

Variabilité intraparcélaire de quelques propriétés des sols sableux des Landes de Gascogne (France)

Conséquences sur la stratégie d'échantillonnage agronomique

D. Arrouays₍₁₎, Isabelle Vion₍₂₎, Cl. Jolivet₍₁₎, Dominique Guyon₍₃₎, A. Couturier₍₁₎
et J. Wilbert₍₁₎

1 INRA, Unité de Science du Sol, SESCOF, 45160 Ardon, France

2 Inter-Etudes-Aménagement, Parc Technologique de La Pardieu, 63063 Clermont-Ferrand Cedex 1, France

3 INRA, Laboratoire de Bioclimatologie, BP 81, 33883 Villenave d'Ornon Cedex, France

RÉSUMÉ

Sur une parcelle maïsicole des Landes de Gascogne, on étudie la variabilité intraparcélaire de quelques propriétés de sols sableux. On réalise des prélèvements selon un carroyage systématique et des déterminations des taux de matière organique, du pH, et des teneurs en K_2O et P_2O_5 . On étudie la variabilité de ces caractères selon des techniques statistiques classiques et selon des techniques géostatistiques. Les résultats mettent en évidence la très forte variabilité des paramètres K_2O et P_2O_5 , qui peuvent être considérés comme aléatoirement distribués à l'échelle étudiée. Les teneurs en matière organique et le pH présentent, par contre, une structure spatiale qui autorise leur cartographie intraparcélaire par krigeage. On développe ensuite les conséquences de ces variabilités aléatoires ou structurées sur la possibilité de modulation des apports en fonction de l'existence ou non de zones d'isoteneurs, et sur la stratégie d'échantillonnage à adopter pour un suivi à long terme de l'évolution de ces paramètres. On montre qu'il est possible de moduler les apports de chaux sur la parcelle afin d'éviter des chaulages excessifs ou trop faibles. A l'opposé, il apparaît impossible de délimiter des zones d'isoteneurs en K_2O et en P_2O_5 , suffisamment vastes pour être fertilisées différemment. De plus, on montre que le nombre d'échantillons à prélever pour un suivi temporel de ces caractéristiques doit être beaucoup plus élevé que celui retenu dans les pratiques agronomiques conventionnelles.

Mots clés

Sols sableux, variabilité spatiale, échantillonnage, géostatistique, modulation des intrants.

SUMMARY

SHORT-RANGE VARIABILITY OF SOME CHARACTERISTICS OF A CORN-CROPPED SOIL IN FRENCH GASCONY. Impacts on sampling designs.

The short-range variability of some characteristics of a sandy soil were studied for a continuously corn-cropped field of French Gascony. A systematic grid of sampling was applied for the measurement of organic matter content, pH in water and K_2O and P_2O_5 contents. The variability of these characteristics was studied by using both classical statistics and geostatistical methods. Results demonstrated the large spatial variability of K_2O and P_2O_5 that can be considered as randomly distributed at the scale of the study. On the contrary, organic matter and pH exhibited a spatial structure which made possible their mapping by kriging. The impacts of these spatial differences are discussed, in terms of rates of field input, and sampling design for long-term monitoring. One can spatially vary the liming rate within the field in order to avoid overliming and underliming of large areas. However, one cannot map large enough

homogeneous areas for K_2O and P_2O_5 . Moreover, the number of samples for monitoring these characteristics is much greater than the one retained in classical agronomic characterizations.

Key-words

Sandy soils, spatial variability, sampling, geostatistics, spatially variable crop management.

RESUMEN

VARIABILIDAD INTRAPARCELARIA DE ALGUNAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS ARENOSOS DE LA REGIÓN " LANDAS DE GASCOGNES, FRANCIA "

Consecuencias sobre la estrategia de muestreo agronómico

Sobre una parcela de cultivo de maíz en los Landas de Gascognes, se estudia la variabilidad intraparcilaria de algunas propiedades de los suelos arenosos. Se realiza muestreos según una cuadrícula sistemática y determinaciones de las tasas de materia orgánica, del pH, y de las tasas de K_2O y P_2O_5 . Se estudia la variabilidad de estos caracteres según técnicas estadísticas clásicas y según técnicas geoestadísticas. Los resultados ponen en evidencia la muy fuerte variabilidad de los parámetros K_2O y P_2O_5 , que puede ser considerados como distribuidos aleatoriamente a la escala estudiada. Las tasas de materia orgánica y el pH presentan al contrario una estructura espacial que autoriza una cartografía intraparcilaria por «krigeage». Se desarrolla después las consecuencias de estas variabilidades aleatorias o estructuradas sobre la posibilidad de modulación de los aportes en función de la existencia o no de zonas de isocontenidos y sobre las estrategias de muestreo a adoptar para un seguimiento a largo plazo de la evolución de estos parámetros.

Palabras claves

Suelos arenosos, variabilidad espacial, muestreo, geoestadística, modulación de los aportes.

La variabilité intraparcellaire des caractères du sol est étudiée depuis de nombreuses années. Les méthodes statistiques classiques ont été tout d'abord utilisées pour décrire cette variabilité. Une revue de ces travaux a été présentée par Beckett et Webster (1971). Un objectif fréquent est de déterminer le nombre d'échantillons nécessaires pour obtenir la valeur moyenne d'une caractéristique avec un niveau de confiance donné [par exemple, Beckett et Webster (1971); Wilding et Drees, (1983); Nolin et al., (1991, 1993)]. Un autre problème classique est de pouvoir s'abstraire des effets de la variabilité du sol dans les expérimentations portant sur les plantes. Pour atteindre ces objectifs, des stratégies d'échantillonnage et des méthodes statistiques appropriées ont été développées (Papadakis, 1937; Cochran, 1977; Pichot, 1993). La théorie des variables régionalisées (Matheron, 1963) a permis le développement des outils géostatistiques qui ont été fréquemment utilisés pour l'étude de la variabilité des sols à grande échelle [par exemple, Goulard et al., (1987), Webster et Oliver (1990, 1992), Voltz et Webster (1990), Meredieu et al., (1996), Arrouays et al., (1996)] ainsi que pour l'optimisation des stratégies d'échantillonnage [par exemple, McBratney et Webster, (1983), Papritz et Webster, (1995a et b)]. L'intérêt du couplage des méthodes géostatistiques et de la cartographie des sols a récemment fait l'objet d'une revue bibliographique (Gascuel-Oudoux et al., 1993).

Depuis les années cinquante, la monoculture intensive de maïs grain irrigué s'est développée sur les sols sableux des Landes de Gascogne, entraînant des apports importants d'engrais et la généralisation de l'utilisation de pesticides. Dans ce milieu, la matière organique constitue, en l'absence de colloïdes minéraux, le facteur essentiel de rétention d'eau et de cations (Delas, 1971; Juste, 1992a). De nombreuses études ont également montré (par exemple Liu et al, 1970; Helling, 1971; Majka et Lavy, 1977; Fernandez et al, 1988), que ce constituant représente un facteur essentiel pour l'adsorption des pesticides.

