

Quelques conceptions actuelles sur l'analyse spatiale en pédologie

JAMAGNE M.(*)
KING D.(*)
GIRARD M.C.(**)
HARDY R.(*)

RÉSUMÉ

Le sujet traite des démarches dans le domaine de l'analyse spatiale en pédologie, des principales conceptions sur les différentes approches possibles et des perspectives qui se présentent actuellement.

Une première partie évoque les recherches associées au recueil de l'information pédologique spatialisée, et la manière dont on organise actuellement les connaissances acquises par une structuration du découpage de la couverture pédologique.

Un certain nombre de notions de base y sont présentées ou rappelées : modes de prospection, stratégies d'observation, hypothèses sur des modèles d'organisation qu'il convient de valider progressivement par itération, pour pouvoir généraliser.

Indépendamment des grandes lignes d'une démarche générale, y sont évoquées des approches plus spécifiques comme l'analyse structurale, la cartographie par horizons, l'étude de "systèmes sols", la notion de combinaisons de sols, l'approche morphopédologique...

Sont également définis les concepts d'horizons, d'unités typologiques de sols, d'unités cartographiques et de fonctionnement de sols, de pédopaysages.

La deuxième partie traite de la transmission de l'information, en rappelant les différents modes de représentation cartographique les plus fréquemment utilisés, avant de mettre en évidence l'intérêt de l'utilisation de l'informatique, avec élaboration de bases de données et de systèmes d'information géographique, comprenant les concepts d'ensembles géométrique et sémantique et celui de base de données relationnelle.

L'utilisation des données spatialisées y est également évoquée, essentiellement par le canal de leur croisement informatique, permettant modélisations et simulations.

Ces dernières années, les travaux de cartographie sont apparus progressivement comme trop statiques, constituant de simples états des lieux. Il convient maintenant de concevoir l'inventaire des données du milieu physique de manière plus dynamique, à la fois dans leur variabilité spatiale et temporelle.

Les concepts actuels de l'analyse spatiale prennent donc en compte beaucoup plus qu'auparavant les notions de régime et de cycles de comportement et de fonctionnement, saisonniers et annuels notamment.

On conclut de ce fait par des orientations prioritaires qui se dessinent pour l'avenir : élaboration de modèles d'organisation spatiale, analyse des processus de

*) INRA - Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France
Centre de Recherches d'Orléans. 45160 ARDON

**) INA PG - Laboratoire des Sols et Hydrologie 78850 THIVERVAL-GRIGNON

fonctionnement, transmission et thématisation des données sols spatialisées à des fins de gestion rationnelle de l'espace et de conservation des ressources en sols.

Mots-clés : pédologie - analyse spatiale - typologie - cartographie - fonctionnement - pédopaysage - modélisation - organisation spatiale - système d'information géographique - Europe - gestion des sols - conservation des sols.

SOME ACTUAL CONCEPTIONS ON SPATIAL ANALYSIS IN PEDOLOGY

The contribution deals with methods of spatial analysis in pedology, describing the principles of different approaches and current perspectives.

The first part presents the research associated with the collection of spatial pedological information, and the actual way of organizing the collected knowledge according to the different components of the soil cover.

The main steps of soil mapping are cited : preliminary studies, selection of representative sites, analysis of those sites for generalization to bigger areas.

Some basic notions are presented or recalled: soil survey methods, observation strategies, hypotheses on organization models that have to be validated by iteration for generalization.

Independently of the main lines of approach, some more specific ones are cited as "structural analysis" (Fig. 1), horizon mapping, "soil systems" studies, and the "morphopedologic" approach...

Concepts of soil horizons, soil typological units, soil mapping and functioning units and "pedolandscapes" are also defined (Fig. 2 and 3).

The different types of soil associations are briefly described, including particularly the notion of "soil combinations".

The second part deals with transmission of information, i.e. with the two great possibilities that exist now: the traditional technique of representation and the use of computers. The more often used cartographic representations are recalled (Fig. 4, 5 and 6) before showing the interest of computerizing, with elaboration of data bases and geographic information systems, including the concepts of geometric and semantic (or alpha-numeric) sets and that of relational data bases (Fig. 7).

The use of spatial soil data is then developed, either as it concerns agricultural or other uses of land or the protection of the land. Computerization allows us to combine permanent data of the environment with conjunctural ones, leading to a more dynamic data processing, giving numerous possibilities of modelling and simulation (Fig. 8).

The recent years soil survey work appears too static, being just statements. It is necessary now to conceive the inventory in a more dynamic way, embodying both their spatial and temporal variability.

The actual concepts concerning spatial analysis take more than earlier in account the notions of regime and behaviour and functioning cycles : season and year particularly.

In conclusion priorities for the future are listed (Fig. 9) : elaboration of spatial organization models, analysis of functioning processes, transfer and thematization of spatial soil data for rational management of the space, and soil conservation.

Keywords : pedology - spatial analysis - typology - mapping - functioning - pedolandscape - spatial organization - modelling - geographic information system - soil management - soil conservation.

INTRODUCTION

L'utilisation rationnelle des terres implique une connaissance aussi complète que possible des caractéristiques, des propriétés, du comportement et du fonctionnement des sols.

L'approche spatiale en pédologie consiste en l'étude des sols dans le paysage sans les dissocier des autres éléments du milieu. Il s'agit donc d'une approche globale, géographique, permettant la compréhension des relations existant entre diverses unités, qui par ailleurs constituent un continuum : la *couverture pédologique*. Cette approche apparaît donc à la fois comme un fondement et comme un complément rigoureusement indispensable à toute recherche et toute application dans les domaines de la science du sol.

Le thème que nous allons traiter concerne essentiellement l'étude des organisations spatiales des sols et de leurs modes de fonctionnement. Il s'agit de déterminer l'existence de macro-structures à des niveaux d'études dont le champ peut aller du bassin versant élémentaire à l'unité de paysage régionale. On cherche à mettre en évidence le rôle déterministe que joue cette organisation géographique sur le fonctionnement général du système naturel, en particulier sur les transferts, hydriques notamment, entre les différentes composantes du milieu (sol, sous-sol, végétal, atmosphère, etc...).

Les démarches dans le milieu naturel impliquent l'acquisition de connaissances sur l'organisation tridimensionnelle de la couverture pédologique. Il convient ensuite de transmettre cette information, soit sous forme brute, soit après l'avoir traitée. Pour les évoquer, nous aborderons successivement le recueil de l'information pédologique spatialisée et la transmission de cette information. Nous terminerons par une évocation des prospectives dans le domaine de l'analyse spatiale, en mettant en évidence les orientations maintenant prioritaires.

Nous nous sommes limités ici à traiter de notions expérimentées, pour l'essentiel, dans le domaine atlantique européen.

I - RECUEIL ET ÉLABORATION DE L'INFORMATION PÉDOLOGIQUE SPATIALISÉE

Une des justifications initiales de la cartographie des sols, et ayant toujours sa valeur aujourd'hui, est liée au fait que les utilisateurs de l'espace rural ont éprouvé le besoin d'une délimitation en sous-ensembles territoriaux pour lesquels un type d'utilisation et de travail associé pouvait intervenir de manière uniforme. Cela nécessitait de délimiter des "terres" se comportant de manière à peu près analogue.

Pour ce faire, il a fallu analyser et étudier le paysage rural, et tenter ensuite de représenter graphiquement les variations observées. Le travail du pédologue cartographe consiste à analyser cette organisation spatiale et à proposer des lois de répartition permettant de définir des ensembles spatiaux, qui peuvent être délimités géographiquement, et dont le contenu est défini par un certain nombre de caractères et de propriétés des sols qu'on y retrouve, comme nous allons le voir plus loin.

En figurant sur un fond topographique la limite qui circonscrit une aire géographique, on obtient une "plage cartographique". La représentation cartographique

d'un domaine continu tel que le sol est alors conventionnellement réalisée sous la forme d'une carte composée de pages cartographiques juxtaposées.

Une carte de sols reste cependant toujours un modèle simplifié de l'organisation spatiale de la couverture pédologique.

La démarche de l'analyse spatiale des sols s'opère en plusieurs grandes étapes :

- une étude préliminaire et de reconnaissance,
- le recueil des données dans le milieu naturel, qui comprend tout d'abord l'analyse d'aires échantillons, ensuite les travaux permettant de généraliser les observations effectuées,
- l'organisation structurée des connaissances acquises.

1. Phase préparatoire et de reconnaissance

Il convient tout d'abord de situer la zone à inventorier dans le contexte général du milieu naturel. On collationne les principales données sur la géologie, la géomorphologie, l'hydrologie, la végétation et le climat général de la région à cartographier. Ce travail se fait à la fois sur documents et sur le terrain.

L'analyse des documents de base : cartes topographiques, géologiques, photographies aériennes et documents de télédétection, permet un premier découpage de la région en secteurs physiographiques relativement homogènes.

Une reconnaissance rapide du terrain confirme et complète cette première analyse. Elle permet notamment, d'une part de faire un inventaire des principaux types de sols et d'établir des corrélations entre sols et éléments physiographiques, c'est-à-dire l'élaboration de lois "chorologiques" (GIRARD, 1983), d'autre part de localiser des aires échantillons, interfluves et séquences, dont l'étude détaillée sera susceptible de fournir des résultats généralisables et extrapolables à des zones plus vastes.

Cette première phase de la démarche correspond donc à une analyse dite "descendante" définissant des paysages pédologiques ou "pédopaysages" caractéristiques, à contenu pédologique spécifique (Cf. § 3d). Cette approche permet déjà, en elle-même, l'élaboration de documents cartographiques à petite échelle, c'est-à-dire à faible résolution.

2. Recueil des données dans le milieu naturel

Il convient ici de rappeler qu'il existe différents *modes de recueil* de l'information dont deux essentiels fréquemment évoqués :

- systématique tout d'abord, basé sur un maillage strictement respecté ou servant de base pour maintenir une densité d'observations suffisantes (JAMAGNE, 1967), il s'agit du "grid survey",
- libre ensuite, ou "free survey", où la localisation est laissée à l'appréciation de l'expert cartographe en fonction du milieu naturel où il travaille.

Dans le second cas, il est indispensable d'élaborer une *stratégie d'observation* et de proposer un réseau logique de réalisation. Une telle stratégie correspond à la notion de "niveaux d'investigation" ; en effet, dans la majorité des cas, la recherche d'une organisation pédologique s'effectue selon plusieurs niveaux d'investigation emboîtés :

- étude détaillée des secteurs sélectionnés lors de l'étape précédente, de manière à

comprendre le mieux possible l'organisation de la couverture pédologique, ce qui correspond à la notion de *cartogénèse* (GIRARD, 1983) ;

- extrapolation des éléments ainsi récoltés aux unités pédopaysagiques correspondantes afin de couvrir l'ensemble de la région à inventorier.

a) *Analyse des aires échantillons*

Différentes approches peuvent être adoptées en fonction des objets retenus (volumes structuraux, horizons, solums, systèmes pédologiques,...) et des objectifs : soit scientifiques, c'est-à-dire d'acquisition de connaissances, soit plus appliqués, c'est-à-dire finalisés et destinés à un problème précis d'utilisation de l'espace.

L'objectif de cette étape est d'analyser différentes observations de façon à mettre en évidence des "structures spatiales", tout en recherchant l'origine pédogénétique de ces structures.

Il convient de proposer un modèle d'organisation sous la forme d'un découpage de la couverture pédologique en unités dites "compréhensives" en se fondant essentiellement sur les caractères morphologiques et sur l'organisation des constituants (BAIZE, 1986), et selon les variabilités spatiales et temporelles des principaux facteurs de formation (climat, matériaux originels, substrats, relief, végétation...).

