

# Inventaire cartographique et surveillance des sols en France

## Etat d'avancement et exemples d'utilisation

D. King<sup>(1)</sup>, M. Jamagne<sup>(1)</sup>, D. Arrouays<sup>(1)</sup>, M. Bornand<sup>(2)</sup>, J.C. Favrot<sup>(2)</sup>, R. Hardy<sup>(1)</sup>,  
C. Le Bas<sup>(1)</sup> et P. Stengel<sup>(3)</sup>

(1) INRA, Unité de Science du Sol, SESCOF, Av de la Pomme de Pin, 45160 Ardon.

(2) INRA, UFR de Science du Sol, 2, place Viala, 34060 Montpellier Cedex 01

(3) INRA, Direction Scientifique Adjointe EFA, Site Agroparc, Domaine Saint Paul - 84914 Avignon Cedex 9

### RÉSUMÉ

Un bilan des principaux programmes de cartographie et de surveillance des sols est dressé pour le territoire français.

Le programme " Inventaire, Gestion et Conservation des Sols " (I.G.C.S.) à l'échelle du 1/250 000 vise un inventaire cartographique exhaustif tandis que le programme " Connaissance Pédologique de la France " (C.P.F.) au 1/100 000, comme les opérations Secteurs de Référence, se limitera dorénavant à des aires représentatives pour une connaissance plus détaillée des lois de distribution spatiale des sols.

La surveillance des sols est assurée, pour les surfaces forestières, par le programme RENECOFOR en lien avec le réseau " santé des forêts ". Par contre, dans le domaine agricole, le programme " Observatoire de la Qualité des Sols " (O.Q.S.) possède un nombre très limité de sites. Un nouveau programme du ministère de l'Environnement (GESSOL) vise à établir un dispositif de surveillance de la qualité des sols.

Ces différents travaux de cartographie et de surveillance des sols sont mis en perspective avec des programmes achevés ou en projet à l'échelle européenne. On constate que la France a investi des moyens modérés comparativement à ses voisins dans le domaine de l'inventaire des sols et encore moins dans celui de leur surveillance.

L'utilisation des informations est un point crucial pour répondre à la demande dans les domaines de la production agricole, de la gestion de l'espace rural et de la protection des ressources naturelles. Dans la plupart des cas, les bases de données " sols " sont croisées avec d'autres informations sur l'environnement. Les combinaisons sont réalisées grâce à des modèles couplés avec des Systèmes d'Information Géographique. Si les aspects méthodologiques ont fait des progrès considérables, on note encore de nombreuses difficultés à intégrer les informations sur les sols dans les processus de décision.

Les perspectives sont d'intégrer les programmes de cartographie dans un système multiéchelle, de renforcer les programmes de surveillance en zones agricoles et de mettre en œuvre une politique de large diffusion des informations auprès des décideurs mais aussi du public.

### Mots clés

Sol, cartographie, surveillance, base de données.

## SUMMARY

## SOIL MAPPING AND MONITORING IN FRANCE STATE OF PROGRESS AND EXAMPLES OF USE

The main French soil mapping and monitoring programs are reviewed. The Soil Inventory, Management and Conservation program (French acronym : I.G.C.S.) at scale 1 : 250,000 is mostly intended for an exhaustive mapping inventory of the country. On the other hand, the Pedological Knowledge of France program (French acronym : C.P.F.) at scale 1 : 100,000, like the "Reference Areas", is now restricted to representative areas for a better understanding of the nature of the spatial distribution of soils.

The RENECOFOR program, in conjunction with the "Forest Health" network, has been developed to monitor the soils of forested landscapes. Concerning agricultural land, however, the Soil Quality Observatory program (French acronym : O.Q.S.), only has a very small number of observation sites. A new Environment Ministry program (GESSOL) is intended to establish a soil quality monitoring system.

These different mapping and monitoring programs are being compared with programs, either completed or in progress, at the European scale. Compared with its European neighbours, France has made only moderate investments in terms of the soil inventory of the country and has accomplished even less in the field of soil monitoring.

The use of this information is crucial to meet the demands in the fields of agricultural production, the management of rural areas and the conservation of natural resources. In most cases the soil database information is used jointly with other type of environmental data. The data treatment is done with the help of models coupled with Geographical Information Systems. The methodology has made considerable progress but much remains to be done to integrate soil information to the decision making process.

Current perspectives are to integrate mapping programs in a nested system with maps at different scales, to strengthen monitoring programs in agricultural areas and to implement a policy of large dissemination of the information to the policy makers and to the public at large.

## Key-words

Soil mapping, monitoring, database.

## RESUMEN

## INVENTARIO CARTOGRÁFICO Y VIGILANCIA DE LOS SUELOS EN FRANCIA, ESTADO DE AVANCE Y EJEMPLOS DE UTILIZACIÓN

En el territorio francés se ha realizado un balance de los principales programas de cartografía y de vigilancia de los suelos.

El programa "inventario, gestión y conservación de los suelos" (IGCS) a escala 1/250.000 persigue un inventario cartográfico exhaustivo mientras que el programa "conocimiento pedológico de Francia" (C.P.F.) a 1/100.000, así como las operaciones Sectores de Referencia, se limitarán desde ahora a áreas representativas para un conocimiento más detallado de las leyes de distribución espacial de los suelos.

La vigilancia de los suelos, para las superficies forestales, está asegurada por el programa RENECOFOR ligado a la red "salud de los bosques". Por contra, en el dominio agrícola, el programa "conservatorio de la calidad de los suelos" (O.Q.S.) tiene un número muy limitado de emplazamientos. Un nuevo programa del ministerio del Medio Ambiente (GESSOL) busca establecer un dispositivo de vigilancia de la calidad de los suelos.

Estos diferentes trabajos de cartografía y de vigilancia de los suelos están confrontados a programas terminados o en proyecto a nivel europeo. En comparación con nuestros vecinos, se observa que Francia ha aportado medios moderados en los dominios del inventario de los suelos y todavía más moderados en el de la vigilancia.

El uso de las informaciones es un punto crucial para contestar a la demanda en los dominios de la producción agrícola, de la gestión del espacio rural y de la protección de los recursos naturales. En la mayoría de los casos los bancos de datos "suelos" se cruzan con otras informaciones sobre el medio ambiente. Las combinaciones están realizadas gracias a modelos acoplados a sistemas de informaciones geográficos. Si los aspectos metodológicos hicieron progresos considerables, se notan todavía numerosas dificultades para integrar las informaciones sobre los suelos en los procesos de decisión.

Las perspectivas son integrar los programas de cartografía en un sistema pluriescala, reforzar los programas de vigilancia en zonas agrícolas y desarrollar una política de larga difusión de las informaciones para que los que deciden pero también para el público.

## Palabras claves

Suelo, cartografía, vigilancia, base de datos.

Créé en 1968, le Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France (S.E.S.C.P.F.) assure au sein de l'INRA la coordination de la plupart des programmes de cartographie et de surveillance des sols sur le territoire français. Pour ce faire, il reçoit l'aide de nombreux autres organismes publics ou privés, partenaires de ces programmes : instituts de recherche (C.N.R.S., Universités), établissements d'enseignement supérieur agronomique (ENSA, INAPG, ENITA, ISA...), organismes professionnels de développement (Chambres d'Agriculture, Office National des Forêts), compagnies d'aménagement et bureaux d'étude. Les travaux sont menés à la demande et avec le soutien des ministères de l'Agriculture et de l'Environnement ainsi que des collectivités locales (conseils régionaux).

Le territoire français est composé de 56 % de terres agricoles, 28 % de surfaces boisées, 8 % de surfaces sans usage ou destinées à la protection des milieux naturels et enfin 8 % de milieux artificialisés (IFEN, 1998). Les tendances actuelles mettent en évidence un rythme d'artificialisation de près de 40 000 ha par an, soit l'équivalent d'un département français tous les dix ans. Cette évolution est certainement l'une des principales menaces sur les sols qui conduit à leur dégradation irréversible.