Or, une des caractéristiques importantes des parcelles cultivées dans ce milieu est leur hétérogénéité (Righi, 1977; Righi et Wilbert, 1984), en particulier en ce qui concerne la répartition de la matière organique, susceptible de varier fortement sur des distances décimétriques. Une telle hétérogénéité constitue un facteur limitant la bonne adéquation aux caractéristiques du sol des doses d'engrais et de pesticides. De nombreuses études ont en effet montré qu'un apport uniforme (fertilisants, pesticides, amendements) sur une parcelle hétérogène provoquait des excès et des manques sur des surfaces importantes (par exemple, Schueller, 1992; Cassman et Plant, 1992; van Noordwijk et Wadman, 1992; Kachanoski et Fairchild, 1996), pouvant ainsi conduire à des dommages aux cultures, à un surcoût pour l'exploitant, et - dans le cas présent - à un entraînement vers la nappe phréatique proche.

Une cartographie intraparcellaire des caractéristiques des sols pourrait pallier en partie ces inconvénients. En effet,

durant les dernières décennies, de nombreuses études ont visé à développer des équipements permettant la modulation des doses d'engrais ou de pesticides en fonction des caractéristiques du sol, préalablement déterminées ou détectées par des capteurs lors du déplacement du matériel dans la parcelle (par exemple, Krishnan et al, 1981; Ruckmann et al, 1981; Pitts et al, 1983; Griffis, 1985; Schueller, 1991 et 1992). Une autre conséquence de l'hétérogénéité intraparcellaire est la difficulté du choix d'une stratégie d'échantillonnage pour un suivi à long terme de l'évolution des caractéristiques des sols.

Les objectifs du travail présenté ici sont : (i) d'évaluer certaines caractéristiques (teneur en matière organique, pHeau, K_2O et P_2O_5) présentent des structures spatiales permettant une cartographie intraparcellaire opérationnelle dans ce milieu et (ii) de déterminer quelle stratégie d'échantillonnage doit être adoptée pour un suivi à long terme de l'évolution de ces caractéristiques.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Site d'étude

La parcelle étudiée est située au sein du paysage pédologique de la Lande humide, caractérisé par une association de podzols à horizon BP compact plus ou moins aliotique [(PODZOLS DURIQUES et HUMO-DURIQUES, (Righi, 1992)], et de podzols hydromorphes à horizon BP meuble [PODZOLS HUMIQUES, (Righi, 1992)]. La surface de la zone sur laquelle porte l'étude est rectangulaire (140 X 240 m), couvrant 3,4 hectares. Cette parcelle est cultivée en monoculture intensive de maïs grain irrigué depuis 10 ans.

Observations pédologiques et échantillonnage

L'échantillonnage des sols a été réalisé selon une grille régulière de 20 mètres de côté. En chacun des 104 points de cette grille, la couche 0-20 cm a été prélevée pour les analyses. Le prélèvement a été réalisé à l'aide d'une tarière (diamètre 8 cm) sur les 20 premiers centimètres de la couche labourée (profondeur du labour : environ 30 cm). Sur 10 intervalles choisis au hasard, un prélèvement complémentaire à mi-distance (10 m) a été réalisé afin d'appréhender la variabilité à cette échelle. La microvariabilité à des échelles plus grandes n'a pas été étudiée car l'objectif était de tester la faisabilité d'un zonage opérationnel délimitant des aires suffisamment grandes pour être prises en compte dans la modulation des doses ou dans l'élaboration d'une stratégie d'échantillonnage.

Analyses de sol

Chacun des 114 échantillons a donné lieu aux détermina-

tions suivantes :

- Matière organique, déterminée par perte au feu (800°C durant 5 heures) sur une quantité importante (40 grammes) de matériau préalablement homogénéisé,
- pH eau, [NF ISO 10390, (AFNOR, 1996)],
- P₂O₅ méthode Dyer, [NF X 31-160, (AFNOR, 1996)],
- K₂O échangeable [acétate d'ammonium, NF X 31-108, (AFNOR, 1996)].

Analyse statistique

Les résultats ont donné lieu à deux types de traitements.

i) Des traitements de statistique « classique » [moyenne, écart-type, coefficient de variation, tests de normalité (Khi-deux), corrélations entre variables].

ii) Des traitements géostatistiques, utilisant la théorie des variables régionalisées (Matheron, 1963 ; Delhomme, 1978), (calcul des variogrammes, krigeage dans le cas de variables présentant des structures spatiales). Le calcul des variogrammes a été réalisé avec un pas de 20 mètres. Sur les figures, nous reportons également les valeurs de semi-variance correspondant aux couples de points distants de 10 m. En raison du faible nombre de couples, cette dernière valeur de semi-variance n'a pas été prise en compte pour l'ajustement. L'ajustement des variogrammes a été réalisé par la procédure classique des moindres carrés, avec un poids fonction du nombre de couples de points (Webster et Oliver, 1990).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Variabilité des valeurs observées

Le tableau 1 présente les caractéristiques statistiques des valeurs observées sur la parcelle. La variabilité est très élevée pour la potasse et l'acide phosphorique. La variabilité relative des différents paramètres est illustrée par l'ordre de grandeur de leurs coefficients de variation (CV). Le pH présente la variabilité la plus faible (CV = 8,4 %) ; ce paramètre est connu pour

sa faible variabilité à l'échelle parcellaire (Cipra et al., 1972 ; Campbell, 1978 ; Luxmore et Shama, 1980 ; Gajem et al., 1981 ; Vauclin, 1982 ; Laslett et al., 1987). En revanche, les teneurs en matière organique présentent une variabilité plus importante : leur coefficient de variation (24,1 %) est du même ordre de grandeur que ceux cités par Cipra et al., (1972), Vauclin (1982), ainsi que Williot (1995) pour des sols forestiers. D'après la revue bibliographique de Wilding et Drees (1983), la matière organique fait partie des caractères les plus variables (CV > 35 %) au sein de surfaces de l'ordre d'un hectare ou moins. Sur 8 parcelles situées dans les Landes de Gascogne, Jolivet (1996) obtient des coefficients de variation qui varient de 11 à plus de 50 %. On note la très forte variabilité des caractères chimiques K₂O et P₂O₅ (CV voisin de 50 %). Dans une revue concernant la variabilité spatiale des propriétés des sols, Vauclin (1982) cite des coefficients de variation compris entre 37 et 89 % pour la potasse, et pouvant parfois dépasser 300 % pour le phosphore.

