme, les informations scientifiques acquises est au cœur de ses missions. Il est donc normal que l'OQS consacre des efforts aux bases de données. Cela a d'ailleurs été fait dans le passé, dès les débuts de la mise en place de l'Observatoire, et constitue actuellement une priorité. Il faut également créer des dossiers "papier" de sécurité. On peut aussi songer à l'utilisation d'Internet pour la mise à la disposition de tous publics d'un info-service sur l'évolution des sols.

6. Constituer un banque d'échantillons de sols (fonction mémoire n°2). L'ensemble des questions posées à l'OQS ne peut être anticipé. Les choix initiaux comportent une part hypothétique. Des précautions sont à prendre : une banque d'échantillons de sol permettra d'étudier en tant que de besoin les propriétés qui n'ont pas été prises en compte et dont les évolutions dans le temps doivent être estimées rétrospectivement. La contrainte est qu'il faut disposer d'un local de stockage de taille suffisante et adapté à la conservation des propriétés des sols.

7. Contribuer au dialogue entre les chercheurs et les "utilisateurs" (fonction de communication sociale).

8. Constituer un centre de test pour les méthodes d'échantillonnage, pour les indicateurs de qualité des sols et pour les logiciels de modélisation (fonction ressource méthodologique).

Nous recommandons le développement de l'OQS dans quatre directions (Legros et Martin, 1997 ; Martin, 1998 ; Martin et al., 1998) :

1. Une extension géographique en quatre niveaux :

- Quelques sites plus lourdement équipés pour l'étude de processus (par exemple : mesure des flux de polluants).

- Un réseau de sites permanents (quelques dizaines), comparables en gros aux sites actuels, afin de disposer, à terme, d'une image de l'essentiel des situations existant en France,

- Un réseau de sites servant d'ancrage à des enquêtes légères (quelques centaines) pour, à la fois, estimer l'étendue spatiale des changements qui ont été étudiés dans des situations locales, mieux positionner les sites permanents et constituer un système d'alerte. Ces enquêtes légères seront constituées d'interviews locales (agriculteurs, agronomes, pédologues...) et de mesures de terrain simplifiées.

- L'exploitation conjointe de l'information géoréférencée existante sur les propriétés des sols et sur l'occupation des sols. Pour cela, il faudra utiliser des SIG, des modèles et les fonctions de pédotransfert associées (Buche et al., 1992 ; King et al., 1995 ; Legros, 1996).

Il est certain que la conception de ce dispositif, sa mise en

route et son exploitation, en particulier l'intégration des différentes couches d'information qui en résulteraient, constitueraient un vaste sujet de recherche auquel devrait être consacrés des moyens suffisants. Les résultats de ces recherches seraient d'ailleurs susceptibles de remettre en cause la configuration de l'OQS que nous proposons.

2. Un développement thématique. Le programme actuel de suivi des sites pourra prochainement être complété par l'étude de certaines propriétés biologiques des sols. D'autres domaines devront être abordés dès que possible : l'appréciation des effets des pesticides et des autres molécules organiques préoccupantes, le suivi de l'état physique des sols et de l'érosion, la dynamique de la matière organique du sol, etc.

La problématique de l'agriculture durable conduit à devoir consolider la prise en compte des pratiques agricoles dans la caractérisation des sites de l'OQS avec, en particulier, l'intégration d'une typologie du fonctionnement des exploitations dans le choix des sites. (Landais, 1998 ; Landais et al., 1996).

La question des limites thématiques de l'OQS se posera indubitablement. On peut tout à fait imaginer que l'OQS voit son domaine considérablement élargi et évolue vers une sorte d'observatoire des écosystèmes terrestres comparable à "l'Environmental Change Network" britannique, géré par l'Institute of Terrestrial Ecology à Cumbria, ou au projet de "National Environmental Monitoring and Research Program" aux Etats Unis (Bricker et Ruggiero, 1998).