De nombreux auteurs ont détaillé ce type d'approche avec différents vocabulaires selon les milieux étudiés. Il s'agit notamment de l'analyse détaillée d'"unités paysagères", de "systèmes sols", de "bassins versants élémentaires", et de la phase dite "analytique" de l'analyse structurale (BOCQUIER, 1973 ; BOULET *et al.*, 1982 ; FRITSCH, 1984).

L'approche dénommée "analyse structurale", constitue un exemple intéressant de ce type de démarche en en reprenant tous les stades. Elle tend à favoriser la compréhension fine (échelle métrique à décimétrique) des agencements structuraux, l'étude des relations géométriques entre volumes et les recherches sur l'importance relative des interfaces et des fronts de transformation.

Une matérialisation de la connaissance acquise peut s'exprimer par des coupes et blocs diagrammes, associés au tracé de courbes d'"isodifférenciation". La figure 1 illustre la nature des résultats obtenus dans le milieu guyanais.

La cartographie "par horizons" (GIRARD, 1989) constitue également une approche très analytique appartenant à ce même type.

D'autres fils directeurs, de nature différente, peuvent être utilisés en fonction des paysages, comme l'importance des "structures relais" entre roches mères et horizons pédologiques (CALLOT, 1977).

In fine, la compréhension d'un milieu pourra se traduire sous la forme d'un *Modèle d'Organisation Spatiale des Sols* synthétisant l'ensemble des lois déterministes ou statistiques de la distribution spatiale des volumes pédologiques élémentaires. Un tel modèle ne sera pas toujours formalisé sous la forme d'une carte ; il pourra être une fonction statistique ou un ensemble logique de déductions.

Il s'agit donc ici de la première phase de structuration de ce type de modèle, qui devra ensuite être matérialisé en fonction du degré de précision requis, soit par une échelle cartographique de publication, soit par une base de données informatique.

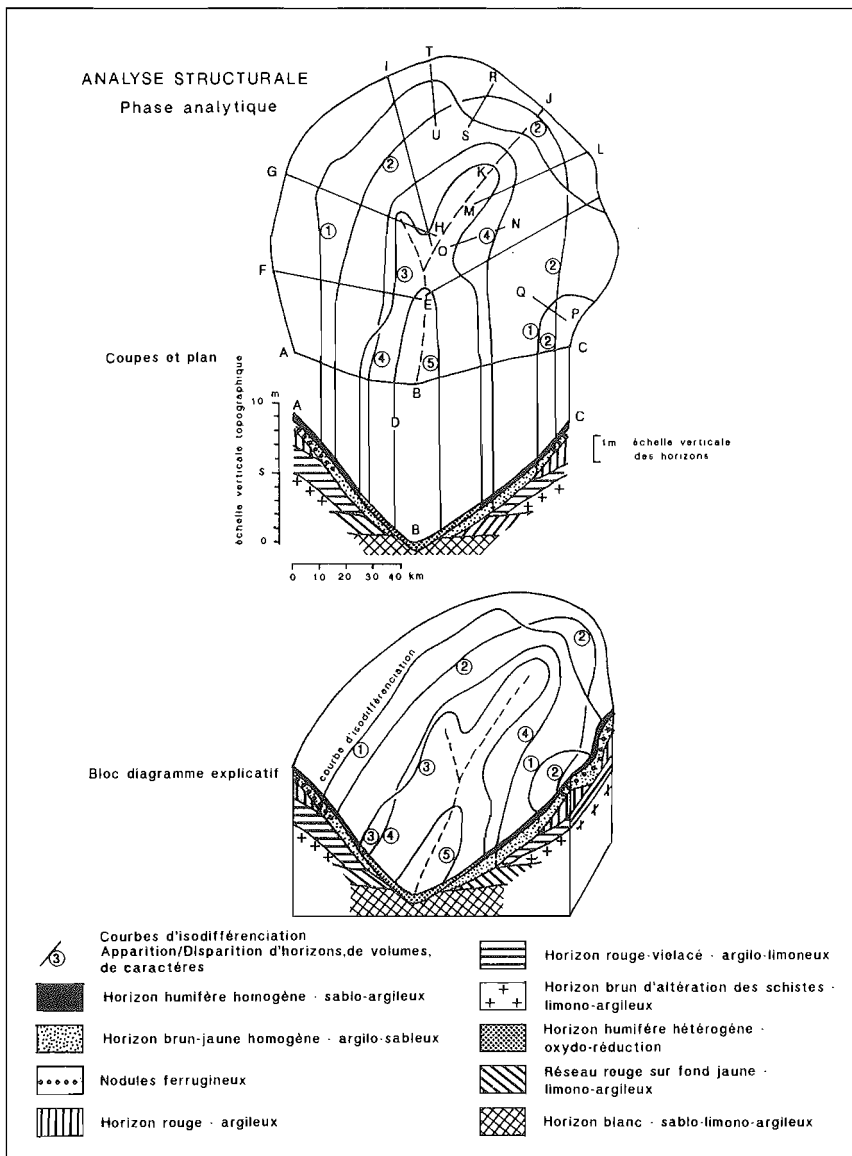


Figure 1 : Exemple d'application de la démarche d'analyse structurale. Bassin versant sur schistes de Bonidoro - Guyane (d'après Boulet *et al.*, 1982).

*Example of use of the "Structural Analysis" approach. Catchment on Bonidoro schists - Guyana (after Boulet *et al.*, 1982).*

b) Généralisation à l'ensemble des zones à étudier

Elle est réalisée par une prospection de contrôle de la représentativité des données recueillies sur les aires échantillons, par extrapolation aux unités pédopaysagiques et de modelé présumées analogues.

Des ajustements successifs et progressifs sont effectués jusqu'à couverture complète du paysage, avec compléments éventuels dans certains secteurs, ou l'analyse d'autres zones tests, la notion d'*itération* (GIRARD, 1983 ; LAMOTTE *et al.*, 1992) prenant ici toute sa valeur. Ces ajustements peuvent entraîner une modification du modèle de répartition des unités de sols, jusqu'à validation satisfaisante. Cette dernière peut donc être "falsifiante" et nécessiter une autre stratégie d'observations ou d'autres hypothèses sur les modèles d'organisation ; si elle est "vérifiante", la généralisation peut alors intervenir.

Nous sommes donc ici, de manière évidente, en présence de la notion de cartographie "ascendante" donnant en un premier temps priorité au contenu, avant de définir le contenant constitué par les unités cartographiques.

Un des types de techniques le plus souvent utilisées pour ces travaux de généralisation, et permettant des mesures spatialisées, est la télédétection qui offre des relevés géographiques périodiques sur de grandes surfaces, et ce en complément de la prise en compte sur le terrain des grands facteurs du milieu physique : géologie et géomorphologie (GIRARD et GIRARD, 1989). A ce stade, des méthodes statistiques peuvent être également appliquées (BREGT, 1992).

Cette phase de *transfert d'échelle*, pour passer d'une démarche très analytique à une cartographie plus synthétique requiert de la part du pédologue cartographe un maximum d'expérience, car il convient de ne faire émerger que les grandes lois en abandonnant ce qui apparaît aléatoire ou trop conjoncturel.

3. Organisation des connaissances acquises

Comment peut-on, à partir de la compréhension acquise des organisations, structurer logiquement ces connaissances ? Ceci nécessite de rappeler brièvement quelques notions de base permettant d'aboutir à celle de Modèle d'Organisation Spatiale déjà évoquée. Il convient, en fait, de définir les différents types d'unités-sols, de volumes caractéristiques, distinguables au sein de la couverture pédologique, c'est-à-dire de préciser un découpage de la couverture pédologique (Figure 2).

Le continuum constitué par la couverture pédologique peut être subdivisé en deux types de sous-ensembles (GIRARD, 1983 ; BRABANT, 1989) :

- en sous-ensembles homogènes : les horizons, permettant la meilleure caractérisation, et correspondant à un découpage *horizontal* ;
- en sous-ensembles dits hétérogènes : les unités typologiques et cartographiques de sols, correspondant, elles, à un découpage *vertical*.

Le schéma met d'autre part en évidence, au sein de la couverture pédologique, l'existence d'un découpage *latéral* délimitant l'extension des horizons.

a) Les Horizons

Les pédologues subdivisent la couverture pédologique en volumes sensiblement homogènes, constituant des couches le plus souvent parallèles à la surface du sol : les horizons. Il s'agit en fait d'une première structuration de la couverture pédologique, servant notamment de base aux descriptions morphologiques et aux échantillonnages.

Un horizon est en pratique 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 l'extension spatiale d'un tel volume, il est possible d'en définir l'ensemble des caractéristiques. Pour un degré fixé de précision, ces caractéristiques sont spatialement invariantes pour un seuil de probabilité choisi.

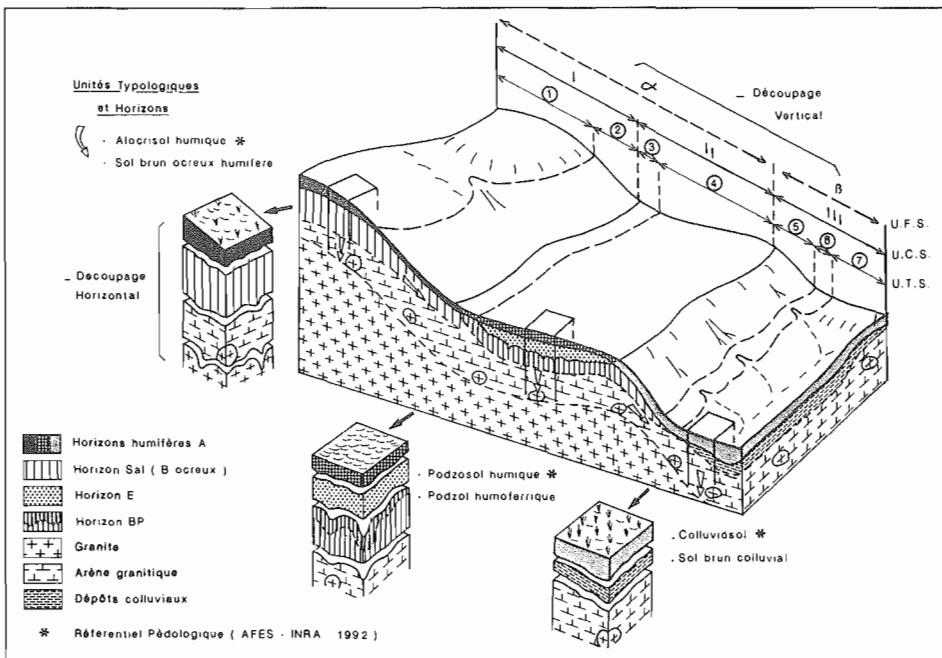


Figure 2 : Paysage granitique, Vosges. Bloc diagramme illustrant les notions d'Unités Typologiques de Sols (UTS) : 1 à 7, d'Unités Cartographiques de Sols (UCS) : I, II et III et d'Unités de Fonctionnement de Sols (UFS) : α et β . Vecteur de l'UFS : transferts au sein de l'arène (d'après Bonneau *et al.*, 1978) (1) Alcristol humique/Sol brun ocreux humifère (2) Alcristol humique/Sol brun ocreux (3) Podzsol ocreux/Sol ocre podzsolique (4) Podzsol humique/Podzsol humoferrique (5) Alcristol humique/Sol brun ocreux (6) Brunisol désaturé/Sol brun acide de bas de versant (7) Colluviosol/Sol brun colluvial.

