

ANALYSE ET INTERPRETATION DE LA VARIABILITE SPATIALE DE LA DENSITE APPARENTE DANS TROIS MATERIAUX FERRALLITIQUES

J.-M. IRIS ⁽¹⁾

RESUME

L'analyse de la variabilité spatiale locale des propriétés des sols d'un petit bassin versant de Côte d'Ivoire est menée par l'étude des variogrammes selon la méthode d'analyse structurale géostatistique.

Trois des quatre principaux types de sol font l'objet d'un échantillonnage régulier sur des surfaces d'un hectare. Les mesures sont effectuées aux nœuds d'une grille de 10 m de côté.

Les résultats concernent la densité apparente du sol, dont la variabilité est fortement liée aux propriétés hydrodynamiques des sols.

En valeurs absolues, les valeurs de densité apparente des trois échantillons correspondent aux critères pédologiques utilisés pour la description des types de sols : des différences significatives de densité apparente opposent les sols rouges (secteur I) des sols rouge-ocres et ocres (secteurs III et II) (tableau I).

L'analyse structurale géostatistique montre qu'à chacun des trois échantillons correspond une organisation spatiale des données spécifiques (figures 4 et 5).

Les deux structures spatiales observées dans les sols rouges et ocres correspondent à deux modes différents d'évolution. Dans les premiers les modifications structurales sont brutales et paraissent localisées selon un déterminisme spatial aléatoire dans des petites clairières ouvertes dans la forêt claire. Dans les seconds et sous la savane arbustive, les modifications pédologiques sont enchaînées les unes aux autres sur des distances plus grandes. Elles sont globalement plus fortes et leur déterminisme spatial paraît lié aux différenciations pédologiques. Sous un couvert végétal arboré homogène, cette évolution semble être bloquée ou fortement ralentie.

INTRODUCTION

La détermination de la variabilité spatiale des caractères pédologiques à différentes échelles s'intègre dans l'étude des relations entre les caractères morphologiques des sols et leur comportement hydrodynamique menée sur un petit bassin versant de Côte d'Ivoire.

Plusieurs échelles d'analyse sont envisagées depuis le matériau pédologique jusqu'à l'ensemble d'un bassin versant de 136 ha (Hyperbav, 1982), les résultats présentés ici concernent l'hétérogénéité spatiale de trois types de matériaux sur un hectare.

De nombreux auteurs ont mis en évidence l'évolution topo-séquentielle des matériaux ferrallitiques en milieu subtropical, et leurs filiations chronologiques. Le plus souvent menées sur des transects topographiques, ces études ont montré la

(1) ORSTOM Centre d'Adiopodoumé B.P. V51, Abidjan, Côte d'Ivoire.

dégradation structurale des matériaux rouges associée aux phénomènes de deferrification et la dissociation entre les argiles et les sesquioxydes de fer.

Bien que reconnue comme facteur de différenciation, l'influence de ces dégradations sur la dynamique de l'eau dans les matériaux en voie de transformation reste peu précisée. En induisant des différenciations texturales (CHAUVEL, 1977) et minéralogiques ces phénomènes sont également tributaires des conditions hydrodynamiques. Des sols rouges vers les sols ocres, l'infiltration est réduite par les modifications structurales internes et superficielles. Ces transformations se révèlent par l'apparition d'un réseau de ravines d'érosion dans la partie médiane du versant.

La variabilité spatiale de la densité apparente du sol est étudiée ici avec une attention particulière afin de déceler, dans le contexte évolutif général des sols de la région, l'origine des différenciations locales qui influencent le comportement hydrique des sols (RAMBAL S. et al., 1984). Cette étude associe dans ce but une analyse statistique classique et une analyse géostatistique.

I. METHODE D'ETUDE

A) Présentation de la géostatistique

La variabilité d'une propriété Z déterminée à partir d'un échantillon d'effectif N est donnée par sa variance S :

$$S = E \{ (Z - \bar{Z})^2 \}$$

Où \bar{Z} est la valeur moyenne de Z dans l'échantillon.

(dans la suite du texte cette variabilité sera dite « globale » pour la différencier de la variabilité « spatiale ».)

Une partie de la variabilité des propriétés pédologiques est cependant induite par leur organisation spatiale que la variance ne précise pas, mais qui peut être mesurée par l'analyse géostatistique en assimilant les caractères pédologiques à des Variables Régionalisées.

La géostatistique, s'appuyant sur la Théorie des Variables Régionalisées, elle-même issue de la Théorie des Fonctions Aléatoires (MATHERON, 1965) a été élaborée pour résoudre des problèmes d'estimations minières en tenant compte de la structure spatiale des variables traitées. Dans ce but la propriété étudiée Z , localisée dans l'espace par ses coordonnées notées $X(x, y, z)$ est assimilée à une Fonction Aléatoire (FA), $Z(X)$.