3. Un renforcement des liens avec les utilisateurs avec en particulier l'approfondissement des collaborations avec le milieu professionnel agricole, la diversification des applications de la base de données et la publication de documents thématiques.

4. L'établissement de liens effectifs avec d'autres réseaux sectoriels au niveau français, comme RENECOFOR pour les forêts (Bornand, 1997), et au niveau européen (Armstrong-Brown et al., 1998). Ces liens pourront aller du simple échange d'informations à la mise en commun de certains sites, en passant par des efforts d'harmonisation méthodologique.

CONCLUSION

Depuis 1985, l'OQS français a fonctionné à petite vitesse avec des moyens financiers et humains très limités. Ce n'est pas la faute des chercheurs impliqués qui ont fait ce qu'ils pouvaient avec les possibilités offertes. Ainsi un important savoir-faire a-t-il été accumulé et onze sites ont-ils été implantés, neuf d'entre eux ayant déjà fait l'objet de deux campagnes. Un assez grand nombre de publications scientifiques, actuellement en cours de rédaction, montreront quels résultats ont été obtenus.

Au plan de la qualité des sols, les résultats actuels portent sur l'évolution des teneurs en éléments trace métalliques (et,

pour les sites en forêt, en éléments échangeables), sur la répartition spatiale à l'échelle de l'hectare des propriétés des sols et sur l'établissement de références pour la mise au point de bioindicateurs.

Au plan méthodologique, l'expérience acquise en échantillonnage – prélèvements, traitements statistiques etc. – permet d'améliorer les procédés d'investigation.

Au plan stratégique et organisationnel, les travaux du Comité de Pilotage ont servi à définir et à planifier, dans leurs grandes lignes, les développements futurs. Des adaptations seront certes nécessaires mais en partant d'un acquis dont nous avons montré plus haut qu'il était important.

Au plan social, de nouveaux liens se sont tissés, sous l'égide de l'OQS, entre le monde agricole et la recherche. L'OQS fait désormais partie de l'horizon de l'encadrement technique agricole. C'est ainsi que des projets de soutien au développement durable de l'agriculture, actuellement en discussion dans les régions et les départements, prévoient dorénavant et déjà d'intégrer des sites de l'OQS à leurs dispositifs.

REMERCIEMENTS

Cet article est une des productions de "l'Observatoire de la Qualité des Sols" qui a été financé par le ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement et dont la gestion a été confiée à l'INRA.

BIBLIOGRAPHIE

- Acton D.F. et Gregorich L.J., 1995 – The Health of our Soils : Towards sustainable agriculture in Canada. Agric. Agri-food Can., CDR Unit, Ottawa, Canada.
- Armstrong-Brown S., Loveland P., Holman I., Arrouays D., Eckelmann W. and Vogel H., 1998 – A proposal for a European soil monitoring network : content, coverage and users. 16th World Congress of Soil Science, symposium 25, Montpellier, France, August 1998.
- Arrouays D., Mench M., Amans V. et Gomez A., 1996 – Short-range variability of fallout Pb in a contaminated soil. Canadian Journal of Soil Science, vol. 76, pp 73-81.
- Arrouays D., Vogel H., Eckelmann W., Armstrong-Brown S., Loveland P. et Coulter B., 1998 - Soil monitoring networks in Europe : A review. 16th World Congress of Soil Science, symposium 25, Montpellier, France, August 1998.
- Baize D., 1988 – Méthodologie relative au choix, au prélèvement et à l'étude pédologique préalable des sites de l'Observatoire de la Qualité des Sols. In : Manuel de l'OQS. Ministère de l'Environnement, Paris, France.
- Baize D., 1997 – Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Eds, 410p.
- Barbault R., 1990 - Ecologie générale. Structure et fonctionnement de la biosphère. Masson, Paris, 269 p.
- Bascombe J., 1998 – Spatiotemporal patterns in nature. Trends in Ecology and Evolution, vol.13, n°13, 5 mai 1998, pp173-174.
- Blandin P., 1986 – Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques.