Relations entre les variables

L'étude des corrélations entre les variables (tableau 2) fait apparaître des relations entre matière organique et pH eau, matière organique et phosphore, matière organique et potasse, et pH eau et potasse (seuils de signification à 5 %, R² = 0,0357). Toutefois, ces relations, bien que significatives, sont faibles, et aucune régression linéaire ne permet d'expliquer un pourcentage satisfaisant de la variance des paramètres.

Étude géostatistique et variabilité spatiale

Pour identifier l'existence de structures spatiales, les semi-variogrammes expérimentaux ont été calculés. Les valeurs ont été normalisées par les variances correspondantes (figures 1, 2, 3, 4).

Le semi-variogramme normalisé de la matière organique présente un palier de l'ordre de 1. Cela montre l'existence d'une variance finie. Les dimensions de la parcelle semblent suffisantes pour décrire toute la variabilité spatiale du paramètre matière organique.

Tableau 1 - Paramètres statistiques des variables matière organique (M.O.), pH eau, P₂O₅ et K₂O.

Table 1 - Statistical parameters for organic matter (M.O.), pH in water, P₂O₅ et K₂O.

	MO (g/100g)	pH eau	P ₂ O ₅ (ppm)	K ₂ O (ppm)
Moyenne	4,82	5,81	288,7	42,3
Minimum	2,75	4,43	58,2	2,4
Maximum	8,35	7,2	808,7	122,5
Ecart-type	1,16	0,49	142,8	23,3
Cœf. var. %	24,1	8,4	49,5	55,1

Figure 1 - Semi-variogramme expérimental (points) et modèle ajusté (ligne) pour la variable pH_{eau}. Le point à 10 m (triangle) n'est pas pris en compte pour l'ajustement. Modèle linéaire croissant, pépité = 0,48.

Figure 1 - Experimental semi-variogram (points) and fitted model (line) for pH_{water}. 10-m lag point (triangle) was not taken into account for modelling. Linear increasing model, nugget = 0.48.

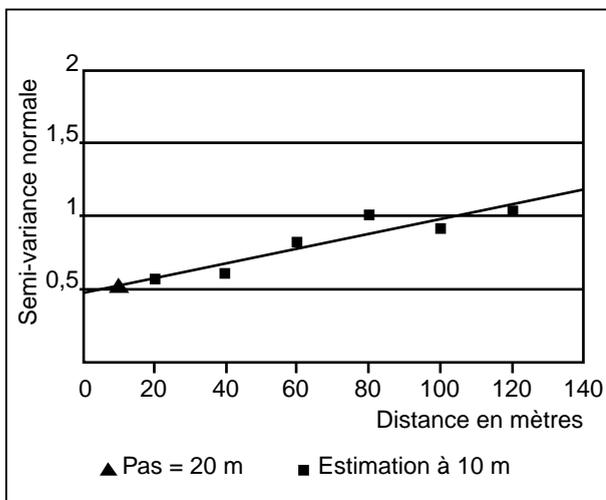


Figure 2 - Semi-variogramme expérimental (points) et modèle ajusté (ligne) pour la variable matière organique. Le point à 10 m (triangle) n'est pas pris en compte pour l'ajustement. Modèle sphérique, pépité = 0,39, portée = 63 m.

Figure 2 - Experimental semi-variogram (points) and fitted model (line) for organic matter. 10-m lag point (triangle) was not taken into account for modelling. Spherical model, nugget = 0.39, range = 63 m.

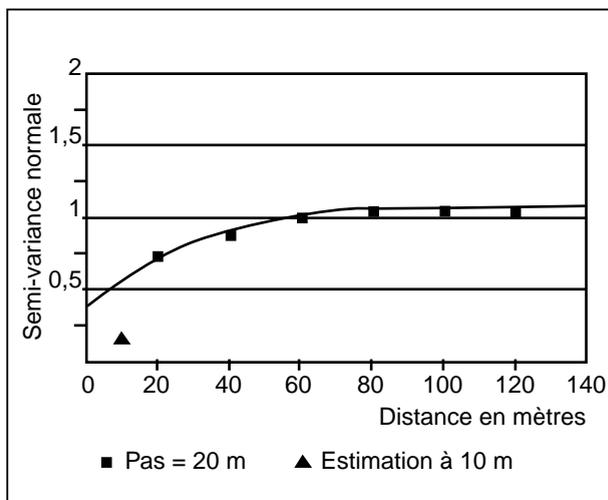


Tableau 2 - Coefficients de détermination R^2 entre les différentes variables (seuil de confiance au risque de 5 % = 0,0357).

Table 2 - Coefficients of determination R^2 within the different parameters (5 % significant level = 0.0357).

R^2	pH eau	P_2O_5	K_2O
MO	0,196	0,069	0,161
pH eau		0,271	0,034
P_2O_5			0,009

Les variables K_2O et P_2O_5 ne présentent pas de structure spatiale pour le pas d'échantillonnage adopté et peuvent donc être considérées comme aléatoires. Le calcul de ces variogrammes selon les deux directions principales n'a pas fait apparaître d'anisotropie au sein de la parcelle. L'allure de leur variogramme suggère que la variabilité de ces paramètres est susceptible de s'exprimer sur des distances inférieures au plus petit pas d'échantillonnage.

Dans le cas des variables spatialement structurées (matière organique et pH_{eau}), l'effet de pépité est d'un ordre de grandeur correspondant à la moitié de la variance totale, montrant

qu'en deçà de 10 mètres d'intervalle, les informations sont fortement corrélées. Cet effet de pépité traduit néanmoins une variabilité relativement importante de ces paramètres à une échelle inférieure à celle de l'échantillonnage. La valeur très faible de la semi-variance des teneurs en matière organique calculée pour les couples distants de 10 mètres suggère cependant que ces teneurs sont très fortement corrélées en-deçà de ce pas. Sur une micro-parcelle étudiée dans le même milieu, Jolivet (1996) obtient des résultats comparables.

Ces variogrammes ont été ajustés à des modèles théoriques. Pour le pH, un modèle linéaire s'avère le plus adéquat (figure 1). Pour la matière organique les meilleurs résultats sont obtenus avec un modèle sphérique (figure 2). Pour le pH et la matière organique, les modèles ajustés sont figurés en surimpression des variogrammes et leurs paramètres sont précisés en légende des figures.

Variabilité et faisabilité d'une cartographie intraparcellaire

Dans le cas des variables purement pépétiques comme K_2O et P_2O_5 , les résultats démontrent qu'une prédiction fiable de la répartition intraparcellaire de ces caractéristiques est impossible à réaliser, même en disposant d'un maillage d'observations très serré tel que celui dont nous disposons. L'absence de structure spatiale de ces paramètres à l'échelle

Figure 3 - Semi-variogramme expérimental pour la variable K_2O .

