

Apport de la géostatistique à l'analyse morphologique du sol : cas d'un transect représentatif de la plaine côtière guyanaise.

Ch. GASCUEL-ODOUX⁽¹⁾M. GRIMALDI⁽²⁾L. VEILLON⁽³⁾

RÉSUMÉ

Les analyses morphologique et géostatistique constituent deux approches détaillées pour analyser la structure de la couverture pédologique. Ces deux méthodes diffèrent par les hypothèses de base et les techniques d'analyse, par les variables prises en compte et l'échantillonnage. Elles sont ici successivement mises en oeuvre sur un transect représentatif de la plaine côtière ancienne guyanaise. Le transect choisi (longueur 180 m) traverse un système de transformation d'une couverture ferrallitique en podzol ; il présente une différenciation latérale forte mais progressive. Les résultats montrent que, à cette échelle, la géostatistique renseigne l'analyse à trois niveaux : (1) elle associe à la description morphologique du système pédologique une description des variations spatiales des propriétés choisies et montre leurs inter-relations spatiales ; (2) elle précise le caractère variant de la plupart des horizons pédologiques, gradients verticaux et latéraux, variabilité locale ; (3) elle indique la pertinence des limites latérales, justifiées à l'échelle du système pédologique lorsqu'elles séparent différents domaines de variation d'une ou de plusieurs variables.

MOTS-CLÉS : variabilité spatiale - Guyane Française - système pédologique - sol ferrallitique - sol podzolique.

MORPHOLOGICAL AND GEOSTATISTICAL ANALYSIS :

The case of a representative transect of the French Guyana old coastal plain.

Geostatistical and morphological analysis constitute two detailed approaches to analyse spatial variations of soil mantle ; they differ from one another in basic assumptions and techniques, in the studied properties and sampling. A representative transect of the pre-coastal bars in French Guyana was chosen to use geostatistics in addition to a morphological study. It presents a large but progressive lateral differentiation from a ferrallitic end-member to a podzolic one (figure 1). Soil horizons are described and delimited by means of a morphological analysis. Procedure of the geostatistical analysis is detailed for clay content : structural analysis by variograms (figure 2), cross validation tests (figure 3 and table 1) and kriging maps (figure 4) ; it

(1) I.N.R.A. Laboratoire de Science du sol - 65, route de Saint-Brieuc - 35042 Rennes Cedex - France

(2) O.R.S.T.O.M. Cayenne - B.P. 165 - 97323 Cayenne Cedex - France

(3) I.N.A. P-G - 16, rue Claude-Bernard - 75231 Paris Cedex 05

extended to other soil variables such as other particle sizes and chemical variables : structural analysis by means of variograms and covariograms (figures 5, 6, 7 and table II), kriging maps (figure 8). The discussion about the two approaches shows, at this scale, that geostatistics bring information to morphological analysis in three domains : (1) it associates to the morphological description of the pedological system, a description of the spatial variations of the chosen properties, and show their inter-relations ; (2) the spatial variability of soil horizons is determined in detail, particularly for vertical and lateral gradients or local variability ; (3) relevance of pedological limits for the studied properties is established particularly according to the spatial variations at the scale of the whole transect and not only locally. As a conclusion, a synthetic scheme of organisation and spatial variability of this representative pedological system is given in figure 9.

KEY-WORDS : spatial variability - French Guyana - pedological system - ferrallitic soil - podzolic soil

INTRODUCTION

La géostatistique est utilisée en science du sol depuis une dizaine d'années (BURGESS et WEBSTER, 1980a ; 1980b ; WEBSTER et BURGESS, 1980 ; BURGESS *et al.*, 1981 ; WEBSTER et OLIVER, 1990). Les domaines d'application sont principalement : (1) l'échantillonnage, par le calcul d'un écart-type d'estimation (VIERA *et al.*, 1981 ; Mc BRATNEY et WEBSTER, 1983 ; WEBSTER et BURGESS, 1984 ; WOPEREIS *et al.*, 1988) ; (2) la description des variations spatiales d'une ou de plusieurs propriétés du sol analysées successivement (GASCUEL-ODOUX et MEROT, 1986 ; VOLTZ, 1986 ; BOIVIN, 1990) ; (3) l'étude des relations spatiales entre différentes propriétés du sol (BYERS et STEPHENS, 1983 ; VAUCLIN *et al.*, 1983 ; VOLTZ, 1986). L'utilisation du krigeage, méthode d'interpolation linéaire et optimale au sens statistique, permet en particulier de cartographier les variations spatiales de propriétés du sol et de décrire les limites progressives entre unités pédologiques (GASCUEL-ODOUX, 1984). Ainsi la géostatistique, méthode d'analyse quantitative de données spatialisées, a montré son intérêt et sa robustesse.

L'objectif de cette étude est de discuter de l'apport de la géostatistique à l'analyse morphologique du sol pour caractériser l'organisation d'un système pédologique représentatif tel qu'il est défini par RUELLAN *et al.* en 1989.

On entend ici par analyse morphologique l'étude des variations verticales et latérales des caractères macromorphologiques du sol, à partir de sondages ou de fosses situées sur des transects. La densité et la position des observations sont fonction de l'appréciation sur le terrain de la variabilité latérale du sol. Des volumes ou "horizons" pédologiques sont alors définis par leurs caractères morphologiques, sans référence à une classification, et sont délimités. L'organisation pédologique des transects est représentée sous forme d'une cartographie en coupe des horizons pédologiques. L'analyse morphologique s'inscrit donc dans une démarche naturaliste de connaissance de l'organisation des systèmes pédologiques. Elle ne constitue que la première étape de l'analyse structurale dont la démarche globale est décrite par ailleurs (BOULET *et al.*, 1982 ; HUMBEL, 1984 ; RUELLAN *et al.*, 1989).

La géostatistique permet quant à elle de traiter des mesures de caractéristiques physiques, chimiques ou morphologiques du sol, effectuées à partir d'un échantillonnage fixé en général *a priori*. Les variogrammes et les cartes d'isovaleurs des différentes propriétés obtenues par krigeage donnent des informations quantitatives sur les variations spatiales des propriétés analysées. Cet outil commun à diverses disciplines s'appuie sur des concepts stochastiques ; il n'y a pas *a priori* sur la part d'organisé et d'aléatoire ; les hypothèses de base sont celles d'une certaine continuité spatiale des propriétés étudiées ; il n'y a pas d'objectif de partition de l'espace.

Ces deux approches ont donc des supports d'information propres à chacune d'elles tant du point de vue des variables étudiées que de l'échantillonnage. Elles visent à la connaissance détaillée des variations spatiales des systèmes pédologiques ; elles mettent en oeuvre des démarches très différentes, relativement lourdes, mais bien adaptées à l'étude de sites représentatifs.

Un transect de la plaine côtière de Guyane Française a été choisi pour cette étude. Il est représentatif de cette couverture à forte différenciation latérale (LUCAS *et al.*, 1986), interprétée depuis les travaux de TURENNE (1975), BOULET *et al.* (1982), comme un système de transformation (BOULET *et al.*, 1984a) d'un sol ferrallitique en podzol. C'est en référence à ces travaux que l'étude détaillée des variations spatiales du système pédologique prend son importance, puisqu'elle rend également compte d'une dynamique temporelle.

I. MILIEU ET DONNÉES

La plaine côtière ancienne du littoral guyanais est constituée de cordons sableux, orientés parallèlement à la côte. Ces cordons forment les "barres pré littorales", longues d'environ un kilomètre, larges de quelques centaines de mètres et hautes de quelques mètres.

Le transect choisi pour cette étude, long de 180 m, est situé au sommet et à l'extrémité d'une barre pré littorale, dans l'axe longitudinal de celle-ci. La couverture pédologique est encore de type ferrallitique à une des extrémités du transect, en bordure du replat sommital. La transformation de cette couverture, par appauvrissement en argile et en fer des horizons de surface, progresse latéralement à partir du centre de la barre, où se développe un podzol.

1. Analyse morphologique

L'analyse morphologique de ce transect a été effectuée à partir de 35 sondages (6 fosses et 29 sondages à la tarière), distants de 1 à 15 m selon la variabilité du sol, suivant la procédure habituelle de ce type d'analyse (BOULET *et al.*, 1984b) ; la localisation des observations (Fig. 1) permet d'apprécier la précision des limites latérales entre horizons pédologiques. La définition des horizons pédologiques est fondée sur des critères de couleur, de texture et de compacité de la matrice et des volumes pédologiques inclus ; la structure est décrite sur les fosses. Dans ce milieu, les limites ne correspondent généralement pas à des discontinuités morphologiques nettes ; elles jalonnent plutôt des variations continues. La nomenclature des horizons ne fait référence à aucune classification ; elle procède simplement de l'itinéraire de terrain, s'attachant à rendre compte distinctement des variations verticales et horizontales.