Cette fonction présente un aspect imprévisible d'un point à un autre, auquel s'ajoute un aspect structuré tel que l'information saisie en un point peut être étendue à son voisinage.

Deux conditions sur la FA sont nécessaires pour caractériser sa structure à partir des valeurs observées d'un échantillon. Elles constituent l'« hypothèse intrinsèque » de la géostatistique stationnaire :

- 1) L'espérance de la propriété doit être constante dans le domaine étudié,
- 2) Sa variance ne doit pas dépendre des coordonnées des points de mesure, mais de la distance qui les sépare.

La structure est alors représentée par le variogramme :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \{ [Z(X+h) - Z(X)]^2 \}$$

où h est la distance entre les points de mesure.

Cette fonction rend compte de la covariance entre les points de mesure, analysant comment se détériore l'information acquise en un point lorsqu'on s'en éloigne.

B) Calcul des variogrammes

Pratiquement, le variogramme est estimé en définissant des classes de distances h_i telles qu'un nombre suffisant de points permettent de calculer les écarts quadratiques de la façon suivante :

$$\gamma(h) = \frac{2.N(h_i)}{1} \sum ((Z(X+h) - Z(x))^2)$$

où $N(h_i)$ est le nombre de couples séparés par h ($h_i, h_i + 1$).

(Dans la suite les variogrammes seront estimés avec des effectifs de couples supérieur à 50 dans chaque classe de distance).

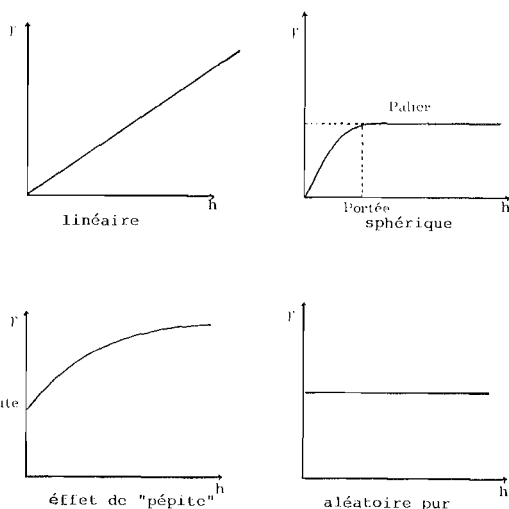


Figure 1 : Exemples de variogrammes typiques
(d'après Delhomme, 1976)

Examples of typical variograms
(from Delhomme, 1976)

La mise en évidence d'organisations spatiales anisotropes s'effectue en sélectionnant les couples orientés selon quatre directions et par le calcul des variogrammes orientés.

L'analyse géostatistique débute par la description du comportement du variogramme à l'origine et à l'infini.

COMPORTEMENT A L'ORIGINE

Les variogrammes des phénomènes structurés ont à l'origine un comportement linéaire ou parabolique signifiant que l'information acquise en un point se dégrade régulièrement quand on s'en éloigne.

La présence d'une discontinuité à l'origine, appelée « effet de pépite », peut être induite soit par les erreurs de mesure supposées aléatoires et non régionalisées, soit par l'existence d'une variabilité spatiale définie sur une distance plus faible que la plus petite classe de distance prise en compte dans le variogramme.

COMPORTEMENT A L'INFINI

A l'infini le variogramme peut être borné ou, au contraire, croissant.

Dans le cas où le variogramme atteint un palier à une distance appelée alors la « portée », une fonction d'autocorrélation lie les points plus proches que la portée. Elle s'annule lorsque le palier est atteint.

L'absence de palier indique que le phénomène observé évolue dans l'ensemble du domaine. L'espérance de la FA dépend alors des coordonnées des points de mesure et la première condition de l'hypothèse intrinsèque n'est pas réalisée. Pour se replacer dans les conditions de l'hypothèse intrinsèque il est alors nécessaire

de filtrer la relation entre la FA et les coordonnées X calculées par des régressions linéaires ou quadratiques. L'analyse de la structure peut être reprise sur les résidus de la dérive ainsi calculée.

Divers modèles comportementaux servent de repère à l'analyse (figure 1). Les plus couramment utilisés sont les modèles sphériques et linéaires auxquels correspondent des types structuraux contrastés.

Le modèle sphérique caractérise les phénomènes de transition dont la variabilité est bornée.

Les variogrammes linéaires représentent plutôt des phénomènes qui évoluent régulièrement sans qu'une véritable structure soit décelable.

Les variogrammes plats, dit « aléatoires purs » constituent un cas particulier du modèle linéaire réduit à l'effet de pépite.

