Apports réciproques des SIG et de la télédétection pour l'élaboration d'un système d'informations sur les sols d'Europe

D. KING [1], A. BURRILL [2]

1. INRA Science du Sol - SESCPF, 45160 Ardon-Olivet, France.
2. CCR - IATD 21020 Ispra (VA) Italy.

Résumé

Face aux demandes concernant le suivi de la production agricole (programme MARS) et la surveillance de l'environnement (programme CORINE, Agence Européenne de l'Environnement), la Commission de l'Union Européenne achèvera prochainement une base de données géographique des sols d'Europe (Union Européenne et pays de l'Europe continentale) à une échelle correspondant à la résolution et la précision du 1/1 000 000. Ce travail est le fruit d'une collaboration des principaux centres de cartographie et de gestion des bases de données « sols » des pays d'Europe.

Les concepts SIG ont été largement utilisés pour développer cette base et valoriser les informations d'archives acquises antérieurement. Les données de télédétection ont été utilisées de façon empirique pour la définition des Unités Cartographiques de Sols. En revanche, il est prévu de combiner de façon explicite, des données de sols avec des données de télédétection soit au sein de règles de pédotransfert, soit avec l'utilisation de modèles agrométéorologiques.

A l'avenir, il serait nécessaire de poursuivre le développement de telles bases à des niveaux de résolution plus fins. Pour ce faire, il est recommandé d'une part d'identifier et de stocker les données de base et d'autre part d'expliciter les démarches utilisées pour reconnaître les lois d'organisation des sols dans l'espace. La télédétection est l'un des outils qui devrait offrir des moyens de quantification de l'espace et également de suivi de la dynamique des phénomènes. Son intégration avec les autres données incluses dans les SIG reste une voie de recherches.

Abstract

The complementarity of GIS and remote sensing in the development of a soils information system for Europe

The European Commission has established a soils information system to address some of its needs in the areas of agriculture and environment. The resolution of the information in this system corresponds to that of a printed map at the scale of 1:1,000,000. The information system is operational for the 1994 member states of the European Union and is being extended progressively to include the new member states, Norway, Switzerland, Central and Eastern Europe, the Baltic states and the Balkan region. The system includes spatial descriptions of soils mapping units, profile information and global knowledge (expert system rules).

Remote sensing served as a useful tool in development of the national overviews on the basis of which the soil mapping units were delineated. Inversely, the soils information system may now serve remote sensing projects, such as the MARS crop monitoring programme or the CORINE project to assess erosion risk. In these activities, the soils information complements the data which are derived from satellites.

The European Soils Information System was developed following basic GIS design principles: distinct layers of information, separation of spatial information and attributes, quality control, etc. During the compilation process, it was highlighted that the design the database should not be influenced by the limitations of the type and amount of information which can be placed on printed maps.

If this system is to be used in the future for regional applications, its spatial resolution will need to be improved. One possible approach would be to digitize larger scale maps (e.g. 1:250,000), depending of course on their availability. Judging by experience gained during the development of the present database, however, it would seem preferable to develop the expanded system directly as a database. This implies the need to store and harmonize these data, with the precise definition of cartographic modeling rules (typology, attribute links, geographic links, etc.)

Satellite-derived data would form an integral part of such a system. They can contribute indirect information about the soils on the basis of landscapes, and also provide direct information about soil state characteristics. Similarly, satellite imagery can provide valuable information about the temporal evolution of phenomena, in particular the degradation or erosion of soils. In an information system concerned primarily with the soil, however, it is important to limit the data to those which truly relate to the soils characteristics. Given the large size and quantity of satellite datasets it will be important to determine the appropriate pre-processing steps.

1. Introduction

Le développement d'une nouvelle politique agricole commune en Europe ainsi que l'accroissement des problèmes de dégradation de l'environnement ont conduit l'Union Européenne à développer une base de données géographiques des sols harmonisée sur l'ensemble du continent européen. Deux principaux programmes sont à l'origine de ce développement : le programme CORINE (BRIGGS et MARTIN, 1988) et le programme MARS (MEYER-ROUX, 1987).

Le programme CORINE a digitalisé en 1986 la carte des sols des Communautés Européennes (PLATOU et NOOR, 1989) et l'a introduite dans le système global d'informations sur l'environnement. Le programme MARS a repris et développé cette première base d'une part en augmentant la précision des variables (KING et *al.*, 1994a) et d'autre part en lançant un programme d'extension vers les pays de l'Europe Centrale, Orientale, Baltes et Scandinaves (JAMAGNE et *al.*, 1994). Ces deux programmes utilisent prioritairement un grand nombre de données satellitaires. Au regard de ces programmes, nous nous proposons d'examiner les apports réciproques de la télédétection et des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) qui ont contribué au développement de la base de données des sols d'Europe.

Nous présentons tout d'abord l'état actuel de la base. Puis, nous examinerons comment les concepts des SIG ont permis de structurer un système d'information d'une façon plus large que la simple représentation cartographique. Nous examinerons ensuite comment la télédétection est une source d'information pour l'établissement d'une telle base et comment, en retour, cette base alimente des programmes utilisant des données de télédétection. Enfin, nous tenterons de dégager les éléments qui serviront aux développements futurs.