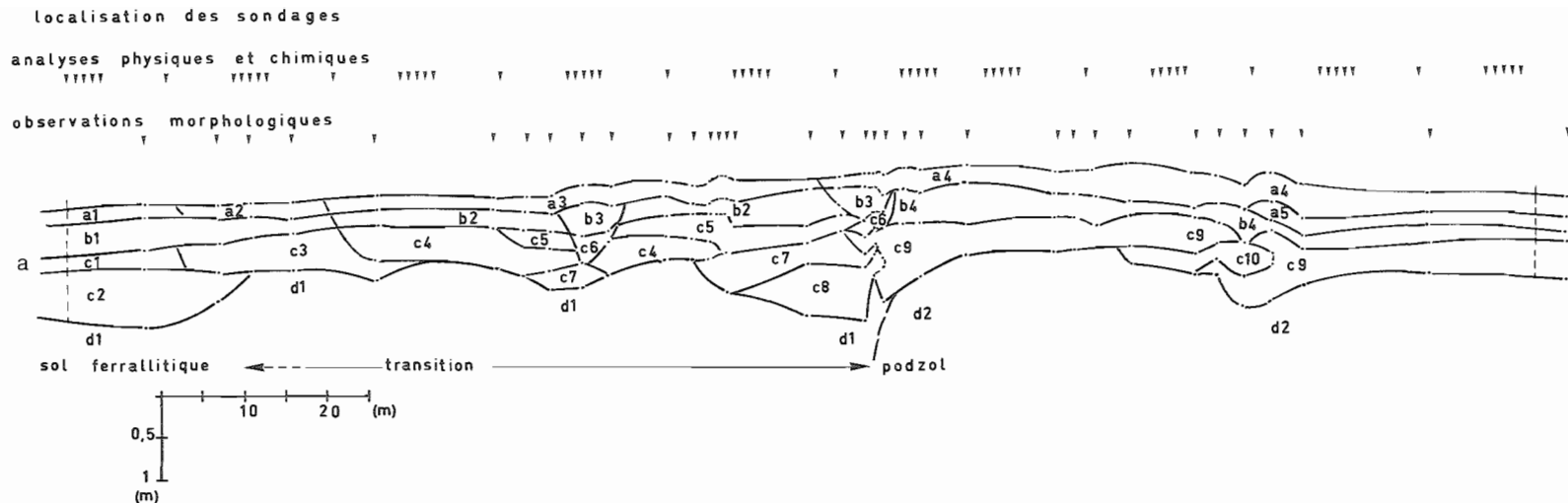


Fig. 1: Organisation morphologique du transect étudié et localisation des sondages (▼) pour les approches morphologique et géostatistique.
Morphological organisation of the transect and samplings for geostatistics and morphological analysis.

Texture des horizons pédologiques délimités :

SA : sablo-argileuse ; S : sableuse ; TS : très sableuse.

Couleurs : code de la charte Munsell.

a1 : SA	10 YR 4,5/4
a2 : SA à S	10 YR 4/3
a3 : S	10 YR 4/2 à 5/2
a4 : TS	10 YR 4/1 à 5/1
a5 : TS	10 YR 6/1 à 7/1
b1 : SA	10 YR 5/5 à 5,5/4
b2 : S	10 YR 4/3 + vol. mm. 10 YR 6/5 et 6/2 à 6/3
b3 : S	10 YR 6/2 à 6/1 + vol. mm. 10 YR 7/1 à 8/1
b4 : S	10 YR 4/4 à 4,5/3 ou 5/4

c1 : SA	10 YR 5/6 à 7,5 YR 5/8
c2 : SA	7,5 YR 5/8
c3 : SA	8,75 YR 5/8 à 10 YR 5/8
c4 : SA à S	10 YR 5/5 à 6/8 + vol. mm. 10 YR 4/2
c5 : S	10 YR 5/4 à 6,5/6 + vol. mm. 10 YR 4/3 à 6/4
c6 : S	10 YR 6/3,5 à 7/4
c7 : S	10 YR 6/8 et 6/6 (haut) à 10 YR 7/5 et 7/3 (bas) + vol. mm. 10 YR 5/8
c8 : SA	10 YR 5,5/8
c9 : SA	7,5 YR 5/8 + vol. cm. 10 YR 5/3 et 4/5 à 10 YR 7/1 + vol. cm. 7,5 YR 6/8 + réseau 10 YR 6/2
c10 : S	10 YR 5/3
d1 : SA	10 YR 5/6 à 6/6 + vol. cm. 2,5 YR 5/8
d2 : S ou SA	10 YR 6/8 ou 5/4 + vol. cm. 2,5 YR 5/8 + 10 YR 7/1

Le pôle ferrallitique du transect présente une succession verticale d'horizons de texture sablo-argileuse, se différenciant par leur couleur ; les transitions sont progressives entre l'horizon a1, humifère, brun jaunâtre foncé - les codes MUNSELL correspondants sont précisés dans la légende de la figure 1-, l'horizon b1 brun jaunâtre, l'horizon c1 brun jaunâtre à brun vif, l'horizon c2 brun vif et l'horizon d1 brun jaunâtre à volumes rouges centimétriques. Cette séquence verticale d'horizons a été observée sur une quinzaine de mètres (Fig. 1).

La transition vers le podzol s'effectue sur une distance de 75 mètres environ (Fig. 1) ; elle se caractérise par des changements importants et progressifs des caractères macromorphologiques des horizons superficiels (a) et médians (b et c) ; l'horizon d1 ne varie pas sensiblement, sinon par sa profondeur d'apparition.

- Dans l'horizon superficiel, on observe d'abord l'apparition de taches ocre, la couleur du fond étant brun foncé et la texture sablo-argileuse à sableuse (a2) ; puis, le développement de volumes blancs de sables "lavés" dans une matrice brun grisâtre foncé puis brun grisâtre, la texture devenant alors sableuse (a3).

- L'horizon b2 jouxte b1 : sableux, il présente la juxtaposition de volumes millimétriques brun foncé, gris brunâtre clair et brun jaunâtre clair, dont les proportions varient continuellement jusqu'au pôle podzolique ; b3 remplace b2 par deux fois (notamment avant le podzol) ; il est peu étendu latéralement, sableux et gris avec des volumes millimétriques gris clair.

- Chacun des 5 horizons profonds s'étend sur une distance de 20 à 40 mètres, parfois moins. Le premier, c3, est sablo-argileux et brun jaunâtre ; il se termine en formant un biseau sous l'horizon c4. Celui-ci est sablo-argileux à sableux ; sa couleur dominante varie de brun jaunâtre à jaune brunâtre vers le podzol, avec des volumes millimétriques brun grisâtre foncé et rouges à sa base. L'horizon c4 se termine également en biseau sous c5, sableux et de couleur hétérogène : brun jaunâtre à jaune avec de nombreux volumes millimétriques brun à brun jaunâtre clair. L'horizon c6 remplace localement c5 (sous l'horizon b3) ; sa texture est sableuse, sa couleur presque homogène : brun jaunâtre pâle. L'horizon c7 apparaît sous c4, c5 ou c6 ; sableux, sa couleur varie de jaune brunâtre à brun très pâle avec des volumes brun vifs à la base. Dans les dix derniers mètres de la zone de transition vers le podzol, sous c7 apparaît c8, sablo-argileux et brun jaunâtre.

Le pôle podzolique est constitué par différents horizons apparaissant, à quelques mètres près, au même point du transect (Fig. 1). Sous l'horizon de surface, a4, très sableux et gris foncé à gris, apparaît l'horizon b4, sableux et brun jaunâtre foncé à brun ou brun jaunâtre, qui passe, par un front glossique souligné par des volumes humiques brun sombre, à l'horizon c9, très hétérogène ; généralement induré à son sommet, c9 est globalement sablo-argileux ; sa couleur varie latéralement : au début de la différenciation podzolique, il est brun vif avec un réseau brun, et devient progressivement gris clair à volumes jaune rougeâtre avec un réseau gris brunâtre clair. L'horizon d2, qui jouxte d1, est également très hétérogène : sablo-argileux ou sableux, parfois fluant, jaune brunâtre ou brun jaunâtre, avec des volumes de diverses couleurs (rouge, gris pâle,...) d'abondance variable. L'horizon c10, brun, sableux avec des graviers de quartz et de micas, fluant, apparaît localement.

Ainsi, la transformation de la couverture ferrallitique se traduit sur ce transect par un appauvrissement en argile qui débute à la surface du sol, s'approfondit et aboutit à un profil podzolique nettement différencié. Le caractère hétérogène de l'horizon c9, de même que l'apparition, sous a4, de l'horizon a5, très sableux et gris clair, montrent que la transformation de la couverture pédologique se poursuit au sein du domaine podzolique.

2. Analyse géostatistique

Un échantillonnage stratifié a été choisi ; il est constitué de 58 sondages, distants soit de 1 mètre, par groupe de 5 sondages, soit de 8 mètres (Fig. 1) ; de cet échantillonnage on peut tirer un sous-échantillon de 18 sondages régulièrement espacés de 10 mètres. Ce type d'échantillonnage stratifié, indépendant de la variabilité du milieu, est fréquent en géostatistique ; il permet d'analyser la variabilité à très courte distance et de façon homogène sur l'ensemble du transect. Les prélèvements de sol sont effectués à 7 profondeurs : 0,1 m, puis, de 0,2 à 1,2 m, tous les 0,2 m. 406 échantillons ont ainsi été prélevés et analysés sur ce transect. Les variables étudiées sont la teneur en eau pondérale - les prélèvements ont été effectués en saison des pluies - , les teneurs en fer total et en carbone, le rapport C/N et les 5 fractions granulométriques de la terre fine (<2mm) : argile (<2 μ m), limon fin (2 à 20 μ m), limon grossier (20 à 50 μ m), sable fin (50 à 200 μ m) et sable grossier (0,2 à 2 mm). Ces variables ont été choisies car elles sont liées à celles de l'analyse morphologique : les variations de couleur et de texture manifestent des changements de constitution du sol, notamment au niveau des fractions granulométriques, de la matière organique et des oxydes de fer.

