

Essai de modélisation de l'organisation spatiale des sols d'une région. Application aux plateaux calcaires bourguignons

J. CHRETIEN*
D. KING**
R. HARDY**
D. MEUNIER*

RÉSUMÉ

Cet article présente, à partir d'un cas concret, la méthode proposée pour transmettre le plus complètement possible l'information acquise lors de l'étude de la couverture pédologique d'une région (Bourgogne). La méthode est développée à partir des concepts des Systèmes d'Information Géographique (SIG). Les travaux ont été conduits dans le cadre d'essais méthodologiques liés à la réalisation du Référentiel Régional Pédologique à l'échelle du 1/250 000 (programme IGCS : "Inventaire, Gestion et Conservation des Sols").

L'approche utilisée est celle d'une structure informatique, le MOS (Modèle d'Organisation Spatiale des Sols) comprenant essentiellement deux ensembles : un ensemble géométrique décrivant les limites spatiales des objets géographiques reconnus (UCS : Unités Cartographiques de Sols) et un ensemble sémantique qui décrit leur contenu pédologique (UTS : Unités Typologiques de Sols).

Dans le contexte des plateaux calcaires bourguignons et à l'échelle de l'étude, les UCS sont rarement pures (composées d'une seule UTS) mais le plus souvent des associations de sols plus ou moins complexes qui traduisent l'organisation de la couverture pédologique dans un paysage donné. Définies à partir des deux critères de base que sont la géomorphologie et la lithologie, les UCS correspondent pour la plupart à des ensembles litho-géomorpho-pédologiques.

Cet exemple montre que les concepts des SIG sont très utiles pour mémoriser et gérer un grand nombre de données spatialisées. Ceci est un résultat évident et classique. Les concepts des SIG permettent surtout de décrire la variabilité spatiale des sols à l'aide de codes symboliques lorsqu'on ne connaît pas la localisation des limites de sols. Dans le futur, un modèle d'organisation spatiale des sols devrait être décrit de façon plus explicite en utilisant de tels codes sur les relations sol-paysage.

Mots-clés : sol - modélisation - organisation spatiale - unité cartographique - unité typologique - variabilité - plateau calcaire - Bourgogne.

TEST FOR MODELLING THE SPATIAL ORGANIZATION OF SOILS IN A REGION : APPLICATION TO THE LIMESTONE PLATEAUS OF BURGUNDY, FRANCE.

A method is presented for describing in computer form the knowledge of the soil cover structure on a regional scale (Burgundy in France). The aim is to transmit in the

* INRA - SESCOF - Station d'Agronomie - 17, rue de Sully 21034 - DIJON

** INRA - SESCOF - Centre de Recherches d'Orléans - 45160 ARDON

most complete and coherent manner as possible, all data obtained during the steps of soil mapping. The method is elaborated from Geographical Information System (GIS) concepts. The work is part of methodological tests for a regional 1:250,000-scale agro-pedological investigation, called the IGCS programme (French acronym for inventory, management and conservation of soils).

The approach used is that of a computerized "Spatial Organization Model" (SOM) of soils (fig. 1), which essentially comprises two sets. These are a geometrical set describing the spatial boundaries of known geographical objects called "Soil Map Unit" (SMU), and a semantic set called "Soil Typological Unit" (STU) that describes their pedological content. The data are stored in tables (fig. 1). The model focuses on the description of the spatial variability within STUs and the organization of STUs within SMUs. A relational table indicates surface percentage, variation steps, boundary contrasts, shape index, etc. This gives a symbolic description of soil geographical patterns without geometric description.

The method is applied on a test region which is a part of the Burgundy region in France. The landscape analysis shows a set of limestone plateaus oriented SW-NE between the Morvan and the Vosges (fig. 2). In this context and at a 1:250,000 scale, an SMU is rarely composed by only one STU, but more likely is a soil association of varying complexity. The main SMUs are listed in table I. SMUs are defined from two basic criteria : geomorphology and lithology, which means that most SMUs are litho-morpho-pedological spatial units. One SMU is chosen as a complete example (fig. 3). The intra-unit and inter-unit variabilities are especially described and discussed (tables II and III).

The methodology applied to the Burgundy region shows that the GIS concepts are very useful to store and manage numerous spatial data. This is an obvious and usual result. GIS concepts make it possible especially to describe the soil spatial variability with symbolic codes when the location of soil boundaries is not known with high accuracy. In future, a more explicit soil spatial model should be described by using such a codification on soil-landscape relations and by explaining previous and present soil functioning.

Keywords : soil - modelling - spatial organization - soil map unit - variability - Burgundy.

INTRODUCTION

Une carte de sols est un moyen conventionnel pour représenter la variabilité spatiale du continuum "sol". Quels que soient les moyens graphiques utilisés, la plupart des cartes indiquent un découpage géographique de ce continuum selon une classification des sols préétablie (ALEXANDER, 1983). Une telle représentation constitue un moyen efficace de transmission des informations et elle a été largement utilisée dans de nombreux programmes de cartographie tant nationaux qu'internationaux. On note toutefois des critiques sur cette méthode : d'une part, les utilisateurs des cartes des sols jugent l'accessibilité aux informations trop difficile (langage pédologique complexe, symboles graphiques difficilement lisibles, etc., VALENTINE *et al.*, 1981 ; MSANYA *et al.*, 1987) et d'autre part, les limites entre unités de sols sont fournies sans réelle explicitation des arguments scientifiques à l'origine du découpage proposé (SCHELLING, 1970 ; HEWITT, 1993). En d'autres termes, seules des personnes

formées à la pédologie et à la cartographie sont capables de décrypter le message complexe et parfois implicite transmis par une carte pédologique.

Les moyens informatiques, en particulier ceux rassemblés sous le terme de "Système d'Information Géographique" (SIG) (BURROUGH, 1986), permettent désormais d'acquérir, de gérer et de restituer des données spatiales (GIRARD *et al.*, 1989). Il est donc nécessaire de réviser à la lumière de ces nouvelles méthodes les concepts développés dans le cadre d'une représentation cartographique conventionnelle (JAMAGNE *et al.*, 1989). C'est dans ce sens que la communauté des pédologues français a développé une structure de base relationnelle de données sols spatialisées (projet DONESOL ; GAULTIER, 1990 ; DAROUSSIN, 1992 ; GAULTIER *et al.*, 1993), en vue de gérer l'ensemble des données pédologiques du territoire français. Des projets similaires sont en cours aux plans européen et mondial (projet MARS, MEYER-ROUX, 1987 ; projet SOTER, BATJES, 1990).

L'objectif de cet article est de préciser les concepts conventionnellement utilisés en cartographie des sols et de proposer une modélisation de l'organisation spatiale des sols en utilisant les moyens offerts par les SIG. Pour cela, nous présenterons et discuterons le cas de la région naturelle des plateaux calcaires bourguignons dans le département de la Côte d'Or. Ce travail est inclus dans l'un des volets du programme IGCS (Inventaire, Gestion et Conservation des Sols, HARDY et GIRARD, 1992). Notons qu'il se situe dans la continuité de travaux précédemment présentés (ARROUAYS, 1989 ; BORNAND et ROBBEZ-MASSON, 1990 ; CHRETIEN *et al.*, 1990 ; ROQUE et HARDY, 1993).

I - METHODOLOGIE

1. Définition d'un Modèle d'Organisation Spatiale des Sols (MOS)

Deux activités peuvent être distinguées lors d'un travail de cartographie des sols. Il s'agit d'une part de l'analyse de la distribution des sols dans l'espace et d'autre part de leur représentation sur un document cartographique. Il y a parfois confusion entre ces deux activités (GIRARD *et al.*, 1989) : le travail d'analyse consiste à mettre en évidence les relations spatiales entre les sols signalant ainsi les lois d'organisation de la couverture pédologique. Le travail de représentation est quant à lui un travail de synthèse où l'on cherche à transcrire de façon didactique les organisations précédemment reconnues.

Les techniques informatiques et statistiques fournissent de nouveaux moyens au sein de ces deux types d'activités. Nous nous attacherons à la seconde en notant que la notion de "représentation cartographique" a été progressivement remplacée par celle de "Système d'Information Géographique". De tels systèmes offrent des possibilités très larges de mémorisation et de gestion des informations, ainsi que de traitement graphique.