2. Le système d'information sur les sols d'Europe

Depuis plusieurs années, on constate une diminution et une réorientation des programmes d'inventaire cartographique dans de nombreux pays (par exemple, CEC, 1991, HEWITT, 1993). Ceci ne signifie pas nécessairement une diminution de la demande dans le domaine des données de sol. Par contre, on constate que la carte pédologique établie et présentée sous une forme conventionnelle, ne suffit plus à transmettre les informations nécessaires (VALENTINE et *al.*, 1981 ; MSYANA et *al.*, 1987 ; LAMMERS et JOHNSON, 1991), en particulier dans le domaine du suivi de l'environnement. Dans le cas des programmes européens, la demande a été orientée très tôt vers la connaissance 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 (VAN DIEPEN, 1992). Il s'agit donc de fournir des données quantifiées, localisées dans l'espace et de plus, harmonisées à l'échelle continentale. De

nombreux programmes nationaux ou internationaux expriment actuellement les mêmes besoins (GEMS, 1990 ; GRID, 1990 ; ISRIC, 1993).

La carte des sols publiée en 1985 a servi de support à l'élaboration de la première base de données géographiques Les travaux ont consisté à remonter aux sources de l'information (BURRILL et KING, 1993), tout d'abord en intégrant les archives ayant servi à l'harmonisation cartographique (TAVERNIER, 1985), ensuite en demandant à chacun des pays concernés de réactualiser ces informations anciennes (LE BAS et *al.*, 1994), enfin en complétant ces informations par des données mesurées sur des profils pédologiques localisés (MADSEN, 1991).

La base de données géographique des sols d'Europe est actuellement structurée en quatre modules (Fig. 1) : (1) la base géographique proprement dite, (2) la base « profils », (3) la base de connaissances et (4) la métabase.

Le premier module est au centre du système. Il contient les Unités Typologiques de Sols (UTS) qui décrivent tous les types de sols européens identifiés principalement selon la légende FAO (1975) révisée CEC (1985). Du point de vue sémantique, les UTS sont caractérisées par des attributs descriptifs codés selon une nomenclature harmonisée : nom de sol FAO, texture de surface et de profondeur, pente, phase, matériau parental, différenciation texturale, obstacle aux racines, régime hydrique, présence d'une couche imperméable, etc. Du point de vue géométrique, les UTS sont en général trop détaillées pour être représentables à l'échelle du 1/1 000 000. Elles sont donc regroupées en Unités Cartographiques de Sols (UCS) définies au plan géométrique par un contour pédologique géoréférencé, et au plan sémantique par des variables descriptives (par exemple, nombre d'UTS). Cet « objet » UCS est équivalent au concept classique d'associations de sols (SIMONSON, 1971). 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 (double codage possible pour chaque attribut afin de donner l'étendue de leur gamme de variation intra-UTS).

Le second module contient des profils pédologiques caractérisés par les principales variables d'analyses physiques et chimiques. Dans une première étape, il a été décidé de recueillir un profil représentatif de chaque UTS dominante au sein des UCS (c'est-à-dire l'UTS ayant le plus fort pourcentage de surface au sein de l'UCS). Compte tenu des difficultés d'harmonisation des méthodes d'analyses de laboratoire, 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 « variables estimées », les méthodes sont imposées afin de pouvoir établir des comparaisons immédiates entre les pays. Les valeurs indiquées proviennent d'un transfert des données brutes après interprétations 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

variabilité 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 régionalisation la sélection des profils pour des UCS ou UTS dispersées sur un large territoire.

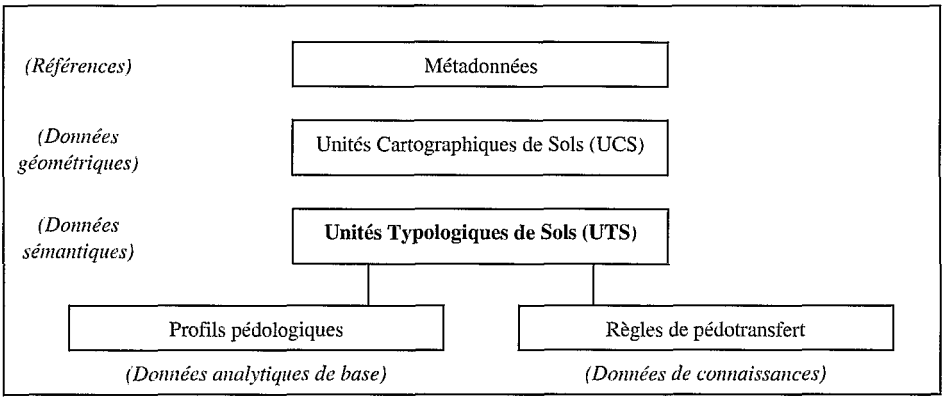

Figure 1. Schéma d'organisation des informations dans la base de données géographique des sols d'Europe.

Le troisième module contient des règles de pédotransfert afin d'établir des estimations pour des variables absentes de la base à partir des variables présentes (Tableau 1). Il s'agit donc d'une base de connaissances élaborée à partir de références bibliographiques. Les règles sont appliquées au niveau des UTS, les valeurs manipulées en entrée et en sortie étant qualitatives. Les estimations réalisées peuvent être réinjectées dans la base et même servir de support à de nouvelles règles. L'enchaînement explicite de ces règles permet de formaliser les interprétations que l'on effectue empiriquement lors de l'examen et de l'interprétation d'une carte pédologique. L'avantage de ce système est de pouvoir réactualiser à tout moment les connaissances. Toute modification des variables d'entrée (attributs des UTS) ou des règles elles-mêmes, imposent de nouvelles simulations pour la mise à jour des variables de sortie.

