

Intérêt du couplage des méthodes géostatistiques et de cartographie des sols pour l'estimation spatiale.

C. GASCUEL-ODOUX (1)

C. WALTER (2)

M. VOLTZ (3)

RÉSUMÉ

La carte pédologique est un des principaux moyens pour décrire l'organisation des sols dans l'espace. Elle est à la fois fondée sur des observations ponctuelles du sol et sur une analyse du paysage. Le découpage de la couverture pédologique en unités cartographiques, retenu par la carte pédologique, a classiquement conduit à donner un poids important à la définition et à la délimitation des unités cartographiques pour effectuer des estimations spatiales d'une propriété donnée. Cependant, la notion de continuum dans la couverture pédologique, associée à la grande variabilité spatiale des caractéristiques pédologiques, a imposé ces dernières années un recours important aux méthodes géostatistiques, au sens de la théorie des variables régionalisées. Ces méthodes sont fondées sur la continuité spatiale de la couverture pédologique, par la notion de structure spatiale, et privilégient ainsi les relations de voisinage entre les observations pour effectuer des estimations spatiales. Ces deux approches sont à la fois très différentes sur le plan conceptuel et complémentaires du point de vue de la prise en compte de l'organisation des sols. Or des travaux comparatifs de ces démarches et une émergence d'approches couplées apparaissent. Cet article analyse comment le problème de l'estimation spatiale est abordé dans les approches basées sur la carte pédologique, dans les approches géostatistiques, puis dans les approches couplées. Trois principales étapes de l'estimation spatiale sont abordées : la stratégie d'échantillonnage ; l'analyse de la variabilité spatiale ; la méthode d'estimation spatiale associée.

Mots-clés : carte des sols - cartographie des sols - unité cartographique - statistique spatiale - estimation spatiale - géostatistique.

THE INTEREST OF COMBINING GEOSTATISTICS AND SOIL SURVEY FOR SPATIAL PREDICTION

The soil survey constitutes one of the major means of describing the spatial variations of soil cover. It is based on local observations and a landscape analysis. A first approach for spatial prediction is based upon map unit characterization and

INRA (1) - ENSA (2) , Laboratoire de la chaire de Science du Sol et du Bioclimat, 65 Route de Saint-Brieuc, 35042 Rennes Cedex.

INRA (3) , Laboratoire de Science du Sol, 9 Place Viala, 34060 Montpellier cedex.

delineation. They make it possible: to choose sampling strategies (Fig. 1) ; to describe the main nested levels of the spatial structure (Fig. 2) ; to estimate a given property. Nevertheless, the notion of continuum in soil cover and the great spatial variability of soil properties are not taken into account. This has led to using more and more geostatistical methods these last ten years. This second approach is based on the spatial continuity in soil mantle and privileges spatial relationships between punctual observations by using the notion of spatial structure. It requires a good estimate of this structure (Fig. 4) and makes it possible to decrease the estimated variance (Fig. 3). Due to the complementarity of these two approaches, works of comparison or new combined approaches have recently been developed. This paper analyses how spatial prediction is solved by soil survey approaches, by geostatistical approaches and finally by new combined approaches. Three phases are considered : sampling strategy; spatial variability analysis; statistical methods of spatial prediction.

Keywords : soil survey - soil map - map unit - spatial statistic - spatial prediction - geostatistics.

INTRODUCTION

Une estimation spatiale des propriétés du sol est souvent requise pour résoudre des problèmes agronomiques ou environnementaux, par le biais notamment d'une modélisation spatialisée du fonctionnement du sol. L'estimation porte alors sur les variables d'entrée du modèle, sur des points non échantillonnés ou sur des surfaces. On recherche de plus une estimation de l'erreur associée à cette estimation spatiale. Se pose alors le problème du choix de la méthode d'estimation et de la sélection des sources d'information utilisées. Deux approches peuvent être distinguées.

Une première approche met à profit la cartographie pédologique qui constitue une des méthodes les plus courantes pour analyser et représenter l'organisation des sols dans l'espace. Lors de la cartographie, le pédologue intègre d'une part des observations ponctuelles de certaines propriétés du sol qui deviennent ainsi des critères cartographiques, d'autre part des variations d'autres composantes du milieu qu'il peut observer en continu à la surface du sol -topographie, états de surface du sol (CASNAVE et VALENTIN, 1979)- et qui lui paraissent liées à des variations du sol. Ces informations permettent d'établir une typologie des sols, de distinguer, sur cette base, des unités cartographiques, puis de tracer les limites délimitant des plages cartographiques (BAIZE, 1986). L'utilisation de la cartographie pédologique pour l'estimation spatiale s'appuie essentiellement sur la typologie des unités cartographiques et leur localisation dans l'espace. La continuité du sol entre unités ou l'hétérogénéité spatiale au sein des unités n'est pas prise en compte. Le sol est alors considéré comme un ensemble d'unités indépendantes pour l'estimation spatiale.

Face à cet inconvénient, et face également à la nécessité d'une formalisation numérique de la représentation spatiale de la couverture pédologique (GIRARD, 1983 ; KING, 1987), une seconde approche, basée sur les méthodes géostatistiques, s'est développée depuis une dizaine d'années. Le terme de géostatistique est ici, et pour la

suite de cet article, pris au sens le plus courant, celui de l'utilisation de la théorie des variables régionalisées introduite par MATHERON (1965). La géostatistique, par la notion de structure spatiale, privilégie l'aspect "continuum" de la couverture pédologique. Certes, cette idée de continuité est inscrite depuis longtemps dans la culture pédologique par la notion de chaîne (CPCS, 1967) ; elle a été soulignée par des études méthodologiques qui ont quantifié les variations progressives du fonctionnement des sols d'une plage cartographique à l'autre (GASCUEL-ODOUX, 1984 ; VOLTZ, 1986).

Or, on assiste actuellement à l'émergence de travaux qui tentent de préciser l'intérêt et les limites de ces approches pour l'estimation spatiale : d'une part, par le biais d'études comparatives au cas par cas ; d'autre part, par l'élaboration de nouvelles méthodes couplant ces approches. L'objectif de cet article est de montrer, à partir de l'analyse d'un ensemble de travaux, comment sont abordés les problèmes d'estimation spatiale successivement, dans les approches basées sur la cartographie pédologique, dans les approches géostatistiques et enfin dans les approches comparatives voire couplées.

Le plan adopté développe, pour chacune de ces approches, le problème de l'estimation spatiale, en abordant successivement deux étapes : le raisonnement de l'échantillonnage, par lequel on cherche à minimiser l'erreur d'estimation, sous des contraintes de coût de mise en oeuvre ; l'analyse de la variabilité spatiale et les méthodes d'estimation spatiale associées. Sans rentrer dans les développements de chacune des méthodes, que l'on trouve par ailleurs, on tentera d'analyser leur intérêt et leur limite.

I - LES APPROCHES BASEES SUR LA CARTOGRAPHIE PEDOLOGIQUE

Les objectifs des méthodes de cartographie pédologique sont de fournir, par une carte, une légende et une notice, des informations sur la nature des variations spatiales de la couverture pédologique. Cependant le manque de formalisation d'une partie de cette information, notamment sur la variabilité au sein des unités cartographiques et sur les variations associées aux contours cartographiques, conduit le plus souvent à privilégier la carte pour l'estimation spatiale. Ainsi la définition des unités cartographiques et les contours cartographiques, établis sur la base de critères cartographiques, sont souvent les seules informations retenues dans le cadre de l'estimation spatiale. Ces unités cartographiques, voire parfois des regroupements d'unités, sont considérées comme des strates, qui sont caractérisées soit selon une démarche déterministe, soit selon une démarche statistique.

La démarche déterministe consiste à implanter, en des sites choisis par le cartographe, des profils de référence jugés représentatifs des unités cartographiques (BOULAINÉ, 1980). Un seul profil de référence est généralement choisi par strate ; il est considéré comme représentatif de la valeur modale par strate. L'avantage de cette méthode est son faible coût, un seul profil, ou en tout cas un faible nombre de profils de référence par unité cartographique, devant suffire à l'estimation spatiale requise. La prise en compte par le cartographe de différentes composantes du milieu dans le choix de ces profils de référence est sensé compenser leur faible nombre. L'inconvénient

majeur de cette démarche, en particulier dans le cadre d'une modélisation, est de ne pas avoir accès à l'erreur de l'estimation spatiale associée. Bien que cette démarche de l'utilisation du profil de référence soit fréquente, peu de travaux ont testé la précision des estimations obtenues par cette démarche du profil de référence (KING et GIRARD, 1988 ; BREGT, 1988 ; LEENHARDT *et al.*, 1993), elle sera donc peu évoquée dans la suite de cet article.

