

L'estimation de propriétés du sol par krigeage d'indicateurs confrontée à celle dérivée d'une carte pédologique.

C. WALTER*

RÉSUMÉ

Le krigeage d'indicateurs est appliqué sur un secteur vallonné de 1565 hectares du sud de l'Ille-et-Vilaine pour cartographier la profondeur du sol et la classe d'hydromorphie en se basant sur l'échantillonnage ayant servi à l'établissement d'une carte pédologique.

Cette technique est une méthode non paramétrique adaptée au traitement de variables qualitatives ou ordonnées. Elle permet d'obtenir une carte d'estimation de la propriété mais également des cartes donnant la probabilité que la propriété dépasse une valeur-seuil. De plus, elle permet, pour une même propriété, de montrer des structures spatiales différentes selon les classes retenues.

Confrontées aux cartes dérivées de la carte pédologique, les cartes krigées révèlent les mêmes traits majeurs mais s'avèrent plus lissées. Un échantillonnage indépendant de vérification indique que la carte pédologique constitue un estimateur de précision équivalente au krigeage d'indicateurs pour la profondeur du sol et meilleur pour la classe d'hydromorphie. Cette confrontation montre qu'une grande part des limites de la carte pédologique ne peuvent se justifier par les seules observations ponctuelles du sol. On met ainsi en évidence l'importance de l'information liée aux facteurs extrinsèques du sol (topographie, végétation) dans le tracé de la carte pédologique.

Mots-clés : géostatistique - krigeage d'indicateurs - carte pédologique - variabilité spatiale..

COMPARISON OF SOIL PROPERTIES ESTIMATION USING INDICATOR KRIGING AND SOIL MAP BASED DATA.

Indicator kriging has been applied on a 1565 ha area in Brittany (France) to map soil depth and soil wetness classes (Tab. 1 and Fig. 1) from the sampling scheme also used to establish the soil map.

Indicator kriging is a distribution-free geostatistical procedure which enables spatial analysis of multistate variables (Fig. 2). This technique gives not only an estimation map or the property (Fig. 4), but also the probability maps of cutoff overstep (fig. 3).

The kriged maps show the same major trends of the spatial variation as the maps derived from the soil map, but much more smoother (Figs 4 and 5). An independent sampling procedure indicates that the prediction by the soil map is more precise for soil

* ENSA-INRA - Laboratoire de Science du Sol - 65, rue de Saint-brieuc - F 35042 Rennes Cedex

wetness classes than by indicator kriging and of equivalent precision for soil depth (Tab. III).

The probabilities that the actual values are those of the soil map estimations are in general small (Fig. 6). Therefore, such a comparison emphasises the importance given by the soil surveyor to the landscape features for locating the limits of the soil map patches.

Keywords : geostatistics - indicator kriging - soil survey - spatial variability.

INTRODUCTION

Dès lors qu'on s'attache à décrire la variabilité spatiale des propriétés du sol sur des secteurs de superficie importante, le problème majeur réside toujours dans la faiblesse de l'échantillonnage par rapport à l'objet étudié (LEGROS, 1978). La cartographie pédologique tente de résoudre cette difficulté en tenant compte, non pas uniquement des seules observations ponctuelles du sol, mais également des variations d'autres composantes du milieu (topographie, végétation, géologie) qui paraissent liées à des variations du sol. Néanmoins, cette approche, intégrant une information non recueillie dans des fiches de sondages, ne permet pas une description statistique de la qualité des documents cartographiques obtenus.

Confrontés à l'estimation de propriétés du sol sur de vastes secteurs, de nombreux auteurs ont de ce fait employé des techniques géostatistiques pour pouvoir quantifier la précision des estimations faites (Mc BRATNEY *et al.*, 1982 ; XU et WEBSTER, 1984 ; Van Der ZAAG *et al.*, 1984 ; OVALLES et COLLINS, 1988).

Les études comparant les deux types d'approche restent peu nombreuses. Menées dans des régions à topographie peu marquée, elles concluent à une précision similaire des deux méthodes (Van KUILENBERG *et al.*, 1982 ; BREGT *et al.*, 1987). Mais la géostatistique employée dans ces études étant de type linéaire, cette comparaison n'a pu se faire que sur la base de variables continues (épaisseur de l'horizon Ap, réserve utile des sols...), alors que la majorité des variables décrites dans une cartographie pédologique sont de type qualitatif ou ordonné (BREGT, 1992).

Le krigeage d'indicatrices est une technique géostatistique, initiée par JOURNAL, (1983), qui permet l'étude de propriétés qualitatives ou ordonnées. Il ne suppose aucune hypothèse préalable sur la fonction de répartition de la variable étudiée. Il présente donc des qualités de robustesse qui le rendent intéressant dans de nombreuses études du sol où les données quantitatives sont rares et où les hypothèses classiques sur la loi de distribution d'une propriété ne peuvent être vérifiées.

Les objectifs de ce travail sont doubles :

- tester l'intérêt du krigeage d'indicatrices, peu employé jusque là en Science du Sol, pour cartographier sur des secteurs de quelques milliers d'hectares, des propriétés du sol qualitatives ordonnées;

- comparer les cartes obtenues par cette technique à celles dérivées d'une carte pédologique. En confrontant ces deux méthodes, nous voulons qualifier la nature de l'information contenue dans une carte pédologique.

I - MATÉRIEL

1. Le secteur d'étude et sa cartographie pédologique

Le secteur d'étude est situé à une trentaine de kilomètres au sud de Rennes (Ille-et-Vilaine, France) et correspond à un périmètre de 1565 ha. Sur le plan géologique, ce secteur appartient à une unité synclinoriale, orientée suivant une direction (sud sud-est - nord nord-ouest), constituée d'une succession de schistes et de grès d'âge primaire. La topographie du secteur d'étude est fortement liée à sa structure géologique : l'alternance de formations de dureté variable à induit un modelé de crêtes et de dépressions parallèles. Les grès constituent souvent les parties hautes du relief à des altitudes d'environ 100 mètres, alors que les formations de schiste tendre correspondent aux versants et aux bas-fonds, entre 50 et 80 mètres d'altitude.

Ce secteur a fait l'objet d'une cartographie pédologique à l'échelle du 1/25 000 (RIVIERE *et al.*, 1993) fondée sur une approche classique : (1) l'emplacement du sondage est laissé au libre choix du cartographe ; (2) le regroupement des observations se fait sur la base de quatre critères cartographiques jugés pertinents sur le domaine d'étude : le substrat, la classe d'hydromorphie, le type de profil et la profondeur du sol ; (3) le tracé des limites est fait au champ en s'appuyant sur les modifications topographiques, de l'état de surface du sol ou de la végétation.