Le dernier module, encore à l'état de projet, a pour objectif de rassembler les informations de référence sur les études pédologiques disponibles au plan européen (concept de méta-données). Un précédent programme avait permis l'établissement d'un référentiel des bases de données (CEC, 1990) mais il n'y a jamais eu de mise à jour depuis sa création. La connaissance des études pédologiques disponibles sous forme numériques ou non permettrait d'identifier les sources d'informations et d'orienter les futurs programmes de coordination. Elle permettrait de juger de la qualité de la synthèse réalisée au 1/1 000 000. Il existe en effet des niveaux très variés de densité d'observations selon les régions européennes (CEC, 1991).

Tableau 1. Extrait de la liste des règles de pédotransfert (CCE, 1994).

INPUT ATTRIBUTES	OUTPUT ATTRIBUTES	OUTPUT (CLASSES)
BIOLOGICAL ATTRIBUTES		
- FAO soil name - Topsoil textural class - Regrouped land use class - Accumulated mean temp.	Topsoil organic carbon content (0 - 25 cm)	H(igh): > 6.0% M(edium): 2.1-6.0% L(ow): 1.1-2.0% V(ery) L(ow): ≤ 1.0%
- FAO soil name	Presence of a raw peaty topsoil	Y(es) N(o)
CHEMICAL ATTRIBUTES		
- FAO soil name	Profile Mineralogy	(C)hemical or Geochemical (M)echanical or Physical MC: Chemical and Mechanical ND: No Differentiation
- Parental material - Profile Mineralogy	Topsoil Mineralogy	KQ: 1/1 minerals + quartz KX: 1/1 minerals + oxides & Hy. MK: 2/1 and 1/1 minerals M: 2/1 and 2/1/1 non swelling m.
- Parental material - Profile Mineralogy	Subsoil Mineralogy	MS: Swelling and non s. 2/1 m. S: Swelling 2/1 minerals TV: Vitric materials TO: Andic materials
- Topsoil textural class - Topsoil organic carbon content - Soil profile differentiation - Profile Mineralogy	Topsoil Cation Exchange Capacity	L(ow): < 15 cmol(+)kg-1 soil M(edium): 15-40 H(igh): > 40
- Subsurface textural class - Subsoil mineralogical class	Subsoil Cation Exchange Capacity	
MECHANICAL ATTRIBUTES		
- Regrouped land use class - FAO soil name	Topsoil structure	G(ood), N(ormal), P(oor)
- FAO soil name	Subsoil structure	H(umic) or Peaty soil ; O : Peaty subsoil
HYDROLOGICAL ATTRIBUTES		
- Parental material	Parent material hydrogeological type	R, C, S, L, H, M
- FAO soil name - Elevation - Parent material hydrological class	Hydrological class	HG1: soil with permeable substratum, remote from groundwater: seldom wet HG2: lowland soil affected by groundwater, seasonally or permanent wet, or artificially drained HG3: soil with impermeable layers within 80 cm depth, seasonally or permanently wet HG4: soils of the uplands and mountains
- Topsoil textural class - Topsoil packing density	Available Water Capacity of the topsoil	V(ery) H(igh): > 190 mm H(igh) : 140-189 mm M(edium) : 100-139 mm
- Topsoil textural class - Topsoil packing density	Easily Available Water Capacity of the topsoil	L(ow): < 99 mm

3. Apport des concepts SIG

Le SIG est entendu, dans cet article, comme un outil informatique permettant de collecter, de gérer, d'analyser et de restituer des données géographiques (BURROUGH, 1986). Le développement d'un tel outil a permis de dégager ou de préciser des concepts généraux dans le domaine des sciences géographiques. Appliqué à la cartographie des sols, et plus particulièrement à l'exemple de la carte des sols des Communautés Européennes, il a permis de progresser dans les quatre activités citées : collecte, gestion, analyse, restitution.

3.1. Collecte des données

La mise en place d'une base de données géographiques nécessite d'analyser la nature et le volume des données que l'on manipule. Lorsqu'un document cartographique existe, une première méthode consiste à numériser celui-ci de façon à permettre une automatisation des procédures d'édition cartographique. L'exemple de la carte des sols des Communautés Européennes a clairement montré les limites de cette méthode (KING et *al.*, 1994a). En effet, la production d'une carte à petite échelle impose des règles de lisibilité qui nécessitent de privilégier ou d'agréger des informations. On constate une simplification des contours pédologiques et surtout des variables sémantiques décrivant la nature de sols. Ceci conduit donc à la perte des données initiales voire même à des erreurs d'interprétation de la carte publiée lorsque les procédures d'agrégation sont trop fortes. L'établissement d'une base de données géographique implique donc d'identifier les informations de base collectées et rassemblées avant la procédure de synthèse et d'écriture cartographique. Dans le cadre de la carte des sols d'Europe, il a été jugé trop difficile de collecter ce type d'information à la base mais un niveau d'harmonisation intermédiaire a été défini en concertation avec les différents pays concernés (CEC-INRA, 1993).