Dans la démarche statistique, la localisation des points d'observation est tirée au sort. La typologie et la localisation des unités cartographiques sont mises à profit pour stratifier l'échantillonnage et effectuer les estimations par strates. La théorie de l'échantillonnage (COCHRAN, 1977) permet alors de calculer une erreur d'estimation selon le protocole d'échantillonnage retenu. L'avantage de cette démarche, plus lourde à mettre en oeuvre, est donc de fournir l'erreur d'estimation spatiale.

1. Le raisonnement de l'échantillonnage

Il s'appuie sur la stratification que propose la carte pédologique : les unités cartographiques ou les regroupements d'unités, considérées comme des strates, sont mutuellement exclusives et collectivement exhaustives. L'échantillonnage est raisonné par strate. L'intérêt de cette démarche est que l'estimation peut être menée de manière séparée dans chaque strate, et que sa précision ne dépend plus que de la variabilité intra-strate. Ceci permet, dès lors que la stratification est pertinente, un gain de précision important par rapport à des échantillonnages strictement aléatoires sans stratification préalable (WEBSTER et OLIVER, 1990). L'échantillonnage des strates est le plus souvent un échantillonnage à allocation proportionnelle, c'est-à-dire dont le nombre d'observations par strate est proportionnel à la surface de la strate.

Les stratégies d'échantillonnage au sein de chacune des strates (Fig. 1) découlent ensuite de l'information que l'on désire acquérir :

- une première stratégie s'attache à caractériser les variabilités intra et inter unités cartographiques, sans faire de distinction entre les plages cartographiques ; les points de mesure sont répartis sur chacune des unités cartographiques, par Echantillonnage Aléatoire Simple (E.A.S.) par exemple (WRIGHT et WILSON, 1979), ou en répartissant aléatoirement des transects comportant des points régulièrement espacés (STEERS et HAJEK, 1979 ; LEENHARDT, 1991).

- une seconde stratégie vise à analyser la structure spatiale au sein d'une strate, à partir de l'étude d'une ou deux grandes plages cartographiques choisies arbitrairement ou aléatoirement, et considérées comme représentatives de l'unité cartographique. Sur chacune d'elle, peut alors être adoptée une stratégie basée sur une approche géostatistique (AMEYAN, 1986 ; IRIS, 1986 ; GOOVAERTS *et al.*, 1988 ; VAN MERVEINNE et HOFMAN, 1989).

- une troisième stratégie a pour objectif de rechercher les niveaux d'organisation de la couverture pédologique : unité cartographique, plage cartographique, variabilité spatiale pour des pas de distance fixés. Bien qu'elle se rapproche de la géostatistique, cette méthode ne permet qu'une appréciation approchée de la structure spatiale (STEIN, 1991). Elle intègre plusieurs niveaux d'échantillonnage dans la stratégie d'échantillonnage : en premier lieu, l'échantillonnage de plages cartographiques, en

général par E.A.S. ; en second lieu, l'échantillonnage des points de mesure au sein des plages sélectionnées. Différentes façons de choisir ces points ont été proposées. Des auteurs ont proposé d'effectuer un premier choix de points, par E.A.S., à partir desquels d'autres points sont déterminés de façon systématique : points régulièrement espacés et positionnés, soit sur un transect (WANG, 1984 ; GRUIJTER et MARSMAN, 1984), soit sur un cercle de rayon fixé, suivant des directions choisies aléatoirement (THOMAS *et al.*, 1989) ; points positionnés selon des distances croissantes fixées *a priori* et selon des directions choisies aléatoirement (OLIVER et WEBSTER, 1986 ; WALTER, 1990) ; ce dernier type d'échantillonnage est dit imbriqué.

Ces échantillonnages sont orientés soit vers l'estimation spatiale, soit vers l'analyse de la variabilité spatiale, selon respectivement le caractère aléatoire ou le caractère dirigé du choix des points de mesure.

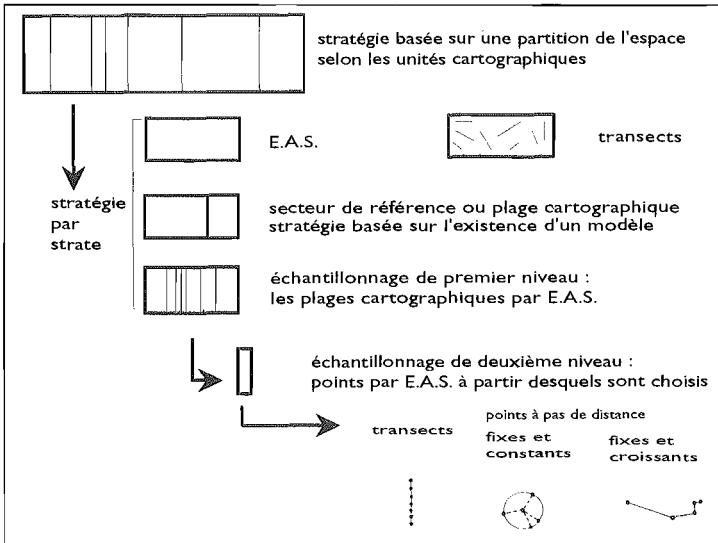


Figure 1 : Différentes stratégies d'échantillonnage pour décrire les unités cartographiques d'une carte pédologique (E.A.S. : Echantillonnage aléatoire simple).

Different sampling strategies for describing the mapping units of a soil map.

2. L'analyse de la variabilité spatiale

Elle consiste principalement à tester la pertinence des différents niveaux d'organisation de la couverture pédologique repérés lors de la cartographie pédologique.

Une première approche, portant sur les critères cartographiques, consiste à caractériser l'homogénéité des unités cartographiques, à partir de la mesure de la concordance entre les observations et la définition de l'unité cartographique. Les calculs d'indices de pureté stricte, moyenne et partielle (BECKETT et WEBSTER, 1971 ; BECKETT et BIE, 1975 ; LEGROS, 1978a et 1978b ; MARSMAN et

GRUIJTER, 1986 ; BREGT *et al.*, 1987 ; GIRARD *et al.*, 1989) s'inscrivent dans cette approche. L'indice de pureté stricte donne le pourcentage d'observations correspondant strictement à la définition de l'unité cartographique, pour l'ensemble des critères cartographiques retenus. L'indice de pureté partielle donne le pourcentage d'observations correspondant à la définition de l'unité cartographique, pour un critère cartographique donné. L'indice de pureté moyenne est la moyenne, pour l'ensemble des critères cartographiques retenus, des indices de pureté partielle. Ces différents indices sont uniquement basés sur les critères cartographiques ; ils rendent compte du pourcentage d'individus ne correspondant pas à la définition de l'unité cartographique, mais non de l'importance des différences.

D'autres approches, portant sur d'autres variables que les critères cartographiques, ont été utilisées. WALTER (1990) calcule un indice de présence/absence des horizons les plus fréquemment observés par unité cartographique. Dans le cas de variables quantitatives, BREGT et BEEMSTER (1989) analysent la variabilité intra-unité cartographique, à partir des écarts des observations sur cette unité à un profil considéré comme représentatif de l'unité cartographique, en calculant l'écart moyen, la moyenne des écarts absolus, et l'écart quadratique moyen. Ils distinguent un écart systématique entre le profil représentatif et la moyenne des profils de l'unité considérée et une erreur aléatoire due à la variabilité des profils au sein de l'unité cartographique.

L'analyse de variance permet *in fine* d'analyser la pertinence du découpage de l'espace proposée par la cartographie pédologique, en comparant la variabilité intra et inter unité cartographique (WILDING *et al.*, 1965 ; WRIGHT et WILSON, 1979 ; McBRATNEY *et al.*, 1982 ; GIRARD *et al.*, 1989 ; LEENHARDT, 1991). Selon la configuration de l'échantillonnage, cette analyse peut être affinée en comparant la variabilité intra et inter plage cartographique, ou même en analysant l'influence de la taille des plages cartographiques (WANG, 1982). L'analyse peut être poursuivie à un niveau plus détaillé encore, lorsque la configuration de l'échantillonnage prend en compte des couples de points séparés par des distances fixes. On peut alors analyser la semi-variance, c'est-à-dire l'écart quadratique moyen entre les couples points séparés par une distance fixe, pour différentes valeurs de distance (Fig. 2). Cette approche permet d'analyser, au sein de la plage cartographique, niveau le plus détaillé de l'analyse cartographique, la structure spatiale des observations. Cette analyse est plus grossière que celle établie à partir de l'analyse du variogramme expérimental, car elle est basée sur un nombre de pas de calcul beaucoup plus restreint. Elle rejoint cependant les approches géostatistiques. On peut ainsi mettre en évidence les principaux niveaux d'organisation de la couverture pédologique et caractériser la variabilité spatiale associée.