*Schematic Diagram showing the relationships between Soil Typological Units (STU) : 1 to 7, Soil Mapping Units (SMU) : I, II and III, and Soil Functioning Units (SFU) : α and β . Granitic Landscape, Vosges. Vector of the SFU : transfers within the weathering layer (after Bonneau *et al.*, 1978).*

b) Les Unités Typologiques de Sols (UTS)

Une UTS est constituée par ce que l'on a fréquemment défini comme "Profil", "Solum" ou "Pedon", c'est-à-dire un volume constitué par la superposition ou l'agencement d'horizons aux caractéristiques bien définies. Sa définition repose sur le rattachement à un classement, le plus souvent de type référentiel.

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).

Une base de ce type a été largement utilisée dans les programmes de cartographie des sols : il s'agit de la notion de "série de sols", correspondant à un besoin pratique de classement des terrains, et mise au point aux Etats-Unis (Soil Survey Manual, 1961 ; CPCS, 1967 ; JAMAGNE, 1967 ; GIRARD, 1968 ; BOULAINÉ, 1975 ; SIMONSON, 1989 ; AUBERT et BOULAINÉ, 1989).

Il est possible de reconnaître une structuration pertinente d'un milieu selon un compartimentage horizontal ou vertical sans définir avec précision les limites géographiques de chacun des compartiments. En conséquences, les deux objets conceptuels retenus "Horizon" et "Unité Typologique de sol" seront définis d'abord selon leurs caractéristiques internes propres (texture, structure, etc...), sans que l'on en connaisse nécessairement la répartition géographique. C'est dans le cadre des analyses spatiales proprement dites qu'ils feront ensuite l'objet d'observations précises concernant leurs extensions latérales.

Ce sont ces volumes de la couverture pédologique qui font l'objet d'échantillonnages variés et de caractérisations analytiques fines permettant une définition quantitative de leurs différents constituants.

c) Les Unités Cartographiques de Sols (UCS)

L'Unité Typologique étant clairement reconnue, il est de l'objectif de la cartographie de chercher à représenter son extension géographique. L'entité ainsi délimitée sera nommée "Unité Cartographique de Sols", rejoignant ainsi le concept de "mappon" proposé par (J. BOULAINÉ, 1975).

Le choix d'une échelle de représentation graphique implique qu'il est fréquent de ne pas pouvoir dessiner une UTS sur une carte et qu'il faut procéder à des regroupements. On donnera en conséquences la définition suivante à l'UCS :

Une Unité Cartographique de Sols est le regroupement d'une ou plusieurs Unités Typologiques de Sols (UTS) de façon à 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. Une plage cartographique est une surface fermée dont le contenu sémantique est considéré comme homogène à un niveau de probabilité donné.

Ces plages constituent une "unité géométrique" compte tenu du fait que l'on ne peut pas ou l'on ne sait pas la fragmenter en unités plus petites.

- Il n'est pas possible de subdiviser une UCS lorsqu'une contrainte graphique rend la lisibilité du document alors impossible. Un seuil de représentabilité suivant la loi du Quart (BOULAINÉ, 1980) peut par exemple être adopté. Nous verrons plus loin que cet obstacle est très minimisé par l'utilisation de l'outil informatique.

- On ne sait pas, d'autre part, subdiviser une UCS lorsque la complexité du milieu et sa variabilité sont telles qu'il n'est pas possible d'effectuer une analyse spatiale suffisante pour y délimiter des sous-ensembles.

On distingue des unités cartographiques simples, comprenant une seule UTS, et des unités dites complexes comprenant plusieurs UTS (C.P.C.S., 1967).

La distribution des UTS au sein des UCS répond, dans certains cas, à une loi chorologique de répartition dans le paysage. Ces UCS constituent alors essentiellement des *séquences* ou des *chaînes* de sols.

- Une *séquence de sols* est un ensemble de sols connexes dont la répartition géographique 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. Un exemple fréquent est celui des toposéquences liées au relief, et la notion de "caténa" y correspond assez étroitement (MILNE, 1935 ; JAMAGNE, 1964).

- Une *chaîne de sols* est un ensemble de sols liés génétiquement, chacun d'eux ayant reçu des autres, ou cédé aux autres, certains de ses constituants.

- Une *juxtaposition de sols* est, par ailleurs, un ensemble de sols dont la coexistence dans une aire donnée ne paraît liée à aucune règle de répartition géographique précise, aucune loi chorologique n'ayant pu être mise en évidence.

Pour la description et la définition des unités complexes, il serait possible de reprendre la typologie proposée par les pédologues soviétiques et mise en forme par W. FRIDLAND (1975). Cette méthode repose sur la notion de "*Structure de la Couverture Pédologique*", et introduit celle de "*Combinaison de sols*" : succession définie et constante dans l'espace de sols différents les uns des autres.

Quatre niveaux essentiels permettent l'analyse de la couverture pédologique : - les surfaces pédologiques élémentaires (SPE) - les micro et méso structures - les régions et secteurs - les provinces et zones.

Les pédologues russes distinguent, suivant les distances moyennes entre unités, des micro et méso-structures (10 et 100 m) ; vient ensuite le caractère de liaison entre sols : sols non liés ou sols liés entre eux (chaînes de sols). Enfin, vient le contraste suivant que les différents termes de la combinaison sont proches génétiquement (peu contrasté) ou très éloignés (contrasté). La forme des unités est enfin prise en compte.

Ainsi, les phases de cette méthode apparaissent importantes à prendre en compte dans un inventaire des sols à distribution complexe. J. BOULAIN, dans le cadre du levé de la carte pédologique de St Claude, en paysage hétérogène jurassien, en a montré tout l'intérêt (Cf. II. 1).

Généralement, il est fait référence, dans la définition des unités cartographiques, à un classement, une systématique, ou une taxonomie, soit d'unités-sols, soit de systèmes-sols, soit de "pédopaysages" comme nous allons le voir ci-dessous, soit encore parfois d'unités géologiques ou lithologiques.

d) La notion de Pédopaysage

La notion de paysage pédologique, ou "Pédopaysage" (GIRARD 1972, 1983 ; NORTHCOTE, 1984), prend de plus en plus d'importance dans les conceptions de l'analyse spatiale en pédologie. Elle recouvre la nécessité de mettre en évidence des portions de territoire : couverture pédologique, ou partie de cette couverture, dont l'organisation spatiale résulte de l'intégration d'un ensemble d'horizons pédologiques agencés et des autres éléments paysagiques : substrat géologique, hydrologie, géomorphologie, occupation végétale, mode d'utilisation, et soumis à un certain nombre de contraintes spécifiques. L'ordre de grandeur est le plus souvent kilométrique à déca kilométrique en milieu tempéré humide.

Cette notion n'est cependant pas nouvelle dans sa conception, et un bloc diagramme des pédopaysages du Chélif peut illustrer ce qui vient d'être évoqué (Figure 3).

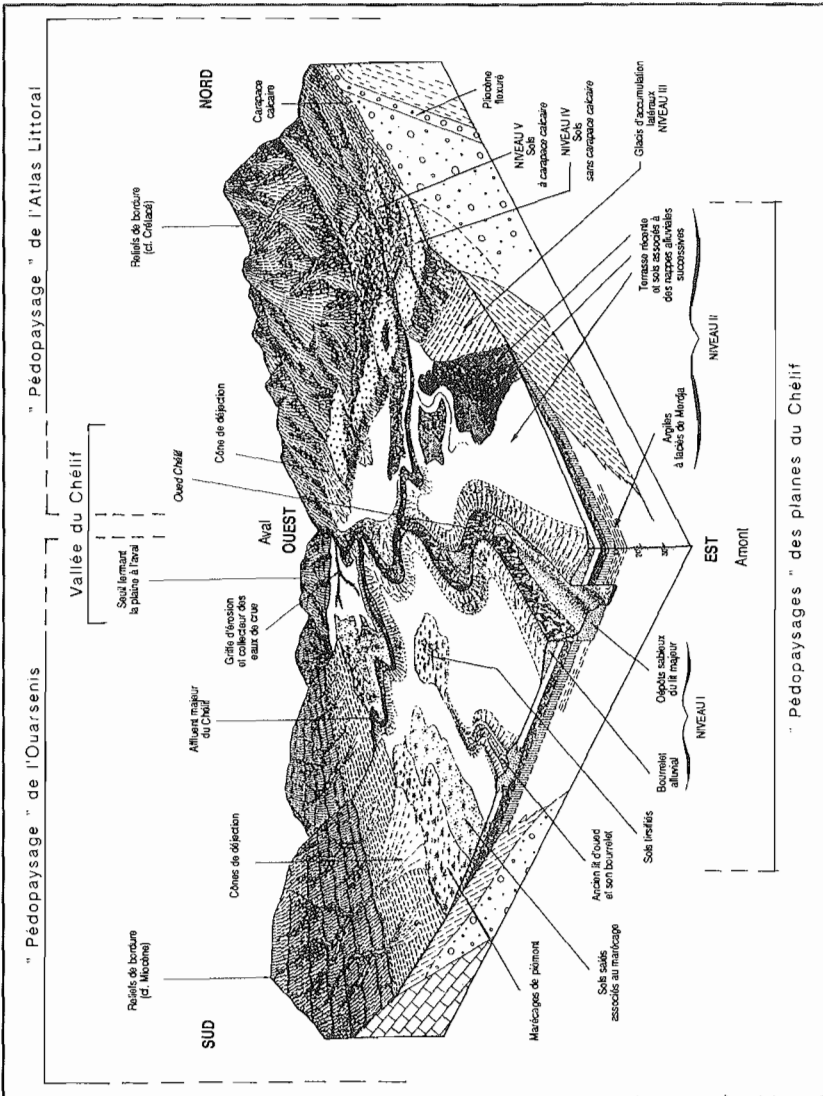


Figure 3 : Bloc diagramme schématique illustrant les relations entre formations quaternaires et sols dans les plaines du Chélif - Esquisse de "Pédopaysages". (d'après Boulaine, 1957).
Schematic Diagram showing the relationships between Quaternary formations and soils in the Chélif plains. "Pedolandscape" sketch (after Boulaine, 1957).

Pour une définition il est possible de se référer notamment à l'analyse très claire et argumentée exposée au séminaire Franco-Africain de pédologie tropicale en 1989 (Gavaud, 1989).

On peut également évoquer, dans le cadre de cette démarche, une approche spécifique largement utilisée dans certains paysages : l'*approche morphopédologique* (KILIAN, 1974 ; ESCHENBRENNER et BADARELLO, 1975 ; TRICART et KILIAN, 1979). Cette démarche considère le milieu naturel comme un système dynamique en perpétuelle évolution, et étudie de manière précise les liaisons géomorphologie-pédologie.

Les interactions concurrentielles, dans le temps et dans l'espace, de la morphogénèse et de la pédogénèse nécessitent d'effectuer un bilan de la dynamique des paysages. Lorsque ce bilan penche vers la pédogénèse, il y a approfondissement des sols et une relative stabilité, lorsqu'il penche vers la morphogénèse, il y a dominance des processus de dégradation et instabilité des paysages.