Trop souvent, l'utilisation de ces techniques s'est limitée à l'informatisation des contours pédologiques issus du seul document papier publié (KING *et al.*, 1994), négligeant les informations précieuses contenues dans la légende et surtout dans la notice de la carte. Il est donc proposé une structure informatique d'accueil pour les données numériques décrivant les couvertures pédologiques. Cette structure doit, par

exemple, rendre compte de la géométrie tridimensionnelle des volumes de sols et formuler les inter-relations structurelles ou fonctionnelles entre ces volumes (BOULET *et al.*, 1982). Une telle structure n'est plus strictement une carte et elle est dénommée "Modèle d'Organisation Spatiale des Sols" (MOS) (KING et DAROUSSIN, 1990).

Dans un MOS, l'information est décomposée en "couches" indépendantes (BURROUGH, 1986 ; JAMAGNE *et al.*, 1993). Pour une couche donnée, on identifie les "objets" dont la géométrie est décrite dans un premier ensemble (notion de contenant) et dont les caractéristiques sont incluses dans un second ensemble nommé "ensemble sémantique" (notion de contenu).

2. Définition des objets géographiques

Les informations pédologiques recueillies lors du travail d'analyse sont essentiellement ponctuelles (sondages à la tarière, profils pédologiques). L'objectif d'une telle analyse est de pouvoir identifier les principaux types de sols, puis de déterminer leurs lois de distribution spatiale ou chorologique (GIRARD, 1983) en relation avec les facteurs de l'environnement (pente, lithologie, végétation, etc.). Dans un premier temps, une typologie d'unités de sols est ainsi constituée ; elle est, en général, reliée à une classification régionale ou nationale (BAIZE, 1989) ; dans un second temps, ces Unités Typologiques de Sols (UTS) peuvent être spatialement délimitées individuellement ou par groupe selon l'échelle de représentation choisie. Le découpage de la couverture pédologique selon cette typologie fournit des Unités Cartographiques de Sols (UCS).

a) Définition de l'Unité Typologique de Sol (UTS)

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi de définir l'Unité Typologique de Sol comme un ensemble de pédons présentant des développements de profils semblables, c'est-à-dire la même succession d'horizons, l'un ou l'autre de ces horizons pouvant être éventuellement absent (AFES, 1992).

Un horizon est un volume pédologique dont les dimensions latérales (x et y) sont largement plus grandes que la dimension verticale. Sans nécessairement connaître l'extension spatiale précise d'un tel volume, il est possible d'en définir la "sémantique", c'est-à-dire l'ensemble de ses caractéristiques intrinsèques. Chacune d'entre elles est décrite à l'aide d'une valeur modale accompagnée d'un intervalle de variation. La constitution d'une UTS, réalisée essentiellement à partir d'un diagnostic morphologique (assemblage d'horizons), reflète avant tout un mode de mise en place et de fonctionnement de la couverture pédologique sans que l'on en connaisse nécessairement l'extension spatiale.

Une telle définition se veut très "souple", n'imposant pas un lien strict entre la précision des variables sémantiques et l'échelle de représentation. Ceci permet de s'adapter aux conditions du terrain étudié et à la quantité de données dont on dispose. En revanche, il peut être nécessaire, dans le cadre d'un programme harmonisé, de fixer des limites quant à la précision souhaitée sur les variables descriptives inscrites dans l'ensemble sémantique.

b) Définition de l'Unité Cartographique de Sols (UCS)

Une Unité Cartographique de Sols est définie comme un (ou des) morceau(x) de la

couverture pédologique dont l'extension correspond à la définition d'une loi de distribution spatiale. Celle-ci pourrait être décrite sur la base de critères statistiques (ou géostatistiques) strictement pédologiques ou en tenant compte des liens déterministes entre les caractères du sol et les facteurs de l'environnement (géologie, géomorphologie, occupation du sol, etc...). En réalité, il est difficile d'explicitier l'ensemble des lois et on choisit ici de n'enregistrer que le résultat des travaux d'analyse spatiale, c'est-à-dire les limites géographiques entre des unités de sols reconnues comme différentes. Aux petites échelles, comme ici dans notre étude à 1/250 000, les critères lithologiques et géomorphologiques seront privilégiés pour déterminer les unités cartographiques. De façon concrète, cela se traduit par la délimitation de polygones (ou plages) dont on décrit les coordonnées de leurs contours dans l'ensemble dit "géométrique".

Avec un SIG, il est possible d'enregistrer de tels polygones quelle que soit la finesse des contours. Il est donc possible de retenir toutes les limites pédologiques reconnues quelle que soit leur complexité et d'attacher à chacune d'elles une échelle à partir de laquelle on considère sa représentation lisible (CRUICKSHAND, 1972 ; BOULAIN, 1980). Dans un grand nombre de cas, ce sont les moyens d'investigation, en particulier le nombre d'observations, qui limitent la création d'UCS très détaillées. Une UCS peut alors regrouper plusieurs UTS. Elle est nommée UCS complexe ou Association (SIMONSON, 1971 ; FAO, 1975). Deux types seront distingués : les juxtapositions lorsque la nature des liaisons entre UTS est inconnue et les combinaisons (FRIDLAND, 1976 ; BOULAIN, 1978) lorsqu'il est possible d'apporter des éléments sur l'organisation des UTS entre elles (cf. paragraphe I.4).

Une UCS peut évidemment ne comprendre qu'une seule UTS : elle est alors nommée UCS simple. Dans ce cas, il y a adéquation entre le niveau de précision sémantique souhaitée pour la définition de l'UTS et les possibilités de délimitation géographique de l'UCS. Notons qu'une telle relation UCS-UTS n'empêche pas qu'une UTS puisse appartenir à plusieurs UCS.

La définition des UCS et en corollaire, le regroupement des UTS sont réalisés de façon à traduire le mieux possible l'organisation de la couverture pédologique d'un paysage donné. Les facteurs lithologiques et géomorphologiques sont souvent privilégiés pour regrouper les UTS dans des ensembles appelés aussi "pédopaysages" (HUGGETT, 1975 ; ARROUAYS et HARDY, 1993). Ces deux facteurs sont retenus car ils sont les principales clefs explicitant les modes de distribution et d'évolution des sols. Ils traduisent les phénomènes pédogénétiques dominants, en particulier ceux liant des UTS différenciées à partir d'un même processus spatial. C'est le cas, par exemple, des séquences de sols le long de versants liant les différents types de sols selon un processus d'érosion-colluvionnement. Cette notion équivaut au concept de "chaîne de sols" proposé par la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (CPCS, 1967). D'autres critères sont utilisés dans un nombre de cas plus limité, comme par exemple, l'occupation des sols.

3. Description de la variabilité intra-unité

Les définitions proposées sont très proches des notions classiques utilisées dans les programmes de cartographie à petites et moyennes échelles. Une carte de sols est un excellent moyen pour décrire la variabilité spatiale de la couverture pédologique. La

méthode proposée reprend par analogie cette approche en précisant les concepts d'UTS et d'UCS. La question posée est alors de savoir s'il est possible de poursuivre une telle description de la variabilité spatiale des sols au delà de ces concepts, par exemple en décrivant la variabilité spatiale à l'intérieur des entités UTS et UCS précédemment définies.

a) Variabilité intra-UTS

De nombreux travaux se sont attachés à définir de façon statistique la variabilité au sein d'unités de sols (WALTER, 1990). Ils nécessitent la plupart du temps un grand nombre de données. Nous limiterons volontairement notre propos aux travaux réalisés sur la base d'une analyse de l'organisation des sols par expertise d'un grand territoire où il serait très difficile de gérer numériquement toutes les observations réalisées.

Tout travail de cartographie conventionnelle est souvent un compromis entre le nombre de sites échantillonnés et la précision des mesures réalisées sur ces sites (LEGROS, 1978). Ainsi, toute appréciation finale des caractéristiques d'une UTS est entachée de deux types d'erreur (au sens mathématique du terme) : une "erreur" due à l'imprécision des mesures et une "erreur" due à l'échantillonnage c'est-à-dire au nombre limité des sites observés. D'une façon générale, ces deux types d'erreur peuvent être associés dans la mesure de l'erreur globale.

Une pratique courante est de travailler à l'aide de variables qualitatives, dont les valeurs correspondent à des classes (exemple des classes de texture), l'étendue d'une classe étant si possible plus large que l'erreur estimée. Une normalisation de ces classes est toujours recherchée [travaux GEPPA, STIPA, AFNOR, ISO (BERTRAND *et al.*, 1984 ; LEGROS, 1990)] mais il est souvent constaté que ces classes sont ajustées à chaque nouvelle étude en fonction de la plus ou moins grande variabilité des terrains et des connaissances acquises [efficacité du pédologue de BOULAIN (1980)]. En conséquence, il est difficile de proposer une normalisation de la description des UTS sur la base de variables qualitatives ordonnées c'est-à-dire de variables discrétisées dont les valeurs sont divisées en classes *a priori*. Cela est d'autant plus vérifié que les bornes de classes prédéfinies ne correspondent pas nécessairement à des seuils de comportements intéressant plus directement des utilisateurs.