Les variogrammes sont utilisés en géostatistique pour résoudre des problèmes d'estimation spatiale qui, en pédologie, peuvent être appliqués à la cartographie assistée par ordinateur (BURGESS T.M. et WEBSTER R., 1980, IRIS J.-M., 1984). Mais cette extension de la méthode ne sera pas abordée dans ce travail consacré à l'identification et à l'interprétation des types de structures observés sur la densité de trois matériaux ferrallitiques.

II. LES DONNEES ET LEUR VARIABILITE

A) La densité apparente du sol

Trois secteurs expérimentaux d'environ 1 ha choisis pour l'homogénéité de leur couverture pédologique (FRITSCH E. et PLANCHON O., 1985) ont été échantillonnés selon une grille carrée de 10 m de côté. Chaque prélèvement a été effectué dans un matériau pédologique caractéristique du bassin à une profondeur variant selon les secteurs, entre 20 cm et 45 cm de profondeur.

La densité apparente du sol en place est donnée par le rapport du poids de la terre séchée à l'étuve à 105° au volume du prélèvement effectué dans un cylindre de 960 (cm³). Elle dépend de la structure macroscopique du sol et de la densité de ses constituants qui, ici, sont voisines (quartz et kaolinite). De ce fait, la variabilité de la densité apparente représente la variabilité de la structure du sol.

Cette mesure effectuée sur le terrain en est entachée d'une erreur estimée pour une densité moyenne de 1,58 (g/cm³) dans l'intervalle :

$$1,6 \cdot 10E-3 \text{ (g/cm}^3\text{)}^2 < \text{Smes.} < 6,2 \cdot 10E-3 \text{ (g/cm}^3\text{)}^2.$$

B) Les trois secteurs étudiés

Les trois secteurs (figure 2) sont situés dans la partie supérieure d'un versant couvert de sols ferrallitiques typiques et appauvris représentatifs des couvertures ferrallitiques développées sur les substrats acides.

Le secteur I est localisé à l'amont du secteur II et, de ce fait les matériaux échantillonnés ont probablement une origine commune. La couverture végétale passe progressivement de la forêt sèche ouverte par des clairières à la savane arbustive développée à mi-versant.

Le secteur III se distingue des deux autres par le relief peu accusé du versant et une couverture forestière sèche homogène.

Dans le secteur I, l'échantillonnage spatial porte sur un matériau typique ferrallitique, rouge, bien drainé, de texture argilo-sableuse. Les éléments structuraux polyédriques sont délimités par un réseau fissural développé et apparemment opérationnel.

Le sol ocre du secteur II situé immédiatement à l'aval du précédent le long du versant, est une forme dégradée des matériaux rouges caractérisée par la

diminution des teneurs en argile et en Fer et l'effondrement de la structure macroscopique.

Une partie du secteur est occupée par le bassin versant d'une ravine qui s'approfondit à l'aval. De nombreuses termitières en occupent la surface ; les mesures de densité effectuées dans ces formations ont été éliminées de l'échantillon (12 prélèvements).

Dans le secteur III la couleur rouge-ocre du matériau indique une defferification peu poussée, mais la texture argilo-sableuse a préservé la structure macroscopique soulignée par un réseau de fissures fines. Ce réseau paraît fonctionnel, Mais la texture grossière induit dans ce sol une capacité de rétention plus faible que dans le sol rouge.

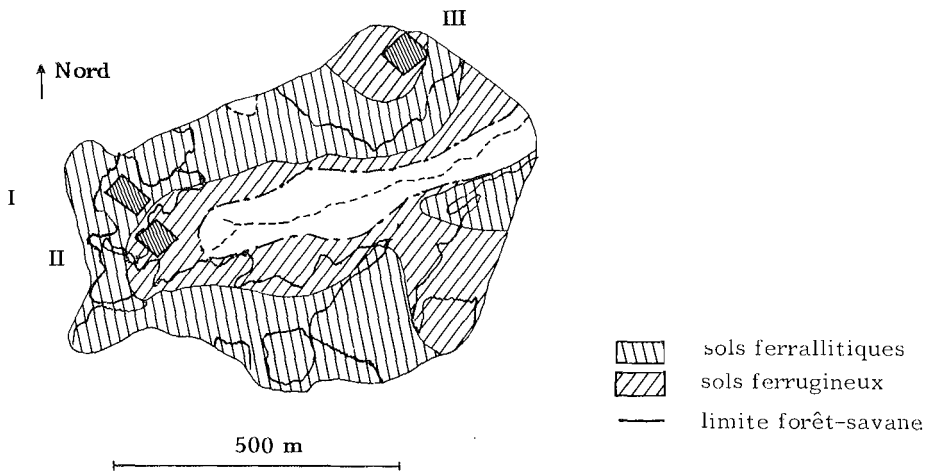


Figure 2 : Localisation des secteurs étudiés sur l'esquisse pédologique.
(d'après E. FRITSCH et C. VALENTIN)

