

Apport de l'informatique à l'analyse spatiale de la couverture pédologique et à l'exploitation des cartes

M.-C. GIRARD⁽¹⁾
P. AUROUSSEAU⁽²⁾
D. KING⁽³⁾
J.-P. LEGROS⁽⁴⁾

RESUME

Cet article constitue une réflexion de quatre chercheurs français. L'utilisation de l'informatique pour l'élaboration des cartes a entraîné un réexamen des différents concepts sous-jacents à la cartographie. En conséquence, on précise ici différentes définitions relatives à la cartographie et à la cartogénèse. Les apports de l'informatique à l'analyse spatiale sont précisés en ce qui concerne les acquisitions des données, leur gestion, leur synthèse par voie statistique, le contrôle des impuretés. Enfin, l'exploitation de l'information cartographique : cartes mono ou plurifactorielles et cartes thématiques, est facilitée grâce aux Systèmes d'Information Géographique. Ceux-ci permettent la prise en compte du facteur temps et la réalisation d'études de scénarios.

MOTS CLES : Cartographie - Cartogénèse - Sols - Informatique.

AUTOMATIC DATA PROCESSING USE FOR SPATIAL ANALYSIS OF PEDOLOGICAL MANTLE AND MAPPING

This paper results from four french scientists reflexion. Automatic data processing use for map elaboration induced a complete reexamination of mapping concepts. As a consequence various definitions concerning mapping (cartography) and mapping elaboration (cartogenesis) were precised. Automatic data processing contribution to spatial analysis were precised especially on data collection, handling, and synthesis through statistical analysis, error control. At last mapping interpretation : mono or multifactors maps, thematics maps is facilitated through Geographical Information Systems. These enable to take time into account and simulate different scenarii.

KEY WORDS : Cartography - Cartogenesis - Soils - Automatic data processing.

INTRODUCTION

La couverture pédologique a comme caractéristique principale d'être continue et variable. Le pédologue cartographe a pour objectif de comprendre l'organisation spatiale de cette couverture et de transmettre cette compréhension à d'autres personnes sous forme d'une carte. A travers une approche globale, il doit saisir, gérer, interpréter, synthétiser et transmettre un flot très grand d'informations.

(1) INAPG Science du Sol et Hydrologie, 78850 Grignon.

(2) ENSA Science du Sol, 65, route de Saint-Brieuc, 35042 Rennes Cédex.

(3) INRA SESCPF, Ardon, 45160 Olivet.

(4) INRA Science du Sol, Place Viala, 34060 Montpellier Cédex.

L'informatique dont l'un des rôles principaux est d'accélérer la manipulation des informations semble donc a priori un outil précieux pour la cartographie. Mais, une analyse des concepts et une décomposition rigoureuse des problèmes en différentes étapes sont des préalables nécessaires à l'utilisation de méthodes numériques.

Pour rendre compte des progrès réalisés au moyen de l'ordinateur, nous allons d'abord faire quelques rappels concernant l'analyse spatiale de la couverture pédologique et sa traduction graphique. Ensuite, nous montrerons ce que l'informatique a apporté, de l'amont à l'aval, c'est-à-dire dans le domaine de l'analyse spatiale, dans celui de l'élaboration cartographique et dans le domaine de l'exploitation des cartes.

I. ANALYSE D'UNE CARTE

A) LES ÉTAPES DE LA CARTOGRAPHIE

Une carte des sols est conventionnellement représentée sous la forme de plages cartographiques délimitant des zones, en principe, homogènes. Une telle carte ne se limite pas à la description d'une distribution d'horizons, de profils ou de caractères pédologiques dans l'espace géographique selon les 2 axes longitude-latitude. Elle est accompagnée d'une notice précisant les relations entre ces objets et explicitant les fonctionnements actuels et anciens de la couverture pédologique.

L'objectif premier du pédologue cartographe est de comprendre l'organisation spatiale de la couverture pédologique qu'il étudie. Il procède à la saisie, à l'analyse chorologique, à la modélisation, à la transmission de l'information. A chacune de ces étapes, il peut produire un report géographique d'informations plus ou moins élaborées.

1) L'observation de la couverture pédologique en profondeur constitue la première étape. Elle est le plus souvent localisée en des sites représentant un échantillonnage infiniment petit vis-à-vis des volumes étudiés. Les sols observés et les horizons qui les composent sont d'abord analysés d'un point de vue strictement statistique, liaisons entre variables, proximité géographique...). A

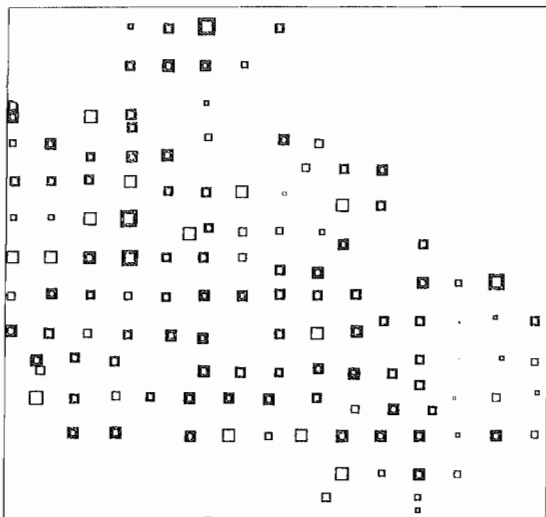


Figure 1 :

Projection des valeurs d'une variable pour chaque point d'un plan d'échantillonnage. Dans cet exemple, la taille et l'intensité du figuré fournissent le degré de ressemblance de chaque sondage avec un profil-type de référence.

Projection of variable values for each point of sampling set. For this example, the size and intensity of the symbol is in relation with the similarity degree of each sampling to a type profile of reference.

cette étape, les résultats se présentent sous la forme de plans d'échantillonnages (figure 1) ou de courbes d'isoprobabilité de présence d'un caractère ou d'un type d'horizon (figure 2).

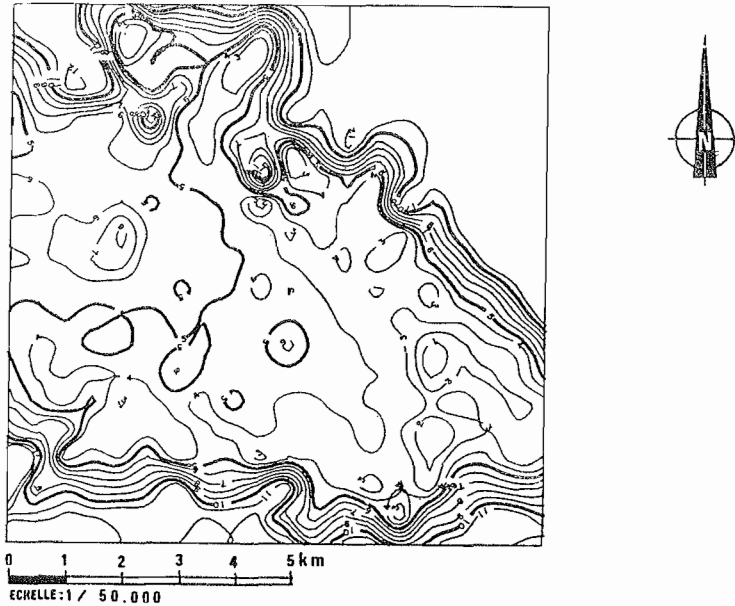


Figure 2 : Courbes d'isoprobabilité de la présence d'un horizon. Dans cet exemple, les nombres représentés sur les courbes expriment le degré de ressemblance de l'horizon du sondage à un horizon type de référence.