Cette carte montre la relative homogénéité des sols quant à leur type de profil : nommés suivant le Référentiel Pédologique Français, ils sont de type «Brunisol mésosaturé» dans les zones de plateaux ou de versants et de type «Rédoxisol» dans les bas-fonds hydromorphes. Par contre, la profondeur des sols, leur état d'engorgement et le substrat sur lesquels ils se sont développés, sont très variables.

2. Les variables retenues

Les variables retenues sont la profondeur du sol et la classe d'hydromorphie, disponibles dans l'ensemble des sondages.

La profondeur du sol correspond à la profondeur d'apparition du substrat géologique mesurée à la tarière, mesure dont la précision peut être estimée à plus ou moins 10 cm. Cette variable est ordonnée par le cartographe en six classes de profondeur croissante (Tableau I).

Tableau I : Codage et définition des classes de profondeur du sol et d'hydromorphie.
Codification and definition of soil depth and soil water regime classes.

| Profondeur du sol | Classe d'hydromorphie |
|-------------------------------|---|
| 1 comprise entre 0 et 20 cm | 1 Absence de taches d'oxydo-réduction |
| 2 comprise entre 20 et 40 cm | 2 Taches d'oxydo-réduction peu abondantes au-delà de 80 cm |
| 3 comprise entre 40 et 60 cm | 3 Taches d'oxydo-réduction abondantes au-delà de 80 cm |
| 4 comprise entre 60 et 80 cm | 4 Taches d'oxydo-réduction peu abondantes entre 40 et 80 cm |
| 5 comprise entre 80 cm et 1 m | 5 Taches d'oxydo-réduction abondantes entre 40 et 80 cm |
| 6 de plus de 1 m | 6 Taches d'oxydo-réduction peu abondantes dès la surface |
| | 7 Taches d'oxydo-réduction abondantes dès la surface |
| | 8 Pseudogley généralisé |
| | 9 Pseudogley généralisé avec gley en profondeur |

La détermination de la classe d'hydromorphie prend en compte à la fois la profondeur d'apparition et l'abondance des taches d'oxydo-réduction (Tableau I), qui sont des critères révélateurs des durées de saturation des sols par l'eau (VIZIER, 1992). La classe d'hydromorphie est donc interprétée comme une variable qualitative ordonnée, rangée en 9 classes d'hydromorphie croissante.

Les distributions de fréquence de ces deux variables sont de types différents (Fig. 1) ; l'histogramme de la profondeur du sol est unimodal avec un mode centré sur 70 cm, le diagramme en bâtons de la classe d'hydromorphie est plurimodal avec certaines classes très peu représentées sur le secteur d'étude.

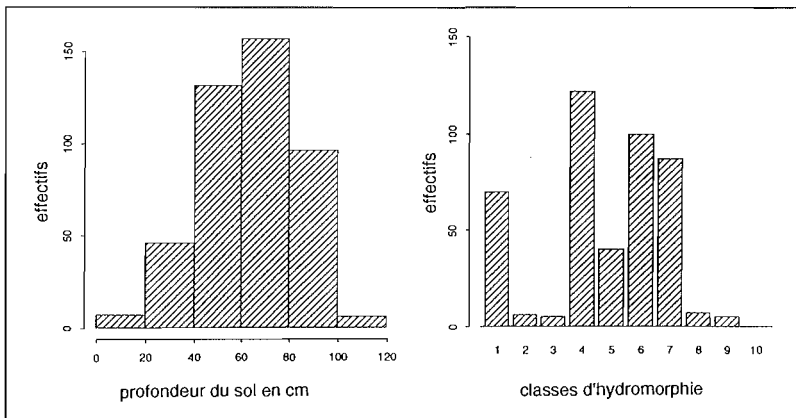


Figure 1 : Histogramme de la profondeur du sol et diagramme en bâtons de l'hydromorphie.

Histogram of soil depth and barplot of soil water regime classes.

3. L'échantillon de départ

L'échantillon de départ est celui ayant servi à la fois au levé de la carte pédologique et à la mise en oeuvre de l'analyse géostatistique. il s'agit de 458 sondages à la tarière distants en moyenne de 130 mètres. Le principe d'échantillonnage a été le suivant : le cartographe détermine les emplacements des sites d'observation sur le terrain, sans plan d'échantillonnage préconçu, mais à des intervalles réguliers.

Un tel échantillonnage présente des risques de biais. Dans notre cas, le nombre d'observation par unité de surface est inférieur à la densité d'observations moyenne dans certaines situations jugées atypiques ou sans intérêt par le cartographe : à proximité des haies, dans les zones boisées, dans les bas-fonds très hydromorphes. Ce principe d'échantillonnage a néanmoins été retenu, car il s'avère moins contraignant qu'un plan prédéterminé.

4. L'échantillon de vérification

L'échantillon de vérification est constitué de 60 points choisis aléatoirement et indépendamment de la cartographie pédologique et de l'analyse géostatistique. Une contrainte a été imposée dans le choix de ces points, à savoir leur appartenance à des

zones de plateaux ou de versants. En effet, les zones de bas-fonds ayant été sous-échantillonnées, une comparaison des méthodes d'estimation incluant ces zones aurait été biaisée.

II - MÉTHODES

1. L'estimation dérivée de la cartographie pédologique

Les deux variables retenues, la profondeur du sol et la classe d'hydromorphie, participent à la définition des unités cartographiques de la carte pédologique. En un point quelconque, on peut donc estimer ces deux variables en lui affectant la modalité de l'unité cartographique à laquelle il appartient.

2. L'estimation par krigeage d'indicatrices

a) Les raisons du choix de cette technique

Le choix du krigeage d'indicatrices comme outil d'estimation spatial est lié aux caractéristiques des variables que nous étudions.

La profondeur du sol est une variable continue, susceptible de faire l'objet d'une analyse classique par krigeage linéaire (Webster et Burgess, 1983 ; Walter, 1990) : à titre de comparaison, nous présenterons par la suite une carte de profondeur du sol obtenue par ce type de krigeage. Mais, l'erreur sur la mesure est importante, de l'ordre de 10 cm. De plus, l'interprétation est souvent fondée sur un regroupement de cette variable en classes plutôt que sur sa mesure brute.