Figure 3 - Experimental semi-variogram for K_2O

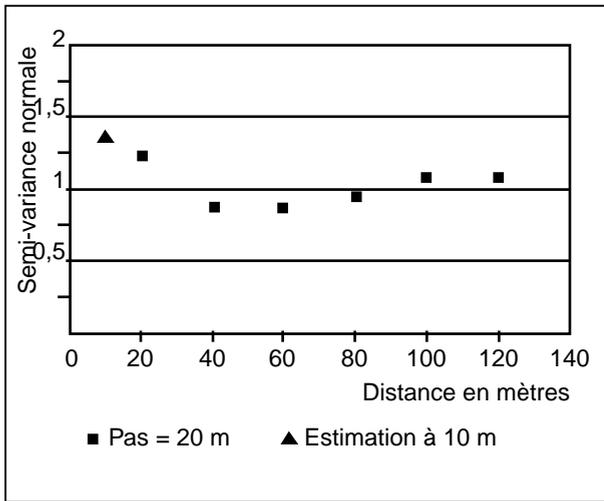


Figure 4 - Semi-variogramme expérimental pour la variable P_2O_5 .

Figure 4 - Experimental semi-variogram for P_2O_5 .

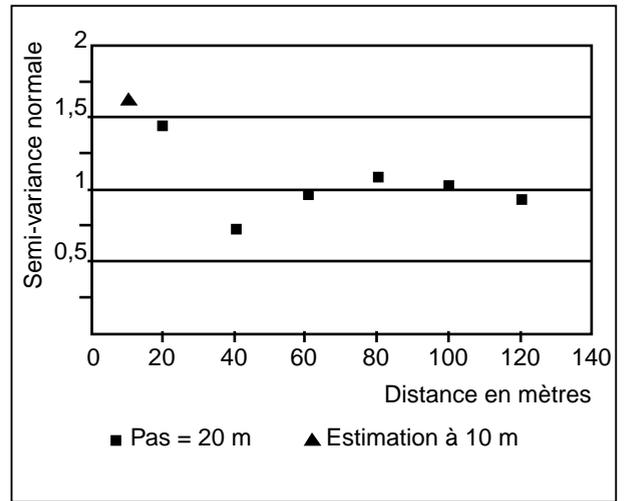


Figure 5 - Représentation en bloc-diagramme des valeurs krigées de la variable pH eau.

Figure 5 - Three-dimensional view of kriged values of pH water.

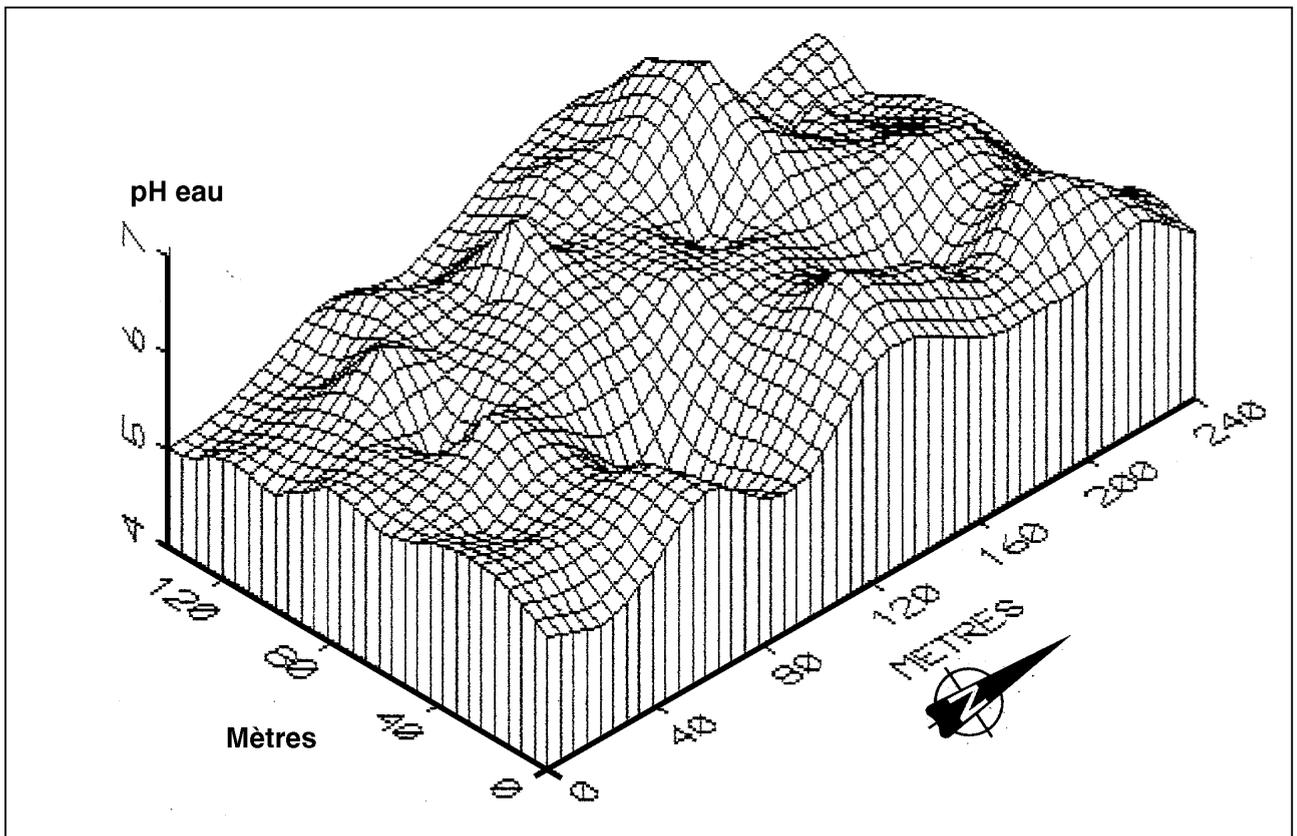
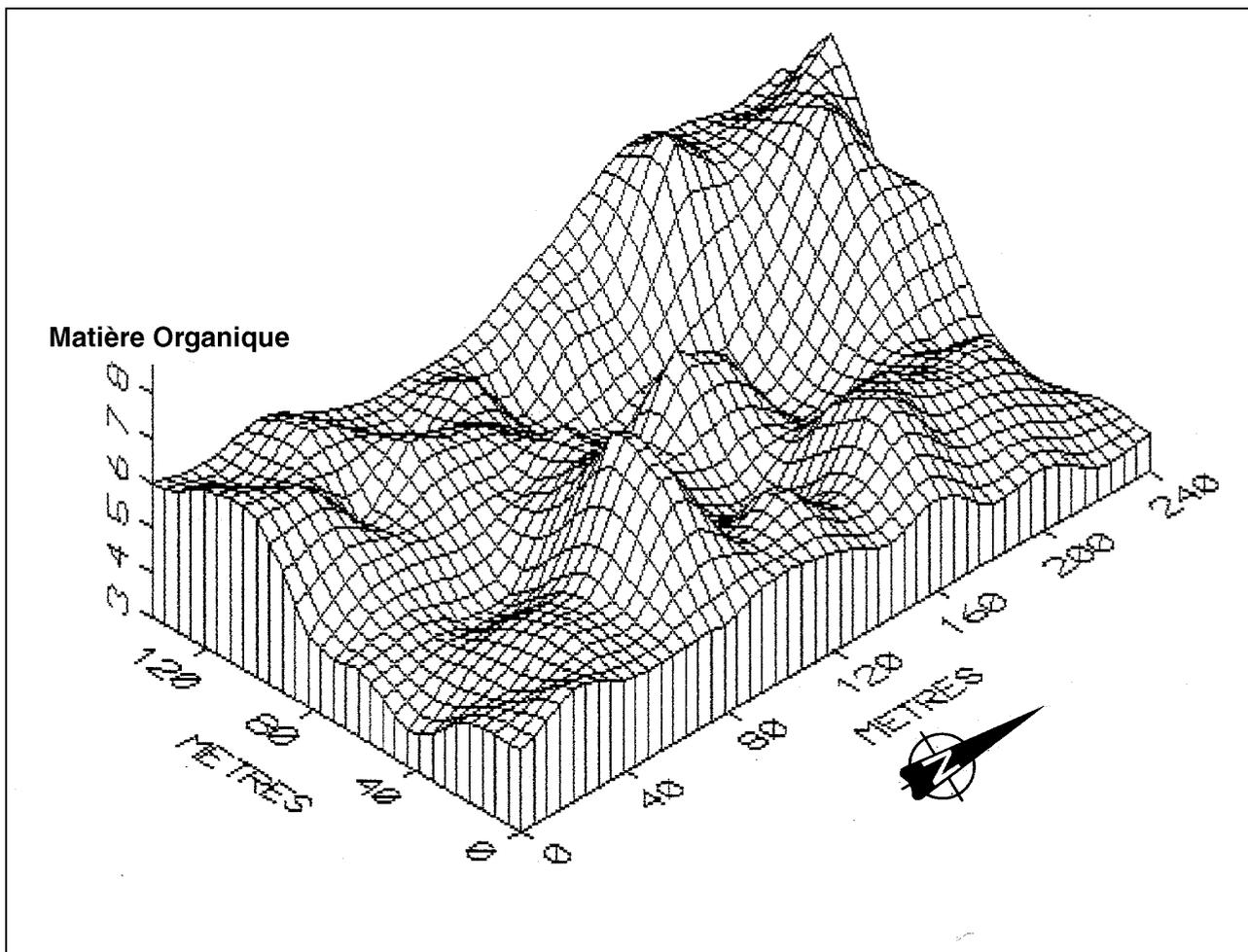