Les programmes de cartographie constituent un outil précieux de gestion des terres. Toutefois, on constate une diminution des moyens affectés à ces programmes parallèlement à une demande croissante, de plus en plus diversifiée et spécialisée sur les fonctions agronomiques et environnementales des sols. Un inventaire systématique du territoire ne suffit plus à répondre à ces demandes et l'on constate une multiplicité d'actions dont il faut assurer la coordination à l'échelle nationale en lien avec les programmes européens. En particulier, on note un besoin essentiel dans le domaine de l'évolution à moyen et long termes de la qualité des sols. L'objectif de cet article est de rappeler quelques unes des actions engagées et de montrer succinctement leur utilisation dans des programmes de gestion durable des ressources naturelles. Pour plus d'informations, une synthèse complète des travaux réalisés depuis 30 ans a fait l'objet d'un rapport pour les ministères (Bornand, 1997).

## CARTOGRAPHIE DES SOLS

Le programme " Connaissance Pédologique de la France " (C.P.F.) a permis, depuis plus de 25 ans, l'acquisition de très nombreuses données sur les ressources en sols de notre territoire et de connaissances fondamentales sur la typologie et la variabilité spatiale des principaux systèmes pédologiques (Jamagne et al., 1995). Ce programme a justifié la création du S.E.S.C.P.F. et a permis ainsi la constitution d'une plate-forme nationale de coordination et de concertation dans le domaine

de l'analyse spatiale des sols. Fin 1999, 26 feuilles à l'échelle du 1/100 000 étaient publiées et 14 feuilles supplémentaires étaient en préparation, couvrant environ 15 % du territoire (figure 1). Les moyens affectés à ce programme ne permettent pas d'envisager une couverture complète de la France à moyen terme. Il a donc été décidé de réorienter le programme C.P.F. en privilégiant une formalisation détaillée des lois de distribution des sols au sein de zones représentatives des principaux systèmes pédologiques français. Concrètement, cela signifie une informatisation des données acquises et un choix ciblé de nouvelles acquisitions dans des régions peu inventoriées. Les résultats de cette réorientation devraient ainsi servir de support scientifique pour des programmes d'inventaire ou de surveillance menés à des échelles plus globales.

Le programme " Inventaire, Gestion et Conservation des Sols " (I.G.C.S.) est mené par le ministère de l'Agriculture et l'INRA depuis 1990. Ce programme a pour premier objectif d'élaborer, dans chacune des régions françaises, un document cartographique et une base de données associée à l'échelle du 1/250 000 (Bornand et al., 1989, Jamagne et al., 1995). Actuellement, trois régions françaises sont achevées ainsi que douze départements. L'ensemble des régions engagées couvre environ 40 % du territoire (figure 2). La poursuite de cet inventaire au 1/250 000 est réalisé en concertation avec les programmes européens qui se mettent en place. Le second objectif de ce programme est d'étudier finement, à l'échelle du 1/10 000, des aires échantillons de petite superficie. Le suivi des fonctionnements agronomiques et environnementaux de ces zones fournit des références généralisables à des systèmes-sols analogues, répertoriés à l'échelle du 1/250 000 (Favrot et Lagacherie, 1993). Dans ces zones, le drainage a constitué le thème principal d'étude pendant de nombreuses années, au travers des opérations " secteurs de référence drainage " antérieures au programme I.G.C.S. (Favrot, 1987). De nouveaux thèmes sont actuellement abordés sur un nombre de secteurs plus limité qu'auparavant : citons par exemple, l'irrigation, le terroir viticole, l'agriculture de précision, l'épandage de boues, etc.

Ces deux programmes ne couvrent pas l'ensemble des activités. Plusieurs organismes régionaux ou nationaux ont initié des programmes d'inventaire typologique ou de cartographie à des échelles diverses : par exemple, la base de données sur les sols de la Région Centre au 1/50 000, la carte au 1/250 000 du département de l'Aisne (désormais informatisée), les cartes départementales des terres agricoles (C.D.T.A.), le catalogue des stations forestières (Dumé, 1995), etc. Par ailleurs, de nombreuses régions ou départements ont proposé, avant même d'avoir achevé leur territoire, des typologies de sols (Favrot et al., 1998) (figure 3). Cela fournit ainsi des synthèses régionales précieuses notamment pour le conseil agronomique. Enfin, il faut mentionner de nombreuses initiatives locales à l'origine d'études dont il est difficile de capitaliser les

informations. Ces travaux, non coordonnés au plan national, représenteraient d'après Bornand (1997) plus du double des investissements financiers réalisés dans les programmes nationaux cités précédemment. Un catalogue réunissant un grand nombre de ces travaux a été réalisé à partir des documents d'archives collectés (Favrot, 1994; Hardy et al., 1999).

## SURVEILLANCE DES SOLS

Il existe principalement deux réseaux de surveillance des sols sur le territoire français : (1) l'Observatoire de la Qualité des Sols (O.Q.S.) qui privilégie le suivi à long terme des sols cultivés ou des espaces naturels non forestiers et (2) le programme RENECOFOR qui concerne les espaces forestiers.

Le principal objectif de l'O.Q.S. est d'évaluer la situation présente des sols et de développer une politique pour leur protection (Martin, 1993). Onze sites d'environ 1 ha ont été choisis en fonction de quelques principaux types de sol et d'utilisation des terres (figure 4). Un minimum de paramètres sont mesurés systématiquement sur chacun des sites. Pour des problèmes de dégradation spécifique, d'autres mesures ne sont réalisées que sur quelques sites : par exemple, fraction légère en C et N, C et N minéralisables, biomasse microbienne, enzymes du sol, vers de terre. Le pas de temps recommandé a été de cinq années mais a atteint 10 ans pour plusieurs sites.

Quelques premiers résultats ont montré des évolutions diverses selon les sites. Dans un site agricole, il a été observé une augmentation significative en carbone organique et en métaux lourds (Cu, Zn) due à des applications continues de lisier de porcs. Dans un sol brun acide sous une forêt d'épicéas, une décroissance des éléments totaux dans la litière ainsi que des éléments échangeables dans les horizons organo-minéraux est notée. Cette diminution pourrait avoir des conséquences graves pour la nutrition des arbres dans le futur. Une décroissance du plomb dans la litière peut être considérée comme un signe encourageant de la dépollution des carburants. D'autres travaux sont en cours sur la définition d'indicateurs biologiques et sur les stratégies d'échantillonnage pour l'estimation de la biomasse microbienne et la détermination de la faune du sol. Enfin, un travail a été mené sur la variabilité analytique à long terme. Il met en évidence des dérives notables dues à des changements opératoires ou technologiques. Ce travail plaide fortement en faveur de la conservation des échantillons au sein d'une pédothèque.

Le programme RENECOFOR est un réseau de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (figure 4). Il a été créé par l'Office National des Forêts (O.N.F.) en 1992 afin de compléter le système de surveillance sanitaire des forêts (Ulrich, 1995). Il constitue la partie française d'un ensemble de placettes permanentes installées dans 34 pays européens. Il couvre des domaines très variés sur le suivi du peuplement forestier. Pour

le sol, deux profils pédologiques sont systématiquement décrits et analysés. Un suivi pluriannuel de plusieurs paramètres est réalisé selon un plan d'échantillonnage standard. Dans le cadre du sous-réseau Cataenat (charge acide totale d'origine atmosphérique), les dépôts atmosphériques sont mesurés dans 27 placettes depuis 1993, et des mesures sont effectuées sur les solutions de sol à 20 et 70 cm de profondeur dans 17 placettes. Ce réseau a ainsi mis en évidence l'apport considérable d'azote par les pluies (de 4 à 15 kg/ha/an) (Ulrich et al., 1998).

D'autres réseaux de surveillance ont été mis en place et impliquent les sols. Toutefois, ceux-ci concernent surtout les autres composantes du milieu, tout particulièrement les ressources en eau. Par ailleurs, des moyens ont été mis en œuvre pour structurer des analyses de sols réalisées individuellement ou au sein de programmes spécifiques (cf. paragraphe suivant à propos de la Base Nationale des Analyses de Terre - B.N.A.T.- et du programme ASPITET). Ces données, repérées dans l'espace et dans le temps, fournissent des indications sur les évolutions à moyen et long termes. Un projet est à l'étude afin de pérenniser une collecte systématique de ces données auprès des laboratoires concernés.