Curves of isoprobability of horizon's presence.

In this example, the figures on the curves give the similarity degree of sampling horizon to a type horizon of reference.

2) La deuxième étape est constituée par la chorologie qui est l'analyse spatiale des liens qui existent entre les caractères intrinsèques des sols et leur distribution dans le paysage à 3 dimensions (facteurs extrinsèques) (GIRARD, 1983). A ce titre la chorologie est un instrument d'extrapolation.

3) La troisième étape correspond à la construction du modèle d'organisation spatiale de la couverture pédologique. Pour cela, on réalise la synthèse de toutes les informations recueillies en introduisant également des connaissances pédologiques générales non nécessairement spécifiques de la région étudiée. Ce modèle d'organisation est décrit sous la forme de croquis, coupes, blocs diagrammes, notes explicatives. La carte telle qu'elle est publiée est l'une des formes d'expression de ce modèle. La chorologie et la modélisation constituent la cartogénèse.

4) La transmission de l'information constitue la dernière étape. Elle débouche sur la production de cartes synthétiques ou spécifiques d'un problème. Le mode d'expression cartographique choisi ne doit pas être confondu avec les méthodes utilisées pour la construction de la carte c'est-à-dire avec la cartogénèse.

B) CHOIX DE L'ENTITÉ REPRÉSENTÉE

Classiquement, l'objet délimité graphiquement par le contour d'une plage cartographique est représenté par un solum (RPF, 1988). Pour s'y référer par le langage, il lui est affecté un nom de classification pédologique, régionale ou universelle.

Cette façon de procéder, tout en ayant démontré son caractère opérationnel, présente au moins deux inconvénients. D'une part, elle rend obligatoire une certaine simplification de la réalité pédologique, ce qui peut altérer la précision de la carte ou même rendre impossible la compréhension de la genèse et du fonctionnement du système. D'autre part, cette représentation gomme un peu la notion d'horizon alors même que celui-ci représente à lui seul une entité structurale et de fonctionnement, et qu'il est un objet beaucoup plus facile à manipuler que le solum au plan informatique.

Une autre méthode considère les différents horizons rencontrés comme indépendants (même s'ils s'associent souvent en séquences verticales (GIRARD, 1983 ; FITZPATRICK, 1986 ; QUIDEAU, 1980 ; VALS *et al.*, 1979). Cela revient à dire qu'on modélise au niveau de l'information cartographique interne à l'ordinateur, une structure en trois dimensions. Les outils graphiques dont on dispose maintenant permettent de gérer assez bien la complexité qui résulte de cette attitude. En particulier on peut dériver facilement deux types de représentations planes :

— en projetant sur un plan vertical : on détermine une coupe (ou transect pédologique). Pour assurer une bonne lisibilité, les échelles verticales (indiquant les altitudes et les profondeurs) doivent être très différentes entre elles, et également sans rapport avec l'échelle utilisée dans le sens latéral.

— en projetant sur un plan parallèle à la surface du sol, on obtient une « tomographie ». La définition stricte du terme est ici étendue : il s'agit d'une représentation spatiale en deux dimensions de la couverture pédologique, à une profondeur déterminée (l'observation en surface constitue un cas particulier).

Il est possible enfin de représenter des pédopaysages : ensemble des éléments pédologiques (horizons, caractères...) et des éléments paysagiques (végétation, effets de l'activité humaine, morphologie, hydrologie, substrats...) dont l'organisation spatiale permet de définir, dans son ensemble, une (ou une partie d'une) couverture pédologique.

C) LES CONSTITUANTS D'UNE CARTE

1. Le document cartographique stricto sensu

Graphiquement, une carte de sols est la projection sur un plan de la couverture pédologique, c'est-à-dire d'un volume. Cette carte qui comporte d'abord l'information graphique stricto sensu, constitue un document extrêmement riche : système de projection, échelle, niveau d'analyse (précision des mesures, des observations, types de variables utilisées), résolution (surface la plus petite pour laquelle on dispose d'une information), objets cartographiés (valeur de la Réserve Utile, horizon, présence de concrétions...).

La carte peut être considérée comme un ensemble d'interfaces, c'est-à-dire des portions de limites entre des plages de contenus différents : il s'agit de Segments Cartographiques également dénommés arcs en informatique (figure 3). Ils sont définis par les coordonnées de leurs deux extrémités, et par la suite des coordonnées des points qui les constituent.

Les Plages délimitées par les segments sont également dénommées polygones en informatique. L'ensemble des plages possédant une même définition constitue une Unité Cartographique (U.C.).

Dans ces plages se situent des Points représentant les sites d'observation. Ils constituent une population statistique dont l'analyse permet de définir une valeur dominante analogue à celle retenue pour caractériser la plage.