3. Les méthodes d'estimation spatiale

La théorie de l'échantillonnage (COCHRAN, 1977) propose un cadre conceptuel pour calculer les estimateurs et les variances d'estimations correspondant aux différents types d'échantillonnage aléatoire retenus. Elle permet ainsi des estimations globales (moyenne, médiane) sur les entités spatiales retenues, considérées comme homogènes. Pour l'estimation, toutes les observations au sein d'une strate ont le même poids, quelle que soit leur position. La typologie cartographique et la position des contours

cartographiques sont explicitement prises en compte dans le choix des entités spatiales retenues, dans le choix de l'échantillonnage, dans le positionnement des points de mesure. Les relations avec d'autres variables liées au paysage, ne sont qu'indirectement prises en compte : ce sont celles que le cartographe a intégré lorsqu'il a effectué le dessin des contours cartographiques. La notion de continuum au sein des strates n'est pas prise en compte : ni la position relative des points de mesure, ni la position des points de mesure par rapport aux limites cartographiques ne sont considérées. Dans le cas d'un échantillonnage aléatoire, il en découle notamment que la redondance d'information entre points de mesure proches ne peut être discriminée. La notion d'hétérogénéité au sein des strates n'est pas non plus prise en compte. L'ensemble de ces observations est sensé être représentatif de l'ensemble de l'unité.

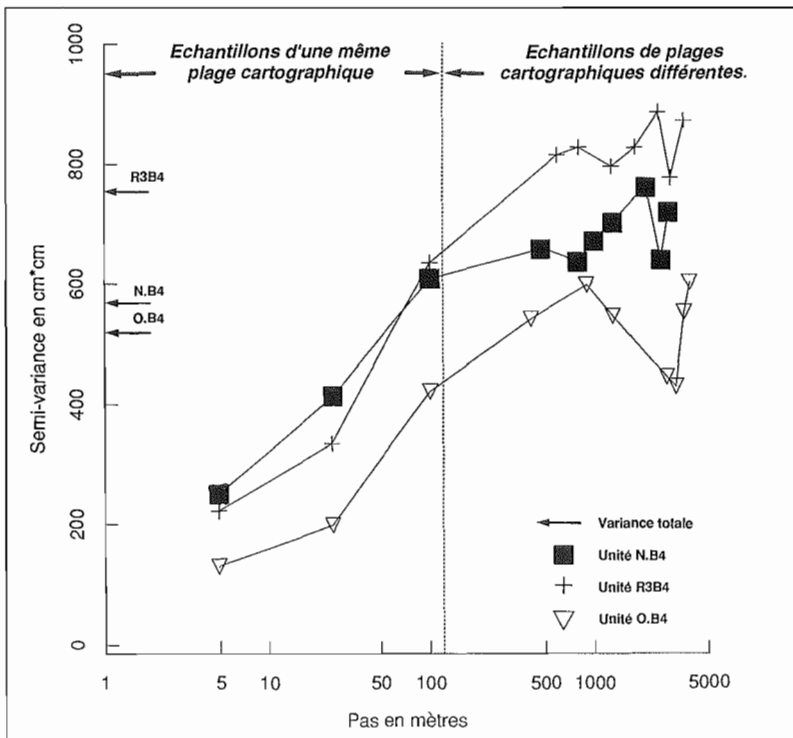


Figure 2 : Semivariance de la profondeur du sol en fonction de la distance entre les observations, à partir d'un échantillonnage imbriqué, pour trois unités cartographiques (d'après WALTER, 1990).

Semivariance of soil depth against the distance between sampling points, with a nested sampling scheme, for three mapping units (in WALTER, 1990).

Cette première approche fondée sur l'analyse cartographique, couplée à un échantillonnage déterministe ou statistique, est ainsi fortement basée sur l'analyse des variations spatiales des critères cartographiques déterminés soit directement à partir de l'analyse de sondages soit indirectement à partir de l'analyse du paysage. L'intégration

de ces deux types d'information, locale et spatiale, n'est pas formelle. Elle rend difficile une quantification de la variabilité spatiale des critères cartographiques au sein des unités cartographiques. Cette quantification est encore plus difficile quand il s'agit de propriétés du sol non retenues comme critères cartographiques. Néanmoins, ces informations cartographiques constituent une base de connaissance importante sur les sols et leur agencement dans l'espace, d'autant qu'elles sont acquises en grand nombre.

Cette approche statistique basée sur la cartographie représente le sol selon un modèle très discontinu, impliquant des variations brutales entre plages cartographiques. Cette approche ne retient qu'une partie de la démarche cartographique : la typologie et le tracé des contours. Ni les caractéristiques des limites, ni la variabilité inter et intra unités, renseignées pour partie dans la démarche cartographique, ne sont prises en compte.

Enfin les possibilités restreintes quant au nombre d'observations conduisent le plus souvent, soit à négliger certaines unités cartographiques, soit à effectuer des regroupements plus ou moins pertinents pour la variable à analyser, diminuant ainsi la pertinence des entités spatiales retenues.

II - LES APPROCHES GEOSTATISTIQUES

Les approches géostatistiques considèrent que les variations des propriétés du sol sont à la fois aléatoires et continues. La distribution spatiale d'une variable, supposée être une réalisation d'un processus aléatoire, est ainsi susceptible de présenter une structure. Celle-ci s'exprime par l'existence d'autocorrélations spatiales entre les observations. L'outil statistique qui permet d'analyser la structure spatiale est le variogramme : il décrit comment la variance d'une propriété mesurée en deux points varie en fonction de la distance entre ces points. Ce formalisme permet ainsi d'exprimer de manière statistique la continuité de la couverture pédologique. Les méthodes d'interpolation issues de ce formalisme, notamment le krigeage, utilisent une moyenne pondérée des observations avoisinantes pour estimer la valeur d'une propriété en un point non échantillonné. La connaissance de la structure spatiale de la propriété étudiée permet de déterminer le poids à affecter à chaque observation pour l'estimation de ce point. L'erreur d'estimation peut être calculée. L'approche géostatistique met ainsi l'accent sur les observations ponctuelles et leur configuration relative, par le biais d'une analyse de la structure spatiale des observations.

1. Le raisonnement de l'échantillonnage

Dans les approches géostatistiques, le choix de l'échantillonnage peut présenter deux objectifs : l'un est la minimisation de l'erreur d'estimation aux points à estimer, ce qui est en définitive recherché ; l'autre est la minimisation de l'erreur d'estimation du variogramme, étape intermédiaire mais déterminante dans la mise en oeuvre du krigeage.

Dans le premier cas, pour minimiser l'erreur d'estimation aux points à estimer, on utilise le fait que, dans le krigeage, cette erreur ne dépend que de la structure spatiale et de la configuration des points de mesure, sans requérir d'observations. Cette analyse peut donc être effectuée *a priori*, pour les configurations d'échantillonnage et les

modèles de structure spatiale les plus courants. Ainsi le choix de modèles types de la structure spatiale -modèle sphérique, exponentiel ou linéaire-, le choix de surfaces d'intégration -en relation avec la distance d'autocorrélation- et enfin le choix de configurations d'échantillonnage types - échantillonnage aléatoire simple ou stratifié, grille carrée ou triangulaire...- permet de calculer l'erreur d'estimation spatiale par krigeage (BURGESS *et al.*, 1981 ; McBRATNEY et WEBSTER, 1983a ; WEBSTER et BURGESS, 1984 ; MUNOZ-PARDO, 1987). Le raisonnement de l'échantillonnage consiste alors à sélectionner la combinaison permettant d'obtenir une erreur d'estimation donnée pour un coût de mise en oeuvre minimal (Fig. 3). Ce raisonnement se heurte à plusieurs inconvénients : d'une part, on ne connaît pas, en général, la structure spatiale *a priori* ; d'autre part, même si un échantillonnage préalable est disponible, on ne disposera que d'une estimation du variogramme réel, qui est sujette à une variabilité suivant la population d'échantillons retenue (TAYLOR et BURROUGH, 1986 ; RUSSO et JURY, 1987 ; 1988) ; enfin la diminution de l'effort d'échantillonnage due à la prise en compte de la structure spatiale apparait, dans certains cas, relativement faible (Fig. 3), compte tenu des faibles distances d'autocorrélation et d'une forte composante aléatoire sur certaines caractéristiques pédologiques (VAUCLIN, 1982 ; GASCUEL-ODOUX, 1987). C'est en particulier le cas des variables hydrodynamiques telles que la conductivité hydraulique.