## BASES DE DONNÉES SUR LES SOLS

Depuis 1990, une structure unique de base de données a été adoptée pour l'ensemble des programmes harmonisés au plan national. Ce système, nommé DONESOL, comprend trois volets (Gaultier et al., 1993) :

- (1) les données ponctuelles qui correspondent aux observations et mesures réalisées sur les profils pédologiques.
- (2) les données descriptives des unités cartographiques de sols qui sont des données d'expertise décrivant les unités typologiques de sols et les horizons. Des données complémentaires rendent compte de la variabilité spatiale au sein de ces entités. Les contours digitalisés sont inclus dans un SIG couplé avec DONESOL.
- (3) les " métadonnées " qui indiquent les références bibliographiques des études ainsi que leur localisation et leur degré de précision. Un effort tout particulier a été entrepris ces dernières années pour recenser l'ensemble des études pédologiques réalisées à une échelle détaillée (Favrot, 1994). Ce recensement vient d'être complété par les études aux moyennes et petites échelles (Hardy et al., 1999). Enfin, un répertoire des professionnels en cartographie et expertise pédologique a été publié (Favrot et al., 1998).

Une présentation des programmes de cartographie et de surveillance est disponible sur l'infoservice de l'INRA d'Orléans (<http://www-sescpf.orsleans.inra.fr/public/>). L'objectif est de développer ce site, en particulier en y incluant les métadonnées du point (3) présentées ci-dessus.

D'autres bases de données ont été élaborées en lien ou en parallèle avec la base DONESOL. Contrairement aux programmes précédemment cités, ces bases ont été constituées dans le cadre de projets de recherche ciblés. Nous citerons quatre d'entre elles : ASPITET, SOLHYDRO, B.N.A.T. et CARBONE-FRANCE.

ASPITET - L'INRA a lancé en 1994 un programme de recherche intitulé "Apports d'une Stratification Pédologique pour l'Interprétation des Teneurs en Éléments Traces" (Baize, 1997). L'objectif était d'acquérir des références sur les concentrations naturelles en éléments traces dans les sols. Ce travail a été réalisé en tenant compte des types de sols et des matériaux géologiques parentaux. Les sites forestiers ont été privilégiés car supposés pratiquement indemnes d'apports d'origine anthropique. La population étudiée à ce jour (fin 1999) est constituée de 1310 horizons pédologiques correspondant à 706 sites distincts. Pour chaque échantillon, ont été déterminées les concentrations totales en éléments traces (toujours Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, souvent As, Co, Hg, Se, Tl). Ces données montrent que le degré général de contamination par les activités humaines demeure très faible comparé aux stocks des éléments traces naturels dans les sols. Il y a cependant trois types d'exception en zones cultivées : (i) les zones de vignes et d'arboriculture presque toujours contaminées par du cuivre, (ii) des parcelles ayant reçu des épandages de boues très chargées en "métaux lourds" (iii) des parcelles situées à proximité d'usines traitant des minerais (pollution par voie atmosphérique d'origine proche).

SOLHYDRO - En 1998, un projet a été initié pour constituer une base de données analytiques sur les propriétés hydrauliques des sols de France. Les objectifs de cette base sont : (i) de réunir toutes les données mesurées sur ces propriétés par les différents laboratoires de recherche, ainsi que toute donnée analytique ou descriptive complémentaire, (ii) de mettre à disposition des chercheurs ces données afin de comparer les méthodes de mesure et d'élaborer des fonctions de pédotransfert tenant compte de la diversité des sols du territoire français, (iii) d'élaborer des références reconnues au plan national par les utilisateurs. Des liens seront assurés entre cette base, DONESOL et le système européen HYPRES (Wösten et al., 1999).

B.N.A.T. - Plus de 200 000 analyses de sols sont pratiquées chaque année par des particuliers. Une étude de faisabilité a été entreprise sur les années 90-94 dont le but était de recueillir ces informations et de les intégrer dans une base de données intitulée Base Nationale des Analyses de Terre (Schvartz et al., 1997). Les données ont été ensuite agrégées par commune et par canton afin de protéger les droits des propriétaires d'analyses. Chaque variable peut s'exprimer sous forme de cartes ou de tableaux statistiques (Walter et al., 1997). Ces documents ont ainsi permis de confirmer des structures spatiales souvent connues mais jamais encore

quantifiées, tout particulièrement pour des variables difficiles à appréhender dans des travaux de cartographie conventionnelle (Schvartz et al., 1998). L'intérêt de cette base réside dans les possibilités ultérieures d'analyse permettant le suivi temporel des propriétés des sols. Un grand nombre d'années sera bien entendu nécessaire pour déceler de telles évolutions.

ADEME-INRA - La collecte et la structuration de données analytiques réalisées par des particuliers est une source précieuse pour des synthèses régionales ou nationales. Citons en plus de la B.N.A.T., le programme ADEME/INRA qui a recueilli de 1992 à 1997 près de 12 000 analyses de "métaux lourds" provenant d'études préalables à l'épandage des boues de station d'épuration. Les cartes éditées permettent de visualiser la qualité générale des sols agricoles et de faire apparaître les zones d'anomalies soit naturelles, soit liées à des pollutions localisées (Baize et al., 1999).

CARBONE-FRANCE - En 1997, à l'initiative de la mission interministérielle sur l'effet de serre, l'INRA a entrepris de constituer une base spécifique concernant les données ponctuelles de stocks de carbone des sols de France. A ce jour, cette base comprend environ 8 000 points de mesure inégalement répartis sur le territoire. Elle a permis une première évaluation cartographique et une estimation globale des stocks de carbone à l'échelle du pays (Arrouays et al., 1999).

## COMPARAISON AVEC LES PAYS D'EUROPE ET LES PROGRAMMES DE L'UNION EUROPÉENNE

### Les pays d'Europe

L'Europe, au sens géographique, est constituée d'un grand nombre de pays dont l'histoire scientifique et politique a produit une large diversité d'approches dans les domaines de l'inventaire et de la surveillance des sols. Il serait trop long et fastidieux de détailler l'état d'avancement des travaux dans chacun des quelques 30 pays du continent européen. On pourra se reporter aux documents issus de rencontres régulières entre les responsables des centres de cartographie et de base de données sur les sols en Europe (Le Bas et Jamagne, 1996; Heineke et al., 1998; Bullock et al., 1999).

Dans le domaine de l'inventaire des sols, on peut classer les pays en 3 grands groupes : (1) les pays du nord de l'Europe (en y incluant l'Allemagne, la Suisse et l'Autriche) qui possèdent une couverture systématique de leur territoire, souvent à échelle détaillée (1/20 000 en Belgique, 1/50 000 aux Pays-Bas) et organisée au sein d'un S.I.G., (2) les pays du sud de l'Europe dont les programmes d'inventaire sont très dispersés et rarement informatisés (il faut mentionner l'exception du Portugal qui a réalisé la moitié de son territoire à l'échelle

du 1/50 000 mais sans informatisation des données), (3) et enfin, les pays d'Europe Centrale et Orientale qui disposent d'une masse considérable d'information établie à des échelles très détaillées. Pour cette dernière catégorie, les données sont issues des anciens programmes de gestion collective des terres. Beaucoup de ces données sont des documents papier, pas toujours harmonisés à l'échelle nationale et souvent en dehors des standards internationaux. Les SIG se développent progressivement mais de façon inégale selon les pays.

Notons par ailleurs que nombre de pays sont des fédérations et que les régions jouent un rôle premier dans la gestion des espaces ruraux. C'est le cas de l'Allemagne, de l'Espagne, de l'Italie, également du Royaume-Uni. On observe au sein de ces pays des différences très fortes entre les inventaires pédologiques des régions. La France est l'un des rares pays à avoir un système centralisé et à avoir conservé au cours des 30 dernières années un souci de coordination nationale (I.G.C.S., DONESOL). Par contre, la France a une position intermédiaire entre les 3 catégories présentées. Son inventaire couvre environ la moitié du territoire avec une informatisation devenue systématique. En tant que premier producteur agricole d'Europe, ce bilan reste modeste comparativement aux pays les plus dynamiques.

