

La base de données géographique des sols de France

M. Jamagne*, R. Hardy*, D. King* et M. Bornand**

* : Institut National de la Recherche Agronomique. Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France. Centre de Recherche d'Orléans. F45160 Olivet.

** : Institut National de la Recherche Agronomique. Unité de Science du Sol. Place Viala. F34060 Montpellier.

RÉSUMÉ

L'objectif de cette note est de montrer le type d'information disponible sur l'ensemble des sols du territoire français à partir d'une base de données géographique des sols de France mise en place récemment à l'Unité de Science du Sol de l'INRA d'Orléans, et issue d'une collaboration entre de nombreux pédologues français.

Une première partie se rapporte à l'historique des données et décrit tout d'abord brièvement la base de données géographique des sols de France issue des travaux de coordination effectués au niveau européen. Les informations principales ayant servi à l'élaboration de la base de données sont alors abordées : réalisation d'inventaires cartographiques et programmes de recherches ayant servi de support à l'élaboration d'une synthèse au millionième.

La deuxième partie concerne la structure de la base de données. Les principaux ensembles de gestion informatique sont évoqués : - métadonnées, correspondant aux données acquises et aux connaissances générales ; - données descriptives des objets géographiques : horizons, Unités Typologiques de Sols (UTS), Unités Cartographiques de Sols (UCS), Unités de Fonctionnement de Sols, Modèles d'Organisation Spatiale,... ; - données ponctuelles correspondant aux profils pédologiques représentatifs. L'état d'avancement des travaux aux plans national et européen est évoqué.

La troisième partie se rapporte aux possibilités d'extraction et de traitement des données. Sont abordés successivement les méthodes d'extraction, les règles de pédotransfert et le croisement de données spatialisées.

La quatrième partie concerne la restitution des données, comprenant les possibilités de sorties cartographiques informatiques, ainsi que la fiabilité de ces représentations incluant les notions de pureté et de niveau de confiance.

Une dernière partie traite enfin des orientations et perspectives, et met en évidence tout l'intérêt de la démarche : structuration rationnelle des connaissances, absence de pertes d'information, possibilités d'intégration des éléments antérieurement acquis, mise à disposition rapide des données aux utilisateurs,...et ceci tant au plan national qu'europpéen.

Il s'agit en fait d'une base de données emboîtée selon plusieurs niveaux d'échelle qui s'élabore progressivement, en vue de proposer les informations nécessaires aux différents gestionnaires de l'espace rural.

Mots clés

Cartographie des sols, analyse spatiale, bases de données, modélisation, systèmes d'information géographiques, profils pédologiques, gestion des sols, conservation des sols.

SUMMARY**THE SOIL GEOGRAPHIC DATABASE OF FRANCE**

The objective of this paper is to present the type of soil information which is available for the whole french territory, derived from a soil geographical database of France. This base has recently been established at the Soil Research Unit of INRA at Orleans.

A first part is dealing with data history and describes first briefly the geographical soil database due to coordination works that have been made at european level. Principal basic data that served for the elaboration of the data base are described : mapping actions and research programs that were used for a 1/1 M synthesis (fig. 1).

The second part concerns the data base structure (fig 2). The main datasets are evoked : - metadata, corresponding to the soon acquired data and to general knowledge ; - descriptive data of the geographical objects :

horizons, Soil Typological Units (STU), Soil Mapping Units (SMU), Soil Functioning Units, Spatial Organization Models,... ; - point data corresponding to representative pedological profiles. The state of progress at french and european level is then evoked.

The third part is dealing with the possibilities of extraction and management of data. Are successively taken up the extraction methods (fig. 3 and 4), the pedotranfer rules and combination of spatialized data.

A fourth part deals with data restitution, including possibilities of computerized mapping outputs (fig. 5, 6 and 7), as well as reability of those representations, including notions of purity and confidence level (fig. 8 and 9).

A last part concerns some orientations and perspectives, and sets in evidence the great interest of that approach : rational knowledge structuration, no more loss of information, possibilities for integration of old results, quick disposal of data for users,... and this at french or european level.

This is in fact a fit in/together database following different scale levels that is progressively elaborated, in view to propose the necessary information to different managers of rural space.

Key-words

Soil Survey, spatial analysis, databases, modelisation, geographical information systems, pedological profiles, soil management, soil conservation.

RESUMEN**EL BANCO DE DATOS GEOGRÁFICOS DE LOS SUELOS DE FRANCIA**

El objetivo de esta nota es de mostrar el tipo de información disponible sobre el conjunto de los suelos del territorio francés a partir de un banco de datos geográficos de suelos de Francia que fue recientemente creada en la unidad de Ciencia del suelo del INRA de Orléans, y cuyo el origen es una colaboración de numerosos pedólogos franceses.

Una primera parte concierne la historia de los datos y describe primeramente y brevemente el banco de datos geográficos de suelos de Francia nacido del trabajo de coordinación hecho al nivel europeo. Las informaciones principales que han servido a la elaboración del banco de datos están entonces presentadas : realización de inventarios cartográficos y programas de investigaciones que servían de soporte a la elaboración de una síntesis a millón.

La segunda parte concierne la estructura del banco de datos. Los principales conjuntos de gestión informática están presentados : «metadatos», correspondiendo a los datos adquiridos y a los conocimientos generales ; - datos descriptivos de objetos geográficos : horizontes, unidades tipológicas de suelos (UTS), unidades cartográficas de suelos (UCS), unidades de funcionamiento de suelos, modelo de organización espacial, - datos puntuales correspondiendo a los perfiles pedológicos representativos. El estado de adelanto de los trabajos en los planos nacional y europeo está evocado.

La tercera parte se refiere a las posibilidades de extracción y de tratamiento de los datos. Se acercan sucesivamente los metodos de extracción, las reglas de «pedotransferencia» y el cruce de datos espacializados.

La cuarta parte concierne la restitución de datos, abarcando las posibilidades de salidas cartográficas informáticas, así que la fiabilidad de estas representaciones incluyendo las nociones de pureza y de nivel de confianza.

Una ultima parte trate en fin de las orientaciones y perspectivas, y muestra el interés de la metodología : estructuración racional de conocimientos, ausencia de perdidas de información, posibilidades de integración de los elementos anteriormente adquiridos, disposición rápida de los datos a los usuarios, y eso tan al plano nacional que europeo.

Se trata, de hecho, de una base de datos encajados según varios niveles de escala que se elabora progresivamente, para proponer las informaciones a los diferentes gestores del espacio rural.

Palabras claves

Cartografía de suelos, análisis espacial, bancos de datos, modelización, sistemas de información geográficos, perfiles pedológicos, gestión de suelos, conservación de suelos.

Une nouvelle politique agricole commune au niveau de l'Europe, ainsi que l'accroissement des problèmes de dégradation de l'environnement ont conduit de nombreux pays à se doter de moyens de gestion rapides permettant l'aide à la décision.

Depuis plusieurs années, on constate une diminution et une réorientation des programmes d'inventaire cartographique dans différents pays. Ceci ne signifie pas nécessairement une diminution de la demande dans le domaine des données de sols. Par contre, on constate que les cartes pédologiques élaborées et présentées sous une forme conventionnelle ne suffisent plus à transmettre les informations nécessaires (Valentine *et al.*, 1981 ; Msanya *et al.* 1987 ; Lammers *et al.* Johnson 1991 ; King *et al.*, 1991), en particulier dans le domaine du suivi de l'environnement.

L'Union Européenne a développé depuis quelques années une base de données géographiques des sols, harmonisée sur l'ensemble du continent européen. Dans le cas de ces programmes, la demande a été très tôt orientée vers la connaissance et la gestion de paramètres du sol en vue d'alimenter des modèles de fonctionnement : modèle d'érosion (CEC-CORINE, 1992), modèle de croissance et de développement des cultures (Vossen *et Meyer-Roux*, 1995).

Il s'agit donc de recueillir, de gérer et de transmettre des données quantifiées et harmonisées, et localisées dans l'espace. De nombreux programmes nationaux et internationaux (GEMS, 1990 ; GRID, 1990 ; ISRIC, 1993) expriment actuellement les mêmes besoins.

L'objectif de cette note de synthèse est de montrer tout d'abord la genèse de l'élaboration de la base de données géographique sur les sols de France, ensuite le type d'information disponible sur l'ensemble du territoire français, et enfin l'intérêt scientifique de posséder un tel outil, prenant en compte d'une part le substrat qu'une base de ce type peut constituer pour un certain nombre de recherches fondamentales, d'autre part les possibilités d'applications finalisées qu'elle est susceptible d'offrir aux utilisateurs.

Nous présentons en premier lieu l'historique des données, c'est à dire la base de données géographique des sols de France issue des travaux de coordination effectués dans le cadre européen. Ceci nous permettra d'aborder ensuite les programmes d'inventaire cartographique et de recherches qui ont servi de support à l'élaboration de synthèses au 1/1.000.000. Nous évoquerons ensuite le problème de la gestion informatique des données anciennes acquises ainsi que celles en cours d'acquisition. Le traitement et la restitution des informations permettra enfin de discuter la nécessité de disposer d'interfaces efficaces pour répondre aux problèmes posés.

LES DONNÉES DISPONIBLES ET HARMONISÉES A L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE FRANÇAIS

Les documents de synthèse à 1/1 000 000

Après les anciens travaux d'Agafonoff avant les années 40, une première carte synthétique des sols du territoire français fut été élaborée et publiée en 1966, sous la direction du Professeur J. Dupuis (Dupuis, 1966).

