

THESE DE DOCTORAT de l'UNIVERSITE PARIS 6

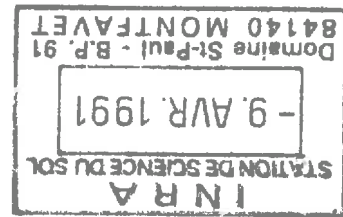
~~TH-TAT7~~  
TH-2C1

Spécialité:

**PEDOLOGIE**

présentée par :

**Christian WALTER**



pour obtenir le titre de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE PARIS 6**

**ESTIMATION DE PROPRIETES DU SOL ET  
QUANTIFICATION DE LEUR VARIABILITE  
A MOYENNE ECHELLE :**

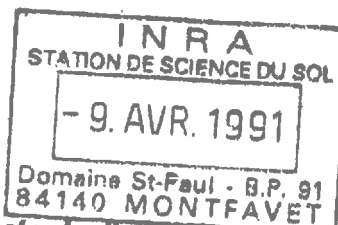
**CARTOGRAPHIE PEDOLOGIQUE  
ET GEOSTATISTIQUE  
SUR UN SECTEUR DU SUD  
DE L'ILLE et VILAINE (FRANCE)**

soutenue le 30 novembre 1990 devant le jury composé de :

**M. PEDRO G.  
M. DE MARSILY G.  
M. GIRARD M.C.  
M. AUROUSSEAU P.  
M. JAMAGNE M.  
M. WEBSTER R.**

**Président  
Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Examineur**

## AVANT - PROPOS



*Le premier obstacle: l'expérience première  
(G. Bachelard)*

*Ce mémoire est le résultat d'un travail entrepris en 1986 au laboratoire de Science du Sol de Rennes, laboratoire associé de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes et de l'Institut National de la Recherche Agronomique. Ce travail de recherche a été mené de façon parallèle à une activité d'enseignant à l'ENSA de Rennes.*

*Je tiens à remercier en premier lieu les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail: M. G. PEDRO, directeur de recherches à l'INRA et responsable du 3e cycle de pédologie à l'Université Paris VI - M. G. DE MARSILY, professeur à l'Université Paris VI - M. M.C. GIRARD, maître de conférences à l'Institut National Agronomique - M. P. AUROUSSEAU, maître de conférences à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes - M. M. JAMAGNE, directeur du Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France (SESCPF) - M. R. WEBSTER, jusqu'à récemment "Senior Principal Scientific Officer" à Rothamsted Experimental Station et à présent Directeur de Recherches à l'INRA de Montpellier. Tous ont lu mon travail avec une très grande attention malgré des emplois du temps surchargés. Leurs remarques et critiques m'ont beaucoup aidé et je saurai en tenir compte dans mes activités de recherche à venir. Qu'ils en soient vivement remerciés.*

*Comme dans tout travail de recherche, j'ai profité de l'aide d'un grand nombre de personnes et j'aimerais leur faire preuve de ma gratitude.*

*C. CHEVERRY m'a intégré dans l'équipe d'enseignants de Science du Sol qu'il dirige à l'ENSA de Rennes et je lui en suis reconnaissant. C'est lui qui m'a poussé et aidé à dégager du temps pour mener une activité de recherche. La fonction d'enseignant incite à la clarté dans l'expression orale et écrite et sans cesse il m'a engagé à rédiger de façon simple. Sa contribution dans la rédaction finale a été décisive et je lui dois beaucoup.*

*P. AUROUSSEAU a été le responsable direct de ce travail: il m'a laissé à la fois une grande liberté de manoeuvre tout en restant très exigeant sur la rigueur du raisonnement. Avec lui, il vaut mieux ne pas avoir les deux pieds dans le même sabot, mais l'évolution du parc informatique et logiciel du laboratoire montre combien son dynamisme est efficace.*

*J.M. RIVIERE, C. DUPONT et P. EDELIN sont les auteurs de la carte pédologique sur laquelle j'ai travaillé: sans leur concours, ce travail n'aurait pas été possible. Ils m'ont confié leurs documents de terrain et sans cesse m'ont expliqué leur démarche de cartographie, souvent sur le terrain. C'est parce qu'ils ressentaient le besoin de quantifier la variabilité au sein des unités cartographiques que ce travail a vu le jour.*

*R. WEBSTER m'a accueilli à Rothamsted pendant une semaine pour travailler sur mes données. C'est lui qui m'a poussé à décrire plus finement les variogrammes à l'aide de modèles anisotropes et à tenter l'emploi du krigeage indicatif.*

*C. GASCUEL a été une des premières à utiliser les techniques géostatistiques. Son aide a été décisive dans le choix des méthodes employées et dans la définition de l'échantillonnage au sein des unités cartographiques. P. CURMI m'a appris sur le terrain la rigueur en matière d'observation morphologique du sol. Même si son domaine d'activité préférentiel réside dans l'étude fine des organisations du sol, il n'a pas oublié son activité de cartographe à moyenne échelle et ses conseils m'ont été fort utiles. P. MEROT, quant à lui, s'est toujours intéressé à mon travail, la spatialisation de modèles hydrologiques pouvant être confortée par une connaissance*

de la variabilité spatiale des propriétés du sol. J'espère que nos démarches jusque là parallèles vont se rejoindre.

**G. BOURRIE** et **A.B. DELMAS** ont dirigé successivement le laboratoire au cours de ce travail. Tous deux m'ont fait confiance et m'ont incité à pousser plus loin mes investigations.

Je n'oublie pas que ce sont les enseignants de l'INA Paris-Grignon qui m'ont donné le goût pour la Science du Sol. J'aimerais les remercier ici.

A un moment ou à un autre, ce travail a profité des critiques des membres du GROM (Grignon-Rennes-Orléans-Montpellier), structure informelle qui regroupe des personnes ayant une activité dans le domaine de la cartographie des sols et de la cartographie assistée par ordinateur: **M. BORNAND, J. DAROUSSIN, M.C. GIRARD, D. KING, J.P. LEGROS.**

Et puis, il y a l'ensemble des chercheurs, ingénieurs, thésards ou étudiants qui font le dynamisme d'un laboratoire et portent un regard plus externe sur un travail, mais de ce fait souvent plus incisif: **V. HALLAIRE, J. BERRIER, M. AZIB, H. HAMDI, R. LAHMAR, C. LASSAUSSE, V. MAITRE, A. MIKLOS, C. DERSIGNY, P. LEPAROUX, O. COR.**

Le fonctionnement d'un laboratoire dépend fortement de ses techniciens. Tous m'ont aidé à un moment ou à un autre: **M. ANDERS, J. BEDIER, R. DELAYE, F. GARNIER, J.C. FERREN, A. REGEARD, A. SIMON** et tout particulièrement **O. QUIDU** pour son concours dans la représentation informatique de cartes et la finition des dessins.

Ce travail a bénéficié du soutien financier de différents organismes: l'INRA, la Direction Générale de l'Enseignement et de la Recherche du Ministère de l'Agriculture, la Région Bretagne. J'aimerais en particulier évoquer le soutien de **J.J. HERVE**, anciennement responsable du Bureau des Sols du Ministère de l'Agriculture.

J'en arrive aux remerciements plus personnels et je ne saurais oublier mes parents: ce travail représente l'aboutissement de longues années d'études et de sacrifices. J'espère ne pas les avoir déçus en ayant choisi la science du sol, alors que pour eux, marqués par le dur labeur d'une agriculture peu mécanisée, travailler la terre est synonyme de se salir les mains.

J'aimerais en fin de compte remercier ma femme et lui dédier ce travail. Cette thèse restera sûrement sous le signe des voyages hebdomadaires Rennes-Limoges que nous avons effectués pendant quatre ans. Enfin, Nicolas a tout changé ....

## RESUME

L'objectif de ce travail porte sur l'estimation de propriétés du sol à moyenne échelle et les possibilités d'associer à une telle estimation une indication de sa fiabilité. Pour cela, on analyse successivement les possibilités d'emploi des techniques statistiques, de façon alternative à la cartographie pédologique ou de façon complémentaire à celle-ci, pour obtenir des estimations de propriétés du sol avec une précision connue.

Un secteur de 10 000 hectares, situé dans le sud de l'Ille-et-Vilaine, a servi de terrain expérimental à cette étude. Il recouvre deux grands ensembles géologiques: au nord, le bassin de Rennes constitué de schistes briovériens; au sud, le synclorium de Martigné-Ferchaud composé d'une succession de schistes et de grès paléozoïques. Ce secteur a été retenu du fait d'une très grande variété des substrats et de l'existence d'une carte pédologique à l'échelle du 1/25 000.

Dans une première partie, deux techniques de krigeage sont successivement utilisées pour cartographier des propriétés du sol pour lesquelles on disposait de nombreuses mesures ponctuelles: d'une part, le krigeage linéaire pour cartographier la profondeur du sol, d'autre part, le krigeage indicatif pour cartographier la classe d'hydromorphie. Les cartes obtenues par krigeage mettent en évidence les grandes tendances de variation de ces deux propriétés, mais les estimations obtenues sont toujours peu précises. La comparaison avec des cartes de la profondeur du sol ou de la classe d'hydromorphie dérivées de la carte pédologique, met en évidence l'aspect extrêmement lissé des cartes krigées en regard des cartes issues de la carte pédologique. Cette comparaison souligne également l'importance accordée aux facteurs du milieu, extrinsèques au sol (végétation, topographie, états de surface,...), dans le tracé des limites de la carte pédologique.

Dans une seconde partie, à partir d'un échantillonnage indépendant nous permettant de comparer des points distants de 5, 25 et 100 mètres au sein d'une plage cartographique et des points situés dans des plages cartographiques différentes, nous décrivons la variabilité de propriétés du sol au sein de trois unités cartographiques. Ces trois unités cartographiques constituent des populations différentes à la fois pour les propriétés du sol qui ont servi à l'établissement de la carte pédologique et pour des propriétés physiques de l'horizon de surface. Néanmoins, la variabilité au sein des unités cartographiques s'avère dans certains cas importante et induit des incertitudes quand on exploite le document cartographique à des fins d'application. Enfin, l'étude de la variabilité au sein et entre des plages cartographiques d'une même unité, fournit un ordre de grandeur de la densité d'échantillonnage que suppose l'estimation de propriétés du sol avec un niveau de précision donné.

Cette étude montre l'intérêt d'une approche quantifiée de la variabilité spatiale des propriétés du sol à moyenne échelle, pour appréhender de façon plus raisonnée l'exploitation des documents cartographiques à des fins d'application.

**Mots-clés:** Variabilité spatiale, moyenne échelle, cartographie pédologique, unité cartographique, variabilité intra-unité cartographique, géostatistique, krigeage, Massif Armoricaïn.

# SOMMAIRE

*Introduction générale* p. 2

## **Chapitre I: *Le milieu étudié et son expression cartographique***

1. Caractérisation générale du milieu p. 4
2. La carte pédologique au 1/25.000 p. 7
3. L'estimation de propriétés du sol à partir de la carte pédologique p. 13

### **Première partie:**

## ***CARTOGRAPHIE PAR KRIGEAGE DE PROPRIETES DU SOL ET COMPARAISON AVEC DES CARTES THEMATIQUES DERIVEES DE LA CARTE PEDOLOGIQUE***

## **Chapitre II: *Obtention de cartes monofactorielles par krigeage***

1. Méthodes statistiques et objet d'étude p. 17
2. Emploi du krigeage linéaire pour la profondeur du sol p. 24
3. Emploi du krigeage indicatif pour la classe d'hydromorphie p. 38

## **Chapitre III: *Comparaison des cartes krigées et des cartes dérivées de la carte pédologique***

1. Procédures de comparaison des documents p. 47
2. Les résultats de la comparaison p. 48
3. Discussion p. 52

### **Seconde partie:**

## ***VARIABILITE DE PROPRIETES DU SOL ET STRUCTURE SPATIALE DE CETTE VARIABILITE AU SEIN D'UNITES CARTOGRAPHIQUES***

## **Chapitre IV : *Une revue bibliographique***

1. Approche classique et critiques formulées à son égard p. 58
2. Description quantitative de la variabilité spatiale au sein d'unités cartographiques p. 61

## **Chapitre V: *Matériel et méthodes d'étude***

1. Les unités cartographiques étudiées p. 68
2. Stratégie d'échantillonnage p. 70
3. Les propriétés du sol étudiées p. 73
4. Expression des résultats p. 74

**Chapitre VI: Description globale de la variabilité au sein des unités cartographiques**

- |  |       |
|--|-------|
| 1. Indices de pureté au sein des trois unités cartographiques  | p. 79 |
| 2. Variabilité des propriétés analytiques de l'horizon de surface                                    | p. 86 |
| 3. Relations entre la pureté des unités cartographiques et la variabilité des propriétés analytiques | p. 96 |

**Chapitre VII: Structure spatiale au sein des unités cartographiques**

- |  |       |
|--|-------|
| 1. Structure spatiale de la variabilité des propriétés morphologiques du sol               | p.103 |
| 2. Structure spatiale de la variabilité des propriétés analytiques de l'horizon de surface | p.116 |

**Chapitre VIII: Un test des possibilités de généralisation régionale de la variabilité intra-unité cartographique**

- |   |       |
|---|-------|
| 1. Présentation du nouveau secteur d'étude de Guignen                                       | p.126 |
| 2. Description globale de la variabilité des propriétés analytiques de l'horizon de surface | p.128 |
| 3. Structure spatiale de la variabilité des propriétés analytiques de l'horizon de surface  | p.132 |

**Conclusion générale** p.137

- |  |       |
|--|-------|
| <b>BIBLIOGRAPHIE</b>                     | p.141 |
| <b>ANNEXES</b>                           | p.151 |
| <b>LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX</b> | p.168 |
| <b>TABLE DES MATIERES DETAILLEE</b>      | p.172 |

## INTRODUCTION GENERALE

A quelle date et à quelle dose épandre un lisier sur les parcelles d'une exploitation agricole? Quel est le devenir de l'azote apporté sur un sol? Quel objectif de rendement d'une culture peut-on fixer dans un milieu pédoclimatique et un système de production donnés? Quelle est la quantité de chaux à apporter sur une parcelle pour lever les problèmes liés à l'acidification des sols? Ces exemples choisis parmi les nombreux problèmes d'aménagement de l'espace, présentent deux caractéristiques communes:

- la réponse ne dépend pas uniquement d'un seul paramètre, mais de plusieurs dont le sol, le climat, la topographie, les systèmes de production;
- la réponse doit être formulée dans l'espace pour tenir compte de la variabilité spatiale des facteurs entrant en jeu.

La contribution du spécialiste des sols va d'abord dépendre de sa compréhension du fonctionnement du sol et du comportement de celui-ci sous l'action d'un agent externe d'ordre naturel ou anthropique. Cela suppose des études souvent longues et coûteuses qui sont en général effectuées sur des secteurs restreints (de l'ordre de l'hectare). Des progrès considérables ont été réalisés dans ce domaine, concernant par exemple la modélisation des transferts de l'eau dans le sol.

Il semble intéressant de trouver un moyen d'étendre ces connaissances à des secteurs plus vastes, de l'ordre de plusieurs centaines ou milliers d'hectares, échelle à laquelle se résolvent souvent les problèmes d'aménagement de l'espace. Cette extension des connaissances apparaît possible si on sait: (i) d'une part définir des propriétés du sol aisément accessibles qui permettent de reconnaître des comportements différents; (ii) d'autre part, estimer ces propriétés sur l'ensemble du secteur d'étude.

Notre travail aborde le problème de l'estimation dans l'espace des propriétés du sol sur un secteur de plusieurs milliers d'hectares et celui des possibilités d'associer à une telle estimation une indication sur sa précision. En effet, sur un secteur de cette importance, la connaissance de la variabilité spatiale des propriétés du sol comporte nécessairement une part d'incertitude qui est rarement quantifiée.

La cartographie pédologique constitue une première méthode de description de la variabilité spatiale des propriétés du sol. Pour comparer puis regrouper ses observations afin d'établir une typologie des sols et pour tracer les limites des unités cartographiques, le pédologue sélectionne certaines propriétés du sol qui deviennent ainsi des critères de distinction d'unités cartographiques différentes: nous qualifions ces propriétés privilégiées par le pédologue de *critères cartographiques*.

En règle générale, la carte pédologique n'est pas établie à partir des seules observations ponctuelles du sol; le pédologue prend en compte également des variations d'autres composantes du milieu (topographie, végétation...) qui lui paraissent liées à des variations du sol. Cette approche, intégrant une information non recueillie dans des fiches de sondages, rend difficile une quantification de la variabilité des critères cartographiques au sein des unités cartographiques. Cette quantification est encore plus difficile pour des propriétés du sol qui n'ont pas été retenues comme critères cartographiques.

Parallèlement, de nombreuses études font état d'une variabilité très importante des propriétés du sol à de très courtes distances. Ce constat et l'absence d'une réelle quantification de la variabilité des propriétés du sol au sein des unités cartographiques, entraînent une remise en cause des possibilités d'emploi d'une carte pédologique comme estimateur fiable des propriétés du sol sur des secteurs importants.

L'emploi des techniques statistiques en matière de spatialisation des propriétés du sol a connu un développement très important aux cours des vingt dernières années. Ces techniques fournissent à la fois une estimation des propriétés du sol dans l'espace et une mesure de la qualité de cette estimation. De plus, elles permettent de définir l'effort d'échantillonnage qu'il faut fournir pour obtenir des estimations d'une précision donnée (Webster, 1985). Elles présentent a priori comme défaut sur des secteurs importants de prendre en compte moins d'information que la cartographie pédologique puisque seules les observations ponctuelles du sol entrent dans l'analyse statistique.

Ces techniques statistiques ont surtout été employées à grande échelle où elles ont permis des avancées dans la compréhension de la variabilité spatiale des propriétés du sol (Gascuel, 1984).

Dans ce travail, nous *cherchons à analyser les possibilités d'emploi des techniques statistiques, de façon alternative à la cartographie pédologique ou de façon complémentaire à celle-ci, pour obtenir des estimations de propriétés du sol avec une précision connue.*

*Cette étude se base sur un terrain expérimental de l'ordre de 10.000 hectares situé au sud de l'Ille-et-Vilaine. Nous disposons sur ce secteur d'une cartographie pédologique à l'échelle du 1/25.000 réalisée par des pédologues expérimentés et suivant une démarche classique.*

*Le mémoire comporte deux grandes parties faisant suite à une présentation du milieu étudié et de son expression cartographique:*

- *Dans une première partie, nous appliquons certaines techniques statistiques à l'ensemble du secteur d'étude pour obtenir des cartes de profondeur du sol et de classe d'hydromorphie. Il s'agit là de critères cartographiques retenus par le pédologue. Les documents obtenus par voie statistique pourront donc aisément être confrontés à ceux dérivés de la carte pédologique.*
- *Dans une seconde partie, nous retenons certaines unités cartographiques définies par le pédologue et nous cherchons à définir la variabilité de certaines propriétés du sol au sein de ces unités cartographiques à partir d'un échantillonnage complémentaire. Cet échantillonnage et les techniques statistiques employées doivent nous permettre de quantifier cette variabilité mais également de cerner la structure spatiale de cette variabilité. En effet, une compréhension de la structure spatiale de la variabilité est indispensable pour définir les conditions d'obtention de documents cartographiques plus précis.*

Une telle démarche ne prétend pas régler tous les problèmes de quantification de la variabilité spatiale des propriétés du sol sur des secteurs de superficie importante: à ces échelles, l'échantillonnage est toujours faible par rapport à l'objet étudié et on se situe souvent aux limites d'application des techniques statistiques. Il s'agit donc bien d'une approche exploratoire justifiée par le nombre peu important d'études de ce type. L'urgence de telles analyses nous semble réelle: des progrès techniques considérables ont été effectués dans le domaine des "systèmes d'information géographique" qui permettent de gérer aisément l'information spatiale dont on dispose sur les sols (Burrough, 1986). Tout en utilisant ces systèmes, il faut réfléchir sur la qualité de cette information spatiale.

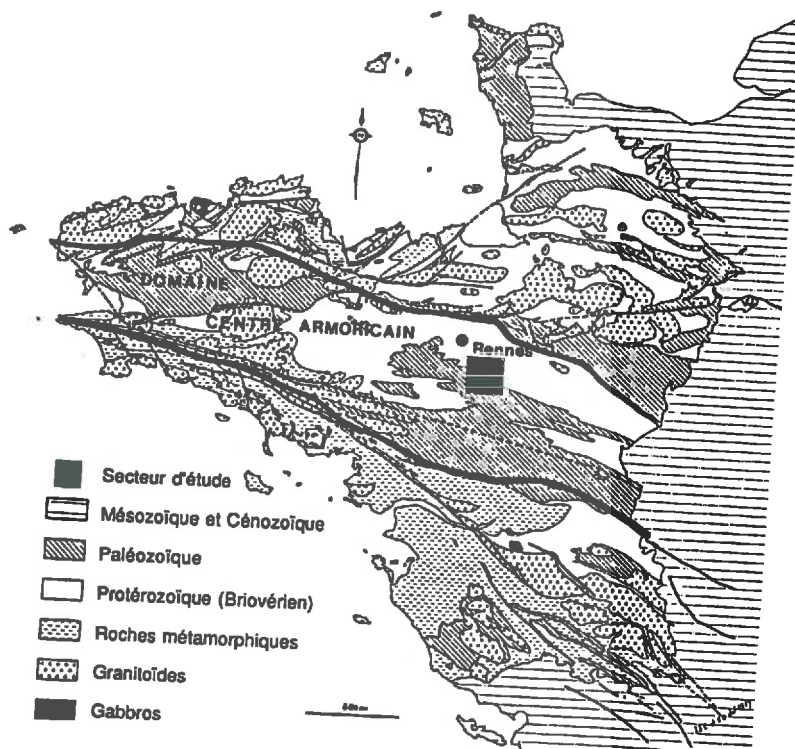


## Chapitre I

# LE MILIEU ETUDIE et SON EXPRESSION CARTOGRAPHIQUE

### 1. CARACTERISATION GENERALE DU MILIEU

Le secteur d'étude est situé à une trentaine de kilomètres au sud de Rennes (Ille-et-Vilaine) et correspond à un périmètre rectangulaire de 13,4 km dans le sens est-ouest et de 10 km dans le sens nord-sud, soit une superficie de 13.400 hectares (Fig. I.1): il s'agit des feuilles 6 et 7 de la carte IGN au 1/50.000 de Janzé. Ce secteur chevauche dans sa partie nord le "Pays de Rennes" et dans sa partie sud le "Pays de la Moyenne Vilaine et du Semnon". Nous avons choisi cette zone en raison de l'existence d'une carte pédologique à l'échelle du 1/25.000 et de la variabilité importante des substrats géologiques.



*Figure I.1: Localisation du secteur d'étude et carte géologique du Massif Armoricain.  
(d'après la carte géologique de la France au 1/1 000 000)*

#### 1.1. Le contexte socio-économique.

Le secteur d'étude inclut les territoires de neuf communes: Brie, Chanteloup, Crevin, Le Petit-Fougeray, Le Sel-de-Bretagne, Pancé, Poligné, Saulnières et Tresboeuf. Ce sont des communes rurales de moins de 500 habitants, pour lesquelles l'agriculture est l'activité économique dominante.

Les productions animales, en premier lieu la production laitière, constituent l'activité principale d'exploitations agricoles de petite taille (SCET AGRI, 1983; RGA, 1989). La nécessité de dégager des revenus suffisants sur de faibles surfaces a conduit les agriculteurs à développer un système d'élevage laitier intensif: il s'ensuit que les prairies permanentes représentent moins de 30 % de la Surface Agricole Utile. Néanmoins, l'instauration des quotas laitiers en 1984, a induit un développement important des surfaces consacrées à des cultures de vente (blé, maïs

grain, oléo-protéagineux). En effet, cette région cherche, dans un contexte nouveau de limitation de la production laitière, à diversifier son système de production. L'introduction de cultures de vente, mais également la prise de conscience récente des problèmes d'environnement, conduisent les agriculteurs à rechercher des références précises sur le sol de leurs parcelles (Belleil, 1989; Walter et al., 1989c).

## 1.2. Le substrat géologique.

Le Massif Armoricain est divisé par les géologues en grands domaines issus de l'orogénèse hercynienne (Durand, 1977; Chauvel et al., 1979). Dans ce cadre, l'ensemble du secteur étudié appartient au "domaine centre armoricain" limité au nord et au sud par deux importants cisaillements hercyniens (Fig. I.1).