La classe d'hydromorphie est une variable qualitative ordonnée. La lecture de la définition de ses classes (Tableau I) montre de plus que leur étendue n'est pas régulière. Le calcul d'une combinaison linéaire entre ces classes est donc difficilement interprétable, ce qui exclut l'emploi dans ce cas du krigeage linéaire.

Ce constat nous a amené à rechercher une méthode autre que le krigeage linéaire qui permette le traitement de variables qualitatives ordonnées. La méthode dite du *krigeage d'indicatrices* satisfait à cette condition.

b) Présentation du krigeage d'indicatrices

Le krigeage d'indicatrices, initié par JOURNEL (1983), a déjà fait l'objet de présentations mathématiques (DAVIS, 1984 ; JOHNSON et DREISS, 1989 ; CRESSIE, 1991 ; BIERKENS et BURROUGH, 1993 a). Nous en exposons le principe en nous limitant au cas particuliers des variables qualitatives et ordonnées.

L'idée de base du krigeage d'indicatrices consiste à effectuer l'analyse spatiale non pas directement de la propriété étudiée, mais des différentes fonctions dites «indicatrices» issues d'un codage binaire de cette propriété.

Soit Z la variable étudiée connue par ses réalisations $z(x_i)$ en des points de coordonnées x_i . Considérons une valeur z_c de la variable Z et définissons une fonction binaire I telle que pour tout point d'échantillonnage :

$$\begin{cases} I(x_i, z_c) = 1 & \text{si } z(x_i) \leq z_c \\ I(x_i, z_c) = 0 & \text{si } z(x_i) > z_c \end{cases} \quad (1)$$

On qualifie I de fonction indicatrice («indicator function») de z_c de valeur-seuil

("cutoff"). Cette définition de la fonction indicatrice tient compte du caractère ordonné de la variable étudiée.

Une telle fonction indicatrice présente des propriétés intéressantes (RIVOIRARD, 1990), en particulier son espérance est égale à la probabilité que $Z(x)$ soit inférieur ou égal à z_c : $E(I(x, z_c)) = P(Z(x) \leq z_c)$.

Les étapes de la mise en oeuvre du krigeage d'indicatrices sont au nombre de quatre. Elles supposent une stationnarité stricte de la propriété étudiée (CRESSIE, 1991).

1. *Le choix des différentes valeurs-seuil* conditionne l'ensemble des estimations pouvant être faites par la suite et dépend des objectifs poursuivis. Si le but réside dans l'estimation des valeurs d'une propriété, les différentes valeurs-seuil doivent correspondre aux caractéristiques majeures de l'histogramme de la propriété (DAVIS, 1984). Mais dans de nombreuses études appliquées, ce n'est pas tant la valeur même d'une propriété qui est intéressante que sa probabilité de dépasser un certain seuil, qui peut être de toxicité, de décision... Le choix des valeurs-seuil est guidé dans ce cas par l'interprétation de la variable, indépendamment de son histogramme de fréquence.

2. La seconde étape réside dans le calcul du variogramme des fonctions indicatrices définies par le choix des valeurs-seuil. Le variogramme de cette fonction s'écrit :

$$\begin{aligned} \gamma(h, z_c) &= 1/2E\{[I(x, z_c) - I(x+h, z_c)]^2\} \\ &= P(Z(x) \leq z_c) - P(Z(x) \leq z_c \text{ et } Z(x+h) \leq z_c) \end{aligned} \quad (2)$$

où : h est la distance géographique séparant les points, z_c est la valeur seuil retenue.

Ce variogramme peut être estimé à partir des observations par :

$$\gamma_*(h, z_c) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [I(x_i, z_c) - I(x_i+h, z_c)]^2 \quad (3)$$

où $N(h)$ est le nombre de couples d'observations distants de $h \pm \Delta h$.

3. L'estimation dans l'espace de la fonction indicatrice I , pour chacune des valeurs-seuil retenues, se fait en ajustant un modèle sur le variogramme empirique défini par l'équation (3) et en employant ce modèle dans une procédure de krigeage linéaire.

En un point x_0 , on estime donc la valeur de l'indicatrice $I^*(z_0, z_c)$ suivant :

$$I^*(x_0, z_c) = \sum_{i=1}^n \lambda_i I(x_i, z_c) \quad (4)$$

où : n est le nombre de points expérimentaux pris en compte dans l'estimation, λ_i est le poids affecté au point expérimental x_i .

Ainsi, du fait de la définition de la fonction indicatrice, on calcule par (4) une valeur comprise en théorie entre 0 et 1 qui est *une estimation en un point donné de la probabilité que la valeur de Z soit inférieure ou égale à la valeur seuil z_c* choisie. Si on fait varier les valeurs-seuil entre les classes minimales et maximales, on estime ainsi en tout point la fonction de la répartition de la variable Z étudiée.

On notera néanmoins qu'en règle générale, des modèles structuraux sont ajustés de façon indépendante aux variogrammes expérimentaux (3) des différentes fonctions indicatrices, pour estimer ces fonctions en tout point suivant (4). De ce fait, on peut

KRIGEAGE D'INDICATRICES ET CARTOGRAPHIE PEDOLOGIQUE

observer des problèmes de monotonie dans l'estimation de la fonction de répartition de Z : la relation théorique peut ne pas être assurée en certains points, ce qui nécessite l'emploi de procédures de correction postérieures au krigeage (JOURNEL, 1983 ; DAVIS, 1984).

Ces corrections faites, on peut, par différence entre les estimations des fonctions indicatrices pour deux valeurs-seuil consécutives, estimer en tout point la probabilité que la variable soit égale à une valeur-seuil donnée.

4. La dernière étape consiste en l'estimation de la valeur $z^*(x_0)$ de la propriété Z en un point quelconque x_0 connaissant sa fonction de densité. Deux voies pour une telle estimation sont envisagées ici.

- Calculer l'espérance de la valeur de la propriété.

Cette technique tient compte des probabilités associées à chacune des valeurs-seuil et la précision de l'estimation peut être cernée par le calcul d'une variance d'estimation. Par contre, elle ne peut être employée que pour des variables continues ou des variables qualitatives ordonnées dont l'étendue des classes est régulière. Cette technique est employée par Davis (1984) pour estimer des teneurs en or.

- Retenir la valeur-seuil dont la probabilité est la plus grande.

Cette méthode peut être employée dans tous les cas. Elle ne tient néanmoins pas compte des probabilités non nulles d'occurrence des autres valeurs-seuil. La précision de l'estimation est indiquée par la probabilité associée à cette valeur-seuil. Cette méthode est employée par (BIERKENS et BURROUGH 1993b) pour estimer des profondeurs d'apparition de nappe.