Une seconde carte a ensuite été publiée en 1985 dans le cadre d'un programme international concernant les pays de la Communauté Européenne (CEC, 1985). En réalité, cette carte a été élaborée à partir d'éléments réunis pour un projet commencé dans les années 70 par la FAO. Ce projet concernait la totalité des pays de l'Europe continentale mais n'a pas pu être mené à terme faute de moyens suffisants. La Commission des Communautés Européennes (CCE) a repris, vers 1980, l'ensemble de ces données pour les pays de la Communauté. L'élaboration du document a nécessité, à partir de données initiales fournies par chaque pays (esquisses cartographiques et tableaux descriptifs des unités), une harmonisation indispensable, mais qui a conduit à l'abandon de certaines données, conservées cependant en archives à l'Université de Gand (Jamagne *et al.*, 1994).

Le programme CORINE de la CCE a réalisé l'informatisation de cette carte des sols des CE en 1986 (CEC, 1986 ; Briggs *et Martin*, 1988 ; Platou *et al.*, 1989), constituant ainsi une première base de données spatialisées (version 1.0). Seuls les paramètres de la carte proprement dite avaient été pris en compte : nom FAO (FAO, 1974), texture de surface, pente et phase éventuelle. Les données de base issues de la digitalisation du document cartographique se sont alors avérées insuffisantes pour répondre de manière satisfaisante à différents problèmes thématiques. Des travaux d'enrichissement ont alors été effectués pour diminuer ces insuffisances, d'une part par l'intégration de données d'archives abandonnées lors de l'harmonisation cartographique (version 2.0) : nature des matériaux originels, occupation du sol, pourcentage d'occupation des unités typologiques au sein des unités cartographiques, d'autre part par l'insertion de nouveaux attributs permettant de mieux caractériser les unités typologiques et cartographiques (version 3.0) : texture du sous-sol, profondeur du changement textural, obstacles à l'enracinement, présence d'un niveau imperméable, régime hydrique...

La structuration des connaissances sur notre territoire a donc subi ces diverses améliorations, conduisant d'une part à un enrichissement de la définition des unités à partir des nombreux travaux réalisés depuis les années 70, d'autre part à une meilleure précision des limites graphiques. Par ailleurs, la France s'est bien entendu associée, pour le territoire français,

à la création, sous l'égide de la CCE (Projet MARS) (Meyer-Roux, 1987 ; King, 1989), d'une base de "Profils de sols" pour renforcer les possibilités de caractérisation des unités les plus représentatives du territoire européen (Madsen, 1991).

L'ensemble qui vient d'être évoqué constitue en fait une première origine de la Base de Données Géographiques des sols de France.

Les connaissances de base

Différents travaux d'analyse spatiale plus détaillée menés à l'échelle du territoire français sont issus d'un grand nombre d'études menées de façon coordonnée ou non. Nous retiendrons celles qui ont fait l'objet d'une harmonisation et dont les résultats ont pu être évalués scientifiquement. Sans vouloir établir une liste exhaustive fastidieuse, on peut citer les programmes d'inventaire cartographique coordonnés au plan national, les programmes régionaux menés en collaboration avec des instances nationales, ainsi que les programmes de recherches plus fondamentaux sur les lois de différenciation et d'organisation spatiale des sols. Ce sont ces travaux qui ont permis progressivement les différentes versions de la carte des sols de France et des bases de données géographiques associées. La *figure 1* donne un aperçu global de la répartition des connaissances.

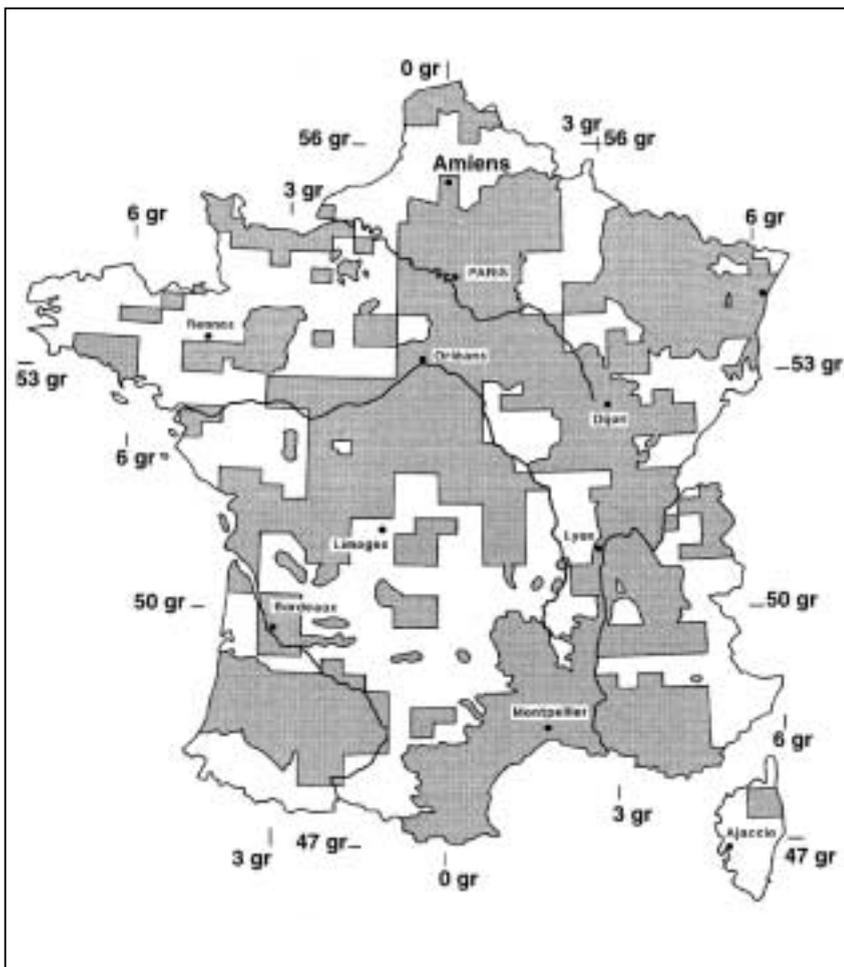
Programmes d'inventaires cartographiques

L'INRA, par le canal de ses Unités de Science du Sol d'Orléans et de Montpellier, assume au plan national la responsabilité de l'élaboration et la coordination scientifique de deux programmes essentiels : la Carte Pédologique de France (CPF) à 1/100 000 et le programme "Inventaire, Gestion et Conservation des Sols" (IGCS) à 1/250 000, en liaison, pour ce dernier, avec le Ministère de l'Agriculture et l'Institut National Agronomique Paris-Grignon.

Le programme "Carte Pédologique de France" (CPF)

Figure 1 - Connaissance spatiale harmonisée des ressources en sols du territoire (hachures).

Figure 1 - Harmonized spatialized knowledge of soil resources on the territory (hatching).



Ce programme mis en place en 1968, a justifié la création du Service d'Étude des Sols et de la Carte Pédologique de France (SESCPF). Cette action 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.*, 1989 ; Hardy, 1992), ainsi que la constitution d'une plate-forme nationale de coordination et de concertation dans le domaine de l'analyse spatiale des sols. Ceci a conduit à l'établissement de relations scientifiques stables avec la majorité des organismes se préoccupant de science du sol, tant de recherche : CNRS, ORSTOM, Universités..., que professionnels : Chambres d'Agriculture, sociétés d'économie mixte,....Le SESCOPF a, de ce fait, été progressivement reconnu comme interlocuteur en ce domaine à l'échelon international, et essentiellement dans le contexte européen.

A ce stade, 21 cartes ont été publiées avec leur notice, 2 sont en cours d'impression, 32 sont terminées au plan des levés, 35 sont en cours de prospection. La surface cou-

verte actuellement correspond à environ deux tiers de la SAU (INRA-SESCPF, 1969-1994).

Le programme "Inventaire, Gestion et Conservation des Sols" (IGCS)

Ce programme a été élaboré par l'INRA et le Ministère de l'Agriculture ; il comporte deux volets complémentaires : d'une part au niveau régional (Référentiels Pédologiques régionaux), d'autre part au niveau local (Secteurs de Référence). Pour le premier, il s'agit d'élaborer dans chacune des grandes régions françaises un document cartographique et une base de données (d'une précision correspondant à l'échelle du 1/250 000), de qualité suffisante pour permettre la prise de décisions à l'échelon régional (Girard *et al.*, 1993 ; Arrouays et Hardy, 1993). Pour le second, il est prévu d'étudier très finement, à l'échelle du 1/10 000, des aires échantillons de petite superficie, dites Secteurs de Référence. Le suivi des fonctionnements pédo-agronomiques de ces zones devrait permettre d'obtenir des "références" généralisables à des systèmes-sols analogues, répertoriés à l'échelle du 1/250 000 (Favrot, 1987 ; Favrot et Lagacherie, 1993).

En ce qui concerne les "Référentiels pédologiques régionaux", les régions administratives suivantes ont fait l'objet d'essais de faisabilité et de réalisations, et ce dans différents paysages français caractéristiques : en Ile-de-France et Languedoc-Roussillon, dans le Loiret, la Côte-d'Or, l'Yonne et les Landes. L'analyse des interactions lithologie-géomorphologie-pédologie montre qu'il est possible d'introduire à ce niveau la notion de "pédopaysages", significatifs pour la gestion de l'espace rural (Girard, 1983 ; Bornand *et al.*, 1994). Cette démarche est proche de celle préconisée par le programme SOTER mené conjointement par l'ISRIC et la FAO (ISRIC, 1993).

Autres programmes à plus grande échelle (1/50 000 et 1/25 000)

Un soutien méthodologique est apporté à différentes Chambres d'Agriculture ayant entrepris la cartographie systématique de certains départements. Il s'agit de l'harmonisation des cartes de sols, de la numérisation des données et de l'élaboration de cartes thématiques dans des départements comme ceux de la région Centre ainsi que de la Vienne, de la Haute-Vienne et de l'Yonne. Il s'agit également de l'aide apportée à l'informatisation et au traitement des données dans le département de l'Aisne.