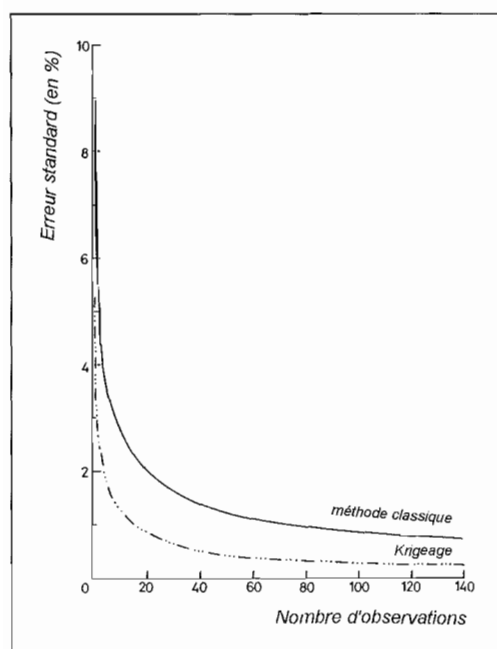


Figure 3 : Erreur standard (en %) en fonction du nombre d'observations (d'après McBRATNEY et WEBSTER, 1983a).

Standard error (%) versus the number of samples (in Mc.BRATNEY and WEBSTER, 1983a).

Dans le second cas, pour minimiser l'erreur d'estimation sur le variogramme, des auteurs ont proposé d'analyser l'influence de la population d'échantillons sur le variogramme expérimental ; la stratégie d'échantillonnage retenue est celle qui permet d'obtenir un estimateur fiable de la structure spatiale. Une première voie est de

rechercher un échantillonnage conduisant à un nombre de couples de points constants à chaque pas de calcul du variogramme expérimental, ce qui permet d'avoir une erreur d'estimation constante quel que soit le pas (RUSSO, 1984 ; WARRICK et MYERS, 1987). Une autre voie, répondant plus directement au problème posé, est soit de générer différentes populations d'échantillons présentant des caractéristiques différentes de configuration ou de structure spatiale (MUNOZ-PARDO, 1987), soit de sous échantillonner parmi un large échantillon réel ou simulé (SHAFER et VARLJEN, 1990 ; ENTZ et CHANG, 1991 ; VAN MEIRVENNE et HOFMAN, 1991 ; GASCUEL-ODOUX et BOIVIN, 1992 ; WEBSTER et OLIVER, 1992). Le choix de l'échantillonnage est fondé sur l'analyse des erreurs entre variogramme expérimental et variogramme théorique (Fig. 4), selon la configuration de l'échantillonnage.

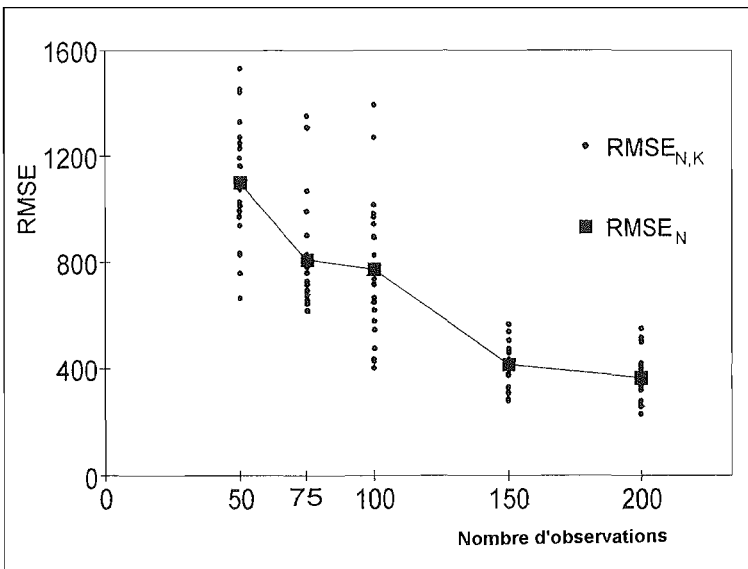


Figure 4 : Évolution des écarts entre un variogramme calculé sur des sous-populations et le variogramme calculé sur la population totale, en fonction du nombre d'observations des sous-populations (d'après GASCUEL-ODOUX et BOIVIN, 1993) :

RMSE_{N,K} : racine carrée de l'écart quadratique moyen pour un tirage de sous-populations

RMSE_N : moyenne des racines carrées de l'écart quadratique moyen de 20 tirages.

Influence of the sample set on the experimental variogram root mean squared error between the experimental variogram and the global variogram, versus the number of samples, for 20 sample sets (adapted from GASCUEL-ODOUX and BOIVIN, 1993).

Ces différentes approches conduisent à des résultats très généraux. Elles convergent pour préconiser l'utilisation de 150 à 200 échantillons au minimum, répartis régulièrement suivant un maillage régulier, sur une surface dont le côté est de 2 à 3 fois la distance d'autocorrélation.

Les structures spatiales, en particulier les distances d'autocorrélation, apparaissent étroitement dépendantes de la variable analysée, mais aussi du terrain d'étude comme le montrent des revues bibliographiques (VAUCLIN, 1982 ; GASCUEL-ODOUX, 1986).

L'inconvénient majeur de ces approches est de choisir l'échantillonnage sur la base d'une structure moyenne estimée à partir de l'ensemble de la zone d'étude, alors que celle-ci peut présenter des juxtapositions de zones à faible et à forte variabilité spatiale, sans permettre d'en juger ou de les prendre en compte dans le choix de l'échantillonnage. Cette hétérogénéité peut expliquer pour partie les forts effets de pépité souvent observés qui diminuent l'intérêt d'une utilisation de ces méthodes.

2. L'analyse de la variabilité spatiale

Elle consiste à étudier les corrélations spatiales entre les points d'observations de façon à définir la structure spatiale sur l'ensemble du domaine étudié. Sous des conditions d'homogénéité spatiale des variations des paramètres étudiés, et pour une variable quantitative, la structure spatiale est estimée en ajustant un modèle au variogramme expérimental, par diverses procédures statistiques dont CRESSIE (1991) donne un compte rendu approfondi. Ces méthodes d'estimation de la structure d'une variable quantitative sont maintenant couramment utilisées en science du sol ; elles se sont étendues d'une part au cas multivarié, d'autre part au cas de variables qualitatives.

Dans le cas multivarié, on étudie de plus l'ajustement de modèles aux différents variogrammes croisés qui peuvent être calculés (Mc BRATNEY et WEBSTER, 1983b). Ces variogrammes croisés rendent compte des corrélations spatiales d'une variable à l'autre. La lourdeur de cette analyse peut être allégée par une approche simplificatrice basée sur l'analyse de la structure spatiale sur des composantes principales (OLIVER, 1984 ; WACKERNAGEL, 1985 ; WALTER, 1990) déterminées par l'analyse en composantes principales, l'analyse des correspondances ou l'analyse des correspondances multiples.

Dans le cas de variables qualitatives ou qualitatives ordonnées, les développements récents (JOURNEL, 1982 ; BIERKENS ET BURROUGH, 1993) reposent sur la transformation préalable de la variable en fonctions binaires dites "indicatrices" : la valeur d'une fonction indicatrice est égale en un point à 1 si la valeur de la variable étudiée est égale (inférieure ou égale pour des variables ordonnées) à un seuil fixé ; elle est égale à 0 sinon. Par suite, l'analyse de la structure spatiale de la variable qualitative étudiée repose sur le calcul des variogrammes de ses différentes fonctions indicatrices (WALTER, 1993). BREGT (1992) utilise ce type d'approche pour étudier la variabilité spatiale de critères cartographiques, souvent notés de façon qualitative.

Le développement de la géostatistique multivariée et de la géostatistique sur des variables qualitatives constitue une ouverture importante vers la prise en compte de l'analyse cartographique dans l'estimation spatiale, par le biais notamment du relevé des critères cartographiques au lieu de sondage. Cette information multivariée et souvent qualitative, peut alors être considérée comme une information complémentaire sur les niveaux d'organisation de la couverture pédologique et avantageuse car souvent recueillie en de nombreux points.