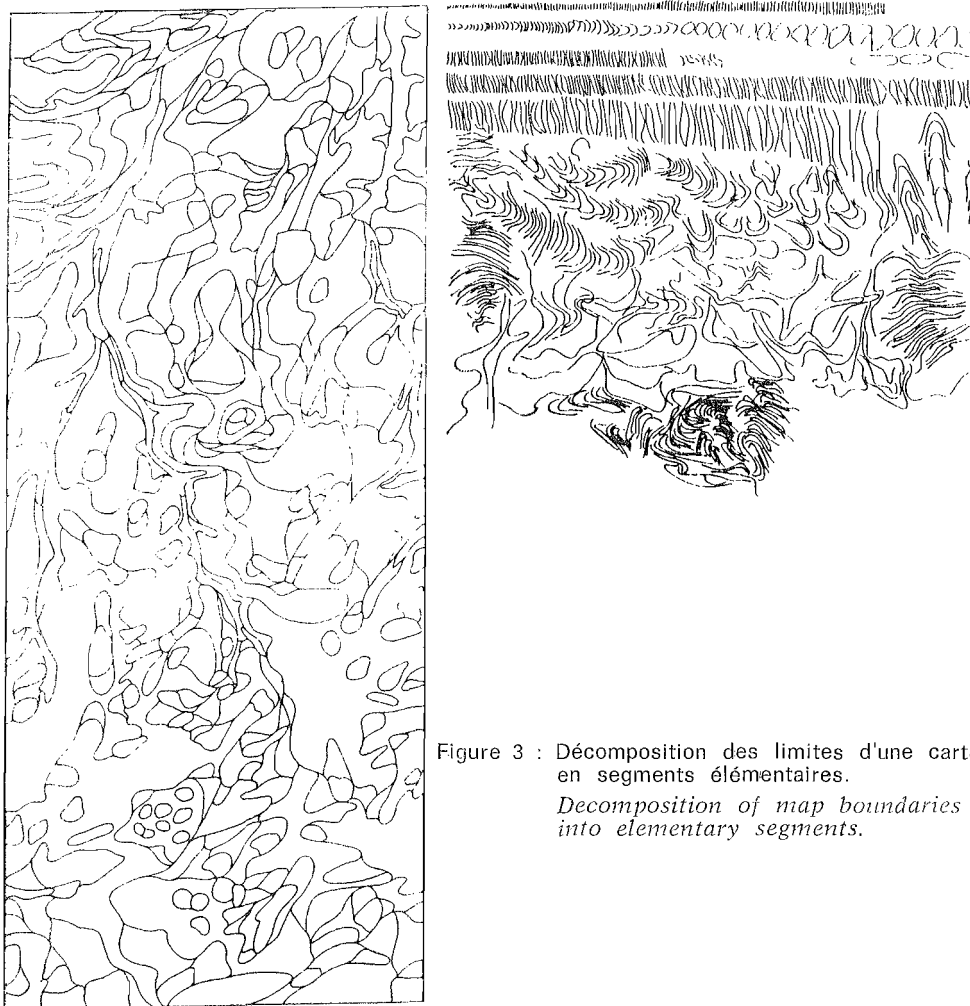


Figure 3 : Décomposition des limites d'une carte en segments élémentaires.

Decomposition of map boundaries into elementary segments.

2. La légende et la notice

La notice et la légende représentent un ensemble sémantique permettant de compléter et préciser les informations pédologiques, en particulier :

- la caractérisation des unités cartographiques (description morphologique et analytique des horizons),
- la description des liaisons chorologiques entre les U.C. et l'environnement (facteurs extrinsèques : substrat, morphologie, hydrologie, végétation, effets de l'activité humaine, climat...),
- la dénomination des unités cartographiques en référence à une classification, ou en correspondance à un système de référence (RPF, 1988),

— l'interprétation éventuelle des informations recueillies, en terme de genèse ou/et de fonctionnement actuel.

Les notices comprennent aussi la description et l'analyse de profils qui illustrent et précisent localement le contenu des plages cartographiques. En général ces profils fournissent une information plus complète et plus fine mais moins synthétique, intégrant peu ou mal les notions de représentativité et de variabilité latérale.

Les liaisons entre contenus, ainsi qu'entre contenus mènent aux notions de contraste et de contiguïté.

Le contraste, représente la somme des différences existant entre les modalités de chaque variable de deux plages situées de part et d'autre de la même limite.

Le contraste représente la somme des différences existant entre les modalités sous certaines hypothèses, elle peut conduire à l'établissement d'un tableau croisé de fréquences donnant cette probabilité pour toutes les unités prises deux à deux.

D) CONCLUSION

La difficulté majeure du pédologue-cartographe est donc de savoir saisir, gérer, traiter et restituer le grand volume de données nécessaires à l'élaboration cartographique. Nous allons examiner comment l'informatique a pu apporter une aide au long des différentes étapes de la cartographie en modifiant parfois des constructions intellectuelles trouvant leur expression au plan graphique ou dans le domaine des applications de la carte.

II. LES APPORTS DE L'INFORMATIQUE A L'ANALYSE SPATIALE

Dans cette partie, l'informatique est analysée en tant qu'outil pouvant faciliter et accélérer les tâches nécessaires à l'élaboration d'une carte.

A) ACQUISITION DES DONNÉES

L'abondance des informations à recueillir lors des phases de terrain entraîne un goulot d'étranglement au niveau de la saisie des données. Cela peut être résolu en limitant le nombre de variables à observer. Dans tous les cas, il faut décider des sites que l'on choisit, de leur nombre et de leur emplacement. Des outils sont désormais disponibles.

1) La saisie directe des descriptions de sol sur le terrain est possible en utilisant un micro-ordinateur portatif et un programme adéquat. Le système fonctionne en routine depuis quelques mois à l'INRA (Montpellier, Le Magneraud). Cela prend le même temps que l'utilisation des fiches. En effet, c'est l'observation qui limite la vitesse de la description, et non pas l'enregistrement. Cette façon de procéder a un double intérêt : éviter une phase de transfert de l'information entre la fiche et le micro-ordinateur, ensuite et surtout, permettre la mise en œuvre, en temps réel, de différents tests de validité.

Cependant, on ne dispose pas encore d'un système qui permette d'enregistrer les observations faites par un pédologue se déplaçant d'un site à un autre.

2) Les données de télédétection mettent à la disposition du pédologue des informations en continu sur l'ensemble de la couverture pédologique qu'il étudie. De plus, les images satellitaires, digitalisées, permettent d'effectuer des traitements statistiques et informatiques rapides et nombreux (M.-C. et C.-M. GIRARD, 1989 ; MULDER, 1987).

Chaque pixel fournit une information sur la couleur et les états de surface du sol : rugosité, humidité, taux de matière organique, calcaire et fer. Les images

diachroniques dont on dispose, permettent d'étudier les diverses phases de la dégradation structurale et de l'érosion (COURAULT, 1989 ; C. KING *et al.*, 1989).

Divers modèles statistiques permettent de stratifier le milieu étudié en Unités de Paysage à partir de quelques éléments majeurs :

- l'eau comportant une charge solide plus ou moins importante,
- végétation (prairies, forêts, cultures, formations végétales plus ou moins modifiées par l'homme : friches, garrigues...),
- sols nus (humidité, couleur et rugosité variable).

Ces Unités de Paysage représentent une structure aidant le pédologue à choisir les sites à observer. En retour, elles autorisent aussi une extrapolation de la carte des sols si les terrains et paysages sont étroitement corrélés. Dans tous les cas, les images satellitaires sont utiles pour effectuer des synthèses et des transferts d'échelle.

B) GESTION DES DONNÉES

La première fonction assurée par les ordinateurs lors du développement de l'informatique pendant les années 1960-1970 fut de stocker de très grandes quantités de données tout en sachant les restituer rapidement.

La volonté affichée de stocker les informations dans des banques a fait faire d'énormes progrès au niveau de la prise des données sur le terrain. Qu'on utilise des fiches ou un micro-ordinateur portatif, on se réfère dans les deux cas à un vocabulaire précis. Naturellement, la mise en banque de l'information suppose qu'on ne touche pas au dictionnaire de données (variables, valeur des codes correspondants, définitions) pendant plusieurs années. Il ne servirait à rien de stocker des informations dont la signification évoluerait rapidement au cours du temps.