III. RÉSULTATS

1. Variogrammes des fonctions indicatrices

Le krigeage d'indicatrices suppose en premier lieu le choix d'un certain nombre de valeurs-seuil et la transformation de la variable étudiée en fonctions indicatrices. Dans une optique de confrontation avec la carte pédologique, les valeurs-seuil, retenues sont celles adoptées par la carte pédologique. De la sorte, cinq valeurs-seuil notées de 1 à 5 ont été retenues pour la profondeur du sol : 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 et 100 cm, et cinq autres pour la classe d'hydromorphie (en excluant les classes très peu représentées) : classe 1, classe 4, classe 5, classe 6, classe 7.

Pour chaque propriété, le variogramme moyen de chacune des cinq fonctions indicatrices a été calculé jusqu'à une distance de 2,5 km avec un pas de 0,1 km (fig. 2). L'aspect d'un tel variogramme est fonction, comme pour les variogrammes classiques, de la ressemblance entre les observations distantes d'un pas donné. Mais, l'ordre de grandeur des semi-variances dépend également de l'effectif des classes délimitées par les valeurs-seuil : les semi-variances d'événements rares ou prédominants sont ainsi généralement faibles comme le montre l'équation (2).

Pour aider à la lecture de ces variogrammes, plaçons-nous par exemple dans le cas d'une observation de classe d'hydromorphie inférieure ou égale à 4. Le variogramme de la fonction indicatrice 2 de cette propriété montre que la probabilité de rencontrer des sols de classe d'hydromorphie supérieure strictement à 4, va croître jusqu'à une distance d'un kilomètre puis se stabiliser. A travers sa pépite, ce même variogramme

indique que cette probabilité est déjà grande à une distance inférieure à 100 mètres.

L'observation des variogrammes d'indicateurs montre que la variabilité spatiale de la profondeur du sol et de la classe d'hydromorphie comporte deux composantes principales. l'une est structurée et est caractérisée par une croissance des variogrammes d'indicateurs vers un palier d'ordre kilométrique : c'est le cas des indicateurs correspondant aux sols peu ou moyennement profonds (indicateurs 3 et 4) et celles des sols non ou peu hydromorphes (indicateurs 2 et 3). L'autre composante de cette variabilité est aléatoire : elle est révélée par l'importance de l'effet de pépite dans tous les cas, mais est surtout marquée pour les indicateurs des sols très profonds et des sols très hydromorphes (fonctions indicatrices 5) pour lesquelles le variogramme est de type pépitique pur.

La calcul des variogrammes de différentes fonctions indicatrices pour une propriété donnée permet donc de mettre en évidence des structures spatiales différentes suivant la valeur-seuil retenue.

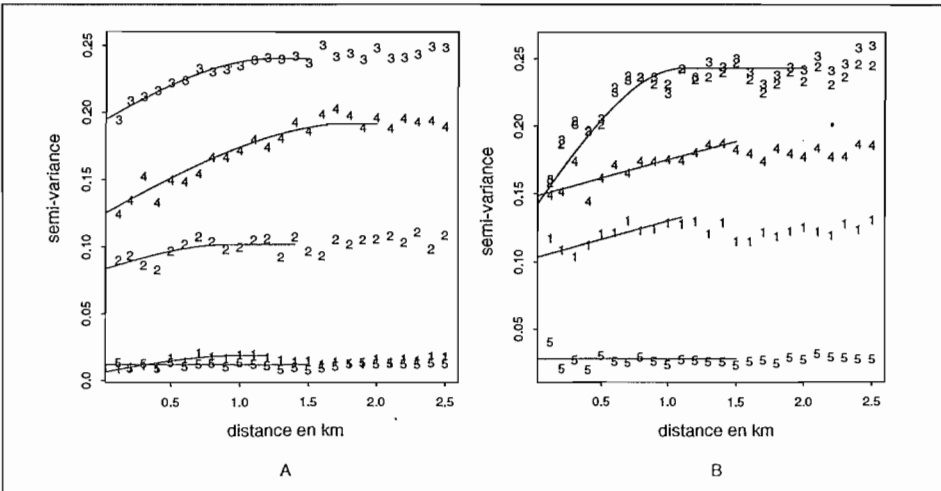


Figure 2 : Variogramme moyens des cinq fonctions indicatrices de la profondeur du sol (A) et de la classe d'hydromorphie (B).

Mean variograms of the five indicator functions of soil depth (A) and soil water regime (B).

2. Les estimations par krigeage

a) L'estimation des fonctions indicatrices

La première étape consiste en l'estimation par krigeage ponctuel ordinaire des différentes fonctions indicatrices retenues. Pour cela, on a retenu une grille régulière de pas 50 mètres aux noeuds de laquelle les estimations sont faites.

L'ajustement de modèles aux variogrammes expérimentaux des différentes fonctions indicatrices est fondé sur une technique non linéaire de minimisation par moindres carrés grâce au logiciel Geopack (YATES et YATES, 1989). Les paramètres des modèles retenus sont indiqués dans le tableau II.

Différents tests ont été effectués pour vérifier que le choix du modèle d'ajustement ou la prise en compte d'une éventuelle anisotropie par ajustement de modèles sur les

KRIGEAGE D'INDICATRICES ET CARTOGRAPHIE PEDOLOGIQUE

variogrammes directionnels, n'avaient pas d'incidences significatives sur les résultats de l'estimation par krigeage (WALTER, 1990). Les raisons en sont liées à l'importance prépondérante à l'effet de pépite des différents variogrammes, rendant négligeables les différences induites par le choix des modèles.

Tableau II : Paramètres des modèles ajustés aux variogrammes d'indicatrices.