Dans le domaine de la surveillance des sols, on retrouve les mêmes catégories (Arrouays et al., 1998). Les pays du nord de l'Europe auxquels s'ajoutent également la Suisse et l'Autriche, possèdent des réseaux dont la densité d'observation dépasse 1 site par 1 000 km<sup>2</sup>. A l'inverse, la plupart des pays du Sud n'ont aucun réseau de surveillance. La situation est très variable dans les pays d'Europe Centrale et Orientale, les réseaux de surveillance étant issus des systèmes mis en place pour le suivi de la fertilité agricole. La France rejoint les pays européens les moins pourvus en réseau de surveillance, excepté le cas du réseau RENECOFOR inclus dans la surveillance des forêts.

## Les programmes de l'Union Européenne

L'Union Européenne constitue le principal pôle d'harmonisation des travaux internationaux. Elle ne limite pas son champ d'action aux 15 pays membres mais étend ses travaux à l'ensemble des pays du continent européen. Deux organismes ont été créés ces dernières années : (1) le Bureau Européen des Sols (B.E.S.) dont l'objectif est de promouvoir les travaux sur les sols, de proposer des méthodes harmonisées et de faciliter les échanges d'informations et (2) le Centre Thématique Européen pour les Sols (C.T.E./S.) qui s'intéresse au suivi environnemental de la qualité des sols. D'autres institutions internationales apportent également leur concours, notamment la FAO et l'ISRIC.

Le B.E.S. a lancé la création d'une base de données géographique des sols d'Europe à l'échelle du 1/1 000 000. Les travaux sont basés initialement sur la carte des sols d'Europe

publiée en 1985 (CEC, 1985). Dans un premier temps, les données ont été informatisées puis révisées par chacun des pays de l'Union Européenne (King et al., 1994). Dans un second temps, la démarche a été étendue à l'ensemble des pays du continent européen (Jamagne et al., 1995). Enfin, dans un troisième temps actuellement en progression, les Nouveaux Etats Indépendants européens ainsi que les pays du pourtour méditerranéen sont invités à participer à un projet d'extension géographique de la base de données.

L'élaboration d'une telle base de données a été le support de nombreuses autres activités. D'une part, il a fallu prévoir la diffusion de ces informations (Jones et al., 1998) et le développement de méthodes permettant leur utilisation, par exemple, dans le domaine des potentialités agricoles (Le Bas et King, 1997), des risques d'érosion, etc. D'autre part, cette échelle est insuffisante pour rejoindre les préoccupations régionales. Le B.E.S. a ainsi produit un manuel de référence pour l'établissement de bases de données sur les sols à des échelles plus détaillées (Finke et al., 1998; Finke et al., 1999). Plusieurs actions régionales au 1/250 000 sont en cours à l'aide de ce manuel. En France, un essai de transfert des données I.G.C.S. dans le système européen est en cours sur le département de la Côte-d'Or.

Un objectif affiché par le B.E.S. au travers des différents programmes entrepris est d'associer, au sein d'une approche multiéchelle, les résultats acquis au 1/1 000 000 avec ceux du 1/250 000, ainsi que ceux élaborés par les régions à des échelles plus détaillées (inventaire au 1/50 000 ou secteurs de référence).

Le C.T.E./S. appartient à l'Agence Européenne de l'Environnement qui a inscrit le sol comme l'une des ressources essentielles à protéger en Europe. Le C.T.E./S. a recensé l'ensemble des dispositifs de surveillance dans l'Union Européenne (Arrouays et al., 1998) et a proposé d'établir des méthodes et des sites communs (Armstrong et al., 1998). Par ailleurs, le réseau de surveillance des forêts a été mis en place grâce à deux programmes internationaux concernant la protection des forêts contre la pollution atmosphérique (Vanmechelen et al., 1997). Il est le seul réseau harmonisé capable de délivrer des données sur la qualité des sols à l'échelle européenne. Malgré cet effort d'harmonisation, on observe des différences notables entre les pays. La poursuite des travaux de standardisation des méthodes d'échantillonnage, de prélèvements et d'analyses reste une priorité.

Le sol est désormais reconnu par les instances européennes. De nombreuses initiatives voient le jour au sein de la Commission Européenne ou d'autres instances internationales. L'harmonisation des travaux est un point vital pour le futur de l'Europe, et les structures européennes en plein essor devront veiller à harmoniser leurs efforts. La France ne pourra pas éviter d'inscrire ses propres programmes dans le cadre de ce développement européen.

Figure 1 - Etat d'avancement 2000 du programme C.P.F. (1/100000)

Figure 1 - State of progress 2000 : CPF : (1/100000)

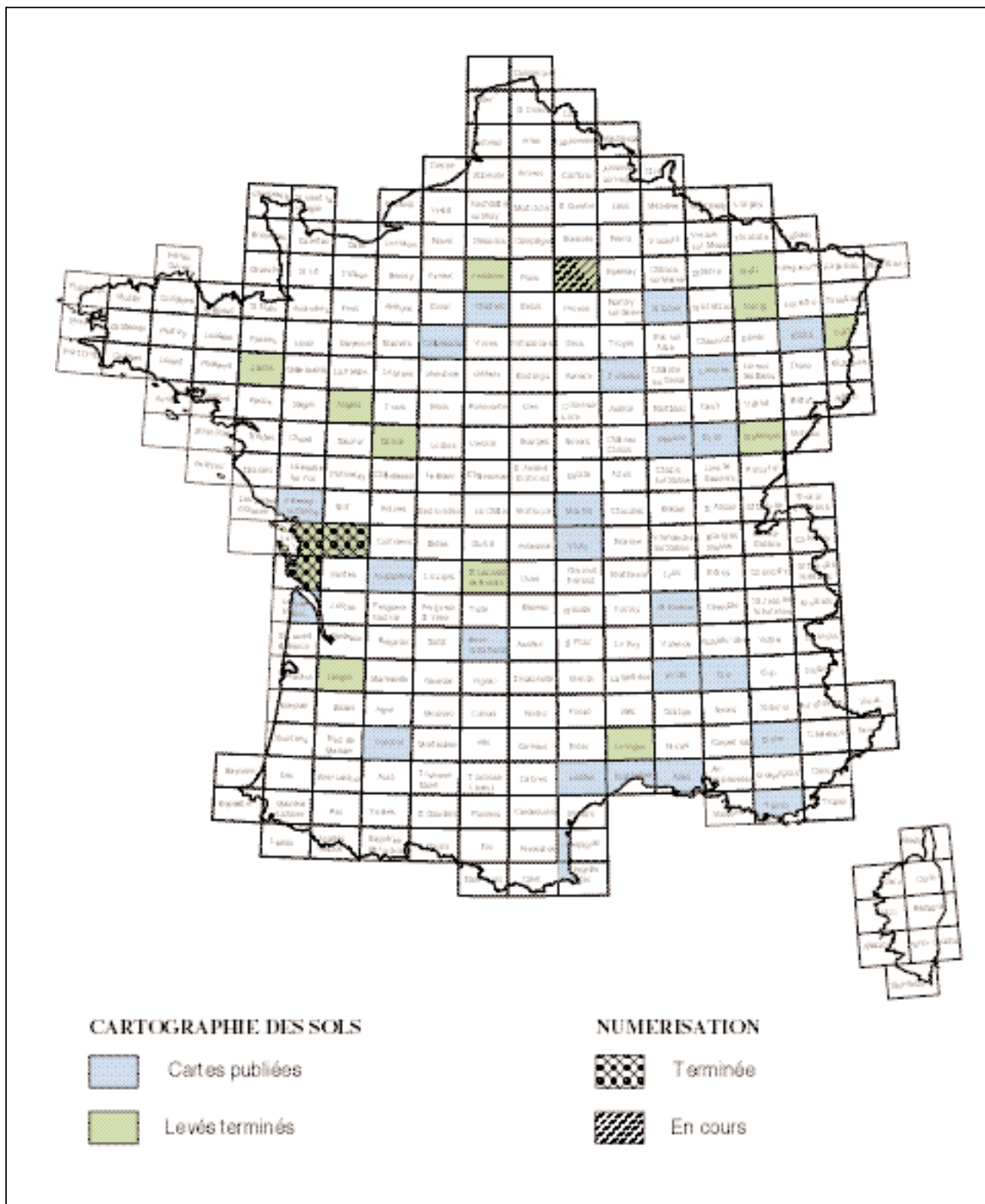


Figure 2 - Etat d'avancement 2000 du programme I.G.C.S. (1/250 000)

Figure 2 - State of progress 2000 : I.G.C.S. (1/250 000)