Dans le futur, nous devons déterminer les données à maintenir dans de vastes banques de données au niveau régional ou à centraliser au niveau national, voire international.

— Les données de sondage

Les données saisies à partir d'un examen à la tarière sont souvent peu valorisées. Elles constituent pourtant la base de l'analyse spatiale. Leur gestion ne peut s'envisager qu'au niveau régional, compte tenu de la masse d'informations qu'elles représentent. Elles sont relevées de façon rapide par différents prospecteurs pour une même étude. Cela suppose un effort de coordination pour assurer la fidélité des observations. De plus, les données manquantes sont très nombreuses car le cartographe pédologue accélère les processus de saisie en jouant sur l'effet de répétition (ex. : mention « idem précédent »).

— Les données de profil

La description morphologique de solum a commencé d'être normalisée en France depuis la publication du glossaire pour la description des horizons pédologiques (Informatique et Biosphère, 1969). Ce glossaire a été suivi par l'élaboration et la diffusion du système et du logiciel STIPA de description des horizons pédologiques (BERTRAND *et al.*, 1979). Ce logiciel STIPA comprend plusieurs modules dont, en particulier un module de saisie, un module de mise en banque et un module d'édition automatique. Depuis 10 ans, 10 000 profils ont été stockés dans des banques du type STIPA. La modernisation du système est actuellement en cours associée à une normalisation AFNOR et ISO.

— Les données d'analyse de terre

Des données d'analyse de terre résultent de travaux commandités par les agriculteurs. Elles constituent un apport intéressant compte-tenu de leur volume important. Elles permettent de réaliser des statistiques sur la variabilité analyti-

que des unités de sol, et donc d'étudier quelques tendances en grand, au niveau d'une région. Ces tendances peuvent être visualisées par des cartes en courbes d'isovaleur (fig. 4) réalisées en utilisant des algorithmes géostatistiques (MATHERON, 1965).

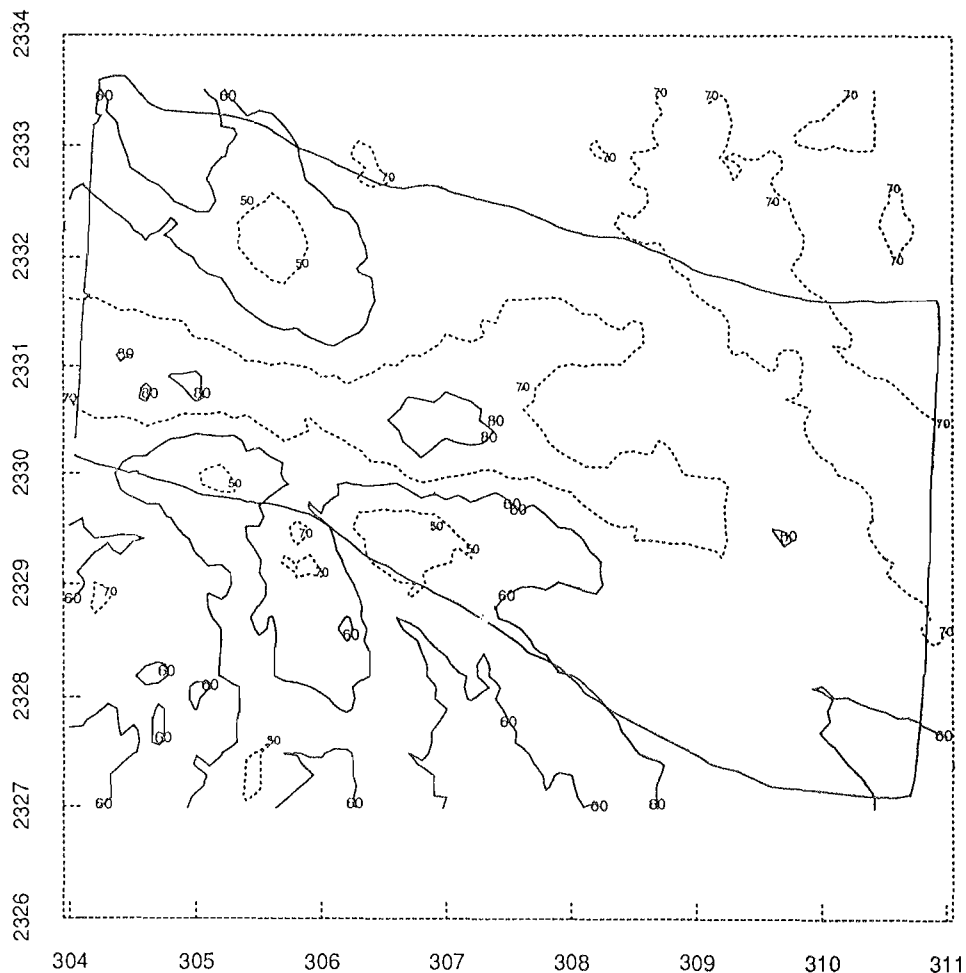


Figure 4 : Carte en courbes d'isovaleur de la profondeur du sol, obtenue par krigeage linéaire (modèle exponentiel ; effet de pépité = 250 ; palier - pépité = 150 ; portée = 0.9 ; 20 voisins) d'un secteur de 7 km sur 8 km au sud de l'Ille-et-Vilaine. Les coordonnées sont en système Lambert II. D'après C. Walter, communication personnelle.

Isorhythmic map of soil thickness, obtained by linear kriging (exponential model ; nugget = 250 ; sill - nugget = 150 ; range = 0.9 ; 20 neighbours) of an area of 7 by 8 km in the south of Ille-et-Vilaine district, Brittany. Coordinates are in Lambert II geographic system. After C. Walter.

C) ANALYSE STATISTIQUE : SYNTHÈSE DES DONNÉES

La conception de la carte, ou cartogénèse se fait en général d'une manière non explicite à l'intérieur de la tête du pédologue. Celui-ci, dans un souci d'opérationnalité réalise sa synthèse de la manière la plus directe possible. Les

caractères du sol sont réunis en horizons. Les horizons sont constitués en profils, les profils sont associés pour former une unité cartographique, ceci en donnant à chaque objet en cause, un poids unique : celui qui paraît intuitivement le meilleur pour obtenir un modèle simple et convenable de la couverture pédologique.

Pour valider ce type de démarche, il faut la reconstituer pas à pas. Une analyse de cette cartogénèse a été faite par GIRARD (1983) et KING (1986). Pour atteindre l'objectif fixé, il a fallu aussi modéliser la notion de ressemblance entre horizons et entre profils (GIRARD, 1983 ; PAVAT, 1986 ; SIMMONEAUX, 1987), puis reconstituer la méthode permettant de passer de la notion d'horizon à celle de profil : probabilité pour que n horizons soient toujours associés ensembles.