Il existe en fait peu d'actions systématiques couvrant des entités administratives complètes. Par contre, on trouve de très nombreuses études réalisées sur des surfaces limitées à la demande de collectivités locales ou de groupements professionnels. Il faut citer en particulier le programme Secteur de Référence Drainage de l'ONIC-Ministère de l'Agriculture (Favrot, 1987).

Les éléments obtenus par plusieurs dizaines d'études ont fait l'objet d'un stockage dans une base de données spécia-

lisée et pourront être progressivement intégrés dans la base nationale.

Les travaux de recherche fondamentale

Parallèlement aux recherches menées sur les démarches cartographiques proprement dites (Girard, 1983 ; King, 1986 ; Walter, 1990 ; Lagacherie, 1992 ; Robbez-Masson, 1994 ; Arrouays, 1995), des études fondamentales de pédogenèse fondées sur des travaux de cartographie se sont développées et ont constitué d'importantes bases de réflexion. A l'aide des données recueillies par les travaux de la Carte Pédologique de France, des études plus approfondies ont été effectuées dans de nombreuses grandes régions naturelles, et les chercheurs ont tenté de comprendre la formation, l'évolution et la distribution des sols de différents grands systèmes pédologiques. Ceci a notamment conduit à aborder de façon détaillée l'étude des principaux processus de la pédogenèse : lessivage, appauvrissement, acidification, aluminisation, dégradation, hydromorphie, podzolisation, fersiallisation, planosolisation.

Ont donc été réalisés plusieurs travaux de pédologie "intégrée" faisant appel aux différents niveaux d'investigation accessibles, "du cristallite au bassin versant". Les approches ont concerné la morphologie, la répartition, la pédogenèse, le fonctionnement à l'échelle régionale, voire nationale, et les résultats obtenus servent actuellement de base à des échanges internationaux.

Ces recherches fondamentales sur la pédogenèse ont donné lieu à des travaux importants (thèses d'État - synthèses régionales), notamment : - sur les formations limoneuses, loessiques ou alluviales (Jamagne, 1973-1978 ; Ducloux, 1978 ; Begon, 1978), - sur les sols anciens des terrasses du Rhône (Bornand, 1978), - sur les formations calcaires charentaises (Callot, 1976), - sur les formations cristallines du Massif Central (Legros, 1982), - sur la différenciation pédologique des sédiments argileux (Baize, 1983),...

Le recours aux archives

L'information évoquée précédemment correspond à des documents de synthèse présentant une interprétation de la couverture pédologique en fonction de données mesurées et observées sur le terrain. Les cartes publiées sont un moyen de communication très performant, mais elles doivent nécessairement limiter la quantité de données à transmettre.

Si les notices de cartes permettent d'indiquer un grand nombre de détails et d'ouvrir des discussions très fructueuses, il leur est impossible de fournir l'ensemble des éléments acquis. En l'absence de moyens informatiques opérationnels dans les années 70-80, les données élémentaires se trouvent archivées sous la forme de minutes cartographiques de terrain, d'études détaillées de secteurs représentatifs, de profils décrits et analysés mais non sélectionnés pour publication. Ces archives existent tant au niveau du SESCOF qu'auprès

de différents collaborateurs ou institutions de recherche ou de valorisation. Et ceci sous des formes parfois sensiblement différentes.

Il est évident qu'il conviendrait de récupérer les plus fiables d'entre elles pour les mémoriser et les stocker dans une base de données, et éviter ainsi une perte d'informations importante pour l'avenir.

STRUCTURE DE LA BASE DE DONNÉES

Une Base Nationale de Données Sols a été élaborée en collaboration avec les Unités INRA de Montpellier, Versailles, Grignon et Rennes. Elle rassemble sous une seule structure l'ensemble des informations antérieurement dispersées du point de vue de leur thématique et de leur localisation. Mise en place récemment au Centre INRA d'Orléans, et gérée par le SESCOF, elle permettra dorénavant de structurer rationnellement les connaissances sur la couverture pédologique de la France.

Au cours de la réalisation des différents programmes mentionnés plus haut, la notion de "base de données géographique" (Burrough, 1986 ; Girard *et al.*, 1989 ; Jamagne et King, 1991 ; Legros, 1991-1992) s'est progressivement substituée à celle de "carte pédologique". Les travaux de recherches animés par l'INRA ont permis d'aboutir à une structuration informatique des données pédologiques : les plus anciens (STIPA, 1984) concernent les données ponctuelles alors que les plus récents (projet DONESOL) ont inclus la description de la variabilité spatiale des sols (Gaultier *et al.*, 1992)..

Ce que nous allons exposer ci-dessous a été, de manière continue, confronté aux conceptions internationales en ce domaine (CCE, FAO, ISRIC, GRID, GEMS) et un souci constant de compatibilité dans les concepts et approches a permis d'une part de déboucher sur un consensus général, d'autre part d'envisager un transfert aisé des données au niveau international.

La base de données géographique est structurée en plusieurs ensembles, et trois niveaux essentiels d'information sont à distinguer :

- les *métadonnées* indiquant les références bibliographiques des études, leur localisation et leur extension, ainsi que leur degré de précision (Favrot *et al.*, 1990). Il s'agit en fait de l'ensemble des travaux mentionnés ci-dessus.

- les *données descriptives des "Unités Cartographiques de Sols" (UCS)* : chaque UCS est elle-même composée d'une ou de plusieurs "Unités Typologiques de sols" (UTS) que l'on décrit également et pour lesquelles on précise le mode d'agencement et le pourcentage de surface qu'elles occupent au sein de l'UCS ; enfin pour chacune des strates (horizons du sol), des données quantitatives et qualitatives rendent compte de la variabilité spatiale des caractéristiques du sol au sein de chaque UTS.

- les *données ponctuelles* : caractéristiques descriptives et analytiques de profils pédologiques représentatifs.

La *figure 2* illustre la structure générale d'une base de données géographique sur les sols.

Il faut donc noter que parallèlement à la constitution d'une base dite sémantique, il est mis en place une base dite géométrique (coordonnées géographiques de localisation des profils de sols et limites des polygones matérialisant les UCS). La gestion par un Système d'Information Géographique (SIG) de ces types d'informations associées permet la visualisation cartographique immédiate de toute donnée sémantique (King *et al.*, 1991).

Les objets géographiques - les unités de sol

Méthodes et concepts

La couverture pédologique se présente sous la forme d'un continuum. Mises à part certaines modélisations mathématiques, il est conventionnellement proposé un découpage de ce continuum en unités de sols, ou volumes pédologiques distinguables. Deux grands types de découpage sont reconnus, identifiant des sous-ensembles distincts (Girard, 1983, Brabant, 1989 - 1994) :

- des sous-ensembles dits homogènes : les horizons, permettant la meilleure caractérisation, et correspondant à un découpage horizontal ;

- des sous-ensembles dits hétérogènes : les unités typologiques et cartographiques de sols, correspondant, elles, à un découpage vertical.

Les définitions des concepts mis en œuvre s'inspirent des premiers travaux de cartographie coordonnés (Jamagne, 1967) et de classification des sols (CPCS, 1967 ; Soil Survey Staff - USDA, 1975). Elles se sont progressivement affinées avec le développement des outils de gestion informatique (King, 1986 ; Jamagne *et al.*, 1993), aboutissant à la notion de Modèles d'Organisation Spatiale de Sols (MOSS) (King *et al.*, 1994).

Rappelons les principales définitions des concepts utilisés :

Les Horizons

Un horizon est considéré comme un volume élémentaire de la couverture pédologique, que l'on peut appréhender sur le terrain, et dont les dimensions latérales sont nettement plus grandes que la dimension verticale. Indépendamment de la connaissance de la géométrie d'un tel volume, il est possible d'en définir l'ensemble de ses caractéristiques.

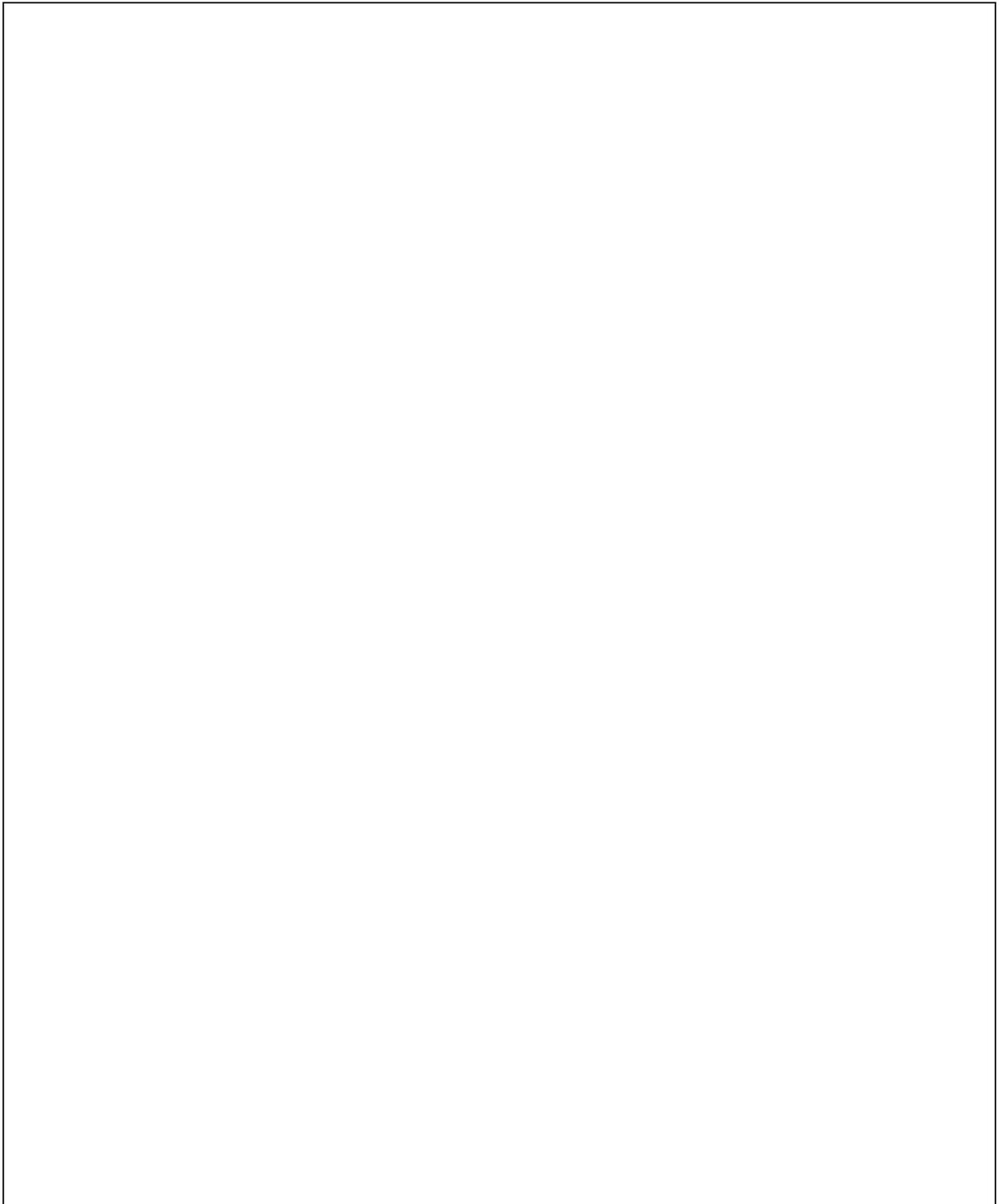
Cette notion est donc associée à une homogénéité des caractéristiques dans la dimension latérale et à un contraste vertical.