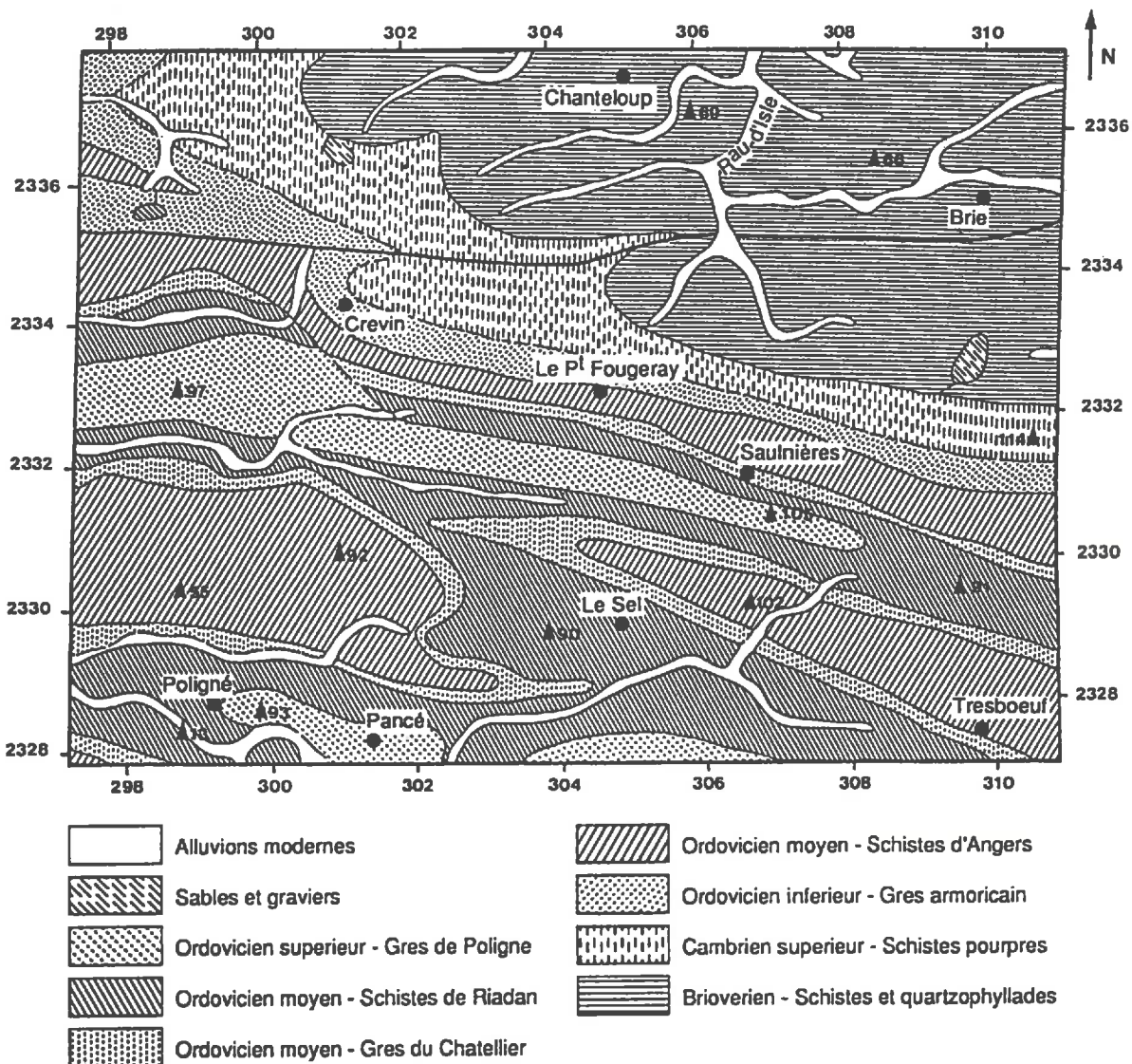


Figure I.2 : Carte géologique du secteur d'étude <sup>(1)</sup>  
(extrait de la carte géologique au 1/80 000 de Redon)

<sup>(1)</sup> Les cartes, blocs-diagrammes, plans d'échantillonnage de ce mémoire ont été réalisés grâce aux logiciels G (LeBorgne, 1987), S (Becker et Chambers, 1984) et Descartes (Walter et al., 1989b)

- Au sein de ce domaine, on peut distinguer deux grands ensembles géologiques (Fig. I.2) <sup>(1)</sup>:
- la partie nord-est, constituée de formations antérieures à la transgression paléozoïque, appartient au bassin de Rennes. Il s'agit de formations protérozoïques connues sous le nom de "schistes briovériens".
  - les parties sud et ouest se rattachent au synclinorium de Martigné-Ferchaud qui fait partie des synclinaux paléozoïques du Sud de Rennes. Cette unité synclinoriale, orientée suivant une direction (sud sud est - nord nord ouest), est composée d'une succession de schistes et de grès.

Le tableau I.1 présente les caractéristiques modales de ces différentes formations telles qu'on peut les définir à partir de la compilation de diverses études (Ministère de l'industrie, 1964, 1966 ; Chantraine et al., 1982, 1988; Fourniguet et Trautmann, 1985; Herrouin et al., 1989). Les auteurs notent de grandes variations lithologiques et morphologiques, difficiles à cartographier, au sein de chacune des formations. Ces variations sont liées à des processus complexes de sédimentation, de déformation, de métamorphisme et de volcanisme intrusif, qui se sont produits depuis la mise en place de ces matériaux.

Formation	Age	Faciès	Couleur	Dureté	Schistosité	Minéralogie
Schistes Briovériens	Protérozoïque supérieur	argilo siltite	gris verdâtre	tendre	variable	quartz, séricite, chlorite
Schistes pourprés	Cambrien supérieur	siltstone pourpre	lie- de- vin	dur	fruste	quartz (50 %), micas blancs, chlorite, hématite
Schistes d'Angers	Ordovicien moyen	lutite	bleu-noir	moyenne	ardoisier	quartz, séricite, chlorite, micas blancs, pyrite
Schistes de Riadan	Ordovicien moyen	siltite et grès	brun verdâtre	tendre	fruste	quartz, micas blancs, plagio., chlorite, biotite, carbonates
Grès Armoricaïn	Ordovicien inférieur	grès quartzitique	gris pâle	dur	-	quartz (90 %), muscovite, séricite
Grès du Chatellier	Ordovicien moyen	grès fin micacé	brun verdâtre	dur	-	quartz (70 %), micas blancs, feldspaths, chlorite.
Grès de Poligné	Ordovicien supérieur	arénite quartzitique	gris blanc	dur	-	quartz (90 %), séricite, chlorite

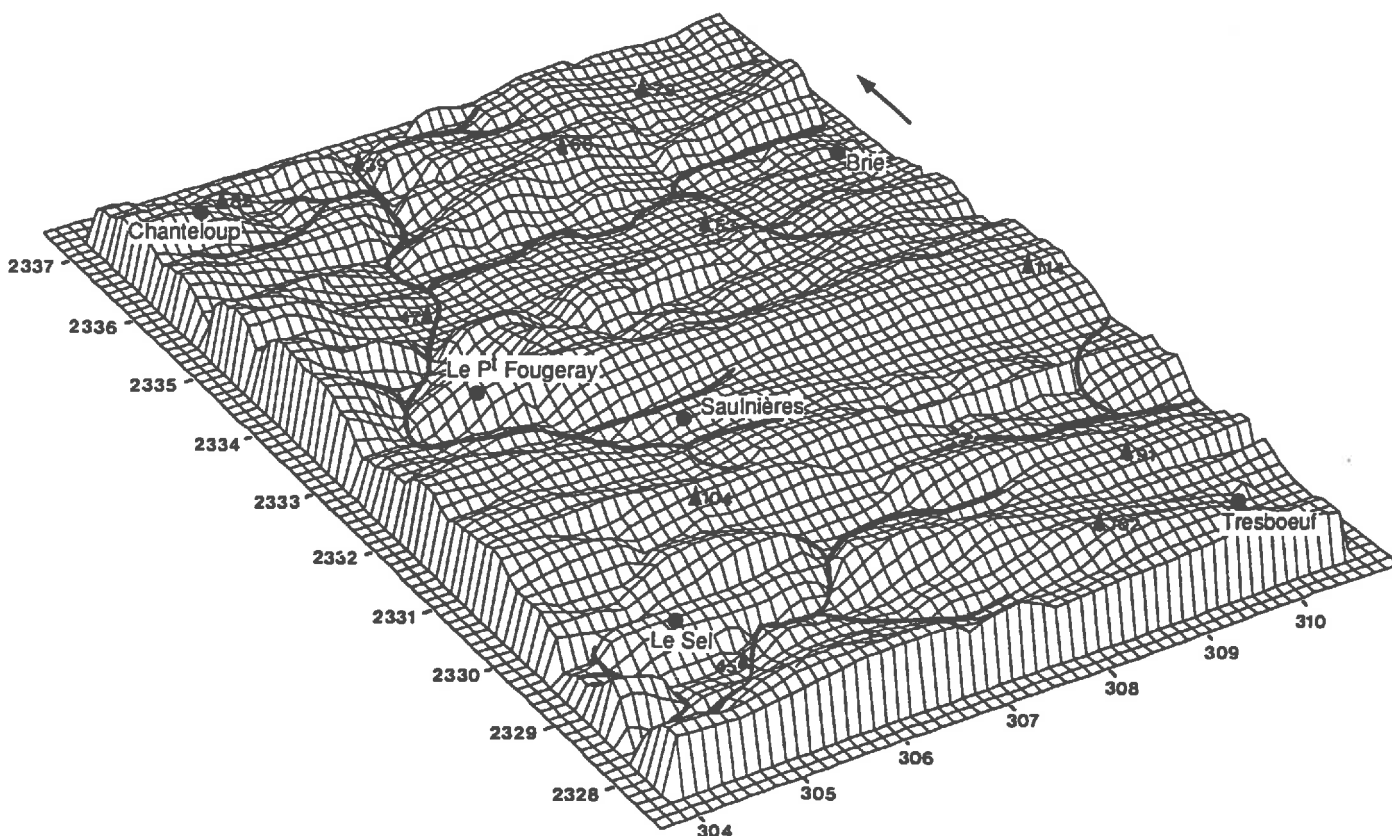
**Tableau I.1:** Caractéristiques modales des formations protérozoïques et paléozoïques présentes sur le secteur d'étude

Notons enfin la présence à la surface des affleurements de chacun des substrats, d'altérites supposées paléocènes et à texture généralement conservée. Ces altérites ne sont pas reportées sur la carte géologique au 1/80.000 de Redon couvrant notre secteur, mais sont relevées sur le 1/50.000 de Bain-de-Bretagne qui le jouxte. Leur épaisseur est fort variable et est comprise entre 0 et 2 mètres. L'entraînement de ces altérites a créé un colluvionnement de pente ou de vallon à composition souvent hétérogène.

<sup>(1)</sup> Dans l'ensemble de ce travail, tous les documents cartographiques concernant la zone d'étude sont référencés par rapport au système Lambert II zone étendue. Ce repère est pratique, les unités étant des kilomètres. Néanmoins, les axes de ce repère ne sont pas parallèles aux bords de la carte.

### 1.3. Topographie

La topographie du secteur d'étude est fortement liée à sa structure géologique: l'alternance de formations de dureté variable a induit un modelé de crêtes et de dépressions parallèles. Les grès constituent souvent les parties hautes du relief à des altitudes de l'ordre de 100 mètres, alors que les formations de schiste tendre (Briovérien, de Riadan) correspondent aux versants et aux bas-fonds, entre 50 et 80 mètres d'altitude (Fig. 1.3).



*Figure 1.3: Topographie de la moitié "est" du secteur d'étude.  
Bloc diagramme des altitudes à partir d'une vue sud-ouest.*

## 2. LA CARTOGRAPHIE PEDOLOGIQUE A L'ECHELLE DU 1/25 000

La carte pédologique du secteur d'étude a été levée à l'échelle du 1/25.000 (Rivière, Dupont et Edeline, à paraître). Cette opération s'inscrit dans le cadre du levé cartographique des sols de France en vue d'une représentation graphique à l'échelle du 1/100 000. A ce titre, cette carte fait partie de la feuille au 1/100.000 de Janzé.

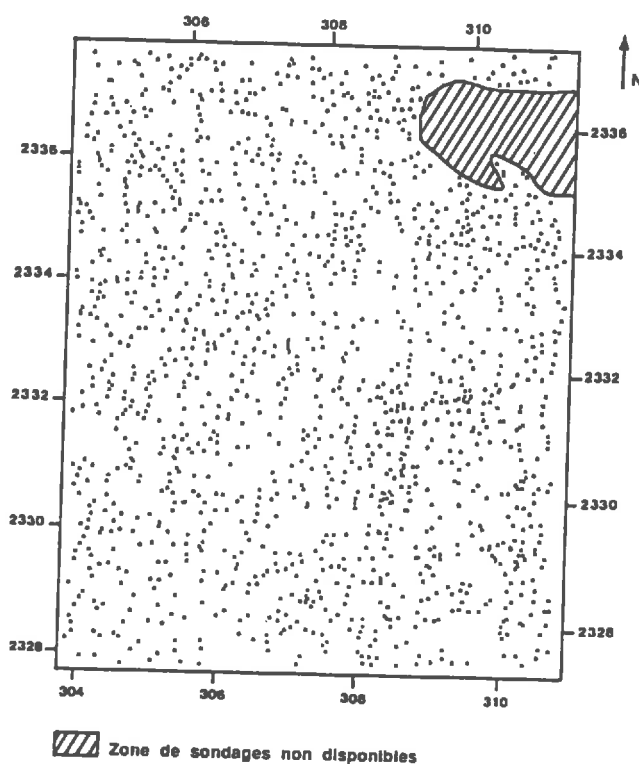
Divers auteurs ont tenté d'explicitier (Jamagne, 1967, 1977; Maignien, 1969; Boulaine, 1980; Baize, 1986) ou de modéliser (Girard, 1983; Oliver, 1984; King, 1986) la démarche du cartographe. Sans rentrer dans l'explication de la procédure même de cartographie, nous allons présenter la carte pédologique de notre secteur en examinant:

- l'échantillonnage de la couverture pédologique,
- les critères retenus pour regrouper les observations,
- les unités cartographiques présentes sur le secteur.

## 2.1 L'échantillonnage

Le principe d'échantillonnage sur le secteur d'étude a été le suivant: le pédologue détermine les emplacements des sites d'observation sur le terrain, sans plan d'échantillonnage préconçu, mais à des intervalles réguliers. Cette méthode présente des analogies à la fois avec un échantillonnage par mailles, puisqu'on assure un semis régulier de sondages sur l'ensemble de la zone d'étude, et avec un échantillonnage par choix libre: l'emplacement des sites n'est pas prédéterminé mais tient compte des variations des facteurs extrinsèques au sol (géologie, topographie, végétation...). En France, cette méthode semble la plus courante en matière de cartographie pédologique (Jamagne, 1977; Legros, 1978b). A notre connaissance, l'échantillonnage par mailles n'a été adopté que dans des milieux où les facteurs extrinsèques au sol apparaissent monotones sur l'aire cartographiée, par exemple dans les marais de l'Ouest (King, 1986).

La figure I.4 représente le plan d'échantillonnage de la moitié "est" de notre zone d'étude: nous allons appeler cette zone "Secteur 1", car elle va constituer dans notre étude une zone d'investigation privilégiée. Sur le secteur 1, 1251 observations à la tarière et 25 descriptions de profil ont été faites sur une superficie de 6700 hectares, soit une observation pour 5,25 hectares. Cette densité d'échantillonnage correspond à des sites d'observation espacés en moyenne de 229 mètres sous l'hypothèse d'un échantillonnage par mailles.



**Figure I.4:** Plan d'échantillonnage sur le secteur 1 (moitié est de la zone d'étude)

Pour avoir une idée plus précise de la structure de l'échantillonnage, nous avons calculé pour chacun des sondages, la distance géographique qui le sépare de ses dix voisins les plus proches. En moyenne, la distance séparant un sondage de son voisin le plus proche, est de 131 mètres avec un écart-type de 44 mètres (Fig. I.5). Si on considère un rayon de 400 mètres autour d'un sondage, ce sont en moyenne dix observations qui ont été effectuées au sein de ce périmètre.

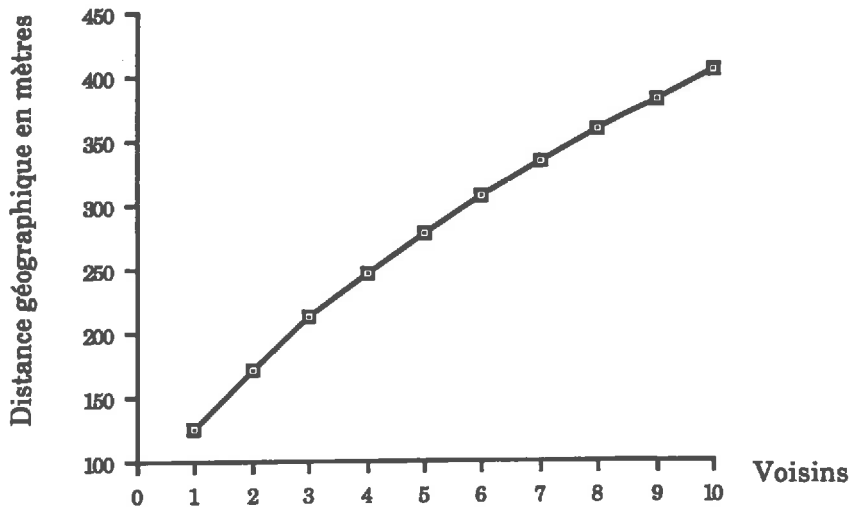


Figure 1.5: Distance moyenne à parcourir pour trouver de 1 à 10 voisins à partir d'un sondage donné.

Cette différence entre les valeurs de 229 mètres et de 131 mètres s'explique par l'existence de zones mal reconnues:

- soit parce que les sondages ne sont plus disponibles (nord-est du secteur) pour une simple raison de perte;
- soit du fait d'un sous-échantillonnage de certaines parties du paysage. En superposant le plan d'échantillonnage au fond topographique, on remarque que ces parties sous-échantillonnées correspondent aux zones de bas-fonds, dont le caractère hydromorphe est jugé dominant. Or, l'extension de ce caractère hydromorphe peut être précisée en se basant sur divers facteurs extrinsèques: occupation des sols par des prairies permanentes comprenant des espèces hygrophiles, une topographie plane délimitée au niveau de la rupture de pente par des haies. L'échantillonnage de ces zones est donc moindre.

## 2.2 Regroupement des observations: la légende "4 critères".

En chacun des points de sondage, une description de l'environnement et du sol est faite en se servant d'une fiche de sondage adaptée au milieu d'étude. Les données d'environnement concernent l'occupation du sol, le substrat et quelques données topographiques (altitude, pente, exposition). La description du sol se fait horizon par horizon par l'étude des caractères de couleur, texture, éléments grossiers, taches, matière organique, effervescence et éléments secondaires.

Pour regrouper ces observations et définir les unités cartographiques, les auteurs de la carte ont retenu quatre critères principaux:

- la nature du substrat géologique, en adoptant une liste pétrographique simplifiée par rapport à celle établie par les géologues,
- la classe d'hydromorphie, définie en tenant compte de la présence-absence de taches d'oxydo-réduction, de leur couleur, de leur abondance et de leur profondeur d'apparition,
- le type de développement de profil, donné par la succession des différents horizons et nommé en se référant à la classification française de 1967 (CPCS, 1967).
- la profondeur d'apparition du substrat géologique ou de son altérite, interprétée comme la profondeur du sol.

Pour chacun de ces critères, un recensement des modalités existantes dans le Massif Armoricain a été effectué et un code spécifique leur a été affecté. L'ensemble de ces codes est présenté en Annexes A. Le code de légende d'une unité cartographique est composé de la juxtaposition des codes concernant chacun des quatre critères.

Considérons trois exemples d'unités cartographiques dont nous rappellerons souvent la codification au cours de ce travail:

**\* 1<sup>er</sup> exemple:** L'unité cartographique "R 3 B 4"

La première lettre permet de définir le type de substrat: le code "R" est associé à un substrat de type grès schisteux. Le second élément du code est composé d'un point ou d'un chiffre de 1 à 9 permettant d'indiquer la classe d'hydromorphie: la classe d'hydromorphie "3" est caractérisée, pour les sols profonds, par des taches d'oxydo-réduction peu abondantes, apparaissant à une profondeur de plus de 40 cm. Le troisième élément du code est une lettre définissant le type de développement de profil: la lettre "B" correspond au type "Sol brun". Enfin, le chiffre final est celui de la classe de profondeur du sol: la classe "4" comprend les sols dont la profondeur est comprise entre 40 et 60 cm.

En résumé, l'unité cartographique R3B4 est une unité de "Sol brun sur Grès Schisteux, d'une profondeur comprise entre 40 et 60 cm, avec la présence de taches d'oxydo-réduction peu abondantes à plus de 40 cm".

**\* 2<sup>ème</sup> exemple:** L'unité cartographique "N . B 4"

Il s'agit d'une unité de "Sol brun (B) sur schiste briovérien (N), d'une profondeur de 40 à 60 cm (4) et sans tache d'oxydo-réduction (.)".

**\* 3<sup>ème</sup> exemple:** L'unité cartographique "O . B 4"

Il s'agit d'une unité de "Sol brun (B) sur schiste d'Angers (O), d'une profondeur de 40 à 60 cm (4) et sans tache d'oxydo-réduction (.)".

Cette méthode de codification des unités cartographiques, connue sous les termes de "légende 4 critères" ou de "méthode tarière", a été présentée en détail dans différents documents (Edeline, 1981; Dupont et Edeline, 1985; Rivière, 1989; Rivière et al., 1989). Elle a servi de légende pour la plupart des travaux de cartographie du Massif Armoricaïn et a été adoptée par les organismes ou sociétés ayant une activité de cartographie dans cette région.

## 2.3 Les unités cartographiques présentes sur le secteur

La carte pédologique au 1/25.000 est présentée en *Annexes A*.

### 2.3.1 Présentation sommaire et importance relative des unités cartographiques

Sur l'ensemble du secteur d'étude, on dénombre 1607 plages cartographiques appartenant à 353 unités cartographiques différentes. La présentation de ces unités cartographiques ne peut être faite ici. Nous notons simplement:

- l'existence de 17 types de substrat géologique différents,
- l'appartenance de 58 % des plages cartographiques à des unités présentant un développement de profil de type "Sol brun" et de 21 % des plages cartographiques à des unités de type "Sol brun faiblement lessivé",
- l'absence d'hydromorphie pour 28 % des plages et une hydromorphie supérieure ou égale à la classe 4 pour 46 % des plages,
- une profondeur du sol inférieure à 60 cm pour 52 % des plages.

La figure I.6 ordonne les 353 unités cartographiques en fonction de leur superficie. Elle représente en abscisse les unités cartographiques rangées de façon décroissante en fonction de leur superficie. En ordonnée, on a reporté l'aire cumulée divisée par l'aire totale. On montre ainsi que l'unité cartographique la plus fréquente représente 6.9 % de l'aire totale ou que les cinquante premières unités cartographiques constituent 65 % de la surface totale. Dernier chiffre, 95 % de l'aire totale est décrite par 193 unités cartographiques différentes. Le tableau I.2 précise cette figure pour les vingt unités cartographiques les mieux représentées.

*Ainsi, un nombre restreint d'unités cartographiques couvre une superficie importante et de nombreuses unités cartographiques sont très peu représentées sur le secteur.*

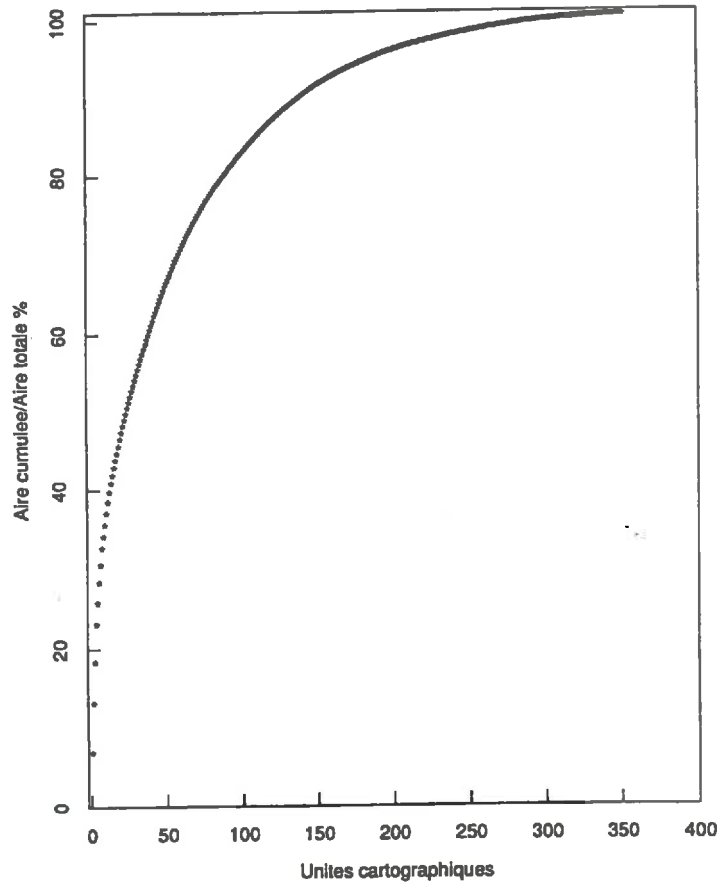


Figure I.6: Tri par ordre décroissant des unités cartographiques en fonction de leur surface.

Rang	Code	Définition synthétique de l'unité cartographique	Superficie en ha	% surface totale
1	V7V1	Sol d'apport sur alluvions, hydromorphie de classe 7, de plus d'un mètre de profondeur	932.5	6.9
10	V8V1	Sol hydromorphe sur alluvions, hydromorphie de classe 8, de plus d'un mètre	213.0	1.6
6	U7U1	Sol d'apport sur colluvions, hydromorphie de classe 7, de plus d'un mètre de profondeur	367.4	2.7
2	N.B4	Sol brun sur schiste tendre, sain, de 40 à 60 cm de profondeur	910.0	6.8
3	N.B5	Sol brun sur schiste tendre, sain, de 20 à 40 cm de profondeur	748.3	5.6
9	N3C2	Sol brun faiblement lessivé sur schiste tendre, hydromorphie de classe 2, de 80 à 100cm	215.4	1.6
13	N3C3	Sol brun faiblement lessivé sur schiste tendre, hydromorphie de classe 3, de 60 à 80 cm	180.1	1.3
20	N6F2	Sol brun sur altérite de schiste tendre, hydromorphie de classe 6, de 80 à 100 cm	126.8	0.9
7	O.B4	Sol brun sur schiste moyen, sain, de 40 à 60 cm de profondeur	327.3	2.4
17	O.B5	Sol brun sur schiste d'Angers, sain, de 20 à 40 cm de profondeur	131.4	1.0
8	O5F3	Sol brun sur altérite de schiste moyen, hydromorphie de classe 5, de 60 à 80 cm	303.3	2.3
5	P6D1	Sol lessivé faiblement dégradé sur schiste pourpré, hydromorphie de classe 6, > 1m	389.1	2.9
14	R.B5	Sol brun sur grès schisteux, sain, de 20 à 40 cm	164.6	1.2
4	R3B4	Sol brun sur grès schisteux, hydromorphie de classe 3, de 40 à 60 cm de profondeur	695.2	5.2
19	R4B5	Sol brun sur grès schisteux, hydromorphie de classe 4, de 20 à 40 cm	128.0	0.9
11	Q3B4	Sol brun sur grès armoricain, hydromorphie de classe 3, entre 60 et 80 cm	210.2	1.6
12	Q.B5	Sol brun sur grès armoricain, sain, de 20 à 40 cm	209.0	1.6
18	Q4C3	Sol brun faiblement lessivé grès armoricain, hydromorphie de classe 4, de 60 à 80 cm	129.1	0.9
16	Q5D8	Sol lessivé faibl dégradé sur grès armoricain, hydromorphie de classe 6, de 60 à 80 cm	145.1	1.1
15	E3C3	Sol brun faibl lessivé sur éboulis de pente, hydromorphie de classe 3, de 60 à 80 cm	145.4	1.1
			6671.2	49.6

Tableau I.2: Définition synthétique des vingt unités cartographiques les mieux représentées. Les unités sont regroupées par type de substrat; le rang est issu d'un tri par ordre décroissant des unités cartographiques en fonction de leur surface.