3.2. Gestion des données

La gestion des données dépend de leur organisation au sein de la base géographique. Cette organisation dépend elle-même de l'analyse précédente faite sur la nature des données. L'un des principaux apports conceptuels est de préciser la distinction entre les données géométriques et les données sémantiques. Les Unités Cartographiques de Sols (UCS) sont des objets géométriques de la couverture pédologique décrits principalement par leur contenant (GIRARD et *al.*), tandis que les Unités Typologiques de Sols (UTS) sont des objets sémantiques identifiés par leur contenu. La variabilité des sols est ainsi décrite géométriquement avec le découpage en UCS et symboliquement à l'aide de descripteurs qualitatifs de l'organisation des UTS au sein des UCS (GAULTIER et *al.*, 1992). En complément de cette organisation en UCS et UTS, des profils pédologiques constituent un échantillon des données réelles

qui ont servi à l'établissement de la carte. Ce sont ces données de base dont il a été jugé impossible de réaliser une collecte exhaustive d'autant plus qu'il faudrait y ajouter d'autres éléments tels les modèles numériques de terrain, les images de télédétection, etc.

3.3. Analyse des données

Rassembler un grand nombre de données ne suffit certainement pas à répondre aux questions posées dans le domaine du suivi de la production agricole ou de la protection de l'environnement. L'analyse et le traitement de ces données constituent des étapes essentielles avant de produire une information claire et directement utilisable dans des programmes finalisés. Antérieurement, l'usage d'une carte pédologique ne se limitait pas au transfert brute des données de base. Un tel usage est la plupart du temps intégré dans une procédure d'aide à la décision qui fait appel à d'autres données de l'environnement ainsi qu'à des connaissances « universelles » non nécessairement acquises sur le territoire prospecté. Les données passent ainsi par une série de « filtres » avant d'être réellement utilisées. Deux types de filtre ont été identifiés et mis en œuvre dans le cadre du projet européen : d'une part un premier essai de bases de connaissances sous la forme de règles de pédotransfert fournit une aide à l'interprétation sous la forme d'un système expert, et d'autre part des modèles agrométéorologiques sont développés pour répondre aux questions sur le suivi de la production agricole. Ces deux approches utilisent des données externes à la base « sols » et devraient progressivement intégrer des images de télédétection.

3.4. Restitution des données

La dernière fonction des SIG est la « restitution » des données. Elle peut se présenter sous la forme de cartes montrant soit des données brutes, soit des données élaborées au travers des « filtres » ci-dessus mentionnés. Il arrive que la production de cartes soit totalement absente d'une procédure utilisant les SIG, par exemple lorsque la demande concerne la réalisation de tableaux statistiques globaux.

Les procédures d'automatisation du dessin cartographique sont rendues possibles grâce aux SIG : par exemple, changement d'échelle, vue trois dimensions, etc. Mais l'apport fondamental des SIG consiste en leur capacité à gérer parallèlement les données et l'incertitude attachée aux données. Ainsi, quel que soit le type de restitution issue de la base de sols d'Europe, il est produit une carte de pureté et une carte du niveau de confiance. La première carte indique le pourcentage de représentativité de l'information au sein des unités cartographiques complexes. La seconde carte exprime le degré de fiabilité accordé aux règles de pédotransfert utilisées.

L'utilisation des SIG montre qu'une carte numérisée et gérée par un ordinateur ne constitue pas une réelle base de données géographique. Il est nécessaire désormais d'inverser notre approche de l'espace géographique, en travaillant d'abord à l'établissement d'un « modèle d'organisation spatiale » et en utilisant tous les concepts

accessibles à l'analyse numérique de l'espace. Ensuite, il est toujours possible d'en déduire des cartes, toujours fortement conseillées pour assurer une communication rapide et synthétique de l'information géographique complexe (KING et *al.*, 1994b).

4. Apport de la télédétection

La télédétection est entendue comme l'ensemble des techniques qui permettent d'acquérir des informations à partir de l'espace (acquisition aéroportées ou satellitaires), de les traiter et de les restituer sous forme d'images (GIRARD et GIRARD, 1989). Exception faite de la connaissance physique du signal, une telle définition pourrait s'inscrire dans celle proposée pour les SIG. Dans le domaine de la cartographie pédologique, la télédétection a toutefois la particularité d'être l'une des rares techniques fournissant des informations avec une large résolution spatiale. En effet, la plupart des données acquises par les pédologues sont relevées ponctuellement, la résolution des capteurs classiques ne dépassant pas quelques décimètres carrés. Ils faut alors utiliser des procédures mathématiques d'interpolation (WEBSTER et OLIVER, 1990) ou s'appuyer sur un support continu de l'espace corrélé aux données pédologiques, comme celui offert par les Modèles Numériques de Terrain (MNT) ou par la télédétection.