II. METHODE

Les propriétés analysées par la géostatistique sont considérées comme des variables régionalisées (MATHERON, 1965), ce qui veut dire qu'elles présentent simultanément deux aspects : un aspect structuré et un aspect aléatoire. Leur structure spatiale (BURGESS et WEBSTER, 1980a ; 1980b) est analysée à l'aide du variogramme, $\gamma(h)$, tel que :

$\gamma(h) = 1/2 (E (Z(x+h) - Z(x))^2)$, où Z est la variable étudiée, x et x+h deux points d'appui distants de h ; E désigne l'espérance mathématique.

Le variogramme est calculé de façon discrète ; on choisit alors un modèle de la structure qui est utilisé lors de l'estimation par krigeage. Cette estimation est linéaire, non biaisée et optimale au sens où l'on minimise la variance d'estimation (MATHERON, 1965).

D'un point de vue statistique, l'hypothèse requise est l'hypothèse intrinsèque : l'espérance mathématique de la variable est supposée constante sur la zone d'étude ; la variance des accroissements de la variable entre les points d'observations dépend de la distance entre ces points et non de leur position (DELHOMME, 1978). Ceci n'est souvent pas le cas et il existe une gamme de sous-hypothèses moins contraignantes. Il s'agit, par exemple, de l'hypothèse d'une tendance générale ou dérive : l'espérance mathématique n'est pas constante mais fonction de la position du point ; on essaie alors de modéliser cette dérive ; l'hypothèse intrinsèque et le calcul du variogramme portent sur les résidus, écarts par rapport au modèle de dérive. Il peut s'agir également de

l'hypothèse intrinsèque locale ; le modèle est ajusté au variogramme sur une courte distance et le krigeage est effectué à partir d'un nombre limité de voisins ; on parle de krigeage en voisinage glissant. Ces différentes solutions sont utilisées ici, puisque la zone d'étude est hétérogène et anisotrope ; elle associe des gradients très différents latéralement et verticalement. De plus, ces gradients sont difficiles à comparer étant donné les échelles très différentes horizontalement et verticalement lors d'une étude de coupe, dans le plan vertical. C'est pourquoi, avant toute analyse géostatistique, nous avons procédé à une affinité sur les coordonnées de l'axe vertical afin de permettre une comparaison des gradients et un traitement statistique de l'anisotropie. Le facteur multiplicatif de l'affinité est choisi de sorte que les variogrammes calculés dans les principales directions d'anisotropie soient confondus et que l'on puisse trouver ainsi un modèle général de la structure de la variable étudiée. C'est une des procédures qui est décrite par JOURNAL et HUIJBREGTS (1978) dans le cas de l'anisotropie ; d'autres procédures ont pu être utilisées dans le cas d'étude de transects (JOHNSON et DREISS, 1989 ; NASH *et al.*, 1988).

Les relations spatiales entre 2 variables Z_1 et Z_2 peuvent être étudiées à partir du covariogramme, $\gamma_{12}(h)$, tel que :

$$\gamma_{12}(h) = 1/2 (E(Z_1(x+h) - Z_1(x)) (Z_2(x+h) - Z_2(x))).$$

Le covariogramme rend compte de la distance pour laquelle une propriété influence l'autre (BRESLER *et al.*, 1981).

III. RESULTATS

L'analyse géostatistique est présentée en détail pour la variable teneur en argile. Les résultats obtenus pour les différentes variables sont ensuite comparés.

1. Variabilité spatiale de la teneur en argile

Le variogramme expérimental de la teneur en argile (Fig. 2A) présente un aspect chaotique au pas de 0,1 m, distance minimale entre deux observations dans la direction verticale. Cette allure s'explique par une importante anisotropie : les gradients verticaux et latéraux sont nettement différents. Les variogrammes directionnels, au pas de 1m, sont ainsi bien distincts (Fig. 2B) : les semi-variances sont nettement plus fortes dans les directions verticale et oblique que dans la direction horizontale.

Pour analyser correctement cette anisotropie, une affinité a été effectuée sur les coordonnées de l'axe vertical. Le facteur multiplicatif choisi expérimentalement est égal à 30. Il correspond au rapport entre les pentes des variogrammes dans les directions verticale et horizontale. Il existe évidemment une incertitude sur la mesure de ce facteur, de même que sur le choix du modèle, puisque les variogrammes sont calculés de façon discrète. Un modèle linéaire, valable sur environ 40 m, est ajusté au variogramme obtenu par cette procédure (Fig. 2C). Cependant, l'examen des variogrammes directionnels montre qu'il existe encore une nette anisotropie au-delà d'une quinzaine de mètres (Fig. 2D). Le choix d'une dérive linéaire (Fig. 2E) ne semble pas très bien adapté au phénomène analysé d'après l'aspect très chaotique des variogrammes directionnels (Fig. 2F). Les tests de validation croisée n'indiquent qu'une faible amélioration des résultats (Tableau I).

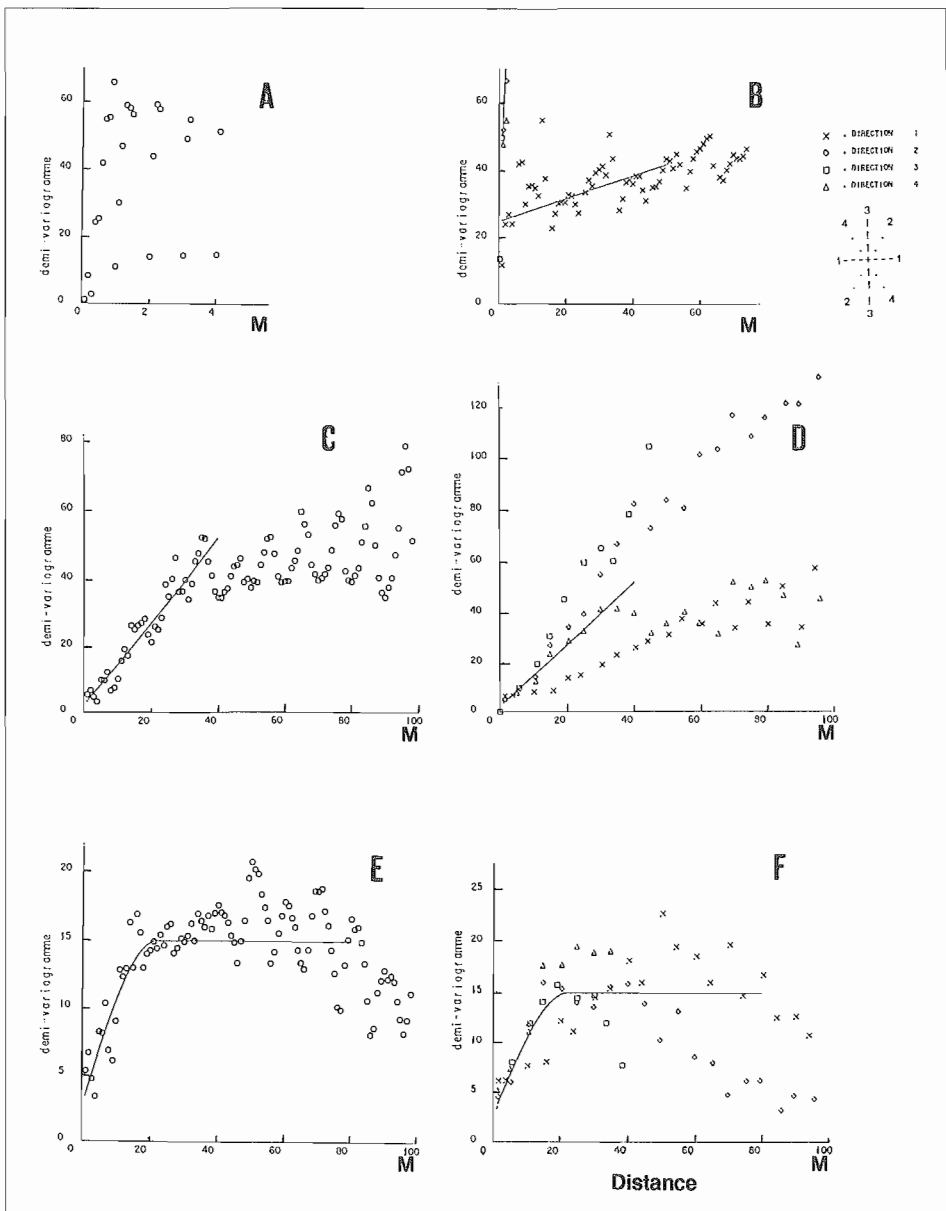


Fig. 2 : Variogrammes de la teneur en argile. (A) variogramme brut, pas de 0,1 m ; (B) variogrammes directionnels, pas de 1m ; (C) et (D) respectivement variogrammes bruts et directionnels après affinité sur les coordonnées verticales ; (E) et (F) respectivement variogrammes bruts et directionnels, avec hypothèse d'une dérive, après affinité sur les coordonnées verticales.