C'est pourquoi, nous avons retenu en liaison avec les travaux d'harmonisation du projet DONESOL (GAULTIER, 1990) :

(1) de ne pas différencier les erreurs dues à la mesure et celles dues à la variabilité spatiale,

(2) de transcrire les variables sous une forme quantitative (par exemple, pourcentage des fractions granulométriques plutôt que classes de texture).

Ceci se traduit, pour chaque variable, par l'affectation d'une valeur modale. Celle-ci correspond à une estimation de la valeur de plus forte probabilité si l'on effectuait un échantillonnage aléatoire. De plus, chaque valeur modale est encadrée de deux valeurs indiquant l'intervalle de variation dans lequel se retrouveraient 60 % des mesures de ce même échantillonnage aléatoire pour un seuil de probabilité fixé. Pour décrire la nature de la variation lorsqu'elle est connue, la forme de l'histogramme peut être précisée : nombre de modes, dissymétrie, etc. Ces valeurs sont estimées de façon empirique car il est rarement possible d'établir un échantillonnage suffisamment grand pour respecter les contraintes des tests statistiques.

Pour les variables nominales qui ne peuvent pas être rapportées sous la forme de variables quantitatives (exemple de la nature des éléments grossiers), il est proposé une démarche similaire en notant trois possibilités, de la plus fréquente à la moins fréquente : la modalité dominante et deux modalités secondaires. La description de la forme de l'histogramme n'a, par contre, pas de sens.

b) Variabilité intra-UCS

La variabilité intra-UCS correspond à l'assemblage des UTS la constituant. Pour décrire cet assemblage, plusieurs moyens sont classiquement utilisés. Le plus fréquent consiste à donner simplement le pourcentage de surface estimé d'une UTS au sein d'une UCS. Ce moyen ne fournit aucune information sur la géométrie du système. Un second moyen utilise la représentation schématique d'un bloc diagramme ou la cartographie d'un petit secteur. Un troisième moyen, initié par les travaux de FRIDLAND (1976), consiste à décrire la géométrie des UTS à l'aide d'un langage symbolique (VIEU, communication orale). Celui-ci peut être normalisé et s'inscrire aisément dans un système d'information (INRA, 1982 ; KING, 1984). Quelques exemples de variables symboliques descriptives de l'espace sont donnés ci-après (pour plus de détails, on se reportera aux documents de travail : KING et DUVAL, 1990 ; INRA, 1992) :

- (1) Individualisation : Il s'agit de préciser l'extension approximative de portions continues d'UTS incluses dans une UCS pour juger de leur influence au niveau d'une utilisation de l'espace (unité d'individualisation métrique, décamétrique, hectométrique, etc.)
- (2) Motif (ou forme) : On donne une description symbolique du mode de répartition de l'UTS au sein de l'UCS (par exemple, petites unités cellulaires isolées, unité englobante, en bandes, en réseaux, etc.).
- (3) Localisation : L'UTS peut couvrir la totalité de l'UCS selon le motif précédemment décrit ou, au contraire, être plus particulièrement localisée dans une portion limitée de l'UCS.
- (4) Morcellement : On note si l'UTS constitue une entité continue unique au sein de l'UCS ou si elle est constituée d'un grand nombre de plages isolées les unes des autres (par exemple : une seule plage, une à dix plages, plus de dix plages).
- (5) Différenciation : On indique les facteurs principaux à l'origine de la différenciation pédogénétique des UTS : lithologie, géomorphologie, hydrologie, évolution anthropique, etc.
- (6) Contiguïté : Pour chaque UTS, on fournit l'UTS la plus fréquemment présente comme unité immédiatement voisine (contour commun le plus long). Ceci permet de décrire par la suite la nature des relations entre UTS comme la transition.
- (7) Transition : On précise la nature de la transition entre les UTS voisines (graduelle, nette, très nette, etc.). Cette information indique qu'il sera plus ou moins difficile de différencier spatialement une UTS lors d'une prospection à plus grande échelle.

Ces variables sont actuellement en nombre limité et elles ne permettent certainement pas de transmettre toutes les connaissances acquises sur une UCS. Elles devraient progressivement augmenter en nombre de façon à permettre une description de l'espace lorsque le nombre d'informations ne suffit pas à décrire des limites géométriques précises.

c) Choix entre les différentes possibilités de description de la variabilité

Avec la méthode exposée précédemment, il est difficile de faire un choix entre :

(1) décrire de façon précise de nombreuses UTS qui sont regroupées en UCS complexes ;

(2) définir un petit nombre d'UTS correspondant à des UCS pures mais en donnant, pour chacune d'entre elles, des intervalles de variation très larges.

Cette double possibilité fournit une grande souplesse d'utilisation mais elle fait appel à une synthèse parfois complexe des données d'observation et d'analyses de laboratoire. La décision peut être prise selon la connaissance du type de variabilité. Si celle-ci est aléatoire (ce qui signifie une ignorance des lois de variation), il est préférable d'indiquer une seule UTS dans une UCS et de décrire la variabilité spatiale à l'aide des critères statistiques prévus : valeur modale, quantiles, forme de l'histogramme. Cette variabilité devra tout de même rester modérée pour la plupart des caractères. Sinon, il serait étonnant qu'une forte variabilité sur un grand nombre de caractères n'ait pas une cause déterministe facilement décelable. A l'inverse d'une variabilité dite "aléatoire", nous pouvons connaître des lois de répartition spatiale ou mettre en évidence des types de sols fortement différenciés ; dans ce cas, il est préférable d'utiliser la possibilité de décrire plusieurs UTS au sein de la même UCS et de décrire la variabilité spatiale à l'aide du langage symbolique proposé.

En résumé, la méthode proposée offre trois possibilités pour décrire la variabilité spatiale des sols : (1) On identifie clairement les UTS à la fois par leur contenu sémantique et par leur extension géographique ; la variabilité spatiale de la couverture pédologique est alors définie par la géométrie du système ; (2) Les UTS sont identifiables au sein du paysage mais elles possèdent une forte variabilité spatiale d'un nombre limité de leurs caractéristiques ; la variabilité est alors indiquée sous la forme de paramètres statistiques de distribution ; (3) Enfin, on ne connaît pas la géométrie des UTS, on les regroupe en ensembles plus larges et l'on décrit l'extension probable de ces unités et leurs relations spatiales à l'aide de codes symboliques.

4. Structure informatique

Les concepts "horizon", "UTS", "UCS" et polygones tels que définis ci-dessus, sont décrits au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG) sous la forme de tableaux alphanumériques (KING et DUVAL, 1990) (Fig. 1). Les lignes de chaque tableau correspondent à la liste des "objets" identifiés (par exemple, liste des UTS d'un territoire cartographié) et les colonnes correspondent aux variables descriptives de ces objets (par exemple, profondeur du sol, matériau parental, etc.). D'autres tableaux, dits relationnels, assurent la description de l'organisation spatiale de ces "objets". Par exemple, le tableau de relation UCS-UTS indique, pour chaque UCS, la liste des UTS présentes ; les colonnes de ce tableau correspondent aux variables de description symbolique de la variabilité intra-UCS (cf. paragraphe I.3b).