Parameters of the models fitted on the indicator function variograms.

| Fonction indicatrice | Type | Pépite | Pente | Palier-pépite | Portée (km) |
|------------------------------|-----------|--------|-------|---------------|-------------|
| <i>Profondeur du sol</i> | | | | | |
| 1 | Sphérique | 0,006 | - | 0,013 | 1,02 |
| 2 | Sphérique | 0,083 | - | 0,019 | 0,92 |
| 3 | Sphérique | 0,194 | - | 0,047 | 1,24 |
| 4 | Sphérique | 0,124 | - | 0,068 | 1,82 |
| 5 | Linéaire | 0,012 | 0 | - | - |
| <i>Classe d'hydromorphie</i> | | | | | |
| 1 | Linéaire | 0,103 | 0,027 | - | - |
| 2 | Sphérique | 0,140 | - | 0,103 | 1,12 |
| 3 | Sphérique | 0,140 | - | 0,103 | - |
| 4 | Linéaire | 0,028 | 0,027 | - | - |
| 5 | Linéaire | 0,028 | 0,000 | - | - |

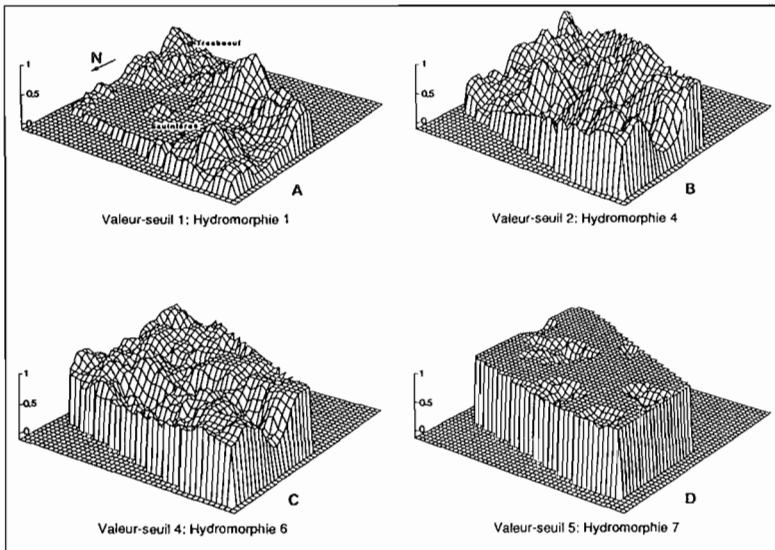


Figure 3 : Blocs-diagrammes des estimations par krigeage de quatre fonctions indicatrices de la classe d'hydromorphie. Le secteur est présenté à partir d'une vue nord-ouest.

Perspective diagrams of the kriging estimations of four indicator functions. The area is shown from north-west.

L'emploi de ces modèles pour le krigeage permet d'estimer en tout point la valeur de chacune des fonctions indicatrices. La figure 3 représente ces estimations sous forme de blocs diagrammes pour quatre fonctions indicatrices de la classe d'hydromorphie. A

titre d'exemple, le bloc diagramme de la fonction indicatrice 1 montre des valeurs proches de 0 dans les parties nord-est et centrale : la probabilité d'y trouver des sols sans traces d'hydromorphie y est donc très faible. Au contraire, dans la partie nord-ouest, les valeurs de cette même fonction indicatrice sont de l'ordre de 0,6 : les sols sains y présentent donc une probabilité d'occurrence élevée.

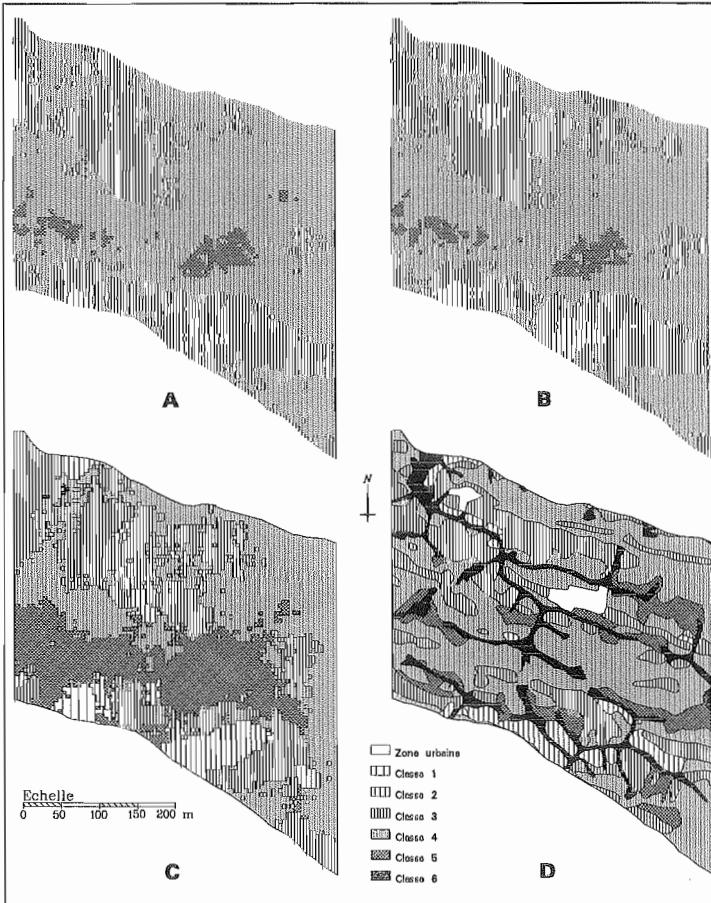


Figure 4 : Cartes de la profondeur du sol obtenues par les différentes méthodes testées : par krigeage linéaire (carte A) ; par krigeage d'indicatrices en représentant l'espérance (Carte B) ; par krigeage d'indicatrices en représentant la classe probabilité maximale (carte C) ; par extraction de la carte pédologique (carte D).

Soil depth map by indicator kriging with different estimates : by linear kriging (A) ; by indicator kriging showing expectation of the soil depth class (B), by indicator kriging showing largest probability of occurrence class (C) ; derived from the soil map (D).

La cartographie des différentes indicatrices permet ainsi de visualiser la probabilité que la propriété étudiée dépasse différentes valeurs-seuil. Ces cartes fournissent donc déjà une description spatiale des variations de la propriété.

b) L'estimation de la propriété

La dernière étape de l'approche par krigeage d'indicatrices consiste en l'estimation de la propriété étudiée, connaissant en tout point une réalisation de sa fonction de répartition.

La profondeur du sol étant une variable de type continue, il est possible de comparer deux types d'estimateur, l'un fondé sur le calcul de l'espérance de la propriété en tout point (type E), l'autre fondé sur la classe de probabilité maximale (type P).

Les figures 4.B et 4.C présentent les cartes obtenues avec ces deux méthodes d'estimation sur le secteur d'étude. La structure générale des deux cartes est similaire, montrant l'existence de sols peu profonds au nord et au sud du secteur d'étude et de sols profonds dans la partie centrale. Néanmoins, l'emploi de l'espérance conduit à une carte beaucoup plus lissée gommant toute variation de faible étendue.