Variograms of clay content. (A) raw variogram, lag 0,1 m ; (B) directional variograms, lag 1m ; (C) and (D) respectively raw and directional variograms, on vertical changed coordinates ; (E) and (F) respectively raw and directional variograms, under drift assumption, on vertical changed co-ordinates.

En définitive, pour la teneur en argile, le variogramme présente un palier vers 40 m, un faible effet de pépite et une anisotropie nette ; un modèle linéaire peut être utilisé pour le krigeage à partir de voisins proches au plus d'une quinzaine de mètres.

Tableau I : Résultats du test de validation croisée.

Results of the cross validation test.

Résultats		Nombre de données	$E(Z-Z^*)$	M.Q.($Z-Z^*/s^*$)
Krigage simple	1	405	0,024	1,3
	2	383	0,075	0,711
Krigage avec dérive	1	405	0,016	1,32
	2	382	0,065	0,714

$E(Z-Z^*)$, calcul de la moyenne des écarts entre valeur réelle Z et valeur estimée Z^* .

M.Q. ($Z-Z^*/s^*$), calcul de la moyenne quadratique de l'écart réduit par l'écart-type d'estimation s^* .

1 : calcul sur l'ensemble des données.

2 : calcul sur les données dont M.Q. ($Z-Z^*/s^*$) est inférieure à 2,5.

Les résultats du test de validation croisée ont été analysés point par point suivant deux critères : (1) l'erreur de krigeage est supérieure à 2,5 fois la racine carrée de l'effet de pépite, celui-ci étant la variance liée aux erreurs de mesure ou aux micro-hétérogénéités locales ; ce seuil, égal ici à 3,5, indique donc une erreur de krigeage significativement supérieure à cette variabilité locale ; (2) l'erreur réduite est supérieure à 2,5, indiquant une sous-estimation de l'écart-type d'estimation. La localisation de ces erreurs sur la coupe (Fig. 3) montre que le krigeage reconnaît mal les données des horizons profonds dans les domaines de transition et surtout les domaines podzoliques, là où les sondages sont proches de 1 mètre ; ainsi les gradients, même forts, sont bien reconnus par le krigeage *a contrario* des hétérogénéités ponctuelles.

La cartographie a été effectuée sur la séquence à partir d'un krigeage sur des points ou sur des blocs, en prenant ou non en compte la dérive. Les mailles ont 1,5 m de large et 5 cm de profondeur. Ces différentes procédures donnent des cartes d'aspect très proche (Fig. 4). Elles font apparaître spatialement quatre domaines : (1) tout d'abord, la teneur en argile, homogène latéralement, s'accroît faiblement et de façon régulière en profondeur ; (2) elle diminue ensuite latéralement, davantage en surface qu'en profondeur, de sorte que le gradient vertical s'accroît ; (3) ensuite, la teneur en argile, très faible en surface, augmente fortement avec la profondeur (autour de 60 cm), tandis que, latéralement, on note une diminution régulière en surface, irrégulière en profondeur ; (4) enfin, la teneur en argile est faible, croissant irrégulièrement et faiblement de la surface à la profondeur. L'écart-type d'estimation est inférieur à 2,5 sur toute la coupe (Fig. 4D), valeur bien inférieure à l'écart-type de dispersion de 6,56 ; celui-ci confirme la signification des domaines définis ci-dessus.

Le passage de 58 sondages, soit 406 prélèvements, à 18 sondages distants de 10 m, soit 126 échantillons, donne une cartographie légèrement différente (Fig. 4E) : si les différenciations majeures sont les mêmes à l'échelle de ce transect, la présence éventuelle d'hétérogénéités locales notables surtout dans la zone de transition et traduites par une tortuosité des courbes d'isovaleurs n'apparaît plus.

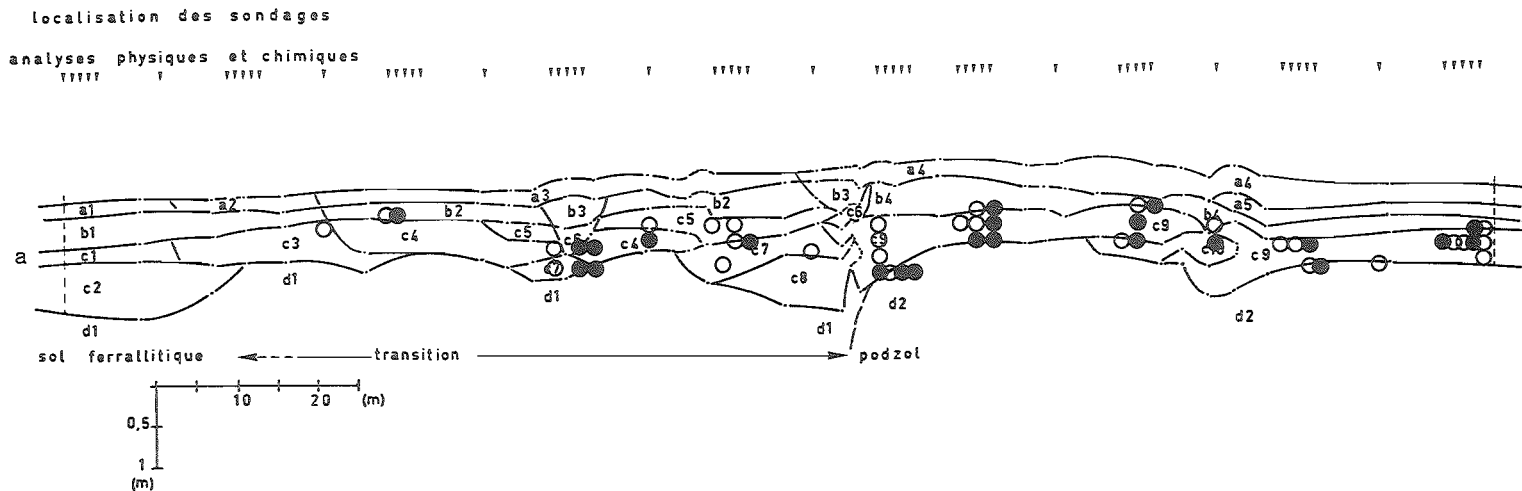


Fig. 3 : Localisation des points sur la coupe pour lesquels l'estimation par krigeage n'est pas satisfaisante ; o : $(Z-Z^*)$ supérieur à 3,5 ; ● : $(Z-Z^*/s^*)$ supérieur à 2,5.

Display of the erratic points by kriging ; o : $(Z-Z^)$ superior to 3.5 ; ● : $(Z-Z^*/s^*)$ superior to 2.5.*

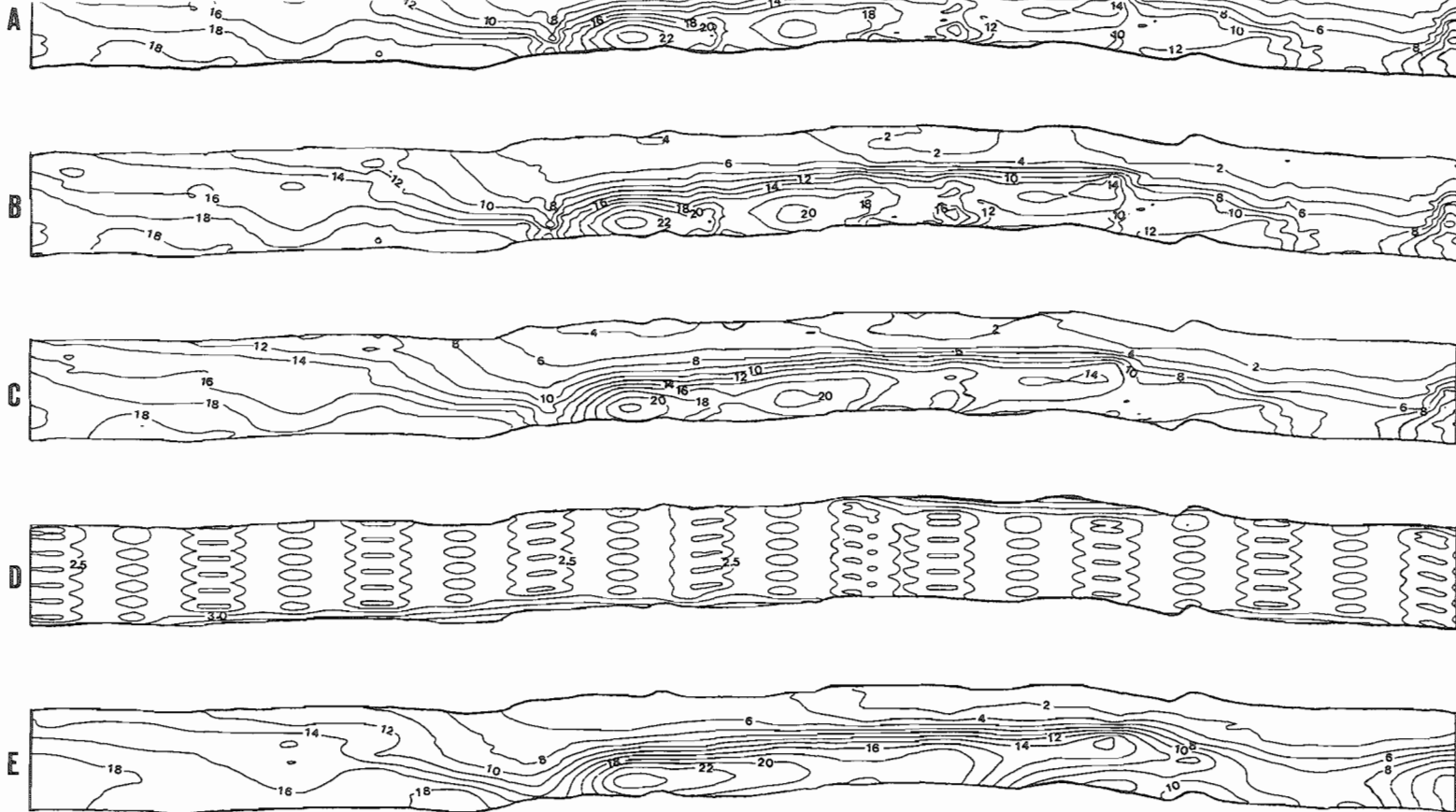
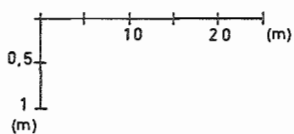