On peut donc définir des milieux paysagiques stables (biostasie), pénestables et instables (rhexistasie) (ERHART, 1956). De nombreux travaux utilisant cette approche ont été notamment réalisés par le CIRAD dans des régions où la dégradation physique est importante (ROSSIGNOL *et al.*, 1987 ; Rossi, 1989 ; Raunet, 1989).

e) Les Unités de Fonctionnement de Sols (UFS)

Pour mieux comprendre et mieux décrire l'organisation de la couverture pédologique à partir d'une analyse spatiale de terrain, la nécessité est apparue progressivement de prendre en compte des aspects plus dynamiques concernant son fonctionnement, et de ce fait les relations de voisinage (BOULAINÉ, 1986). En effet, il existe très souvent des interactions entre les éléments du milieu à l'origine de processus spatiaux. Ceux-ci intègrent des espaces suffisamment grands et doivent être étudiés au niveau d'organisation auquel ils interviennent (bassin versant, fragment de paysage, etc...) (HUGGETT, 1975).

La notion d'Unité de Fonctionnement de Sols est ainsi apparue : fragment d'unité de paysage ou de modèle dont on connaît l'organisation, et dont on peut préjuger la dynamique de fonctionnement.

C'est ici que les mécanismes et processus intervenant aux interfaces des ensembles organisés prennent toute leur importance, et ce notamment en ce qui concerne les *fronts de transformation*. Et il convient, bien entendu, de les analyser aux niveaux d'organisation les plus fins.

Une UFS est également un regroupement de plusieurs Unités Typologiques de Sols (UTS) selon des lois d'organisation spatiale ou de fonctionnement reconnues. Par ailleurs, une UFS peut être définie sans en connaître son extension spatiale (pas de description dans l'ensemble géométrique).

L'ajout de ce niveau complémentaire est un moyen d'introduire la description des relations structurelles et fonctionnelles pouvant exister entre les UTS. Par exemple toutes les UTS appartenant à un même bassin versant peuvent être regroupées dans une seule UFS afin de décrire les flux entre UTS. Nous retrouvons là, tout naturellement, la prise en compte de conceptions introduites depuis longtemps déjà, notamment par J. BOULAINÉ : les notions de régimes pédologiques, de types de pédogénèse (lixivante, confinante, engorgeante) ainsi que celle de paysages géochimiques.

Quelle que soit l'approche choisie, un véritable *Modèle d'Organisation Spatiale* (MOS, KING *et al.*, 1990) peut être élaboré au sein des unités de pédopaysagiques, qui résulte de l'emboîtement des structures que nous venons de décrire : *horizons - unités typologiques - unités cartographiques - unités de fonctionnement = MOS*.

Le mot "modèle" signifie le reflet de notre compréhension de la couverture pédologique. Ce modèle permet non seulement d'expliquer la distribution spatiale des différents types de sols, mais aussi de formuler les inter-relations géométriques et sémantiques entre les différents types reconnus.

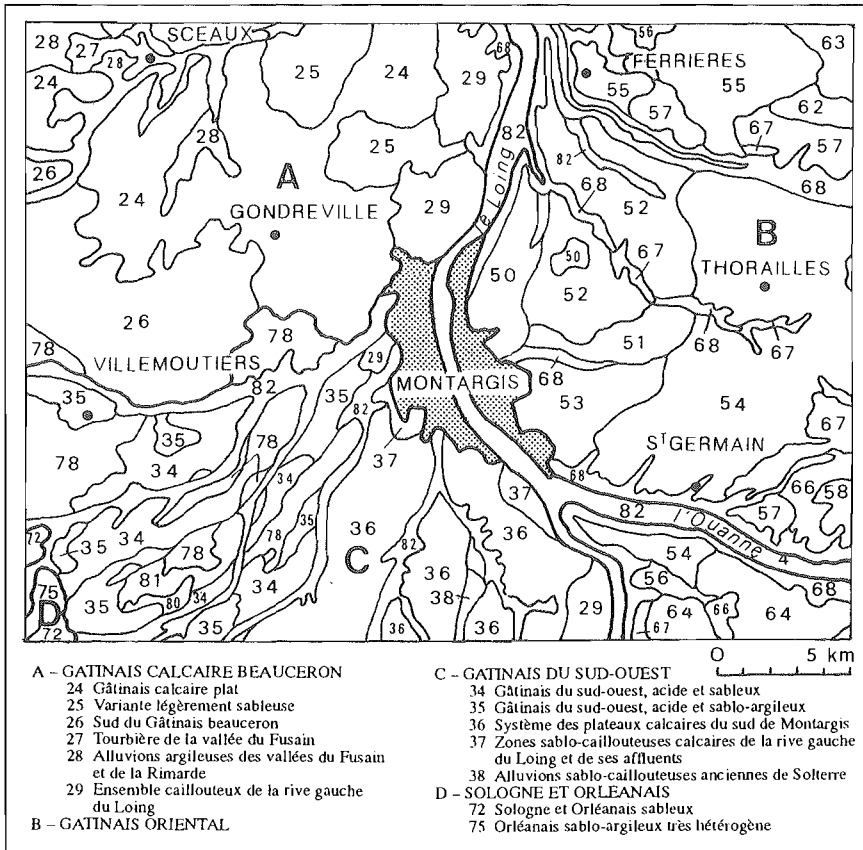


Figure 4 : Extrait du Référentiel Pédologique du Loiret (IGCS) à 1/250 000. Quelques exemples de Pédo-paysages (24...75) faisant partie de Régions Naturelles (A...D) du centre de la France (Arrouays et al., 1989).

Extract of the "Référentiel Pédologique" of Loiret (IGCS) at 1/250 000 scale - Some examples of Pedolanscapes (24...75) from Natural Regions (A...D) of center France (Arrouays et al., 1989).

II - TRANSMISSION DE L'INFORMATION

Le rôle important des cartes de sols a été évoqué depuis très longtemps : connaissance de la distribution des sols dans l'espace, base stratifiée pour un échantillonnage rationnel, clé de structuration de classifications, taxonomies, typologies, référentiels.

Une carte joue en pratique deux rôles complémentaires : un rôle de mémorisation de l'information, et un rôle de transmission. Ceux-ci sont parfois contradictoires car il est difficile de vouloir à la fois tout conserver et tout transmettre étant donné les contraintes graphiques. Il faut donc faire des choix dans la définition des unités cartographiques et dans le mode de représentation graphique.

Deux possibilités existent en fait actuellement :

- d'une part les techniques de *représentation cartographique* proprement dite,

- d'autre part l'utilisation des *systèmes d'information géographique*.

1. L'écriture et le dessin cartographique - Les cartes de sols

A partir des minutes de terrain, on procédait jusque récemment à une synthèse des résultats et à la recherche de la meilleure expression possible sur la carte. Il s'agit en fait ici de la "cartographie" proprement dite. Divers types de cartes ont été élaborés, à des échelles très variées, en liaison avec les objectifs poursuivis.

Il faut rappeler ici la différence entre les notions d'échelle et de niveau d'analyse. La première, l'"échelle", est liée à une représentation en deux dimensions sur un document papier (rapport de la mesure d'un segment sur la carte à la mesure du même segment sur le terrain). La seconde, le "niveau d'analyse", est liée à la résolution, ainsi qu'au nombre, à la nature et à la précision des informations.

a) Représentations cartographiques

Parmi les plus usitées, nous pouvons citer les suivantes.

Représentation synthétique - Un signe conventionnel distinctif et particulier à chaque unité peut être une couleur, une trame ou un symbole.

La carte elle-même est alors très simple, mais la notice explicative est souvent détaillée pour pouvoir développer suffisamment les caractéristiques et les propriétés de chacune des unités.

Un exemple typique de cette méthode est représenté par la carte des sols des Etats-Unis (USDA), levée à moyenne échelle (1/20 000 à 1/60 000).

Une représentation synthétique est également utilisée pour les documents à petite échelle telle la carte des sols de l'Europe à 1/1 000 000. Les unités y sont représentées par une couleur associée à un sigle simple et correspondent aux différents niveaux des unités majeures du référentiel de la FAO (Tavernier, 1985).

Représentation par Pédopaysages - Les premiers résultats concernant le Référentiel Régional Pédologique du programme IGCS (IGCS, 1992) sur le territoire français montrent que ce type de cartographie publiée à 1/250 000 doit faire apparaître les "petites régions naturelles", ces dernières étant subdivisées en "sous-ensembles" compatibles avec l'échelle graphique du document. Elles doivent prendre en compte les éléments majeurs du paysage, en privilégiant les données pédologiques qui ont d'importantes conséquences agronomiques (BORNAND *et al.*, 1989 ; ARROUAYS *et al.*, 1989, figure 4).

Ces documents fournissent la possibilité de mise au point de typologies locales ou régionales mettant en évidence les particularités pédologiques d'unités de paysage du type terroirs, bassins versants, petites régions.

Représentation mixte ou morphogénétique - Il s'agit de documents où les éléments de la pédogenèse, la caractérisation des matériaux et l'économie en eau sont simultanément mentionnés.

*C'est notamment le mode de représentation adopté par le Service de la Carte Pédologique de France de l'INRA pour le levé systématique du territoire à 1/100 000. Le type d'évolution pédologique est représenté par une couleur particulière, tandis que des figurés traduisent en gris l'origine et la nature des matériaux, en bleu l'intensité de l'hydromorphie (GEPPA-SESCPF 1969, JAMAGNE *et al.*, 1989-1991, figure 5).*

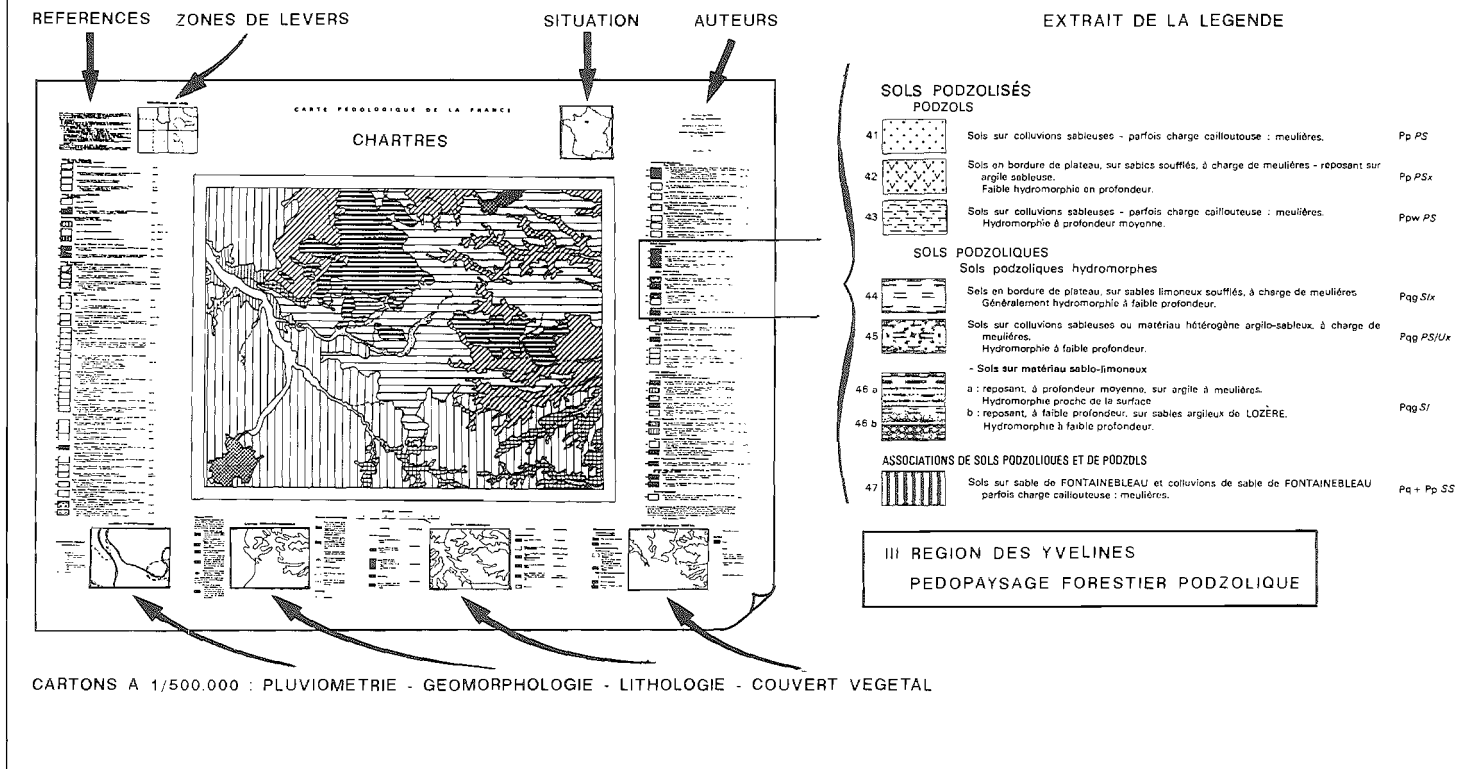


Figure 5 : Exemple de représentation cartographique : Carte Pédologique de France à 1/100 000 - Feuille de Chartres F17 (Crahet, 1978).
 Example of cartographic representation : Pedological Map of France at 1/100 000 scale. Sheet of Chartres F17 (Crahet, 1978).