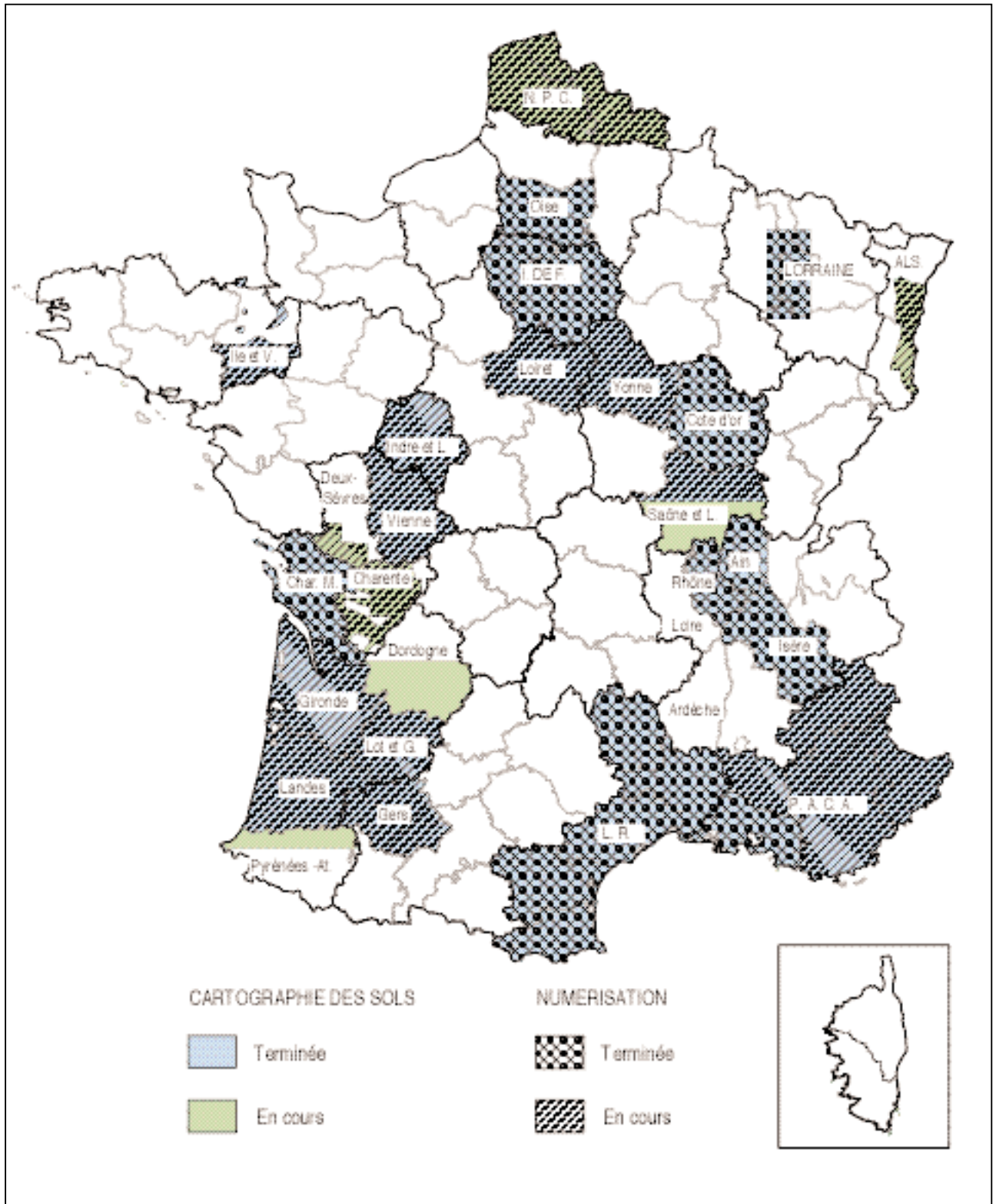




Figure 3 - Carte des typologies de sols (d'après Bornand, 1997)

Figure 3 - Sol typologies map (in Bornand, 1997)

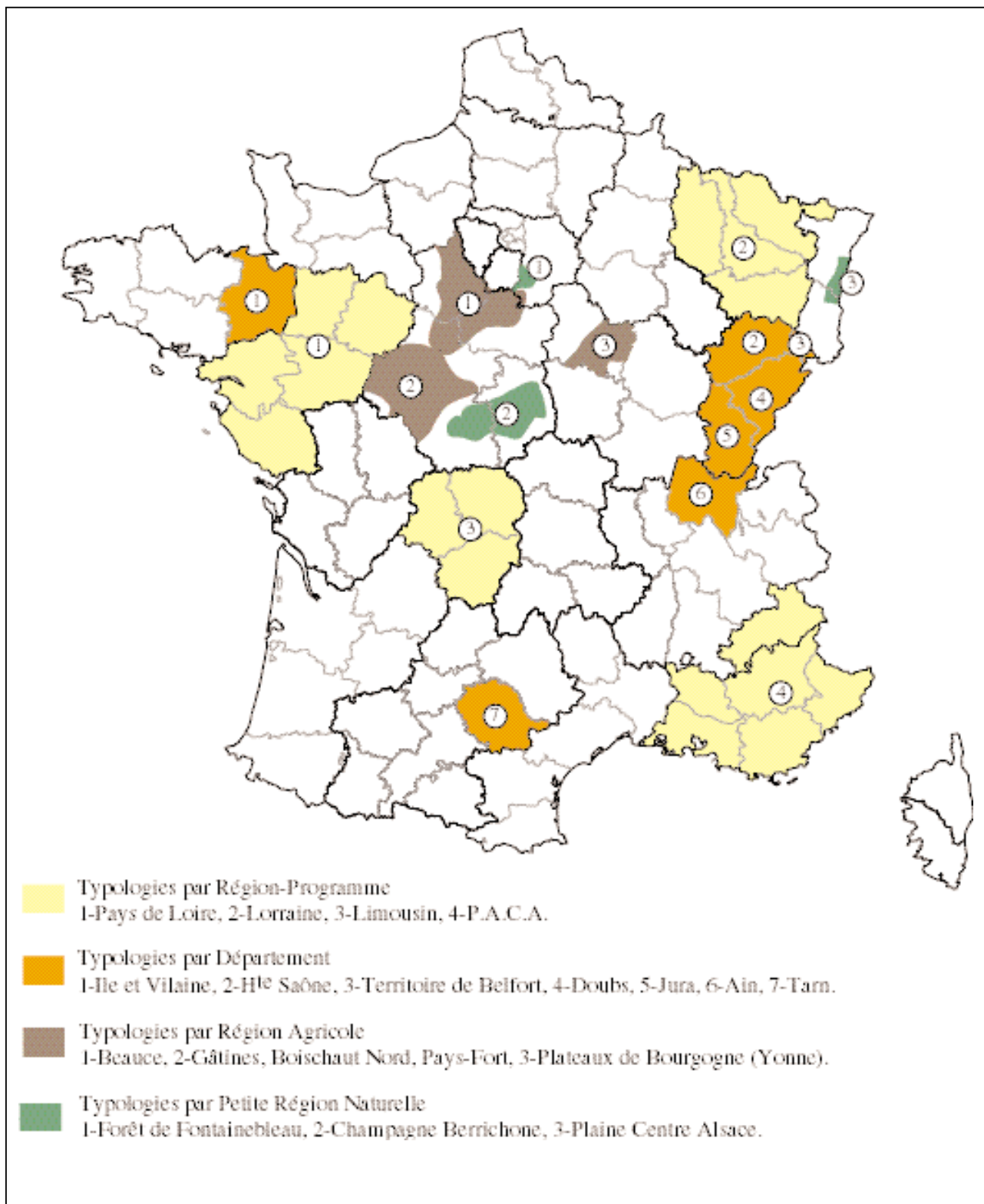
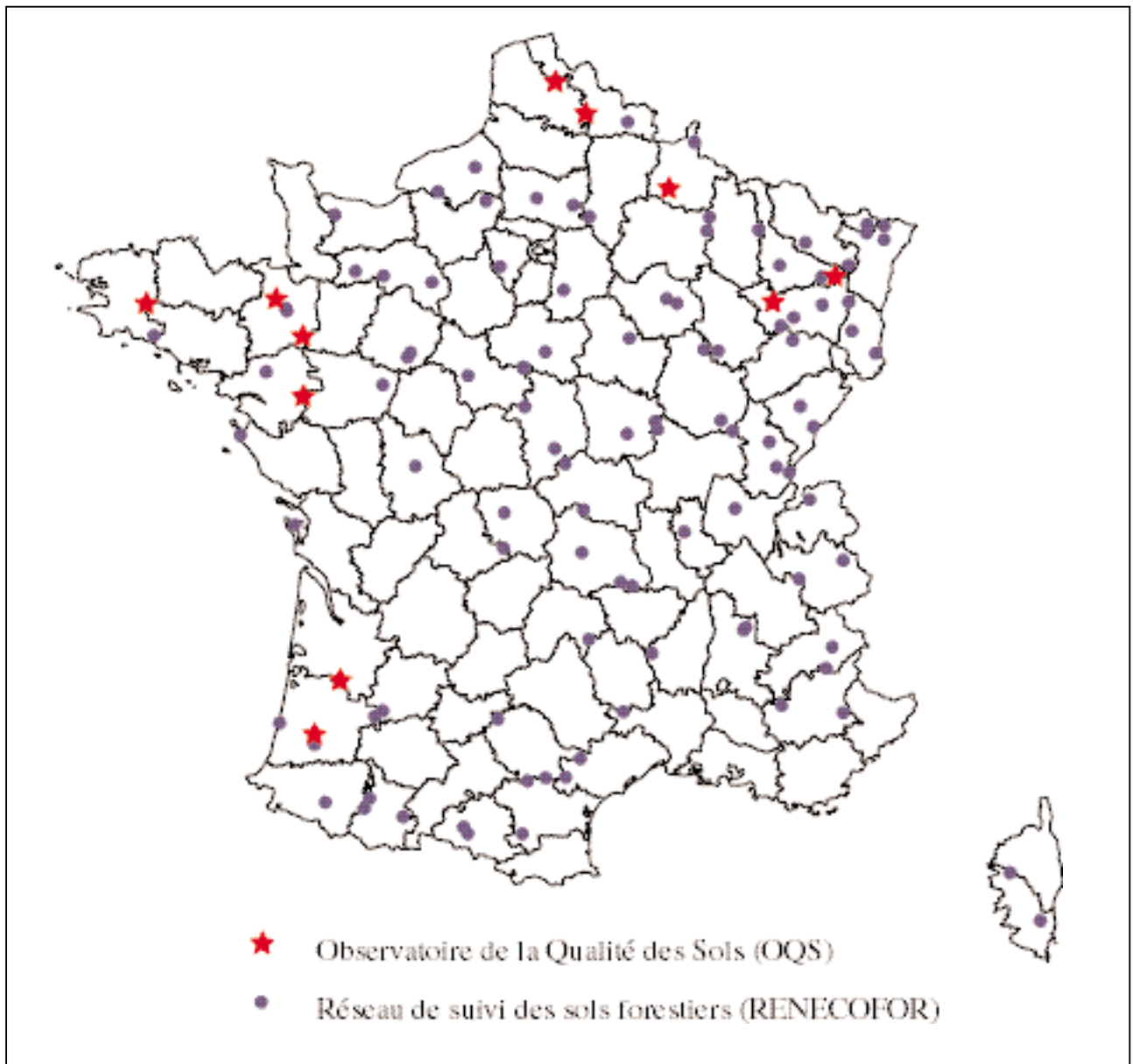