Figure 6 - Représentation en bloc-diagramme des valeurs krigées de la variable matière organique.

Figure 6 - Three-dimensional view of kriged values of organic matter.



d'étude, opposée à la structure spatiale observée pour la matière organique dont le rôle sur la rétention du phosphore est connu (par exemple Frossard et al., 1986), suggère qu'une part de cette micro-hétérogénéité pourrait être due à une variabilité dans les apports phosphatés. Quoiqu'il en soit, il apparaît impossible de délimiter des zones d'isoteneurs au sein de la parcelle, suffisamment vastes et homogènes pour être susceptibles d'une gestion différente des apports.

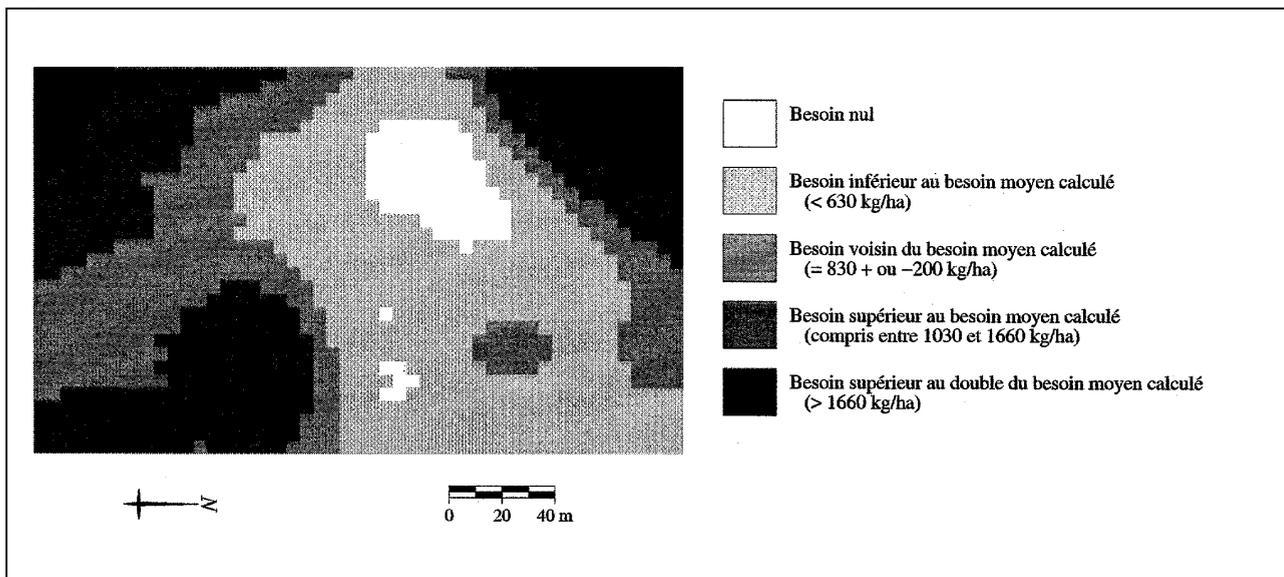
Dans le cas des variables structurées telles que le pH et la matière organique, les résultats suggèrent qu'une approche cartographique opérationnelle est réalisable, en particulier en utilisant la méthode du krigeage (Delhomme, 1978). Cette approche permet de distinguer des zones d'isovaleur de ces paramètres (figures 5 et 6), qui pourront être prises en compte pour une modulation des doses de certains apports. Citons en

particulier pour la matière organique une modulation possible des apports exogènes (fumiers, composts) et des doses de pesticides (herbicides en particulier). Toutefois, il convient de signaler que la répartition des teneurs en matière organique montre une zone où les valeurs apparaissent systématiquement plus élevées (nord-est), ce qui remet en cause l'hypothèse de stationnarité d'ordre 1 sous-jacente à l'analyse géostatistique.