Les Unités Typologiques de Sols (UTS)

Une UTS est identifiée par ce que l'on a fréquemment défini comme "Profil", "Pedon" ou "Solum", c'est-à-dire un volume constitué par la superposition ou l'agencement d'horizons aux

Figure 2 - Schéma d'organisation des informations dans une base de données géographique des sols (Daroussin, 1995).

Figure 2 - Scheme of information organization in a soil geographic database.



caractéristiques bien définies. Sa définition repose sur le rattachement à un classement de référence.

Une Unité Typologique de Sols est un volume de la couverture pédologique présentant en tout lieu de l'espace la même succession d'horizons, l'un ou l'autre de ces horizons pouvant être éventuellement absent (AFES-INRA, 1992).

Les Unités Cartographiques de Sols (UCS)

En matérialisant leurs contours sur un fond topographique, les UTS devraient constituer en principe autant d'Unités Cartographiques de Sols. La correspondance entre UTS et UCS est cependant complexe. En effet, pour des raisons de contrainte graphique, ce n'est guère que sur des fonds topographiques aux grandes échelles (1/5000, 1/10000) qu'il est possible de délimiter des UCS dites simples, ou pures, correspondant chacune à une UTS donnée. Le plus souvent, en fait, une UCS va devoir regrouper plusieurs UTS de façon à conserver au document final une lisibilité satisfaisante. Mais on s'attachera alors à traduire au mieux l'agencement spatial de ces UTS au sein de l'UCS.

Une Unité Cartographique de Sols est le regroupement d'une ou plusieurs Unités Typologiques de Sols (UTS) permettant de pouvoir en faire une représentation cartographique à une échelle choisie. Elle constitue donc une unité sémantique rassemblant un ensemble de plages cartographiques. Dans tous les cas, une UCS est décrite par la délimitation d'une ou plusieurs plages.

On distingue couramment trois grands modes d'agencement au sein de ces unités complexes (CPCS, 1967 ; Fridland, 1975 ; Boulaine, 1975-1980) : - une séquence de sols, ensemble de sols dont la succession se retrouve constamment dans un ordre déterminé, la raison de cette constance étant l'influence prépondérante, et régulièrement répétée, d'un de leurs facteurs de formation ; - une chaîne de sols, ensemble de sols liés génétiquement, chacun d'eux ayant reçu des autres, ou cédé aux autres, certains de ses constituants, - une juxtaposition de sols, ensemble de sols dont la coexistence au sein d'une unité cartographique ne paraît liée à aucune règle de répartition précise.

Un effort important a été mené pour décrire la variabilité des sols, d'une part en indiquant le pourcentage de représentativité des UTS au sein des UCS et d'autre part en s'attachant à décrire également l'incertitude spatiale des attributs au sein des UTS, c'est à dire l'étendue de leur gamme de variation intra UTS.

Enfin, des recherches sont en cours pour tenter d'introduire la description des relations structurelles et fonctionnelles pouvant exister entre les unités typologiques, essentiellement en ce qui concerne les flux hydriques et les transferts de constituants. Ceci conduit à la notion «*d'Unités de Fonctionnement de Sols*», à préciser en fonction de l'échelle et des processus en cause.

État d'avancement

Les programmes CPF et IGCS

Alors que les données ponctuelles, repérées par leurs coordonnées géographiques, sont naturellement indépendantes de toute notion d'échelle, il n'en est pas de même pour les informations liées aux UCS, objets géométriques dont la délimitation et la composition est fonction de la précision des levés. Il en résulte que ces dernières sont stockées dans la base par niveau d'analyse, c'est à dire par type de programme d'inventaire, principalement les programmes CPF et IGCS.

Programme CPF

Les coupures en cours de publication pour le programme CPF sont désormais systématiquement digitalisées. Des essais méthodologiques sont actuellement réalisés afin d'évaluer l'apport d'une mémorisation des minutes de terrain, voire même de l'ensemble des observations à la tarière (essais sur les feuilles de Versailles et de La Rochelle). En ce qui concerne les feuilles 1/100 000 déjà publiées, il est prévu de les saisir progressivement (premier essai sur la coupure de Saint Dié).

Programme IGCS

Au plan géométrique, un certain nombre de documents cartographiques ont été déjà digitalisés. Par niveau d'échelle, la base comprend les cartes de sols à 1/250 000 des départements du Loiret (Arrouays *et al.*, 1989), de l'Yonne (Baize, 1993), de la Côte-d'Or (Chrétien, 1994) et des régions Languedoc-Roussillon (Bornand *et al.*, 1994) et Ile de France (Roque et Hardy, 1994) ainsi que la carte des textures de surface de la région Nord-Pas-de-Calais, ainsi que des cartes de sols à plus grande échelle (1/25 000 à 1/10 000) : différents secteurs de référence et sites expérimentaux en région Nord-Pas-de-Calais, Centre, Haute Normandie, Vosges, Landes...

Au plan sémantique, les données relatives aux UCS, UTS et strates du département du Loiret, de la région Ile-de-France sont numérisées ; pour la région Languedoc-Roussillon la saisie est presque terminée ; elle est prévue courant 1995 pour les départements de la Côte-d'Or et des Landes.

Les profils pédologiques

La base de données STIPA constituée et gérée depuis fort longtemps par l'équipe de Montpellier a été transférée à Orléans en 1993, et incluse sous DONESOL sur le serveur du Centre d'Orléans.

Au plan géométrique, un travail important a été réalisé par l'Unité de Science du Sol de Montpellier et par l'unité d'informatique du Magneraud pour assurer l'inclusion des données STIPA dans DONESOL et en particulier la transcription des anciennes coordonnées géographiques dans le système unique préconisé : le Lambert 2 étendu.

Au plan sémantique, des premières interrogations de la base indiquent une certaine hétérogénéité des données. Par

exemple, on dispose actuellement de plus de 20 000 observations décrites pour seulement environ 5 000 profils analysés et un peu moins (4 715) à la fois décrits et analysés. Ceci peut s'expliquer du fait de la disparité de leur provenance : types d'organismes (93), finalité de l'étude (2 315 études), niveau d'investigation (échelles du 1/10 000 au 1/250 000). Il est prévu une analyse plus détaillée de la nature et de la fiabilité de ces données, afin d'orienter l'acquisition de nouvelles données. L'objectif serait de couvrir la diversité française des grands types de sols avec un nombre d'analyses de laboratoire suffisamment exhaustif.

Compte-tenu des difficultés d'harmonisation, et suivant ce qui a été proposé au plan européen, deux types de "format" ont été retenus : d'une part un format pour des variables mesurées et d'autre part un format pour des variables estimées. Dans le format "variables mesurées", les données sont directement transcrites à partir de profils réels identifiés géographiquement par leurs coordonnées en longitude et latitude. Un code "méthode" est associé à chaque variable permettant d'indiquer le type d'analyse réalisée. Dans le format "valeurs estimées", les méthodes sont imposées afin de pouvoir établir des comparaisons immédiates entre différents secteurs inventoriés. Les valeurs indiquées proviennent d'un transfert des données brutes après interprétation du contexte pédoclimatique. Ce second format permet également de fournir une valeur moyenne de l'UTS à l'issue d'un traitement statistique, valeur qui sera nécessairement plus représentative de la valeur intra UTS qu'un unique profil isolé. Une seconde étape prévoit d'augmenter le nombre de profils afin de disposer d'informations pour toutes les UTS mais aussi en régionalisant la sélection des profils pour des UCS ou UTS dispersées sur le territoire.

En ce qui concerne l'Europe, l'INRA s'est vu confier la responsabilité de la coordination pour l'élaboration d'une Base de données géographique des sols, tout d'abord pour l'Union Européenne (King *et al.*, 1995), puis ensuite pour la quasi totalité des pays de l'Europe Continentale (Jamagne *et al.*, 1995). L'ensemble de ces travaux s'inscrit dans les préoccupations des Directions Générales de l'Agriculture (DG VI), de l'Environnement (DG XI) et de la Recherche (DG XII) de l'Union Européenne, ainsi que dans celles de l'Agence Européenne de l'Environnement.