### 2.3.2 Les limites des plages cartographiques: l'analyse du contenant

Pour pouvoir replacer dans un contexte plus général les résultats de notre travail, il est important que nous sachions si la variabilité des sols de notre secteur d'étude est plus grande, comparable ou moindre que dans d'autres régions.

Une méthode simple pour répondre à cette question est de mesurer la distance séparant les limites des plages cartographiques: en première approximation, les sols d'une région seront d'autant plus variables que la distance moyenne séparant deux limites sera faible.

Pour mesurer ce paramètre, nous avons disposé dix transects sur la carte de façon aléatoire: 3 transects dans chacune des directions N-S et E-W, deux transects dans chacune des directions NNW-SSE et SSW-NNE. Cette disposition doit permettre de quantifier les orientations préférentielles des plages cartographiques visibles sur la carte pédologique. Sur chaque transect, on note une à une la distance séparant deux limites successives sécantes avec le transect.

La figure I.7 représente les histogrammes cumulés de la distance entre limites pour les transects d'orientation N-S et E-W qui sont les plus dissemblables. Pour résumer l'information de ces histogrammes, on peut leur ajuster, comme le suggèrent Burgess et Webster (1984a), de façon fort satisfaisante une courbe exponentielle de la forme:

$$G(x) = 1 - \exp(-\lambda x)$$

où :  $x$  représente la distance entre limites,  
 $G(x)$  est la fréquence cumulée,  
 et  $\lambda$  est un paramètre d'ajustement.

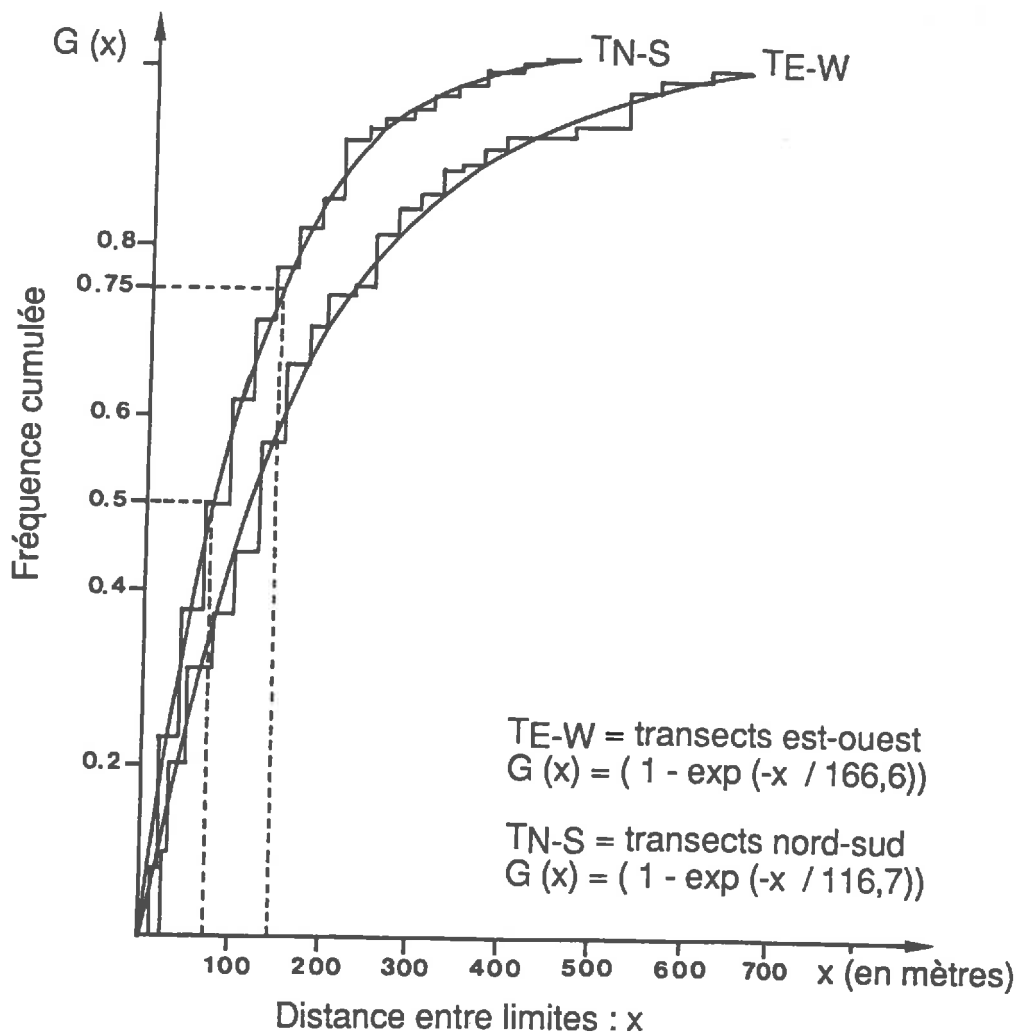


Figure I.7: Histogrammes cumulés des distances entre limites pour des transects d'orientation Nord-Sud et Est-Ouest.

L'anisotropie du document cartographique apparaît nettement: si l'on suit une direction nord-sud, la médiane des distances entre limites est de 85 mètres et le quartile supérieur est de 165 mètres. Dans une direction est-ouest, la médiane est de 120 mètres et le quartile supérieur est de 230 mètres. Cet axe d'allongement est-ouest des plages cartographiques correspond à la structure géologique et topographique décrite précédemment (§ I.1.2 et § I.1.3). On retrouve ainsi le fait classique que les sols varient de façon plus rapide le long des pentes.

Les résultats ainsi obtenus peuvent être comparés à deux études précédentes: d'une part, celle de Rogala (1982) qui a porté sur l'analyse de 94 cartes, la plupart pédologiques, provenant du monde entier et à des échelles allant du 1/5 000 au 1/1 000 000; d'autre part, celle de Burgess et Webster (1984a et 1984b) qui s'est basée sur huit cartes pédologiques levées en Grande-Bretagne à l'échelle du 1/25 000. En s'attachant à des cartes d'échelle comparable, il ressort de la confrontation avec ces études, que la carte pédologique de notre secteur d'étude présente une distance moyenne entre limites parmi les plus faibles recensées par ces auteurs.

Ainsi, la répartition spatiale des sols de notre secteur d'étude, telle qu'elle est décrite par la carte pédologique au 1/25.000, est caractérisée par des distances faibles entre limites de plages cartographiques. Cette caractéristique peut être expliquée soit par la méthode de cartographie, soit par une variabilité forte des sols, sans que l'on puisse trancher pour l'instant en faveur de l'une ou de l'autre de ces hypothèses.

### 3. ESTIMATION DE PROPRIETES DU SOL A PARTIR DE LA CARTE PEDOLOGIQUE

L'estimation dans l'espace d'une propriété du sol à partir d'une carte pédologique pose un problème différent selon que cette propriété constitue ou non un critère de cartographie .

Pour comparer puis regrouper ses observations afin d'établir une typologie des sols et pour repérer les limites des unités cartographiques, le pédologue sélectionne certains critères, les ordonne en fixant des bornes. Par exemple, dans la carte étudiée, la profondeur du sol est un des critères permettant de différencier les observations et des bornes fixées à 20, 40, 60, 80 et 100 cm définissent des classes de profondeur différentes.

Le choix de ces critères est fait par le pédologue avec un double souci:

- celui de retenir des critères cartographiques qui soient corrélés à un grand nombre d'autres propriétés du sol;
- celui de pouvoir représenter spatialement la variabilité de ces critères à l'échelle retenue et en fonction du milieu d'étude.

*Si la propriété que l'on cherche à estimer est un critère cartographique*, on dispose de son estimation pour chaque unité cartographique, souvent sous la forme d'un intervalle de variation. On peut donc estimer pour un tel critère sa valeur en un point en utilisant la valeur modale de l'unité cartographique à laquelle ce point se rattache. A titre d'exemple, pour une unité cartographique dont la profondeur du sol est par définition comprise entre 40 et 60 cm, l'estimation de la profondeur du sol en un point pourra être de 50 cm.

A priori, l'origine des incertitudes sur une telle estimation provient:

- des erreurs de mesure: la mesure de la profondeur du sol peut être entachée d'erreur dans le cas de sols caillouteux ou très secs;
- de la fourchette de variation admise par le pédologue. Deux observations pour lesquelles la profondeur du sol est comprise entre 40 et 60 cm sont considérées comme similaires pour le critère profondeur du sol;
- de la présence d'inclusions au sein de l'unité cartographique ne répondant pas à la définition de celle-ci. Ces inclusions ont pu être remarquées par le pédologue mais celui-ci a décidé de ne pas les représenter. Ces inclusions ont pu également ne pas être détectées.

Si la propriété que l'on cherche à estimer n'est pas un critère cartographique, l'emploi de la carte pédologique comme estimateur repose sur l'existence de corrélations entre cette propriété et les critères cartographiques. De telles corrélations sont bien mises en évidence par la projection sur un plan factoriel des modalités de variables descriptives du sol. La figure I.8, tirée de Girard (1983), représente le premier plan factoriel d'une analyse factorielle des correspondances menée sur 117 horizons décrits par 30 variables. Les modalités de variables liées au pH, à l'effervescence, à la présence de calcaire, sont localisées dans ce plan et reliées de façon ordonnée pour définir "le chemin qui caractérise chaque variable". La proximité dans le plan factoriel des différentes modalités et la forme du chemin des variables peuvent être interprétées en terme de corrélations entre variables (Fénelon, 1981). Dans cet exemple, on voit que des variables supposant une mesure au laboratoire (calcaire total, calcaire actif) suivent des chemins analogues à ceux de variables pouvant être déterminées sur le terrain (effervescence généralisée, sur la matrice, sur le squelette) et pouvant donc servir de critères de cartographie. On peut ainsi envisager d'utiliser une carte pédologique utilisant ces critères d'effervescence, pour estimer le calcaire total ou actif. Il n'en pas de même pour le pH ou le calcium échangeable qui suivent des chemins très différents de ceux des autres variables. Les variations de ces variables sont peu liées à celles d'autres caractéristiques aisément accessibles. Dans ce cas, il n'est pas sûr que la variabilité du pH au sein d'unités cartographiques définies et délimitées par des critères d'effervescence, soit moindre que la variabilité observée sur l'ensemble de la couverture pédologique.

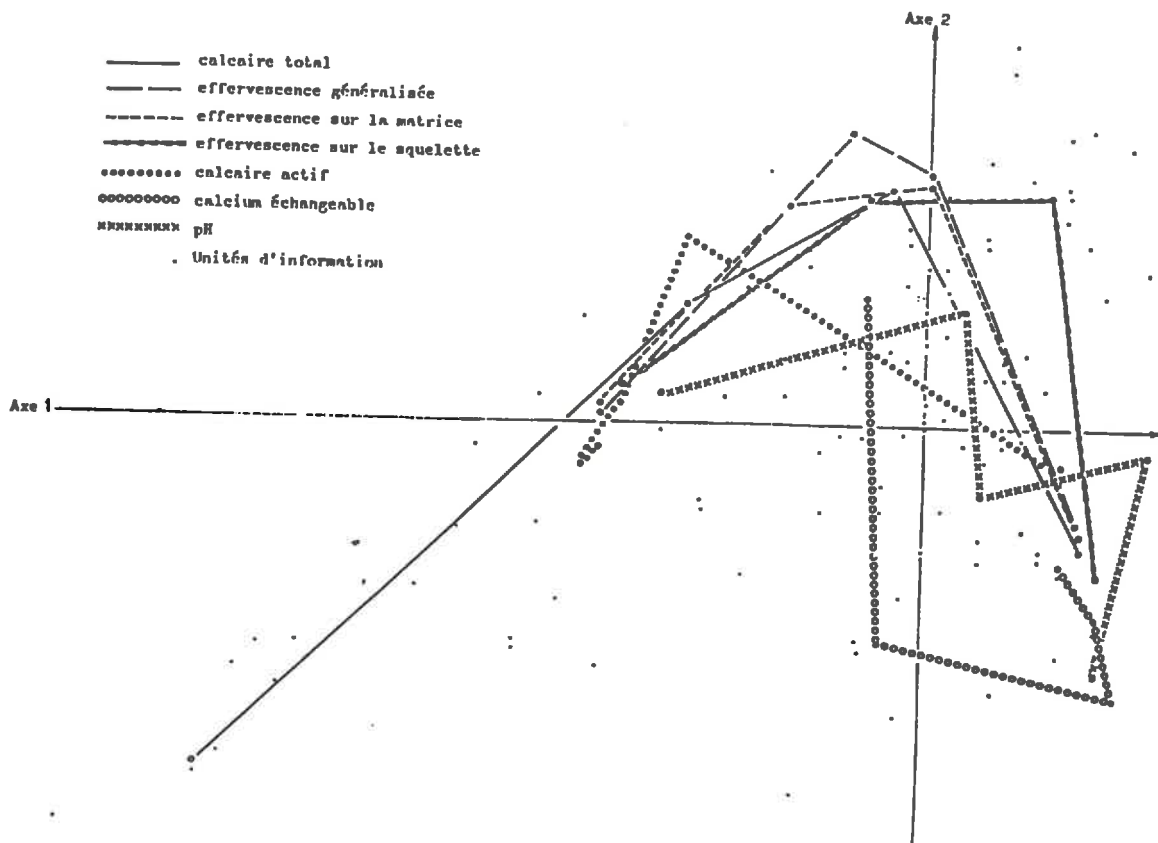


Figure I.8: Projection des modalités de variables descriptives d'horizons dans le premier plan factoriel d'une Analyse Factorielle des Correspondances (tiré de Girard, 1983)

En résumé, la précision de l'estimation dans l'espace d'une propriété du sol grâce à la carte pédologique va dépendre:

- pour un critère cartographique: des erreurs de mesure, de l'intervalle de variation admis par le pédologue et de la présence d'inclusions au sein des unités cartographiques;
- dans les autres cas: des facteurs précédents et en plus, des corrélations avec les critères cartographiques.

## **CONCLUSION DU CHAPITRE I:**

Le secteur d'étude retenu est situé à la limite de deux unités physiographiques du Massif Armoricaïn: au nord, le bassin de Rennes caractérisé par un substrat géologique briovérien; au sud, le synclinorium de Martigné-Ferchaud présentant une succession de schistes et de grès. L'étude entreprise sur ce secteur porte ainsi sur des sols développés sur une gamme assez large de substrats.

La carte pédologique du secteur a été levée suivant une méthodologie courante par des pédologues expérimentés: échantillonnage libre, description de sondages et de profils, choix et codage de variables permettant de comparer les observations, dessin des limites en s'aidant des caractéristiques extrinsèques du milieu. Une étude de ce document cartographique, en analysant le nombre d'unités cartographiques et leurs limites, semble montrer une grande variabilité des sols. D'une part, le nombre d'unités cartographiques différentes est élevé malgré l'importance en surface d'un nombre limité d'unités cartographiques. D'autre part, on change d'unité cartographique dans 75 % des cas dès que l'on parcourt une distance de 165 mètres suivant une orientation nord-sud ou de 230 mètres dans le sens est-ouest.

## Première partie

# CARTOGRAPHIE PAR KRIGEAGE DE PROPRIETES DU SOL ET COMPARAISON AVEC DES CARTES THEMATIQUES DERIVEES DE LA CARTE PEDOLOGIQUE

L'estimation dans l'espace de propriétés du sol peut a priori être faite par deux méthodes, l'une se basant sur la carte pédologique, l'autre employant des techniques statistiques. Il apparaît important de confronter ces approches sur un même secteur d'étude.

Pour mettre en oeuvre cette confrontation, nous allons retenir deux variables, la profondeur du sol et la classe d'hydromorphie, et procéder en deux étapes constituant les deux chapitres de cette première partie:

- 1. Quelles sont les possibilités d'emploi des techniques statistiques à l'échelle d'un secteur de plusieurs milliers d'hectares ? Le krigeage sera la méthode d'estimation spatiale retenue. On sera amené à employer le krigeage dit "linéaire" pour la profondeur du sol qui est une variable continue, et le krigeage dit "indicatif" pour la classe d'hydromorphie qui est une variable qualitative ordonnée.*
- 2. Comment sont liées les estimations faites à partir de la carte pédologique et les estimations par voie statistique ? La comparaison des estimations obtenues par ces deux approches sera faite de trois façons: (i) en comparant visuellement les documents cartographiques, (ii) en comparant les estimations aux noeuds d'une grille; (iii) en comparant enfin les estimations avec des valeurs mesurées lors d'un échantillonnage indépendant.*

## Chapitre II

# OBTENTION DE CARTES MONOFACTORIELLES PAR KRIGEAGE

L'objet de ce chapitre est d'analyser les possibilités d'emploi des techniques statistiques sur un secteur de plusieurs milliers d'hectares.

## 1. METHODES STATISTIQUES ET OBJET D'ETUDE

### 1.1 Les techniques géostatistiques: Analyse du variogramme et krigeage

Les techniques statistiques permettant l'estimation dans l'espace d'une propriété à partir d'un nombre fini d'échantillons sont nombreuses: la plus simple d'entre elles est celle des polygones de Thiessen associant à chaque point à estimer, la valeur de l'observation la plus proche. Cette méthode a été utilisée par Marsman et De Gruijter (1986) pour comparer différentes procédures de cartographie dans une zone sableuse aux Pays-Bas. D'autres méthodes sont par exemple l'approximation aux moindres carrés (Mallet, 1976; Leleux et al., 1988), l'ajustement de fonctions polynomiales ou de fonctions splines (Dubrule, 1984; Ponce-Hernandez et Beckett, 1988)...

Dans notre travail, la méthode de prédiction spatiale retenue est celle du *krigeage*, basée sur la théorie des "Variables Régionalisées" développée par Matheron (1965). Ce choix s'explique par:

- l'existence d'un nombre très important d'études employant cette méthode pour décrire la variabilité spatiale de propriétés du sol à des échelles et dans des milieux très différents. On citera de façon très incomplète les études de Nortcliff (1978), Oliver (1984) portant sur des données morphologiques, celles de Gascuel (1984), Voltz (1986) sur des propriétés physiques, celles de Bratney et al. (1982), Wopereis et al. (1989) sur des propriétés chimiques. Toutes ces références font que le krigeage est la technique de prédiction spatiale pour laquelle les possibilités et limites d'emploi sont les mieux connues.
- les études comparant différentes méthodes statistiques d'estimation spatiale. Ces études sont peu nombreuses (Creutin et Obled, 1982; Kuilenberg et al., 1982; Laslett et al., 1987; Goulard et al., 1987), mais elles montrent que le krigeage s'avère être dans tous les cas un des meilleurs estimateurs.

La théorie des variables régionalisées a fait l'objet de présentations très complètes tant au niveau de son formalisme (Matheron, 1971; Journel et Huijbregt, 1978) que de ses possibilités d'emploi en science du sol (Burgess et Webster, 1980a, 1980b; Webster et Burgess, 1980; Burgess et al., 1981; Bratney et Webster, 1983b; Webster, 1985; Gascuel, 1987; Webster et Oliver, 1989, 1990). L'existence de toutes ces références nous permet de faire une présentation sommaire de cette théorie, dégagée de tout formalisme mathématique réservé à des spécialistes. Cette présentation est fondée sur celle faite par Webster (1985).

*La théorie des variables régionalisées fournit deux outils pour analyser la variabilité spatiale de propriétés du sol:*

1. *Un résumé synthétique de la variabilité spatiale des propriétés du sol sous la forme d'un variogramme*

2. Une technique de prédiction, le krigeage, prenant en compte l'information du variogramme et permettant l'estimation avec une précision connue de propriétés du sol en des sites non échantillonnés.

### 1.1.1 Le variogramme.

Considérons une propriété du sol notée  $Z$  connue en  $n$  points de l'espace géographique, chacun de ces points étant repérés par le vecteur  $x$  de ses coordonnées géographiques (longitude et latitude). De la sorte, la notation " $z(x_i)$ " représente la valeur observée de la propriété  $Z$  au  $i$ ème point d'échantillonnage de coordonnées  $x_i$ .

Dans un cas très simple, prenons deux points pour lesquels on connaît des valeurs  $z_1$  et  $z_2$  de la propriété  $Z$ . La variance entre les observations de ces deux sites, notée  $s^2$ , est par définition:

$$s^2 = [z_1 - \bar{z}]^2 + [z_2 - \bar{z}]^2 \quad (1)$$

où  $\bar{z}$  est la moyenne entre ces deux observations.

Cette variance  $s^2$ , qui traduit l'importance des écarts à la moyenne, est d'autant plus grande que les observations sont différentes. On peut d'ailleurs développer l'équation (1) pour obtenir une autre expression de cette valeur  $s^2$ :

$$s^2 = 1/2 [z_1 - z_2]^2 \quad (2)$$

Cette équation peut être écrite pour tout couple de sites. Pour cela, considérons deux sites  $x_i$  et  $x_i + h$  où  $x_i$  représente les coordonnées géographiques d'un des sites et  $h$  est un vecteur caractérisant la distance entre les sites. L'équation (2) s'écrit alors:

$$s^2 = 1/2 [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

Calculons à présent la distance géographique séparant chacun des points d'observation et considérons les  $m$  couples de points séparés par une même distance géographique  $h$ . On peut comme précédemment, calculer la variance des observations pour les sites pris deux à deux. La moyenne  $\bar{s}^2$  de ces  $m$  variances s'écrit en employant (3):

$$\bar{s}^2 = 1/(2m) \sum_{i=1}^m [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (4)$$

Pour une distance  $h$  séparant deux points d'observation,  $\bar{s}^2$  rend compte de la ressemblance des observations faites en ces deux points: Il sera d'autant plus grand que ces observations sont différentes.  $\bar{s}^2$  est souvent qualifiée de "semi-variance".

De façon intuitive, on conçoit que deux observations seront en général d'autant plus semblables qu'elles seront proches géographiquement l'une de l'autre. Le calcul de  $\bar{s}^2$  pour différentes distances  $h$ , va permettre de quantifier cette idée: il permet de suivre l'évolution des écarts entre des observations en fonction de la distance qui les sépare.

L'intérêt de cette notion simple et les conditions de sa généralisation ont été définis par la théorie des variables régionalisées (Matheron, 1965). Cette théorie montre que la généralisation de l'équation (4) suppose deux conditions, connues sous le terme d' *hypothèse intrinsèque* :

- l'espérance de  $Z$  est constante quelle que soit la position  $x$
- $$E[Z(x)] = \text{constante} \quad (5)$$

- pour toute distance  $h$ , la différence  $[Z(x) - Z(x+h)]$  a une variance finie, indépendante des coordonnées  $x$

$$\begin{aligned} \text{VAR} [Z(x) - Z(x+h)] &= E \{ [Z(X) - Z(X+h)]^2 \} \\ &= 2 \gamma(h) \end{aligned} \quad (6)$$

Quand ces deux conditions sont vérifiées, la valeur  $\bar{s}^2$  définie dans l'équation (4) constitue un estimateur non biaisé de la fonction  $\gamma(h)$  définie en (6). Cette fonction  $\gamma(h)$  est connue sous le terme de *variogramme*.

La figure II.1 représente à titre d'exemple un variogramme sur des données de profondeur d'apparition d'une altérite: pour une parcelle expérimentale de 0.5 hectare sur schiste pourpré de Pont-Réan située à Paimpont (Ille-et-Vilaine), 150 mesures de la profondeur d'apparition de l'altérite ont été effectuées suivant un échantillonnage régulier. Le variogramme présenté est qualifié de "moyen", car son calcul ne tient compte que de la distance séparant les points, quelle que soit la direction. Pour mettre en évidence une éventuelle anisotropie, il est souvent intéressant de calculer le variogramme par classes de directions, variogrammes dits "directionnels".

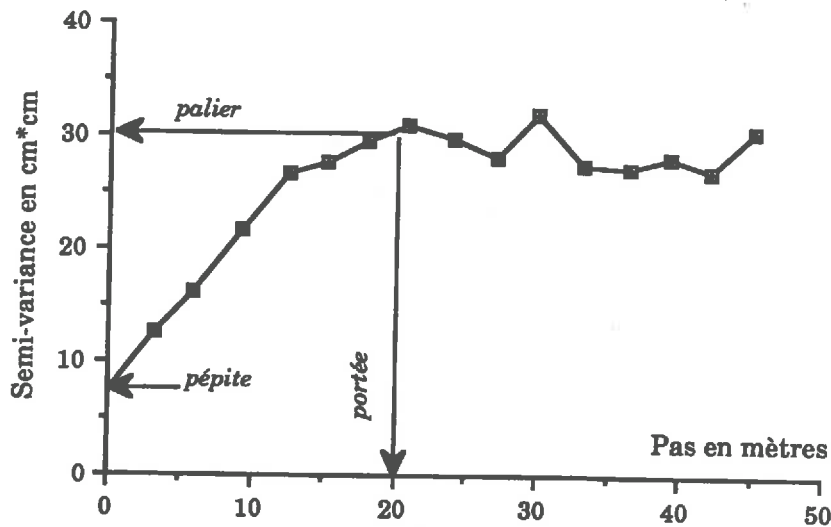


Figure II.1: Un exemple de variogramme: variogramme moyen de la profondeur d'apparition de l'altérite sur une parcelle de 0.5 hectare.