Des programmes opérationnels, diffusés et accompagnés de leur notice d'utilisation, matérialisent les progrès accomplis. Il s'agit principalement de DIMITRI (GIRARD et KING, 1988) et VLADIMIR (KING et GIRARD, 1988), réunis dans le cadre de la bibliothèque LOGOS (KING et DUVAL, 1988). Ces programmes spécifiques à la Science du Sol viennent compléter les outils généraux d'analyse des données comme SPAD (LEBART *et al.*, 1987) et ADDAD (LEBEAUX, 1985),

Ces programmes permettent de nombreuses simulations. Par exemple, on examine dans quelle mesure une carte aura ses limites transformées si l'on change quelques paramètres ou le poids de quelques variables dans le processus d'agrégation de l'information. Il a été montré que même dans des cas extrêmes, la carte restait identique à elle-même sur les deux tiers de sa superficie (KING, 1987). Cela donne une mesure de l'incertitude qui accompagne la délimitation des sols. Cela sert aussi à déterminer quels sont les facteurs susceptibles de provoquer les erreurs les plus grandes.

D) ANALYSE SPATIALE

L'analyse spatiale ne relève pas d'une interpolation d'un caractère entre n points : des méthodes géostatistiques conviendraient alors. L'analyse spatiale procède d'une modélisation dans laquelle entre en jeu un grand nombre de caractères de natures différentes, qui sont aussi bien quantitatifs que qualitatifs ordonnés. Ces caractères sont à la fois intrinsèques au sol et extrinsèques, c'est-à-dire correspondant aux données d'environnement ; nature du substrat, géomorphologie, réseau hydrographique, type de végétation, etc... A l'aide de l'informatique, nous pouvons désormais étudier d'une façon explicite et systématique les relations spatiales entre les différentes entités listées ci-dessus et les types de sol. L'objectif est d'établir des lois chorologiques permettant de décrire la structure de la couverture pédologique en liaison avec son environnement (WEBSTER, 1977 ; Informatique et Biosphère, 1971 ; BONNERIC, 1978 ; BAILLE *et al.*, 1988 ; KING, 1985 ; BURROUGH, 1987). Les résultats issus en particulier de modèles numériques de terrain fournissent des documents de structure identique aux images de télédétection. Ce type d'approche est loin d'être épuisé ; par exemple des cartes de structures agraires (taille et forme des parcelles, éloignement...), peuvent être dressées et croisées avec les données pédologiques pour mettre en évidence les contraintes relatives à l'exploitation du sol (DELCROS, 1989). Les spécialistes de la télédétection ont joué à ce niveau un rôle moteur. Profitant de la numérisation des cartes et de la quantification correspondante, ils ont proposé des algorithmes pour mesurer le contraste, la contiguïté et définir la forme des plages : aplatissement, rayon de courbure des segments (ROGALA, 1982 ; MOMAL, 1988).

Enfin, des progrès seront réalisés, lorsqu'on arrivera concrètement à mener de front l'analyse statistique et l'analyse spatiale. Cela revient à étudier en même temps, les relations entre variables dans l'espace mathématique défini

par celles-ci et les relations spatiales entre les observations positionnées dans l'espace géographique défini par la zone d'étude (en trois dimensions).

E) CONTROLE CARTOGRAPHIQUE : NOTION D'IMPURETÉS

Grâce à la mémorisation systématique de l'ensemble des données ayant servi à l'élaboration d'une carte, nous pouvons procéder à un contrôle a posteriori des unités définies. Nous constatons qu'il existe toujours une part d'impureté correspondant à une variabilité spatiale non prise en compte.

La valeur de 15 % d'impuretés par série de sol du Soil Survey Manual (1951) est théorique et repose sur peu de fondements expérimentaux. Les travaux sur la variabilité interne aux unités ont apporté des chiffres tout à fait différents. Une étude sur une carte pédologique détaillée au 1/25 000 a établi que, le taux d'impuretés « mineures » (erreur d'une modalité sur une seule variable pédologique ou d'une modalité sur plusieurs variables) pouvait atteindre 40 %. Ces chiffres viennent conforter les résultats obtenus par MARSMAN et de GRUIJTER (1984), qui proposent les concepts de pureté moyenne, pureté partielle et pureté stricte. Ces auteurs montrent que dans des études cartographiques au 1/10 000 la pureté moyenne varie entre 59 et 62 %, la pureté partielle entre 48 et 84 % et la pureté stricte entre 7 et 12 %. Les travaux en cours de C. WALTER sur la variabilité interne aux unités pédologiques (C. WALTER, comm. pers.) conduisent à des résultats du même ordre.

F) CONCLUSION

L'informatique est apparue rapidement comme un outil pouvant nous aider dans la gestion de l'important volume de données que nous devons nécessairement manipuler lors d'une approche cartographique. Mais l'informatique et la statistique nous ont conduit à mieux formaliser et quantifier notre démarche et ce, dès la saisie sur le terrain des données (se reporter aux nombreux travaux autour du système STIPA).

En second lieu, l'informatique a permis de se débarrasser des tâches purement techniques ou répétitives et a fourni des méthodes de cartographie assistée. Le pédologue peut alors se concentrer sur les aspects scientifiques de la cartographie : recherche des relations spatiales ou étude des fonctionnements des sols.

Les limites d'une cartographie entièrement automatique se situent désormais dans un cadre mieux précisé. En effet, l'informatique simule difficilement l'approche de type dialectique du cartographe qui passe continuellement d'un modèle d'organisation à la saisie d'une nouvelle donnée et réciproquement (les systèmes experts permettront peut-être de lever cet obstacle). Nous analysons dans la dernière partie comment l'informatique peut fournir également des outils pour faciliter la transmission de l'information entre concepteurs et utilisateurs de cartes.

III. LES APPORTS DE L'INFORMATIQUE A L'EXPLOITATION DES CARTES

Une enquête internationale récente (MSANYA *et al.*, 1987) a montré que le principal défaut relevé par les utilisateurs de carte était leur illisibilité (51 % des réponses) alors que pratiquement personne ne se plaignait des erreurs (5 % seulement des réponses). Nous pouvons remarquer en effet que l'information

cartographique est souvent compliquée et empêche l'utilisateur d'accéder rapidement aux données qui lui sont nécessaires. Ainsi, le document graphique est loin de représenter la totalité des informations recueillies et traitées par l'auteur de la carte. Les pédologues regroupent des informations faute de pouvoir les représenter séparément et les lecteurs doivent ensuite décoder des noms de sols et un symbolisme graphique souvent complexes.

A) LES SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE

L'informatique permet désormais de s'affranchir des contraintes graphiques et de mémoriser le maximum de données de base ou élaborées. L'analyse de l'information cartographique amène à prendre en compte deux ensembles : l'ensemble graphique et l'ensemble sémantique correspondant respectivement au contenant et au contenu des plages cartographiques.