Représentation analytique - Dans ce type de représentation, la variabilité spatiale des sols est exprimée par une codification de toutes les propriétés importantes du sol. La carte détaillée des sols du département de l'Aisne en est un exemple très caractéristique (JAMAGNE, 1967).

Cette carte est basée sur une représentation des textures successives des sols à laquelle sont joints des caractères concernant la profondeur, la présence de substrats, la teneur en calcaire, l'hydromorphie, la charge en éléments grossiers et l'évolution pédogénétique. L'intérêt essentiel d'un tel mode d'expression tient d'une part à une objectivité évidente, d'autre part à une facilité d'interprétation pour les utilisateurs ; les notions d'argile, de sable, de cailloux, de mauvais drainage, etc., ne présentent en effet que peu d'ambiguïtés.

D'autres modes de représentation, plus particuliers ou plus récents sont à citer.

Représentation par Combinaisons - Il s'agit d'une expression cartographique de la démarche préconisée par les pédologues russes (FRIDLAND, 1975 ; BOULAIN, 1975). La figure 6 illustre la matérialisation de cette approche dans une zone du Jura français. On constatera que les mésocombinaisons sont très proches de la définition des pédopaysages.

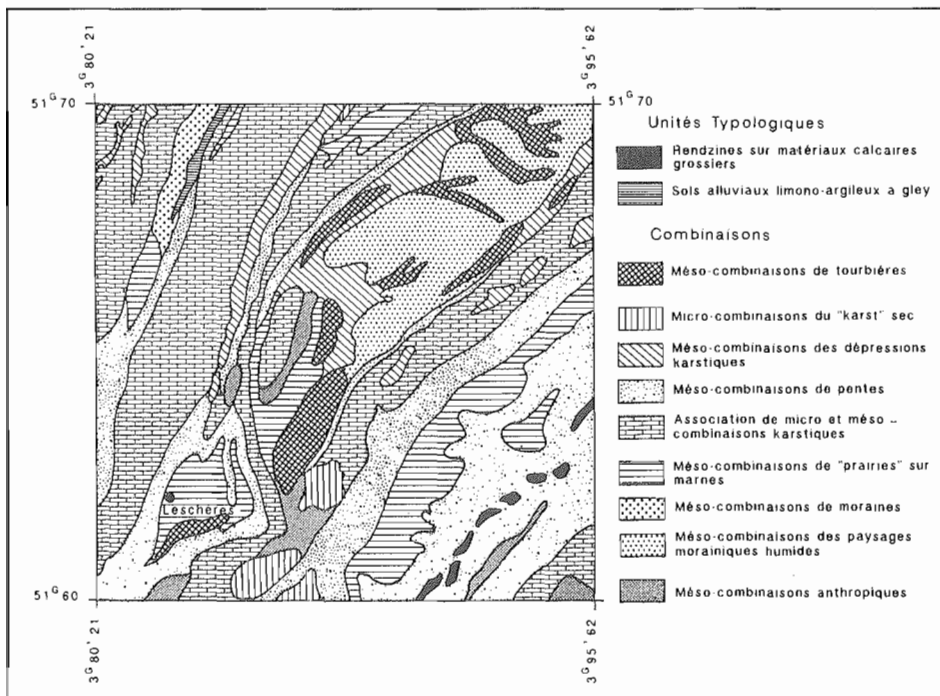


Figure 6 : Extrait de la feuille St Claude de la Carte Pédologique de France. Illustration de l'utilisation de la notion de **Combinaisons de Sols** (Boulaine, 1975).

Extract of the sheet of St Claude from the Pedological Map of France. Illustration of the "Soil Combinations" approach (Boulaine, 1975).

Représentation en courbes d'isodifférenciation - Cette représentation, utilisée essentiellement à grande échelle, privilégie le tracé de courbes matérialisant l'apparition et la disparition d'horizons et volumes pédologiques significatifs de l'organisation de la couverture pédologique.

Nous avons vu que l'intégration d'une représentation en coupe et en plan permet alors une expression tridimensionnelle de cette organisation (BOULET et al., 1982).

b) La légende et la notice explicative

La carte elle-même ayant une fonction de transmission, les rôles essentiels de la légende et de la notice sont à la fois ceux de mémorisation et de transmission.

La *légende* figure sur la carte elle-même et constitue une synthèse de la connaissance des différentes unités cartographiques représentées. Elle résulte d'une construction logique basée sur l'inventaire ordonné des unités.

La *notice explicative* fournit une description détaillée des différentes unités de sols représentées ainsi que leurs propriétés essentielles. Elle doit renseigner sur tout ce qui n'a pas pu être représenté sur la carte et fournir notamment les éléments importants des autres composantes du milieu naturel. Indépendamment de leurs principales propriétés, le comportement et le fonctionnement des sols y sont précisés, ainsi que les lois chorologiques de répartition au sein de la couverture pédologique.

2. Les Systèmes d'Information Géographique

Le seul document graphique est donc loin de représenter la totalité des informations recueillies et traitées par l'auteur d'une carte. La contrainte graphique est en effet à la fois un frein pour le pédologue qui regroupe des informations sans pouvoir toutes les représenter, et une gêne pour le lecteur qui doit décoder d'une part des noms synthétiques de sols trop généraux, d'autre part un symbolisme graphique souvent complexe.

L'informatique a introduit en pédologie, depuis déjà plus de vingt ans (Informatique et Biosphère, 1969-1971 ; VAN DEN DRIESSCHE, 1974 ; KING, 1984 ; GIRARD *et al.*, 1989), comme dans beaucoup d'autres domaines, de nouvelles possibilités de stockage, de traitement de l'information et d'expression des résultats.

Des "banques de données-sols" sont en effet créées auprès de nombreux organismes. Elles consistent en la mise en mémoire sur ordinateur des différentes variables observées et mesurées sur les sols inventoriés, par l'utilisation de "codes" fondés sur des "glossaires" harmonisés. La collecte des données s'effectue par l'utilisation de fiches adaptées (STIPA, 1984) ou par celle de microordinateurs portables.

Les possibilités de l'informatique permettent désormais de s'affranchir des contraintes graphiques et de mémoriser le maximum de données de base ou élaborées, ceci en décomposant l'information et en la structurant en "couvertures d'objets" successives que l'on peut superposer. L'analyse de l'information cartographique a conduit à décrire un *modèle informatique* des données spatialisées comprenant deux ensembles : l'*ensemble graphique* et l'*ensemble sémantique* correspondant respectivement au contenant et au contenu des pages cartographiques (KING *et al.*, 1990).

Une réflexion en ce domaine a conduit à substituer à la représentation cartographique des sols une structure informatique intégrant une description des modes d'organisations spatiales les plus fréquents au sein de la couverture pédologique, et susceptible d'accueillir toutes les informations.

Trois principes ont été dégagés (Figure 7) :

- L'intérêt de décomposer les informations en "couvertures d'objets indépendantes", chacune d'entre elles correspondant à la description spatiale d'un ensemble spécifique. Il s'agit de distinguer les informations se rapportant directement au sol (limites des sols, localisation des profils pédologiques), mais aussi à des données d'une autre nature (courbes de niveaux altitudinales, réseau hydrographique).

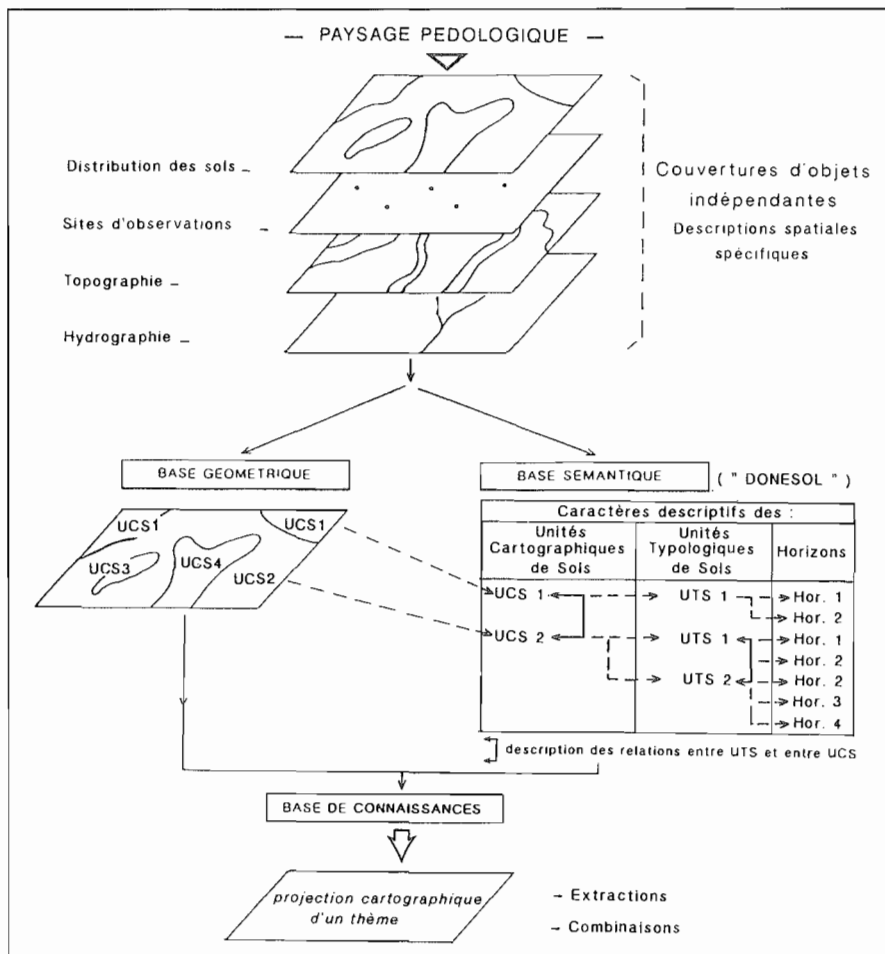


Figure 7 : Schéma d'un Modèle d'Organisation Spatiale des Sols (MOS), montrant les principes de structuration d'une base de données relationnelle (King, 1990).