Localisation of studied areas on the pedological map
(from E. FRITSCH and C. VALENTIN)

Fréquences relatives (%)

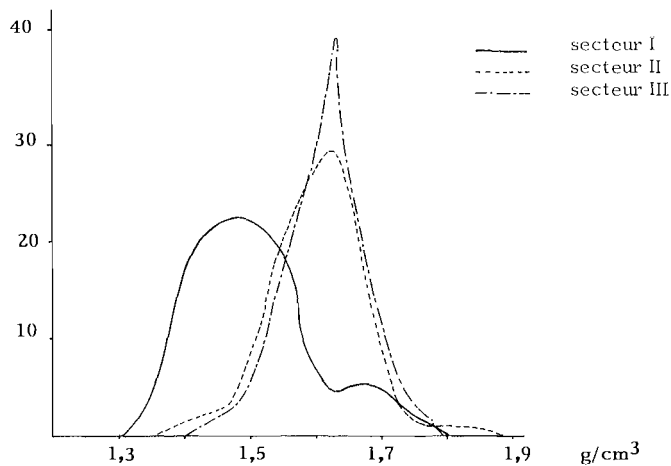


Figure 3 : Distributions des valeurs de densité apparente.

Plotted distributions of bulk density in the three areas.

C) La variabilité globale de la densité apparente

Le diagramme des fréquences de la densité apparente présenté figure 3 fait apparaître les caractéristiques statistiques des trois échantillons étudiés.

En valeur moyenne la densité apparente croît du matériau rouge vers les matériaux rouge-ocre et ocre, l'analyse de la variance distingue ces deux types de matériaux de façon très hautement significative (risque de première espèce inférieur à $10E-5$).

Tableau I : Paramètres statistiques de la densité apparente dans les trois secteurs
Statistical parameters of the bulk density in the three areas

secteur	effectif	moyenne (g/cm ³)	variance (g/cm ³) ²	CV (%)
I	70	1,5	7,6 10E-3	5,8
II	96	1,6	6,5 10E-3	5,0
III	115	1,6	3,2 10E-3	3,5

La bimodalité de la distribution du secteur I est induite par la présence d'une nappe de gravillons ferrugineux de faible extension à l'amont du secteur.

La variance des échantillons croît dans l'ordre des secteurs III, II et I et les coefficients de variations passent de 3,5 % à 5,8 % (Tableau I).

Les trois groupes de données récoltés se distinguent en valeur moyenne par les différences entre les sols rouges et ocres, et par la faible dispersion de la densité des matériaux du secteur III. Il reste cependant difficile, à ce niveau d'analyse, d'interpréter la signification de ces différences.

D) La variabilité spatiale de la densité apparente

L'analyse de la variabilité spatiale porte sur les données brutes de la densité apparente et sur les résidus des régressions les plus significatives.

1. Expression des dérives

Le tableau II présente les résultats des régressions linéaires et quadratiques calculées systématiquement dans les trois secteurs. Les coefficients de régression sont tous significatifs au seuil de 95 %. Seules trois des six équations expriment plus de 20 % de la variance de la densité apparente sur les secteurs étudiés.

Tableau II : Caractéristiques des régressions
Regression parameters

régression N	coeff. corr.	coefficients de régression					
		A1	A2	A3	A4	A5	A6
SECT. I Linéaire	70	0,106		-0,2			1,48
SECT. I Quadr.	70	0,531 *	-8,9	-3,3		0,1 0,03	1,71
SECT. II Linéaire	96	0,499	-0,8	-0,9			1,69
SECT. II Quadr.	96	0,512 *	-0,9			-0,1	1,68
SECT. III Linéaire	115	0,216		0,4			1,59
SECT. III Quadr.	115	0,332	0,9	1,2	0,01		1,54

* : régressions dont les résidus font l'objet d'une analyse géostatistique (dérives).

28 % de la variance globale du secteur I s'exprime dans la régression quadratique, contre 1 % dans la régression linéaire. La tendance dégagée est une dérive quadratique qui se présente sous la forme d'une cuvette allongée selon l'axe Nord-Ouest/Sud-Est (figure 4a).

Dans le secteur II les coefficients de corrélation multiple obtenus avec les régressions linéaires et quadratiques sont voisines. Les deux équations obtenues expriment 25 % et 26 % de la variance globale. L'ensemble des données présente une dérive de gradient Nord-Sud de $1,2 \cdot 10^{-3}$ [g/cm³]/m. Dans la direction Est/Ouest le gradient est de $9,2 \cdot 10^{-5}$ [g/cm³]/m (figure 4b).