Un allègement de la procédure de cartographie de ces zones d'isoteneurs en matière organique pourrait être obtenu en utilisant les propriétés spectrales de surface - et en particulier la couleur - de ces sols : il a en effet été montré que la réponse spectrale des sols sableux des Landes de Gascogne est liée à leur teneur en carbone organique (Arrouays et al., 1983) ainsi qu'à la nature des composés organiques (rapport

Figure 7 - Apports préconisés en CaO (kg. ha⁻¹) sur la base de la formule de Laveau et Juste (1982) appliquée aux valeurs moyennes du pH et de la matière organique sur l'ensemble de la parcelle.

Figure 7 - Liming recommendations (CaO kg. ha⁻¹) calculated from Laveau and Juste formulae (1982) using mean value of pH and organic matter content.



C/N en particulier). Cette nature des composés organiques est par ailleurs très fortement dépendante du micro-relief qui conditionne la position des profils par rapport à la nappe phréatique ainsi que la végétation du sous-bois antérieure au défrichement (Righi, 1977). Sur des parcelles défrichées depuis 10 ans, Crétois (1982) et Arrouays et al. (1983) ont montré de telles organisations spatiales de la nature et de la quantité des matières organiques. En conséquence, l'utilisation combinée de données spectrales et micro-topographiques, associée à un échantillonnage stratifié selon des transects topographiques, pourrait permettre d'affiner considérablement les prédictions cartographiques. Des travaux seront poursuivis dans ce sens.

En ce qui concerne le pH, la connaissance de sa variabilité au sein des parcelles permettra d'ajuster au mieux le chaulage de ces sols pour respecter les prescriptions régionales et les seuils à ne pas dépasser (Juste, 1992b). En effet, un pH trop élevé dans ces sols maïsicoles crée une situation favorable à l'apparition de carences en micro-éléments tels que le cuivre (Juste, 1978), le zinc (Juste et Solda, 1988) et surtout le manganèse (Lubet et al., 1989). A titre d'exemple, nous présentons une carte des besoins en chaulage de cette parcelle calculés selon la formule de Laveau et Juste (1982), qui préconise les apports selon une régression prenant en compte le pH et la matière organique, et sur la base d'un pH souhaité de 6,0 (figure 7). On constate qu'une zone d'importance non négligeable (6 % en blanc) présente un besoin nul. L'application de chaux

sur la base de la teneur moyenne de la parcelle aurait conduit à un apport de 830 kg. ha⁻¹ de CaO, relevant le pH de ces zones au-delà du seuil d'apparition des carences en micro-éléments. A l'opposé, les coins nord-ouest et sud-ouest (10 % de la parcelle) auraient été très largement sous amendés. Ainsi, même pour une parcelle de dimension réduite, l'utilisation de la connaissance de la variabilité spatiale des sols peut permettre une certaine modulation des intrants. Il est probable que l'application de telles méthodes sur des surfaces plus vastes montrerait un impact beaucoup plus important des pratiques de modulation intra-parcellaires sur la gestion agronomique des parcelles. De telles pratiques ont d'ailleurs été principalement étudiées dans des milieux où la taille moyenne des parcelles implique une forte variabilité (par exemple aux Etats-Unis et au Canada).

Échantillonnage pour un suivi de ces caractéristiques

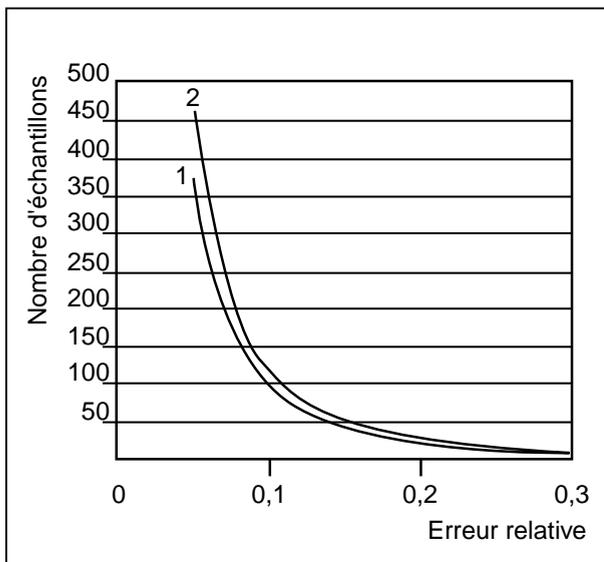
La valeur moyenne d'une variable assimilée à un processus stochastique bidimensionnel et isotrope est entachée sur une surface donnée d'une erreur provenant (Russo et Bressler, 1982 ; Ruelle et al., 1986) :

- de l'incertitude sur la mesure,
- de l'incertitude due à la variabilité spatiale des observations sur cette surface,
- de l'incertitude liée à la dimension finie de cette surface.

Ruelle et al., (1986) montrent par calcul que l'erreur totale

Figure 8 - Nombre d'échantillons nécessaires en fonction de la précision souhaitée pour estimer la moyenne de deux caractéristiques (K_2O et P_2O_5) avec un intervalle de confiance de 95 % ($t = 1,96$) (formule de Snedecor et Cochran, 1967)

Figure 8 - Number of samples required to obtain mean value of K_2O and P_2O_5 with confidence level of 95 % ($t = 1,96$) (Snedecor and Cochran formulae, 1967)



dépend d'une manière générale des coefficients de variation, du nombre d'échantillons, et de la structure spatiale de la variable sur la surface étudiée.

Dans le cas des variables non structurées spatialement et distribuées normalement (K_2O et P_2O_5) la qualité de l'estimation de la valeur moyenne d'une parcelle ne dépend que du CV et du nombre d'échantillons. Ces échantillons peuvent être théoriquement distribués selon n'importe quelle stratégie spatiale d'échantillonnage (sous réserve de les espacer d'au moins 20 m, plus petit pas d'échantillonnage systématique de notre étude). La formule permettant de calculer le nombre d'échantillons à prendre en compte pour estimer une moyenne avec un intervalle de confiance donné est la suivante (Snedecor et Cochran, 1967) :

$$n = t^2 (CV^2)/e^2 \quad (1)$$

avec t = valeur du t de Student, CV = coefficient de variation, e = erreur relative d'estimation de la moyenne

La figure 8 présente le nombre d'échantillons nécessaires, en fonction de la précision souhaitée, pour estimer la moyenne de ces deux caractéristiques avec un intervalle de confiance de 95 % ($t = 1,96$). La très forte variabilité de P_2O_5 et de K_2O conduit à un nombre d'échantillons beaucoup plus élevé (respectivement 94 et 116 échantillons pour estimer la moyenne avec une erreur relative de 10 % et un intervalle de confiance

de 95 %) que celui retenu dans les pratiques habituelles fondées sur la constitution d'échantillons composites (AFNOR, 1996). Ces estimations sont cohérentes avec les chiffres fournis par Wilding et Drees (1983) pour les caractères chimiques, dans leur revue concernant la variabilité spatiale des propriétés des sols. Dans le cas de notre étude, ces estimations montrent a posteriori que le nombre d'échantillons prélevés (114) est compatible avec une estimation fiable de la valeur moyenne de ces deux caractéristiques.