L'analyse du variogramme porte:

- sur son comportement à l'origine. En théorie, on devrait avoir  $\gamma(h) = 0$  pour  $h = 0$ , mais fréquemment, le variogramme présente une ordonnée à l'origine non nulle. Cet écart est qualifié d'"effet de pépité" et est interprété comme le résultat d'erreurs de mesure ou d'une variabilité spatiale présente à une distance inférieure au pas d'échantillonnage;
- sur son aspect borné ou non.  $\gamma(h)$  est en général une fonction croissante qui peut atteindre un palier pour une distance appelée portée. La portée est donc la distance à partir de laquelle les valeurs de la variable entre deux points sont indépendantes (non corrélées).

### 1.1.2 Le krigeage linéaire et le krigeage indicatif (1)

Le deuxième outil fourni par la théorie des variables régionalisées pour décrire la structure spatiale d'une propriété est le krigeage. Il définit un estimateur  $Z^*$  d'une propriété  $Z$  en un point quelconque de l'espace géographique. Cette estimation est faite à partir des observations effectives  $z(x)$  de cette propriété.

(1) Cette présentation du krigeage est volontairement incomplète: d'autres formes du krigeage existent, en particulier le krigeage disjonctif basé sur un estimateur non linéaire (Yates et Yates, 1988; Webster et Oliver, 1989).



### a) Le krigeage linéaire

La forme la plus simple et la plus employée de cette technique est celle du krigeage linéaire. L'estimation  $z^*(x_0)$  faite en un point  $x_0$  par le krigeage linéaire est telle que:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (7)$$

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

Cette estimation est effectuée sous deux conditions; elle doit être

- non biaisée  $E [ Z^*(x) - Z(x) ] = 0$  (8)

- optimale dans le sens d'une minimisation de la variance d'estimation  
 $VAR [ Z^*(x) - Z(x) ]$  minimale (9)

Quand l'hypothèse intrinsèque est vérifiée (équations 5 et 6), l'ajustement d'une fonction autorisée au variogramme expérimental permet de résoudre le système défini par les équations 7, 8 et 9. De la sorte, on peut calculer les poids  $\lambda_i$  de l'équation 7 et donc la valeur de l'estimation  $z^*(x_0)$ . On obtient également une valeur de la variance d'estimation en tout point.

La variance d'estimation est un indicateur de la précision des estimations faites: elle sera d'autant plus grande que les estimations sont peu précises. Cette variance d'estimation ne dépend pas de la valeur des observations, mais uniquement de la position des points et du variogramme.

### b) Le krigeage indicatif

Pour estimer la valeur d'une propriété en un point, le krigeage linéaire utilise une combinaison linéaire des observations faites dans un voisinage du point à estimer. Cette méthode suppose de façon implicite que la variable étudiée soit une variable continue ou du moins une variable qualitative ordonnée dont l'étendue des classes soit régulière.

Or, considérons la variable "classe d'hydromorphie" déjà évoquée au chapitre I. La définition des trois premières classes de cette variable est la suivante:

Classe 1: Absence de taches d'oxydo-réduction sur tout le profil

Classe 2: Taches d'oxydo-réduction à une profondeur supérieure à 80 cm, peu nombreuses

Classe 3: Taches d'oxydo-réduction à une profondeur supérieure à 80 cm, nombreuses

Il apparaît clairement que les intervalles entre les classes 1 et 2 et entre les classes 2 et 3 ne sont pas égaux. Le calcul d'une combinaison linéaire entre ces classes est donc difficilement interprétable. L'exemple choisi n'est pas unique et les variables descriptives du sol sont souvent de ce type (Girard, 1979, 1983).

Ce constat nous a amené à rechercher une méthode autre que le krigeage linéaire, méthode qui soit indépendante de la loi de distribution de la propriété étudiée. La méthode dite du *krigeage indicatif*, présentée par Journel (1984), satisfait à cette condition et permet d'envisager l'emploi des techniques géostatistiques pour des variables qualitatives ordonnées.

Cette méthode repose sur une transformation simple de la variable  $Z$  étudiée. Considérons une valeur  $z_c$  de la variable  $Z$  et définissons une fonction binaire  $I$  telle que pour tout point d'échantillonnage défini par ses coordonnées  $x$  :

$$\begin{cases} I(x_i; z_c) = 1 \text{ si } z(x_i) \leq z_c \\ I(x_i; z_c) = 0 \text{ si } z(x_i) > z_c \end{cases} \quad (10)$$

On qualifiera  $I$  de fonction indicatrice ("indicator function") et  $z_c$  de valeur-seuil ("cutoff"). La figure II.2 schématise sur un cas fictif cette transformation d'une variable  $Z$  en une fonction indicatrice.

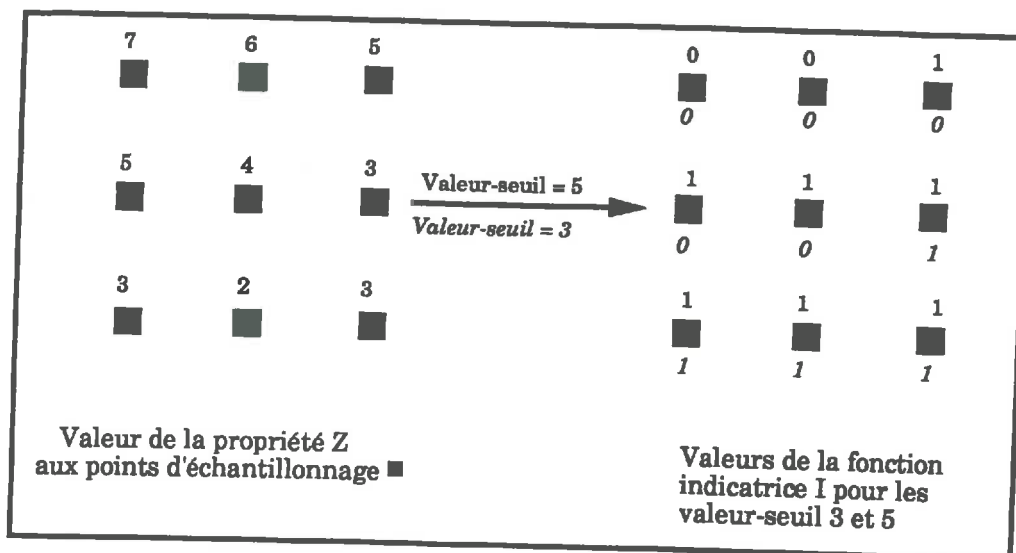


Figure II.2: Schématisation de la transformation d'une variable en une fonction indicatrice.

L'approche du krigeage indicatif comporte par la suite:

- le choix de différentes valeurs-seuil et le calcul du variogramme pour chacune des fonctions indicatrices définies par ces valeurs-seuil. Suivant une formule analogue à (6) et sous l'hypothèse intrinsèque, le variogramme de cette fonction s'écrit:

$$\gamma(h, z_c) = 1/2 E ( [ I(x, z_c) - I(x+h, z_c) ]^2 ) \quad (11)$$

- l'estimation dans l'espace de la fonction indicatrice  $I$  pour chacune des valeurs-seuil retenues. Cette estimation se fait en ajustant un modèle sur le variogramme défini par l'équation (11) et en employant ce modèle dans une procédure de krigeage linéaire.

En un point  $x_0$ , on estime donc  $I^*(x_0, z_c)$  suivant:

$$I^*(x_0, z_c) = \sum_{i=1}^n \lambda_i I(x_i, z_c) \quad (12)$$

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

Ainsi, du fait de la définition de la fonction indicatrice, on calcule par (12) une valeur comprise entre 0 et 1 qui est en fait *une estimation en un point donné de la probabilité que la valeur de Z soit inférieure ou égale à la valeur seuil  $z_c$* . La connaissance de cette probabilité en un même point pour différentes valeurs-seuil, permet d'estimer en ce point la valeur de la variable Z étudiée. Nous allons voir comment pour l'exemple retenu.

Le krigeage indicatif a été peu employé pour des propriétés du sol. Son emploi a concerné la prospection aurifère (Davis, 1984; Lemmer, 1984; Sullivan, 1984) et des données de perméabilité de sédiments alluviaux (Johnson et Dreiss, 1989).

### Conclusion:

La méthode statistique retenue comprend deux étapes majeures: d'abord, l'analyse de la structure spatiale de la variable étudiée grâce au variogramme, puis l'emploi d'une technique de prédiction spatiale tenant compte de cette structure spatiale, le krigeage.

Nous qualifions cet ensemble de "techniques géostatistiques".

## 1.2 Les secteurs d'étude: Localisation des secteurs 1 et 2

Pour mener cette confrontation, le secteur retenu correspond à la moitié "est" du domaine présenté au chapitre I. Ce secteur est noté "secteur 1". On dispose sur ce secteur de la description de 1251 sondages (Fig. II.3).

On a vu précédemment que le "synclinorium de Martigné-Ferchaud" recouvre une partie du secteur 1. Cette structure est nettement mise en évidence par la carte pédologique: elle se traduit par l'existence de sols développés sur des formations paléozoïques et par une orientation préférentielle des plages cartographiques suivant un axe est-ouest.

On a voulu savoir si la prise en compte de cette information, sous la forme d'un partitionnement de la couverture pédologique, permettait d'améliorer les cartes obtenues par voie géostatistique. A cet effet, on a défini un sous-secteur, noté "secteur 2", inclus dans le secteur 1 (Fig. II.3). La carte géologique étant trop imprécise, la délimitation du secteur 2 a été faite grâce à la carte des substrats dérivée de la carte pédologique, en regroupant l'ensemble des unités cartographiques définies sur le synclinorium. 485 sondages ont été décrits sur le secteur 2.

L'analyse géostatistique portera donc à la fois sur l'échantillonnage du secteur 1 et sur un sous-ensemble de cet échantillonnage, limité au secteur 2. Par contre, la comparaison des documents obtenus ne pourra se faire que sur le secteur 2 puisqu'il s'agit là du seul domaine commun aux deux secteurs (Fig. II.4). Cette comparaison sera basée sur les différences d'estimation faites aux noeuds d'une grille régulière de pas 100 mètres, superposée au secteur 2.

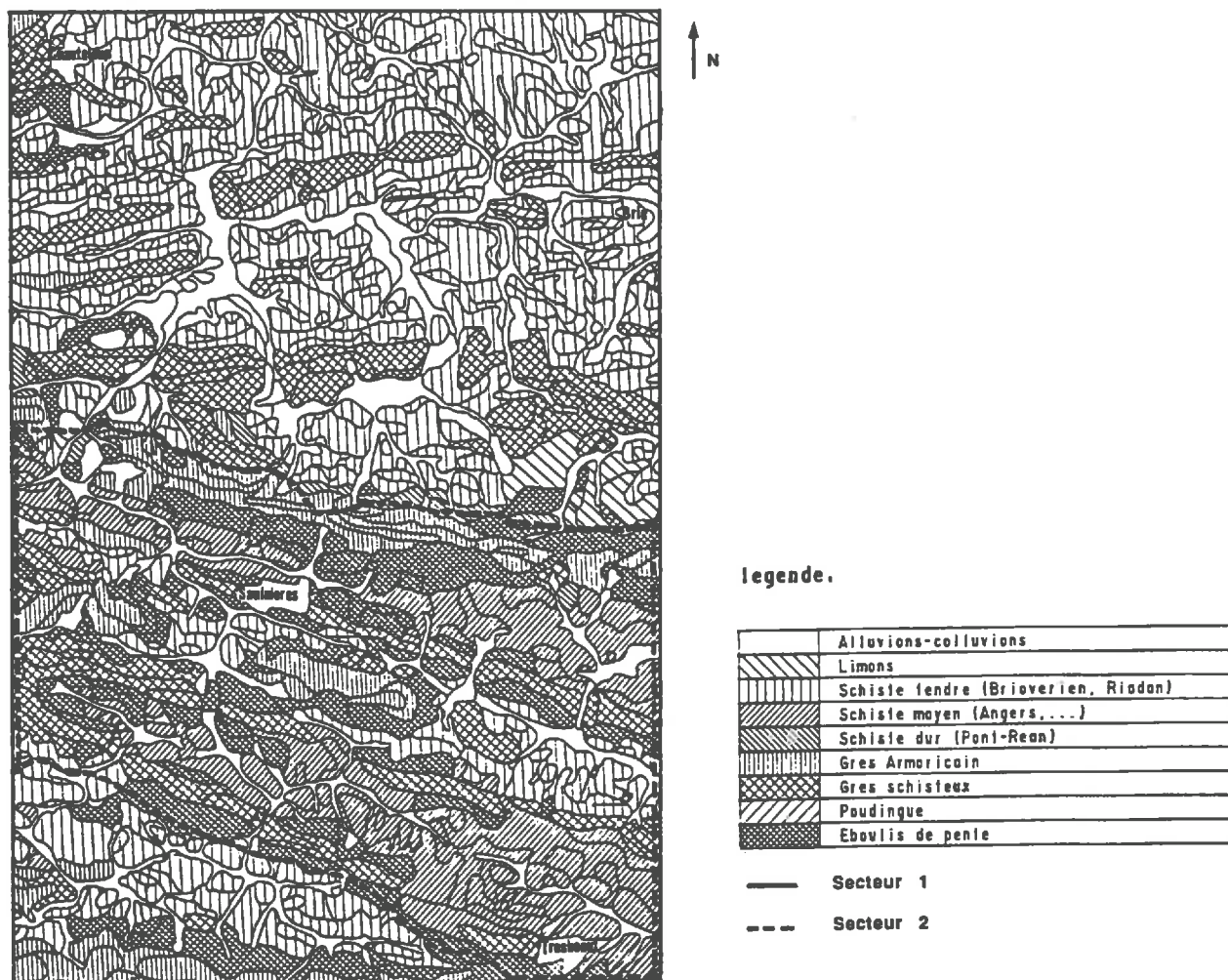


Figure II.3: Localisation des secteurs 1 et 2  
Carte du substrat dérivée de la carte pédologique au 1/25.000 de la feuille Janze 7

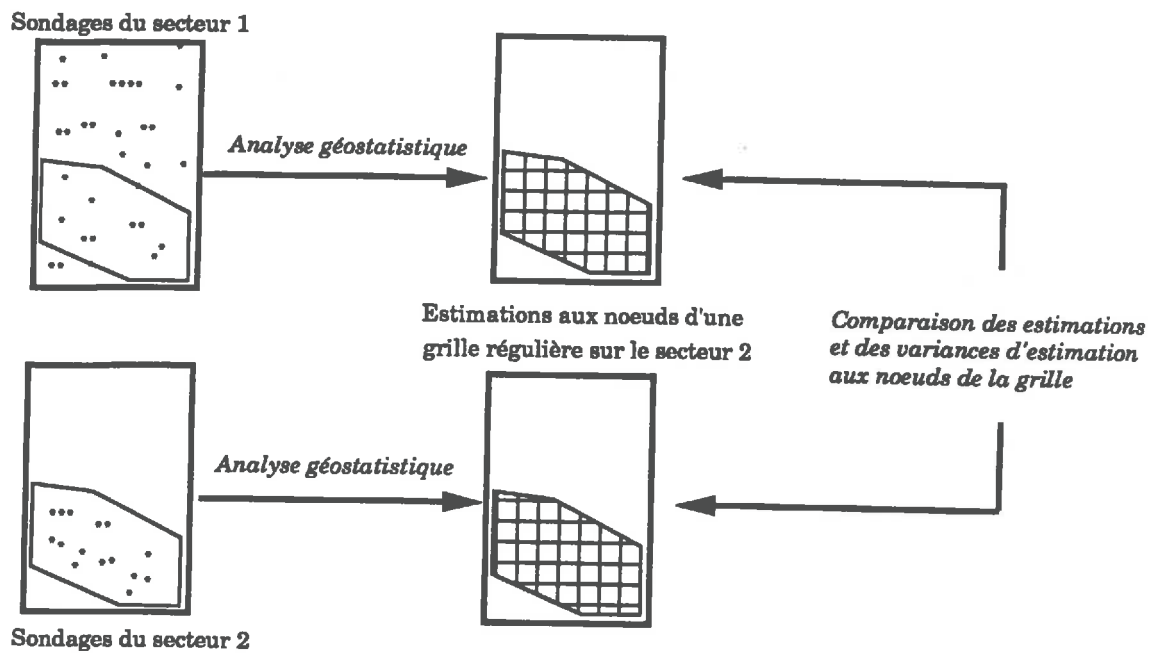


Figure II.4: Les analyses géostatistiques faites sur les secteurs 1 et 2.

### 1.3 Les variables retenues

Les variables retenues sont la profondeur du sol et la classe d'hydromorphie. Les raisons de ce choix sont liées à leur importance sur le plan agronomique (Leparoux, 1988, Walter et al., 1989c) et au fait que cette information est disponible sur l'ensemble des sondages. La profondeur du sol correspond à la profondeur d'apparition du substrat géologique mesurée à la tarière.

La détermination de la classe d'hydromorphie prend en compte à la fois la profondeur d'apparition et l'abondance des caractères liés à l'hydromorphie. Il s'agit d'une variable qualitative ordonnée, rangée en 10 classes par degré d'hydromorphie croissante.

L'emploi de logiciels statistiques nous a contraint à recoder la classe d'hydromorphie sous une autre forme que le codage utilisé par les pédologues pour définir les unités cartographiques. Le tableau II.1 présente ce nouveau codage qui sera utilisé tout au long de ce chapitre.

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

Tableau II.1: Codage et définition des classes de profondeur du sol et d'hydromorphie

## Conclusion

Les techniques géostatistiques retenues dans ce chapitre doivent nous permettre d'étudier la variabilité spatiale de la profondeur du sol et de la classe d'hydromorphie sur les secteurs 1 et 2: le krigeage linéaire est utilisé pour la profondeur du sol et le krigeage indicatif pour la classe d'hydromorphie.

## 2. EMPLOI DU KRIGEAGE LINEAIRE pour la PROFONDEUR DU SOL

### 2.1 Les logiciels employés <sup>(1)</sup>

L'essentiel des calculs nécessaires pour la mise en oeuvre des techniques géostatistiques a été fait en employant deux logiciels de l'Ecole des Mines de Paris: d'une part, le logiciel *Gamma* (Chiles et al., 1982) pour le calcul des variogrammes; d'autre part le logiciel *Bluepack* (Delfiner et al, 1976) pour le krigeage.

Ces deux logiciels n'ont pas d'outil performant d'ajustement de fonctions statistiques au variogramme: pour faire de tels ajustements, nous avons employé le logiciel *MLP* (Ross, 1980, 1990).

Les cartes en courbes d'isovaleurs à partir des estimations par krigeage sont obtenues grâce à des programmes utilisant la bibliothèque *Cartolab* (Mallet, 1976). Enfin, la gestion des données pour le krigeage et de nombreuses représentations graphiques (bloc diagrammes, figures...) ont été faites grâce au logiciel *S* (Becker et Chambers, 1984 ).

### 2.2 Caractérisation générale de la variable

Rappelons que nous disposons de 1256 sondages sur le secteur 1 et de 458 sondages sur le secteur 2 pour lesquels la profondeur du sol a été mesurée à la tarière. La précision de cette mesure est variable et dépend principalement de l'état d'humidité du sol et de la charge en cailloux. Il est donc difficile de chiffrer de façon exacte cette précision; nous l'estimons à partir de notre expérience personnelle du milieu étudié à plus ou moins 10 cm.

Les histogrammes de la profondeur du sol sur les secteurs 1 et 2 montrent dans les deux cas une distribution unimodale (Fig. II.5). Pour le secteur 1, le mode correspond à la classe 40 à 60 cm; pour le secteur 2, le mode est la classe 60 à 80 cm. La médiane de ces deux populations est dans les deux cas égale à 70 cm.

La définition d'un estimateur non biaisé de l'espérance d'une variable suppose la connaissance de sa loi de distribution: à titre d'exemple, la moyenne arithmétique d'une variable est un estimateur exact de l'espérance dans le cas d'une distribution normale, mais non dans le cas d'une distribution lognormale. Pour profiter des propriétés bien connues de la loi normale, de nombreux auteurs (Snedecor et Cochran, 1971; Dagnelie, 1980) proposent de tester la normalité de la variable et éventuellement d'utiliser une transformation de la variable pour rendre la distribution normale.

---

<sup>(1)</sup> Depuis peu, des logiciels fonctionnant sous système MSDOS regroupent la plupart des étapes que nous avons effectuées avec des logiciels différents: citons *Geostat-PC* (Boivin, 1988), *Geo-Eas* (Englund et Sparks, 1988), *PC-Geostat* (Burrough et al., 1988), *Geopack* (Yates et Yates, 1989). Cela permet une convivialité accrue dans l'emploi des techniques géostatistiques. Ces logiciels n'ont néanmoins pas encore la capacité de traiter des fichiers aussi importants que ceux de cette étude.

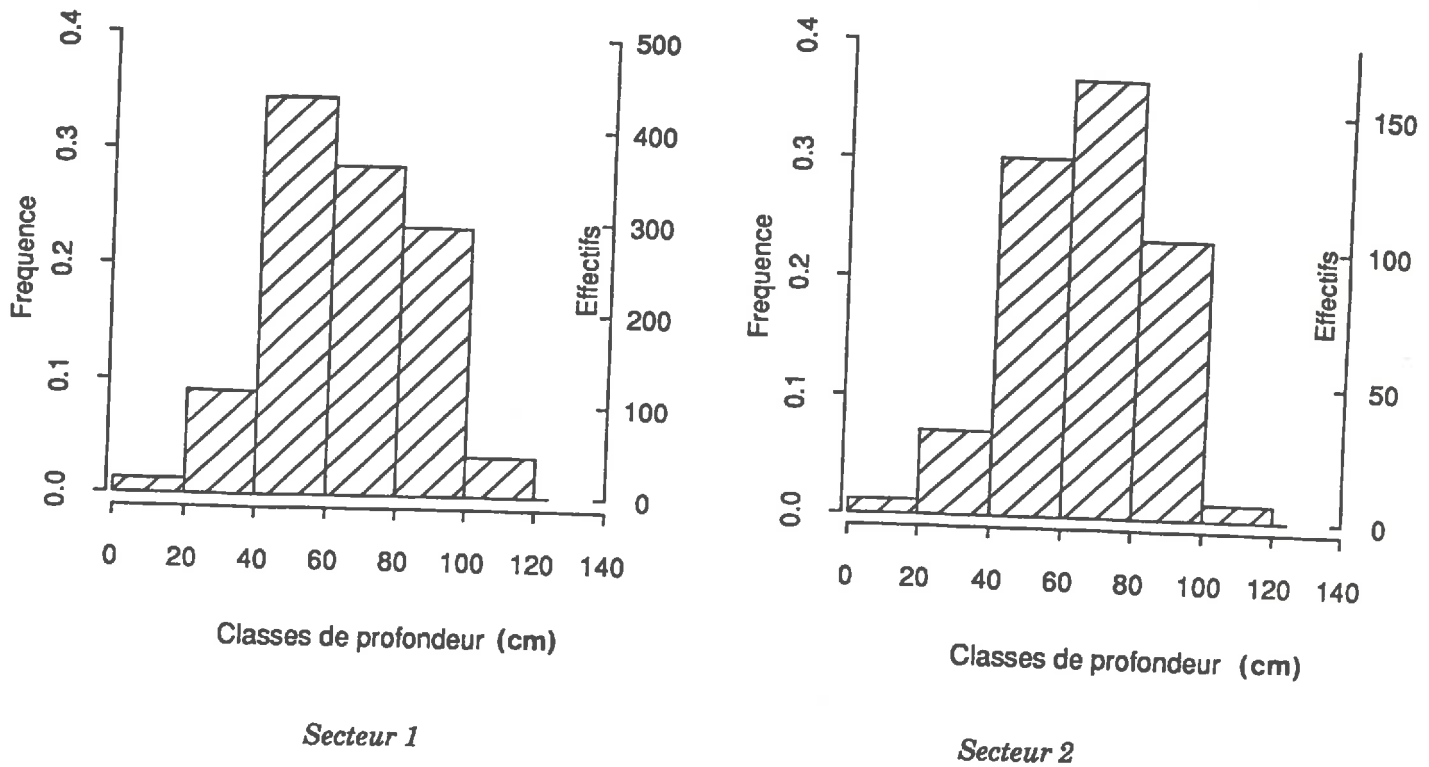


Figure II.5: Histogrammes de la profondeur du sol sur les secteurs 1 et 2

Dans notre cas, un test du chi-2 d'ajustement à une loi normale<sup>(1)</sup> est rejeté pour les deux secteurs au seuil de probabilité 0.05. Il en est de même quand on fait l'hypothèse d'une distribution log-normale. Il ne semble donc pas y avoir de transformation simple permettant de rendre normales les distributions de la profondeur du sol sur le secteur 1 et 2.

La non-normalité de la variable n'affecte pas les estimations faites par krigeage puisque l'hypothèse de normalité n'est pas requise dans le calcul du variogramme et le calcul des estimations (Gutjahr, 1984). Ces considérations nous ont amené à ne pas mener plus loin la recherche d'une transformation rendant normales les distributions de la profondeur du sol.