- Bulletin d'écologie, tome 17, fasc. 4, pp. 215-307, France.
- Blum W.E.H. et Aguilar Santelises A., 1994 – A Concept of Sustainability and Resilience Based on Soil Functions : the Role of ISSS in Promoting Sustainable Land Use. In : Soil Resilience and Sustainable Land Use. Greenland D.J. et Szabolcs Eds., Cab International, pp 535-542.
- Bonneau M., 1997 – Observatoire de la Qualité des Sols du Donon. Résultats 1996. Rapport à la Commission Européenne, au ministère de l'Environnement et à la Région Alsace, 45 p. + ann., France.
- Bornand M., 1997 – Connaissance et suivi de la qualité des sols en France. Etat des lieux. Enjeux. Besoins en données. Propositions pour une gestion raisonnée de la ressource en sol. Rapport d'expertise demandé par les ministères de l'Agriculture et de l'Environnement et l'Institut National de la Recherche Agronomique, 176 p, France.
- Bouma J., 1997 – Soil environmental quality : a European perspective. J. Environmental Quality, vol 26, pp26-31.
- Bricker O.P. et Ruggiero M.A., 1998 – Toward a national program for monitoring environmental resources. Ecological Applications, 8(2), 1998, pp.326-329, Ecological Society of America ed.
- Buche P., King D. et Lardon S., 1992 – Gestion de l'espace rural et système d'information géographique. Séminaire de Florac, 22-24 octobre 1991, INRA, France.
- Catizzone M., 1998 – Faut-il établir un dialogue avec les utilisateurs? 16th World Congress of Soil Science, symposium 36, Montpellier, France, August 1998
- Cazemier D., Lagacherie Ph., Martin-Clouaire R. et Bornand M., 1998 – Cartographie de propriétés hydriques de sol à partir de l'information imprécise contenue dans une carte pédologique à petite échelle. 16th World Congress of Soil Science, symposium 17, Montpellier, France, August 1998
- Chaussod R., 1996 - La qualité biologique des sols : évaluation et implications. Etude et Gestion des Sols, 3(4), pp 261-277
- Ciesielski H., Proix N. et Sterckeman T., 1997 – Détermination des incertitudes liées à la méthode de mise en solution des sols et sédiments par étude interlaboratoire. Analisis Magazine, 25, pp 188-192.
- Ciesielski H., Leprêtre A., Martin S., Sterckeman T., en prep. – Analyses des sols : problèmes analytiques rencontrés et stratégies de mesures à mettre en place lors d'essais comportant des suivis à long terme.
- Comité de Pilotage de l'OQS, 1997 – Base de réflexion pour une Charte de l'Observatoire de la Qualité des Sols. In : Observatoire de la Qualité des Sols, compte-rendu intermédiaire des travaux (décembre 1997), INRA et ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, décembre 1997, pp : 25-41, France
- Doran J.W., 1996 – The international situation and criteria for indicators. In : Soil Quality Indicators for Sustainable Agriculture in New Zealand : Proceedings of a Workshop. Cameron K.C., Cornforth I.S., McLaren R.G., Beare M.H., Basher L.R., Metherel A.K. et Kerr L.E. Eds. Lincoln Soil Quality Research Center, Lincoln Univ., New Zealand.
- Doran J.W. et Parkin T.B., 1994 – Defining an assessing soil quality. In : Defining soil quality for a sustainable environment. J.W. Doran et al. Eds., Soil Sci. Soc. Am. Special Publication n°35, pp 3-21.
- Doran J.W., Liebig M. et Santana D.P. 1998 – Soil Health and Global Sustainability. 16th World Congress of Soil Science, symposium 26, Montpellier, France, August 1998.
- Edwards D., 1998 – Issues and themes for natural resources trend and change detection. Ecological Applications, 8(2), 1998, pp.323-325, Ecological Society of America eds.
- Frontier S. ed., 1983.- Stratégies d'échantillonnage en écologie. Masson (Paris) et PUL (Québec). 494p.