3. Les méthodes d'estimation spatiale

Comme signalé ci-dessus, l'estimation en un point, dans les méthodes géostatistiques, est une moyenne pondérée des observations avoisinantes. Les pondérations visent à minimiser l'erreur d'estimation. Elles prennent en compte la structure spatiale de la variable et la configuration relative des points de mesure : ainsi, en deçà de la distance d'autocorrélation, le poids d'une observation varie inversement à la distance au point à estimer ; au delà de la distance d'autocorrélation, le poids est constant ; ceci rend compte de la continuité spatiale de la variable. Par ailleurs, quand les observations sont regroupées dans l'espace, leurs poids individuels dans l'estimation sont inférieurs à ceux qu'auraient des observations situées à une distance identique du point à estimer, mais plus dispersées ; ceci permet de discriminer les redondances d'information apportées par des points d'observations très proches, donc susceptibles d'être semblables.

Les méthodes géostatistiques ont connu de nombreux développements ces dernières années avec l'élaboration de différentes formes de krigeage adaptées aux caractéristiques des processus à estimer. Pour les variables quantitatives, le krigeage ordinaire, le krigeage universel et le krigeage disjonctif (YATES et WARRICK, 1986) sont les principales méthodes d'estimation géostatistiques. Elles diffèrent principalement par les conditions statistiques requises pour les mettre en oeuvre. Pour les variables qualitatives ou nominales, on utilise le krigeage d'indicatrices (JOURNEL, 1982). Dans le cas de champs multivariés, on a recours au krigeage avec dérive externe, au cokrigeage, au cokrigeage disjonctif (YATES, 1986) ou à l'analyse krigeante (GOULARD *et al.*, 1987 ; WACKERNAGEL, 1988 ; GOOVAERTS, 1992). Ces méthodes permettent de prendre en compte les variations spatiales d'autres variables corrélées à la variable considérée et diffèrent également par les hypothèses requises.

Ces différentes méthodes sont essentiellement le fruit de développements méthodologiques pour l'instant. Leur avantage est de prendre en compte explicitement la structure spatiale, la configuration des points de mesure et les corrélations avec d'autres variables, en particulier avec des variables faciles d'accès tels que les critères cartographiques. L'information prise en compte reste toujours ponctuelle et souvent bidimensionnelle. Leur inconvénient, lorsqu'on dispose d'une cartographie pédologique, est de ne considérer ni les unités cartographiques -et encore moins les horizons pédologiques-, ni les caractéristiques des limites définies par le cartographe. Ainsi ces méthodes d'estimation prennent par exemple mal en compte les fortes variations liées à des limites "abruptes" et/ou à la juxtaposition d'unités très différentes (GASCUEL-ODOUX, 1984 ; VOLTZ et WEBSTER, 1990). Ces méthodes reconnaissent mal des unités cartographiques de petite taille ou de forme allongée qui disposent, dans cette approche géostatistique, de relativement peu de points de mesure : l'échantillonnage est réparti de façon homogène sur toute la surface, et non par unité cartographique. Ces méthodes reconnaissent mal les unités délimitées essentiellement par le cartographe à partir de l'analyse du paysage. C'est le cas par exemple des unités cartographiques de fonds de talwegs (WALTER, 1990). La prise en compte d'un critère cartographique comme covariable, par le cokrigeage, permet cependant d'atténuer ces inconvénients (STEIN *et al.*, 1988a ; 1988b ; 1989), dans le cas où cette covariable présente une densité d'échantillonnage plus grande que celle de la variable étudiée. Il

n'en reste pas moins que l'information utilisée est moindre que dans l'approche précédente puisque seules les observations ponctuelles du sol entrent dans l'analyse statistique.

III - LES APPROCHES COMPARATIVES OU COUPLÉES

Comme on l'a vu, ces deux grandes approches considèrent l'organisation de la couverture pédologique différemment : la première donne un poids important aux discontinuités spatiales, impliquant l'utilisation des niveaux d'organisation spatiale définis par la cartographie pédologique ; la seconde accorde un poids important à la continuité spatiale de la couverture pédologique, impliquant l'utilisation des observations ponctuelles et de leur configuration relative dans l'espace. La complémentarité de ces approches les fait actuellement converger, aboutissant à la mise en oeuvre de travaux comparatifs et à l'émergence d'approches couplées.

1. Le raisonnement de l'échantillonnage

SARNDAL (1978), GRUIJTER et TER BRAAK (1990 ; 1992), BRUS et GRUIJTER (1993) ont clairement mis en évidence les concepts sous-jacents aux deux approches. Dans la géostatistique, fondée sur l'existence d'un modèle de structure spatiale -"model based approach"-, on construit les variables aléatoires en supposant que les valeurs observées sont le résultat d'un tirage au sort. Dans l'approche statistique basée sur la cartographie des sols, fondée quant à elle sur l'existence d'une stratification du milieu -"design based approach"- on suppose au contraire que ce sont les positions des points d'échantillonnage qui sont tirées au sort. Les auteurs soulignent l'intérêt de cette seconde approche pour choisir un échantillonnage, car elle est basée sur des hypothèses moins contraignantes et conduit à des estimations plus robustes. Ils concluent à l'intérêt de développer des études comparatives des deux méthodes, selon différentes stratégies d'échantillonnage et selon différents modèles d'organisation spatiale des propriétés du sol.

Une approche originale est proposée par DOMBURG *et al.* (1993). Elle couple les hypothèses d'un modèle de structure spatiale et d'une partition de l'espace selon différentes entités spatiales. A partir de la construction d'un système à base de connaissance dans lequel les informations pédologiques et statistiques sont intégrées, et supposant connue la structure spatiale de la variable étudiée, globalement ou par strate, une procédure de simulation est développée ; elle permet, par des procédures itératives d'implantation aléatoire de points de mesure, une estimation de l'erreur d'estimation spatiale selon différentes stratégies d'échantillonnage basées sur la théorie classique de l'échantillonnage (E.A.S., strates, grappes). Cette approche constitue sans doute une des voies les plus globales ; elle permet à la fois d'associer les caractères aléatoire, structuré et stratifié des variables pédologiques, et à la fois de créer un système ouvert à l'implantation de nouvelles hypothèses, voire de connaissances, au cours de l'élaboration d'une stratégie d'échantillonnage.

2. l'analyse de la variabilité spatiale et l'estimation spatiale

A partir de comparaisons expérimentales de ces deux approches (VAN KUILENBURG *et al.*, 1982 ; BREGT *et al.*, 1987 ; WALTER, 1990 ; BRUS, 1993) et

de la mise en évidence de leurs limites propres, trois types de stratégies d'estimation spatiale couplant ces deux approches ont été récemment proposés.

La première, très pragmatique, vise à privilégier, en chaque point, la stratégie d'estimation fournissant la variance d'estimation la plus petite. Dans cette approche proposée par HEUVELINK et BIERKENS (1993), l'estimation en un point est la moyenne pondérée des estimations par krigeage et de celles issues de la cartographie des sols, la somme des poids étant égale à 1, leur rapport étant approximativement proportionnel aux variances d'erreur estimées par chacune des méthodes. Cette procédure améliore sensiblement la qualité des estimations faites par krigeage, ceci d'autant plus que le nombre de points de mesure utilisé par le krigeage est faible et que la variance d'erreur sur les estimations issues de la carte des sols est quantifiée de manière fiable par des études précises et systématiques.

La seconde stratégie vise à inclure dans les approches géostatistiques une part de l'information cartographique. Ainsi une solution est de prendre en compte les contours cartographiques en calculant un variogramme par unité cartographique et en limitant le voisinage de krigeage aux points appartenant à l'unité cartographique considérée (GASCUEL-ODOUX, 1984 ; STEIN *et al.*, 1988a ; McBRATNEY *et al.*, 1991). Cependant, on voit bien la lourdeur de cette solution qui requiert un nombre extrêmement important d'échantillons. Pour pallier cet inconvénient, VOLTZ et WEBSTER (1990) définissent un variogramme moyen intra-strate, variogramme qui ne retient que les couples de points pour lesquels les deux points appartiennent à la même unité cartographique, quelle que soit cette unité. On obtient ainsi la structure spatiale moyenne interne à l'unité cartographique et l'on suppose qu'elle est représentative de l'ensemble des unités cartographiques. VAN MEIRVENNE *et al.* (1992) introduisent une alternative au variogramme intra-strate, en proposant un variogramme intra strate relatif, normant chacun des écarts quadratiques calculés entre les couples de points, par la variance estimée sur la strate du couple de points considéré. Seule la forme du variogramme est alors supposée constante pour chaque unité cartographique, et non la variance.