Dans le cas des variables spatialement structurées, il ne suffit pas d'augmenter le nombre d'échantillons pour améliorer la précision de la moyenne (Ruelle et al., 1986). Lorsque les variogrammes présentent un palier, le calcul se ramènerait à l'équation (1) si l'on espaçait les échantillons par une distance au moins égale à la portée ; ce calcul nous donne un nombre d'échantillons à prendre en compte qui est par exemple, pour un intervalle de confiance de 95 % et une erreur relative de 5 % sur l'estimation, de 88 pour la matière organique. Ce type d'échantillonnage théorique conduit inéluctablement à prendre en compte pour la matière organique une surface 10 fois plus grande que la parcelle d'étude ! Le concept d'échelle intégrale (Ruelle et al., 1986) devrait donc être utilisé préalablement à l'installation de dispositifs expérimentaux de suivis de longue durée de cette caractéristique. Ceci permettrait de déterminer les dimensions de la parcelle et le nombre d'observations nécessaires pour estimer la valeur moyenne avec un degré de précision souhaité.

Il reste cependant que la gamme de variabilité (illustrée par le CV par exemple), comme la structure spatiale des paramètres (caractérisée par exemple par un modèle de semi-variogramme), sont aussi susceptibles de présenter des variations temporelles. Face à ces constats, l'emploi de la formule de Snedecor et Cochran, qui n'a pas été conçue pour tenir compte des variations spatiales, montre ses limites. Ainsi, le choix a priori d'une stratégie d'échantillonnage reste particulièrement délicat (Papritz et Webster, 1995a). Récemment, Papritz et Webster (1995a et b), ont en effet montré que la variabilité spatiale des propriétés du sol avait des incidences sur les différences pouvant être décelées dans le temps.

CONCLUSION

A partir d'une étude de la variabilité intraparcellaire conduite selon un maillage systématique, nous avons pu démontrer l'existence de variables présentant - ou ne présentant pas - de structures spatiales. Certaines caractéristiques (P_2O_5 et K_2O) sont affectées par une très forte variabilité qui peut être considérée comme aléatoire à l'échelle de notre travail. Ceci se traduit par une liberté du choix de l'emplacement des échantillons pour déterminer une valeur moyenne. En revanche le nombre de prélèvements à effectuer apparaît beaucoup plus

élevé que celui retenu dans les pratiques agronomiques traditionnelles, et cette variabilité aléatoire interdit tout zonage de la parcelle visant à réaliser une modulation des intrants.

D'autres variables apparaissent structurées spatialement, selon un déterminisme probablement pédogénétique. En conséquence, la stratégie d'échantillonnage devrait prendre en compte cette structure spatiale pour un suivi à long terme de ces caractéristiques. A un instant donné, et moyennant de nombreux prélèvements, une cartographie intraparcellaire de ces paramètres est réalisable, permettant ainsi la modulation de certains apports.

D'une façon plus générale, cette étude démontre l'intérêt d'une analyse préalable de la variabilité spatiale des paramètres du sol avant d'effectuer un choix quant à la méthode d'échantillonnage à adopter pour un suivi à long terme de ces caractéristiques.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement Christian Walter et Henri Dinel pour leur lecture critique très constructive d'une première version de cet article, ainsi que Philippe Berché pour son aide technique.

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR., 1996 - Qualité des sols. Recueil de normes françaises. Association Française de Normalisation, Paris. 534 p.
- Arrouays D., Guyon D. et Riou J., 1983 - Différenciation par l'humidité et la matière organique de deux sols sableux à partir de données radiométriques et photographiques. In : *Ile Coll. Int. Signatures Spectrales d'Objets en télédétection*. Bordeaux, 12-16 sept. 1983. Ed. INRA Publ. pp. 81-89.
- Arrouays D., Mench M., Amans, V. et Gomez A., 1996 - Short-range variability of fallout Pb in a contaminated soil. *Can. J. Soil Sci.* 76 : 73-81.
- Beckett P. H. T. and Webster R., 1971 - Soil variability : a review. *Soil Fertilizers* 34 : 1-15.
- Campbell J. B., 1978 - Spatial variation of sand content and pH within single contiguous delineations of two soil mapping units. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42 : 460-464.
- Cassman K.G. et Plant R.E., 1992 - A model to predict crop response to applied fertilizer nutrients in heterogeneous fields. *Fertil. Res.* 31 : 151-163.
- Cipra J.E., Bidwell O.W., Whitney D.A. et Feyerherm A.M., 1972 - Variation with distance in selected fertility measurements of pedons of Western Kansas Ustoll. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36 : 111-118.
- Cochran W. G., 1977 - Sampling techniques. John Wiley. New York.
- Delas J., 1971 - Évolution des propriétés d'un sol sableux sous l'influence d'apports massifs et répétés de matières organiques de différentes origines. *Annales Agronomiques*, 22 (5) : 585-610.
- Delhomme P., 1978 - Kriging in hydrosociology. *Adv. Water Res.*, 1 : 251-266.
- Fernandez R.N., Schulze D.G., Coffin D.L. et Van Scoyoc, G.E., 1988 - Color organic matter and pesticide adsorption relationships in a soil landscape. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52 : 1023-1026.
- Frossard E., Truong B. et Jacquin F., 1986 - Influence de l'apport de composés organiques sur l'adsorption et désorption des ions phosphates en sol ferrallitique. *Agronomie*, 6 (6) : 503-508.
- Gajem Y.M., Warrick A.W. et Myers D.E., 1981 - Spatial dependence of physical properties of a typical torrifluent soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45 : 709-715.
- Gascuel-Oudoux C., Walter C. et Voltz M., 1993 - Intérêt du couplage des méthodes géostatistiques et de cartographie des sols pour l'estimation spatiale. *Science du Sol*, 31 : 193-213.
- Goulard M., Voltz M. et Monestiez P., 1987 - Comparaison d'approches multivariées pour l'étude de la variabilité spatiale des sols. *Agronomie* 7 (9) : 657-665.
- Griffis, C.L., 1985 - Electronic sensing of soil organic matter. *Trans. A.S.A.E.*, 28 : 703-705.
- Helling C.S., 1971 - Pesticide mobility in soils. III. Influence of soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35 : 743-748.
- Jolivet C., 1996 - Évolution des stocks de carbone organique des sols sous l'effet d'un changement d'occupation. Possibilité de généralisation spatiale sur les Landes de Gascogne. DEA National de Science du Sol. 52 p.
- Juste C., 1992a - Caractéristiques et évolution de la matière organique en sols sableux. In : *Étude et mise en valeur des sols sableux de Pologne et de France*. INRA Éditions, pp. 135-142.
- Juste C., 1992b - Acidité et chaulage des sols sableux. In : *Étude et mise en valeur des sols sableux de Pologne et de France*. INRA Éditions, pp. 129-134.
- Juste C. et Solda P., 1988 - Influence de l'addition de différentes matières fertilisantes sur la biodisponibilité du calcium, du manganèse, du nickel et du zinc contenus dans un sol sableux amendé par des boues de station d'épuration. *Agronomie*, 8 : 64-75.
- Kachanoski R.G. et Fairchild G.L., 1996 - Field scale fertilizer recommendations : the spatial scaling problem. *Can. J. Soil Sci.* 76 : 1-6.
- Krishnan P., Buttler B.J. et Hummel J., 1981 - Close-range sensing of soil organic matter. *Trans. A.S.A.E.* 24 : 306-311.
- Laslett G.M., MacBratney A.B., Pahl P.J. et Hutchinson M.F., 1987 - Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. *J. Soil Sci.* 38 : 325-341.
- Laveau G. et Juste C., 1982 - Contribution à la mise au point d'une méthode de détermination rapide du besoin en chaux des sols sableux des Landes. *C. R. Acad. Agr. France*. 610-616.
- Liu L.C., Cibes-Viade H. et Koo F.K.S., 1970 - Adsorption of ametryne and diuron by soils. *Weed Sci.*, 18 : 470-474.
- Lubet E., Plénet D. et Juste C., 1989 - Problèmes posés par la nutrition en manganèse sur maïs dans les sols sableux du Sud-Ouest Atlantique. *Perspectives Agricoles*, 135 : 77-80.
- Luxmore R.J. et Shama M.L., 1980 - Runoff responses to soil heterogeneity : experimental and simulation comparison for two contrasting watersheds. *Water Resour. Res.* 16 (4) : 675-684.
- Majka J.T. et Lavy T.L., 1977 - Adsorption, mobility and degradation of cyanazine and diuron in soils. *Weed Sci.* 25 : 401-406.
- Matheron G., 1963 - Principles of geostatistics. *Econ. Geol.* 58 : 1246-1266.
- McBratney A. B. et Webster R., 1983 - How many observations are needed for regional estimation of soil properties ? *Soil Sci.* 135 : 177-183.
- Meredieu C., Arrouays D., Goulard M. et Auclair D., 1996 - Short range soil variability and its effect on red Oak growth (*Quercus rubra* L.). *Soil Sci.* 161 : 29-38.
- Nolin M. C., M. J. Caillier and C. Wang., 1991 - Variabilité des sols et stratégie