De nombreuses études ont recherché les liens existant entre les caractéristiques des surfaces des sols nus mesurées sur le terrain et le signal reçu par les capteurs à différentes longueurs d'onde (par exemple, CIERNIEWSKI et COURAULT, 1993 ; COURAULT, 1989 ; ESCADAFAL et *al.*, 1988). A l'échelle de travail utilisée pour l'élaboration de la carte des sols d'Europe puis pour l'enrichissement de la base géographique associée, il était difficile de prendre directement en compte ces relations. Par contre, des images ont été utilisées pour identifier des paysages selon l'occupation des sols (GIRARD *et al.*, 1991). La délimitation de certaines Unités Cartographiques de Sols a pu ainsi être précisée dès lors que l'on connaissait la relation entre les types de sols et leur usage. Dans la grande majorité des cas, ces travaux ont été réalisés empiriquement à partir d'images traitées de façon standard. De plus, la définition des unités cartographiques n'a pas reposé sur cette seule analyse mais elle a été intégrée dans un processus de synthèse d'un grand nombre d'informations provenant, par exemple, de cartes pédologiques réalisées à plus grande échelle, de données sur la forme des reliefs, d'informations géologiques, etc. Il est donc difficile d'identifier la part réelle de l'apport de la télédétection.

En revanche, cet apport devrait apparaître plus clairement dans l'utilisation potentielle de la base de connaissances. Certaines règles nécessitent en entrée des données non pédologiques, principalement climatiques et agronomiques. Dans le cas où la télédétection peut fournir directement les données nécessaires, il est possible de réaliser une combinaison géographique des images de télédétection avec la base « sols ». Par exemple, pour l'estimation des taux de matière organique, une règle a été

établie (DAROUSSIN et KING, 1994) nécessitant les variables en entrée suivantes : occupation du sol, texture de surface, type de sol selon la nomenclature FAO et température cumulée moyenne. Il serait possible de combiner les données extraites de la base « sols » avec des données extraites de la base « CORINE land cover » issue elles-mêmes de l'interprétation d'images de télédétection. Cette combinaison pourrait être complétée avec les données climatiques interpolées à partir du réseau météorologique européen. L'état d'avancement du programme « CORINE land cover » ne permet pas encore une application sur l'ensemble de l'Europe. Mais l'état actuel des travaux permet d'envisager des tests locaux avec l'avantage d'une mise à jour des simulations au fur et à mesure de la progression de l'acquisition de nouvelles données.

Enfin, rappelons que l'un des principaux demandeurs de données pédologiques est un programme principalement axé sur l'utilisation de la télédétection. Il s'agit du programme MARS (MEYER-ROUX, 1987). Pour l'estimation des surfaces et le suivi des cultures, les données sont en général utilisées de façon directe sous la forme d'interprétations ou de traitements statistiques sans faire appel à d'autres sources d'informations. Par contre, pour l'évaluation des rendements, l'objectif est d'injecter des données de télédétection dans des modèles agrométéorologiques en les couplant avec d'autres types de données, en particulier climatiques ou pédologiques (VOSSEN, 1992). Plusieurs niveaux d'intégration sont envisagés : (1) soit en fournissant en entrée des paramètres du modèle (température de surface), (2) soit en calant le modèle à l'aide d'un paramètre accessible par télédétection à certains stades phénologiques de la plante (indice foliaire), (3) soit enfin, en comparant de façons indépendantes des résultats de modélisation provenant respectivement de la télédétection et de données de terrain.

5. Perspectives

La base de données géographique des sols d'Europe est en voie d'achèvement pour 18 pays auxquels s'ajouteront prochainement 11 autres pays (Fig. 2). Les premières utilisations de cette base ont permis de fournir des informations globales à l'échelle « continentale » et ainsi de comparer des situations régionales diversifiées. Toutefois, il est reconnu par les concepteurs et par les utilisateurs de cette base que les données sont insuffisamment précises pour rendre compte de la variabilité des paramètres pédologiques (CEC, 1991). Tout d'abord, les unités de mesure sont trop grossières et trop souvent limitées à une appréciation qualitative. Ensuite, la résolution spatiale ne permet pas de décrire réellement des Unités de Sols mais des Associations de Sols. Pour de nombreux problèmes en particulier environnementaux, la localisation de petites unités peut s'avérer essentielle. Enfin, il est désormais nécessaire de connaître l'évolution temporelle des caractéristiques des sols afin de suivre et de prédire la dynamique des phénomènes. Ce dernier aspect n'est absolument pas pris en compte dans la base actuelle.

5.1. Besoins théoriques

Les travaux réalisés ont permis de créer un réseau international prêt à œuvrer pour un nouveau projet harmonisé. Un groupe de travail est constitué pour élaborer des recommandations sur un nouveau projet en réponse aux demandes de la Commission de l'Union Européenne. Les réflexions s'appuient sur les leçons tirées du premier travail collectif, principalement en ce qui concerne (1) la quantification des démarches et (2) la recherche d'une structure informatique la plus proche possible des données de base.

(1) La quantification des approches cartographiques est désormais reconnue comme indispensable (ARNOLD et WILDING, 1991). L'essor des SIG favorise ce processus en offrant les outils nécessaires. Pourtant, les essais de cartographie entièrement numérique restent encore peu nombreux, surtout aux moyennes et petites échelles (du 1/50 000 au 1/1 000 000). Cela est certainement dû à la nature et au volume des informations traitées lors d'une analyse spatiale de la couverture pédologique.