La densité apparente du matériau rouge-ocre sous la forêt (secteur III) ne présente pas de tendance spatiale décelable par la méthode statistique classique.

$$D_a = A_1 \cdot x + A_2 \cdot y + A_3 \cdot xy + A_4 \cdot x^2 + A_5 \cdot y^2 + A_6$$

coordonnées dans le plan : X(x, y)

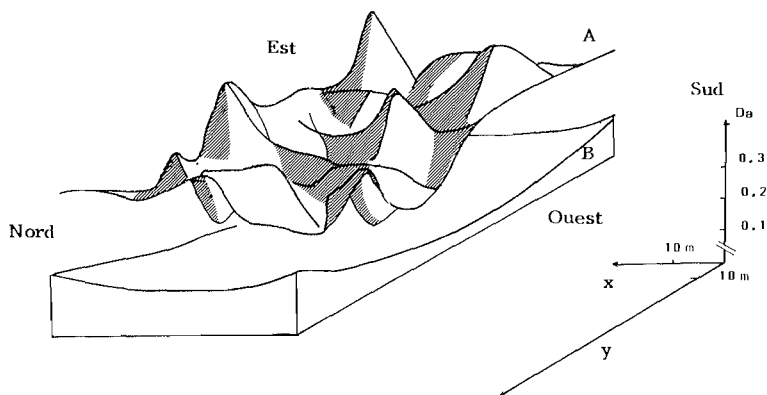


Figure 4a : Evolution spatiale de la densité apparente (A), et de sa dérive quadratique (B) dans le secteur I.

Spatial evolution of bulk density (A) and quadratic trend (B) in area I.

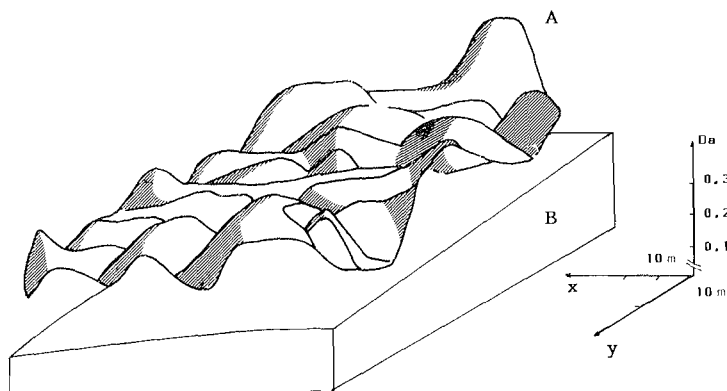


Figure 4b : Evolution spatiale de la densité apparente (A), et de sa dérive quadratique (B) dans le secteur II.

Spatial evolution of bulk density (A) and quadratic trend (B) in area II.

Les variogrammes ont été calculés sur les données brutes des trois secteurs et sur les résidus des dérivés quadratiques retenues dans les secteurs I et II. L'analyse porte d'abord sur l'influence des phénomènes « en grand » sur la structure dans les secteurs I et II, puis sur la comparaison des structures observées dans les trois secteurs.

Tableau III : Caractéristiques des variogrammes de la densité apparente
Characteristics of variogram of the bulk density

	Type de structure	Discontinuité à l'origine (g/cm ³) ²	Palier (g/cm ³) ²
SECTEUR I	SPHERIQUE	3,2 10E-3	8,3 10E-3
RESIDUS I	SPHERIQUE	3,2 10E-3	6 10E-3
SECTEUR II	LINEAIRE (1)	4,3 10E-3	—
RESIDUS II	LINEAIRE (1)	4,1 10E-3	—
SECTEUR III	SPHERIQUE	2,6 10E-3	3,2 10E-3

(1) Structure anisotrope.

SECTEUR I

Les variogrammes de la densité apparente et des résidus dans les matériaux rouges sont bornés, de type sphérique (Tableau III et figure 5). L'extraction de la dérive n'affecte pas la structure mais modifie les valeurs de palier et de portée, l'effet de pépite reste inchangé. La dérive exprime 28 % de la variabilité maximale. Ce résultat, établi à partir des variogrammes, confirme celui de la régression, qui n'exprime que 46 % de la variance spatiale maximale.

Du fait du choix de l'emplacement du secteur à partir de l'observation minutieuse des sols, les portées de 45 m pour les résidus et 56 m pour les données brutes sont plus élevées que celles citées dans la littérature (VIERA SR. et al., 1983, GASCUEL-ODOUX C., 1984).

L'effet de pépite représente 39 % de la variance spatiale maximale. La configuration du plan d'échantillonnage n'a pas permis de déceler la présence d'une structure anisotrope.

Ce secteur constitue un domaine de transition où la variabilité est forte sur des distances courtes mais reste limitée dans l'ensemble du domaine. Localement, les gradients peuvent être importants mais la variabilité spatiale maximale est peu élevée.