Pour ce qui est d'une base de données "Profils", la diversité des origines d'information est encore plus grande lorsque l'on tente de créer une base de données à l'échelle européenne (Madsen, 1991-1995). Dans un premier temps, il a été décidé de ne retenir que des profils jugés représentatifs de chaque UTS dominante au sein des UCS de la base géographique des sols d'Europe (il s'agit de l'UTS ayant le plus fort pourcentage de surface au sein de l'UCS).

Plus récemment, l'INRA a été sollicité pour animer un groupe d'experts européen (Soil Information System Development) dont l'objectif est d'évaluer les besoins en matière d'information

sur les sols et de proposer les programmes de recherches, de développement et de gestion nécessaires à la Commission des CE. L'une des réflexions de ce groupe porte actuellement sur la mise en place d'un Bureau des Sols Européen qui permettrait une coordination des programmes et la sauvegarde des informations actuellement dispersées dans de nombreux projets (Meyer-Roux, 1995).

EXTRACTION ET TRAITEMENT DES DONNÉES

La majorité des demandes concernant les données sols sont maintenant liées à la nécessité d'élaboration de différents types de modèles.

Les approches déterministes développées dans la modélisation des phénomènes nécessitent un grand nombre de paramètres quantitatifs. On peut soit extraire ceux-ci directement de la base, soit avoir recours à des fonctions permettant de passer des données existantes aux paramètres souhaités.

Enfin, beaucoup de demandes impliquent de devoir prendre en compte d'autres paramètres que ceux actuellement utilisés, et notamment en provenance d'autres disciplines traitant du milieu physique. Ceci nous conduit tout naturellement à la nécessité du croisement de données.

Méthodes d'extraction

Les méthodes d'extraction peuvent concerner tout d'abord les différents objets cartographiques que nous avons mentionnés plus haut : Horizons ou strates, Unités Typologiques (UTS), Unités Cartographiques (UCS), ou ensuite des combinaisons entre les attributs de ces différents objets.

Diverses cartes thématiques ont été réalisées, à partir des données informatisées, notamment sur le territoire du département du Loiret et des régions Languedoc-Roussillon, Ile-de-France et Nord-Pas-de-Calais : - contraintes mécaniques et physico-chimiques, excès d'eau, réserve en eau utile, - aptitude à la production de biomasse forestière, sensibilité à l'érosion hydrique,...(Arrouays *et al.*, 1989 ; King *et al.*, 1991-1992 ; Girard *et al.*, 1993 ; Bornand *et al.* 1994 ; Roquet et Hardy, 1994).

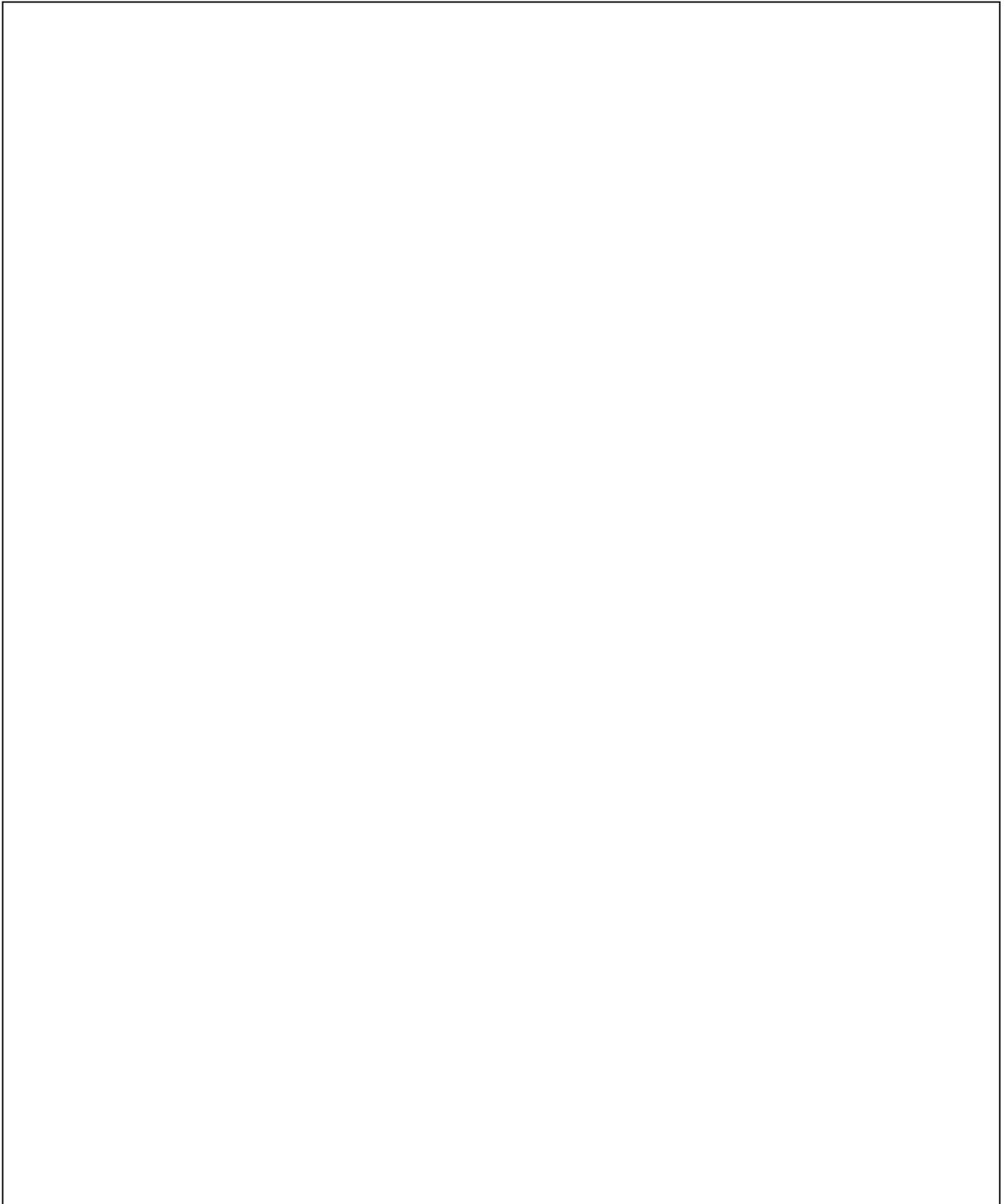
Des exemples en sont donnés par les figures 3 et 4. La première présente une extraction de la base de données régionale de l'Ile-de-France, la seconde une extraction de la base nationale.

Il faut noter, au plan européen, le travail réalisé dans le cadre du programme CORINE sur les risques d'érosion en région méditerranéenne (Giordano *et al.*, 1995), et les travaux d'estimation des rendements des cultures (Vossen et Meyer-Roux, 1995).

Les règles de "pédotransfert"

Figure 3 - Exemple d'utilisation d'une base de données géographique pour deux thèmes essentiels à l'échelon régional (Roque et Hardy, 1994).

Figure 3 - Example of use of a geographic soil database for two essential themes at regional level.



Pour passer des éléments de la base de données aux paramètres permettant de répondre à un problème thématique donné (érosion, pollution,...), un certain nombre de règles, s'inspirant des fonctions dites de pédotransfert, (Bouma et Van Lanen, 1986 ; King *et al.*, 1994) ont été mises au point.

En fait, l'accent est mis maintenant sur la nécessité de mettre à la disposition de l'utilisateur non seulement les données de base, mais également un certain nombre de règles lui permettant à partir de ces données initiales, d'estimer les données manquantes, mais surtout de passer aux paramètres répondant à des problèmes précis. Cela consiste à combiner, avec un poids relatif, des données que nous possédons, ou aisément accessibles. Ces règles de pédotransfert peuvent notamment concerner : le degré de différenciation du solum, une évaluation des capacités de stockage en eau, la faisabilité d'une culture, une estimation des risques de dégradation physique des sols ou de pollution... (Begon *et al.*, 1989 ; King, 1990 ; King *et al.*, 1991 ; 1992 ; Ngongo *et al.*, 1993 ; Girard *et al.*, 1993).

Un tel travail a été récemment élaboré au niveau européen (CEC, 1993 ; Van Ranst *et al.*, 1995), aboutissant à la création d'une "base de connaissances" associée à la base géographique. Les variables estimées ou "Attributs de sortie" sont sélectionnées en fonction des paramètres indispensables à connaître pour solutionner les problèmes rencontrés. Elles peuvent être regroupées selon leur nature : biologique, chimique, mécanique, hydrologique (Daroussin et King, 1994). L'utilisateur a ainsi à sa disposition une sorte d'interface qui lui permet d'avoir accès à la base de données géographique en lui fournissant des estimations sur les paramètres qu'il désire traiter.

Croisement des données spatialisées

L'orientation prise aujourd'hui est de fournir aux praticiens non plus des produits finis, c'est-à-dire essentiellement des cartes thématiques, mais des méthodes et des outils de traitement qui leur permettent de moduler une réponse en fonction de données conjoncturelles.

La gestion des données par l'intermédiaire des SIG permet la combinaison de données intrinsèques aux sols avec des paramètres appartenant à des domaines sémantiques différents (climatologie, télédétection, géomorphologie,...) conduisant à de nombreuses possibilités de modélisation et de simulation.

Les différents paramètres du milieu physique : sol, relief, températures et précipitations, occupation du sol, peuvent être réunis dans un même ensemble pour être consultés simultanément. Un exemple caractéristique est celui concernant les risques d'érosion dans le Nord-Ouest de la France (King *et al.*, 1992). Une décomposition de l'information ainsi structurée permet alors de combiner les données en fonction des problèmes traités. Cette intégration spatiale des différentes données du milieu physique se heurte cependant à

plusieurs problèmes importants : celui de leur disponibilité bien entendu, mais surtout celui lié à leur différence de résolution spatiale.