Pour l'estimation spatiale, cette approche conduit au krigeage intra-strate (VOLTZ et WEBSTER, 1990 ; VAN MEIRVENNE *et al.*, 1992) pour lequel on utilise le variogramme intra-strate et un voisinage de krigeage limité aux points appartenant à la même unité cartographique. Cette démarche est étendue au cas du cokrigeage intra-strate, qui procède de même que le krigeage intra-strate, mais qui utilise de plus une autre covariable telle qu'un critère cartographique (STEIN et STARITSKY, 1990) ou une variable paysagique telle que la topographie.

Les hypothèses sous-jacentes de ces méthodes apparaissent encore très contraignantes. Elles supposent en effet que la forme de la structure spatiale soit la même pour chaque strate. La méthode d'estimation spatiale restreint le voisinage de krigeage aux points appartenant à la même strate que le point à estimer, sans prendre en compte en définitive le degré de ressemblance entre des strates géographiquement voisines. Ces méthodes supposent ainsi l'existence de limites abruptes entre les unités cartographiques et on ne considère la continuité spatiale des observations qu'au sein d'une strate donnée. Ces considérations sont cependant à moduler lorsqu'une covariable, critère cartographique ou paysagique tel que la topographie, comportant une densité d'échantillonnage plus forte, est retenue.

GEOSTATISTIQUE ET CARTOGRAPHIE DES SOLS

La comparaison de ces méthodes d'estimation spatiale couplées avec les approches uniquement basées sur la carte des sols ou avec les méthodes géostatistiques montre effectivement un gain sur la précision des estimations spatiales. STEIN *et al.* (1988a) notent, dans un secteur de sols sableux des Pays-Bas, un gain moyen de précision de 10 % sur les estimations du déficit hydrique moyen en employant le co-krigeage intra-strate plutôt que des estimations moyennes intra-strates. VOLTZ et WEBSTER (1990) comparent la qualité de l'estimation spatiale du taux d'argile de l'horizon de surface par l'emploi de moyennes intra-strates, du krigeage simple ou du krigeage intra-strate : dans un secteur de l'Angleterre sur sédiments jurassiques, à limites de sol localement abruptes, ils observent des erreurs quadratiques moyennes, respectivement pour ces trois méthodes, de 65,2, 49,9 et 46,3 % ; dans un autre secteur de Savoie (France), en milieu alluvial et à limites de sols plus graduelles, ces erreurs sont respectivement de 28,4, 21,2 et 20,8 %. Ainsi, le gain de précision apporté par le couplage de méthodes géostatistiques avec une cartographie pédologique peut être élevé ou faible, voire non significatif (BRUS, 1993). Ce gain apparaît d'autant plus élevé que le milieu étudié présente des limites abruptes et que la carte pédologique servant à la stratification est précise.

Une troisième approche, plus prospective en l'état actuel, mérite d'être citée. C'est celle basée sur la théorie des ensembles flous (ZADEH, 1965) dont l'application dans l'analyse cartographique peut être interprétée comme une généralisation de la notion de strate : les unités cartographiques restent collectivement exhaustives mais ne sont plus mutuellement exclusives ; un point de mesure n'est plus associé à une unité cartographique donnée mais est associé aux différentes unités cartographiques par différents degrés d'appartenance. Cette approche permet de rendre compte de la continuité spatiale des points de mesure, définie à partir des critères cartographiques et/ou d'autres variables. Son application, en l'état actuel, permet la construction d'une typologie des sols (McBRATNEY et GRUIJTER, 1992), qui permet d'apprécier les écarts des observations ponctuelles à une typologie de référence (KING, 1987 ; BURROUGH, 1989). C'est donc une méthode d'analyse de la variabilité spatiale qui doit pouvoir *in fine* améliorer le problème de l'estimation spatiale en prenant en compte la qualité des contours cartographiques et les ressemblances entre unités cartographiques, sur la base de critères cartographiques ou paysagiques (BURROUGH *et al.*, 1992). La configuration spatiale des observations est intégrée ensuite, en krigant ou cokrigant les différents degrés d'appartenance aux unités cartographiques définies en chacun des points d'observation (Mc BRATNEY *et al.*, 1992 ; ODEH *et al.*, 1992 ; 1993).

En définitive, les premières tentatives de couplage ont consisté à appliquer les techniques géostatistiques au sein de strates qui sont les unités cartographiques de la carte pédologique : les unités cartographiques sont alors considérées comme indépendantes entre elles et leurs limites toutes abruptes. On peut penser que les développements à venir vont tenter de s'affranchir de cette vision simplificatrice et tenir compte de la nature des limites (abruptes, graduelles, précises, peu précises) et du degré de ressemblance entre les unités cartographiques : la théorie des ensembles flous peut conduire, pour partie, à une telle évolution, en permettant une affectation modulée des poids aux points voisins pour l'estimation d'un point donné.

CONCLUSION

L'importance donnée à la variabilité spatiale des propriétés du sol, confirmée par de nombreuses études expérimentales, a remis en cause les possibilités d'utiliser la seule carte des sols pour améliorer le raisonnement de l'échantillonnage et la qualité des estimations spatiales. Le développement important de la géostatistique ces dernières années a privilégié la continuité latérale de la couverture pédologique, abordée globalement par le biais de l'analyse de la structure spatiale des processus aléatoires considérés. On assiste actuellement à une réintroduction progressive de l'information apportée par l'analyse cartographique, combinant les caractéristiques naturelles des propriétés des sols : continuum et stratification, caractère structuré et aléatoire des variations spatiales.

Le couplage des méthodes géostatistiques à celles basées sur l'analyse cartographique vise à lever les imperfections des deux approches. En introduisant la notion de strate dans le variogramme et le krigeage, on cherche à se rapprocher des hypothèses de stationnarité sous-jacentes à ces méthodes, hypothèses qui ne sont plus valides dans le cas de limites abruptes. En introduisant l'étude de la dépendance spatiale entre les observations au sein des strates, on cherche à tester l'hypothèse sous-jacente d'indépendance entre les observations d'une même strate. Il reste à ce niveau à conceptualiser la pertinence du choix de telle ou telle approche suivant des considérations sur les caractéristiques des sols et des variables étudiées.

Les informations issues de l'analyse cartographique utilisées dans les méthodes d'estimation spatiale sont essentiellement : le découpage cartographique, par l'utilisation de la notion de strate ; l'analyse paysagique et la typologie cartographique, par l'utilisation de covariables telles que les critères cartographiques ou les variables paysagiques. On peut principalement attribuer cette évolution aux nombreux travaux expérimentaux qui ont mis en évidence, par des études de la variabilité spatiale, les niveaux d'organisation et les facteurs pertinents des variations spatiales des propriétés du sol.

Les informations sur les relations de voisinages entre unités cartographiques, voire entre horizons cartographiques, ainsi que celles sur les caractéristiques des contours cartographiques sont par contre peu utilisées dans le cadre de l'estimation spatiale. Ces aspects, qui ont fait l'objet de travaux (GIRARD, 1983 ; BURGESS et WEBSTER, 1984 ; GREZBYK, 1991 ; BURROUGH, 1992 ; GOURRU, 1992 ; LAGACHERIE, 1992), sont insuffisamment formalisés pour être utilisés dans le cadre de l'estimation spatiale. Ce formalisme peut venir soit de démarches déterministes sur la recherche des facteurs d'organisation des sols en liaison avec leur pédogénèse, soit de démarches statistiques basées sur la théorie des probabilités. L'étude de ces aspects pourrait constituer une des voies d'amélioration de l'estimation spatiale, en modulant le poids à attribuer aux points voisins du point à estimer, selon le degré de ressemblance et la proximité des unités cartographiques des points considérés, selon également la qualité de la limite cartographiée.

Remerciements : Les auteurs tiennent à remercier D. King et un autre lecteur anonyme qui par leurs remarques ont permis d'enrichir une première version de cet article.