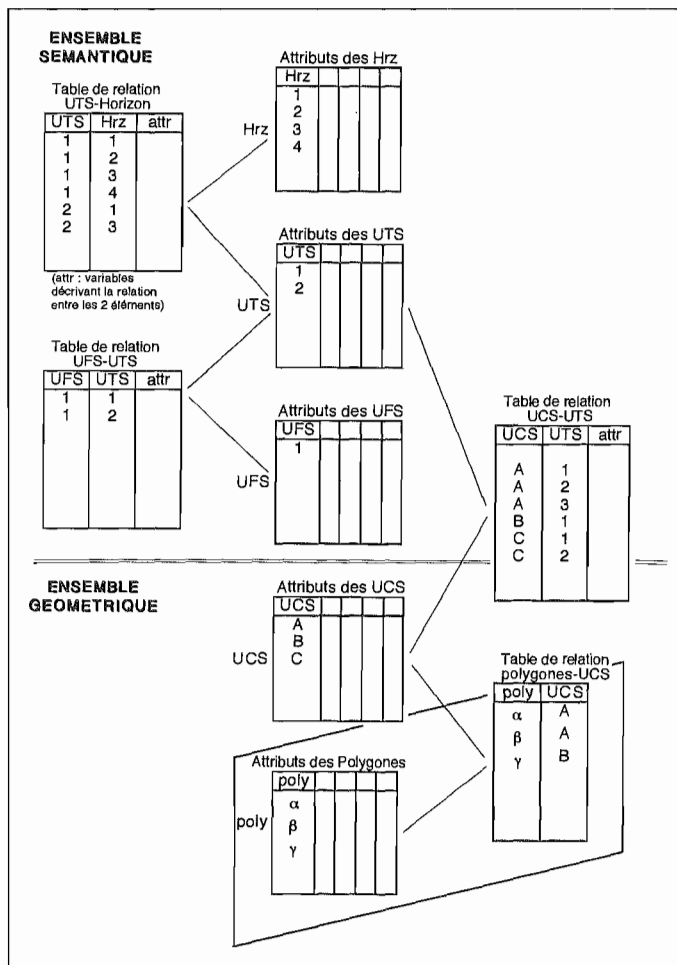


Figure 1 : Schéma de la structure relationnelle décrivant un Modèle d'Organisation Spatiale des Sols (MOS).

Scheme showing the relational structure of a Spatial Organization Model of Soils.

II - APPLICATION AUX PLATEAUX BOURGUIGNONS ET DISCUSSION

1. Présentation générale du milieu - Critères de délimitation des UCS

L'étude réalisée concerne les très grandes superficies de plateaux calcaires du nord de la Bourgogne. En Côte d'Or, deux types de paysage s'y différencient de part et d'autre du Seuil de Bourgogne qui constitue une voûte anticlinale dissymétrique d'orientation SO-NE entre Morvan et Vosges (RAT *et al.*, 1986 ; Fig. 2). Le flanc NO forme de larges plateaux inclinés doucement vers le centre de la cuvette parisienne ; seule la cuesta oxfordienne y crée un relief : la Côte du Châtillonnais. Au SE, les

plateaux calcaires se réduisent de plus en plus à des lanières encadrées d'escarpements de failles qui les dénivellent les uns par rapport aux autres, l'altitude diminuant rapidement vers le bassin de la Saône. Cet ensemble de plateaux, constitués par les terrains du Jurassique moyen et supérieur, est profondément entaillé vers le NO par le réseau hydrographique de la Seine et de ses affluents, et encore davantage au SE par trois rivières affluentes de la Saône.

La reconnaissance des principales Unités Typologiques de Sols a permis de mettre en évidence le rôle principal de la géomorphologie et de la lithologie sur le déterminisme pédogénétique à l'origine de la distribution des sols dans le paysage. Pour ces deux ensembles de critères, nous disposons d'informations géographiques détaillées permettant une délimitation des ensembles de sols. Dans certains cas, nous avons utilisé d'autres critères déterminants dans la répartition des sols tel leur mode d'occupation. Ces différents critères ont été hiérarchisés afin de suivre une démarche identique quelle que soit la zone prospectée.

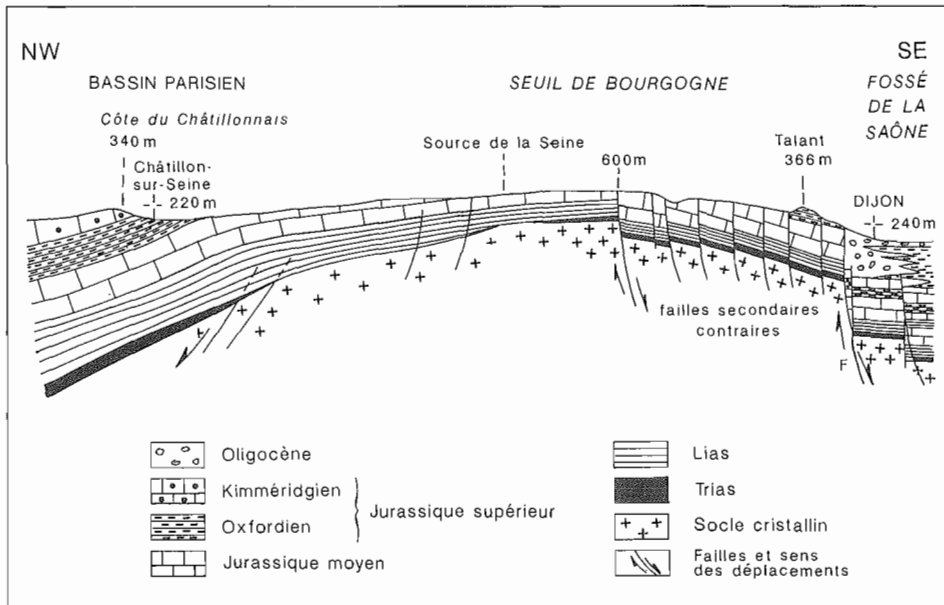


Figure 2 : Coupe géologique des plateaux calcaires de Côte d'Or (d'après P. Rat *et al.*, 1986).
Geological cross-section of the "plateaux calcaires de Côte d'Or" (after P. Rat et al., 1986).

- Dans un premier temps, c'est le critère "forme du relief" qui a conduit à distinguer deux grands ensembles d'Unités Cartographiques de Sols : il s'agit des UCS dites "de plateaux" et de celles dites "de vallée-versants".

- Dans un second temps, les caractéristiques lithologiques des roches calcaires (faciès, débit, dureté, résidu insoluble ...), dont l'incidence sur la typologie des sols développés à partir de leurs matériaux d'altération ou d'argiles de décalcification est primordiale, ont été privilégiées pour déterminer les principales UCS au sein de ces deux grands ensembles.

Sur les plateaux, les UCS correspondent à des associations de sols carbonatés et calciques, souvent superficiels ou peu profonds dont les propriétés (texture, structure, charge en cailloux et graviers, teneur en calcaire et en matière organique) peuvent être très variées. Il est en général possible de les rattacher aux principaux étages ou sous-étages du Jurassique moyen et supérieur, facilitant ainsi la délimitation des contours des UCS sur la base des limites indiquées sur les cartes géologiques à 1/50 000 (tableau I).

Tableau I : Principales unités cartographiques de sols (UCS) des plateaux.
Main mapping units of the soils (SMU) of the plateaus.

n° UCS	Étage géologique	Type de calcaires	Type de sols		Mode D'utilisation	Nbre d'UTS
			CPCS*	RP**		
1	Bajocien	calcaires durs en bancs et plaquettes	bruns calciques bruns calciques	RENDISOLS CALCISOLS	cultures "	2
2	Bathonien inférieur	calcaires durs en dalles et bancs épais (faciès "comblanchien")	Lithosols bruns modaux	LITHOSOLS RENDISOLS	forêt "	2
3	Bathonien moyen et supérieur	calcaires oolithiques en plaquettes	Rendzines bruns calcaires bruns modaux	RENDOSOLS CALCOSOLS RENDISOLS	cultures " forêt	3
4	Callovien	calcaires durs en plaquettes ou "laves"	bruns modaux bruns recarbonatés bruns calciques	RENDISOLS RENDOSOLS CALCISOLS	forêt cultures	3
5	Oxfordien	calcaires marneux et marnes (faciès "argovien")	Rendzines bruns calcaires bruns calciques	RENDOSOLS CALCOSOLS CALCISOLS	cultures " forêt	3
6	Kimmeridgien inférieur	calcaires durs en plaquettes épaisses	bruns modaux bruns recarbonatés	RENDISOLS RENDOSOLS	forêt cultures	2
7	Kimmeridgien moyen et supérieur	calcaires marneux ou en blocs disloqués	Rendzines bruns calciques bruns calciques	RENDOSOLS RENDISOLS CALCISOLS	cultures forêt "	3

* Classification CPCS - 1967

** Référentiel Pédologique (RP) 1992

En ce qui concerne les UCS des vallée-versants entaillant les plateaux, elles ont été également définies conjointement par les deux critères précités puisque leurs caractéristiques morphologiques (modelé, intensité et longueur des pentes) et celles des matériaux de la pédogenèse (nature et importance des affleurements rocheux, des éboulis et colluvions) résultent des effets de l'érosion sur les différents types de roches calcaires rencontrés. Ainsi ont été identifiées un certain nombre d'UCS dont l'extension latérale a été relativement facile à délimiter à partir des cartes topographiques et géologiques. Quant aux limites longitudinales, elles montrent un lien évident avec celles des UCS de plateaux. Il s'agit le plus souvent d'UCS complexes organisées en topolithoséquences de pente pouvant comporter jusqu'à 5 ou 6 types de sols différents caractérisant une couverture pédologique entièrement carbonatée ou calcique.