Fig. 4 : Cartes krigées de la teneur en argile. (A) et (B) respectivement krigeage simple et krigeage bloc ; (C) krigeage simple avec l'hypothèse d'une dérive ; (D) écart-type d'estimation krigé ; (E) krigeage à partir des 18 sondages espacés de 10 m.

Kriging of clay content. (A) and (B) punctual and block kriging ; (C) punctual kriging under drift assumption ; (D) estimation of the standard deviation ; (E) kriging from the 10 m spaced 18 bore holes



En définitive, on observe tout au long du transect un appauvrissement en argile régulier en surface, plus irrégulier en profondeur. Ceci conduit à une zone de forts gradients verticaux d'augmentation de la teneur en argile, qui apparaît dès la zone de transition vers le podzol.

2. Comparaison des différentes variables

Parmi les estimations statistiques calculées (Tableau II), on note en particulier les valeurs très différentes du coefficient de variation, comprises entre 11 et 93 %. Ces valeurs ne permettent pas de connaître l'origine de la variabilité spatiale : variabilité locale ou variation à l'échelle du transect. Les distributions observées ne correspondent pas à des distributions normales ou lognormales pour la plupart des variables, suivant le test de KOLMOGOROV, en liaison avec l'hétérogénéité du milieu étudié.

Tableau II : Estimations statistiques et géostatistiques des variables étudiées.

Statistical and geostatistical estimations of the studied variables.

Variable	Moyenne	Médiane	Variance	C.V.%	Distribution normale °	Distribution lognormale °	Effet de pépite sur variance %	Forme du variogramme	Anisotropie ^{oo}
Argile %	10,91	12,04	43,09	60	0,107 R	0,186 R	5	sphérique	***
Limon fin %	5,04	4,87	5,7	48	0,051 A	0,082 R	17	sphérique	**
Limon grossier %	5,03	5,06	1,28	22	0,066 R	0,116 R	35	linéaire	0
Sable fin %	71,82	70,8	66,01	11	0,069 R	0,058 R	0	sphérique	**
Sable grossier %	7,17	3,94	44,73	93	0,249 R	0,145 R	5	linéaire	0
Fer %	2,59	2,65	3,56	73	0,138 R	0,185 R	11	sphérique	***
Teneur en eau %	22,72	21,6	28,59	23	0,104 R	0,077 R	32	sphérique	**
Carbone ‰	6,3	4,32	29,42	86	0,189 R	0,056 R	13	sphérique	**
Rapport C/N	13,38	13,5	21,84	36	0,051 A	0,087 R	3	sphérique	*

° seuil de rejet pour l'ajustement à une distribution théorique de 0,051 au seuil de 0,01 % ;

R : hypothèse nulle rejetée ; A : hypothèse nulle acceptée.

^{oo} l'anisotropie est notée de façon qualitative : 0, *, ** ou *** correspondant à une anisotropie nulle, faible, moyenne ou forte.

Les variogrammes normalisés par les variances expérimentales (Fig. 5 et 6) sont construits après une affinité, de même rapport pour toutes les variables, sur les coordonnées de l'axe vertical. Les variogrammes de toutes les variables, à l'exception de ceux des teneurs en limon grossier et en sable grossier, sont sphériques avec une portée de 40 m ; celle-ci correspond à la profondeur des sondages en tenant compte de l'affinité. Pour ces variables, la variabilité verticale est donc dominante. Les variogrammes directionnels montrent que c'est nettement le cas pour les teneurs en argile, en limon fin, en sable fin et en fer, moins nettement pour la teneur en carbone et le rapport C/N. Les variogrammes des teneurs en limon grossier et sable grossier sont linéaires et isotropes sur une trentaine de mètres environ ; ces deux variables varient tant latéralement que verticalement.

On peut aussi opposer les variables présentant un fort effet de pépite à celles dont l'effet de pépite est quasi nul. Ainsi la teneur en limon fin et en limon grossier, la teneur en eau pondérale et dans une moindre mesure le rapport C/N et la teneur en carbone montrent une relativement forte variabilité locale ; notons que la teneur en limon

grossier étant calculée par différence aux autres fractions mesurées, sa détermination "absorbe" les différentes erreurs de mesure et explique sans doute pour partie un fort effet de pépite. Par opposition, les variables argile et sable fin, pour lesquelles l'effet de pépite est quasiment nul, présentent des variations beaucoup plus continues dans l'espace.

Le calcul des coefficients de corrélation (Tableau III) et des covariogrammes (Fig. 7) confirme les relations spatiales entre les variables étudiées ; il existe bien une dépendance spatiale, sur une quarantaine de mètres, positive entre la teneur en argile, en limon fin et en fer, négative avec la teneur en sable fin. Les teneurs en limon grossier et en sable grossier, bien que faibles et peu variables, sont spatialement dépendantes. Notons une relation entre teneur en limon fin et teneur en eau.

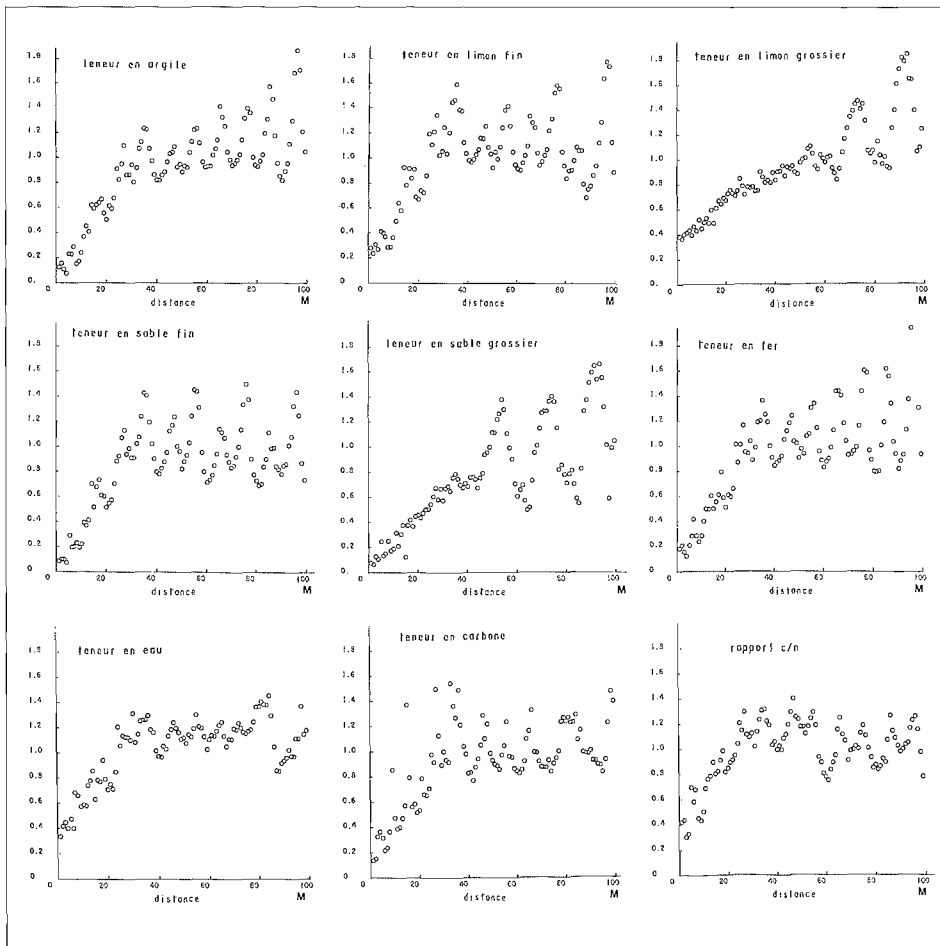


Fig. 5 : Variogrammes bruts des différentes variables étudiées.
Raw variograms of the studied properties.