1. L'ensemble graphique

La gestion et le traitement des données graphiques peuvent se faire selon deux modes : le mode « raster » ou matriciel, et le mode « vecteur ». Chacun de ces deux modes a ses intérêts et ses inconvénients. En mode raster, la carte est représentée sous forme d'une matrice de cellules carrées ou rectangulaires appelées pixels. En mode vecteur, les contours pédologiques sont décrits à l'aide des coordonnées des segments ou arcs qui les composent.

Compte-tenu de la nature des cartes pédologiques où deux pixels voisins ont une forte probabilité d'être identiques, l'information en mode raster est très redondante et se prête à des compactions en vue d'un stockage plus économique en terme de place utilisée. Dans ce cas, l'emploi du mode raster implique des compactions et décompactions fréquentes. Le mode vecteur est beaucoup plus économe en volume de stockage.

Au sein des systèmes actuellement sur le marché, il est de plus en plus proposé des logiciels de passage de l'un à l'autre mode, utilisés selon les besoins spécifiques des opérations à effectuer : saisie automatique, gestion, analyse spatiale, combinaisons cartographiques, restitutions graphiques sur imprimantes...

2. Les données sémantiques

Les données sémantiques fournissent des informations sur le contenu des unités cartographiques plus complètes que celles visualisées sur une carte papier. Il est possible d'indiquer de multiples caractères : des valeurs de variabilité latérale, une description en trois dimensions (en particulier la description des horizons), une description des relations avec les entités voisines, etc. (KING, 1984). C'est donc le modèle d'organisation spatial qui est décrit dans le système informatique et non la carte proposée en deux dimensions. Ainsi, le terme de Système d'Information Géographique (SIG) a été retenu au niveau international et préféré à celui de « carte informatisée ».

Le concept de SIG englobe à la fois la notion d'un Système de Gestion de Base de Données (SGBD) pour l'ensemble sémantique, et celle de Dessin Assisté par Ordinateur (DAO) pour l'ensemble graphique. Mais la définition du SIG s'est étendue aux outils permettant l'extraction et le traitement de l'information spatiale englobant ainsi les méthodes statistiques et les méthodes d'analyses spatiales exposées précédemment (paragraphe II C et II D).

B) EXPLOITATION DE L'INFORMATION CARTOGRAPHIQUE

Une carte peut être lue ponctuellement, à l'image d'un dictionnaire que l'on consulte sur un mot précis, ou perçue globalement, pour fournir une vision

synthétique sur l'ensemble d'une région. Dans les deux cas, les SIG facilitent la transmission des informations entre l'auteur d'une étude et l'utilisateur.

1) Pour rechercher les caractéristiques pédologiques en un point, nous pouvons procéder de nombreuses façons (DERSIGNY, 1988) : extraire les caractéristiques de l'unité cartographique contenant ce point, demander les caractères du sondage ou profil le plus proche, en effectuer une moyenne sur la base des points d'observation appartenant à l'unité, ou bien procéder par interpolation spatiale au moyen de l'analyse géostatistique du champ d'observations (figure 4).

2) Différentes sortes de cartes thématiques sont susceptibles d'être produites :

a — *des cartes monofactorielles*, en procédant à une extraction de variables à partir de la définition sémantique des unités pédologiques (exemples : carte du substrat géologique, carte de la classe d'hydromorphie, carte de profondeur du sol... cf. exemple, carte hors texte).

b — *des cartes plurifactorielles* en utilisant des méthodes empiriques de pondération (MORI *et al.*, 1983). Chaque modalité des variables de définition des Unités Cartographiques est affectée d'une note. On utilise ensuite une pondération soit additive, soit multiplicative, soit combinatoire pour calculer une note finale pour chaque unité de sol. On procède ensuite à un découpage en classes avant la phase de dessin de la carte. Une revue de ces méthodes a été publiée (LEGROS, 1987) et les difficultés ont été soulignées (LEGROS et BORNAND, 1989).

c — *des cartes thématiques dérivées*, en utilisant des fonctions ou règles de « pédotransfert » (BOUMA et LANEN, 1987 ; KING et DAROUSSIN, 1989). Celles-ci expriment les caractères cartographiés en terme de propriétés en ajoutant au SIG des connaissances pédologiques générales non nécessairement spécifiques de la région étudiée. On peut prendre comme exemple, la réserve utile des sols (carte hors texte). On utilise d'abord un modèle de type régression multiple pour estimer la réserve utile en fonction des teneurs en argile, limons fins, limons grossiers et matière organique des horizons qui sont ajustées par des coefficients.

Ensuite la réserve utile totale du sol est calculée en prenant en compte la profondeur d'enracinement (P) et l'épaisseur des horizons.

On obtient ainsi pour chaque Unité Cartographique une valeur de réserve utile et l'on peut visualiser le résultat cartographique correspondant. Celui-ci dépend des valeurs des variables intrinsèques des sols mais également des coefficients d'ajustement et du paramètre P. Ces coefficients n'ont en général qu'une valeur régionale.

C) ÉTUDE DE SCÉNARIOS, COMBINAISONS CARTOGRAPHIQUES

Dans la partie sémantique d'une carte pédologique, on trouve une description de la nature des sols sur la base de caractéristiques permanentes. Dans certains cas, les notices comportent aussi des notions intéressant la dynamique du système par exemple le fonctionnement hydrique ou le comportement par rapport aux façons culturales. Au sein d'un SIG, il est possible de décrire ces aspects dynamiques en précisant les flux existant entre horizons ou entre Unités Cartographiques (exemple, modèle SOURCE : GIRARD et DUFAURE, 1988).

Plusieurs travaux relèvent de ces aspects tels les problèmes d'hydropédologie, d'érosion, de potentialité d'une culture, etc. L'un des avantages des SIG est de pouvoir visualiser d'une façon globale l'état supposé du sol à un instant précis. Mais ceci implique la combinaison des données de sols avec d'autres sources d'informations : données climatiques, géomorphologiques, de télédétection (DEL-CROS, 1989 ; SIMON, 1989) (fig. 5). Cela soulève de nombreux problèmes méthodologiques liés à l'échelle et à la structure différente de chaque type de données.