A ces critères principaux se sont ajoutés d'autres critères secondaires conduisant à l'individualisation de nouvelles UCS. Par exemple, dans les mêmes conditions morphologiques et lithologiques que les plateaux calcaires, 2 UCS contenant des UTS semblables ont été distinguées en fonction de l'altitude dont les écarts engendrent d'autres conditions de milieu. Ceci entraîne une proportion et une répartition différentes des UTS à l'intérieur de chacune d'elles : pour la première (UCS 4 décrite ci-après), plateau très boisé situé entre 450 et 550 m d'altitude sur le seuil de Bourgogne (dominante de l'UTS 41) et pour la seconde, zone de grande culture, peu boisée vers 250 m d'altitude dans le Châtillonnais (dominante de l'UTS 42). De même, le mode d'occupation du sol a conduit à distinguer, vers 400 m d'altitude dans les Hautes-Côtes, une troisième UCS plus diversifiée avec zones de bois, friches et cultures mais également vignes et vergers.

Les critères géomorphologiques et lithologiques retenus sont spécifiques de la région étudiée et ils ne peuvent prétendre à être universalisés. Cela dépend des facteurs prédominants de la mise en place des sols qui changent d'une région à l'autre. Sur les plateaux bourguignons, nous avons rencontré aussi quelques cas particuliers pour lesquels il a fallu faire appel en premier lieu à l'évolution pédogénétique bien que d'une façon générale, la délimitation des UCS soit rarement réalisée sur des critères provenant des caractéristiques propres au sol. Ce fut le cas par exemple pour deux UCS, l'une simple (1 UTS) de NEO-LUVISOLS sur matériau d'altération épais recouvrant les calcaires durs dans la "Vallée" du Châtillonnais, l'autre complexe (2 UTS) de RENDOSOLS et RENDOSOLS humifères forestiers très exceptionnels dans la région en position de plateau.

2. Présentation des UCS

Si la délimitation des UCS dépend principalement de critères non strictement pédologiques, il n'en est pas de même de la détermination des Unités Typologiques de Sols. Celles-ci ont été bâties principalement à partir de la prospection de terrain, sur la base de critères pédologiques classiques : texture, présence de carbonates, charge en éléments grossiers, profondeur, etc. Il est hors de question de décrire ici le contenu de l'ensemble des UCS identifiées sur les plateaux calcaires de Bourgogne. Nous en présenterons un seul exemple, dont nous détaillerons le contenu précis, dans le cadre du MOS, selon le système de bases de données DONESOL : il s'agit de l'UCS 4.

Elle occupe un plateau mollement ondulé, parcouru de petits vallons secs, profondément entaillé par les vallées du Suzon, de l'IGNON et de leurs combes affluentes. C'est un paysage ouvert associant de vastes surfaces cultivées (céréales et colza) autour des rares villages et de secteurs boisés situés souvent en périphérie et dominant les vallées profondes. Le substratum géologique est un calcaire dur grenu du Callovien, en plaquettes et très fissuré.

La couverture pédologique de l'UCS se présente comme une combinaison de trois types de sols (UTS) dont l'organisation est schématisée sur la figure 3 :

UTS 41 : RENDISOLS forestiers, superficiels (10 à 30 cm), argilo-limoneux à argileux, eutrophes à mésotrophes, non calcaires et non caillouteux.

UTS 42 : RENDOSOLS cultivés, peu profonds (15 à 40 cm), argilo-limoneux à argileux, peu à moyennement calcaires, à forte charge fréquente en cailloux et graviers.

UTS 43 : CALCISOLS forestiers ou cultivés, profonds (60 cm à 1 m), argilo-limoneux à argileux, non ou peu calcaires, en général peu caillouteux, sains, des vallons secs.

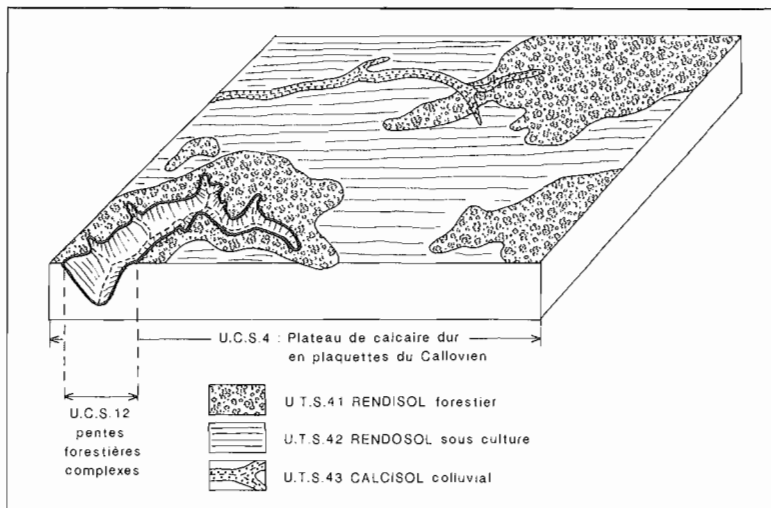


Figure 3 : Schéma d'organisation de l'UCS 4 : Plateau de calcaire dur en plaquettes du Callovien.

Sketchmap of the UCS 4 organization. Complex of soils developed on callovian tabular flaggy limestone

a) Description de l'UCS 4

Numéro : 4 - Surface : 25 000 ha - Nom : Plateaux sur calcaire dur callovien - Nombre d'UTS : 3 - Mode de répartition des UTS dans l'UCS : combinaison, (la nature des liaisons entre UTS est connue par exemple, couvert végétal entre les UTS 41 et 42, topographie entre les UTS 42 et 43) - Nombre de profils décrits : 6 dont 3 modaux - Relief général : plateaux et hautes-terres (pente estimée à chaque sondage comprise entre 0 et 6 %) - Domaine morphologique : karstique - Paysage parcellaire : ouvert (openfield) - Type de surface : ondulations - Altitude mini : 453 m, maxi : 576 m.

Cette description permet une présentation générale de l'UCS relativement précise sur le plan sémantique ; toutefois le vocabulaire descriptif est parfois insuffisant ou mal adapté ; par exemple, le paysage n'est traité que sur le plan du parcellaire agricole (openfield dans le cas présent) alors qu'il comprend également d'importantes surfaces forestières. Par ailleurs, le problème de la nature et de la précision des limites d'UCS est ici totalement occulté. Sur le plan géographique, il est résolu de façon indépendante lors du tracé des contours sur des bases lithologique (changement de faciès avec l'UCS 2 et l'UCS 5) ou structurale (faille avec l'UCS 1) ou encore topographique avec l'UCS 12 (Fig. 3). En revanche, au niveau sémantique, aucune possibilité de description de ces limites n'existe alors qu'on pourrait par exemple les qualifier d'abrupte avec l'UCS 1, de distincte avec l'UCS 12, ou de progressive avec les UCS 2 et 5 en précisant les fourchettes de longueur affectées à chacune d'entre elles.

b) Organisation des UTS dans l'UCS

A l'intérieur de l'UCS 4, nous ne décrivons en détail à titre d'exemple, que les caractéristiques de l'UTS 42 ainsi que des rapports avec les deux autres UTS 41 et 43 :

Numéro UCS : 4 - Numéro UTS : 42 - Pourcentage estimé par rapport à la superficie de l'UTS dans l'UCS : 50 % - Echelle d'individualisation : hectométrique (variabilité pouvant affecter des parcelles lorsque celles-ci sont grandes ; c'est le cas ici, où les parcelles font plusieurs hectares - Mode de répartition : englobante, sans forme particulière ; par exemple, l'UTS 42 peut entourer partiellement ou totalement l'UTS 41 - Localisation : répartition générale sur toute l'UCS - Répétitivité : quelques plages (1 à 10) en raison du caractère englobant de l'UTS dans l'UCS.