Les cartes (Fig. 8) précisent les résultats de l'analyse des variogrammes ; les cartes des teneurs en argile, en sable fin, en limon fin et en fer présentent des similitudes.

Ainsi, la teneur en fer, légèrement croissante verticalement au pôle ferrallitique, diminue latéralement en surface vers le pôle podzolique ; on retrouve une zone de fort gradient vertical associée à une forte hétérogénéité latérale. Dans le domaine podzolique, les variations verticales sont cependant plus marquées pour le fer que pour l'argile. Les variations des teneurs en limon fin et sable fin sont moins accentuées que celles de l'argile ; le comportement de la première est analogue à celui de l'argile, celui de la seconde lui est complémentaire, la corrélation étant négative.

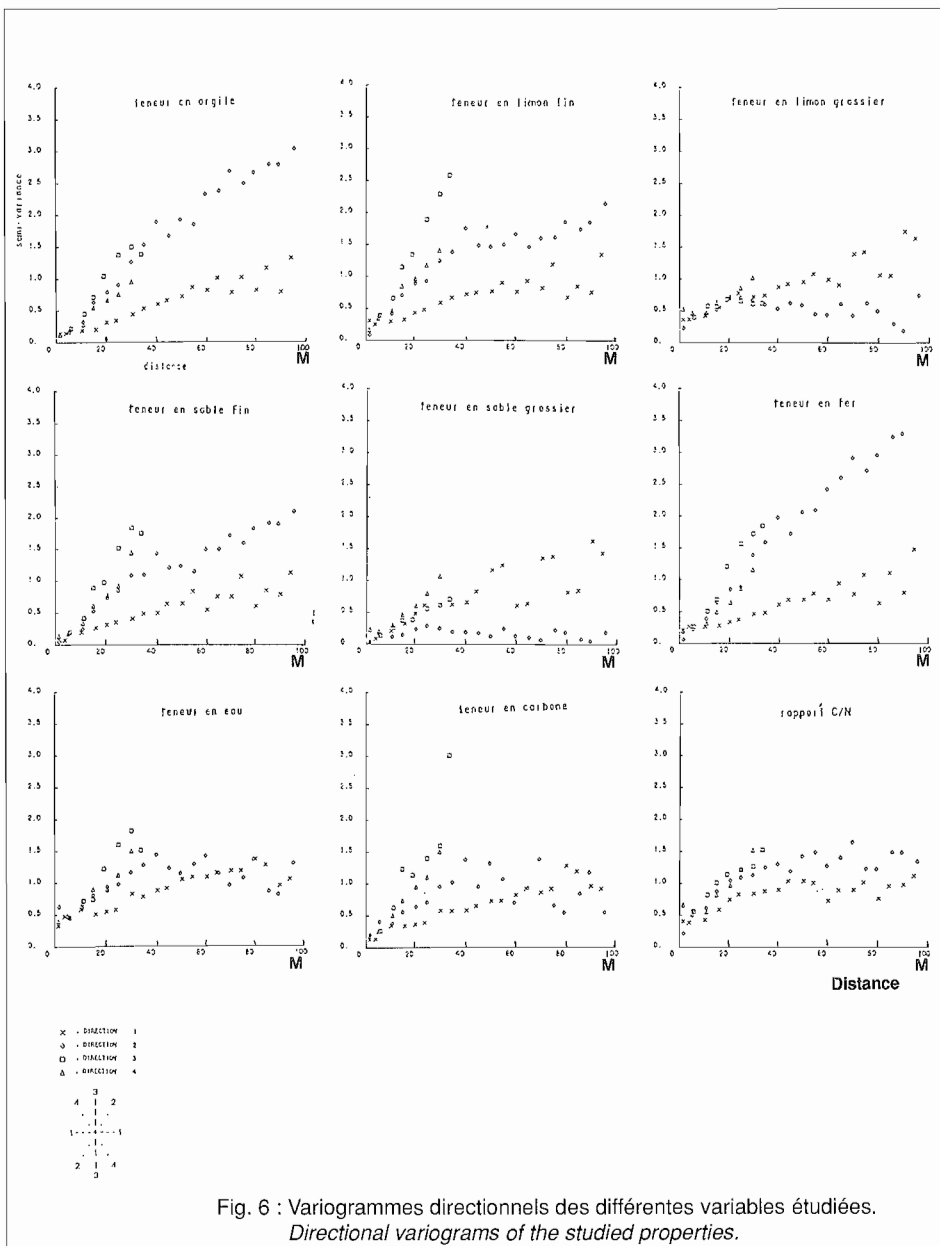


Fig. 6 : Variogrammes directionnels des différentes variables étudiées.
Directional variograms of the studied properties.

La teneur en carbone montre une organisation spatiale singulière par rapport aux autres variables ; le pôle ferrallitique, avec une diminution verticale du carbone, homogène latéralement, s'oppose au pôle podzolique très appauvri en surface. La transition est marquée par une diminution latérale très progressive.

L'organisation spatiale de la teneur en sable grossier est également singulière : au pôle ferrallitique très pauvre, s'oppose le pôle podzolique, plus riche, mais hétérogène, verticalement et latéralement, de manière complémentaire semble-t-il, avec les variations de teneur en limon grossier.

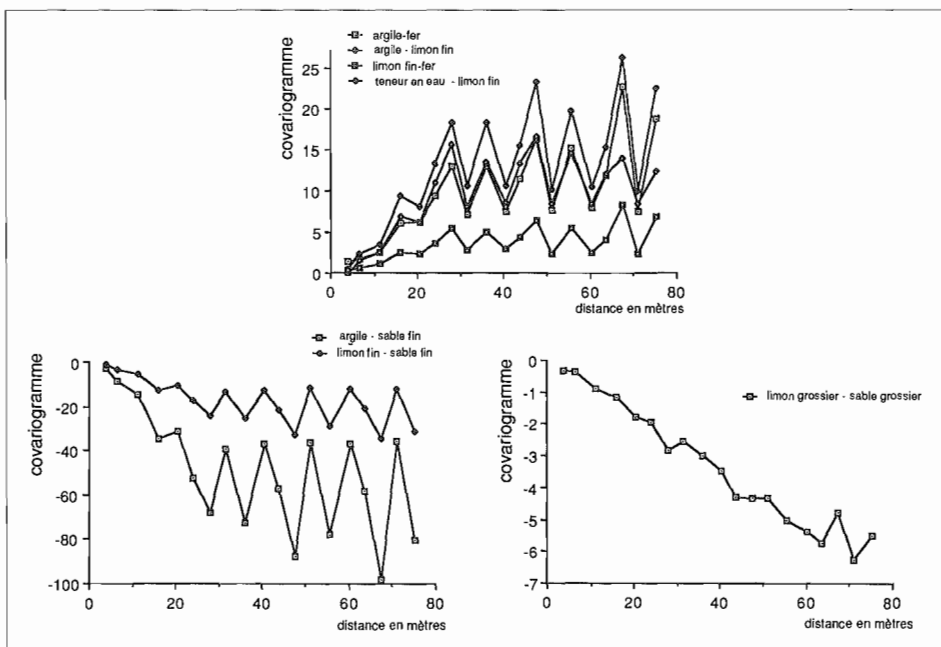
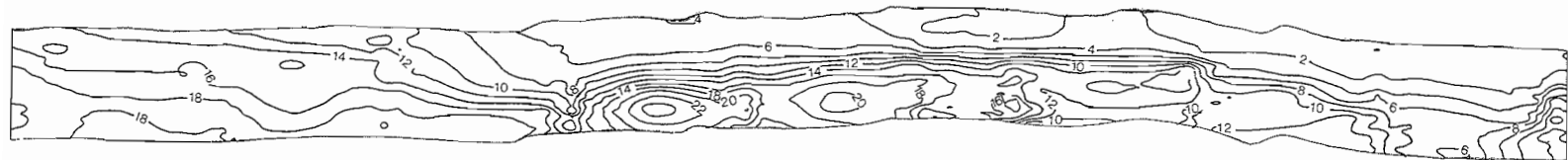