Scheme of a Spatial Organization Model (SOM) showing the structuration principles of a data base (King, 1990).

- Pour la couverture “sol”, nous avons distingué l'*ensemble géométrique* décrivant les limites spatiales des organisations reconnues, de l'*ensemble dit sémantique* qui décrit les caractères des sols. Ce dernier ensemble comprend le tableau des “Unités Typologiques de Sols” (UTS) reconnues. Toutes les UTS ne sont pas nécessairement représentables graphiquement à une échelle donnée ; elles sont alors regroupées en ensembles qui, projetés sur une carte, forment des “Unités Cartographiques de Sols” (UCS). Au sein de chaque UTS, il est possible de décrire les différents horizons pédologiques, constituant ainsi une structure tridimensionnelle de la couverture pédologique.

- Il est nécessaire d'ajouter aux informations relatives à un territoire donné, des informations générales permettant de passer des caractères décrits géographiquement à des variables plus difficilement cartographiables (par exemple, passage de classe de texture et de matériaux originels à des caractéristiques de propriétés de sorption). Ces *fonctions* dites de “*pédotransfert*” (BOUMA et VAN LANEN, 1986) sont incluses dans une “*base de connaissance*” sémantique.

Un modèle relationnel

Enfin, une expression de la *variabilité* au sein des UTS ainsi que l'*agencement* des UTS au sein des UCS est proposée à l'aide des concepts inclus dans une *base de données relationnelle* (KING *et al.*, 1990). Ces derniers permettent également de décrire des relations de fonctionnement entre les unités spatiales.

Un programme dit DONESOL a été prévu à cet effet (GAULTIER *et al.*, 1991), pour structurer ce modèle relationnel et permettre d'organiser les informations de façon à ce qu'elles reflètent le mieux possible la structure spatiale de la couverture pédologique.

Dans la base de données, les attributs décrivant les UCS, ainsi que ceux communs aux UTS appartenant à une même UCS, sont inscrits dans un tableau.

L'agencement des UTS au sein des UCS est décrit par un autre tableau relationnel donnant pour chaque UCS, la liste des UTS décrites par des attributs indiquant leur mode de répartition géographique (KING *et al.*, 1992) ; par exemple : pourcentage de surface, pas de variation, contrastes des limites, liens morphogénétiques,... Une même UTS peut appartenir à plusieurs UCS ; cela peut être le cas pour un type de sol dominant dans une association et présent sous forme d'inclusion dans une association voisine.

Du point de vue géométrique, une UCS est alors composée d'une ou plusieurs plages cartographiques (ou “polygones” dans la nomenclature des SIG) qui sont décrites par les coordonnées des arcs qui les composent. Un tableau relationnel permet de définir l'appartenance de telle ou telle plage à telle ou telle UCS.

La structure de base de données ainsi proposée ne préjuge pas de la façon dont les “objets” sont préalablement définis ou regroupés. Elle offre un cadre descriptif pour organiser les informations spatiales.

3. Utilisation des données spatialisées

Indépendamment de l'intérêt scientifique représenté par l'établissement de l'inventaire et par l'élaboration de programmes de recherches fondés sur les connaissances ainsi acquises, une des justifications essentielles des travaux de

cartographie est la participation aux problèmes d'aménagement du territoire, et en particulier de l'espace rural.

Les problèmes posés par l'aménagement de l'espace peuvent se formuler de plusieurs manières. En effet, l'espace rural a des fonctions diverses, il est le support d'un certain nombre d'activités : agricoles ou non agricoles - il doit faire l'objet d'une utilisation et d'une conservation.

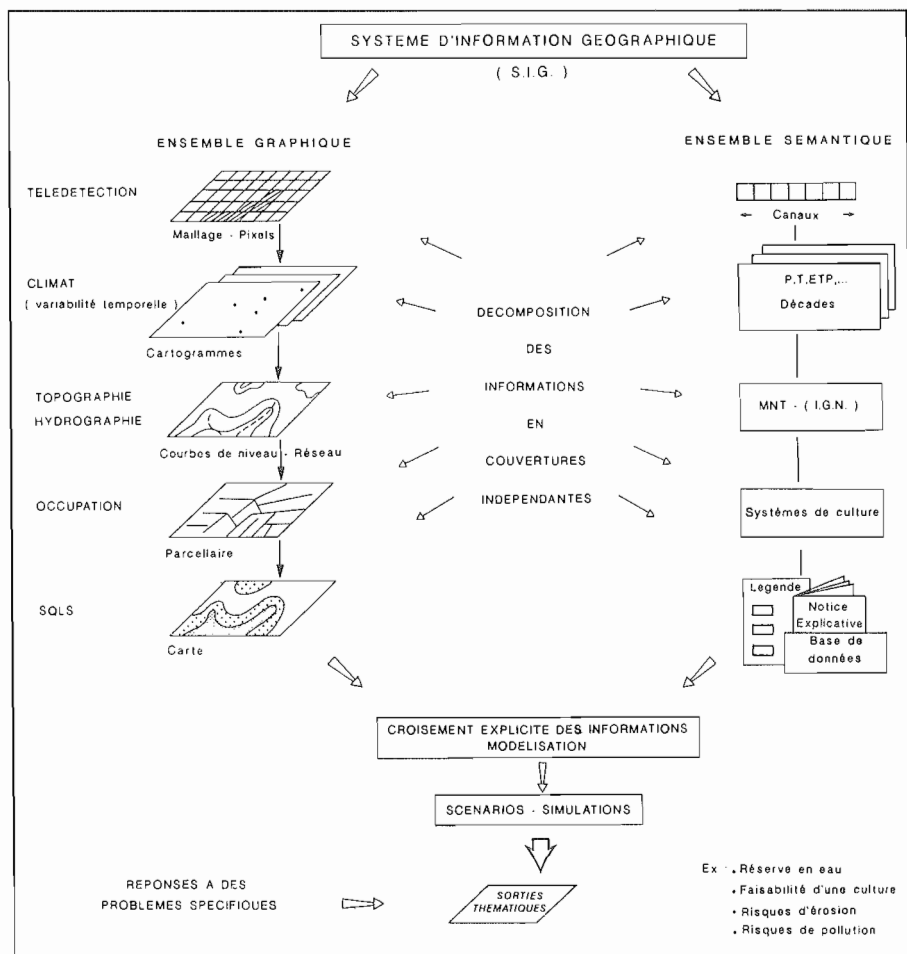


Figure 8 : Schéma illustrant l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) permettant le croisement des données du milieu physique pour répondre à des problèmes spécifiques concernant l'aménagement et la protection de l'Espace Rural. *Schema showing the use of Geographic Information Systems (GIS) allowing combination of physical medium data, in order to give answers to specific problems dealing with management and protection of Rural Space.*

L'aménagement de l'espace nécessite une suite d'opérations depuis le choix initial des objectifs jusqu'aux réalisations, et deux niveaux essentiels peuvent se distinguer :

- celui des choix primaires permettant les grandes options, et correspondant à un niveau de décision régional (Référentiel Régional de l'IGCS par exemple), national, voire international,

- celui des réalisations, comprenant toute une série de choix secondaires nécessitant un degré d'analyse beaucoup plus fin, et qui correspondent à des niveaux de décision essentiellement liés à l'exploitation agricole ou à la parcelle (Secteurs de Référence de l'IGCS par exemple).

Le croisement de données

La démarche cartographique telle que pratiquée jusque récemment apparaît maintenant trop statique, constituant simplement un inventaire figé, comprenant un nombre important de données non classées, et conduisant à l'élaboration de documents complexes difficiles à déchiffrer.

Il convient désormais d'élaborer une gestion des données du milieu physique basée sur leur *variabilité spatiale et temporelle*, c'est-à-dire d'une manière plus *dynamique*.

Nous venons de voir comment les techniques informatiques ont bouleversé les possibilités et les modalités d'expression cartographique. Une carte est considérée comme l'expression partielle et fugace d'une base de données dont on peut tirer à volonté les documents thématiques qui sont nécessaires. Ces cartes sont alors le plus souvent reproduites à un nombre réduit d'exemplaires, car elles ne constituent plus la "mémoire".

Plusieurs unités appartenant à des domaines sémantiques différents peuvent être réunies dans un même ensemble pour être consultées simultanément (figure 8).

Mais cette intégration spatiale de données du milieu physique, du sol et du climat notamment, se heurte à plusieurs problèmes importants : celui de leur disponibilité tout d'abord, et surtout ceux liés aux différences de concepts et de variabilité entre elles.

L'outil informatique permet de combiner les différentes données du milieu physique, qu'elles soient permanentes ou fluctuantes, mais un vaste champ d'études reste ouvert pour explorer les possibilités de modélisation et de simulations, et ceci le plus souvent en termes de prévisions ou de risques encourus.

4. Evolution au plan national

Fondée sur l'ensemble des informations spatialisées accumulées pendant de longues années par les travaux de la Carte Pédologique de France, et par celles en cours de recueil par ce même programme ainsi que par l'action Inventaire, Gestion et Conservation des Sols, une Base de Données Sols nationale a vu le jour, et permet d'effectuer l'ensemble des travaux que nous venons d'évoquer.

Il faut noter que nombreux sont les pays qui se sont dès à présent dotés de cet outil.

5. Evolution dans le contexte européen et mondial

Cette évolution technologique est également intervenue au niveau européen. Le programme CORINE de la DG XI a réalisé l'informatisation de la Carte des Sols de l'Europe au millionième dès sa parution en 1986, constituant ainsi une première *Base de Données spatialisées (Version 1.0)*.

De cette première base de données ont pu être extraites les répartitions d'un certain

nombre de paramètres élémentaires, comme la texture de surface. Plusieurs thématiques ont été ensuite tentées, par combinaisons de variables : - zonage de la partie méridionale de la Communauté en termes de susceptibilité à l'érosion (DG XI-CORINE), - spatialisations de modèles agro-météorologiques (DG VI-MARS Project) (MEYER-ROUX, 1987).

Les données de base issues de la digitalisation du document cartographique se sont cependant avérées insuffisantes pour répondre de manière satisfaisante aux problèmes posés. Des travaux ont donc été effectués pour diminuer ces insuffisances. Ceci d'une part par un enrichissement en intégrant de nombreuses données d'archives abandonnées pour cause d'harmonisation cartographique (*Version 2.0*), d'autre part par l'intégration de nouveaux attributs permettant de mieux caractériser les unités typologiques et cartographiques (*Version 3.0*), enfin par la création d'une base de "*Profils de sols*" illustrant les unités les plus représentatives du territoire européen (MADSEN, 1989, 1991). Pour passer des éléments de la base de données aux paramètres permettant de répondre à un problème thématique donné (érosion, pollution,...), la mise au point de *fonctions* dites de *pédotransfert* (BOUMA et VAN LANEN, 1986) est en cours.

La CCE souhaitant actuellement une extension de cette base de donnée aux pays d'*Europe Centrale et Orientale*, une action a été entreprise pour en intégrer les données sols spatialisées, tout comme pour les territoires de la Suisse et de l'Autriche, publiés en 1986.

Une harmonisation avec un certain nombre de programmes mondiaux, organisés à l'initiative de grands organismes internationaux comme la *FAO* ou l'*UNEP* (SOTER, 1986 ; GEMS, 1990 ; GRID, 1990 ; ISRIC-UNEP, 1990) apparaît de plus en plus importante à assurer.

III - ORIENTATIONS, PERSPECTIVES

La prise en compte des "pédopaysages" et "systèmes-sols" est la démarche essentielle permettant de cerner la dynamique et le fonctionnement nécessaires pour la gestion et la conservation de l'espace rural.