RESTITUTION DES DONNÉES

Représentation cartographique

L'élaboration de bases de données a, bien entendu, considérablement modifié les pratiques de production cartographique ces dernières années. Cela n'implique pas une disparition des cartes au profit des bases de données. Au contraire, le stockage des données étant désormais assuré par les SIG, avec possibilité de pilotage de traceurs très performants, il convient de prévoir des sorties cartographiques correspondant strictement aux demandes des utilisateurs. Mais il faut aussi rappeler les limites d'usage liées aux incertitudes initiales sur les données.

Nous avons noté, par exemple, que pour la plupart des UCS contenant plusieurs UTS, la représentation cartographique de toutes les valeurs d'une variable prises pour chaque UTS n'est pas possible. Une solution souvent utilisée consiste à choisir pour chaque UCS, la valeur de l'UTS dominante, c'est-à-dire celle représentant le plus fort pourcentage.

Un exemple est présenté par la *figure 5* qui fournit la répartition des principaux types de sols de France définis à partir du Référentiel Pédologique (AFES-INRA, 1992), avec une résolution correspondant à 1/1 000 000.

Cependant, l'unité dominante peut ne constituer qu'un faible pourcentage de l'association constituant une UCS, d'où une source d'erreurs à l'utilisation. Pour limiter ces erreurs, il a été choisi non pas de représenter l'UTS dominante, mais la classe dominante pour un thème donné, toutes UTS considérées. On calcule la surface occupée par chaque valeur de la variable au sein de l'UCS. La sélection de la classe dominante permet ainsi une représentation plus juste de la réalité que le choix de l'UTS dominante (Ngongo *et al.*, 1993).

Les *figures 6 et 7* présentent deux exemples de représentation cartographique issus de l'élaboration de règles de pédotransfert. La première concerne la capacité de stockage en eau découlant d'une combinaison des propriétés physiques (King et Le Bas, 1995), la seconde se rapporte à une dominance minéralogique, estimée par une combinaison prenant en compte la classe minéralogique du matériau originel, le degré de différenciation du sol et ses caractéristiques pédogénétiques (Van Ranst *et al.*, 1995).

Fiabilité des données

On comprend que chaque UCS n'est pas forcément pure vis à vis de la variable représentée. Il faut alors tenir compte, pour avoir une vision plus complète de la réalité, d'une part de

cette pureté et d'autre part du niveau de confiance attribué à chaque variable décrivant les UTS.

La notion de *Degré de Pureté* est basée sur le pourcentage de la classe dominante d'un attribut spécifique au sein de chaque UCS.

Par ailleurs, tout attribut de la base est connu avec une certaine incertitude. Dans le cas d'attributs issus de règles de pédotransfert, l'incertitude sera calculée en fonction des attributs d'entrée de la règle, combinée avec l'incertitude de la règle elle-même.

En effet, une règle est le résultat d'une connaissance d'expert et n'est pas nécessairement reliée à 100 % à toutes les possibilités. Cette évaluation repose en effet sur la qualité, la quantité et la variabilité des données initiales utilisées pour l'estimation. Cette notion de *Niveau de Confiance*, s'appuyant sur la fiabilité de l'expertise, met donc en garde les utilisateurs sur la validité des paramètres estimés par les règles.

Il a donc été proposé d'ajouter à toutes les estimations un niveau de confiance qui est attribué aux valeurs des variables estimées. Quatre classes sont proposées, allant de "élevé" via "modéré" et "faible" jusque "très faible".

Ces deux notions : pureté et niveau de confiance sont directement en relation avec deux principales sources d'erreurs : - la première (pureté) étant d'origine géographique, - la seconde (niveau de confiance) étant d'origine sémantique. Pour cette raison, nous avons proposé de produire pour chaque carte thématique une série de cartes montrant la "pureté" tout comme le "niveau de confiance".

Les figures 8 et 9 illustrent ces notions pour la représentation cartographique de la dominance minéralogique des horizons de surface (figure 7).

ORIENTATIONS - PERSPECTIVES

Jusque récemment, et d'une manière générale, l'élaboration d'une base de données géographique associée à une carte de sols pouvait se résumer en deux étapes chronologiques : une première étape aboutissant à la publication d'une carte et une seconde étape correspondant à l'informatisation de ce document. Une adaptation des démarches cartographiques à la notion de Modèle d'Organisation Spatiale propose en fait une inversion dans la chronologie de ces étapes.

Dans le futur, il conviendrait de privilégier, lors de la première étape, et en complément de la reconnaissance des horizons et des unités de sols sur la base d'une typologie, la description de leurs relations de voisinage. Ces relations sont en effet essentielles à envisager, les différents types de sol reconnus n'étant pas des entités indépendantes les unes des autres mais leur position géographique relative indique des relations pédogénétiques de mise en place de la couverture pédologique, influençant le fonctionnement actuel. Un cartographe

devrait donc, avant de concevoir une représentation cartographique finale, élaborer un modèle de représentation sémantique de ses connaissances traduisant d'une façon la plus complète possible les structures d'agencement spatial des différents sols reconnus, traduisant les concepts de "séquence" ou de "système pédologique" (Jamagne *et al.*, 1993 ; King *et al.*, 1994).

Avant l'utilisation des techniques informatiques, une carte des sols devait assurer deux fonctions : une fonction de "mémoire" en gérant le maximum d'informations et une fonction de "communication" en transmettant aux utilisateurs un minimum de données pertinentes vis-à-vis d'un problème.

La notion de Modèle d'Organisation doit assurer la première fonction de "mémoire" des données en proposant un cadre informatique d'accueil de l'information géographique. L'utilisation d'un tel cadre doit s'envisager dans le futur de façon la plus indépendante possible d'un objectif de représentation sur une carte à une échelle fixée, de façon à éviter toute limitation dans l'information mémorisée. La seconde fonction appelée "communication" constitue alors une étape finale, se traduisant en une sélection des caractères pertinents et en une représentation cartographique facile à lire pour les utilisateurs.

D'autres solutions sont envisageables à l'aide de méthodes telles que la géostatistique (Walter, 1990 ; Webster et Oliver, 1990), et/ou en introduisant des données géographiques non strictement pédologiques mais connues de façon systématique sur un territoire (par exemple : Modèles Numériques de Terrain, Télédétection). La réorientation proposée a l'avantage de tenir compte de concepts largement utilisés dans des approches cartographiques conventionnelles, en prenant en compte la structure tridimensionnelle de la couverture pédologique.

Perspectives au plan national

Un objectif essentiel dans le domaine de la connaissance des ressources naturelles est de poursuivre les activités de concertation nationale au plan scientifique et de recherche proprement dite, en maintenant les différents contacts initiés depuis le début des activités coordonnées d'inventaire.

Les réalisations peuvent revêtir différents aspects.

Acquisition de nouvelles données et mémorisation des données cartographiques existantes,

c'est à dire :

- compléter et développer les fonctionnalités de DONESOL, notamment les procédures de saisie, vérification, modification, interrogation et restitution des données pour faciliter leur totale accessibilité ;

- maintenir impérativement la coordination nationale en apportant un soutien logistique et scientifique au réseau de collaborateurs des programmes CPF et IGCS, et ce dans le double but de : - rassembler les données nouvellement

acquises mais aussi les plus anciennes sous forme informatique pour enrichir la base de données nationale, - disposer d'une structure fiable et mobilisable capable d'assurer l'acquisition de données complémentaires dans le cadre de différents programmes d'inventaires nationaux.

Réalisation d'une nouvelle synthèse à 1/1 000 000

Il s'agit là d'un programme ambitieux qu'il est pourtant urgent de mettre en place vu la diminution progressive des spécialistes de l'analyse spatiale en science du sol.

La révision de la base de données géographique des sols d'Europe a entraîné une remise à jour du domaine concernant le territoire français, et les données actuellement stockées sont donc très différentes de celles publiées en 1985. Toutefois ce travail reste insuffisant. D'une part, il serait nécessaire de revoir à la fois la typologie utilisée pour définir les UTS au vu du développement du Référentiel Pédologique, des nouvelles versions de la "classification" FAO (FAO, 1989) et du WRB (World Reference Base - FAO, 1994). D'autre part, la définition de certaines UCS pourrait être précisée compte-tenu des travaux récents menés au sein du programme IGCS. Enfin et surtout, il serait nécessaire d'envisager la description de nouveaux attributs pour les UTS et UCS permettant un accès à des données élémentaires nécessaires en particulier aux modélisations. Le choix de profils représentatifs décrits et analysés selon les normes DONESOL permettrait une approche quantitative objective.

Perspectives au plan européen

Le centre de coordination nationale actuellement mis en place est dès à présent sollicité pour une participation, qui devrait encore s'accroître au cours des prochaines années, dans le domaine de l'acquisition, de la structuration et de la gestion rationnelle des données sols au niveau européen :

- prise en compte de l'actualisation de la base de données par les pays de l'Union Européenne et des pays d'Europe Centrale et Orientale déjà concernés, tant au plan géométrique que sémantique,
- développement de règles et fonctions de pédotransfert associées,
- réflexions sur la mise en place d'un "réseau" européen de cas concrets d'un niveau de précision correspondant à l'échelle du 1/250 000 (Dudal *et al.*, 1995),
- enfin, et ce n'est pas le moindre des projets, participation étroite et organique à la création d'un "Bureau des Sols Européen", destiné à coordonner l'ensemble des données sols spatialisées pour les besoins des différentes directions générales de l'Union Européenne.