A titre de comparaison, la figure 4.A présente la carte obtenue par l'emploi du krigeage linéaire sur les mesures de profondeur du sol, avec un modèle sphérique de pépite 266 cm^2 , de palier 398 cm^2 et de portée 1,2 km (WALTER, 1990). Les estimations du krigeage linéaire ont été regroupées suivant les classes du tableau I pour obtenir une carte comparable à celles issues du krigeage d'indicatrices. Il en ressort que les estimations du krigeage linéaire sont très proches de celles du krigeage d'indicatrices de type E : en effet, l'écart absolu moyen entre les estimations de ces deux méthodes est de 1 cm et la variance des écarts de 5 cm^2 .

Dans un objectif de comparaison avec la carte pédologique, nous préférons retenir l'estimateur de type P, qui traduit mieux la variabilité des observations sur le jeu de données. La précision des estimations faites de la sorte est fournie par leur probabilité associée. Sur le secteur d'étude, excepté certaines zones particulièrement homogènes, cette probabilité est comprise entre 0,4 et 0,6. La précision de la carte obtenue semble donc relativement faible, puisqu'on a généralement plus de 40 % de chances que la vraie valeur soit différente de celle prédite. Cette faible précision n'est pas surprenante si on se rappelle l'importance de l'effet pépite des variogrammes étudiés, traduisant la variabilité importante à faible distance.

3. Comparaison des cartes obtenues

a) Comparaison visuelle

La comparaison des cartes obtenues par krigeage d'indicatrices en utilisant un estimateur de type P, avec les cartes dérivées de la carte pédologique, est d'abord fondée sur une comparaison visuelle.

L'exemple de la profondeur du sol montre (Fig. 4.C et 4.D) que les deux types de carte indiquent les mêmes structures générales, à savoir une proportion plus importante de sols peu profonds dans les parties nord-ouest et sud du secteur.

Néanmoins, la différence d'aspect entre les deux types de carte est nette : à partir de la carte pédologique, les nombres de plages cartographiques sont respectivement de 149 pour la profondeur du sol et de 212 pour la classe d'hydromorphie. Ces mêmes chiffres sont de 86 et 71 pour les cartes krigées. La carte pédologique induit donc un découpage important de la couverture pédologique non révélé par le krigeage. Par ailleurs, les cartes dérivées de la carte pédologique expriment les structures liées aux talwegs sous forme de sols profonds et hydromorphes. Ces structures n'apparaissent pas dans les

cartes krigées, ce qui s'explique en partie par le sous-échantillonnage de ces zones. Mais la largeur de ces zones est comprise entre 50 et 150 mètres, soit l'ordre de grandeur de la distance moyenne entre sondages. Ces zones de talwegs n'auraient donc pu être reconnues par krigeage qu'avec un échantillonnage beaucoup plus dense.

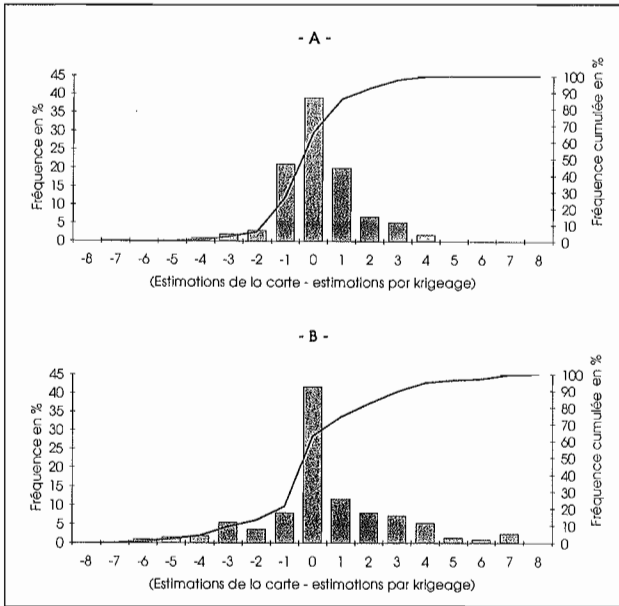


Figure 5 : Histogrammes des écarts entre les estimations de la carte pédologique et les estimations par krigeage d'indicatrices : profondeur du sol (A), classe d'hydromorphie (B).

Histograms of the differences between the estimations derived from the soil map and the estimations by indicator Kriging. Differences are calculated on the 6252 nodes of a 50 m square grid, for soil depth (A) and soil water regime (B).

b) Comparaison des estimations aux noeuds d'une grille

La comparaison des estimations faites par les deux approches aux 6252 noeuds d'une grille régulière de pas 50 mètres permet de quantifier cette première approche visuelle. Les histogrammes des différences d'estimation (Fig. 5) sont centrés sur 0. Ils montrent que dans 40 % des cas pour la profondeur du sol et 45 % des cas pour la classe d'hydromorphie, les estimations entre les deux méthodes sont identiques. Des écarts d'estimation de plus de deux classes sont rencontrés dans 20 % des cas pour la profondeur du sol et 38 % des cas pour la classe d'hydromorphie.

c) Comparaison par rapport à un échantillonnage indépendant

Les soixante points de vérification choisis aléatoirement sur des zones de versant ou de plateau permettent de confronter les valeurs estimées à des valeurs observées.

Le tableau III fournit les principaux critères statistiques des écarts entre valeur estimée et valeur mesurée. Le rang moyen (LASLETT *et al.*, 1987) constitue une

KRIGEAGE D'INDICATRICES ET CARTOGRAPHIE PEDOLOGIQUE

méthode non paramétrique permettant de classer les deux méthodes. Affectons le rang 1 à la méthode donnant en un point la meilleure estimation, le rang 2 à l'autre. Le rang moyen d'une méthode est égal à la moyenne arithmétique de ses rangs pour l'ensemble des points de vérifications. De la sorte, la méthode fournissant en moyenne les estimations les plus précises, aura un rang moyen proche de 1, le rang moyen de l'autre méthode tendant vers 2.

Pour la profondeur du sol, la moyenne des écarts montre que la carte pédologique sous-estime la profondeur effective alors que le krigeage d'indicatrices la surestime. Mais la moyenne des valeurs absolues des écarts et le rang moyen des deux méthodes sont similaires. Par rapport à cette propriété, la qualité d'estimation des deux méthodes est donc équivalente.

Tableau III : paramètres statistiques des écarts entre les valeurs estimées par la carte pédologique ou le krigeage d'indicatrices et les valeurs observées en 60 points indépendants de vérification.