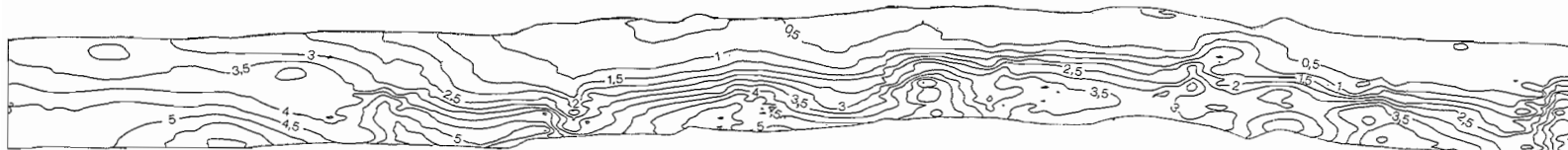
Fig. 7 : Covariogrammes
Covariograms

Tableau III : Table de corrélation
Values of the correlation coefficients

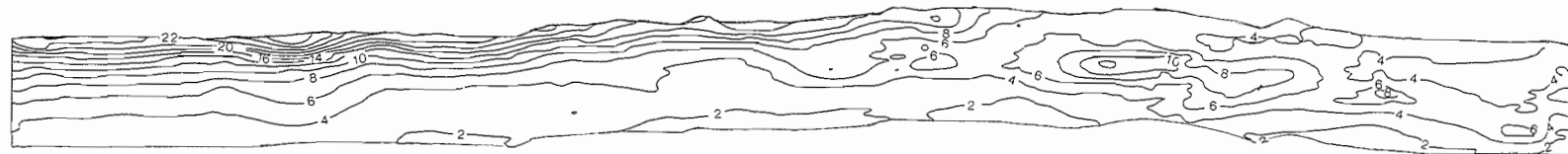
	Argile	Limon fin	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier	Fer	Teneur en eau	Carbone	C/N
Argile %	1								
Limon fin %	0,683	1							
Limon grossier %	0,101	-0,203	1						
Sable fin %	-0,740	-0,727	0,374	1					
Sable grossier %	-0,397	-0,103	-0,723	-0,285	1				
Fer%	0,779	0,700	-0,101	-0,200	-0,200	1			
Teneur en eau %	0,419	0,615	-0,410	-0,500	0,074	0,417	1		
Carbone ‰	-0,115	-0,240	0,250	0,178	-0,220	-0,169	-0,204	1	
Rapport C/N	-0,434	-0,273	0,132	0,234	0,197	-0,394	-0,152	0,495	1



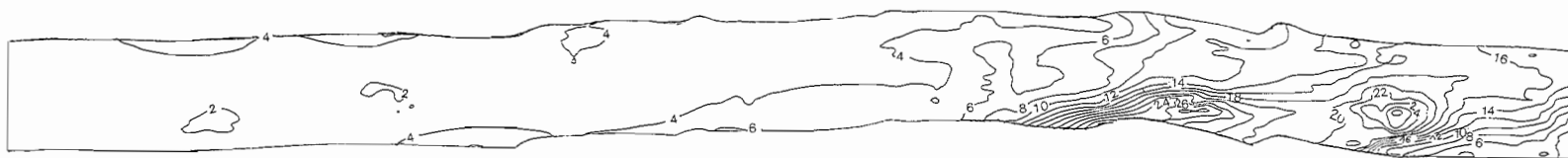
argile %



fer total %



carbone ‰



sable grossier %

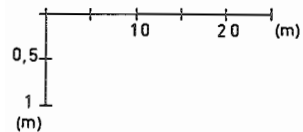


Fig. 8 : Cartes krigées de quelques variables étudiées
Kriging of some studied properties

IV. DISCUSSION

Le fait d'effectuer l'analyse morphologique en premier lieu permet de raisonner l'analyse géostatistique sur une entité bien définie : c'est ici le système pédologique. La variabilité spatiale et les variations des propriétés analysées sont décrites en référence à ce système pédologique.

L'analyse géostatistique permet de déterminer l'organisation spatiale des différentes variables étudiées sur ce transect. Ainsi, ont été notées la similitude des variations des teneurs en fer et en argile, et la complémentarité du sable fin par rapport à l'argile, alors que la teneur en carbone -autre variable rendant compte de la pédogénèse sur ce milieu (TURENNE, 1975) - varie de manière plus spécifique. Par ailleurs, si le squelette est dominé par les sables fins, les teneurs en limon fin et sable grossier sont aussi structurées, ce que l'approche morphologique n'avait pu mettre en évidence.

La géostatistique précise le caractère variant, verticalement et/ou latéralement, de la plupart des horizons pédologiques pour une ou plusieurs propriétés physiques et chimiques. Ainsi la teneur en argile décroît latéralement de 0,4 % par mètre au sein de l'horizon b2, passant de 14 à 6 % sur une vingtaine de mètres et marquant la fin du domaine ferrallitique ; ces variations continues peuvent être associées ou non à une hétérogénéité locale des horizons ; de telles variations ont été parfois notées lors de l'analyse morphologique, au sein du volume c9 du podzol par exemple.

En conséquence, à une délimitation des horizons pédologiques à partir de caractères morphologiques du sol, on peut associer les variations physico-chimiques. Il apparaît ainsi des limites nettes entre les horizons a4, b4 et c9, caractéristiques du podzol ; l'horizon a4, très pauvre en fer et en argile, s'oppose à l'horizon b4, également homogène latéralement, mais présentant un fort gradient vertical pour les quatre variables : teneurs en fer, argile, sable fin et limon fin. L'horizon b4 s'oppose lui-même à c9, sans gradient vertical pour ces mêmes variables mais latéralement hétérogène. Le plus souvent cependant, les limites morphologiques entre les horizons a1, b1, c1, c2 et d1 du profil ferrallitique, jalonnent des variations très continues des variables étudiées ; parfois, les limites ne sont pas reconnues par l'analyse géostatistique sur les variables choisies, comme c'est le cas pour les volumes c7, c8 et c10 ; au contraire, des horizons dont l'extension latérale est limitée à quelques mètres (b3 et c6) coïncident avec une brutale variation des teneurs des différentes variables.

Certaines limites prennent une signification particulière dans l'organisation du transect : ainsi, les limites entre a2 et a3, et entre b1 et b2, qui correspondent à la fin du domaine ferrallitique, sont marquées par le début de l'appauvrissement latéral en fer, en argile et en carbone, bien qu'il n'y ait pas de variation brutale. Des valeurs faibles et stables de ces mêmes variables, en surface, marquent le début du domaine podzolique. La zone de transition entre les deux pôles du système de transformation constitue une amorce du domaine podzolique, d'après les cartes d'isovaleur de toutes les variables structurées (présence d'un gradient vertical autour de 60 cm), à l'exception toutefois de la teneur en carbone dont les variations verticales délimitent bien le pôle podzolique.

On peut en définitive proposer d'établir une séquence de référence pour le passage d'un pôle à l'autre. On ne retient que les variables argile, carbone et sable grossier, puisque les autres ont soit un rôle analogue, comme le fer (dans une moindre mesure,

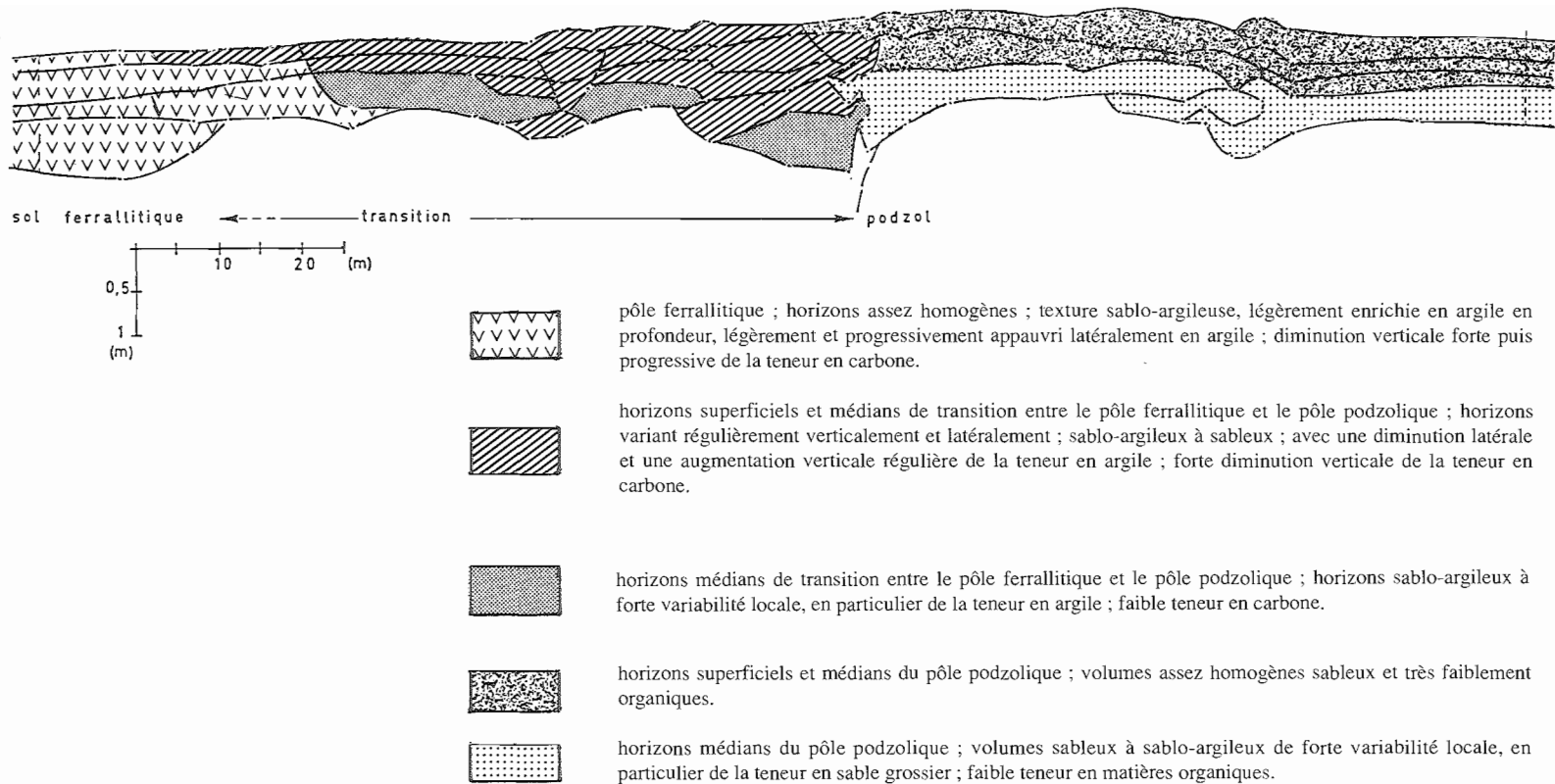


Fig. 9 : Représentation synthétique de l'organisation spatiale du transect
Synthetic model of spatial organization for the studied transect.