Les éléments présentés précédemment mettent en évidence une réorientation maintenant indispensable du recueil, de la structuration et de la gestion des données issues de l'inventaire du milieu physique. La question est alors de savoir quelle sera la "*Gestion des sols en l'an 2000*" ? (JAMAGNE and KING, 1991). Le problème essentiel n'est plus seulement celui de la mise en valeur, bien que toujours d'actualité dans des zones dites défavorisées, mais celui de la conservation. On constate de fait des risques accrus de dégradation physique et chimique des sols, ainsi que de leur usage, puisqu'apparaît une concurrence pour l'utilisation de l'espace agricole ou non agricole.

En conséquence, deux aspects des activités doivent être favorisés :

- des approches mieux adaptées à la connaissance du fonctionnement des unités de paysage, incluant l'analyse structurale détaillée des organisations des sols, et le suivi dans le temps d'un certain nombre de paramètres ;

- le stockage informatique de toutes les données recueillies au cours des inventaires du milieu physique permettant un transfert rationnel des connaissances, et la possibilité de nombreuses combinaisons pour répondre à différents objectifs.

L'ensemble des activités d'une unité de recherche en pédologie spatiale peut se répartir en trois volets : Recherches de base - Analyse spatiale - Thématisation des données ; et en trois niveaux : Activités propres à une unité de recherche en Science du Sol - Activités en tant que service de coordination national ou animateur d'actions interdisciplinaires - Activités dans le cadre de relations internationales (justifiées par les travaux aux niveaux 1 et 2).

Le tableau présenté montre l'articulation de ces activités autour de travaux de cartographie (Figure 9) et d'une base de données spatialisées.

1. Elaboration de Modèles d'Organisation Spatiale

La plupart des travaux cartographiques ont été réalisés par des experts après analyse d'observations sur le terrain ou au laboratoire. Cette analyse est rarement décrite, sauf éventuellement dans le cadre de travaux de recherches. Elle dépend des connaissances préalables de l'expert, de la complexité du milieu d'étude et des moyens disponibles. La carte produite dépend quant à elle des objectifs de l'étude, et tout travail d'informatisation d'une telle carte est réalisé à partir d'un document partiel issu de cette analyse orientée souvent non explicitée.

L'élaboration d'une base de données géographiques associée à une carte des sols de ce type peut 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 MOS propose en fait une inversion dans la chronologie des deux étapes sus-mentionnées. Il s'agit d'abord de réaliser une base de données géographiques à partir de données existantes puis d'en tirer des documents cartographiques selon différents thèmes.

Pour des travaux futurs, il faudra privilégier lors de la première étape la reconnaissance des horizons et des unités de sols sur la base d'une typologie, puis de décrire leurs relations de voisinage. Cette démarche signifie qu'un pédologue doit, avant de concevoir une représentation cartographique finale, élaborer un *modèle* de formulation de ses connaissances traduisant d'une façon la plus complète possible les lois chorologiques découlant des structures d'agencement spatial des différents sols reconnus dans un pédopaysage.

2. Analyse des processus spatiaux de comportement et fonctionnement

Le transfert des résultats de la recherche aux différents niveaux d'organisation du milieu naturel nécessitera un certain nombre d'approches spécifiques à mettre au point. Les notions de comportement, de fonctionnement, de dégradation superficielle, de déplacements de particules, de dynamique de l'enracinement... nécessiteront la prise en compte de paramètres complémentaires à ceux généralement utilisés.

Une "validation" des résultats fondamentaux obtenus devra intervenir à l'occasion d'analyses détaillées dans différentes régions.

Des développements pourraient concerner les points suivants :

- *"étude des relations entre caractéristiques pédologiques et paramètres du comportement physique des sols", incluant l'analyse de la pertinence d'une stratification pédologique vis-à-vis des propriétés significatives du comportement des sols ;*

- "étude de la distribution spatiale des sols en termes de fonctionnement". Il s'agit ici de rechercher et de tenter de formuler les mécanismes ou processus dont les interfaces, verticales et latérales, issues de l'agencement dans l'espace de matériaux sols, sont le siège. Ces interfaces peuvent être soit d'origine naturelle : géologiques ou fronts de transformations pédologiques par exemple, ou d'origine culturelle.

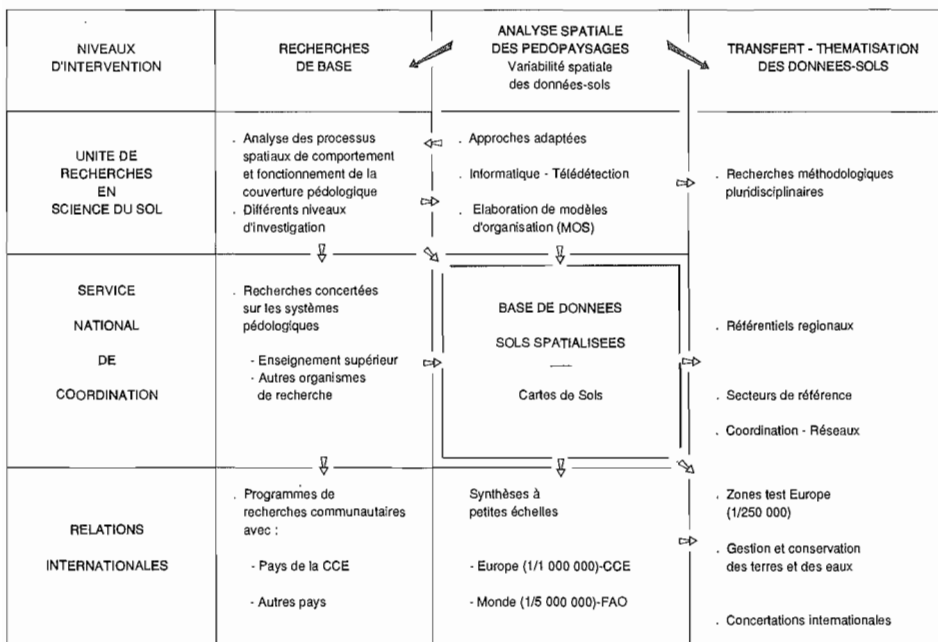


Figure 9 : Tableau décrivant l'organisation des activités et recherches dans le domaine de l'analyse spatiale en pédologie.

Table describing the organization of the activities and researches in the domain of spatial analysis in Pedology.

Ceci englobe des notions d'analyse spatiale détaillée d'agrégats, horizons, parcelles, sites et bassins versants élémentaires, à l'aide d'une analyse par volumes de la couverture pédologique, orientée sur les objectifs de connaissance du fonctionnement, des transferts, des flux,...

3. Transfert et thématisation des données-sols

Une approche nouvelle se dessine à partir des démarches autorisées par les techniques informatiques de gestion et de traitement des données spatialisées.

Différents types de documents thématiques peuvent être produits à partir des données stockées en banques, grâce à l'utilisation des SIG : cartes monofactorielles ; cartes plurifactorielles, issues notamment de croisement de données ; cartes thématiques dérivées.

Une structuration de l'information disponible intervient donc au sein des bases de données, pour pouvoir la transférer sous une forme rationnelle et le plus souvent modélisée. Il s'agit d'élaborer des règles dites de "Pédotransfert".

Ces dernières nous permettent d'estimer d'une part des propriétés significatives des sols, d'autre part le fonctionnement d'unités de paysage.

Il convient d'établir des règles de combinaisons entre paramètres, par exemple en ce qui concerne la conservation des ressources en sols :

- pour la *dégradation physique* : combinaisons, pour les risques de compaction, de la granulométrie des horizons de culture avec le type d'argile ; combinaisons, pour les risques d'érosion, de la qualité structurale des couches de surface avec leur granulométrie et leur teneur en matière organique, liée à une variation de l'infiltrabilité, et pouvant conduire à la battance, aux encroûtements puis au ruissellement ;

- pour la *dégradation physico-chimique et la pollution* : combinaisons de la granulométrie détaillée du solum, associée à la nature de la fraction argileuse en relation avec le matériau parental et la matière organique, de manière à pouvoir estimer l'importance des surfaces actives et la capacité de sorption.

Pour être capable de répondre à ce type de questions, un autre point important à élucider est celui concernant les orientations préférentielles des flux hydriques dans les différentes unités paysagiques. Et ceci nous reconduit, bien entendu, aux notions dynamiques de *Modèle d'Organisation Spatiale* et d'*Unité de Fonctionnement de Sols* évoquées plus haut.

Des mises à jour périodiques de ces bases de données peuvent être effectuées par l'utilisation d'enregistrements de télédétection, par un enrichissement permanent issu des analyses agronomiques des terres, et par la réalisation de nouvelles études spatiales.

Par ailleurs, des études de scénarios et de simulations peuvent être effectuées, permettant des prévisions à plus ou moins long terme.

CONCLUSION

L'analyse spatiale apparaît comme indispensable à l'augmentation de nos connaissances dans les différents domaines de la science du sol : compréhension des mécanismes, des processus, mise en évidence de l'évolution, du fonctionnement et du comportement des sols, de leur distribution dans le paysage et des relations qui existent entre eux.

Cette analyse représente une approche globale des problèmes de potentialités naturelles, le sol constituant un reflet des conditions écologiques.

Puisque l'espace est susceptible d'utilisations multiples qui interfèrent fortement les unes sur les autres, il paraît souhaitable de définir au préalable les grandes orientations du développement d'une région. C'est le cas des grandes options où intervient l'utilisation de documents synthétiques globaux. Les réalisations proprement dites impliquent bien entendu la nécessité d'études plus détaillées.

De nouveaux besoins sont par ailleurs apparus : nécessité de réponses rapides pour s'adapter à une conjoncture, nécessité de disposer d'outils de prévision. Pour satisfaire ces besoins, un nouvel outil de gestion existe maintenant : les systèmes informatiques.

Des programmes importants d'informatisation générale des différentes phases des travaux se sont mis en place, depuis le recueil des données sur le terrain jusqu'aux

traitements statistiques et à la restitution sous forme graphique. Ils comprennent la gestion de banques de données sols et de données cartographiques et correspondent à l'élaboration de différents Systèmes d'Information Géographiques.

Cette notion de système d'information géographique sera très certainement dans l'avenir amenée à remplacer celle, conventionnelle, de "carte". Progressivement, la conception de cartes dites "thématiques" fait place à celle de combinaisons de données permettant l'élaboration de scénarios et de simulations, et ceci notamment en termes de risques. Ceci montre à l'évidence la nécessité d'une pluridisciplinarité.

Un certain nombre de points paraissent actuellement essentiels pour l'orientation des travaux et recherches dans le domaine de l'analyse spatiale et de la cartographie des sols : - la notion de transfert d'échelles - la nécessité d'analyses détaillées de la structure et du fonctionnement des couvertures pédologiques de manière à permettre une modélisation des organisations spatiales, et la connaissance des processus spatiaux nécessaire pour une gestion rationnelle de l'espace rural - l'intérêt que présente maintenant l'utilisation des outils statistiques et informatiques à tous les stades de la démarche du pédologue cartographe.

Compte tenu de la nécessité d'échanges tant dans le domaine scientifique que dans celui de la valorisation, il est évident qu'une concertation et une harmonisation au niveau international (CCE, FAO) sont devenues actuellement totalement indispensables.

Remerciements : Les auteurs remercient les lecteurs, dont Messieurs BOURGEON et BOURRIÉ, ainsi que Monsieur le professeur BOULAIN, pour leurs commentaires et critiques constructives lors l'analyse du manuscrit.