De façon plus précise, trois critères décrivent les relations de contact entre l'UTS et ses voisines avec un rapport de priorité :

- *Contiguïté : numéro de la première UTS la plus fréquemment présente en bordure de l'UTS décrite : 41 - numéro de la seconde UTS la plus fréquemment présente ... : 43.*
- *Transition : très nette avec l'UTS 41, peu nette avec l'UTS 43.*
- *Facteurs responsables de la différenciation des UTS : variation du couvert végétal avec l'UTS 41, variation géomorphologique avec l'UTS 43.*

A ce propos, il convient de noter que les relations entre UTS ne peuvent être décrites qu'au sein d'une UCS. Pourtant, il peut être intéressant parfois de donner des informations sur les types de transition entre des UTS appartenant à plusieurs UCS. Par exemple, l'UTS 41 est très souvent en contact avec l'UTS 121 (appartenant à l'UCS 12) au niveau de la rupture de pente entre plateau et vallée-versant. L'UTS 42 peut l'être aussi mais beaucoup plus rarement, tandis que l'UTS 43 est prolongée à son extrémité aval par l'UTS 125 de fond de combe. La transition se présente alors sous forme d'un abrupt rocheux dénommé "bout du monde". Ainsi, apparaissent des regroupements d'UTS liées entre elles sous forme d'Unité de Fonctionnement de Sols (UFS), indépendamment de leur appartenance à des UCS différentes (KING et JAMAGNE, 1993).

Dans le schéma proposé sur la figure 1, l'UFS correspond à un tableau similaire à celui de l'UCS, relié aux UTS par un tableau relationnel décrivant l'arrangement des UTS au sein de l'UFS. L'UFS appartient alors à l'ensemble sémantique puisqu'elle n'est pas nécessairement associée à une description géométrique de son étendue.

c) Description de l'UTS 42

L'UTS 42 décrite ci-après a été choisie car elle est la mieux représentée, la plus intéressante au niveau de l'analyse des variables pédologiques et agronomiques et la plus importante sur le plan de la mise en valeur.

Données générales

Numéro de l'UTS : 42 - Nom : "petites terres à cailloux" - Désignation pédologique, CPCS : Rendzine pauvre en calcaire fin, FAO : LEPTOSOL RENDZIQUE, RP : RENDOSOL caillouteux, cultivé - Etage géologique : Callovien (J3) - Organisation géologique du profil : monolithique - Type de matériau : roche sédimentaire cohérente calcaire - Nom : calcaire en plaquettes - Profondeur

*d'apparition : 20 cm - Pente minimale de l'unité : 0 %, moyenne : 2 %, maximale : 7 %
 - Etage phytosociologique : collinéen - Forme morphologique : aplanissement karstique - Description de la surface : très forte pierrosité - Type d'aménagement : modification des caractères physiques du sol (broyage des cailloux) - Contraintes principales rencontrées : défaut de profondeur, pierrosité - Occupation principale du sol : champs - Utilisation : cultures annuelles.*

Caractéristiques de l'UTS

*Régime hydrique : sec de manière saisonnière - jamais submergé - sans excès d'eau
 - Type dominant d'éléments grossiers : cailloux - Nature des éléments grossiers : carbonatés - Type de discontinuité : roche disloquée - Profondeur d'apparition : 20 cm
 - Conséquence : obstacle important au travail du sol - Organisation des strates : une strate continue (horizon labouré).*

Les variables quantitatives sont par ordre d'importance : la pierrosité, le taux de CaCO_3 , d'argile et de matière organique, et les variables qualitatives : l'intensité de l'effervescence, la dimension des éléments grossiers et la structure.

Cette description relativement complète a l'avantage de bien situer globalement l'UTS dans son environnement géologique et écologique ainsi que de préciser ses principales caractéristiques et constantes vis-à-vis d'une utilisation agricole, forestière ou de génie civil. Il s'y ajoutera des données supplémentaires, notamment quantitatives avec la description des strates.

d) Description des strates

Une strate correspond soit à un horizon unique soit à un ensemble d'horizons successifs. Dans l'exemple choisi, l'UTS 42 ne comprend qu'une seule strate numérotée 421 correspondant à un horizon Ap.

La description comporte :

- des variables quantitatives : *pierrosité, taux d'argile, de limon, de matière organique, de CaCO_3 , pH, capacité d'échange cationique... où sont exprimées des valeurs minimale, modale et maximale ainsi que le type de fonction.*

L'apport de ces variables quantitatives pose un problème de fond. Ne doit-on utiliser que des données obtenues à partir de profils analysés ? Dans ce cas, ceux-ci doivent être relativement nombreux pour que les fourchettes aient un sens. Ou bien peut-on y introduire des données acquises à partir des sondages, beaucoup plus nombreux, et qu'il est possible de traiter statistiquement après regroupement en classes ? C'est cette approche que nous présenterons et discuterons au paragraphe 3.

- des variables qualitatives : *couleur, porosité, structure où sont exprimés des modes, principal, minimal et maximal ainsi que le type de fonction.*

- quelques données sur les caractéristiques volumique et spatiale de la strate décrivant la géométrie (tridimensionnelle) des horizons au sein d'une UTS : *Profondeur d'apparition : en surface (0 cm) - Epaisseur : mini. = 15 cm, moyenne = 20 cm, maxi. = 40 cm - Forme : volume continu constituant une couche quasi plane d'épaisseur variable - Orientation générale : parallèle à la surface du sol - Terminaison latérale : en relais.*

3. Analyse de la variabilité intra-unités

Sur chacun des sondages effectués lors de la prospection de terrain, différentes variables ont été appréciées : pente, occupation du sol, profondeur, couleur, texture, teneur en calcaire, charge en cailloux, faciès de la roche, ... Ce sont pour la plupart des variables qualitatives ordonnées qui ont été regroupées en quatre ou cinq classes pour faciliter l'appréciation de terrain, puis traduites sous forme quantitative dans le format DONESOL.

Lorsque les sondages caractérisant une UCS ou une UTS sont suffisamment nombreux, supérieurs à 30, un traitement statistique peut être appliqué aux principales variables décrites, (moyenne, histogramme de variation ...) en choisissant, par exemple, deux horizons : un horizon de surface (horizon de culture) et un horizon de profondeur. Dans le cas où les sols sont superficiels (10 à 30 cm), un seul horizon est analysé. Il faut toutefois signaler que les sondages effectués lors de la prospection pédologique ne constituent pas, en toute rigueur, une population choisie au hasard. D'autre part, leur nombre relatif ne reflète que de façon très approximative la proportion des UTS dans l'UCS.

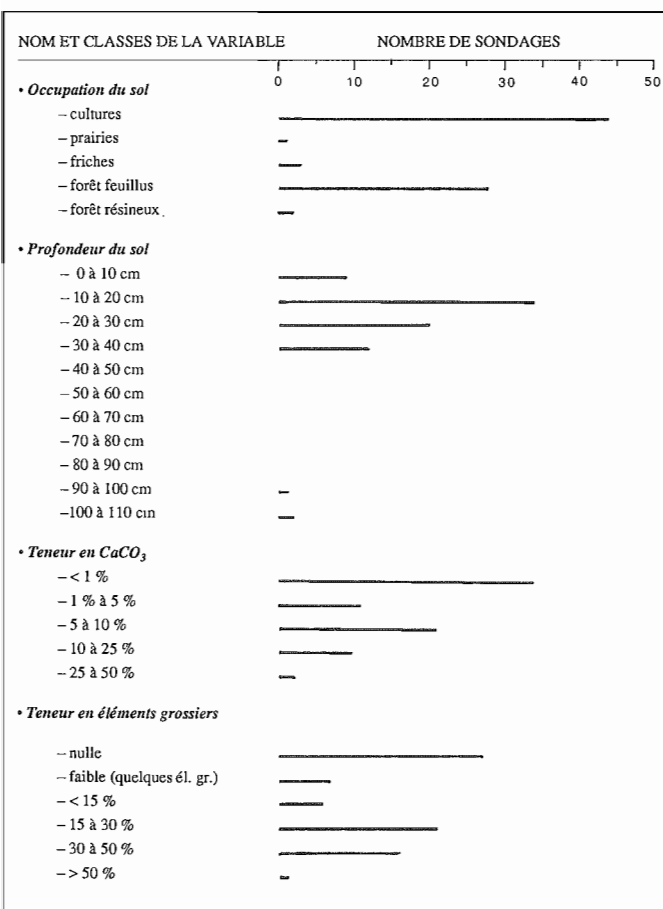


Tableau II :

Histogrammes de quelques variables qualitatives de l'UCS 4 établis à partir d'observations de sondages.