Figure 4 - Localisation des sites de surveillance des programmes O.Q.S. et RENECOFOR

Figure 4 - Localization of monitoring sites in France (O.Q.S. and RENECOFOR)



bases de données de sols évoquées ci-dessus, ont été sélectionnés pour des thèmes concernant directement le sol (l'érosion), la production agricole (qualité des produits), ou la gestion des ressources naturelles (les nappes, les rivières). Ces exemples ont également été sélectionnés pour montrer des applications nationales ou régionales valorisant de façons diverses les différentes bases de données.

## EXEMPLES D'UTILISATION DES INFORMATIONS SUR LES SOLS

La carte pédologique a longtemps été l'objet de reproches en ce qui concerne les difficultés de son utilisation à des fins pratiques. Les bases de données associées aux programmes de cartographie des sols permettent désormais d'envisager de nombreuses finalités. Différents exemples d'utilisation des

## Erosion

Parmi les différentes menaces pesant sur les sols, l'érosion est certainement l'une des plus visibles, tant du point de vue agricole (perte en terre) que du point de vue environnemental (pollution des eaux, dégâts sur les infrastructures urbaines et routières). A la demande du ministère de l'Environnement, deux études cartographiques ont été lancées à l'échelle nationale. La première est un inventaire des coulées boueuses basé sur les dossiers de demande d'indemnisation pour les catastrophes naturelles intervenues pendant la période 1985-1995. La seconde est une cartographie de l'aléa "érosion des sols", obtenue en combinant au sein d'un SIG les différents facteurs à l'origine de cette érosion (Le Bissonais et al., 1998) : battance et érodibilité du sol déduites de la base 1/1 000 000, couverture végétale extraite de CORINE land cover, pentes et pluies (quantité et intensité). La combinaison est réalisée à l'aide d'un modèle empirique simple sur la base d'une grille au pas de 250 m. Les résultats sont ensuite agrégés par bassin versant ou par petites régions agricoles, et présentés par saison. Ces deux documents permettent ainsi des comparaisons inter-régionales, précisant à la fois la nature et l'intensité de l'érosion. Ces documents sont confrontés à des études régionales (King et al., 1998) puis soumis aux responsables régionaux afin de promouvoir des campagnes de sensibilisation et de proposer des moyens de lutte.

## Eléments Traces

Les teneurs en éléments traces mesurées dans les sols résultent de la combinaison de processus naturels (héritage du matériau parental) et des apports directs ou indirects liés aux activités humaines (Baize, 1997). Les résultats du programme ASPITET, complétés par des travaux menés en collaboration avec l'ADEME (programme AGREDE), ont permis de signaler les secteurs à fortes teneurs naturelles en métaux qui excèdent souvent les seuils réglementaires pour l'épandage des boues. Par exemple, Baize et Paquereau (1998) mettent en évidence dans le département de Seine-et-Marne, quatre zones de concentrations anormales en zinc (plus de 80 mg/kg). A l'aide de documents historiques, ils ont montré que ces lieux correspondaient à des zones proches de quatre gares ayant servi pour le déchargement de composts. Ce type de résultat est un moyen d'alerter les pouvoirs publics sur la nécessité de réaliser sur ces secteurs des travaux à plus grande échelle.

## Gestion des ressources

La base de données issue du programme I.G.C.S. est rarement utilisée seule pour exprimer un caractère du sol. Dans la plupart des cas, elle est intégrée au sein d'une combinaison avec d'autres bases de données, notamment climatiques, topographiques et agronomiques. Les combinaisons sont réalisées à l'aide de modèles dynamiques reproduisant par simulation les événements passés. Des cartes expriment sous forme

d'analyses fréquentielles les risques liés à un changement de pratiques agricoles ou à une évolution climatique. Les travaux sont ici nombreux à citer (MAPA, 1998) : par exemple, risque de lessivage de nitrate en Bretagne (Saby et al., 1999), gestion de l'irrigation en Beauce (Nouzille et al., 1999), vulnérabilité aux épandages (Scheurer, 1998), épandage des composts urbains (Legros et al., 1991), diversification des cultures après arrachage de la vigne (Bornand et al., 1994)...

Pour la plupart de ces études, le sol intervient de façon primordiale dans les résultats mais il n'est pas aisé de déceler la pondération qui lui est accordée dans la décision finale. Ceci est dû d'une part aux méthodes de modélisation qui utilisent de nombreuses autres variables de l'environnement, et d'autre part aux facteurs historiques, sociologiques, économiques et politiques nécessairement inclus dans le processus ultime de décision.