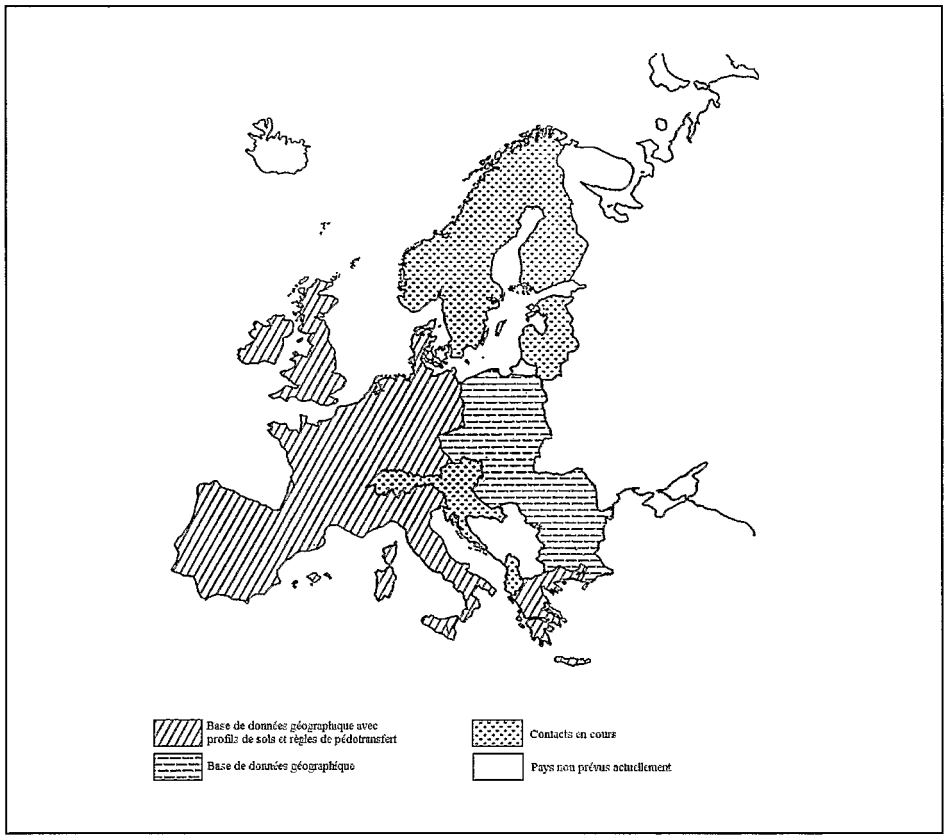

Figure 2. Etat d'avancement de la base de données géographiques des sols d'Europe.

(2) L'élaboration d'une structure informatique nécessite l'identification des données nécessaires pour un objectif fixé. L'idéal est d'enregistrer les données brutes qui, combinées entre elles, sont à la source de toutes les informations délivrées. En Science du Sol, l'étude des couvertures pédologiques est fondamentalement ancrée sur la recherche des facteurs pédogénétiques qui déterminent les éléments structuraux du paysage (HUGGETT, 1975 ; HALL et OLSON, 1991). Elle fait donc appel principalement à la recherche des relations entre les variables du sol et celles de leur environnement (matériau originel, géomorphologie, climat, formation végétale). En théorie, une base de données de sols devrait donc être multifactorielle puisque l'on devrait stocker à la fois les données pédologiques mesurées (essentiellement des profils) et les données sur l'environnement (géologie, MNT, télédétection, etc.). Les données de télédétection représenteraient une part très importante de ces informations puisqu'elles peuvent fournir des données directement sur les sols nus mais aussi sur l'occupation des sols et sur le relief.

Une telle vision théorique d'une base de données de sols se heurte à deux problèmes : d'une part, les données pédologiques acquises sur profils existent en très grand nombre mais elles ne sont pas toutes sous forme numérique et encore moins dans des bases de données (ceci est particulièrement vrai pour les données de sondage à la tarière). Il ne reste de ces informations que des synthèses sous la forme de publications cartographiques, de notices, de thèses ou d'articles scientifiques. D'autre part, les informations « spatiales » du type de la télédétection représentent des volumes gigantesques d'informations dont une petite partie est réellement intéressante pour les études pédologiques. Que devons nous alors conserver qui nécessiterait une mémorisation dans une base de données « sols » ? Pour les données de télédétection, cela revient à poser la question suivante : doit-on conserver des données brutes ou seulement des données interprétées comme cela se fait dans de nombreux programmes de cartographie de l'occupation du sol (par exemple, CORNAERT et MAES, 1992) ?

5.2. Besoins opérationnels

Face à ce bilan, il est proposé de poursuivre la réalisation de synthèses « empiriques » dès lors que l'on se fixe un objectif opérationnel sur un grand territoire (par exemple, une région d'environ 10 000 km²). La structure utilisée pour la base actuelle de données des sols d'Europe pourrait être adaptée à des niveaux de résolution plus fins tout en conservant la même structure multicouche : UCS, UTS, profils représentatifs, base de connaissances, méta-données. La principale amélioration est la recherche d'une description plus détaillée de la variabilité spatiale des paramètres pédologiques d'une part, au sein des unités de sols et d'autre part, à l'interface entre des unités voisines.