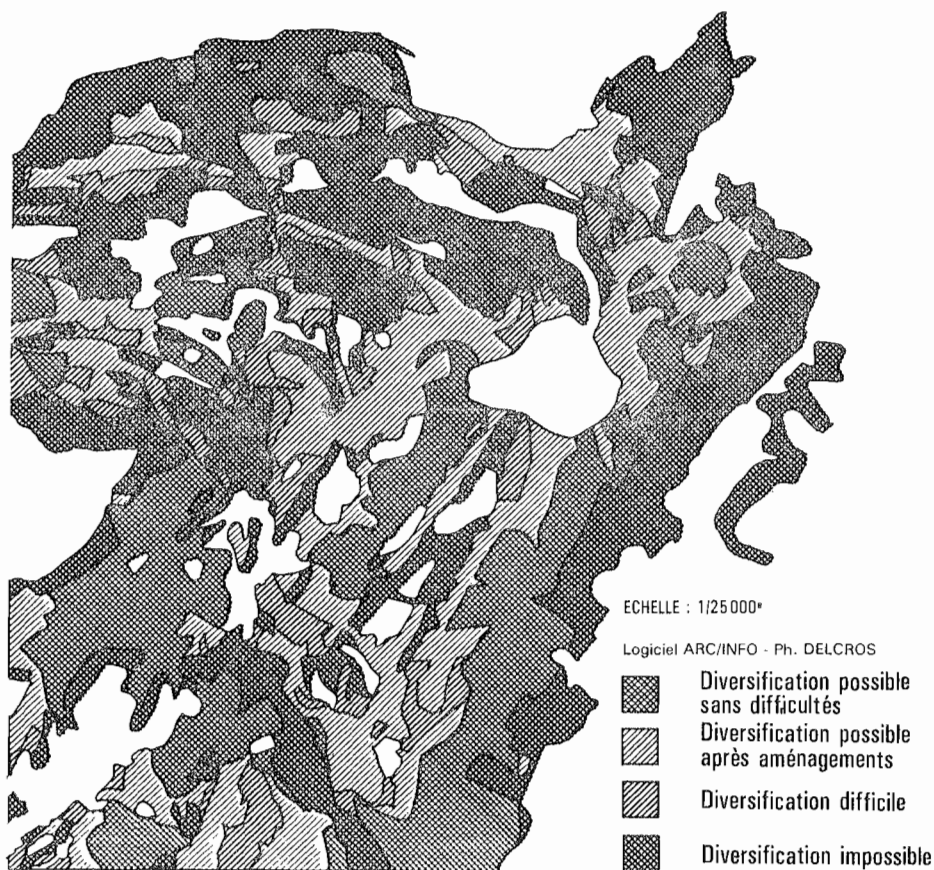


Figure 5 : Carte indiquant les zones dans lesquelles la vigne peut être remplacée par d'autres cultures plus rentables.

Map showing areas in which Vineyard may be removed and replaced by more profitable crops.

Plus précisément :

1) les données à comparer ne sont pas cohérentes ; elles correspondent à des objets étudiés à des niveaux d'investigation d'ordres de grandeur très différents. De plus, elles ne peuvent pas se traiter mathématiquement de la même manière suivant qu'elles sont qualitatives, ordonnées, ou quantitatives ;

2) la stratégie d'échantillonnage diffère suivant les cartes en cause ; par exemple, les sites d'observation pour des caractères pédologiques ne sont pas les mêmes que pour les parcelles d'exploitations agricoles utilisées lors d'enquêtes agronomiques. L'échantillonnage peut être aléatoire (enquêtes statistiques), systématique (télédétection), biaisé dans sa représentativité spatiale (stations météorologiques synoptiques liées aux vallées), stratifié (pédologie) ;

3) la résolution spatiale des documents diffère aussi. Par exemple on dispose d'un site d'observation météorologique pour 1 000 km² ;

4) le modèle spatial varie selon les thèmes ; par exemple, il repose sur un principe de continuité pour la couverture pédologique, alors qu'il admet des seuils pour l'occupation du sol.

Par ailleurs, la mise en relation de données toutes différentes (sol, climat, télédétection) serait facilitée par la mise en relation physique des banques de données correspondantes.

D) CONCLUSION

L'informatique fournit de nouveaux moyens pour gérer et surtout transmettre des informations. La rapidité, la variété, la qualité des sorties représentent l'un des apports les plus marquants de la cartographie informatisée. Par exemple :

- édition des descriptions des profils, en plusieurs langues,
- changement de système de projection géographique,
- effet zoom et modification du champ de vision utilisé,
- choix de l'échelle de publication et des couleurs,
- édition fugace sur écran d'un scénario.

Le document produit in fine par les Systèmes d'Information Géographique reste une carte (sauf dans le cas d'interrogations à caractère localisé) mais il se rapproche de plus en plus de la demande des utilisateurs. Ceux-ci avaient longtemps reproché aux cartes de sols de ne pas fournir l'information qu'ils désiraient. Les SIG leur offrent maintenant une quantité d'information considérable organisée comme ils l'entendent.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'informatique permet de gérer et traiter le volume important de données recueillies lors de travaux cartographiques. Elle a permis ainsi d'accélérer certaines tâches manuelles et d'aider le cartographe dans sa recherche des liaisons statistiques ou spatiales entre ces données. Un apport indirect mais essentiel de l'informatique est d'avoir contraint la communauté pédologique à adopter une standardisation dans le relevé et le codage des informations. Le système STIPA est un bon exemple de cet effort. Mais l'apport le plus spectaculaire est la facilité de mémorisation et de transmission des informations cartographiques au profit des utilisateurs grâce aux procédés de dessin automatique fournissant des cartes thématiques à la demande.

Ainsi, l'informatique amène la révision de nombreux concepts. Le terme de « Système d'Information Géographique » s'est substitué à celui de « carte » et représente l'affranchissement des contraintes de mémorisation liées au graphisme.

Du fait de la qualité médiocre des premières sorties graphiques par ordinateur, les cartographes ont d'abord « boudé » les nouvelles techniques. Ce temps est révolu mais l'introduction des banques de données et des Systèmes d'Information Géographique pose un délicat problème de formation des hommes. Les équipes de cartographie devraient donc réunir des spécialistes de haut niveau maîtrisant l'informatique, l'utilisation de la télédétection et connaissant la diversité des sols. Dès maintenant, il n'est plus possible pour une société française d'obtenir des marchés de cartographie à l'étranger sans faire la preuve de sa compétence technologique. L'évolution n'est pas achevée. Les systèmes experts vont entrer en jeu et représentent un investissement matériel et intellectuel supplémentaire. Dans ce contexte la Recherche et l'Enseignement supérieur Agronomique ont leur rôle à jouer pour aider nos entreprises dans la compétition internationale : tester les systèmes, développer des algorithmes d'application, former les ingénieurs de demain...