Les histogrammes donnent des indices quant à la variabilité générale de la variable étudiée, mais non sur sa structure spatiale. Le report dans l'espace géographique des valeurs de la variable permet une première analyse de cette structure. Ce report a été effectué sur un domaine de 9 km<sup>2</sup> sous forme de rectangles dont la hauteur est proportionnelle à la profondeur du sol (Fig. II.6). L'analyse visuelle montre ainsi:

- l'existence de grandes tendances: zone de sols profonds dans la partie nord-est, zone de sols peu profonds dans la partie centrale;
- des variations importantes à courte distance;
- la difficulté d'une cartographie manuelle essayant de regrouper les sols de même profondeur.

L'existence de secteurs de sols généralement profonds et d'autres de sols peu profonds implique que l'espérance de la profondeur du sol ne peut être considérée comme constante sur l'ensemble du domaine d'étude. Cela semble donc infirmer l'hypothèse intrinsèque (§2.1).

<sup>(1)</sup> Ce test compare les fréquences observées sur l'échantillon aux fréquences théoriques définies par la loi de distribution ajustée à l'échantillon (Dagnélie, 1980).

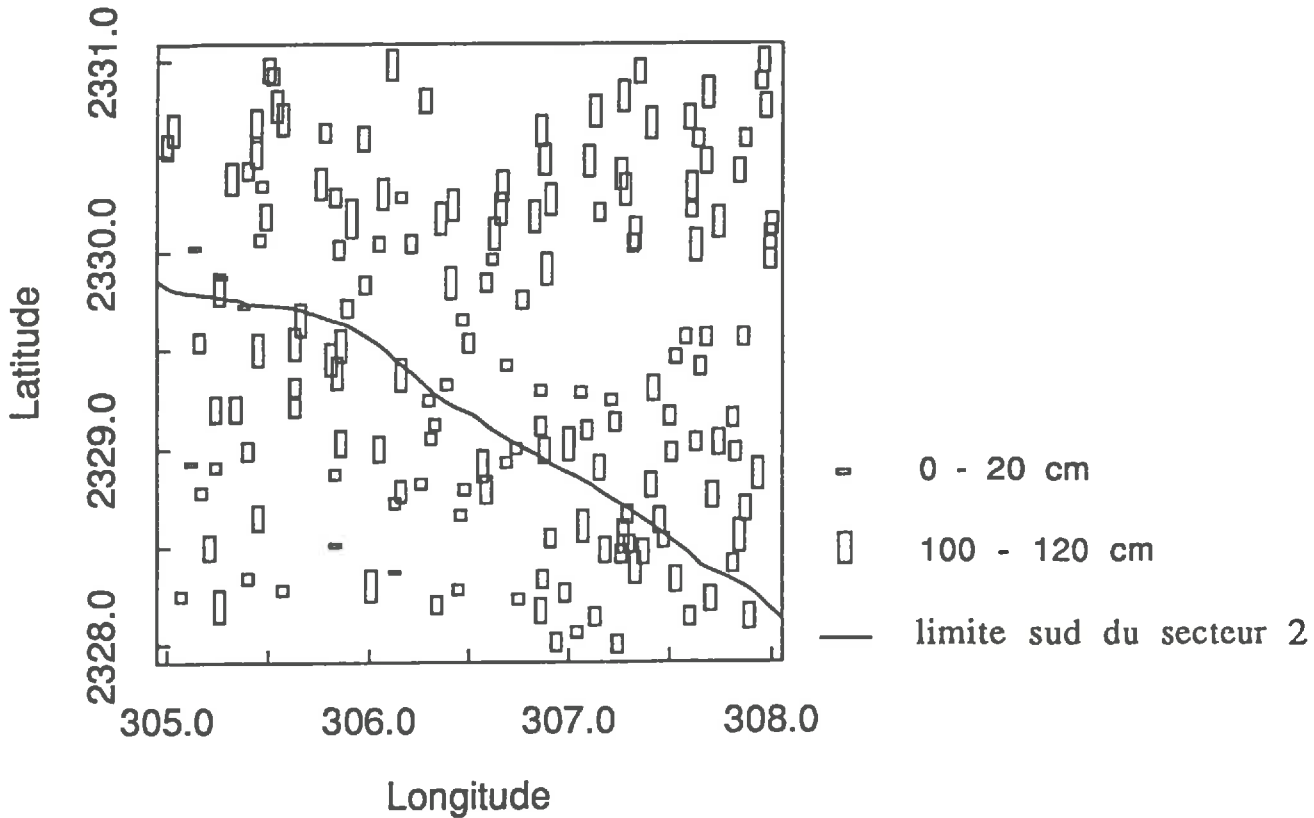


Figure II.6: Report des valeurs de profondeur du sol dans l'espace géographique  
 La hauteur du rectangle est proportionnelle à la valeur de profondeur du sol.

Néanmoins, rappelons en premier lieu que l'estimation en un point par krigeage se fait à partir d'un nombre limité de voisins; cette hypothèse intrinsèque n'a donc besoin d'être vérifiée que localement. D'autre part, il existe un certain nombre de méthodes associées au krigeage qui permettent de traiter les cas où l'hypothèse intrinsèque n'est pas vérifiée (Gascuel, 1984; Webster, 1985). Il n'y a donc pas d'obstacle conceptuel majeur interdisant a priori l'emploi des techniques géostatistiques pour cette variable de profondeur du sol décrite sur un secteur de plusieurs milliers d'hectares.

En résumé, l'analyse des histogrammes permet de cerner l'échelle de variabilité de la profondeur du sol sur les deux secteurs étudiés. Le report dans l'espace géographique permet une analyse qualitative de la structure spatiale de la variable (existence de grandes tendances, variations importantes à courte distance). Il apparaît clairement la nécessité de décrire plus finement cette structure spatiale à travers le calcul du variogramme.

### 2.3 Description de la structure spatiale par le variogramme

On a vu que l'estimation du variogramme se fait suivant la relation:

$$\gamma(h) = 1/(2m) \sum_{i=1}^m [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

où:  $z(x_i)$  est la valeur de la propriété  $Z$  au point  $i$  défini par ses coordonnées  $x_i$   
 $m$  est le nombre de couples de points distants d'une distance  $h$ .

La mise en oeuvre pratique de cette relation consiste à choisir un pas de calcul  $h_0$  et à calculer  $\gamma(h_0)$ ,  $\gamma(2h_0)$ ,  $\gamma(3h_0)$ , .....,  $\gamma(nh_0)$ .

Dans le cas d'un échantillonnage irrégulier, ce calcul suppose d'accepter une certaine tolérance dans le choix des couples de points par rapport à une distance  $h$ . Cette tolérance est définie de façon classique comme égale à la moitié du pas de calcul. Pour un pas de 100 mètres, le calcul de  $\gamma(h)$  pour une distance  $h$  de 400 mètres, ne prendra pas en compte uniquement les points distants exactement de 400 mètres, mais l'ensemble des points distants de 350 à 450 mètres.

Le calcul du variogramme suppose ainsi en premier lieu le choix d'un pas de calcul: si ce pas est très court, le nombre de couples de points permettant le calcul du variogramme pour un pas donné, sera généralement faible et de plus très irrégulier; cela risque de se traduire par un variogramme très irrégulier. Si le pas de calcul est grand, le calcul prend en compte un grand nombre de couples de points, mais avec une grande tolérance concernant la distance séparant les points; il s'en suit un risque de lissage excessif du variogramme et le danger de ne pas détecter certaines structures spatiales.

Nous avons calculé le variogramme de la profondeur du sol pour des pas de 50, 100 et 200 mètres. Il est apparu que l'allure générale des variogrammes n'était pas affecté par ce choix, mais que le pas de 50 mètres induisait un nombre très irrégulier de couples de points et un aspect plus chaotique du variogramme. Un pas de 100 mètres est apparu comme le pas le plus approprié pour à la fois régulariser le nombre de couples de points et éviter un trop grand lissage.

### 2.3.1 L'analyse des variogrammes moyens

Le tableau II.2 indique, pour les deux secteurs, le nombre de couples ayant servi à l'estimation des variogrammes moyens expérimentaux pour un pas de 100 mètres. Ce nombre augmente jusqu'à une distance de 2000 mètres puis décroît à partir de 5000 mètres sur le secteur 1 et à partir de 3000 mètres sur le secteur 2. Dans tous les cas, ce nombre est important puisque l'on recommande un nombre supérieur à 50 pour avoir une bonne précision (Journel et Huijbreghts, 1978). Néanmoins, cette variation du nombre de couples implique une précision a priori plus faible du variogramme pour les courtes distances que pour les distances supérieures au kilomètre.

Numéro du pas	SECTEUR 1		SECTEUR 2	
	Distance moyenne (m)	Nombre de couples	Distance moyenne (m)	Nombre de couples
1	114	745	114	224
2	204	1666	202	526
3	303	2409	301	734
4	402	3077	401	933
5	501	3737	500	1048
10	1001	6577	1000	1750
15	1500	8874	1499	2117
20	2000	10760	2000	2370
25	2500	12384	2500	2505
30	3000	13366	3000	2335
40	4000	13206	3999	1471
50	5000	11873	-	-
60	5999	9470	-	-
70	7000	6348	-	-
80	8000	3722	-	-

Tableau II.2: Nombre de couples et distance moyenne entre ces couples pour différentes distances des variogrammes de la profondeur du sol des secteurs 1 et 2. Le pas de calcul est de 100 m.



La figure II.7 représente les variogrammes moyens de la profondeur du sol, qui possèdent les caractéristiques suivantes:

- pour le secteur 1

Le variogramme est croissant jusqu'à une distance de 1.8 km où il atteint un palier de 450 cm<sup>2</sup>. L'effet de pépite de l'ordre de 350 cm<sup>2</sup> est important puisqu'il représente 78 % de la valeur atteinte au palier. A partir de 2.2 km, on constate un léger infléchissement du variogramme et à nouveau une augmentation à partir de 4 km.

- pour le secteur 2

Le variogramme présente un aspect plus chahuté, néanmoins sa forme est analogue à celui du secteur 1 à savoir: une croissance jusqu'à une distance de l'ordre du kilomètre vers un palier de 380 cm<sup>2</sup>; un effet de pépite de 300 cm<sup>2</sup> représentant 79 % de la valeur du palier; enfin une décroissance à partir de 2.2 km.

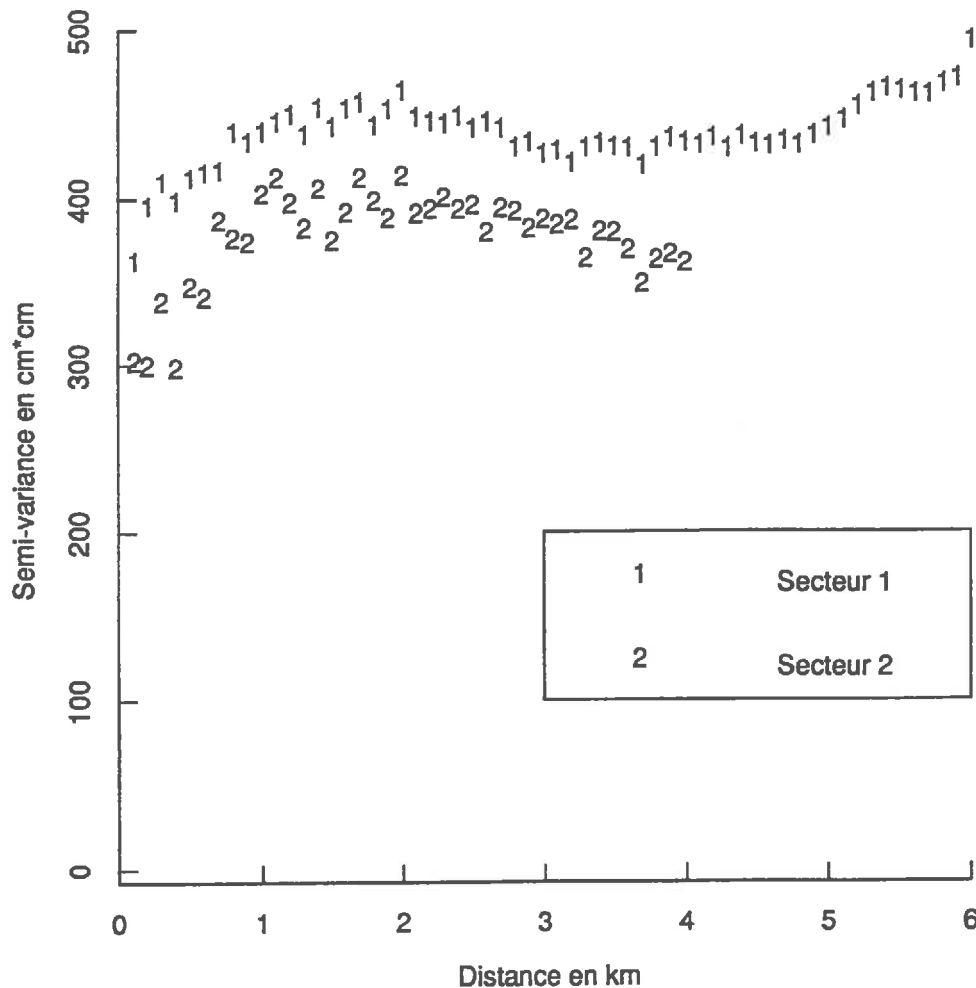


Figure II.7: Variogrammes moyens de la profondeur du sol sur les secteurs 1 et 2

Le variogramme moyen analyse la structure spatiale d'une variable sans tenir compte de la direction séparant les points d'observation: on suppose ainsi de façon implicite une variation isotrope de la variable étudiée. L'orientation préférentielle est-ouest des plages des cartes géologique et pédologique incite à rechercher une éventuelle anisotropie dans la variabilité de la profondeur du sol. Cela est permis par le calcul des variogrammes directionnels, basés sur les couples de points orientés suivant une direction donnée.

### 2.3.2 L'analyse des variogrammes directionnels

#### a) Variogrammes directionnels du secteur 1

La figure II.8 représente les variogrammes directionnels du secteur 1: les variogrammes sont calculés dans 8 classes de direction de 22.5 ° de largeur angulaire, jusqu'à une distance de 7 kilomètres.

Jusqu'à une distance de 2 km environ, les variogrammes sont croissants dans les huit directions. Les relations d'ordre entre les différentes directions sont peu régulières, mais les valeurs dans les directions 4 et 5 sont généralement plus faibles que dans les directions 1 et 8.

A partir de 3 km, l'anisotropie apparait beaucoup plus clairement: Les variogrammes sont croissants dans les directions 4, 5, 6 et 7, c'est-dire dans les directions proches d'une orientation (sud-ouest / nord-est); il sont stables voire décroissants dans les directions 1, 2 et 3, c'est-à-dire suivant une orientation générale (nord-ouest / sud-est).

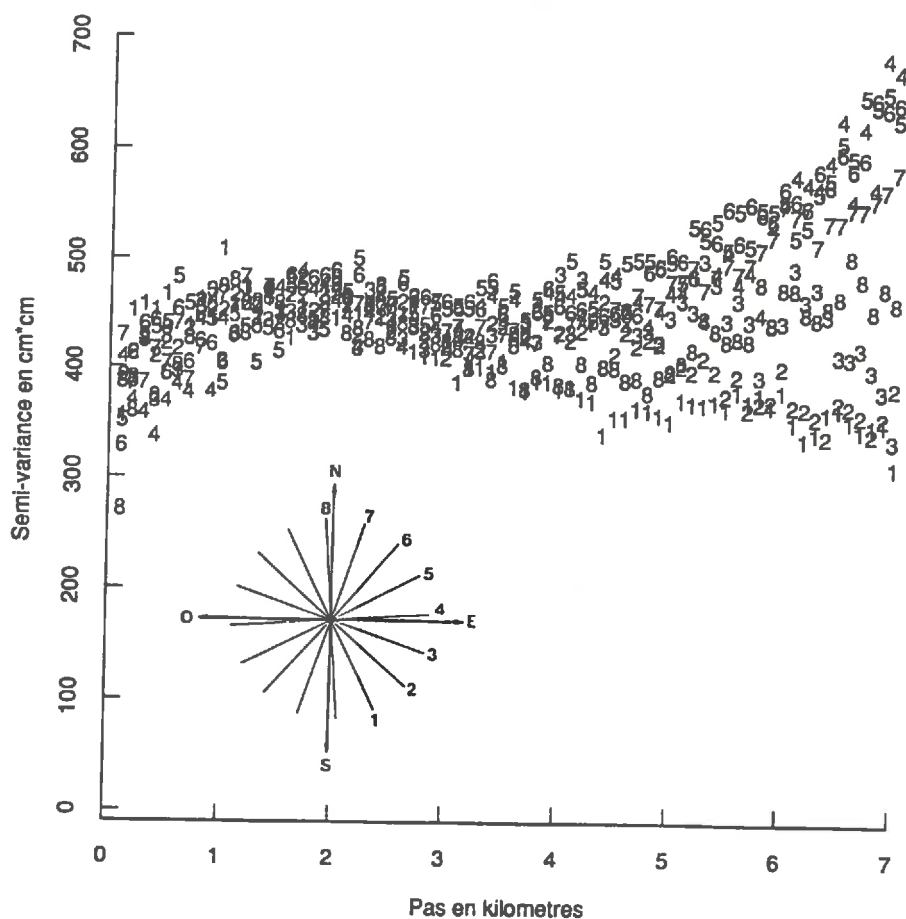


Figure II.8: Variogrammes directionnels de la profondeur du sol du secteur 1

#### b) Variogrammes directionnels du secteur 2.

Comme précédemment, on calcule pour le secteur 2 les variogrammes directionnels en 8 classes de directions jusqu'à une distance de 3 km (Fig. II.9).

Jusqu'à un kilomètre, les variogrammes sont croissants mais chahutés. Une relation d'ordre entre les différentes directions est difficile à établir. L'interprétation visuelle de cette partie des variogrammes est de plus rendue délicate en raison du nombre de couples permettant l'estimation de la semi-variance : celui est en effet relativement faible (entre 42 et 235) et variable d'une direction à l'autre. On ne décèle pas ainsi d'anisotropie nette.

A partir d'un kilomètre, les variogrammes atteignent un palier mais avec des valeurs plus faibles dans les directions 3 et 4 que dans les directions 6, 7 et 8. La variabilité de la profondeur du sol est donc plus importante suivant une orientation générale (sud-ouest / nord-est) que suivant une orientation (sud-est / nord-ouest). On note la concordance avec la direction préférentielle des plages cartographiques de ce secteur.

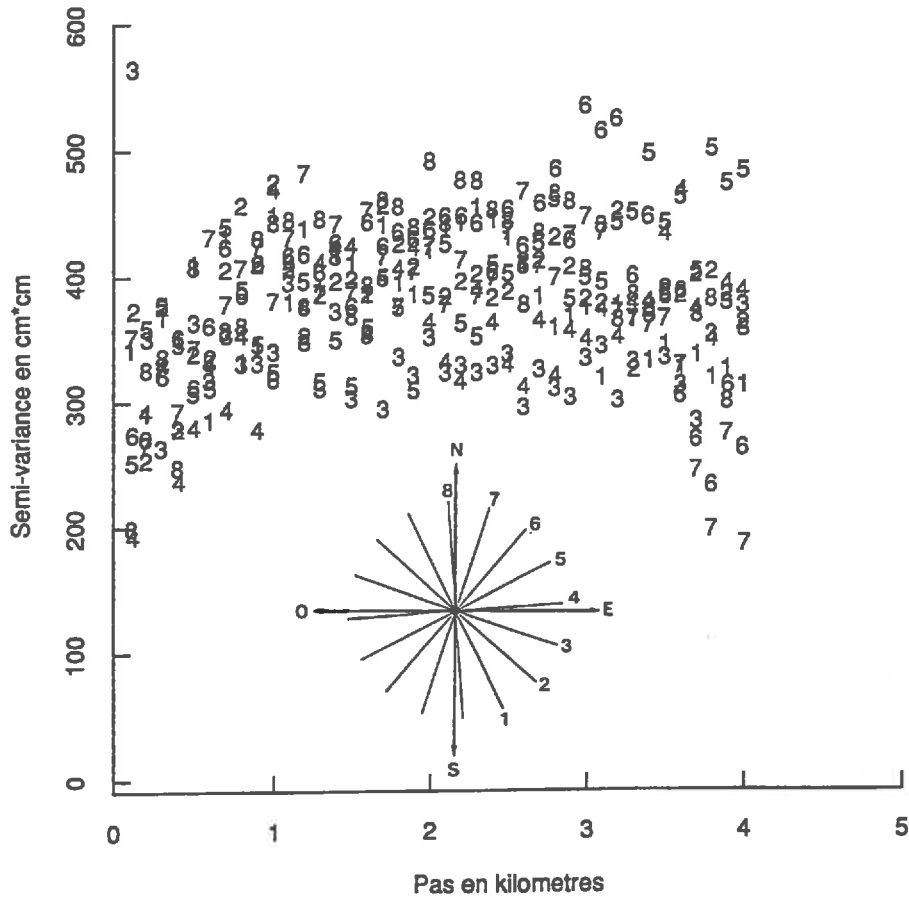


Figure II.9 : Variogrammes directionnels de la profondeur du sol du secteur 2.

### Conclusion sur l'analyse des variogrammes moyens et directionnels:

L'observation visuelle des variogrammes moyens et directionnels de la profondeur du sol sur les secteurs 1 et 2 amène à quatre constats principaux:

- le variogramme du secteur 2 est toujours inférieur à celui du secteur 1 ce qui indique que la délimitation du secteur 2 a induit une variabilité spatiale moindre de la profondeur du sol (Fig. II.7);
- l'effet pépète est important dans tous les cas et représente de l'ordre de 80 % de la valeur du palier atteint à une distance de 1 à 2 km;
- l'existence de ce palier prouve qu'il y a une dépendance spatiale des mesures de profondeur du sol pour une distance inférieure à 1.5 kilomètre environ (Fig.II.7);
- les variogrammes directionnels montrent une anisotropie de la répartition spatiale de la variable au delà du kilomètre (Fig. II.8 et II.9)

Ce type de résultat montre l'intérêt du calcul du variogramme pour décrire la structure spatiale d'une variable.

## 2.4 L'ajustement d'un modèle au variogramme pour le krigeage linéaire

On a vu précédemment que l'emploi du krigeage supposait d'ajuster un modèle autorisé au variogramme pour intégrer dans l'estimation par krigeage, les informations concernant la structure spatiale de la variable apportées par le variogramme.

### 2.4.1 Les fonctions d'ajustement possibles

Le type de fonction qu'on cherche à ajuster au variogramme est guidé par l'analyse visuelle de celui-ci. La liste des fonctions envisageables dans le cas isotrope est longue (Delhomme, 1976) et nous citerons parmi les plus courantes:

- le modèle linéaire:  $\gamma(\mathbf{h}) = c_0 + p \mathbf{h}$  où  $c_0$  est la pépité et  $p$  la pente
- le modèle sphérique:  $\begin{cases} \gamma(\mathbf{h}) = c_0 + c [ 1.5 (h/a) - 0.5 (h/a)^3 ] & \text{si } h \leq a \\ \gamma(\mathbf{h}) = c_0 + c & \text{si } h > a \end{cases}$   
où:  $c_0$  est la pépité,  $c$  le palier moins la pépité et  $a$  la portée
- le modèle exponentiel:  $\gamma(\mathbf{h}) = c_0 + c [ 1 - \exp(-h/r) ]$   
où:  $c_0$  est la pépité,  $c$  le palier moins la pépité et  $r$  un paramètre de distance correspondant environ au tiers de la portée.

La profondeur du sol semble avoir une répartition spatiale anisotrope, ce qui peut être contraire à l'hypothèse intrinsèque (§ 1.1.1). Une démarche classique pour remédier à un tel phénomène, consiste à ajuster une dérive (un plan ou une surface courbe) aux données expérimentales puis à faire l'analyse géostatistique sur les résidus par rapport à cet ajustement. On espère ainsi extraire une anisotropie artificielle du champ de données, dûe à la dérive, et obtenir des résidus satisfaisant alors à l'hypothèse intrinsèque. Cette méthode a été utilisée avec succès par Beucher-Darricau (1981) et Gascuel (1984).

Dans notre cas, cette démarche n'a pas apporté de résultat satisfaisant car le champ de données présente un aspect trop chaotique. Nous avons de ce fait adopté une autre méthode proposée par Burgess et Webster (1980a) puis modifiée par Burgess et al. (1981). Cette méthode consiste à ajuster des modèles anisotropes aux variogrammes directionnels. Elle tient compte des variogrammes directionnels et cherche à ajuster une fonction dépendant non seulement de la distance séparant les points, mais également de la direction.

Considérons l'exemple du modèle linéaire anisotrope schématisé par la figure II.10 et dont la définition est d'après Webster (1985):

$$\begin{cases} \Omega(\theta) = [P_{\max}^2 \cos^2(\theta - \phi) + P_{\min}^2 \sin^2(\theta - \phi)]^{0.5} \\ \gamma(\mathbf{h}, \theta) = c_0 + \Omega(\theta) \mathbf{h} \end{cases} \quad (12)$$

où:  $h$  est la distance séparant les points et  $\theta$  la direction.

L'ajustement d'un tel modèle aux variogrammes directionnels suppose la définition de quatre paramètres qui sont:  $\phi$ ,  $P_{\max}$ ,  $P_{\min}$  et  $c_0$ .

Le premier paramètre à définir est l'angle  $\phi$  qui correspond à la direction de variation maximale.

Lorsque la direction  $\theta$  est égale à  $\phi$ ,  $\gamma(\mathbf{h}, \theta)$  prend sa valeur maximale puisque le système d'équations (12) devient:

$$\gamma(\mathbf{h}) = c_0 + P_{\max} \cdot \mathbf{h} \quad (13)$$

où:  $P_{\max}$  est la pente maximale du modèle linéaire dans la direction  $\phi$ .