Statistical parameters of the differences between estimations by the soil map or by indicator kriging and observed values at 60 random independent points.

| | Profondeur du sol | | | Classe d'hydromorphie | | |
|--------------------------------------|--------------------|---|------------|-----------------------|---|------------|
| | Moyenne des écarts | Moyenne de la valeur absolue des écarts | Rang moyen | Moyenne des écarts | Moyenne de la valeur absolue des écarts | Rang moyen |
| Estimations par la carte pédologique | -0,6 | 1,4 | 1,5 | -0,5 | -0,9 | 1,3 |
| Estimations par le krigeage | 0,4 | 1,5 | 1,5 | 1,6 | 2,0 | 1,7 |

Pour la classe d'hydromorphie, la carte pédologique est un estimateur plus précis que le krigeage d'indicatrices : la moyenne des écarts et la valeur absolue des écarts présentent des valeurs nettement plus faibles que celle du krigeage. Les rangs moyens traduisent cette tendance puisqu'ils montrent que les estimations les plus proches des valeurs mesurées sont dans 70 % des cas celles obtenues par la carte pédologique.

IV - DISCUSSION

Les objectifs de ce travail étaient doubles. D'une part, on a voulu tester l'intérêt du krigeage d'indicatrices pour cartographier des propriétés du sol à moyenne échelle. D'autre part, on a voulu comparer les cartes obtenues par krigeage à celles dérivées de la carte pédologique.

Le krigeage d'indicatrices présente un certain nombre de propriétés intéressantes dans le domaine de la cartographie des sols. C'est une méthode non paramétrique permettant le traitement de variables qualitatives. Par ailleurs, en fixant de façon judicieuse les valeurs-seuil, par exemple au niveau de seuils de décision, on peut cartographier les secteurs où cette valeur seuil sera dépassée, et cela avec une probabilité connue. A ce titre, elle complète les techniques géostatistiques déjà couramment utilisées en Science du Sol. Cette technique permet de plus, de révéler

pour une variable des structures spatiales différentes selon ses classes. Par exemple, sur notre secteur, les variogrammes des indicatrices des sols peu profonds ont des portées plus faibles que ceux des sols moyennement profonds. Ce comportement correspond bien au fait que les zones de sols peu profonds sont souvent d'extension réduite dans le Massif Armoricain.

Cette technique présente néanmoins des difficultés théoriques liées au fait que l'on estime de façon indépendante les différentes fonctions indicatrices, alors que les structures spatiales des différentes indicatrices ne sont pas indépendantes (RIVOIRARD, 1993). Cela peut conduire localement à des probabilités négatives d'appartenir à l'intervalle entre deux seuils consécutifs : des corrections postérieures au krigeage, peu fondées théoriquement, sont alors nécessaires. Des évolutions récentes de ce type d'approche, connues sous le terme de «probability kriging» (JOURNEL, 1984 ; CARR et MAO, 1993) semblent résoudre des difficultés théoriques et méritent d'être testées en Science du Sol.

La comparaison des cartes krigées et des cartes dérivées de la carte pédologique montre qu'elles ont les mêmes structures générales, mais les cartes krigées présentent un aspect beaucoup plus lissé. Ainsi, pour un échantillonnage au départ identique, les deux méthodes conduisent à des cartes sensiblement différentes.

La raison principale est liée à l'information environnementale (topographie, végétation...) prise en compte par le pédologue pour tracer ses limites. L'importance de cette information non contenue dans les sondages apparaît clairement si on croise les estimations de la carte pédologique avec les résultats du krigeage d'indicatrices.

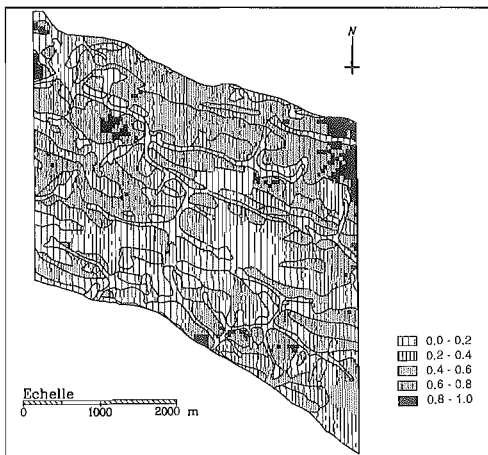


Figure 6 : Carte des probabilités d'après le krigeage d'indicatrices que la classe de profondeur du sol soit celle prédite par la carte pédologique.

Probability map by indicator kriging that the soil depth class is the class predicted by the soil map.

En effet, on peut associer à tout point la probabilité que la valeur de la propriété étudiée soit égale à celle estimée par la carte pédologique. Cette probabilité pour la profondeur du sol. Au nord du secteur, les estimations de la carte pédologique ont une probabilité d'occurrence de 0,6 à 0,9 donc élevée. Par contre, dans les zones de talwegs et certaines plages cartographiques de la partie centrale, cette probabilité est beaucoup plus faible, de l'ordre de 0,1 à 0,4. Ces estimations ne peuvent s'expliquer que si on admet qu'une information non contenue dans les sondages a été injectée dans l'analyse.

KRIGEAGE D'INDICATRICES ET CARTOGRAPHIE PEDOLOGIQUE

Dans un milieu à topographie marquée et où les caractéristiques des sols sont dépendantes en partie de l'occupation des terres, il est légitime que le cartographe s'appuie sur ces facteurs pour tracer les limites de sa carte. On peut en espérer un gain important en matière d'échantillonnage.

Cette idée que la carte pédologique permette un découpage préalable à l'analyse géostatistique se développe. Différents auteurs considèrent les unités cartographiques comme un ensemble de strates dont on décrit ensuite la variabilité par des techniques statistiques (VOLTZ et WEBSTER, 1990 ; STEIN, 1993).

Cette approche qui s'appuie sur la carte pédologique risque néanmoins de rencontrer deux difficultés. D'une part, les plages cartographiques des cartes pédologiques sont souvent très nombreuses (ROGALA, 1982). La quantification de leur variabilité suppose donc un effort d'échantillonnage important. D'autre part, les limites et le contenu de ces unités cartographiques sont parfois imprécis, comme le montre la confrontation avec des données indépendantes effectuées ci-dessus. Le gain apporté par une stratification risque ainsi d'être faible.

L'objectif consiste donc à valoriser l'information non ponctuelle contenue dans la carte pédologique en minimisant le risque de s'appuyer sur des découpages non pertinents. Pour cela, il est important que le pédologue indique clairement sur son document cartographique dans quelles situations le tracé des limites a pu être effectué avec certitude et dans quelles autres situations le tracé est plus incertain. Cela peut se faire simplement dans les Systèmes d'Information Géographique en renseignant les limites des plages cartographiques : on distingue par exemple les limites localisées avec précision de celles qui le sont moins (GIRARD, 1983 ; GOURRU, 1992). Cette information simple permettrait un découpage plus pertinent de la couverture pédologique en strates, caractérisées ensuite par une approche statistique.