Ce constat est également vérifié pour l'utilisation des réseaux de surveillance. Par exemple, dans le domaine de la pollution de l'air, les objectifs sont de réduire les émissions de polluants ayant des effets à longue distance sur les écosystèmes. La notion de charges critiques permet ainsi de quantifier les effets des retombées atmosphériques sur le dépérissement des arbres et le pH des ruisseaux. En France, l'ADEME a mis en place et animé des travaux régionaux et nationaux afin de répondre aux besoins particuliers du ministère de l'Environnement lors de la révision des protocoles internationaux (par exemple, Dambrine et al., 1998 ; Thomas, 1998). L'utilisation des informations issues des réseaux de surveillance représente ici un support essentiel aux comparaisons internationales.

## PERSPECTIVES

Les perspectives sont envisagées sous trois aspects : la cartographie des sols, leur surveillance et la diffusion des informations.

Dans le domaine de la cartographie, la poursuite des travaux au 1/250 000 est maintenue afin de disposer d'une information exhaustive et harmonisée sur l'ensemble du territoire français. Toutefois, cette échelle est reconnue insuffisante pour répondre aux demandes sociales très diverses et très soucieuses de précision. Il n'est pas envisagé de débloquer des moyens considérables au plan national pour répondre à cette demande d'informations précises. Par contre, il est proposé de valoriser les études au 1/100 000 existantes en organisant les résultats acquis en bases de connaissances décrivant les lois d'organisation des sols dans les paysages. Ainsi les collectivités territoriales, les gestionnaires de l'espace rural ou les bureaux d'études pourront y puiser les données indispensables pour répondre à leurs besoins et appliquer ces connaissances sur les espaces qui les concernent. De plus, on

constate une augmentation des besoins en cartographie à des échelles très détaillées, c'est-à-dire à l'échelle même des parcelles agricoles. Ceci est dû notamment à l'évolution des techniques de positionnement dans l'espace (G.P.S.) et aux techniques agricoles qui leur sont associées. Il est donc envisagé de renforcer les recherches à propos de ces nouvelles techniques, notamment dans l'utilisation de la géophysique et des modèles numériques de terrain. Enfin, cette approche multi-échelle, de la parcelle à la région, implique de disposer des méthodes mathématiques capables de formaliser les transferts d'échelle.

En ce qui concerne la surveillance des sols, les systèmes français sont jugés satisfaisants dans le domaine forestier mais insuffisants dans le domaine agricole. Il y a donc nécessité de prévoir un nouveau dispositif comprenant deux niveaux. Le premier serait constitué d'un grand nombre de sites suivis avec un pas de temps de l'ordre de 5 années. L'objectif est ici d'avoir un système d'alerte ne préjugant pas à l'avance des pressions qui pourraient s'exercer sur le sol dans les années à venir. Le second s'appliquerait sur un nombre limité de sites afin de suivre les flux à des pas de temps courts (jour, mois) et ainsi de pouvoir analyser et expliquer les évolutions enregistrées. Dans cette perspective, le ministère de l'Environnement a lancé un programme de recherche (GESSOL) dont l'objectif est d'établir les outils et les bases scientifiques pour évaluer, surveiller, voire restaurer la qualité des sols. Au sein d'un tel programme, il serait important de développer la conservation à long terme des échantillons de sols dans une pédothèque. Nous pouvons constater que, trente ans auparavant, peu de personnes s'interrogeaient sur les teneurs en métaux lourds et il est tout aussi difficile de prévoir les nouvelles questions qui seront posées dans le futur.

Enfin, il est reconnu que l'ensemble des programmes actuels ou à venir n'auront d'intérêt que si la fiabilité de leurs résultats est démontrée, et que si la diffusion des informations est réalisée de façon la plus large et la plus instructive possible. Cela signifie d'une part la poursuite de recherches dans le domaine de la combinaison des données spatiales et dans celui de la propagation des erreurs lors de ces combinaisons. D'autre part, il faut développer des méthodes pour la structuration et la diffusion des informations, notamment grâce à l'utilisation des nouveaux supports technologiques informatiques (web, cédérom). Une connaissance plus approfondie des besoins des utilisateurs est à instruire afin de développer les outils capables de répondre le plus efficacement possible à ces besoins (Jamagne, 1999).

## CONCLUSION

Les programmes d'inventaire et de surveillance des sols sont à une phase décisive de leur développement.

Ceux concernant l'inventaire sont désormais regroupés au sein d'un seul système d'information multi-échelle. Ils devraient ainsi mieux répondre à la diversité des besoins selon les différents degrés de précision souhaités.

Les programmes de surveillance sont une priorité pour développer une politique cohérente de protection des ressources naturelles. Cette surveillance est à coupler avec les travaux d'inventaire afin de disposer in fine de résultats cartographiques et statistiques sur l'ensemble du territoire français et par régions.

Si la recherche reste l'un des moteurs du développement de ces différents programmes, elle ne peut rester seule face à la multiplicité et à l'urgence des besoins. Il est en particulier nécessaire de mettre en place une politique de diffusion des informations et des outils d'aide à la décision.

Un regroupement de l'ensemble des activités d'inventaire et de surveillance des sols en milieu rural est actuellement à l'étude au sein des différents ministères chargés de l'Agriculture, de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire. Pour la réussite d'un tel projet, une participation des utilisateurs directs ou indirects des sols sera à promouvoir au sein de cette structure.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions les nombreuses personnes qui collaborent aux différents programmes évoqués, notamment tous ceux qui nous ont aidés dans cet article de synthèse et qui nous ont fourni les documents nécessaires : Baize D., Bonneau M., Cisielski H., M., Dambrine E., Duval O., Eimberck M., Jones R.J.A., Lagacherie P., Le Bissonnais Y., Legros J.P., Martin S., Montanarella L., Schwartz C., Sterckemann T., Urbano G., Walter C.

## BIBLIOGRAPHIE

- Armstrong Brown S., Loveland P., Holman I., Arrouays D., Eckelmann W., Vogel H., 1998 - A Proposal for a European soil monitoring network : content, coverage and users. 16e Congrès Mondial de Science du Sol, 20-26/08/1998, Montpellier, France. Symp. n° 25. 7 p.
- Arrouays D., Vogel H., Eckelmann W., Armstrong B.S., Loveland P., Coulter B., 1998 - Soil monitoring in Europe : a review. 16e Congrès Mondial de Science du Sol, 20-26/08/1998, Montpellier, France. Symp. n° 25. 7 p.
- Arrouays D., Deslais W., Daroussin J., Balesdent J., Gaillard J., Dupouey J.L., Nys C., Badaeu V., Belkacem S., 1999 - Stocks de carbone dans les sols de France : quelles estimations ? C.R. Acad. Agric. Fr. Sous presse.
- Baize D., 1997 - Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Editions, Paris. 410 p.