BIBLIOGRAPHIE

- BERTRAND R., FALIPOU P., LEGROS J.-P.**, 1979. — Notice pour l'entrée des description et analyses de sols en banque de données. Document SES Montpellier, INRA, IRAT, n° 487, 119 p.
- BONNERIC P.**, 1978. — Conception et réalisation d'un système cartographique appliqué à la pédologie. Mémoire CNAM, Montpellier, 108 p.
- BOUMA J. and VAN LANEN H.A.J.**, 1987. — Transfer functions and threshold values : from soil characteristics to land qualities. In : K.J. BECK, P.A. BURROUGH and D.E. McCORMACK (Eds) : Quantified Land Evaluation Procedures, ITC Publication N° 6, Enschede, 106-110.
- BURROUGH P.A.**, 1987. — Principles of geographical information systems for land resources assessment. Monographs on soil and resources survey n° 12, Oxford. Science publications, 193 p.
- COURAULT D.**, 1989. — Etude de la dégradation des états de surface du sol par télédétection. Thèse Université, Paris VI, 214 p.
- DELCROS Ph.**, 1989. — Elaboration d'une carte de re-structuration des zones agricoles sur une commune de l'Hérault par le logiciel ARC-INFO. Vérification du résultat. Etude de la précision du logiciel. DEA ENSAM-USTL, 95 p + annexes.
- DERSIGNY C.**, 1988. — Collection, organisation et mise à disposition de données agro-pédologiques au sein d'un référentiel pour l'Ille-et-Vilaine, SDS 403, ENSA Rennes, 63 p.
- FITZPATRICK E.A.**, 1986. — Comparison of Soil Taxonomy with FITZPATRICK'S system of soil designation and classification. Ciencia del suelo, vol. 4, 193-207.
- 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 (Docteur ès Sciences). Sols (12), 430 p.
- GIRARD M.-C., DUFURE L.**, 1988. — Présentation d'un modèle de transport de l'eau dans les sols : SOURCE. In Etude sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère. INRA, p. 71-100.
- GIRARD M.-C., et GIRARD C.-M.**, 1989. — Télédétection appliquée. Zones tempérées et intertropicales. Masson, Paris, 260 p.
- GIRARD M.-C., KING D.**, 1988. — Un algorithme interactif pour la classification des horizons de la couverture pédologique. Science du Sol, vol. 26, 2, pp. 81-101.
- INFORMATIQUE ET BIOSPHERE**, 1971. — Glossaire de pédologie. Description de l'environnement en vue du traitement informatique. I. et B. Paris, 173 p.
- KING C.**, 1985. — Etude des sols et des formations superficielles par Télédétection. Thèse de Doct. Ing., Document BRGM n° 96, Orléans, 174 p.
- KING C., MAUCORPS J., AUMONIER F., LENOTRE N.**, 1989. — Indice d'érosion décelable par SPOT dans les sols limoneux du Nord-Pas-de-Calais ; une étude multidate. Bulletin de la SFPT (14), pp. 10-13.
- KING D.**, 1984. — Analyse de quelques concepts en cartographie des sols basée sur une automatisation des cartes thématiques dérivées. Agronomie, 4(5), pp. 461-477.
- KING D.**, 1986. — Modélisation cartographique du comportement des sols basée sur l'étude de la mise en valeur du Marais de Rochefort. Thèse (Docteur-Ingénieur) INA Paris-Grignon, 243 p.
- KING D. et DAROUSSIN J.** 1989. — Test of estimating the available soil moisture reserve. In application of computerized EC Soil Map and Climate data 1516/11/88, Wageningen, pp. 87-105.
- KING D., DUVAL O.**, 1988. — LOGOS. Logiciels pour l'étude de la géographie des sols. Version 3.1. INRA-SESCPF, 112 p.
- KING D., GIRARD M.-C.**, 1988. — Réflexion sur la classification des profils de la couverture pédologique. Proposition d'un algorithme : VLADIMIR. Science du Sol, 26, pp. 239-254.
- LEBART L., MORINEAU A. et LAMBERT T.**, 1987. — SPAD. N, Système Portable pour l'Analyse des Données. CISA, 237 p.

- LEBEAUX M.-O.**, 1985. — Manuel de référence ADDAD, 249 p.
- LEGROS J.-P.**, 1987. — Computerized data sets for soil maps. In Geographical Information Technology in the field of environment. Volume III, Ecole Poly. Fédérale de Lausanne, Suisse, pp. 865-929.
- LEGROS J.-P.** et **BORNAND M.**, 1989. — Systèmes d'Information Géographique et zonage agro-pédo-climatique. Sous presse. Séminaire d'agro-météorologie, 10 p.
- MARSMAN B.A.**, de **GRUIJTER J.-J.**, 1986. — Quality of soil maps. A comparison of survey in a sandy area. Soil Survey Papers n° 15. Netherland, Wageningen, 103 p.
- MATHERON G.**, 1965. — Les variables régionales et leur estimation. Masson, Paris, 306 p.
- MOMAL F.**, 1988. — Structuration et exploitation numérique des informations géographiques. Application à la cartographie pédologique. Thèse Doct. Ing. INAPG, 161 p.
- MORI A.**, **BEGON J.-C.**, **DUCCLOS G.**, **STUDER R.**, 1983. — First approximation of a national land evaluation system (France). In proceeding of a Seminar on Soil Survey and Land Evaluation, Wageningen, 26-29/9/83, pp. 43-55.
- MSANYA B.M.**, **LANGOMR R.**, **LOPULISA C.**, 1987. — Testing and improvement of a questionnaire to users of soil maps. Soil Survey and land evaluation (7) pp. 33-42.
- MULDERS M.A.**, 1987. — Remote sensing in soil science. Developments in soil science, vol. 15, Elsevier, Amsterdam. 379 p.
- PAVAT J.-L.**, 1986. — Contribution à l'étude de la ressemblance entre types de sols. Apport de l'informatique. Application aux secteurs de référence. DEA-ENSAM, USTL, 75 p + annexes.
- QUIDEAU P.**, 1980. — Cartographie détaillée des horizons en Forêt de Paimpont. Mémoire de DEA, ENSAR, 66 p.
- ROGALA J.-P.**, 1982. — Analyse de l'hétérogénéité et de la structure des unités cartographiques. Th. Doct. Ing. INAPG, 224 p.
- RPF.**, 1988. — Référentiel pédologique Français. Deuxième proposition Girard M.-C. et Baize D., Doc. multig. AFES-INRA, 251 p.
- SIMONS S.**, 1989. — Prise en compte raisonnée des facteurs du milieu physique pour une appréciation de l'aptitude à la diversification des cultures après vignes. Application au secteur de Pézenas (Hérault). DEA ENSAM-USTL, 50 p. annexes.
- SIMMONEAUX V.**, 1987. — Mesure de la ressemblance entre groupes de sondages à la tarière et des profils de référence. Application au classement des sols. DAA INAPG - INRA Montpellier, 61 p. + annexes.
- SOIL SURVEY STAFF**, 1951. — Soil Survey Manual, US Department of Agriculture, Washington, 503 p.
- VALS G.** et **VINATIER J.-M.**, 1979. — Cartographie pédologique en séquence, essai au 1/100 000 dans la région de Montauban de Bretagne, mémoire de DEA, ENSAR.
- WEBSTER R.**, 1977. — Quantitative and numerical methods in soil classification and survey, Monographs on Soil Survey, Clarendon Press, Oxford, 269 p.