Histograms of some qualitative variables describing the SMU 4, calculated from auger-boring descriptions.

a) Application à l'UCS 4

Sur le territoire occupé par l'UCS 4, 78 sondages ont été effectués, répartis selon les critères habituels de choix utilisés en prospection pédologique. Ils ont été regroupés en fonction de leur appartenance à l'une des 3 UTS retenues :

- sols forestiers des plateaux (UTS 41) :	30
- sols cultivés des plateaux (UTS 42) :	43
- sols des vallons (UTS 43) :	5

Des traitements statistiques simples ont été effectués sur 10 variables. Les résultats les plus significatifs figurent au tableau II sous forme d'histogrammes de fréquence pour 4 de ces variables, occupation du sol, profondeur, teneur en calcaire total et charge en éléments grossiers (cailloux et graviers). En s'appuyant également sur l'analyse du tableau de contingence de croisement des données (tableau de Burt), il est possible de dégager les principaux points suivants :

- Occupation du sol : 30 sondages ont été réalisés sous forêt dont 28 sous forêt feuillue largement dominante. Ils s'intègrent en totalité dans l'UTS 41. Aucun ne se situe dans un vallon forestier (UTS 43). 48 correspondent à une occupation agricole, essentiellement de cultures céréalières. Ils appartiennent à la fois aux UTS 42 et 43.

- Profondeur : la quasi totalité des sols de l'UCS, forestiers ou cultivés, ont moins de 40 cm de profondeur avec un mode net entre 10 et 30 cm. Seuls 3 sols sont profonds. Ils appartiennent à l'UTS 43. Tous les sols forestiers (UTS 41) sont inférieurs à 30 cm et 9 sont très superficiels (inférieurs à 10 cm).

- Calcaire : 45 sondages sont non calcaires ou contiennent seulement des traces. Ils correspondent à l'ensemble des sols forestiers mais également à 16 sols de culture. Les 33 sols calcaires, tous cultivés, le sont modérément (5 à 25 % de Ca CO₃).

- Charge en éléments grossiers : 34 sondages sont non ou très peu caillouteux, ils correspondent à tous les sols forestiers, plus quelques sols cultivés profonds (UTS 43). 44 sont caillouteux ou très caillouteux calcaires. Ce sont des sols de culture.

Globalement, il apparaît que l'analyse groupée de ces 4 variables appréciées sur le terrain, même si elles ne sont pas totalement discriminantes, permet de conforter logiquement le choix des 3 UTS et de préciser leurs caractéristiques principales. Celles-ci pourront être à leur tour analysées spécifiquement comme, par exemple, ci-après pour l'UTS 42.

b) Application à l'UTS 42

Cette UTS de sols de culture est caractérisée par 43 sondages. Les résultats des traitements statistiques sont présentés dans le tableau III pour les 4 variables les plus intéressantes qui sont comme précédemment : la profondeur du sol, la teneur en calcaire total, la charge en éléments grossiers mais également la texture.

- Profondeur du sol : elle est comprise entre 10 et 40 cm avec une nette dominante inférieure à 30 cm (profondeur du labour limitée par l'apparition de la roche en place ou disloquée).

- Texture : elle est assez constante, à dominante argilo-limoneuse ("argile de décalcification" du calcaire callovien). Il est assez difficile d'en apprécier les nuances avec précision.

- Calcaire : large gamme de teneurs en calcaire depuis l'absence ou traces (13 sondages) jusqu'à des teneurs assez élevées mais qui restent modérées (25 % de CaCO₃ environ). La dominante (19 sondages) caractérise plutôt des sols peu calcaires (5 à 10 % de CaCO₃).

- Charge en éléments grossiers : tous les sols, à une exception près, contiennent des cailloux et graviers, avec une charge très variable, depuis quelques-uns jusqu'à de fortes charges (32 sondages entre 15 et 50 %).

Remarque : les teneurs en calcaire et la charge en éléments grossiers ont été fréquemment modifiées au niveau parcellaire par la pratique du broyage de cailloux très répandue dans la région sur ces types de sols depuis 1975.

Ces résultats d'analyse de la variabilité intra-unité constituent le préalable indispensable à la description des caractéristiques des UTS, en particulier en ce qui concerne les strates. Dans l'exemple traité (UTS 42), pour la strate 421 (strate A - 38 sondages sur 43 ont été décrits avec une seule strate), ces données sont traduites sur la fiche de la façon suivante :

	Min.	Mod.	Max.	Fonction
<i>argile (%)</i>	25	35	50	<i>modale pointue</i>
<i>calcaire (%)</i>	0	5-10	30	<i>modale</i>
<i>pierrosité (%)</i>	1	15-30	50	<i>dissymétrique droite</i>

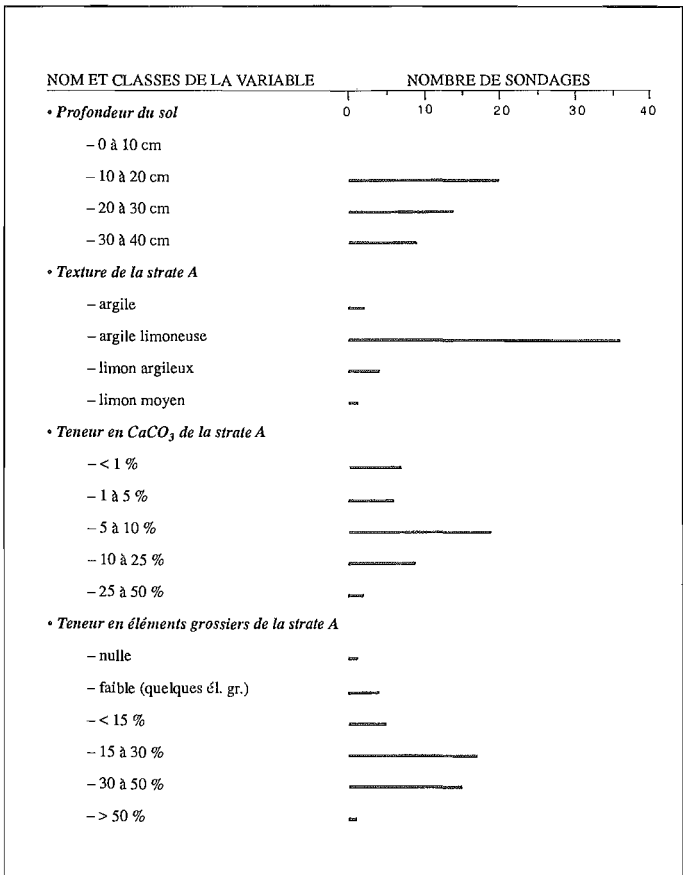


Tableau III :
 Histogrammes de quelques variables qualitatives de l'UTS 42, établis à partir d'observations de sondages.
Histograms of some qualitative variables describing the STU 42, calculated from a u g e r - b o r i n g descriptions.

De l'ensemble de ces constatations (paragraphe 3a et 3b), il ressort nettement que la variabilité des trois principaux caractères retenus (profondeur du sol, teneur en calcaire total et charge en éléments grossiers) est plus faible pour l'UTS 42 (variabilité intra UTS) que pour l'ensemble de l'UCS 4 (variabilité intra UCS). Il existe donc à l'intérieur de l'UCS 4 une entité UTS 42 qu'il est possible de distinguer et de caractériser typologiquement. Ce même type de conclusion pourrait s'appliquer aux deux autres UTS 41 et 43. Ainsi ce constat qui n'était qu'intuitif *a priori* justifie à notre avis le choix de ces 3 UTS pour décrire au mieux l'organisation des sols de l'UCS 4.

CONCLUSION

La carte pédologique a longtemps été le seul moyen de mémoriser et de transmettre l'information géographique. Les contraintes d'expression graphique représentaient alors un cadre pour les cartographes et des normes ont pu être ainsi proposées pour rendre aisée la lecture des cartes. L'utilisation des nouvelles méthodes informatiques modifie ces approches conventionnelles. Il est désormais possible de gérer et de restituer plus facilement et plus rapidement de grandes quantités de données spatiales.

Au travers de l'étude géographique des sols d'une région, nous avons testé une nouvelle approche en utilisant la notion de Modèle d'Organisation Spatiale des Sols (MOS). Dans cet exemple, la distinction entre la description géométrique et sémantique des unités de sols est utilisée. La détermination des différents types de sols (UTS) est faite sur la base de leurs caractères propres, et leur regroupement en vue d'une représentation graphique à l'échelle du 1/250 000 (UCS) est proposé selon les critères principaux de pédogenèse régionale que sont la lithologie et la géomorphologie. A une autre échelle ou dans une optique différente comme, par exemple, celle liée à la notion d'Unité de Fonctionnement de Sols (UFS), d'autres types de regroupement pourraient être proposés.