l'eau et le limon fin), soit un rôle complémentaire, comme le sable fin par rapport à l'argile. La figure 9 présente cet essai de synthèse : l'analyse morphologique est complétée par une description de la variabilité spatiale des principales caractéristiques du sol. Au pôle ferrallitique homogène, ne variant quasiment que par une diminution verticale du haut vers le bas de la teneur en carbone, s'oppose une zone de transition marquée par un net gradient négatif, du haut vers le bas, de la teneur en argile et des variables associées au sein des horizons médians ; une forte hétérogénéité locale caractérise les horizons profonds. Le pôle podzolique, homogène dans les horizons superficiels et médians, à forte variabilité locale en profondeur, est appauvri en argile, surtout vers la surface, et en matières organiques.

CONCLUSION

L'apport de la géostatistique à l'analyse morphologique a été étudié sur un transect représentatif d'une couverture pédologique à différenciation latérale forte et progressive. Ces deux approches d'analyse structurale sont relativement lourdes à mettre en oeuvre, mais sont bien adaptées à l'étude à très grande échelle de sites représentatifs. Elles contribuent à la connaissance de la distribution spatiale des sols et permettent d'aborder correctement les problèmes de la cartographie à plus petite échelle et de l'extrapolation spatiale du fonctionnement des sols : à la description macromorphologique du système pédologique est associée une description des variations spatiales de caractéristiques physico-chimiques jugées importantes dans le fonctionnement des sols.

La première approche, macromorphologique, cherche d'emblée à délimiter des horizons pédologiques. C'est une démarche déterministe ; elle est fondée sur l'hypothèse que la couverture pédologique est organisée ; l'étude détaillée de la distribution spatiale des horizons pédologiques permet de trouver les lois de l'organisation pédologique ; l'aléatoire n'est pas explicitement pris en compte. A l'opposé, dans l'approche géostatistique, il n'y a pas *d'a priori* sur la part d'organisé ou d'aléatoire ; les hypothèses de base sont celles d'une certaine continuité des propriétés étudiées. C'est une démarche stochastique. Ces différences en font *a priori* des méthodes d'investigation complémentaires. Cette étude permet de le vérifier et illustre l'intérêt de l'utilisation conjointe des deux méthodes.

La géostatistique a en effet permis de préciser : (1) l'organisation spatiale de différentes variables dans un système pédologique défini à partir de sa morphologie ; ceci n'est pas toujours facile à apprécier à sa juste mesure sur le terrain, pour les teneurs en fer, les fractions granulométriques par exemple ; (2) le caractère variant des horizons pédologiques : gradients verticaux et/ou latéraux plus ou moins importants, parfois associés à des hétérogénéités locales ; (3) la signification physico-chimique des limites définies macromorphologiquement entre horizons pédologiques : notamment des limites latérales, justifiées parfois localement, parfois à l'échelle du transect, lorsqu'elles séparent différents domaines de variation de l'une des variables.

REMERCIEMENTS : Ce travail a été financé dans le cadre de l'Action Thématique Programmée "Bilans hydriques et minéraux à l'échelle du bassin versant" du PIREN EAU (Programme de recherche interdisciplinaire sur l'environnement) du CNRS.

Reçu pour publication : Juillet 1990
 Accepté pour publication : Avril 1991

BIBLIOGRAPHIE

- BOIVIN P., 1990 - *Caractérisation physique des sols sulfatés acides de la vallée de Katouré (Basse Casamance) ; étude de la variabilité spatiale et relations avec les caractéristiques pédologiques*. Thèse de doctorat de l'Université de Paris 6, 185 p.
- BOULET R., HUMBEL F.X., LUCAS Y., 1982 - Analyse structurale et cartographie en pédologie. II - Une méthode d'analyse prenant en compte l'organisation tridimensionnelle des couvertures pédologiques. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. pédol.*, **19**, **4**, 323-332.
- BOULET R., HUMBEL F.X., LUCAS Y., 1982 - Analyse structurale et cartographie en pédologie. III - Passage de la phase analytique à une cartographie générale synthétique. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. pédol.*, **19**, **4**, 333-351.
- BOULET R., CHAUVEL A., LUCAS Y., 1984 a - Les systèmes de transformation en pédologie. *In Livre jubilaire de l'A.F.E.S.*, 167-180. A.F.E.S., Paris.
- BOULET R., GODON Ph., LUCAS Y., WOROU S., 1984b - Analyse structurale de la couverture pédologique et expérimentation agronomique en Guyane Française. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. pédol.*, **21**, 21-31.
- Mc BRATNEY A. B., WEBSTER R., 1983 - How many observations are needed for regional estimation of soil properties. *Soil Sci.*, **135**, 177-183.
- BRESLER E.S., DAGSBERG D., RUSSO D., DAGAN G., 1981 - Spatial variability of a crop yield as a stochastic soil process. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **45**, 600-606.
- BURGESS T.M., WEBSTER R., 1980a - Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. 1 : the semi-variogram and punctual kriging. *J. Soil Sci.*, **31**, 315-331.
- BURGESS T.M., WEBSTER R., 1980 b - Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. 2 : block kriging. *J. Soil Sci.*, **31**, 333-341.
- BURGESS T.M., WEBSTER R., Mc BRATNEY A.B., 1981 - Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. 4 : sampling strategy. *J. Soil Sci.*, **32**, 643-659.
- BYERS E., STEPHENS D.B., 1983 - Statistical and stochastic analysis of hydraulic conductivity and particle size in a fluvial sand. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **47**, 1072-1081.
- DELHOMME J.P., 1978 - Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. *Bull. B.R.G.M.*, **3**, 341-375.
- GASCUEL-ODOUX C., 1984 - *Application de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol*. Doctorat d'ingénieur. E.N.S.M.P., Fontainebleau, 235 p.
- GASCUEL-ODOUX C., MEROT Ph., 1986 - Variabilité spatiale du transfert de l'eau dans le sol, utilisation du traçage et analyse géostatistique. *J. Hydrol.*, **89**, 93-107.
- HUMBEL F.X., 1984 - L'analyse des couvertures de sol, une base pour la cartographie des sols en Guyane. *In Livre jubilaire de l'A.F.E.S.*, 181-191, A.F.E.S., Paris.
- JOHNSON N.M., DREISS S.J., 1989 - Hydrostratigraphic interpretation using indicator geostatistics. *Water Resour. Res.*, **25**, 2501-2510.
- JOURNAL A.G., HUIJBREGTS Ch. J., 1978 - *Mining geostatistics*. Academic Press, 600 p.
- LUCAS Y., BOULET R., ANDRIEUX P., 1986 - Un système pédologique aval en Guyane Française. Organisation et fonctionnement hydrodynamique. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, **22**, 3-16.
- MATHERON G., 1965 - *Les variables régionalisées et leur estimation*. Une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature. Masson, Paris, 305 p.

- NASH M. H., DAUGHERTY L.A., GUTJAHR A., WIERENGA P.J., NANCE S.A., 1988 - Horizontal and vertical kriging of soil properties along a transect in southern New Mexico. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **52**, 1086-1090.
- RUPELLAN A., DOSSO M., FRITSCH E., 1989 - L'analyse structurale de la couverture pédologique. *Science du sol*, **27**, 319-334.
- TURENNE J.F., 1975 - *Modes d'humification et différenciation podzolique dans deux toposéquences guyanaises*. Thèse doct. Sci., Nancy. Mémoire O.R.S.T.O.M., **84**, Paris, 1977, 173 p.
- VAUCLIN M., VIERA S.R., VACHAUD G., NIELSEN D.R., 1983 - The use of cokriging with limited field soil observations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **47**, 175-184.
- VIERA S.R., NIELSEN D.R., BIGGAR J.W., 1981 - Spatial variability of field measured infiltration rate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**, 1041-1048.
- VOLTZ M., 1986 - *Variabilité spatiale des propriétés physiques du sol en milieu alluvial*. Essai de cartographie quantitative des paramètres hydrodynamiques. Doctorat d'ingénieur, E.N.S.A., Montpellier, 198 p.
- WEBSTER R., BURGESS T.M., 1980 - Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. 3 : changing drift and universal kriging. *J. Soil Sci.*, **31**, 505-524.
- 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 for soil and land resource survey*. Oxford University Press, 316 p.
- WOPEREIS M.C., GASCUEL-ODOUX C., BOURRIE G., SOIGNET G., 1988 - Spatial variability of heavy metals in soil on a one hectare plot. *Soil Sci.*, **146**, 113-118.