- Gaultier J.P., Legros J.P., Bornand M., King D., Favrot J.C. et Hardy R., 1993 – L'organisation des données pédologiques spatialisées : le projet DONESOL. Revue de géomatique vol.3 n°3/1993), pp 235-253, France.
- Gaultier J.P., Martin S. et Leprêtre A., en prep. – An information system for the French national "Soil Quality Observatory".
- Görres J.H., Dichiario M.J., Lyons J.B. et Amador J.A., 1997 – Spatial and temporal patterns of soil biological activity in a forest and an old field. Soil Biology and Biochemistry, vol.30, n°2, pp. 219-230 1997.
- Gregorich E.G., Carter M.R., Angers D.A., Monreal C.M. et Ellert B.H., 1994 – Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. Canadian Journal of Soil Science, vol. 74, pp 367-385.
- Howard P.J.A., Loveland P.J., Bradley R.I., Dry F.T., Howard D.M., Howard D.C., 1995 - The carbon content of soil and its geographical distribution in Great Britain. Soil Use and Management, 11 :9-15.
- Institut National de la Recherche Agronomique, 1983. - Etude de faisabilité d'un Observatoire de la Qualité des Sols, Ministère de l'Environnement, Paris : 112 p.
- King D., Jones R.J.A. et Thomasson A.J., 1995 – European land information systems for agro-environmental monitoring. Institute for remote sensing applications. European Commission, DGXIII, pub. Luxembourg.
- Landais E., 1998 – "Agriculture durable : les fondements d'un nouveau contrat social ?" Le courrier de l'environnement, avril 1998, n°33, p : 5-22. INRA, France.
- Landais E., C. Perrot, P. Pierret, J.L. Maigrot, C.Mignolet et E.Zanchi, 1996 – "Systèmes techniques agricoles, organisation de l'espace rural et production de paysage. Le projet MAP (Modélisation, Agriculture et Paysage)". Colloque Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement, session A, Paris 15, 16 et 17 janvier 1996, pp. : 105-114. France.
- Lavelle P, 1988 a - Assessing the abundance and role of invertebrate communities in tropical soils : aims and methods. J. Afr. Zool., 102, pp 275-283.
- Lavelle P., 1988 b – Paramètres biologiques à mesurer dans le cadre de l'Observatoire de la Qualité des Sols. Etude prospective. Rapport au Secrétariat d'Etat chargé de l'Environnement. 33p., France.
- Lavelle P, 1993 – le rôle de la faune des sols dans le maintien de leur qualité In : La qualité des sols. Chambres d'Agriculture, Special Publication, 817, pp 28-31, France.
- Lavelle P., Rossi J.P. et Martin S., 1998 – Propriétés biologiques des sols. Vers la mise au point de bioindicateurs de la qualité des sols basés sur la macrofaune. Rapport au Ministère de l'Environnement et à l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 21p. France
- Le Bars Y., 1994 – Demande sociale et programmation de la recherche. In : Compte-rendu "Environnement, recherche et société : enseignement, communication, culture, expertise". 29, 30 et 31 mars 1994 à Montpellier. Lettre du Programme Environnement du CNRS n°13, juillet 1994, p 57, France.
- Lefroy R., Bechstedt H.D. et Rais M., 1998 – Indicators for Sustainable Land Management based on farmers surveys in Indonesia, Thailand and Vietnam. 16th World Congress of Soil Science, workshop F, Montpellier, France, August 1998.
- Legay J.M., 1986 – Quelques réflexions à propos d'écologie. Défense de l'indisciplinarité. Acta Oecologica, Oecol. Gener., 1986, 7(4), pp 391-398.
- Legay J.M. et Barbault R., 1995 – La révolution technologique en écologie. Masson, Paris, 259p.
- Legros J.P., 1996 – Cartographies des sols, de l'analyse spatiale à la gestion des territoires. Presses polytechniques et universitaires romandes, 321p., Lausanne, Switzerland.
- Legros J.P., et Martin S., 1997 - L'Observatoire de la Qualité des Sols à l'aube d'un nouveau développement. In : Le sol, un patrimoine à préserver. Chambres d'Agriculture, Special Publication, 886, pp 45, France.