SECTEUR II

Dans les matériaux pédologiques du secteur II les variogrammes de la densité apparente et des résidus ne sont pas bornés (figure 6a). Ces variogrammes sont composés de deux branches linéaires qui se joignent à 70 m. L'extraction de la dérive filtre la première branche du variogramme dont la pente est fortement réduite, mais elle modifie peu la pente de la seconde branche qui ne correspond pas au même déterminisme. Là aussi, l'allure générale du variogramme des résidus ne diffère pas de celui des données brutes.

L'examen des variogrammes orientés révèle l'anisotropie structurale de la densité apparente et des résidus quadratiques par la concentration de l'essentiel de la variabilité spatiale dans la direction Nord/Sud (figure 6b). Le long de cet axe la distinction de deux structures emboîtées n'apparaît plus. Les deux structures décelées par le variogramme des données brutes se distinguent donc par leurs orientations perpendiculaires. La première, définie aussi bien par la régression que les variogrammes est

induite par la différenciation des sols. La seconde, mal exprimée par la dérive quadratique correspond à un phénomène de forte amplitude vraisemblablement liée à la présence de la ravine.

SECTEUR III

Dans le secteur III le variogramme est sphérique, cependant l'effet de pépîte correspond à 81 % de la variance spatiale maximale atteinte à 50 m. Ce comportement est lié à la distribution très réduite des valeurs de la densité apparente, et à l'absence de dérive. La valeur du palier est, de ce fait voisine de la variance globale de l'échantillon.

A chacun des sites étudiés correspond une organisation structurale propre. La variabilité spatiale la plus forte s'observe dans les sols ocres de savane. Elle correspond à un déterminisme spatial assez important du fait des caractéristiques des dérives et de l'orientation des gradients.

A faible distance la variabilité des sols rouges est cependant plus importante que celle des sols ocres. La structure apparaît, dans le secteur I comme étant plus liée à des phénomènes localisés de façon aléatoire et donc mieux analysés par la géostatistique.

Les effets de pépîte des variogrammes des trois secteurs diffèrent peu et correspondent très probablement à l'erreur de mesure dont la variance a été estimée plus haut.

Pour une même variable échantillonnée selon des modalités spatiales identiques dans des matériaux différents, l'analyse géostatistique met en évidence deux types d'organisations. En séparant les variabilité d'origines diverses, l'analyse des variogrammes (analyse structurale en géostatistique) permet de poser quelques jalons pour une interprétation pédodynamique des sols ferrallitiques du bassin versant.

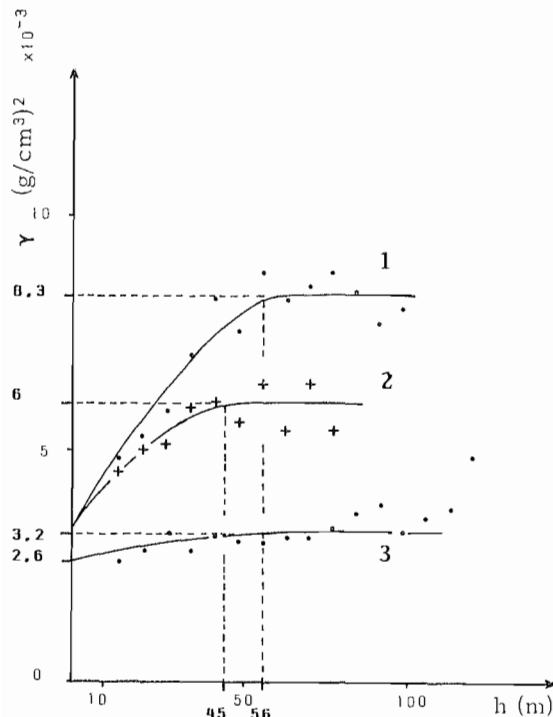


Figure 5 : Variogrammes expérimentaux des secteurs I et III.

- (1) = densité apparente I.
- (2) = résidus quadratiques I.
- (3) = densité apparente III.

Figure 5 : Experimental variograms plotted for area I and III.

- (1) = bulk density I.
- (2) = quadratics residual I.
- (3) = bulk density III.