$c_0$  est la valeur de la pépité

Lorsque la direction  $\theta$  est égale à  $(\phi + \pi/2)$ ,  $\gamma(\mathbf{h}, \theta)$  prend sa valeur minimale puisque le système d'équations (12) s'écrit dans ce cas:

$$\gamma(\mathbf{h}) = c_0 + P_{\min} \cdot \mathbf{h} \quad (14)$$

où:  $P_{\min}$  est la pente minimale du modèle linéaire dans la direction  $(\phi + \pi/2)$

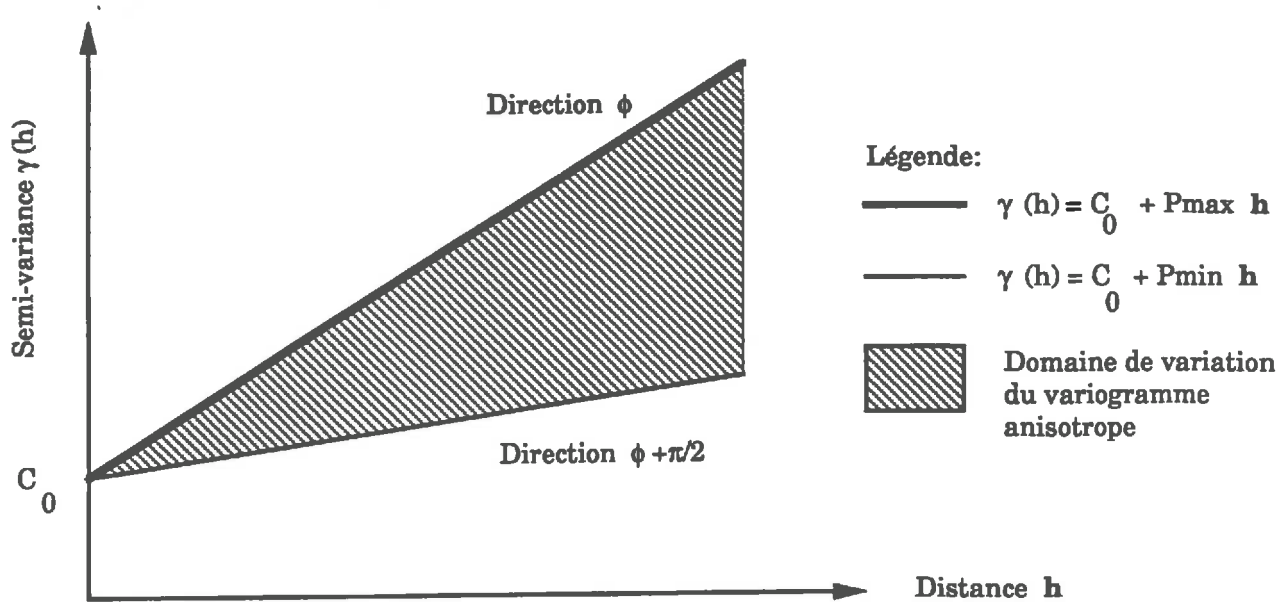


Figure II.10: Schématisation d'un modèle linéaire anisotrope.

La fonction  $\gamma(h, \theta)$  varie donc entre sa valeur maximale dans la direction  $\phi$  et sa valeur minimale dans la direction  $(\phi + \pi/2)$ . Cela se traduira dans le processus de krigeage par un poids fort accordé aux observations situées dans une direction  $(\phi + \pi/2)$  par rapport au point à estimer et un poids plus faible accordé aux observations situées dans une direction  $\phi$ .

Une démarche analogue peut être adoptée pour ajuster aux variogrammes directionnels des modèles exponentiels anisotropes ou des modèles sphériques anisotropes.

### 2.4.2 Comment choisir le meilleur ajustement ?

Le choix du meilleur ajustement en vue du krigeage peut se faire de deux façons:

- soit on retient la fonction qui s'ajuste le mieux aux points expérimentaux du variogramme (Webster, 1985). Pour cela, on calcule les écarts entre les points expérimentaux du variogramme et la fonction d'ajustement. L'importance de ces écarts peut être quantifiée par exemple par leur moyenne quadratique.
- soit on retient la fonction qui donne les meilleurs résultats dans un test de validation croisée (Gascuel, 1984; Voltz, 1986). Pour cela, on enlève à tour de rôle un point de l'ensemble des observations et on estime par krigeage la valeur en ce point à partir des observations restantes. On vérifie qu'en moyenne les estimations par krigeage sont proches des valeurs réelles et que la variance d'estimation calculée ne présente pas de biais.

Quand les conditions d'application de la théorie des variables régionalisées sont vérifiées, ces deux méthodes aboutissent au même choix d'ajustement. En pratique, ces conditions ne sont pas toujours pleinement vérifiées et la mise en oeuvre du krigeage implique des choix, autres que l'ajustement du variogramme (nombre de voisins, ...), inférant également sur les estimations: les deux méthodes risquent donc de préconiser des ajustements différents.

### 2.4.3 Résultats

L'estimation par krigeage se fait généralement en prenant un nombre limité (de 8 à 20) de voisins. On va donc chercher un ajustement optimal pour les faibles distances du variogramme, à savoir jusqu'à 3 km sur le secteur 1 et jusqu'à 2 km sur le secteur 2. L'ajustement de modèles a été fait soit de façon manuelle en observant le variogramme, soit de façon automatique par la "méthode du maximum de vraisemblance" grâce au logiciel MLP (Ross, 1980, Webster, 1985). Cette méthode d'ajustement automatique, malgré les critiques formulées (Journel et Huijbregts, 1978), présente l'avantage de tenir compte du nombre de couples de points ayant servi à estimer la semi-variance.

Les tableaux II.3 et II.4 présentent les valeurs des paramètres de différents ajustements aux variogrammes des secteurs 1 et 2.

Dans ce même tableau, des critères statistiques permettent d'une part de juger de la qualité d'un ajustement par rapport au variogramme expérimental (critère RMS), d'autre part de synthétiser les résultats du test de validation croisée (critères  $M(Z-Z^*)$  et  $MS[(Z-Z^*)/s^*]$ ).

Au vu de ces tableaux, on peut faire les remarques suivantes:

- de façon générale, quel que soit le modèle envisagé, les résultats du test de validation croisée montrent une bonne reconnaissance par krigeage des valeurs observées et un calcul non biaisé de la variance d'estimation.
- dans tous les cas, les modèles linéaires fournissent des résultats moins bons que les modèles sphériques ou exponentiels.
- l'intérêt des modèles anisotropes apparaît pour le secteur 2 pour lequel les meilleurs ajustements sont obtenus avec des modèles de ce type. Ces modèles peuvent être représentés sur les variogrammes directionnels en traçant leur courbe enveloppe, c'est-à-dire les deux fonctions obtenues dans les directions de variation maximale et minimale (Fig. II.11).

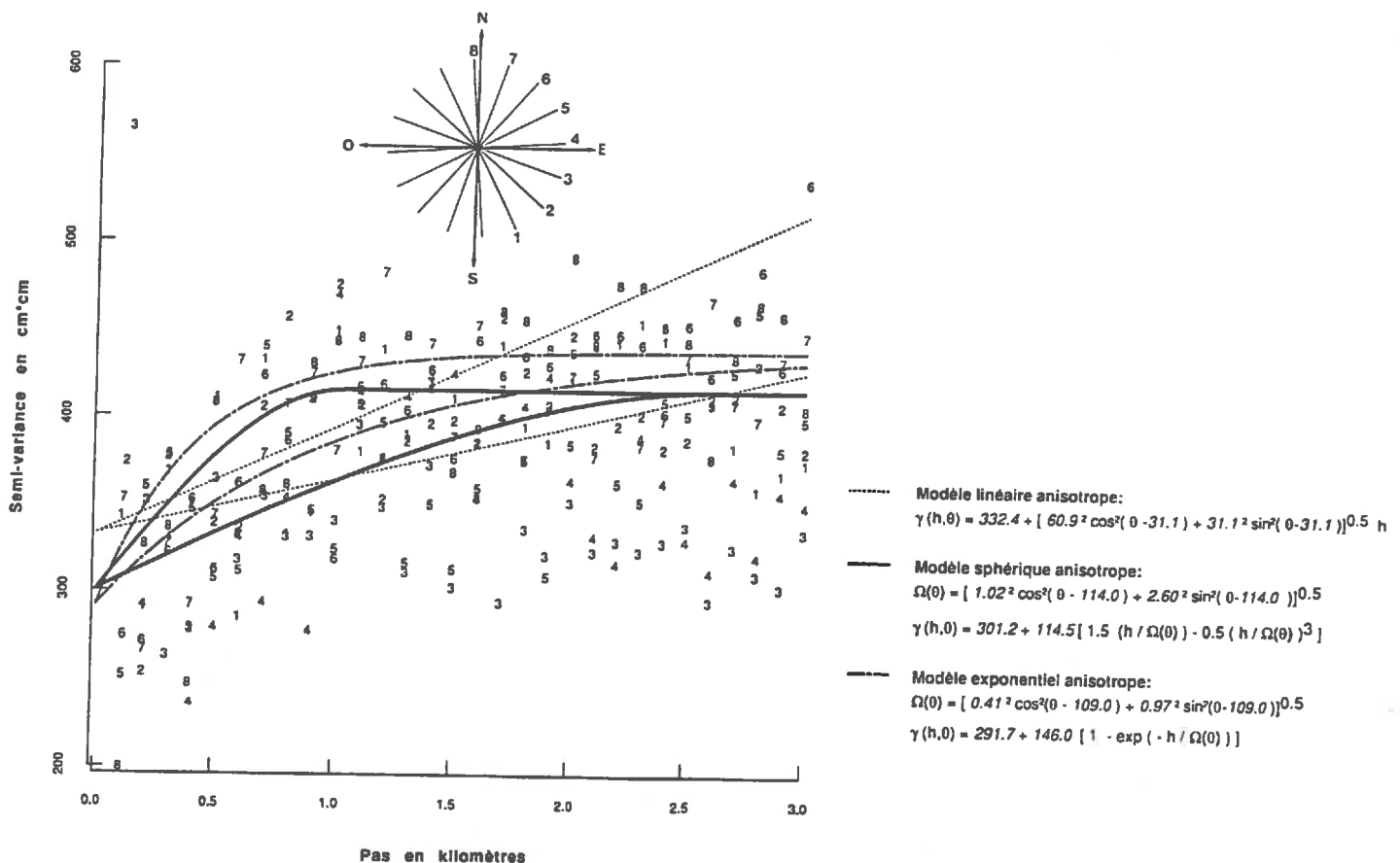


Figure II.11 : Ajustement de modèles anisotropes aux variogrammes directionnels du secteur 2. On représente l'enveloppe des modèles anisotropes.

Type de modèle	Mode d'ajust.	Définition du modèle	Paramètres du modèle	Qualité de l'ajustement	Test de validation croisée M(Z-Z*) MS[(Z-Z*)/s*]
(01) Sphérique isotrope	Manuel	$\gamma(h)=c_0+c[1.5h/a-0.5(h/a)^3]$	$c_0=350$ $a=1.0$ $c=100$	-	0.21 1.07
(02) Exponentiel isotrope	Manuel	$\gamma(h)=c_0+c(1-\exp(-h/r))$	$c_0=300$ $r=0.3$ $c=150$	-	0.18 1.13
(03) Exponentiel isotrope	MLP	$\gamma(h)=c_0+c(1-\exp(-h/r))$	$c_0=366.1$ $r=0.74$ $c=96.9$	RMS=33.2	0.11 1.17
(04) Sphérique anisotrope	MLP	$\Omega(\theta)=[G_{max}^2\cos^2(\theta-\phi)+G_{min}^2\sin^2(\theta-\phi)]^{0.5}$ $\gamma(h,\theta)=c_0+c[1.5h/\Omega(\theta)-0.5(h/\Omega(\theta))^3]$	$c_0=378.3$ $G_{min}=2.12$ $G_{max}=1.11$ $c=76.3$ $\phi=-34^\circ$	RMS=38.6	-0.009 0.99
(05) Exponentiel anisotrope	MLP	$\Omega(\theta)=[G_{max}^2\cos^2(\theta-\phi)+G_{min}^2\sin^2(\theta-\phi)]^{0.5}$ $\gamma(h,\theta)=c_0+c[1-\exp(-h/\Omega(\theta))]$	$c_0=361.5$ $G_{max}=0.5$ $G_{min}=0.76$ $c=99.3$ $\phi=-33.2^\circ$	RMS=40.0	-0.020 0.97

**Tableau II.3** : Ajustement de modèles au variogramme de la profondeur du sol du secteur 1  
Qualité des ajustements et résultats des tests de validation croisée pour différents modèles ajustés manuellement ou automatiquement jusqu'à une distance de 3 km.

Type de modèle	Mode d'ajust.	Définition du modèle	Paramètres du modèle	Qualité de l'ajustement	Test de validation croisée M(Z-Z*) MS[(Z-Z*)/s*]
(06) Linéaire isotrope	MLP	$\gamma(h)=c_0+ph$	$c_0=332.8$ $p=43.2$	RMS=34.5	0.280 0.92
(07) Sphérique isotrope	MLP	$\gamma(h)=c_0+c[1.5h/a-0.5(h/a)^3]$	$c_0=265.9$ $a=1.20$ $c=131.9$	RMS=31.1	0.221 1.05
(08) Exponentiel isotrope	Manuel	$\gamma(h)=c_0+c(1-\exp(-h/r))$	$c_0=250$ $r=0.3$ $c=150$	-	0.157 0.98
(09) Exponentiel isotrope	MLP	$\gamma(h)=c_0+c(1-\exp(-h/r))$	$c_0=238.9$ $r=0.453$ $c=131.9$	RMS=33.2	0.187 1.10
(10) Linéaire anisotrope	MLP	$\Pi(\theta)=[P_{max}^2\cos^2(\theta-\phi)+P_{min}^2\sin^2(\theta-\phi)]^{0.5}$ $\gamma(h,\theta)=c_0+\Pi(\theta)h$	$c_0=332.4$ $P_{max}=60.9$ $P_{min}=31.1$ $\phi=31.1^\circ$	RMS=30.8	- -
(11) Sphérique anisotrope	MLP	$\Omega(\theta)=[G_{max}^2\cos^2(\theta-\phi)+G_{min}^2\sin^2(\theta-\phi)]^{0.5}$ $\gamma(h,\theta)=c_0+c[1.5h/\Omega(\theta)-0.5(h/\Omega(\theta))^3]$	$c_0=301.2$ $G_{max}=1.02$ $G_{min}=2.60$ $c=114.5$ $\phi=114.0^\circ$	RMS=29.6	0.259 0.97
(12) Exponentiel anisotrope	MLP	$\Omega(\theta)=[G_{max}^2\cos^2(\theta-\phi)+G_{min}^2\sin^2(\theta-\phi)]^{0.5}$ $\gamma(h,\theta)=c_0+c[1-\exp(-h/\Omega(\theta))]$	$c_0=291.7$ $G_{max}=0.41$ $G_{min}=0.97$ $c=146.0$ $\phi=109.0^\circ$	RMS=29.8	0.237 0.95

**Tableau II.4** : Ajustement de modèles au variogramme de la profondeur du sol du secteur 2  
Qualité des ajustements et résultats des tests de validation croisée pour différents modèles ajustés manuellement ou automatiquement jusqu'à une distance de 2 km.

**Légende des tableaux II.3 et II.4:**

**MLP** : ajustement automatique de modèles au variogramme (Maximum Likelihood Program de Ross, 1980)  
 $c_0$  et  $c$  correspondent à la pépité et à la valeur (palier-pépité) en  $cm^2$  -  $p$  est la pente d'un modèle linéaire en  $cm^2/km$  -  $a$  est la portée d'un modèle sphérique isotrope en  $km$  -  $r$  est le paramètre de distance d'un modèle exponentiel (environ le tiers de la portée) en  $km$ .  
 $\phi$  est la direction en degrés de variation maximale dans le cas d'un modèle anisotrope -  $P_{max}$  est la pente d'un modèle linéaire anisotrope dans la direction  $\phi$  et  $P_{min}$  la pente dans la direction  $(\phi+90^\circ)$  en  $cm^2/km$  -  $G_{max}$  est la portée ou le paramètre de distance dans la direction  $\phi$  et  $G_{min}$  dans la direction  $(\phi+90^\circ)$  pour des modèles sphérique ou exponentiel anisotropes (en  $km$ ).  
**RMS** est la moyenne quadratique des résidus de l'ajustement du modèle au variogramme (doit être proche de 0)  
**M(Z-Z\*)** est la moyenne des écarts en  $cm$  entre les valeurs réelles et estimées dans le test de validation croisée (doit être proche de 0).  
**MS[(Z-Z\*)/σ\*]** est la moyenne quadratique de l'écart entre la valeur réelle et estimée, divisée par l'écart-type d'estimation (doit être proche de 1)

Cette représentation montre que les modèles sphérique ou exponentiel anisotropes décrivent mieux les variogrammes directionnels que le modèle linéaire anisotrope. Ces deux modèles définissent une direction maximale de variation de l'ordre de  $110^\circ$  avec une portée d'1 km. La direction de variation minimale est de  $20^\circ$  avec une portée d'environ 2.6 km. Ainsi, l'ajustement automatique décèle une anisotropie au sein des variogrammes directionnels du secteur 2 pour de faibles distances, alors qu'une telle anisotropie était difficilement détectable par simple observation visuelle. Nous expliquons cela par la prise en compte lors de l'ajustement automatique du nombre de couples ayant servi au calcul de la semi-variance dans chaque direction.

- notons enfin qu'un modèle exponentiel isotrope (modèle 8 du secteur 2), défini par simple observation visuelle du variogramme moyen du secteur 2, fournit les meilleurs résultats du test de validation croisé.

*En conclusion, les critères retenus pour décrire la qualité des ajustements et les tests de validation croisée, permettent de faire un premier choix parmi les modèles a priori envisageables. Ils montrent qu'un modèle isotrope est préférable sur le secteur 1. Sur le secteur 2, les modèles sphérique ou exponentiel anisotropes constituent les meilleurs ajustements au variogramme. Par contre, un modèle exponentiel isotrope fournit les meilleurs résultats du test de validation croisé. Sur la base de ces résultats, nous préférons entreprendre le krigeage avec différents modèles à savoir le modèle exponentiel isotrope (3) issu du secteur 1 et les modèles exponentiel isotrope (8), sphérique anisotrope (11) et exponentiel anisotrope (12) issus du secteur 2.*

## 2.5 Les estimations par krigeage

Les estimations par krigeage ont été faites aux noeuds d'une grille régulière de pas 100 mètres, superposée au secteur 2.

### 2.5.1 Incidences sur les estimations du choix du modèle d'ajustement.

La figure II. 12 présente sous forme de blocs-diagrammes, les estimations de la profondeur du sol obtenues sur le secteur 2 en utilisant différents modèles ou un nombre variable de voisins dans l'estimation.

Les blocs-diagrammes apparaissent très similaires quel que soit le modèle utilisé. Seul le bloc diagramme B, obtenu en prenant en compte 20 voisins au lieu de 8 voisins habituellement, se distingue par son aspect plus lissé. Cette similarité des estimations est confirmée en comparant les estimations obtenues avec deux modèles différents (Fig. II.13). Les différences d'estimation ne dépassent jamais 5 cm, soit une différence négligeable par rapport à l'incertitude sur la mesure.

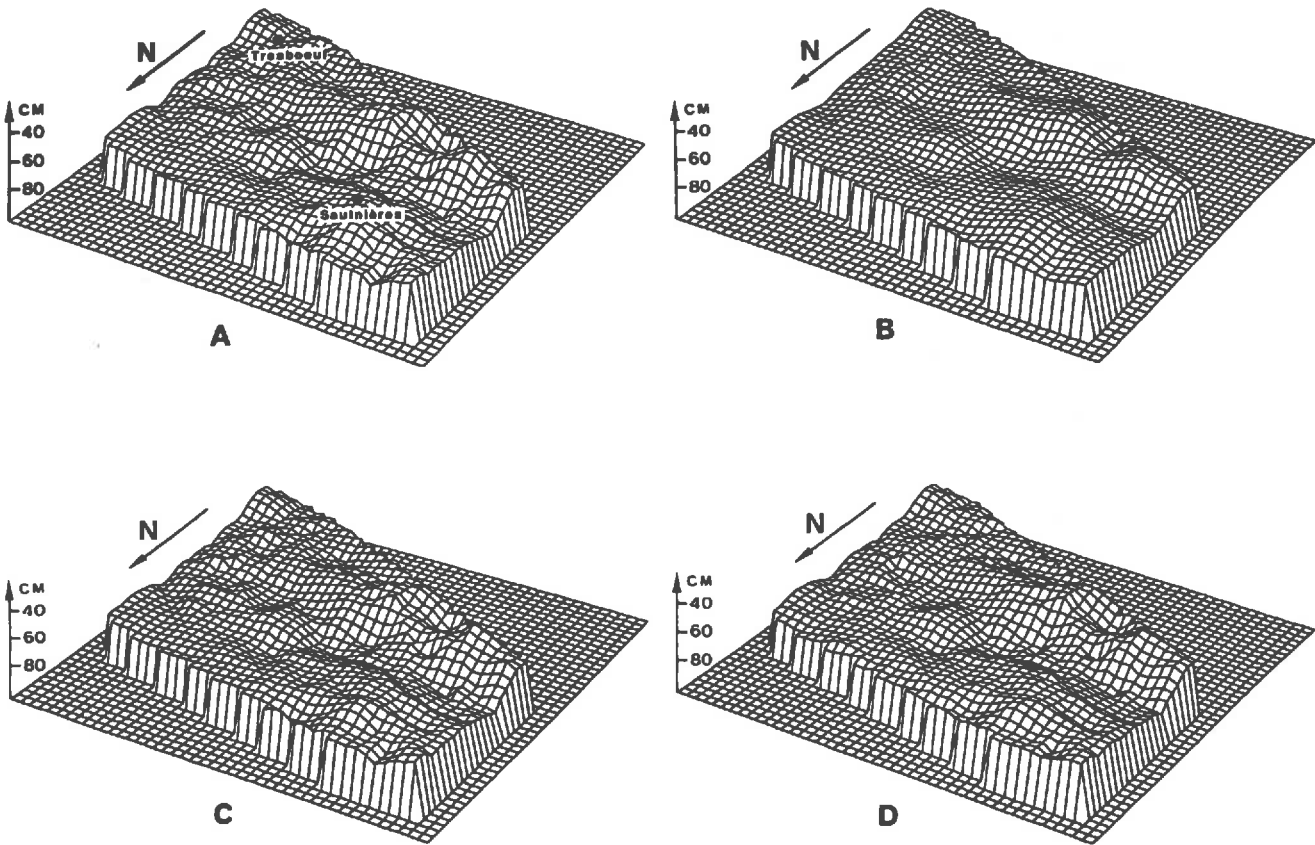
*Le choix du modèle de krigeage n'a donc dans notre cas que très peu d'influence sur les estimations obtenues.*

Cet état de fait est en premier lieu lié à l'importance de l'effet de pépète des variogrammes de la profondeur du sol, qui représente toujours plus de 70 % du palier. Les modèles testés sont certes différents mais leur pépète est toujours nécessairement du même ordre de grandeur. Avec un effet de pépète aussi important, les différences entre les modèles jouent très peu sur les poids affectés aux différents voisins d'un point à estimer.

Une autre raison tient au krigeage lui-même puisqu'il s'agit d'une méthode robuste, peu sensible au modèle d'ajustement du variogramme comme le signalent de nombreux auteurs (Yost et al., 1982; Trangmar et al., 1985; Voltz, 1986).

Si on s'attache aux écarts-type d'estimation, on constate en premier lieu que ceux-ci varient peu pour un même modèle sur l'ensemble du secteur 2, l'échelle de variation étant de l'ordre du centimètre. Les modèles isotropes ou anisotropes définis à partir du variogramme du secteur 2 fournissent des écarts-types d'estimation de l'ordre de 18 cm. Seul le modèle défini à partir du variogramme du secteur 1 se distingue réellement, l'écart-type d'estimation qu'il induit étant d'environ 22 cm.

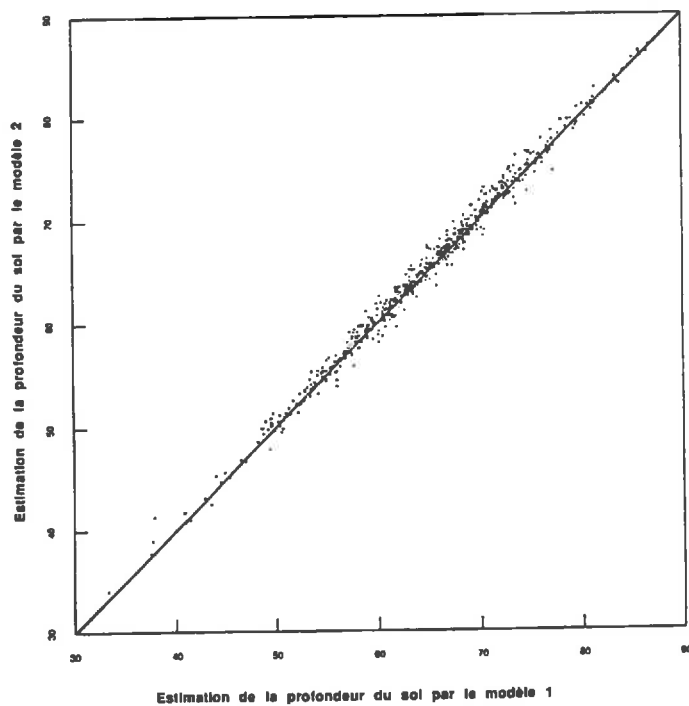




**Légende des blocs-diagrammes**

- A: Modèle exponentiel isotrope issu du secteur 2, 8 voisins  
*Modèle 8 du tableau II.4*
- B: Modèle exponentiel isotrope issu du secteur 2, 20 voisins  
*Modèle 8 du tableau II.4*
- C: Modèle sphérique anisotrope du secteur 2, 8 voisins  
*Modèle 11 du tableau II.4*
- D: Modèle exponentiel isotrope issu du secteur 1, 8 voisins  
*Modèle 3 du tableau II.3*

**Figure II.12:** Blocs-diagrammes des estimations par krigage de la profondeur du sol du secteur 2, avec différents modèles. Les blocs-diagrammes sont présentés à partir d'une vue nord-ouest.