- Legros J.P., Martin S, Baize D., Rivière J.M. et Leprêtre A., en prep. – Cu and Zn enrichment in soils receiving swine slurry at a site of the French Observatory of Soil Quality at Gouézec (Finistère, France).
- Leprêtre A., 1991 – Elaboration des stratégies d'échantillonnage et d'analyse statistique des données concernant les propriétés biologiques des sols en vue de leur intégration dans le système d'information de l'Observatoire de la Qualité des Sols. Rapport au ministère de l'Environnement, 38p., France.
- Leprêtre A. et Martin S., 1994 - Sampling strategy of soil quality. *Analisis Magazine*, 33(3), pp 40-43.
- Lubchenco J., Olson A.M., Brubaker L.B., Carpenter S.R., Holland M.M., Hubbel S.P., Levin S.A., MacMahon J.A., Matson P.A., Melillo J.M., Mooney H.A., Peterson C.H., Pulliam H.R., Real L.A., Regal P.J. et Risser P.G., 1991 - The Sustainable Biosphere Initiative : an Ecological Research Agenda. *Ecology*. A publication from the Ecological Society of America. April 1991. Vol. 72 n°2, pp : 371-412.
- Mamy J., 1993 – Qualité, usages et fonctions des sols. In : La qualité des sols. Chambres d'Agriculture, Special Publication, 817, pp 6-7, France
- Mamy J, Bruckert S, Crouzet Ph, Lavelle P, Mariotti A., 1993 – Rapport d'expertise de L'Observatoire de la Qualité des Sols. Ministère de l'environnement, Direction de la Recherche et des Affaires Economiques et Internationales, octobre 1993, pp : 10 + annexes.
- Martin S., 1993 - The "Observatoire de la Qualité des Sols", an example of ecosystem monitoring. In : *Integrated Soil and Sediment Research : A Basis for Proper Protection*. Heijssackers H.J.P. et Hamers T., Eds, Kluwer Acad. Publishers, the Netherlands.
- Martin S., 1998 – L'Observatoire de la Qualité des Sols. In : *Sol interface fragile*, Stengel P. et Gelin S. coord., INRA éd., pp : 203-212, France.
- Martin S, Baize D., Bonneau M., Chaussod R., Gaultier J.P., Lavelle P., Legros J.P., Leprêtre A. et Sterckeman T, 1998 - The French National "Soil Quality Observatory". 16th World Congress of Soil Science, symposium 25, Montpellier, France, August 1998.
- Observatoire de la Qualité des Sols, 1988 – Manuel de l'Observatoire de la Qualité des Sols. Secrétariat d'Etat chargé de l'Environnement, juillet 1988, France.
- Ranta E., Kaitala V. et Lunberg P., 1997 – The Spatial Dimension in Population Fluctuations. *Science*, vol.278, 28 nov. 1997, pp 1621-1623.
- Rossi J.P., 1992 – Mise au point de méthodes d'échantillonnage de vers de terre en faible densité. Rapport au ministère de l'Environnement, 54p., France.
- Tardieu H, Rochfeld A et Colletti R., 1984 – La méthode MERISE : principes et outils. Les Editions d'Organisation, Paris, France.
- Wopereis M.C., Gascuel-Oudoux C., Bourrié G. et Soignet G., 1988 – Spatial variability of heavy metals in soil on a one-hectare scale. *Soil Science*, august 1988, vol. 146, n°2, pp : 113-118.
- Zanoni M., Pivot A., Vargas M., Raynaud C., Lesclure J.P. et Quensièrre J., 1998 –