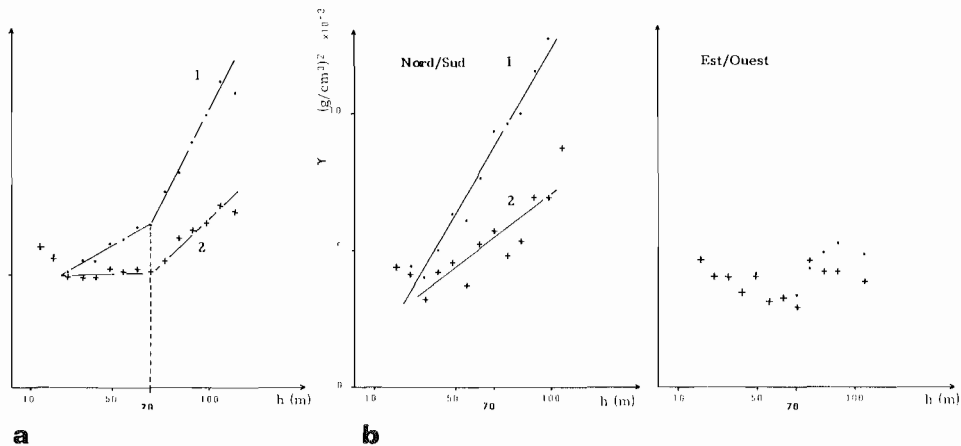


Figure 6a : Variogrammes expérimentaux du secteur II.

(1) = densité apparente II
(2) = résidus quadratiques II

Figure 6b : Variogrammes orientés du secteur II.

Figure 6a : *Experimental variograms*

(1) = *bulk density II*
(2) = *quadratics residual II*

Figure 6b :

Interprétation pédodynamique des résultats

Dans le sol rouge sous la forêt claire à *Daniellia oliveri*, l'effondrement de la structure macroscopique se détermine de façon aléatoire au niveau des petites clairières couvertes de savane arbustive à *Cochlospermum planchonii* et *Andropogon* spp d'une vingtaine de mètres de diamètre.

Sous la savane arbustive qui fait suite à la forêt sur le versant, l'évolution structurale du sol ocre se poursuit selon un déterminisme spatial très affirmé orienté selon l'axe de différenciation des sols. Cette évolution n'apparaît pas dans le sol rouge-ocre sous la forêt claire.

La présence d'un couvert végétal arboré semble ainsi fortement influencer la dynamique d'évolution de la structure des sols. Les déséquilibres pédologiques et structuraux ne s'expriment qu'avec l'ouverture du couvert arboré, le passage de la savane arborée à la savane arbustive puis herbeuse des clairières.

En savane, à mi-versant, l'évolution structurale accompagne les processus de défférication et de migration des particules les plus fines du sol. La péjoration du comportement hydrique des sols paraît être à la fois la cause et la conséquence de ces processus mis en place à partir du déséquilibre observé dans les sols rouges. Dans cette situation, l'évolution régulière de la structure paraît correspondre à une succession d'équilibres enchaînés plutôt qu'à un déséquilibre brutal induit par un facteur externe au sol.

A l'opposé, la présence d'un couvert arboré homogène sur le sol rouge-ocre bloque (ou limite fortement) l'évolution structurale du matériau sous-jacent.

CONCLUSIONS

L'étude de la variabilité spatiale locale de la densité apparente de trois matériaux ferrallitiques est à l'origine d'une analyse des états d'équilibres de ces matériaux. Le niveau d'appréhension envisagé (l'hectare) permet d'étudier dans un contexte évo-

utif régional déjà largement connu par de nombreux travaux antérieurs, les caractéristiques locales qui contrôlent la dynamique de ces différenciations.

Les trois situations étudiées diffèrent par le stade évolutif des matériaux (rouge et ocre) et par le type de couvert végétal (forêt et savane).

Les trois secteurs échantillonnés dans un petit bassin versant de Côte d'Ivoire présentent chacun leur propre type de structure spatiale pour la densité apparente, caractéristiques d'une dynamique d'évolution particulière :

+ la structure pédologique des matériaux rouge évolue brutalement sur de courtes distances qui correspondent au passage du couvert arboré à la savane dans des petites clairières ouvertes dans les forêts claires des sommets de versants. A l'échelle de l'hectare, ces transformations sont limitées.

+ Ces différenciations brutales déclenchent les processus d'évolution structurale observées dans les sols ocres. La couverture végétale peut encore influencer l'évolution ultérieure de la structure pédologique :

1) En savane, l'ensemble du matériau évolue avec un gradient faible et régulier orienté selon l'axe des différenciations pédologiques. La modification du régime hydrique produit des perturbations qui affectent secondairement la densité apparente du sol, ici la présence d'une ravine.

2) La présence d'une couverture forestière sur le versant semble bloquer la différenciation des sols. La variabilité spatiale locale de la densité apparente y est très faible.

Cette étude de la variabilité spatiale locale de la densité apparente a permis de situer des zones de déséquilibre structural et de mesurer l'effet des modifications pédologiques qui leur sont liés. Pour cela on a eu recours à deux méthodes statistiques complémentaires : la variabilité régionale a été mise en évidence par des méthodes régressives classiques, et les déséquilibres locaux par la construction et l'interprétation des variogrammes.