L'ensemble de ces perspectives devrait pouvoir répondre de manière tangible aux attentes des utilisateurs actuels et potentiels, tant en ce qui concerne la recherche agronomique en science du sol qu'en ce qui concerne les problèmes d'amé-

nagement et de conservation de l'espace rural.

EN CONCLUSION

De nombreux travaux de recherches portent actuellement sur l'étude du fonctionnement de la couverture pédologique, en lien notamment avec des programmes sur l'environnement. En réalité, il existe très peu d'études de suivi à long terme. Des sites et des bassins versants élémentaires expérimentaux sont mis en œuvre par différents organismes nationaux afin d'étudier les phénomènes de dégradation des sols et le cycle d'éléments tels que les nitrates ou les pesticides. De tels programmes nécessitent des moyens logistiques très importants et une volonté d'actions menées sur le long terme. Les problèmes de la gestion des données évolutives au cours du temps ainsi que celui de la généralisation spatiale des résultats acquis restent posés. Cela nécessitera la mise en route et le développement de recherches méthodologiques capables d'ajuster et d'intégrer la modélisation des phénomènes à différents niveaux de résolution spatiale et temporelle compatibles avec les informations contenues dans les bases de données géographiques.

La structuration rationnelle de l'ensemble des connaissances sur les principaux types de sols de France, ainsi prévue par voie informatique, devrait faciliter une gestion raisonnée du patrimoine des ressources en sols de notre territoire.

REMERCIEMENTS

Ce travail est le résultat d'une œuvre collective à laquelle ont participé de nombreux pédologues français de différents organismes depuis de longues années. Il est présenté ici par quelques uns plus particulièrement concernés actuellement par la gestion de la structure mise en place.

Nous tenons à remercier vivement tous ces collaborateurs pour leur aide efficace, principalement ceux qui ont directement participé à l'élaboration de la base de données proprement dite, et plus particulièrement *Christine Le Bas* et *Joël Daroussin* pour les sorties informatiques illustrant cette note d'information.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFES - INRA, 1992 - Baize D. et Girard M.C., coord. - Référentiel Pédologique, principaux sols d'Europe. INRA, Paris. 222 p.
- ARROUAYS D., DUVAL O., RENAUX B., 1989 - Esquisse des paysages pédologiques du Loiret à 1/250 000. INRA- Chambre d'Agriculture du Loiret. 1 carte, 1 notice. 182 p.
- ARROUAYS D., HARDY R., 1993 - Le programme inventaire, gestion et conservation des sols. Application dans la région landaise. In : La gestion des sols. Pour une agriculture durable. 2-3/02/1993, Toulouse. Revue Purpan, 166, 5-14.
- ARROUAYS D., 1995 - Analyse et modélisation spatiales de l'évolution des stocks de carbone organique des sols à l'échelle d'un paysage pédologique. Application à l'étude des sols de "touyas" du piémont pyrénéen. Thèse ENSA Montpellier. 169 p.
- BAIZE D., 1983 - Les planosols de Champagne humide. Pédogénèse et fonctionnement. Thèse Doc. État. Université de Nancy. 358 p.
- BAIZE D., 1993 - Petites régions naturelles et "paysages pédologiques" de l'Yonne. INRA/Conseil Général de l'Yonne. 191 p.
- BAIZE D., 1993 - Place of horizons in the new French "Référentiel Pédologique". Catena, 20, 383-394.
- BEGON J.C., 1979 - Sur la mise en évidence de séquences d'évolution dans les formations limoneuses garonnaises. C.R. Acad. Sc. t. 288, D, 481-484.
- BEGON J.C., KING D., STUDER R., 1989 - Faisabilité de la culture du maïs en région Centre. C.R. Acad. Agr., 75, n°9, Séance spécialisée du 13/12/89, 61-67.
- BORNAND M., ARROUAYS D., BAIZE D., JAMAGNE M., 1989 - Cadre méthodologique d'une cartographie régionale des sols à l'échelle de 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. - Étude et Gestion des Sols, N°1, 67-82.
- BOULAIN J., 1975 - Géographie des sols. P.U.F., Paris 200 p.
- BOULAIN J., 1980 - Pédologie appliquée. Collection Sciences agronomiques, Paris, 220 p.
- BOUMA J., VAN LANEN H.A.J., 1986 - Transfer functions and threshold values : from soil characteristics to land qualities. In : Proceedings of the international workshop on quantified land evaluation procedures. 27/04 - 2/05/1986. Washington D.C. 106-110.
- BRABANT P., 1989 - La connaissance de l'organisation des sols dans le paysage, un préalable à la cartographie et à l'évaluation des terres. In SOLTROP 89. ORSTOM, Coll. Colloques et Séminaires, 65-85.
- BRABANT P., 1989 - La cartographie des sols dans les régions tropicales : une procédure à 5 niveaux coordonnés. Science du Sol, 27, 4, 369-385.
- BRIGGS D.J., MARTIN D.M., 1988 - CORINE : an environmental information system for the European Community. Environment Review, 2, 29-34.
- BURROUGH P.A. 1986 - Principles of geographical information systems for land resources assesment. Monographs on Soil and Resources Survey n°12. Oxford Science Publications. 193 p.
- CALLOT G., 1976 - Analyse d'un système géo-pédologique régional Nord-Aquitaine. Thèse Doc. État - USTL Montpellier. 107 p.
- CEC. 1985 - Soil Map of the European Communities at 1 : 1,000,000. CEC DG VI. Luxembourg. 124 p.
- CEC - ISSS. 1986 - Soil Map of Middle Europe 1 : 1 M. EEC publications. Luxembourg. 124 p.
- CEC - CORINE. 1992 - Soil erosion risk and important land resources in the southern regions of the European Community. EEC publications. DG XI. Brussels, Belgium. 97 p.
- CEC. 1993 - A geographical knowledge database on soil properties for environment studies. (D. King Coordinator). CEC DG XI. Report. Brussels, Belgium. 49 p.
- CHRETIEN J., 1994 - Référentiel Pédologique du département de la Côte d'Or. INRA - IGCS (à paraître).
- C.P.C.S., 1967 - Classification des sols. INRA, 87 p.
- DAROUSSIN J., KING D., 1994 - A pedotransfer rules database to interpret the soils geographical database of the European Union for environmental purposes. Proceedings of the 9th European Arc/Info User Conference. Paris, 5-7 October 94.
- DUCLOUX J., 1978 - Contribution à l'étude des sols lessivés sous climat atlantique. Thèse Doc. État - Université de Poitiers, 200 p.
- DUDAL R., BREGT A.K. and FINKE P.A., 1995 - Feasibility of the creation of a soil map of Europe at a scale of 1/250 000. In : European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring (Eds King, Jones and Thomasson). JRC European Commission. ISPRA. 207-220.
- DUPUIS J., 1966 - Carte Pédologique de France à 1/1 000 000.- INRA. SESCOF - Paris. 56 p.
- FAO, 1974 - FAO/Unesco - Soil Map of the World 1 : 5,000,000. Vol. I, Legend - Unesco. Paris, France.
- FAO, 1989 - FAO/Unesco. - Carte Mondiale des Sols 1 : 5,000,000 - Légende révisée. Rapport sur les ressources en sols du monde, 60. FAO, Rome, 125 p.
- FAO - ISRIC - ISSS, 1994 - World Reference Base for Soil Resources - FAO, Rome - Wageningen, 161 p.
- FAVROT J.C., 1987 - Etudes et recommandations préalables au drainage : la méthode des Secteurs de Référence. C.R. Aca. Agric. Fr. 87-73. N. 4 23-32.
- FAVROT J. C et collaborateurs - 1990 - Référentiel des Travaux de Cartographie des Sols sur le territoire français.- GEPPA - INRA Montpellier.
- FAVROT J.C., LAGACHERIE Ph., 1993 - La cartographie automatisée des sols : une aide à la gestion écologique des paysages ruraux.. C.R. Aca. Agric. Fr. 93-79, N°5, 61-76.
- FRIDLAND V.M., 1975 - Structure of the soil cover. Xe Congrès A.I.S.S., II Moscou 552-558.
- 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.
- GEMS, 1990 - Global Environment Monitoring System. UNEP. Nairobi. 32 p.
- GIORDANO A., PETER D. and MAES J., 1995 - Erosion risk in southern Europe. In European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring (Eds King, Jones and Thomasson). JRC European Commission. ISPRA. 167-177.
- GIRARD M.C., 1983 - Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique. Thèse Doc. État. INA-PG, Sols n°12, Grignon. 430 p.
- GIRARD M.C., AUROUSSEAU P., KING D., LEGROS J.P., 1989 - Apport de l'informatique à l'analyse spatiale de la couverture pédologique et à l'exploitation des cartes. Science du Sol, 27 (4), 45-60.
- GIRARD M.C., SOYEUX E., BORNAND M., YONGCHALERMCHAI C., 1993 - Structuration de l'espace régional et protection des ressources naturelles. C.R. Aca. Agric. Fr. 93-79, 5, 37-50.
- GRID, 1990 - Global Resource Information Database. UNEP. Nairobi-Genève. 16 p.
- HARDY R., 1992 - Connaissance et inventaire cartographique des sols en France. Le rôle de coordination scientifique de l'INRA, aux plans national et européen, pour une meilleure valorisation des données. Colloque Qualité et vulnérabilité des sols, Ferrara, Italie, 3-4/12/92.