Reçu pour publication : septembre 1993
Accepté pour publication : décembre 1993

BIBLIOGRAPHIE

- AMEYAN O., 1986 - Surface soil variability of a map unit on Niger River alluvium. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **50**, 1289-1293.
- BAIZE D., 1986 - Couvertures pédologiques, cartographie et taxonomie. *Science du Sol*, **24** (3), 227-243.
- BECKETT P.H.T., BIE S.W., 1975 - Reconnaissance for soil survey. I. Pre-survey estimates of the density of soil boundaries necessary to produce pure mapping units. *J. Soil Sci.*, **26**, 144-154.
- BECKETT P.H.T., WEBSTER R., 1971 - Soil variability: A review. *Soils fert.*, **34**, 1-15.
- BIERKENS M.F.P., BURROUGH P.A., 1993 - The indicator approach to categorical soil data. I. Theory. *J. Soil Sci.*, **44**, 361-368.
- BOULAIN J., 1980 - *Pédologie appliquée*. Ed. Masson, 220 p.
- BOUMA J., 1989 - Using soil survey data for quantitative land evaluation. In : *Advances in Soil Science*, Stewart B.A. (Ed), Springer Verlag, Berlin, IX, 177-213.
- BREGT A.K. 1988 - Quality of representative profile descriptions for predicting the land quality moisture deficit at different scales. In : *Land Qualities in Space and Time*. Bouma et Bregt (Eds). Pudoc Wageningen, 169-172.
- BREGT A.K., 1992 - *Processing of soil survey data*. Chap. 4: Mapping ordinal data in soil survey: a Costa Rican example. PHD-thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 167 p.
- BREGT A.K., BEEMSTER J.G.R., 1989 - Accuracy in predicting moisture deficits and changes in yield from soil maps. *Geoderma*, **43**, 301-310.
- BREGT A.K., BOUMA J., JELLINEK M., 1987 - Comparison of thematic maps derived from a soil map and from kriging of point data. *Geoderma*, **39**, 281-291.
- BRUS D.J., 1993 - *Incorporating models of spatial variation in sampling strategies for soil*. Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, (xii) + 211 p.
- BRUS D.J., GRUIJTER De J.J., 1993 - Design-based versus model-based estimates of spatial means. Theory and application in environmental soil science. *Environmetrics*, **4**, 123-152.
- BURGESS T.M., WEBSTER R., 1984 - Optimal sampling strategies for mapping soil types. II. Risks functions and sampling intervals. *J. Soil Sci.*, **32**, 643-659.
- BURGESS T.M., WEBSTER R., McBRATNEY A.B., 1981 - Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. IV. Sampling strategy. *J. Soil Sci.*, **32**, 643-659.
- BURROUGH P., 1989 - Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. *J. Soil Sci.*, **40**, 447-493.
- BURROUGH P., 1992 - Development of intelligent geographical information systems. *Int. J. Geographical information systems*, **6**, 1-11.
- BURROUGH P., McMILLAN R.A., VAN DERSEN W., 1992 - Fuzzy classification methods for determining land suitability from soil profile observations and topography. *J. Soil Sci.*, **43**, 193-210.
- CASENAVE A. et VALENTIN C., 1989 - *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. ORSTOM, Collection "Didactiques", 230 p.
- COCHRAN W.G., 1977 - *Sampling technics*. Wiley & Sons, 428 p.

- C.P.C.S., 1967 - *Classification des sols; Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols*. Doc. Multi., INRA Grignon, 96 p.
- CRESSIE N., 1991 - *Statistics for spatial data*. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. 900 p.
- DOMBURG P., GRUIJTER J.J., BRUS D.J., 1993 - A structured approach to designing soil survey schemes with prediction of sampling error from variograms. *Geoderma*, sous presse.
- ENTZ T., CHANG C., 1991 - Evaluation of soil sampling schemes for geostatistical analyses: a case study for bulk density. *Can. J. Soil Sci.*, **71**, 165-176.
- GASCUEL-ODOUX, C., 1984 - *Application de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol*. INRA - ENSMP, Thèse de DDI, Rennes, 233 p.
- GASCUEL-ODOUX C., 1986 - Variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol, méthodes et résultats ; cas d'une seule variable : revue bibliographique. *Agronomie*, **7**, 61-71.
- GASCUEL-ODOUX C., BOIVIN P., 1993 - Variability of sample variograms and spatial estimates according to soil sampling: a case study. *Geoderma* (sous presse).
- GIRARD M.C., 1983 - *Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique*. Thèse Doct. d'Etat, Univ. Paris VII, Sols, **12**, 430 p.
- GIRARD M.C., AUROUSSEAU P., KING D., LEGROS J.P., 1989 - Apport de l'informatique à l'analyse spatiale de la couverture pédologique et à l'exploitation des cartes. *Science du Sol*, **27**(4), 335-350.
- GOOVAERTS P., 1992 - *Multivariate geostatistical tools for studying scale-dependent correlation structures and describing space-time variations*. PHD thesis, Université catholique de Louvain, 63 p.
- GOOVAERTS P., GERARD G., FRANKART R., 1988 - Etude de la variabilité spatiale de quelques propriétés chimiques du sol en Fagne de Chimay, Belgique. *Pédologie*, **39**, 191-207.
- GOULARD M., VOLTZ M., MONESTIEZ P., 1987 - Comparaison d'approches multivariées pour l'étude de la variabilité spatiale des sols. *Agronomie*, **7**(9), 657-665.
- GOURRU M., 1992 - *Description des sols du bassin versant de référence de Naizin (Morbihan)*. Mémoire de D.A.A., ENSA Rennes, 44 p.
- GRUIJTER De J.J., MARSMAN B.A., 1984 - Transect sampling for reliable information on mapping units. *Proceedings of workshop of AISS and SSSA*, Las Vegas, USA, Pudoc Wageningen. 150-165.
- GRUIJTER De J.J., Ter BRAAK C.J.F., 1990 - Model-free estimation from spatial samples: a reappraisal of classical sampling theory. *Math. Geol.*, 407-415.
- GRUIJTER De J.J., Ter BRAAK C.J.F., 1992 - Design-based versus model-based sampling strategies: comment on R.J. Barnes "bounding the required sample size for geologic site characterisation. *Math. Geol.*, **7**, 859-864.
- GRZEBYK M., 1991 - *Etude quantitative de séquences pédologiques*. Mémoire de D.E.A., ENSMP, Fontainebleau, 42 p.
- HEUVELINK G.B.M., BIERKENS M.F.P., 1993 - Combining soil maps with interpolations from point observations to predict quantitative soil properties. (sous presse dans *Geoderma*).
- IRIS J.M., 1986 - Analyse et interprétation de la variabilité spatiale de la densité apparente dans trois matériaux ferrallitiques. *Science du Sol*, **24**, 245-256.

GEOSTATISTIQUE ET CARTOGRAPHIE DES SOLS

- JOURNAL A., 1982 - *The indicator approach to estimation of spatial distributions*. Proceedings of the 17 th APCOM International symposium, T.B. JOHNSON et R.J. BARNES editeurs, Society of mining engineers of the american institute of mining, metallurgical and petroleum engineers Publ., New York, 713-806.
- KING D., 1986 - Modélisation de l'approche cartographique du comportement des sols. *Science du Sol*, **25** (2), 107-121.
- KING D., 1987 - Modélisation de l'approche cartographique du comportement des sols. *Science du Sol*, **25** (2), 107-121.
- KING D. et GIRARD M.C., 1988 - Réflexion sur la classification des profils de la couverture pédologique. Proposition d'un algorithme: VLADIMIR. *Science du Sol*, **26** (4), 239-254.
- LAGACHERIE P., 1992 - *Formalisation des lois de distribution des sols pour automatiser la cartographie pédologique à partir d'un secteur de référence. Cas de la petite région naturelle, Moyenne vallée de l'Hérault*. Thèse de doctorat, Univ. Montpellier II, 175 p.
- LEENHARDT D., 1991 - *Spatialisation du bilan hydrique. Propagation des erreurs d'estimation des caractéristiques du sol au travers des modèles de bilan hydrique. Cas du blé dur d'hiver*. Thèse de doctorat, ENSA Montpellier, 129 p.
- LEENHARDT D., VOLTZ M., BORNAND M., WEBSTER R., 1993 - Evaluating soil maps for prediction in Languedoc. Soumis à *J. Soil Science*.
- LEGROS J.P., 1978a - Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique. I: Précision dans la délimitation des sols. *Ann. Agro.*, **29** (5), 499-519.
- LEGROS J.P., 1978b - Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique. II: Précision dans la caractérisation des unités de sols. *Ann. Agro.*, **29** (6), 583-601.
- MARSMAN B.A., GRUIJTER de J.J., 1986 - *Quality of soil maps. A comparison of soil survey methods in a sandy area*. Soil Survey papers, 15, Stiboka, Wageningen, 103 p.
- MATHERON G., 1965 - *Les variables régionalisées et leur estimation*. Masson, Paris, 305 p.
- McBRATNEY A.B., GRUIJTER de J.J., 1992 - A continuum approach to soil classification by modified fuzzy k-means with extragrades. *J. Soil Sci.*, **43**, 159-175.
- McBRATNEY A.B., HART G.A., McGARRY D., 1991 - The use of region partitioning to improve the representation of geostatistically mapped soil attributes. *J. Soil Sci.*, **42**, 513-532.
- McBRATNEY A.B., WEBSTER R., 1983a - How many observations are needed for regional estimation of soil properties? *Soil Sci.*, **135**, 177-183.
- McBRATNEY A.B., WEBSTER R., 1983b - Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. V. Corregionalization and multiple sampling strategy. *J. Soil Sci.*, **34**, 137-162.
- McBRATNEY A.B., WEBSTER R., McLAREN R.G., SPIERS R.B., 1982 - Regional variation of extractable copper and cobalt in the topsoil of south-east Scotland. *Agronomie*, **2**, 969-982.
- MUNOZ-PARDO J.F., 1987 - *Approche géostatistique de la variabilité spatiale des milieux géophysiques. Application à l'échantillonnage de phénomènes bi-dimensionnels par simulation d'une fonction aléatoire*. Thèse de DDI, Grenoble, 254 p.