Cette note donne ainsi un exemple de la puissance de la méthode d'analyse géostatistique pour des phénomènes dont l'évolution laissent des traces régionalisées.

D'un point de vue méthodologique, ces résultats nous conduisent également à examiner très attentivement les méthodes d'estimation, en effet aucun ajustement à un modèle unique ne pourra rendre compte de l'ensemble des structures observées. C'est pour cette raison que ce travail est limité à l'identification et à l'analyse des structures sans proposer de méthode cartographique globale par la méthode géostatistique.

Reçu pour publication : Juillet 1985

Accepté pour publication : mars 1986

AN ANALYSIS OF THE SPATIAL VARIABILITY OF BULK DENSITY IN THE FERRALITIC MATERIALS

Geostatistics is used to study local hydrodynamical variability of the soils in a small watershed in West Ivory Coast.

Three of the four soils are represented by three samples area of one ha each. Measurements were taken on each samples following a 10 × 10 m sampling grid.

Results describe bulk density for these typical materials, which variability is strongly correlated with water behaviour.

Among the three sampled areas (said I to III) significant differences only appeared between redish (I) and yellow-redish soils (II and III). Area III exhibits a very lower variance (table I).

Geostatistical analysis shows that each area can be characterized by its particular organization of the data (figure 4 and 5).

• *Area I is characterized by red drainage ferrallitic soil on the hillslopes top. Plotted variogram reach a sill to 56 m lag. Nugget effect is near 3,1 10E-3 (g/cm³)²*

(table II). Spatial variation of the bulk density is there bounded for a distance greater than 56 m.

- Area II is covered by a yellow reddish ferralitic soil under savannah. Variogram is unbounded and spatial variability reveals continuous variation in this area along the axis of the pedological differentiation. Regression analysis shows that 25 % of the variance of the bulk density is accounted for a linear equation of the sample points coordinates. However nugget effect is approximately $4,3 \cdot 10E-3 \text{ (g/cm}^3\text{)}^2$.

- In Area III, sampled in yellow-reddish soils as above, but located in a clear forest, variogram is purely randomized. Nugget effect is of the same order of the measurement noise $3,2 \cdot 10E-3 \text{ (g/cm}^3\text{)}^2$.

In both Area I and II, geostatistical analysis has been performed on residuals of a quadratic regression on the coordinates of the sampling points. No significant differences were displayed on the structure of variograms. The main effect on variability is shown in Area II where a large part of the variability induced by the regional differentiation of soils is filtered (figure 6a and 6b).

Finally, in a small tropical watershed (figure 2) each sampling area shows its own spatial variability for the bulk density. Soil structure variation depends on both regional differentiation of soils and local factors affecting soil stability such as vegetal cover.

BIBLIOGRAPHIE

- BURGESS T.M., WEBSTER R., 1980. — Optimal interpolation and isarithmic mapping. I. The semivariogram and punctual kriging. *The Journal of Soil Science* (31) pp. 315-331.
- CHAUVEL A., 1977. — Recherche sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. ORSTOM, Paris, Coll. Trav. et Doc. 62, 532 p.
- DELHOMME J.P., 1976. — Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse de Docteur Ingénieur, Paris VI, 160 p.
- FRITSCH E. et PLANCHON O., 1985. — Description de la couverture pédologique du bassin de Booro. Rapport ORSTOM, Adiopodoumé, 10 p.
- GASCUEL-ODOUX C., 1984. — Analyse bibliographique de la variabilité spatiale de la densité apparente : objectifs, méthodes et résultats. *Bull. GFHN* (15), pp. 57-72.
- HYPERBAV, 1982. — Programme de Recherche Hydro-pédologique sur Petit Bassin Versant. Rapport ORSTOM, Adiopodoumé, 10 p.
- IRIS J.M., 1984. — Analyse de la variabilité spatiale d'un paramètre pédologique. *Sciences de la Terre*. Vol. 20, pp. 322-331.
- MATHERON G., 1965. — Les variables régionalisées et leur estimation. Masson Edit., 301 p.
- RAMBAL S., IBRAHIM M., RAPP M., 1984. — Variabilité spatiale des variations du stock d'eau du sol sous forêt. Application à l'optimisation d'un dispositif de mesure du bilan hydrique. *Géoderma*, vol. 11, n° 2/3, pp. 177-186.
- VIERA S.R., HATFIELD J.L., NIELSEN D.R., et BIGGAR J.W., 1983. — Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia* (51) 3 75 p.
- VALENTIN C., FRITSCH E., PLANCHON O., 1986. — Sols, surfaces et formes d'érosion linéaire en milieu ferrallitique. L'exemple d'un bassin versant du Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. Séminaire régional sur les latérites, Yaoundé, 20-27 Janvier 1986.