- INRA - SESCOF - "Cartes Pédologique de France". 1969 - 1994. FAVROT J.C., Vichy L15 (1969) - SERVANT J., Perpignan L 24-25 (1970) - PORTIER J., Toulon P23 (1974) - FAVROT J.C., Moulins L14 (1974) - CALLOT G., Angoulême H16 (1975) - SEGUY J., Condom H21 (1975) - CHRETIEN J., Dijon 012 (1976) - BONFILS P., Brive J18 (1976) - BORNAND M., et coll., Privas N19 (1977) - BAIZE D., Tonnerre M10 (1978) - BONNEAU M., et coll., Saint-Dié Q19 (1978) - WILBERT J., Lesparre F17 (1978) - ISAMBERT M., Châteaudun I9 (1978) - CRAHET M., Chartres J8 (1981) - ARNAL H., Montpellier M22 (1983) - BENOIT-JANIN P., Langres 010 (1986) - DUTIL P., Saint Dizier N8 (1992) - BONFILS P., Lodève L22 (1993) - BOUTEYRE J. et DUCLOS G. Arles N22 (1994).
- ISRIC. 1993. Global and National Soils and Terrain Digital Databases (SOTER). Procedures Manual. UNEP-ISSS-ISRIC-FAO. ISRIC. Wageningen, Netherlands. 115 p.
- JAMAGNE M., 1967 - Bases et techniques d'une cartographie des sols. Ann. Agro. n° hors série, 18, 142 p.
- JAMAGNE M., 1973 - Contribution à l'étude pédogénétique des formations loessiques du Nord de la France - Thèse Doc. en Sc. Agr. Fac. Gembloux - 475 p.
- JAMAGNE M., BORNAND M., HARDY R. - 1989 - La Cartographie des Sols en France à moyenne échelle. Programme en cours et évolution des démarches. Science du Sol, 27, 4, 14-29.
- JAMAGNE M., KING D., 1991 - Mapping methods for the 1990's and beyond. In : Soil survey, a basis for european soil protection. Silsoe, 11-12/12/1989. Soil and groundwater research report I. CEC. 181-196.
- JAMAGNE M., KING D., DAROUSSIN J., LE BAS C., 1993 - Evolution et état actuel des programmes européens de connaissance et de gestion des sols. Bull. Rech. Agron. Gembloux, 28, (2-3), 135-163.
- JAMAGNE M., 1993 - Connaissance des sols et fragilité écologique. Séance spécialisée du 9 juin 1993. Animation, introduction, synthèse et conclusion. C. R. Acad. Agric. Fr., 5, 33-36 et 77-86.
- JAMAGNE M., 1993 - Evolution dans les conceptions de la cartographie des sols. Pédologie, XLIII, 1, 59-115.
- JAMAGNE M., KING D., GIRARD M.C., HARDY R., 1993 - Quelques conceptions actuelles sur l'analyse spatiale en pédologie. Science du Sol, 31, 3, 141-169.
- JAMAGNE M., KING D., LE BAS C., DAROUSSIN J., BURRILL A., VOSSSEN P., 1994 - Creation and use of a European Soil Geographic Database. 15th International Congress of Soil Science. Transactions - Vol. 6a - Commision V - Symposia - Acapulco - Mexico, 728-742.
- JAMAGNE M., LE BAS C., BERLAND M. and ECKELMANN W., 1995 - Extension of the EU database for the soils of central and eastern Europe. In : European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring (Eds King, Jones and Thomasson). JRC European Commission. ISPRA. 85-99.
- KING D., 1986- Modélisation cartographique du comportement des sols basée sur l'étude de la mise en valeur du Marais de Rochefort. Thèse Doc. Ing. INA PG, 243 p.
- KING D. 1989 - Remote sensing and agrometeorological models for yield forecasts. MARS project. CEC. JRC. Ispra, Italy. 25 p.
- KING D. 1990 - The available water capacity map compiled from the European Communities Soil Map at scale one to one million. Proc. 1st Conference on MARS program. CEC. Varese, Italy. 235-242.
- KING D., DAROUSSIN J., JAMAGNE M., 1991 - Contribution of Geographical Information Systems concepts to Soil Mapping. The Soil Map of the European Communities. 2^{ème} Conf. G.I.S.-SISM, Ottawa, 5-8/03/1990. 731-744.
- KING D., LE BISSONNAIS Y., HARDY R., EIMBERCK M., MAUCORPS J., KING C., 1992 - Spatialisation régionale de l'évaluation des risques de ruissellement. Exemple du Nord - Pas-de-Calais. Revue des Sciences de l'Information Géographique et de l'Analyse Spatiale, 2 (2), 229-246.
- KING D., J. DAROUSSIN, R. TAVERNIER, 1994 - Development of a soil geographic database from the soil map of the European Communities. CATENA. 21, 37-56.
- KING D., J. DAROUSSIN, JAMAGNE M., 1994 - Proposal for a Model of a Spatial Organization in Soil Science : Example of the European Communities Soil Map. Journal of the American Society for Information Sciences. 45 (9) - 705-717.
- KING D., JAMAGNE M., CHRETIEN J., HARDY R., 1994 - Soil-space organization model and soil functioning units in Geographic Information Systems. 15th International Congress of Soil Science, Transactions - Vol. 6a - Commision V - Symposia - Acapulco - Mexico, 743-757.
- KING D., LE BAS C., DAROUSSIN J., THOMASSON A.J. and JONES R.J.A., 1995 - The EU map of Soil Water Available for Plants. In European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring (Eds King, Jones and Thomasson). JRC European Commission. ISPRA. 131-141.
- KING D., BURRILL A., DAROUSSIN J., LE BAS C., TAVERNIER R. and VAN RANST E., 1995 - The EU soil geographic database. In European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring (Eds King, Jones and Thomasson). JRC European Commission. ISPRA. 43-60.
- LAGACHERIE P., 1992 - Formalisation des lois de distribution des sols pour automatiser la cartographie pédologique à partir d'un secteur pris comme référence. Cas de la petite région naturelle moyenne vallée de l'Hérault. Thèse Univ. Montpellier. 175 p.
- LAMMERS D.A. and JOHNSON C.G., 1991 - Soil mapping concepts for environmental assessment. in : "Spatial variabilities of soils and landforms". SSA Special Publication N° 28. Madison. 149-160.
- LEGROS J.P., 1982 - L'évolution granulométrique au cours de la pédogénèse. Approche par simulation sur ordinateur. Thèse Doc. État - USTL Montpellier, 402 p.
- LEGROS J.P., 1991 - Computerized data sets for soils maps in geographical information technology in the field of environment. UNED/UNITAR and EPFL. Training programme in GIS. 309-456.
- LEGROS J.P., FALIPOU P., DUNAND-DIVOL S., 1992 - Vérification de la qualité de l'information dans les bases de données de sols. Science du Sol, Vol. 30, 2, 117-131.
- MADSEN H.B. 1991 - The principles for construction of an EC-Soil database system. In "Soil Survey, a Basis for European Soil Protection" (Ed : J.M. Hodgson). CEC. 173-180.
- MADSEN H. and JONES R.J.A., 1995 - The establishment of a soil profile analytical database for the European Union. In European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring (Eds King, Jones and Thomasson). JRC European Commission. ISPRA. 61-69.
- MEYER-ROUX J., 1987 - The ten-year research and development plan for the application of remote sensing in agriculture statistics. CEC-DGVI, JRC Ispra. 23 p.
- MEYER-ROUX J., 1995 - Future needs for soil information in the European Union. In European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring (Eds King, Jones and Thomasson). JRC European Commission. ISPRA. 247-249.
- MSANYA B.M., LANGOHR R. and LOPULISA C., 1987 - Testing and improvement of a questionnaire to users of soil maps. Soil Survey and Land Evaluation. (7), 33-42.
- NGONGO L., KING D., NICOLLAUD B., BRISSON N., RUGET F., 1993 - The accuracy of methods for the selection of soil data in estimating regional moisture deficit from soil maps. Pédologie. XLIII-2, 285-299.
- PLATOU S.W., NORR A.M., MADSEN H.B., 1989 - Digitizing of the EC Soil map. In : Proceedings of the international workshop of computerization of land use data. Pisa. CEC DG VI. Luxembourg. 12-24.

- ROBBEZ-MASSON J.M., 1994 - Reconnaissance et délimitation de motifs d'organisation spatiale. Application à la cartographie des pédopaysages. Thèse ENSA Montpellier. 189 p.
- ROQUE J., HARDY R., 1994 - Carte des pédopaysages de l'Île de France à 1/250 000 ; base de données géométrique et sémantique sur support informatique INRA - Orléans (à paraître).
- SOIL SURVEY STAFF, SCS, 1975 - Soil Taxonomy - U.S. Department of Agriculture handbook 436 - USDA - Washington, 754 p.
- STIPA, 1984 - Bertrand R., Falipou P., Legros J.P. ; Notice pour l'entrée des descriptions et analyses de sols en banques de données. ACCT. Paris, 136 p.
- VALENTINE K.W.G., NAUGHTON W.C. and NAVAJ M., 1981 - A questionnaire to users of soil maps in British Columbia. Canadian Journal of Soil Science, 61, 123-135.
- VAN RANST E., VANMECHELEN L., THOMASSON A.J., DAROUSSIN J., HOLLIS J.M., JONES R.J.A., JAMAGNE M. and KING D., 1995 - Elaboration of an extended knowledge database to interpret the EC 1 : 1 M Soil Map for environmental purposes. In European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring (Eds King, Jones and Thomasson). JRC European Commission. ISPRA. 71-84.
- VOSEN P. and MEYER-ROUX J., 1995 - Crop monitoring and yield forecasting activities of the MARS Project. In European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring (Eds King, Jones and Thomasson). JRC European Commission. ISPRA. 11-29.
- WALTER C., 1990 - Estimation de propriétés du sol et quantification de leur variabilité à moyenne échelle : cartographie pédologique et géostatistique dans le sud de l'Île et Vilaine (France). Thèse Doc. SDS 436, Université de Paris VI. Rennes. 172 p.
- WEBSTER R. and OLIVER M.A., 1990 - Statistical methods in soil and land resource survey - Spatial Information Systems. Oxford University