- d'échantillonnage dans les études pédologiques détaillées de la plaine de Montréal. *Can. J. Soil Sci.* 71 : 439-452.
- Nolin M.C., Cao Y.Z., Coote D.R. et Wang C., 1993 - Short-range variability of fallout ¹³⁷Cs in an uneroded forest soil. *Can. J. Soil Sci.* 73 : 381-385.
- Papadakis J. S., 1937 - Méthode statistique pour des expériences en champ. Thessalonique, Institut d'Amélioration des Plantes, Bulletin scientifique 23, 30 p.
- Papritz A. et Webster R., 1995a - Estimating temporal change in soil monitoring : I. Statistical theory. *Eur. J. Soil Sci.* 46 : 1-12.
- Papritz A. et Webster R., 1995b - Estimating temporal change in soil monitoring : II. Sampling from simulated fields. *Eur. J. Soil Sci.* 46 : 13-27.
- Pichot C., 1993 - Variabilité au stade adulte chez *Populus trichocarpa* Torr. and Gray et prédiction juvénile adulte chez *P. trichocarpa* et *P. deltoides* Bartr. 235 p. Ph. D Thesis. Institut National Agronomique de Paris-Grignon. France.
- Pitts M.J., Hummel J.W. et Butle, B.J., 1983 - Sensors utilizing light reflexion to measure soil organic matter. ASAE paper n° 83-1011. ASAE, St Joseph, MI, USA.
- Righi D., 1977 - Genèse et évolution des podzols et des sols hydromorphes des Landes du Médoc. Thèse Doct. État, Univ. Poitiers, 150 p.
- Righi D., 1992 - Podzosols. In : *Référentiel Pédologique*, D. Baize et M.C. Girard Eds., INRA-AFES, pp. 161-166.
- Righi D. et Wilbert J., 1984 - Les sols sableux podzolisés des Landes de Gascogne. *Science du Sol*, 4 : 253-264.
- Ruckman J.L., Hummel J.W. et Butler B.J., 1981 - Improved soil organic matter sensor with microprocessor control. ASAE paper n°81-1012. ASAE, St Joseph, MI, USA.
- Ruelle P., Ben Salah D. et Vauclin M., 1986 - Méthodologie d'analyse de la variabilité spatiale d'une parcelle agronomique. Application à l'échantillonnage. *Agronomie. France* 6 : 529-539.
- Russo D. et Bressler E., 1982 - Soil hydraulic properties as stochastic processes. II. - Errors of estimates in a heterogeneous field. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46 : 20-26.
- Schueller J. K., 1991 - Design for dynamic response of sprayer-applicators. *J. Fert. Issues.* 8 (3) : 69-73.
- Schueller J. K., 1992 - A review and integrating analysis of spatially-variable control of crop production. *Fertilizer Research* 33 : 1-34.
- Snedecor G. W. and W. G. Cochran., 1967 - *Statistical methods.* 6th Ed. Iowa State Univ. Press. Ames. Iowa. 593 p.
- Van Noordwijk M. et Wadman W.P., 1992 - Effects of spatial variability of nitrogen supply on environmentally acceptable nitrogen fertilizer application rates to arable crops. *Netherlands J. Agric. Sci.* 40 : 51-72.
- Vauclin., 1982 - Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. In : *Variabilité spatiale des processus de transfert dans les sols.* Coll. INRA. Avignon, 24-25 Juin 1982. Ed. INRA publ. pp. 9-43.
- Voltz M. et Webster R., 1990 - A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. *J. Soil Sci.* 41 : 473-490.
- Webster R. et Oliver M.A., 1990 - *Statistical methods in soil and land resource survey.* 316 p. Oxford University Press. Oxford.
- Webster R. et Oliver M.A., 1992 - Sample adequately to estimate variograms of soil properties. *J. Soil Sci.* 43 : 177-192.
- Wilding L. P. et Drees L.R., 1983 - Spatial variability and pedology. In : *Pedogenesis and soil taxonomy. I : concepts and interactions.* L. P. Wilding, N. E. Smeck, and G. F. Hall (ed.). Elsevier, New York. pp. 83-116.
- Williot B., 1995 - Variabilité spatiale et risques d'erreurs dans l'analyse des

horizons holorganiques forestiers. Étude et Gestion des Sols, 2 (1) :

73-83.