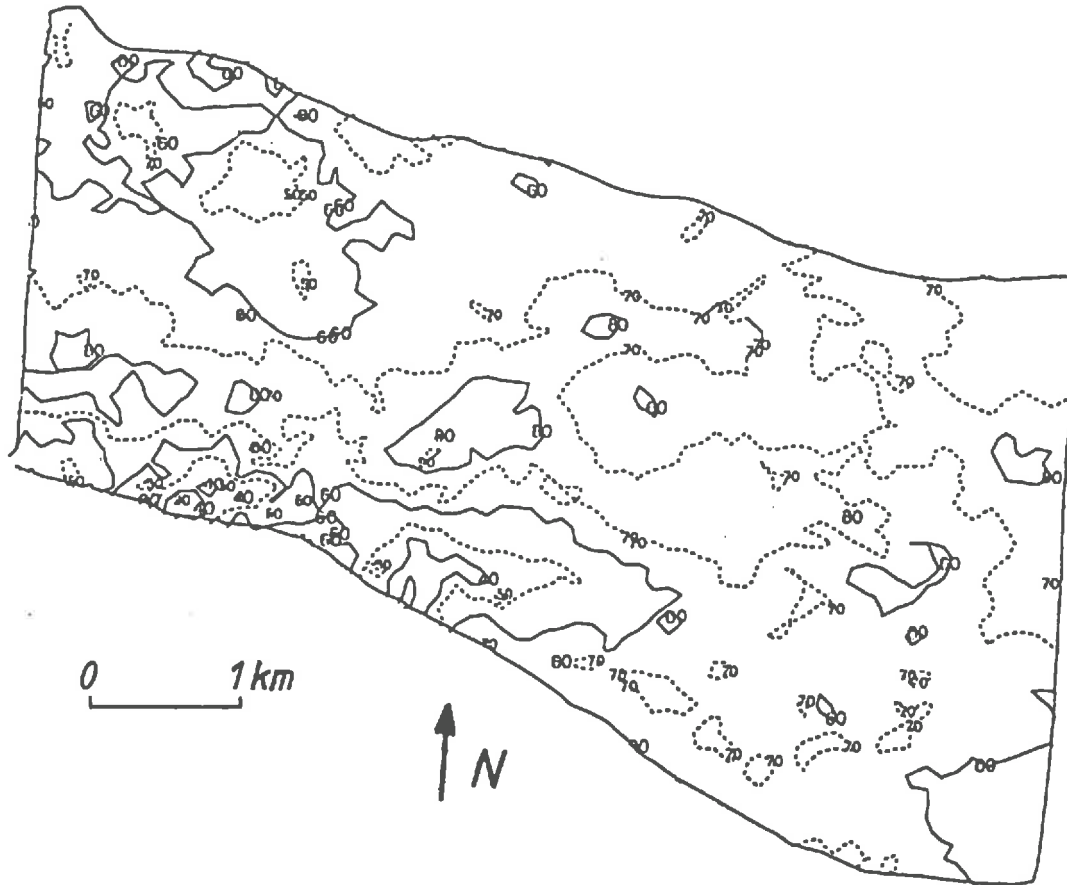
**Modèle 1:**  
 Modèle exponentiel anisotrope  
 issu du secteur 2.  
*Cf. Modèle 12 du Tableau II.4*

**Modèle 2:**  
 Modèle sphérique anisotrope  
 issu du secteur 2.  
*Cf. Modèle 11 du tableau II.4*

**Figure II.13:** Comparaison des estimations obtenues sur le secteur 2 avec 2 modèles de krigage

### 2.5.2 Signification des cartes obtenues par krigeage et intérêt d'un partitionnement de l'espace préalable au krigeage

Les estimations faites par krigeage aux noeuds d'une grille peuvent être visualisées soit sous forme de bloc-diagramme (Fig. II.12), soit sous forme de carte d'isovaleurs (Fig. II.14). L'observation de ces documents indique: (i) deux zones de sols peu profonds (entre 40 et 60 cm) situées aux limites nord-ouest et sud-ouest du secteur; (ii) une zone centrale où la profondeur du sol est plus importante (entre 70 et 80 cm). Globalement, ces zones correspondent aux traits topographique et de substrat majeurs du secteur: lignes de crête au nord et au sud avec un substrat de grès Armoricaïn ou schiste d'Angers, zone à topographie moins marquée en zone centrale avec un substrat de type grès schisteux ou schiste tendre.



**Figure II.14:** Carte en courbes d'isovaleurs de la profondeur du sol sur le secteur 2  
Carte obtenue par krigeage avec un modèle sphérique anisotrope (modèle 11 du tableau II.4)

La cartographie par krigeage permet ainsi de décrire les grandes tendances de variation de la profondeur du sol. Mais, dans tous les cas, les estimations de la profondeur du sol sont peu précises. Rappelons que l'écart-type d'estimation est toujours de l'ordre de 18 cm. Pour illustrer ce que représente une telle valeur, considérons une estimation par krigeage de la profondeur du sol de 70 cm, associée à un écart-type d'estimation de 18 cm. Dans ce cas, sous l'hypothèse gaussienne vraisemblablement simplificatrice mais permettant d'avoir un ordre de grandeur, la probabilité pour que la valeur réelle soit comprise entre 60 et 80 cm n'est alors que de 42 %.

Nous avons mené l'analyse géostatistique en partant d'une part d'un variogramme établi à partir de l'ensemble des données du secteur 1, en partant d'autre part des seules données du secteur 2. Rappelons que le secteur 2 a été délimité de telle sorte à isoler les seules observations effectuées sur le synclinorium de "Martigné-Ferchaud".

Ce partitionnement de l'espace préalable au krigeage n'entraîne pas de modifications significatives des estimations de la profondeur du sol. Par contre, l'intérêt d'une telle pratique est apparu à deux niveaux:

- à distance égale, les valeurs du variogramme du secteur 2 sont toujours plus faibles que celles du secteur 1. La variabilité spatiale de la profondeur du sol est donc moindre sur le secteur 2 que sur l'ensemble du secteur 1;
- l'écart-type d'estimation obtenu par krigeage est plus faible si on développe un modèle spécifique au secteur 2 et par conséquent les cartes sont plus précises.

On aurait pu envisager de développer ce type d'approche et de procéder à un partitionnement sur des critères plus fins, mais très vite on se heurte à un nombre trop faible de points pour le calcul du variogramme.

## Conclusion:

L'emploi du krigeage linéaire pour décrire la variabilité spatiale de la profondeur du sol sur un secteur de plusieurs milliers d'hectares, nous amène à trois types de conclusion:

- (1) *La variabilité spatiale de la profondeur du sol* est caractérisée par deux composantes principales. L'une est spatialement structurée et est caractérisée par une croissance du variogramme vers un palier atteint pour une distance de 2 km. L'autre apparaît aléatoire au pas d'échantillonnage de l'étude et représente environ 75 % de la valeur du palier (l'effet pépète). Cette variabilité importante présente à une distance inférieure à 100 mètres, induit l'obtention de cartes krigées peu précises.
- (2) *La prise en compte de la structure géologique du secteur* permet de réduire la variabilité spatiale de la profondeur du sol et permet l'obtention de cartes un peu plus précises.
- (3) *sur le plan méthodologique*, l'ajustement de modèles anisotropes au variogramme permet dans certains cas une description plus fine de celui-ci et fournit des renseignements sur la structure spatiale de la variable. Néanmoins, le krigeage est une méthode robuste, peu sensible à de légères différences des ajustements.

## 3. EMPLOI DU KRIGEAGE INDICATIF POUR LA CLASSE D'HYDROMORPHIE

Nous considérons à présent la classe d'hydromorphie. Cette variable n'est pas continue et par conséquent ne permet pas d'employer le krigeage linéaire. Nous avons donc adopté une méthode indépendante de la fonction de répartition de la variable, à savoir le krigeage indicatif.

### 3.1 Caractérisation générale de la variable

Les histogrammes de cette variable sur les secteurs 1 et 2 indiquent des distributions à plusieurs modes (Fig. II.15). Rappelons que la classe d'hydromorphie est une variable qualitative ordonnée, notée de 1 à 10 par niveau d'hydromorphie croissante (Tab. II.1).

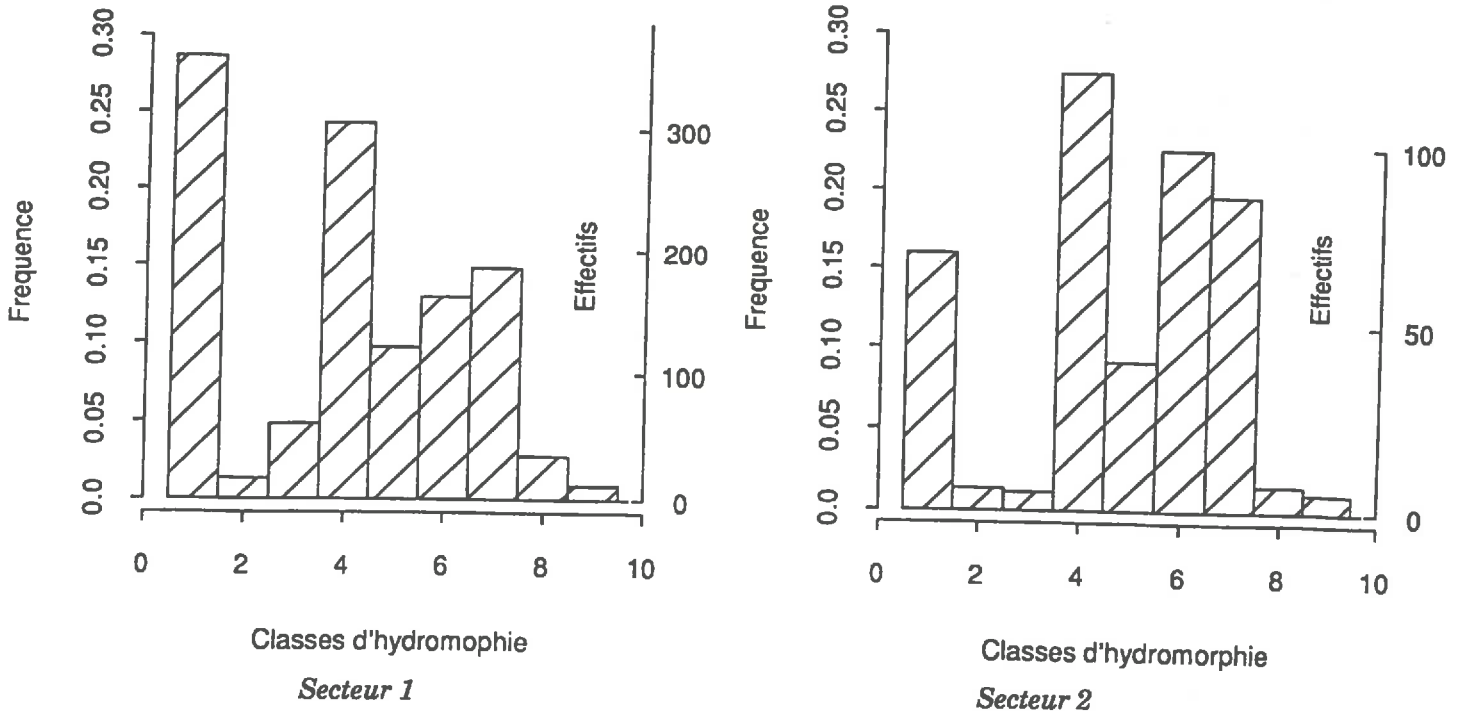


Figure II.15: Histogrammes de la classe d'hydromorphie sur les secteurs 1 et 2

Sur le secteur 1, la classe la plus fréquente est la classe 1 correspondant aux sols ne présentant pas de signe d'hydromorphie et représentant 29 % des observations. Deux autres modes sont observés pour les classes 4 (25 % des observations) et 7 (15 % des observations).

Sur le secteur 2, la classe la plus fréquente est la classe 4 (28 % des observations), deux autres modes étant situés aux classes 1 (16 %) et 6 (22 %).

La population de sondages du secteur 2 présente donc une proportion plus importante que celle du secteur 1, de sols présentant des indices d'hydromorphie.

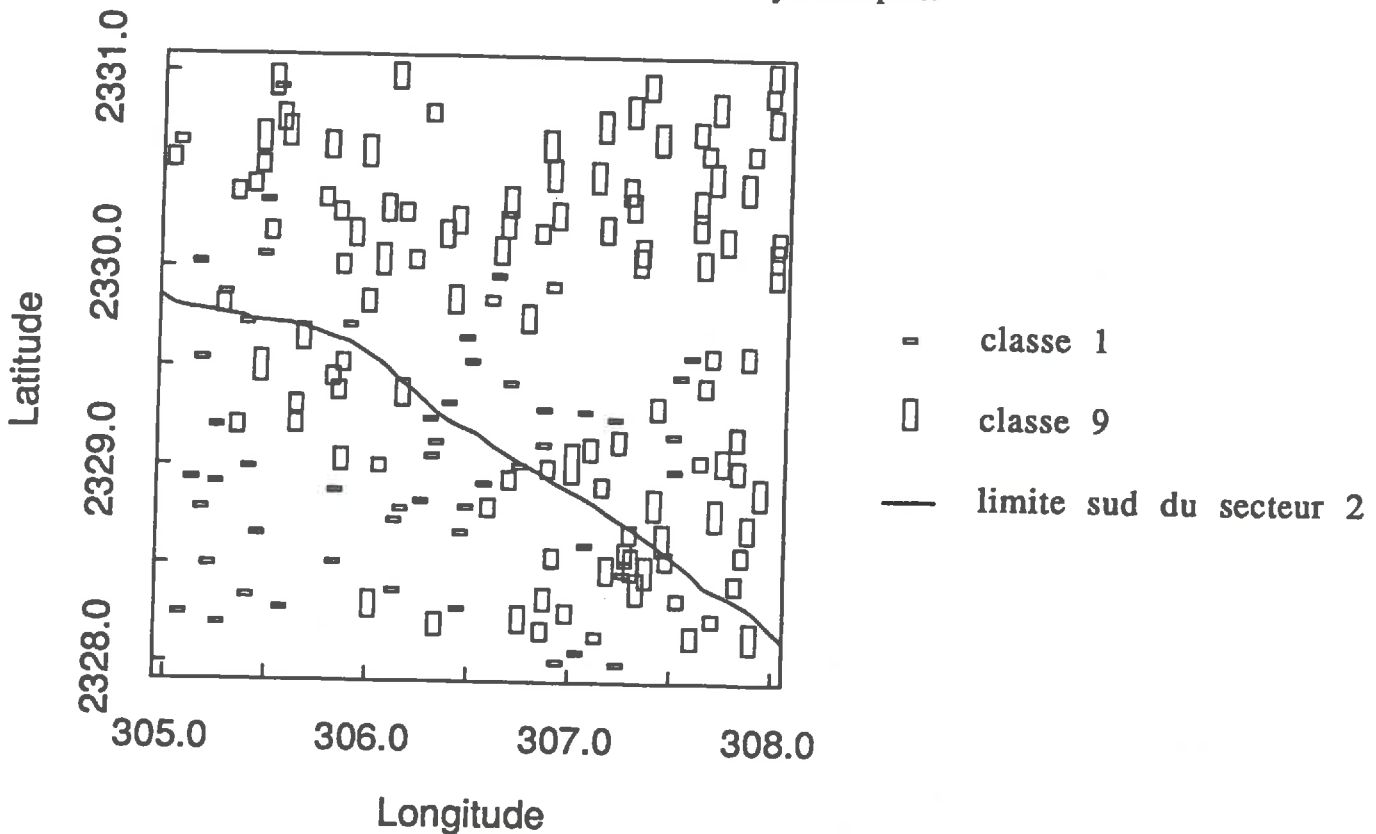


Figure II.16: Report des classes d'hydromorphie dans l'espace géographique  
La hauteur du rectangle est proportionnelle à la valeur de la classe d'hydromorphie.

La représentation dans l'espace géographique des classes d'hydromorphie (Fig. II.16) confirme en premier lieu ce caractère globalement plus hydromorphe du secteur 2. Elle montre ensuite l'existence de grandes tendances: dans la partie sud-ouest du domaine représenté, une grande majorité des observations ne présente pas d'indices d'hydromorphie, contrairement à sa partie nord.

Au sein des zones plus hydromorphes, la distribution spatiale des différentes classes d'hydromorphie apparaît peu ordonnée et une cartographie manuelle délimitant des unités de classe d'hydromorphie différente, semble difficile.

### 3.2 Analyse des variogrammes moyens des fonctions indicatrices.

Le krigeage indicatif suppose en premier lieu le choix d'un certain nombre de valeurs-seuil et la transformation de la variable étudiée en fonctions indicatrices.

Nous avons choisi 5 valeurs-seuil à partir des histogrammes de la classe d'hydromorphie afin de décrire les variations majeures de ces derniers:

valeur-seuil n° 1: la classe d'hydromorphie	1
valeur-seuil n° 2: la classe d'hydromorphie	4
valeur-seuil n° 3: la classe d'hydromorphie	5
valeur-seuil n° 4: la classe d'hydromorphie	6
valeur-seuil n° 5: la classe d'hydromorphie	7

Ce choix induit la définition de 5 fonctions indicatrices, ce qui consiste à affecter à une observation la valeur 1 si la classe d'hydromorphie est inférieure ou égale à la valeur-seuil considérée et la valeur 0 sinon (Cf. § 1.1.2b). On peut, comme précédemment pour la profondeur du sol, calculer les variogrammes moyens et directionnels de chacune de ces fonctions indicatrices. Nous allons simplifier la présentation et ne tenir compte ici que des variogrammes moyens.

Les variogrammes moyens des fonctions indicatrices sur les deux secteurs peuvent être regroupés en trois types si on privilégie leur allure aux courtes distances (Fig. II.17 et Fig. II.18):

- le type "pépitique"

La semi-variance ne dépend pas de la distance séparant les points; la répartition spatiale de la fonction indicatrice apparaît de ce fait aléatoire. C'est le cas sur les deux secteurs de la fonction indicatrice 5 correspondant à la classe d'hydromorphie 7.

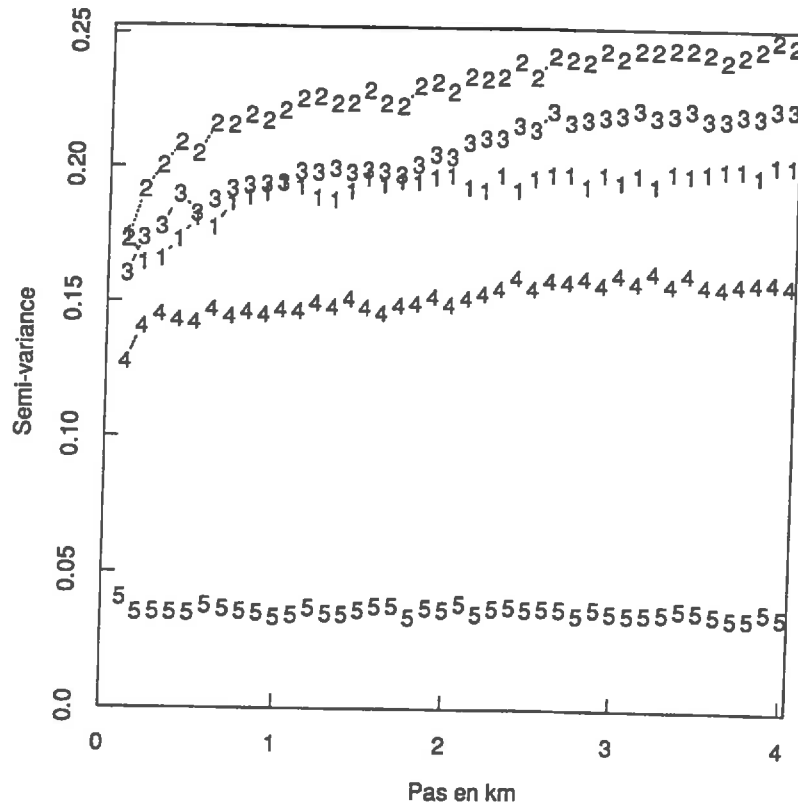
- le type "linéaire"

Le variogramme croît linéairement jusqu'à une distance de 1 km, la pente de cet accroissement étant faible. Les fonctions indicatrices 1 et 4 du secteur 2 sont de ce type.

- le type "borné"

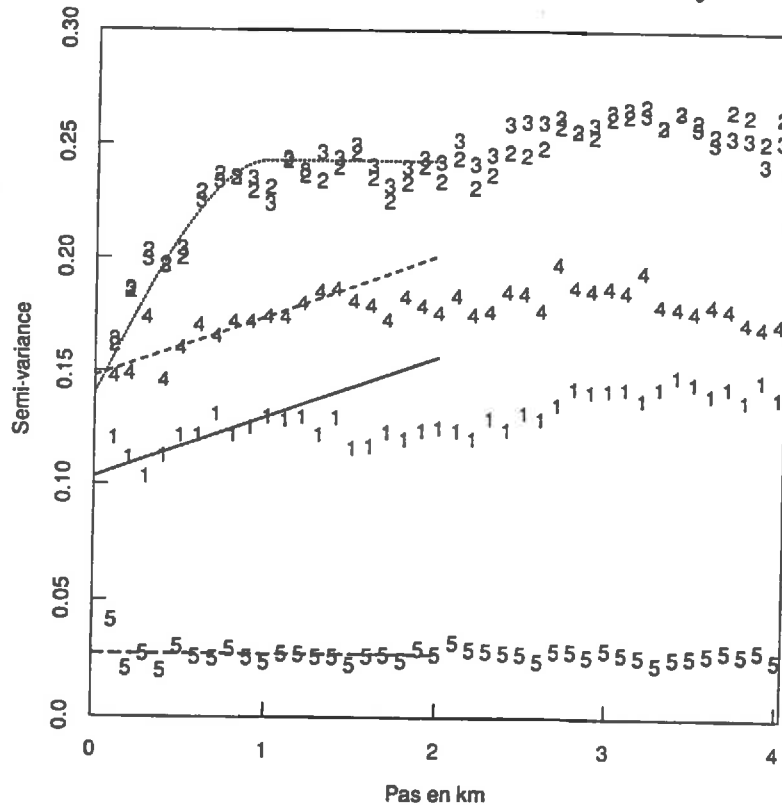
Le variogramme augmente rapidement et atteint un palier. L'effet de pépite est important. Pour les fonctions indicatrices 1, 2 et 3 du secteur 1 et celles 2 et 3 du secteur 2, la portée est de l'ordre du kilomètre. Pour la fonction indicatrice 4 du secteur 1, la portée est de 300 mètres.

Si on compare les variogrammes obtenus sur le secteur 1 avec ceux du secteur 2, on constate que la différence principale concerne la fonction indicatrice 1 distinguant les sols sans aucun indice d'hydromorphie des autres sols. Sur le secteur 1, cette fonction présente une variabilité spatiale globalement importante, un effet de pépite élevé et une portée de l'ordre du kilomètre (Fig. II.17). Sur le secteur 2, la variabilité spatiale de cette fonction est faible et semble très peu structurée (Fig. II.18).



**Légende:** 1: Fonction indicatrice n° 1 (classe d'hydromorphie 1) 4: Fonction indicatrice n° 4 (classe d'hydromorphie 6)  
 2: Fonction indicatrice n° 2 (classe d'hydromorphie 4) 5: Fonction indicatrice n° 5 (classe d'hydromorphie 7)  
 3: Fonction indicatrice n° 3 (classe d'hydromorphie 5)

**Figure II.17:** Variogrammes moyens de 5 fonctions indicatrices de la classe d'hydromorphie sur le secteur 1



**Légende:** 1: Fonction indicatrice n° 1 (classe d'hydromorphie 1) 4: Fonction indicatrice n° 4 (classe d'hydromorphie 6)  
 2: Fonction indicatrice n° 2 (classe d'hydromorphie 4) 5: Fonction indicatrice n° 5 (classe d'hydromorphie 7)  
 3: Fonction indicatrice n° 3 (classe d'hydromorphie 5)

**Figure II.18:** Variogrammes moyens de 5 fonctions indicatrices de la classe d'hydromorphie sur le secteur 2. Les modèles ajustés aux variogrammes indicatifs sont représentés.

Pour illustrer simplement ces résultats, plaçons nous par exemple à l'emplacement d'une observation pour laquelle la classe d'hydromorphie est apparue inférieure ou égale à 7. Le variogramme de la fonction indicatrice 5 montre que la probabilité de faire une observation de classe d'hydromorphie supérieure, est faible et ne dépend pas de la distance qu'on va parcourir. Il faut bien se rappeler que l'analyse géostatistique ne prend en compte que les observations effectives et par conséquent peut être faussée par le sous-échantillonnage des zones de bas-fonds que nous avons noté au chapitre I. Nous reviendrons sur ce problème dans une discussion ultérieure. Nous notons simplement à ce niveau que la répartition des zones très hydromorphes apparaît comme un phénomène aléatoire dans notre fichier de données.

Dans une autre illustration, plaçons nous dans le cas d'une observation de classe d'hydromorphie inférieure ou égale à 4. Le variogramme de la fonction indicatrice 2 montre que la probabilité de rencontrer des sols de classe d'hydromorphie au moins égale à 5, va augmenter rapidement jusqu'à une distance d'un kilomètre puis se stabiliser. A travers sa pépite, ce même variogramme indique qu'une grande part de cette probabilité est déjà présente à une distance inférieure à 100 mètres.