De façon complémentaire, il semble important de mieux formaliser les lois d'organisations des sols dans l'espace afin de pouvoir diversifier l'usage de telles bases de données de sols (HEWITT, 1993). En effet, nous ne connaissons pas les questions futures qui nous serons posées demain. Une synthèse pédologique est toujours orientée

vers un objectif qui ne répondra pas nécessairement à ces questions futures. La formalisation numérique des méthodes qui ont permis de telles synthèses et la mémorisation des algorithmes dans des bases de connaissances sont donc des moyens qui permettent de s'adapter plus rapidement aux nouveaux problèmes posés. Des sites tests pilotes d'extension limités sont envisagés pour servir de support à de telles recherches, l'objectif n'étant plus ici la production d'une carte pédologique mais la production scientifique des méthodes utilisées et des lois de variation des sols mises en évidence. Dans de tels sites pilotes, il serait possible de stocker le maximum de données élémentaires, y compris des données de télédétection, compte tenu de la faible extension des surfaces étudiées. Le choix des sites pilotes est évidemment essentiel et dépendra des études « empiriques » réalisées sur l'ensemble des territoires.

Un dernier défi pour les futures bases de données de sols est de pouvoir rendre compte de l'évolution dynamique des phénomènes érosion, acidification, salinisation, pollution, etc. La télédétection apparaît comme un apport majeur dans de tels suivis du fait de la périodicité régulière des acquisitions. Le principal inconvénient est qu'elle est apporte des informations seulement sur la surface des sols (parfois subsurfaces mais à des profondeurs faibles et pour des données souvent difficiles à interpréter). Il est donc nécessaire de relier ce type d'informations avec des données de suivi sur le terrain. De tels suivis sur des surfaces très grandes représentent des investissements financiers très importants. Il est alors indispensable de privilégier le développement de connaissances sur les relations entre les données précises et pertinentes du terrain et les données de télédétection spatialement exhaustives. De telles études pourraient alors se coupler avec les études sur sites pilotes présentées ci-dessus.

Conclusion

Le développement des concepts des SIG ont permis l'élaboration de bases de données de sols plus précises et plus exhaustives que les cartes pédologiques présentées de façon conventionnelle. En effet, de nombreux programmes, d'agriculture ou d'environnement, nécessitent désormais la connaissance précise de la variabilité spatiale des paramètres du sol. La présentation cartographique d'unités de sols selon une classification préétablie, apparaît insuffisante, par exemple, pour alimenter des modèles de fonctionnement.

Les données mémorisées dans les cartes des sols, telle la carte des sols des Communautés Européennes, représentent un niveau de synthèse impliquant une perte des informations initiales. Un objectif futur devrait être de stocker l'ensemble des mesures acquises à la base et traitées lors de telles synthèses. Ceci permettrait de mieux adapter nos démarches en fonction de la diversité des objectifs. Parallèlement à ce travail de stockage des données élémentaires, il est nécessaire de développer des démarches mieux formalisées pour rendre compte de la variabilité des sols dans

l'espace et pour prédire des valeurs quantitatives des paramètres pédologiques en tout point de l'espace.

Dans une telle perspective, les données de télédétection représentent une part importante des données de base utilisées pour analyser les couvertures pédologiques. Elles peuvent servir soit directement dans la mesure des caractéristiques des sols nus ou soit indirectement dans l'identification de variables de l'environnement liées aux caractéristiques des sols : principalement végétation et morphologie du terrain. La télédétection apporte une vision exhaustive et dynamique de l'espace. Le problème est de savoir si une base de données de sols doit gérer toutes ces informations ou se limiter à la mémorisation de données préinterprétées.

A l'initiative de l'Institut des Applications de la Télédétection (IATD - CCR Ispra), un groupe européen travaille sur ces questions dans l'objectif de développer une nouvelle base de données « sols » plus précise et répondant mieux aux demandes exprimées par la Commission de l'Union Européenne. Les réflexions s'orientent vers le développement d'une synthèse similaire à celle réalisée au 1/1 000 000 mais à un niveau de résolution plus fin. Celle-ci serait complétée par des études sur des sites pilotes permettant d'une part de formaliser les relations spatiales entre les caractères des sols et ceux de l'environnement, et d'autre part d'assurer le suivi quantitatif des phénomènes au cours du temps.

Bibliographie

ARNOLD R.W., WILDING L.P. (1991). « The need to quantify spatial variability », in : *Spatial variabilities of soils and landforms*. SSA Special Publication n°28. Madison. 1-8.

BRIKGS D.J., MARTIN D.M. (1988). « CORINE: an environmental information system for the European Community », *Environment Review*. 2 29-34.

BURRILL A., KING D. (1993). « The soils database of the European union ». *In : Proceedings of EuroCarto XI*, Kiruna, Sweden, 8-11/12/1993. Swedish Cartographic Society. 95-104.

BURROUGH P.A. (1986). « Principles of geographical information systems for land resources assessment ». *Monographs on Soil and Resources Survey n°12*. Oxford Science Publications, 193 p.

CEC (1985). *Soil Map of the European Communities at 1:1,000,000.* CEC DG VI. Luxembourg. 124 p.

CEC (1990). Computerized land evaluation databases in the European Communities. Catalogue of a questionnaire survey, 2nd edition. Brussels Luxembourg.

CEC (1991). Soil and groundwater research report I. Soil survey - a basis for European soil protection. Brussels Luxembourg. 214 p.