- Baize D., Paquereau H., 1997 - Teneurs totales en éléments traces dans les sols agricoles de Seine-et-Marne. *Etude et Gestion des Sols*, 4 (2), 77-94.
- Baize D., Deslay W., Gaiffe M., 1999 - Anomalies naturelles en cadmium dans les sols de France. *Etude et Gestion des Sols*, 2, 85-104.
- Bornand M., Arrouays D., Baize D., Jamagne M., 1989 - Cadre méthodologique d'une cartographie régionale des sols à l'échelle du 1/250 000. *Science du Sol*, 27, 1, 17-20.
- Bornand M., Legros J.P., Rouzet C., 1994 - Les banques régionales de données-sols. Exemple du Languedoc-Roussillon. *Etude et Gestion des Sols*, 1, 67-82.
- Bornand M., 1997 - Connaissance et suivi de la qualité des sols en France. MAPA-MATE-INRA. INRA Montpellier. 176 p.
- Bullock P., Jones R.J.A., Montanarella L. (Eds), 1999 - Soil resources of Europe. ESB-JRC - EUR 18991 EN. Ispra, Italie. 189 p.
- CEC, 1985 - Soil Map of the European Communities at 1 : 1,000,000. CEC DG VI. Luxembourg. 124 p.
- Cousin I., Vautier A., Bruand A., Duval O., Nicoulaud B., 1998 - Recharge de la nappe de Beauce : influence du type de sol. *Doc. Ronéo. INRA Science du Sol Orléans*, 4 p.
- Dambrine E., Thomas A.L., Party J.P., Probst A., Boudot J.P., Duc M., Dupouey J.L., Gégout J.C., Guérolf F., King D., Landman G., Maitat O., Nicolai M., Pollier B., Thimonier A., 1998 - Acidité des écosystèmes forestiers dans les Vosges gréseuses : distribution, évolution, rôle des dépôts atmosphériques et conséquences biologiques. *C.R. Acad. Agric. Fr.* 84(5), 75-94.
- Dumé G., 1995 - Vingt ans de typologie des stations forestières. *Forêt Entreprises*, n° 102, 2, 23-29.
- Favrot J.C., 1987 - Etudes et recommandations préalables au drainage : la méthode des secteurs de référence. Enseignements et prolongements de l'opération drainage ONIC-Ministère de l'Agriculture (1980-1985). *C.R. Acad. Agric. Fr.* 73(4), 23-32.
- Favrot J.C., Lagacherie P., 1993 - La cartographie automatisée des sols : une aide à la gestion écologique des paysages ruraux. *C.R. Acad. Agric. Fr.* 79(5), 61-76.
- Favrot J.C., 1994 - Note de synthèse sur le volet pédologique et sur le répertoire informatisé REFERSOLS. INRA Document, Montpellier. 34 p.
- Favrot J.C., Bornand M., Bouzigues R., Hardy R., 1998 - Une contribution à la connaissance des sols de France : les typologies de sols et les référentiels agronomiques régionaux. *C.R. Acad. Agric. Fr.* 84(7), 81-92.
- Finke P., Hartwich R., Dudal R., Ibañez J., Jamagne M., King D., Montanarella L., Yassoglou N., 1998 - Georeferenced Soil Database for Europe. Manual of procedures, version 1.0. ESB-SAI-JRC. Ispra. 184 p.
- Finke P., Hartwich R., Dudal R., Ibañez J., Jamagne M., King D., Montanarella L., Yassoglou N., 1999 - Base de données géoréférencée des sols d'Europe, version 1.1. Traduction J.J. Lambert. ESB-SAI-JRC. Ispra. 171 p.
- Gaultier J.P., Legros J.P., Bornand M., King D., Favrot J.C., Hardy R., 1993 - L'organisation et la gestion des données pédologiques spatialisées : le projet DONESOL. *Revue de géomatique*, 3, 235-253.
- Hardy R., Favrot J.C., Couturier A., Moulard N., 1999 - REFERSOLS. Répertoire pour la France d'études pédologiques avec cartographie des sols aux petites et moyennes échelles (du 1/50 000 au 1/500 000). Rapport INRA-DERF. 146 p.
- Heineke H.J., Eckelmann W., Thomasson A.J., Jones R.J.A., Montanarella L., Buckley B. (Eds), 1998 - Land Information Systems. Developments for planning the sustainable use of land resources. JRC Ispra, Italie. 547 p.
- IFEN, 1999 - L'environnement en France. La découverte. Editions La découverte & Syros et IFEN. Paris et Orléans. 480 p.
- Jamagne M., 1999 - 16e congrès mondial de la Science du Sol. Compte rendu succinct des travaux. *Etude et Gestion des Sols*, 6(1), 55-78.
- Jamagne M., Hardy R., King D., Bornand M., 1995 - La base de données géographique des sols de France. *Etude et Gestion des Sols*, 2(3), 153-172.
- Jamagne M., King D., Le Bas C., Daroussin J., 1995 - Development and application of European soil geography database. *Eurasian Soil Science*, 27, 4, 19-23
- Jones R.J.A., Buckley B., Jarvis M.G., 1998 - European Soil Database : information access and data distribution procedures. In : " Land Information Systems. Developments for planning the sustainable use of land resources ", Heineke H.J., Eckelmann W., Thomasson A., Jones R.J.A., Montanarella L. and Buckley B. (Eds). ESB-SAI-JRC, Ispra, Italy. 564 p.
- King D., Daroussin J., Tavernier R., 1994 - Development of a soil geographic database from the Soil Map of the European Communities. *Catena*, 21, 37-56.
- King D., Fox D.M., Daroussin J., Le Bissonnais Y., Danneels V., 1998 - Upscaling a simple erosion model from small areas to a large region. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 50, 143-149.
- Lagacherie P., Cazemier D.R., Van Gaans P.F.M., Burrough P.A., 1997 - Fuzzy k-means clustering of fields in an elementary catchment and extrapolation to a larger area. *Geoderma*, 77 (2-4), 197-216.
- Le Bas C., Jamagne M. (Eds), 1996 - Soil databases to support sustainable development. INRA-JRC. 149p.
- Le Bas C., King D., 1997 - Assessment of land suitability for crop production in the EU regions. In : CAP and the regions. Building a multidisciplinary framework for the analysis of the EU agricultural space. C. Laurent, I. Bowler (eds). INRA, Paris 45-54.
- Le Bas C., King D., Jamagne M., Daroussin J., 1998 - The European Soil Information System. In : " Land Information Systems. Developments for planning the sustainable use of land resources ", Heineke H.J., Eckelmann W., Thomasson A., Jones R.J.A., Montanarella L. and Buckley B. (Eds). ESB-SAI-JRC, Ispra, Italy. 564 p.
- Le Bissonnais Y., Montier C., Jamagne M., Daroussin J. et King D., 1998 - Aspect cartographique de l'érosion des sols. *C.R. Acad. Agric. Fr.* 79(5), 117-130
- Legros J.P., Bornand M., Viron J.C., 1991 - Recherches des zones aptes à l'épandage de composts urbains dans la région de Montpellier (Hérault, France). In : " Gestion de l'espace rural et SIG ", Florac, octobre 1991. INRA. 229-239.
- MAPA, 1998 - Rapport IGCS sur les travaux du Colloque de Poitiers. *Doc. Ronéo*. 12 p.
- Martin S., 1993 - L'Observatoire de la Qualité des Sols, un outil de gestion pour l'agriculture, un instrument d'observation de la biosphère. *Chambre d'Agriculture. Supplement No. 897*. 8-10.
- Monnet J.C. et Gaiffe M., 1998 - Le terroir, une réalité géographique mise en évidence par des critères édaphiques. *Etude et Gestion des Sols*, 5(1), 43-59.
- Nouzille C., Nicoulaud B., Duval O., Golaz F., Couturier A., Bruand A., 1999 - Etude de l'alimentation naturelle de la nappe de Beauce. Elaboration d'un modèle de calcul de l'infiltration efficace. INRA Orléans. 78 p. + annexes.
- Saby N., Walter C., Combo S., Quidu O., 1999 - Constitution et thématisation de la base de données du référentiel pédologique du sud de l'Ille et Vilaine. *Laboratoire de Science du Sol ENSA Rennes*. 52 p.
- Schvartz C., Walter C., Claudot B., Bouédo T., Arousseau P., 1997 - Synthèse nationale de analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994. Constitution d'une banque de données cantonale. *Etude et Gestion des Sols*, 4(3), 191-204.
- Schvartz C., Walter C., Daroussin J., King D., 1998 - Statistical review of the soil tests made in France and comparison with the 1 : 1 000 000 soil map. 16e Congrès Mondial de Science du Sol, Montpellier, 20-26/08/1998.
- Thomas A.L., King D., Dambrine E., Couturier A., Roque J., 1999 - Predicting soil classes with parameters derived from relief and geologic materials in

- a sandstone region of the Vosges mountains (Northeastern France). *Geoderma*. 90, 291-305.
- Ulrich E., 1995 - Le réseau RENECOFOR : Objectifs et réalisations. *Revue Forestière Française*. Vol. 2. 107-121.
- Ulrich E., Lanier M., Combes D., 1998 - Dépôts atmosphériques, concentrations dans les brouillards et dans les solutions du sol. Rapport scientifique sur les années 1993 à 1996. ONF Département des recherches techniques. 135 p.
- Vanmechelen L., Groenemans R., Van Ranst E., 1997 - Forest soil condition in Europe. Results of a large-scale soil survey. Technical report. Ministry of the Flemish Community, EC and UN/ECE, Bruxelles, Genève, 198 p. + annexes.
- Walter C., Schwartz C., Claudot B., Bouedo T., Arousseau P., 1997 - Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994. Description statistique et cartographique de la variabilité des horizons de surface cultivés. *Etude et Gestion des Sols*. 4(3). 205-218 p.
- Wösten J.H.M., Lilly A., Nemes A., Le Bas C., 1999 - Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*. 90, 169-185.