Sur une carte conventionnelle, les contours pédologiques sont le seul moyen de transmettre l'organisation spatiale des sols d'une région. A l'aide du MOS, on propose un langage codifié qui permet de transmettre nos connaissances sur la distribution des sols dans le paysage et sur les relations spatiales entre unités de sols même lorsque l'on ne connaît pas avec précision les limites pédologiques. L'exemple traité montre que les bases de données ne doivent pas limiter leur apport à un meilleur travail de gestion de données conventionnelles mais que leur structure doit être conçue pour répondre aux problèmes posés.

La méthode a été testée sur un cas particulier mais elle peut être généralisée. En effet, elle se situe en aval du travail d'analyse, quels que soient les moyens utilisés pour effectuer celui-ci. Toutefois, de nombreux progrès restent encore à réaliser pour mieux expliciter les lois à l'origine des organisations spatiales reconnues. Cela nécessiterait un affinement des analyses spatiales. On peut espérer que les approches numériques utilisant les données systématiques sur le paysage (données satellitaires, modèles numériques de terrain) permettront d'avancer dans ce sens.

Reçu pour publication : Août 1992

Accepté pour publication : Novembre 1993

BIBLIOGRAPHIE

- AFES, 1992. - *Référentiel Pédologique 1992*. INRA Paris, 222 p.
- ALEXANDER B.E., 1983. - Comment on "The relationship between soil taxonomy and soil mapping". *Soil Survey Horizons*, **24**, 1, 15-16.
- ARROUAYS D., 1989. - Commentaires méthodologiques sur l'élaboration de cartes des paysages pédologiques à 1/250 000. Exemple du Loiret. *Science du Sol*, **27**, 1, 13-16.
- ARROUAYS D., et HARDY R., 1993. - Le programme Inventaire Gestion et Conservation des Sols. Application dans la région landaise. *Revue Purpan*, **166**, 5-14.
- BAIZE D., 1989. - *Typologie des sols de l'Yonne. Plateaux de Bourgogne*. INRA, Paris. 148 p.
- BATJES N.H., 1990. - *Macro-scale land evaluation using the 1:1 M world soils and terrain digital database*. Working Paper and Preprint 90/0. ISRIC, Wageningen, 35 p.
- BERTRAND R., FALIPOU P., LEGROS J.P., 1984. - *Notice pour l'entrée des descriptions et analyses des sols en banque de données*. Doc. ACCT, Paris 136 p.
- BORNAND M. et ROBBEZ-MASSON J.M., 1990. - Zonage régional des sols : une approche cartographique par systèmes emboîtés. *2èmes Journées Nationales de l'Etude du Sol*, AFES. Orléans, 19-21/11/90.
- BOULAIN J., 1978. - Les unités cartographiques en pédologie. Analyse de la notion de Génon. *Science du Sol*, **1**, 15-30.
- BOULAIN J., 1980. - *Pédologie appliquée*. Masson, Paris (Coll. "Sciences agronomiques"), 220 p.
- BOULET R., HUMBEL F.X., LUCAS Y., 1982. - Analyse structurale et cartographie en Pédologie. *Cah. ORSTOM, sér. pédol.*, vol XIX (4), 309-321.
- 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.
- CHRETIEN J., MEUNIER D., ROQUE J. et BAIZE D., 1990. - Esquisse agro-pédologique régionale à 1/250 000. Quelques essais méthodologiques en Bourgogne et Ile de France. *2èmes Journées Nationales de l'Etude du Sol*, AFES, Orléans, 19-21/11/90.
- CPCS, 1967. - *Classification des sols - Travaux 1963-1967*. Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols. 87 p.
- CRUICKSHAND J.G., 1972. - *Soil Geography*. Davis & Charles, Newton Abbott, 225 p.
- DAROUSSIN, 1992. - Kaleidos. In : *Gestion de l'espace rural et Système d'Information Géographique*. Buche P., King D., Lardon S. (eds), INRA, 309-320.
- FAO, 1975. - *Soil Map of the world at 1:5 000 000*. Volume I. Legend. Unesco, Paris, 42 p.
- FAO, 1981. - *Soil Map of the world at 1:5 000 000*. Volume V. Europe. Unesco, Paris, 201 p.
- FRIDLAND V.M., 1976. - Levels of organisation of the soil mantle and regularities of soil geography. In : *Biogeography and soil geography*. 23rd Int. Geogr. Conference, Moscow.
- GAULTIER J.P., 1990. - Un modèle d'organisation des données pédologiques : la base de données DONESOL. *2èmes Journées Nationales de l'Etude du Sol*. AFES. Orléans, 19-21/11/90.
- GAULTIER J.P., LEGROS J.P., BORNAND M., KING D., FAVROT J.C., HARDY R., 1993. - L'organisation et la gestion des données pédologiques spatialisées : le projet DONESOL. *Revue de Géomatique*, **3**, 3, 235-253.
- GIRARD M.C., 1983. - *Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique. Application à une région des plateaux jurassiques de Bourgogne*. Thèse, INA-PG, SOLS n° 12, Grignon, 430 p.

- GIRARD M.C., AUROUSSEAU P., KING D., et 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.
- HARDY R., GIRARD M.C., 1992. - IGCS. *Cahier des clauses techniques générales (CCTG) pour la réalisation des Référentiels Régionaux Pédologiques (1/250 000)*. Ministère de l'Agriculture (DERF) et INRA, 12 p.
- HEWITT A.E., 1993. - Predictive modelling in soil survey. *Soils and Fertilizers*, **56** (3), 305-314.
- HUGGETT R.J., 1975. - Soil landscape system : a model of soil genesis. *Geoderma*, **1**, 1-22.
- INRA, 1982. - *DUCS, Proposition pour une description des Unités Cartographiques*. Doc. Poly. INRA-SESCPF, 39 p.
- INRA, 1992. - *Projet DONESOL. Conception fonctionnelle détaillée*, annexes 1 et 2. INRA Versailles, 71 p.
- JAMAGNE M., BORNAND M., HARDY R., 1989. - La cartographie des sols en France à moyenne échelle. Programmes en cours et évolution des démarches. *Science du Sol*, **27**, 4, 301-318.
- JAMAGNE M., KING D., GIRARD M.C., HARDY R., 1993. - Quelques conceptions actuelles sur l'analyse spatiale en pédologie. *Science du Sol*, **31**,3, 141-169.
- KING D., 1984. - Analyse de quelques concepts en cartographie des sols basée sur une automatisation des cartes thématiques dérivées. *Agronomie*, **4**, 5, 461-472.
- KING D. et DAROUSSIN J., 1990. - La notion de Modèle d'Organisation Spatiale en Science du Sol. Application à la carte des Sols des Communautés Européennes à l'échelle du 1/1 000 000. *Colloque CARTAO 90*. 9-11/10/90, Paris, 14 p.
- KING D., et DUVAL O., 1990. - *Description des unités cartographiques de sol. Concepts et glossaire*. Doc poly. INRA-SESCPF, Orléans, 30 p.
- KING D., DAROUSSIN J., TAVERNIER R., 1994. - Development of a soil geographic database from the soil map of the European Communities. *Catena*, **21**, sous presse.
- KING D., JAMAGNE M., 1993. - The notion of soil spatial organization model and functioning unit in the analysis of the soil cover. In : "Soil cover structure". ISSS, SSC Moscou, 6-11/09/1993, 113-116.
- LEGROS J.P., 1978. - Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique. *Ann. Agron.*, **29** (4), 499-519.
- LEGROS J.P., 1990. - AFNOR-ISO, Document n° 2, version 4, 92 p.
- 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., LANGOM R., and LOPULSA C., 1987. - Testing and improvement of a questionnaire to users of soils maps. *Soil survey and land evaluation*, **7**, 33-42.
- RAT P. et coll., 1986. - *Bourgogne-Morvan*. Collection "Guides Géologiques Régionaux". Masson, 2^{ème} édition, 215 p.
- ROQUE J., HARDY R., 1993. - *Référentiel Régional Pédologique d'Ile de France à 1/250 000*. Publication INRA-SESCPF (à paraître).
- SCHELLING J., 1970. - Soil genesis, soil classification and soil survey. *Geoderma*, **4**, 165-193.
- SIMONSON R.W., 1971. - Soil association maps and proposed nomenclature. Proceedings, Soil Science Society of America, **35**, 959-965.
- VALENTINE K.W.G., NAUGHTON W.C. and NAVAIM, 1981. - A questionnaire to users of soil maps in British Columbia. *Can. J. Soil Sci.*, **61**, 123-135.
- WALTER C., 1990. - *Estimation de propriétés du sol et quantification de leur variabilité à moyenne échelle : cartographie pédologique et géostatistique sur un secteur du sud de l'Ille et Vilaine*. Thèse Univ. Paris VI, 168 p.