CEC-CORINE (1992). *Soil erosion risk and important land resources in the southern regions of the European Community* - EEC publications - DG XI - Brussels - Luxembourg - 97 p.

CEC-INRA (1993). Users' guide for the elaboration of the EC soil database 3.1 version. poly. doc. INRA Orleans, 10p.

CEC (1994). *A geographical knowledge database on soil properties for environmental studies, based on 1:1,000,000-scale EC soil map data.* Final report EEA. INRA Orléans.

CIERNIEWSKI J., COURAULT D. (1993). « Bidirectional reflectance of bare soil surfaces in the visible and near-infrared range ». *Remote sensing reviews*, 7. 321-339.

CORNAERT M.H. and MAES J. (1992). Land cover, an essential component of the CORINE information system on the environment, GIS implications. General symposium ISY. Munich, 30/03-04/04/92. ESA. 473-481.

COURAULT D. (1989). *Etude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection.* Thèse Université Paris VI. 214 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. 22p.

DIEPEN C.A. VAN. (1992). « An agrometeorological model to monitor the crop state on a regional scale in the European Community : concept, implementation and first operational outputs ». *In : The application of remote sensing to agricultural statistics.* CEC Proceedings 26-27/11/91. JRC Ispra. 269-277.

ESCADAFAL R., GIRARD M.C., COURAULT D. (1988). « La couleur des sols : appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales ». *Agronomie*, 8 (2), 147-154.

FAO. (1975). Soil Map of the World at 1:5,000,000. Unesco-Paris.

GAULTIER J.P, LEGROS J.P., BORNAND M., KING D., FAVROT J.C., HARDY R. (1992) « L'organisation et la gestion des données pédologiques spatialisées: le projet DONESOL ». *Revue de Géomatique.*- 3, (3). 235 - 253.

GEMS (1990). *Global Environment Monitoring System.* UNEP. Nairobi. 32 p.

GIRARD M.C., GIRARD C.M. (1989). *Télédétection appliquée aux zones tempérées et tropicales.* Masson Ed., 260 p.

GIRARD M.C., YONGCHALERMCHAI C., GIRARD C.M. (1991). « Analyse d'un espace par la prise en compte du voisinage ». In *Gestion de l'espace rural et SIG.* INRA, 342-349.

GRID (1990). Global Resource Information Database. UNEP. Nairobi-Geneva. 16 p.

HALL G.F., OLSON C.G (1991). « Predicting variability of soils from landscape models », in « Spatial variabilities of soils and landforms ». SSA Special Publication n°28. Madison. 9-24.

HUGGETT R.J. (1975). Soil landscape system : a model of soil genesis. *Geoderma*, 1, 1-22.

ISRIC (1993). Global and National Soils and Terrain Digital Databases (SOTER). Procedures Manual. *UNEP-ISSS-ISRIC-FAO.* ISRIC - Wageningen - 115 p.

JAMAGNE M., KING D., LE BAS C., DAROUSSIN J., BURRILL A., VOSSEN P. (1994). « Creation and use of a European Soil Geographic Database ». *15th International Congress of Soil Science*, Acapulco 10-16/07/1994. Vol 6a., 728-742.

KING D., DAROUSSIN J., JAMAGNE M. (1994a). « Proposal for a model of a spatial organization in soil science. Example of the European Community Soil Map ». *Journal of the American Society for Information Science.* Sp. issue. 45(9):705-717.

KING D., DAROUSSIN J., TAVERNIER R. (1994b). « Development of a soil geographic database from the Soil Map of the European Communities ». *Catena*, 21, 37-56.

LAMMERS D.A.. Johnson M.G. (1991). « Soil mapping concepts for environmental assessment. » in : *Spatial variabilities of soils and landforms*. SSA Special Publication n°28. Madison. 149-160.

LE BAS C., KING D., JAMAGNE M., DAROUSSIN J., VOSSEN P. (1994). « Une base de données de sols pour la gestion de l'agriculture et de l'environnement en Europe ». *In : Proceedings of EGIS/MARI'94*, Paris 29/03-1/04/94. Vol. II, 1548-1557. Utrecht. Pays Bas.

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.

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.

MSANYA B.M., LANGOMR R., LOPULISA C. (1987). « Testing and improvement of a questionnaire to users of soil maps ». *Soil Survey and land evaluation*, (7) 33-42.

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-DGVI, Luxembourg. 12-24.

SIMONSON R.W. (1971). « Soil association maps and proposed nomenclature ». *Proceedings, Soil Science Society of America*, 35, 959-965.

TAVERNIER R. (1985). « Introduction and history of the EC soil map ». *In : Soil map of the European Communities 1/1.000.000*. CEC Brussels Luxembourg. 1-2.

VALENTINE K.W.G., NAUGHTON W.C., NAVAI M. (1981). « A questionnaire to users of soil maps in British Columbia ». *Canadian Journal of Soil Science*, 61, 123-135.

VOSSEN P. (1992). « Forecasting of national crop production: the methodologies developed in the Join Research Centre in Support of the Commission of the European Communities ». *Advances in Remote Sensing* (in press).

WEBSTER R. and OLIVER M.A.(1990). *Statistical methods in soil and land resource survey - Spatial Information Systems*. Oxford University Press, 316 p.