CONCLUSION

L'outil géostatistique ne se limite pas au traitement d'une seule variable continue : les développements récents de ces techniques en particulier ceux du co-krigeage (STEIN *et al.*, 1989), du krigeage factoriel (GOOVAERTS, 1992) et du krigeage d'indicatrices, permettent la prise en compte simultanée de plusieurs variables et le traitement de données qualitatives.

L'atout majeur d'une cartographie pédologique ne réside donc plus dans le traitement des données mais dans l'intégration dans la cartogénèse de lois de distribution des sols reliant les observations ponctuelles du sol aux variations, plus faciles d'accès, d'autres éléments du paysage. Cette information n'est utile aux utilisateurs de la carte pédologique que si le cartographe fournit une indication spatialisée de la précision de sa démarche.

Remerciements : l'auteur tient à remercier P. Monestiez et M. Goulard (INRA Avignon) qui, par leur lecture critique, ont permis d'améliorer une première version de cet article.

Reçu pour publication : mai 1993

Accepté pour publication : novembre 1993

BIBLIOGRAPHIE

- BIERKENS M.F.P., BURROUGH P.A., 1993 a - The indicator approach to categorical data. I. Theory. *J. Soil Sci.*, **44**, 361-368.
- BIERKENS M.F.P., BURROUGH P.A., 1993 b - The indicator approach to categorical data. II. Application to mapping and land use suitability analysis. *J. Soil Sci.*, **44**, 369-381.
- BREGT A.K., 1992 - *Processing of soil survey data*. PhD-thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 167 p.
- 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
- CARR J.R., MAO N.H., 1993. - A general form of probability kriging for estimation of the indicator and uniform transforms. *Math. Geol.*, **25** (4), 425-438.
- CRESSIE N.A.C., 1991 - *Statistics for spatial data*. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, New York, 900 p.
- DAVIS B.M., 1984 - Indicator kriging as applied to an alluvial gold deposit. In : *Geostatistics for Natural resources Characterisation*. Part I., G. Verly et al. (EDS), D. Reidel Publishing Company, 337-348.
- GIRARD M.C., 1983 - *Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique*. Thèse Doct. d'Etat. Sols, INA Paris-Grignon, **12**, 430 p.
- GOOVAERTS, 1992 - Factorial kriging analysis : a useful tool for exploring the structure of multivariate spatial information. *J. Soil Sci.*, **43**, 597-619.
- GOURRU M., 1992 - *Description spatiale des sols du bassin-versant de référence de Naizin (Morbihan)*. Mémoire de DAA, ENSA Rennes, 44 p.
- JOHNSON N.M, DREISS S.J., 1989 - Hydrostratigraphic interpretation using indicator geostatistics. *Water Resources Research*, **25** (12), 2501-2510.
- JOURNAL A.G., 1983 - Nonparametric estimation of spatial distributions. *Math. Geol.*, **15**, 445-468.
- JOURNAL A.G., 1984. - The place of non-parametric geostatistics. In : *Geostatistics for Natural Resources Characterisation*. Part. I., G. Verly et al. (Eds), D. Reidel Publishing Company, 307-335.
- KUILENBERG Van 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.
- LASLETT G.M., Mc BRATNEY A.B., PAHL P.J., HUTCHINSON M.F., 1987 - Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. *J. Soil Sci.*, **38**, 325-341.
- LEGROS J.P., 1978 - Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique. II. Précision dans la caractérisation des sols. *Ann. Agron.*, **29** (6), 583-601.
- McBRATNEY A.B., WEBSTER R., MCLAREN R.G., SPIERS R.B., 1982 - Regional variation of extractible copper and cobalt in the topsoil of south-east Scotland. *Agronomie*, **2** (10), 969-982.
- OVALLES F.A., COLLINS M.E., 1988 - Evaluation of soil variability in Northwest Florida using geostatistics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **52**, 1702-1708.

KRIGEAGE D'INDICATRICES ET CARTOGRAPHIE PEDOLOGIQUE

- RIVIERE J.M., DUPONT C., EDELINE P., 1993. - *Notice de la carte pédologique de Janzé à 1/100 000*. INRA - Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France (à paraître).
- RIVOIRARD J., 1990. - *Introduction au krigeage disjonctif et à la géostatistique non linéaire. Cours de géostatistique non-linéaire*. Note interne C-139 du Centre de Géostatistique, Fontainebleau, 84 p.
- RIVOIRARD J., 1993. - Relation between the indicators related to a regionalized variable. In : *Geostatistics Troia 92*, Amilcar Soares Ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 273-284.
- ROGALA J.P., 1982. - *Approche numérique de l'espace agricole. Analyse de l'hétérogénéité et de la structure des unités cartographiques*. Thèse de Docteur-Ingénieur. INA-Paris Grignon, 224 p.
- STEIN A., 1993. - The use of prior information in spatial statistics. *Geoderma* (à paraître).
- STEIN A., BOUMA J., MULDER M.A., WETERINGS M.H.W, 1989. - Using co-kriging in variability studies to predict physical land qualities of a level river terrace. *Soil Technology*, Vol. 2, 385-402.
- VAN DER ZAAG P., YOST R.S., TRANGMAR B.B., HAYASHI K., FOX R.L., 1984. - An assessment of chemical properties for soils of Rwanda with the use of geostatistical techniques. *Geoderma*, **34**, 293-314.
- VIZIER J.F., 1992. - Eléments pour l'établissement d'un référentiel pour les solums hydromorphes. In : *Référentiel Pédologique. Principaux sols d'Europe*. INRA Editions, Techniques et Pratiques, 193-200.
- VOLTZ M., WEBSTER R., 1990. - A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. *J. Soil Sci.*, **41**, 473-490.
- 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.
- WEBSTER R., BURGESS T.M., 1983. - Spatial variation in soil and the role of kriging. *Agricultural Water Management*, **6**, 111-122.
- XU J., WEBSTER R., 1984. - A geostatistical study of topsoil properties in Zhangwu Country, China, *Catena*, **11**, 13-26.
- YATES S.R., YATES M.V., 1989. - *Geostatistics for waste management : a user's manual for the GEOPACK (Version 1.0)*. Geostatistical Software System, 70 p.