Reçu pour publication : Décembre 1992

Accepté pour publication : Octobre 1993

BIBLIOGRAPHIE

- AFES-INRA, 1992 - Baize D. et Girard M.C. coord. - *Référentiel Pédologique - Principaux sols d'Europe* - INRA Editions, 222 p.
- ARROUAYS D., DUVAL O., RENAUX B., 1989 - *Esquisse des paysages pédologiques du Loiret à 1/250 000*. INRA - SESCPF, Orléans. 178 p.
- AUBERT G. et BOULAIN J., 1989 - Contribution de certains pédologues français à l'évolution des concepts pédologiques utilisés en cartographie. *Science du Sol*, **27**, 4, 395-411.
- BAIZE D., 1986 - Couvertures pédologiques, cartographie et taxonomie. *Science du Sol*, **24**, 3, 227-243.
- BOCQUIER G., 1973 - *Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux au Tchad*. Mémoire ORSTOM n°2. 350 p.
- BONNEAU M., FAIVRE P., GURY M., HETIER J.M., LE TACON F., 1978 - Carte pédologique de France à moyenne échelle, Saint-Dié. Carte à 1/100 000 et notice explicative. INRA, Paris. 159 p.

- BORNAND M., ARROUAYS D., BAIZE D., JAMAGNE M., 1989 - Cartographie régionale des sols à l'échelle du 1/250 000. *Science du Sol.*, 27, 1, 17-20.
- BOULAINÉ J., 1957 - *Les sols des plaines du Chélib*. Thèse de Doctorat. Publication Direction Hydraulique et Equipement Rural. Alger, 586 p.
- BOULAINÉ J., 1975 - *Géographie des sols*. P.U.F., Paris. 200 p.
- BOULAINÉ J., 1980 - *Pédologie appliquée*. Collection Sciences agronomiques, Paris, 220 p.
- BOULAINÉ J., 1986 - La dispersion latérale dans les sols ou de l'horizontalisme au verticalisme ; essai sur la loxostasie. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Vol. XXII, 3, 319-327.
- BOULET R., CHAUVEL A., HUMBEL F.X. et LUCAS Y., 1982 - Analyse structurale et cartographie en pédologie. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Vol. XIX, 4, 309-351.
- BOUMA J. and 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. et GAVAUD M., 1985 - *Les sols et les ressources en terres du Nord Cameroun*. 2 cartes à 1/500 000. ORSTOM Paris, 285 p.
- 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, Paris, 65-85.
- BREGT A.K., 1992 - *Processing of soil survey data*. Thèse Doc. Université Agronomique de Wageningen. Pays Bas. Wageningen. 167 p.
- CALLOT G., 1977 - Logique de distribution des sols et formations superficielles sur plate-forme calcaire. Notion de système géopédologique régional. *Bull. Assoc. Fr. Étude du Sol, Sci. Sol*, 4, 189-205.
- C.P.C.S., 1967 - *Classification des sols*. INRA, Paris. 87 p.
- DUCHAUFOUR Ph., 1983 - *Pédologie*. Tome 1. *Pédogenèse et classification*. 2^e éd. Masson, Paris, 510 p.
- ECC, 1985 - *Soil Map of the European Communities 1/1 000 000*. CEC-DGVI Luxembourg. 124 p.
- ERHART H., 1956 - Biostasie et Rhexistasie. *C. R. Acad. Sci.*, Paris. 241, 1218-1220.
- ESCHENBRENNER V. et BADARELLO L., 1975 - *Notice explicative de la carte des paysages morpho-pédologiques à l'échelle du 1/200 000. Feuille Odienné (Côte d'Ivoire)*. ORSTOM. Paris. 95 p.
- FAO-UNESCO, 1975 - *Soil Map of the World at 1/5 000 000*. Vol I. Legend. Unesco, Paris, 62 p.
- FAO, 1991 - "*World Soil Resources Map*". 1/25 000 000 W.S.R., n° 66, Rome, 58 p.
- FRIDLAND V.M., 1975 - Structure of the soil cover. X^e Congrès A.I.S.S., II Moscou 552-558.
- FRITSCH E., 1984 - *Les transformations d'une couverture ferrallitique. Analyse minéralogique et structurale d'une toposéquence sur schistes en Guyane française*. Thèse 3^{ème} cycle, Université Paris VII. 188 p.
- GAULTIER J.P., LEGROS J.P., BORNAND M., KING D., FAVROT J.C. et HARDY R., 1993 - L'organisation et la gestion des données pédologiques spatialisées : le projet DONESOL. *Revue de géomatique*, 3, 3, 235-253.
- GAVAUD M., 1989 - La pratique des études de paysages pédologiques. Application à deux exemples de la zone tropicale. In : *SOLTROP 89*. ORSTOM, Paris, 35-63.
- GEMS, 1990 - *Global Environment Monitoring System*. UNEP. Nairobi. 32 p.
- GEPPA - SESCOF, 1969 - Codes de symbolisation. INRA SESCOF. 35 p.

- GIRARD M.C., 1972 - Méthodologie de la photopédologie. *Bull. Soc. Fr. de Photogramm.* **48**, 1-10.
- GIRARD M.C., 1983 - *Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique*. Thèse état, 430 p., Sols n°12, INA-PG Grignon.
- GIRARD M.C., 1989 - La cartographie en horizons. *Science du Sol*. **27**, **1**, 41-64.
- 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**, 335-350.
- GIRARD M.C. et GIRARD C.M., 1989 - *Télétection appliquée. Zones tempérées et intertropicales*. Masson. Paris. 260 p.
- GRID, 1990 - *Global Resource Information Database*. UNEP. Nairobi-Genève. 16 p.
- HUGGETT R. J., 1975 - Soil Landscape Systems : a Model of Soil Genesis. *Geoderma*. **13**, **1**, 1-22.
- INFORMATIQUE ET BIOSPHERE, 1969 - *Glossaire de Pédologie. Description des Horizons en vue du traitement informatique*. Publ. ORSTOM. Paris. 82 p.
- INFORMATIQUE ET BIOSPHERE, 1971 - *Glossaire de Pédologie. Description de l'Environnement en vue du traitement informatique*. Inf. Biosphere. 173 p.
- IGCS, 1992 - Inventaire, Gestion et Conservation des Sols. Ministère de l'Agriculture (DERF) - INRA. Paris. 9 p.
- ISRIC - UNEP, 1990 - "World Map of the status of human-induced Soil Degradation". Oldeman I.R., Hakkeling R.I.H., Sombroek W. Wageningen. 3 maps, 27 p.
- JAMAGNE M., 1964 - Introduction à une étude pédologique dans la partie Nord du Bassin de Paris. *Pédologie*, **14**, **2**, 228-342.
- JAMAGNE M., 1967 - Bases et techniques d'une cartographie des sols. *Ann. Agron.* n° hors série, **18**, 142 p.
- JAMAGNE M., BORNAND M., HARDY R., 1989 - La Carte Pédologique de France à 1/100 000. *Science du Sol*, **27**, **1**, 21-24.
- JAMAGNE M., BORNAND M., HARDY R., 1991 - Soil mapping in France and its applications. In : *Soil survey, a basis for european soil protection*, Silsoe. Soil and groundwater research report I. CEC. 7-15.
- JAMAGNE M., KING D., 1991 - Mapping methods for the 1990's and beyond. In : *Soil survey, a basis for european soil protection*, Silsoe. Soil and groundwater research report I. CEC. 181-196.
- KILIAN J., 1974 - Etude du milieu physique en vue de son aménagement. *L'Agronomie tropicale*, XXIX (2-3), 141-153.
- KING D., 1984 - Analyse de quelques concepts en cartographie des sols basée sur une automatisation des cartes thématiques dérivées. *Agronomie*, **5**, **5**, 461-472.
- KING D., VOSSEN P., DAROUSSIN J., 1989 - Creation of an agropedoclimatological information system for the European Communities under the MARS Project. 14th World Conf. of I.C.A. Budapest, 211-230.
- KING D., DAROUSSIN J., JAMAGNE M., 1990 - Contribution of GIS concepts to soil mapping. GIS for the 90s, Ottawa, 5-8/3/90. 8 p.
- KING D., DAROUSSIN J. and TAVERNIER R., 1994 - Development of a soil geographic database from the soil map of the European Communities. *Catena* **21**.
- LAMOTTE M., DUVAL O., HUMBEL F.X., JAMAGNE M., 1992 - Une démarche itérative pour l'identification et la cartographie d'un système pédologique en Orléanais. In : "Organisation et fonctionnement des altérites et des sols". Séminaire ORSTOM, Paris, 105-116.

- LE BAS C., JAMAGNE M., KING D., et BERLAND M., 1992 - Les programmes Européens de connaissance et gestion des sols. 3^{èmes} Journées d'Etude des Sols, AFES, Lausanne 8-10/9/1992 (Résumé).
- MADSEN H.B., 1989 - Elaboration of a soil profile and analytical data base connected to the EC-Soil Map. In : *EC-Workshop on application of computerized EC Soil Map and climate data*, Wageningen. CEC-DGVI, Luxembourg, 119-132.
- MADSEN H.B., 1991 - The principles for construction of an EC-Soil database system. In : "*Soil Survey, a Basis for European Soil Protection*". J.M. Hodgson, ed. 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.
- MILNE G., 1935 - Some suggested Units of Classification and Mapping. *Soil Research*, 4, 183.
- NORTHCOTE K. H., 1984 - Soil-landscapes, taxonomic units and soil profiles. A personal perspective on some unresolved problems of soil survey. *Soil Survey and Land Evaluation*, 4, 1, 1-7.
- PEDRO G., KILIAN J., 1986 - Les travaux pédologiques et les études des milieux physiques réalisés par les organismes français de recherche pour le développement dans les régions chaudes. In : *Sols et Eaux*. ORSTOM, 5-65.
- RAUNET M., 1989 - Approche systémique appliquée à la cartographie morphopédologique du paysage. In : *SOLTROP 89*. ORSTOM, 143-177.
- ROSSI G., 1989 - Exemples de morphopédologie tropicale. In : *SOLTROP 89*. ORSTOM, 87-105.
- ROSSIGNOL J.P., GEISSERT T., CAMPOS A. et KILIAN J., 1987 - Morfoedafologia del area Xalapa-Coatepec. 3 cartes 1/75 000. ORSTOM, INIREB, CIRAD, Mexico.
- SIMONSON R.W., 1989 - Historical highlights of soil survey and soil classification with emphasis on the United States, 1969-1970. ISRIC Wageningen, 83 p.
- SOIL SURVEY MANUAL, 1961 - USDA SCS. Washington. 503 p.
- SOMBROEK W.G., BRAUN H.M.H., VAN DER POUW B.J.A., 1982 - *Explanatory Soil Map of Kenya*. 1/1 000 000, Kenya Soil Survey, Nairobi, 56 p.
- SOTER, 1986 - *World Soils and Terrain Digital Database at scale 1:1 M*. Project Proposal. ISRIC. Wageningen.
- STIPA, 1984 - Bertrand R., Falipou P., Legros J.P. (Coord.) *Notice pour l'entrée des descriptions et analyses de sols en banques de données*. ACCT. Paris, 136 p.
- TAVERNIER R., 1985 - *Soil Map of the EC*. Chapters 1 and 3. CCE - DG VI. Luxembourg. 124 p.
- TRICART J., KILIAN J., 1979 - *L'éco-géographie*. Herodote F.M., Paris, 121-162.
- VAN DEN DRIESSCHE R., 1974 - La banque de données pédologique de l'ORSTOM. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XII, 1, 125-132.