- ODEH I.O.A., McBRATNEY A.B., CHITTLEBOROUGH D.J., 1992 - Fuzzy-c-means and kriging for mapping soil as a continuous system. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **56**, 1848-1854.
- ODEH I.O.A., McBRATNEY A.B., de GRUIJTER J.J., 1993 - A comparison of kriging methods for mapping of continuous soil classes. *Geoderma* (sous presse).
- OLIVER M.A., 1984 - *Soil variations in the Wyre Forest: its elucidation and measurement*. PhD Thesis, University of Birmingham, 230 p.
- OLIVER M.A., WEBSTER R., 1986 - Combining nested and linear sampling for determining the scale and form of spatial variation of regionalized variables. *Geographical Analysis*, **18**, 227-242.
- RUSSO D., 1984 - Design of an optimal sampling network for estimating the variogram. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **48**, 708-716.
- RUSSO D., JURY W.A., 1987 - A theoretical study of the estimation of the correlation scale in spatially variable fields. 1. Stationary fields. *Water Resour. Res.*, **23**, 1257-1268.
- RUSSO D., JURY W.A., 1988 - Effect of the sampling network on estimates of the covariance function of stationary fields. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **52**, 1228-1234.
- SARNDAL C.E., 1978 - Design-based and model-based inference in survey sampling. *Scand. J. Statist.*, **5**, 27-52.
- SHAFFER J.M., VARLJEN M.D., 1990 - Approximation of confidence limits on sample semi-variograms from single realisations of spatially correlated random fields. *Water Resour. Res.*, **26**, 1787-1802.
- STEERS C.A., HAJEK B.F., 1979 - Determination of map unit composition by a random selection of transects. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **43**, 156-160.
- STEIN A., 1991 - *Spatial interpolation. Chap1.1: Are nested designs recommendable for spatial semivariogram estimation*. PHD thesis, Wageningen, 41-70.
- STEIN A., STARITSKY I.G., 1990 - Stratified cokriging to predict simulated moisture deficits for areas of land as compared to calculated soil unit averages. *Proceedings of EGIS*, Amsterdam, 1070-1080.
- STEIN A., HOOGERWERF M., BOUMA J., 1988a - Use of soil map delineations to improve (co-) kriging of point data on moisture deficits. *Geoderma*, **43**, 163-177.
- STEIN A., VAN DOOREMOLEN W., BOUMA J., BREGT A.K., 1988b - Cokriging point data on moisture deficit. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **52**, 1418-1423.
- STEIN A., BOUMA J., KROONENBERG S.B., COBBEN S., 1989 - Combining soil classification with (co-) kriging of moisture deficits. In: *Land qualities in space and time*, edited by J. BOUMA and A.K. BREGT, Pudoc, Wageningen, 205-208.
- TAYLOR C.C., BURROUGH P., 1986 - Multiscale sources of spatial variation in soil. III. Improved methods for fitting the nested model to one dimensional semivariograms. *Math. Geol.*, **18**, 811-821.
- THOMAS P.J., BAKER J.C., SIMPSON T.W., 1989 - Variability of the Cecil Map unit in Appomattox County, Virginia. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **53**, 1470-1474.
- VAN KUILENBERG J., GRUIJTER de J.J., MARSMAN B.A., BOUMA J., 1982 - Accuracy of spatial interpolation between point data on soil moisture supply capacity, compared with estimates from mapping units. *Geoderma*, **27**, 311-325.
- VAN MEIRVENNE M., HOFMAN G., 1989 - Spatial variability of soil texture in a polder area 1. Kriging. *Pédologie*, **39**, 69-87.

GEOSTATISTIQUE ET CARTOGRAPHIE DES SOLS

- VAN MEIRVENNE M., HOFMAN G., 1991 - Sampling strategy for quantitative soil mapping. *Pédologie*, **41**, 263-275.
- VAN MEIRVENNE M., SCHELDEMAN K., BAERT G., HOFMAN G., 1992 - Quantification of soil textural fractions of the Bas-Zaïre using soil map polygons and/or point observations. *Proceedings of Pedometrics-92: Developments in Spatial Statistics for Soil Science*, 1-3 sept. 1992, Wageningen, 222-238.
- VAUCLIN M., 1982 - Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés du sol. Les colloques de l'INRA. In : *Variabilité spatiale des processus de transfert dans les sols*, **15**, 9-43.
- VOLTZ M., 1986 - *Variabilité spatiale des propriétés physiques du sol en milieu alluvial*. INRA, Thèse de DDI, ENSA Montpellier, 198 p.
- VOLTZ M., WEBSTER R., 1990 - A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. *J. Soil Science*, **41**, 473-490.
- WACKERNAGEL H., 1985 - *L'inférence d'un modèle linéaire en géostatistique*. Thèse ENSM, Paris, 100 p.
- WACKERNAGEL H., 1988 - Geostatistical techniques for interpreting multivariate spatial information, in: *Quantitative analysis of mineral and energy resources*. Proceedings of the NATO conference, C.F. Chung (Ed.), Reidel, Dordrecht, 392-409.
- WALTER C., 1990 - *Estimation de propriétés du sol et quantification de leur variabilité à moyenne échelle. Cartographie pédologique et géostatistique dans le Sud de l'Ille-et-Vilaine (France)*. Thèse Univ. Paris VI, 172 p.
- WALTER C., 1993 - L'estimation de propriétés du sol par krigeage d'indicatrices confrontée à celle dérivées d'une carte pédologique. *Science du Sol*, **31**, 4.
- WANG C., 1982 - Variability of soil properties in relation to size of map unit delineation. *Can J. Soil Sci.*, **62**, 657-662.
- WANG C., 1984 - La méthode du transect et son application aux problèmes de la prospection pédologique. *Bul. Tech. 1984-4F de la Direction Générale de la Recherche du Canada*, 35 p.
- WARRICK A.W., MYERS D.E., 1987 - Optimisation of sampling locations for variogram calculations. *Water Resour. Res.*, **23**, 496-500.
- WEBSTER R., BURGESS T.M., 1984 - Sampling and bulking strategies for estimating soil properties in small regions. *J. Soil Sci.*, **35**, 127-140.
- WEBSTER R., OLIVER M.A., 1990 - *Statistical methods in soil and land resource survey*. Spatial Information Systems, Oxford University Press, 316 p.
- WEBSTER R., OLIVER M.A., 1992 - Sample adequately to estimate variograms of soil properties. *J. of Soil Science* **43**, 177-192.
- WILDING L.P., JONES R.B., SCHAFER G.M., 1965 - Variation of soil morphological properties within Miami, Celina, and Crosby mapping units in West-Central Ohio. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **29**, 711-717.
- WRIGHT R.L., WILSON S.R., 1979 - On the analysis of soil variability, with an example from Spain. *Geoderma*, **22**, 297-313.
- YATES S.R., 1986 - Disjunctive kriging. 3. Cokriging. *Water Resour. Res.*, **22**, 1371-1376.
- YATES S.R., WARRICK A.W., 1986 - Disjunctive kriging. 1. Overview of estimation and conditional probability. *Water Resour. Res.*, **22**, 615-621.
- ZADEH L.A., 1965 - Fuzzy sets. *Inf. Control*, **8**, 338-353.