En résumé, *le calcul des variogrammes moyens pour différentes fonctions indicatrices de la classe d'hydromorphie, permet de caractériser des structures spatiales différentes suivant la valeur-seuil retenue.*

### 3.3 Estimation par krigeage des fonctions indicatrices sur le secteur 2.

L'étape suivante réside dans l'estimation par krigeage sur le secteur 2 des différentes fonctions indicatrices. Pour cela, on a retenu, comme pour la profondeur du sol, une grille régulière de pas 100 mètres, superposée au secteur 2.

L'ajustement de modèles aux variogrammes expérimentaux est à la base de la technique du krigeage indicatif. Cet ajustement suppose des choix dont il faut tester les effets, comme le nombre de fonctions indicatrices retenu pour décrire la variable étudiée ou encore l'ajustement de modèles sur le variogramme moyen ou sur les variogrammes directionnels, ....

De façon analogue à la profondeur du sol, nous avons vérifié que ces différents choix n'avaient pas d'incidences significatives sur les résultats de l'estimation par krigeage. De plus, l'emploi de modèles définis à partir des variogrammes expérimentaux du secteur 1, aboutit en bout de course aux mêmes estimations par krigeage indicatif de la classe d'hydromorphie. *Nous nous limitons de ce fait à une présentation basée sur un ajustement des variogrammes expérimentaux du secteur 2.*

Les modèles ajustés sur les variogrammes moyens de la classe d'hydromorphie du secteur 2 sont les suivants (Fig. II.18):

pour la fonction indicatrice 1:	$\gamma(h) = 0.103 + 0.0268 h$
pour la fonction indicatrice 2:	$\gamma(h) = 0.140 + 0.1029 [ 1.5 (h/1.0) - 0.5 (h/1.0)^2]$
pour la fonction indicatrice 3:	$\gamma(h) = 0.140 + 0.1029 [ 1.5 (h/1.0) - 0.5 (h/1.0)^2]$
pour la fonction indicatrice 4:	$\gamma(h) = 0.148 + 0.0267 h$
pour la fonction indicatrice 5:	$\gamma(h) = 0.0275$

L'emploi de ces modèles pour le krigeage permet d'estimer en tout point du secteur 2 la valeur d'une fonction indicatrice. La figure II.19 représente ces estimations sous forme de blocs-diagrammes pour les fonctions indicatrices correspondant à quatre valeurs-seuil.

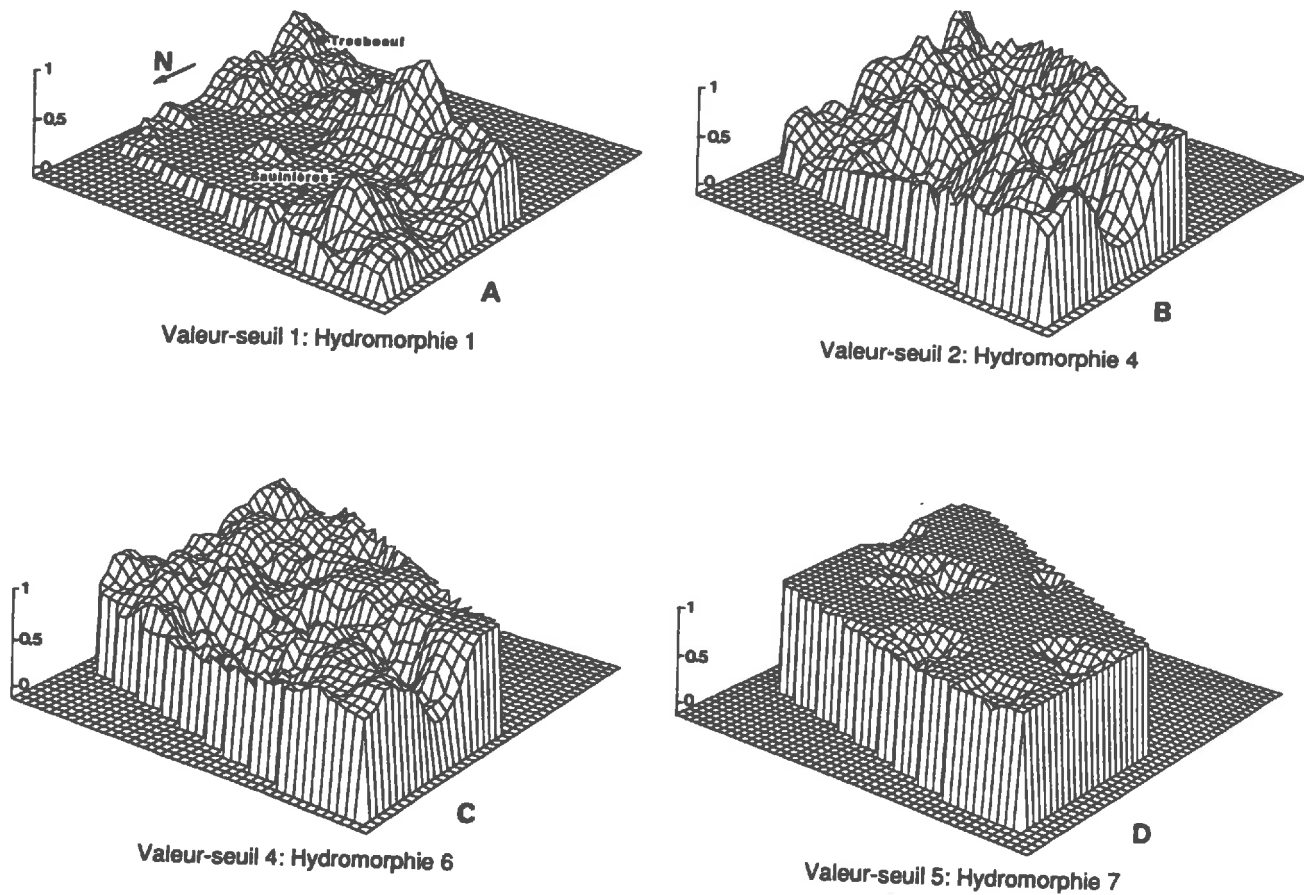


Figure II.19: Blocs-diagrammes sur le secteur 2 des estimations par krigeage de 4 fonctions indicatrices de la classe d'hydromorphie. Le secteur 2 est présenté à partir d'une vue nord-ouest.

Le bloc-diagramme de la première fonction indicatrice (bloc A) montre deux grands types de zones:

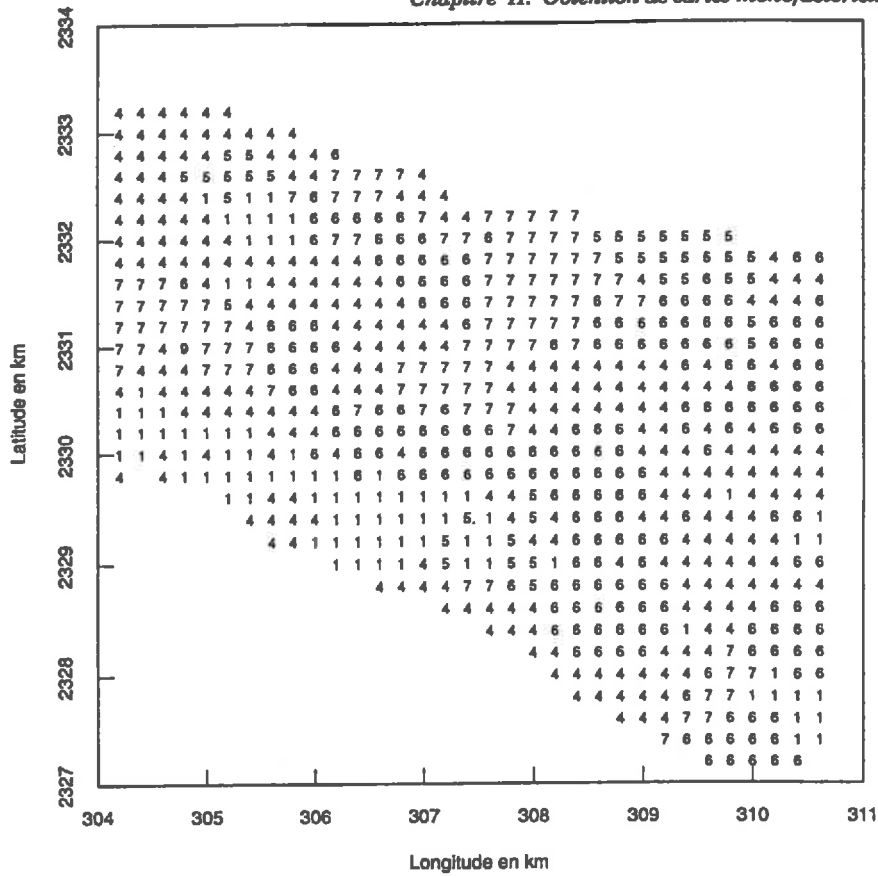
- la partie nord-est et la partie centrale ont des valeurs de la fonction indicatrice proches de 0; la probabilité de rencontrer des sols sains (sans traces d'hydromorphie) est donc très faible dans ce secteur.
- la bordure sud du secteur 2 et la partie nord-ouest présentent des valeurs plus élevées de cette fonction indicatrice, allant jusqu'à 0.6. Ces zones présentent donc une probabilité bien plus importante de rencontrer des sols sains.

Le bloc B est obtenu en prenant une valeur-seuil correspondant à la classe d'hydromorphie 4. Dans la partie sud-ouest, la fonction indicatrice prend des valeurs proches de 1 traduisant la probabilité très faible de rencontrer des sols d'une hydromorphie plus importante que la classe 4 dans ce secteur. Dans la partie centrale au contraire, cette même fonction indicatrice prend des valeurs de l'ordre de 0.3; les sols d'hydromorphie supérieure à 4 y sont donc dominants.

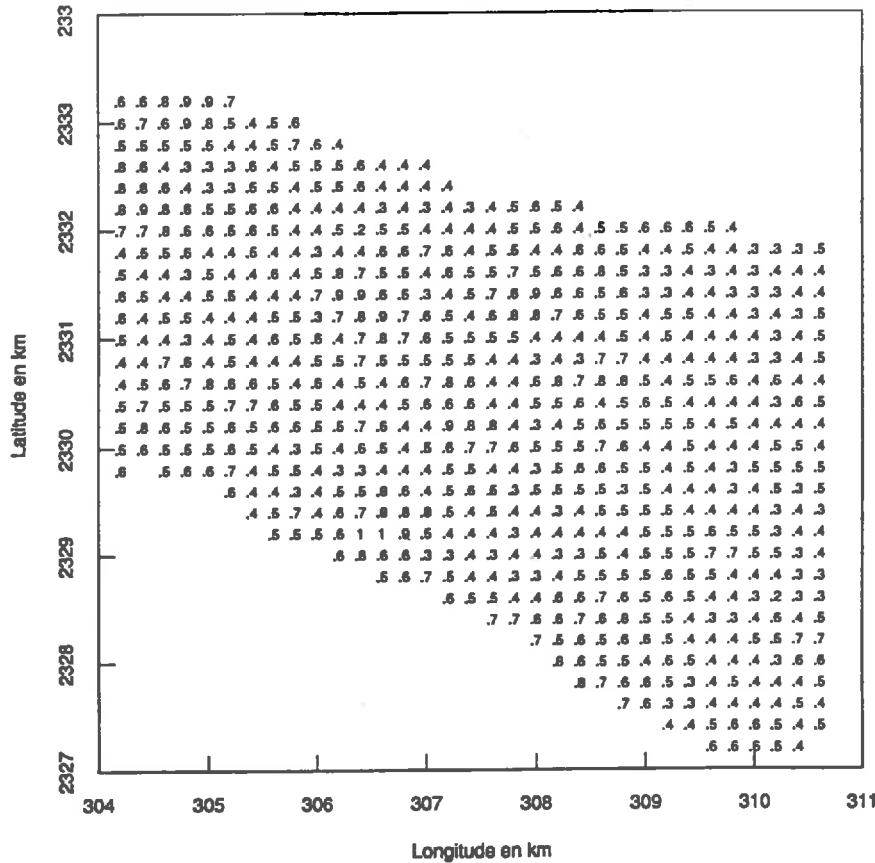
Si on considère avec Dupont (1985) et Rivière (1986) que cette classe d'hydromorphie constitue la limite entre les sols qu'il est raisonnable de drainer et les sols pour lesquels le drainage n'est pas conseillé, on voit l'intérêt d'une telle représentation en matière d'aménagement régional. Elle permet de délimiter des secteurs pour lesquels le besoin en drainage est plus ou moins grand: au vu du bloc diagramme B, ce besoin sera faible dans la partie sud, important dans la partie centrale.

A l'aide des quatre blocs-diagrammes, on peut donc suivre l'évolution dans l'espace des fonctions indicatrices quand les valeurs-seuil augmentent. Excepté pour la fonction indicatrice 5, les estimations des fonctions indicatrices sont de façon uniforme peu précises, puisque l'écart-type d'estimation est de l'ordre de 0.3 unité.





A



B

Figure II.20: Estimations par krigeage indicatif de la classe d'hydromorphie sur le secteur 2  
 A: Report de l'estimation de la classe d'hydromorphie aux noeuds d'une grille de pas 200 mètres  
 B: Report de la probabilité que la classe d'hydromorphie soit égale à l'estimation faite.

### 3.4 Estimation de la classe d'hydromorphie sur le secteur 2

En tout point du secteur 2, nous disposons d'une estimation de chacune des 5 fonctions indicatrices correspondant aux 5 valeurs-seuils retenues. Ces estimations peuvent être interprétées comme la probabilité que la classe d'hydromorphie soit inférieure ou égale en un point à une valeur-seuil. On définit ainsi en tout point la fonction de répartition de la classe d'hydromorphie.

Par différence entre les estimations des fonctions indicatrices pour deux valeurs-seuil consécutives, on peut ainsi calculer en tout point la probabilité que la classe d'hydromorphie soit égale à une valeur-seuil donnée. En effet, on sait que dans le cas d'une variable aléatoire discrète  $X$ :

$$\text{Probabilité } (X = z_c) = \text{Probabilité } (X \leq z_{c+1}) - \text{Probabilité } (X \leq z_c)$$

où :  $z_c$  et  $z_{c+1}$  représentent deux valeurs-seuils consécutives.

Nous avons utilisé cette relation pour calculer en tout point la probabilité que la classe d'hydromorphie soit égale à une valeur-seuil donnée. *La valeur de classe d'hydromorphie qu'on affecte en un point, est celle de la valeur-seuil dont la probabilité est maximale.*

On peut représenter pour tous les noeuds d'une grille régulière la classe d'hydromorphie estimée de la sorte (Fig. II.20, carte A). Ce document permet une visualisation sur le secteur 2, des estimations de la classe d'hydromorphie obtenues par krigeage indicatif.

La distribution spatiale ainsi décrite de la classe d'hydromorphie, confirme les tendances déjà observées sur les blocs diagrammes des fonctions indicatrices, à savoir: (i) la prédominance de sols présentant une hydromorphie marquée (classes 6 et 7) dans les parties nord-est et centrale du secteur 2; (ii) des sols moyennement hydromorphes (classes 4 et 5) au nord-ouest; (iii) des sols peu hydromorphes (classe 1) en bordure sud.

Cette représentation est complétée par le report de la probabilité que la classe d'hydromorphie effective soit égale à la valeur estimée (Fig. II.20, carte B). De la sorte, on dispose d'une indication quant à la précision des estimations faites. On voit que la probabilité varie entre 0.3 et 1., avec une valeur modale de 0.5. La probabilité que la classe d'hydromorphie soit différente de celle indiquée sur la carte A, est donc généralement importante et montre que, comme pour la profondeur du sol, la carte de classe d'hydromorphie obtenue par krigeage indicatif est peu précise.

## CONCLUSION DU CHAPITRE II

Nous avons utilisé les techniques géostatistiques pour décrire la variabilité spatiale de la profondeur du sol et de la classe d'hydromorphie sur un secteur de plusieurs milliers d'hectares. Au cours de cette application, nous avons rencontré deux difficultés majeures, l'une étant liée à la variabilité anisotrope de la profondeur du sol, l'autre à la nature qualitative ordonnée de la classe d'hydromorphie. Pour maîtriser ces difficultés, nous avons employé deux méthodes particulières qui complètent l'ensemble des techniques géostatistiques pouvant être employé pour décrire la variabilité spatiale des propriétés du sol:

- *l'ajustement de modèles anisotropes au variogramme* permet de privilégier dans le processus de krigeage, des observations situées dans une direction particulière en leur accordant un poids plus fort dans l'estimation. Cette direction est définie par une méthode d'ajustement automatique aux variogrammes directionnels et correspond à une direction de plus grande dépendance spatiale des observations.
- *le krigeage indicatif* est une méthode indépendante de la fonction de répartition de la variable et de ce fait adaptée à l'analyse de variables qualitatives ordonnées. De plus, en fixant de façon judicieuse les valeurs-seuil, par exemple au niveau de seuils de décision (drainage utile -drainage inutile), on peut localiser les secteurs où cette valeur-seuil sera dépassée, et cela avec une probabilité plus ou moins grande. Il nous semble qu'il s'agit là d'une méthode très intéressante en matière d'aide à la décision, mais pour l'instant très peu utilisée en science du sol.

Nous obtenons des cartes de profondeur du sol et de classe d'hydromorphie et nous pouvons associer à ces cartes un degré de précision. Les cartes obtenues décrivent une distribution spatiale des deux variables étudiées qui peut être reliée à des variations topographiques ou de substrat. Néanmoins, elles s'avèrent dans les deux cas peu précises.

Il semble intéressant à présent de confronter les estimations obtenues par krigeage avec celles pouvant être faites à partir de la carte pédologique.

## Chapitre III

# COMPARAISON DES CARTES KRIGÉES ET DES CARTES DÉRIVÉES DE LA CARTE PÉDOLOGIQUE

La profondeur du sol et la classe d'hydromorphie sont des critères cartographiques de la carte pédologique au 1/25.000 de Janzé. Nous disposons de ce fait, pour toute unité cartographique, d'une estimation de ces deux variables. Des cartes de profondeur du sol et de classe d'hydromorphie peuvent donc être dérivées de la carte pédologique du secteur 2 par une procédure d'extraction de variables.

Au terme du chapitre précédent, nous disposons également de cartes de ces deux mêmes variables, obtenues par l'emploi de techniques géostatistiques.

*L'objectif de ce chapitre est de confronter les estimations obtenues par ces deux types de documents cartographiques.*

Un commentaire doit être fait de façon préalable: cette confrontation ne peut déboucher sur une conclusion affirmant qu'une méthode est meilleure que l'autre. En effet, une telle conclusion supposerait que les deux méthodes aient chacune été employées de façon optimale. Or, on utilise pour les deux méthodes le même échantillonnage de la couverture pédologique, décrit au chapitre I comme un échantillonnage libre. Un tel échantillonnage ne peut a priori être considéré comme optimal pour une analyse géostatistique.

### 1. PROCEDURES DE COMPARAISON DES DOCUMENTS

La procédure de comparaison des documents cartographiques comporte trois étapes:

*- une comparaison visuelle des cartes*

Cette comparaison porte sur le nombre de plages cartographiques, leur taille, leur forme, la répartition spatiale des classes de profondeur et d'hydromorphie. Elle permet une approche synthétique des différences d'estimation entre les deux méthodes.

*- une comparaison des estimations obtenues aux noeuds d'une grille*

La comparaison visuelle ne permet que des conclusions qualitatives. Pour quantifier les différences d'estimation entre les deux méthodes, nous comparons les estimations obtenues aux noeuds d'une grille régulière de pas 200 mètres. Ces estimations sont obtenues directement par krigeage en définissant l'origine et le pas de la grille. Pour obtenir ces estimations à partir de la carte pédologique, nous superposons à celle-ci un support transparent représentant cette grille et nous lisons aux noeuds de la grille la définition de l'unité cartographique. Dans le cas de la profondeur du sol, nous prenons comme estimation la valeur centrale de la classe de profondeur.

Des estimations par krigeage et des estimations dérivées de la carte pédologique ont été obtenues de la sorte pour 691 points du secteur 2.

*- une comparaison des estimations obtenues aux points d'un échantillonnage indépendant de vérification*

Malgré la réserve émise en introduction sur les possibilités de classement des deux méthodes, il est intéressant de comparer les valeurs estimées à des valeurs mesurées sur le terrain.

A cet effet, nous avons retenu deux unités cartographiques du secteur 2 définies respectivement comme " Sol brun sur grès schisteux, de 40 à 60 cm de profondeur" et comme "Sol brun sur schiste d'Angers, de 40 à 60 cm de profondeur, de classe d'hydromorphie 1". L'aire occupée par ces deux unités cartographiques représente 25 % de la surface totale du secteur 2.

Sur chacune de ces unités, 30 points de vérification ont été localisés de façon aléatoire et ont fait l'objet d'une mesure complémentaire sur le terrain de la profondeur du sol et de la classe

d'hydromorphie. Ces mesures ont été confrontées aux estimations obtenues en ces mêmes points par la carte pédologique et par krigeage.

Pourquoi se limiter à un seul échantillonnage indépendant basé sur ces deux seules unités cartographiques plutôt que sur l'ensemble du secteur 2 ? La première raison tient au fait que l'on évite de la sorte les zones de bas-fonds dont on sait qu'elles ont été sous-échantillonnées; leur prise en compte aurait défavorisé le krigeage. La seconde raison est liée à la lourdeur de la vérification, la méthode employée nécessitant des déplacements moindres.

## 2. LES RESULTATS DE LA COMPARAISON

### 2.1 Comparaison visuelle des documents cartographiques

Les figures III.1 et III.2 représentent, respectivement pour la profondeur du sol et la classe d'hydromorphie, les cartes obtenues à partir de la carte pédologique (Cartes P1 et H1) et par krigeage (Cartes P2 et H2). Dans les deux cas, on a pris soin d'aboutir à la même légende quelle que soit la méthode utilisée pour que les documents cartographiques soient directement comparables.

La différence d'aspect entre les deux types de cartes est très nette: à partir de la carte pédologique, le nombre de plages cartographiques est respectivement de 85 pour la profondeur du sol et de 105 pour la classe d'hydromorphie. Ces chiffres sont de 20 et 45 pour les cartes krigées. La carte pédologique induit donc un partitionnement important de la couverture pédologique sur la base de ces deux critères, non révélé par le krigeage.

Par ailleurs, les cartes P1 et H1 expriment les structures liées aux talwegs sous forme de sols profonds et très hydromorphes. Ces structures n'apparaissent pas dans les cartes krigées. On sait que ces zones ont été sous-échantillonnées, ce qui peut expliquer cette absence. Mais, on peut remarquer que la largeur de ces zones est comprise entre 50 et 200 mètres, ce qui est de l'ordre de grandeur de la distance moyenne séparant les observations ayant servi de support à l'analyse géostatistique. Cela montre que ces zones de talwegs n'auraient pu être reconnues par krigeage qu'à la condition de disposer d'un échantillonnage beaucoup plus dense.

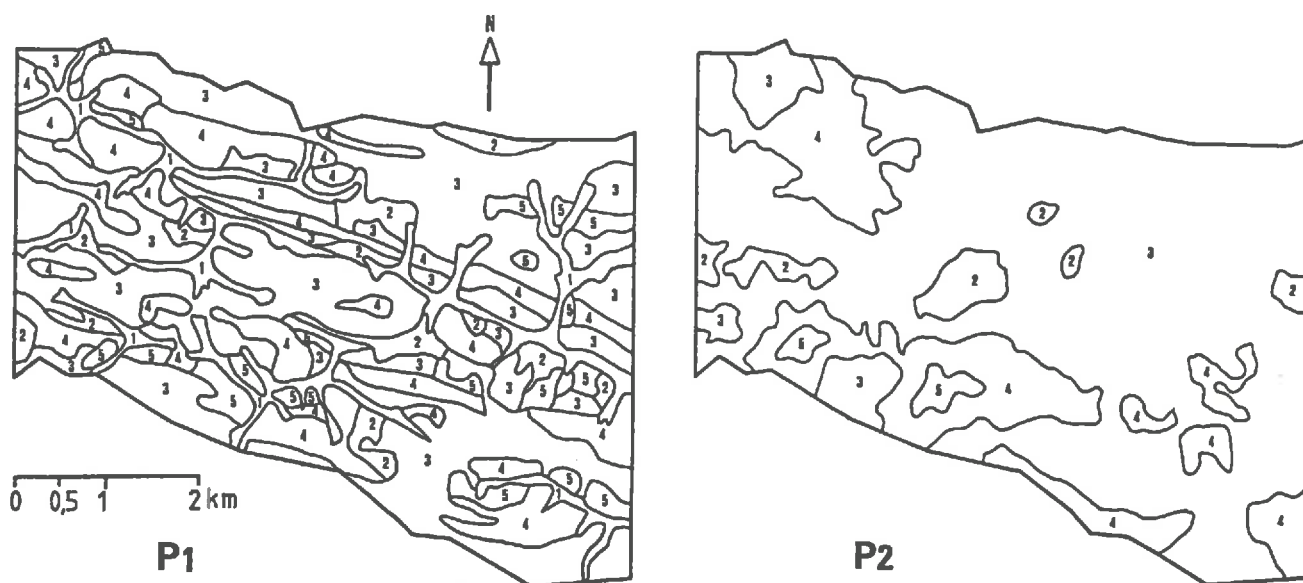


Figure III.1: Cartes de la profondeur du sol sur le secteur 2  
 P1: Carte dérivée de la carte pédologique au 1/25.000  
 P2: Carte obtenue par krigeage linéaire avec un modèle exponentiel isotrope

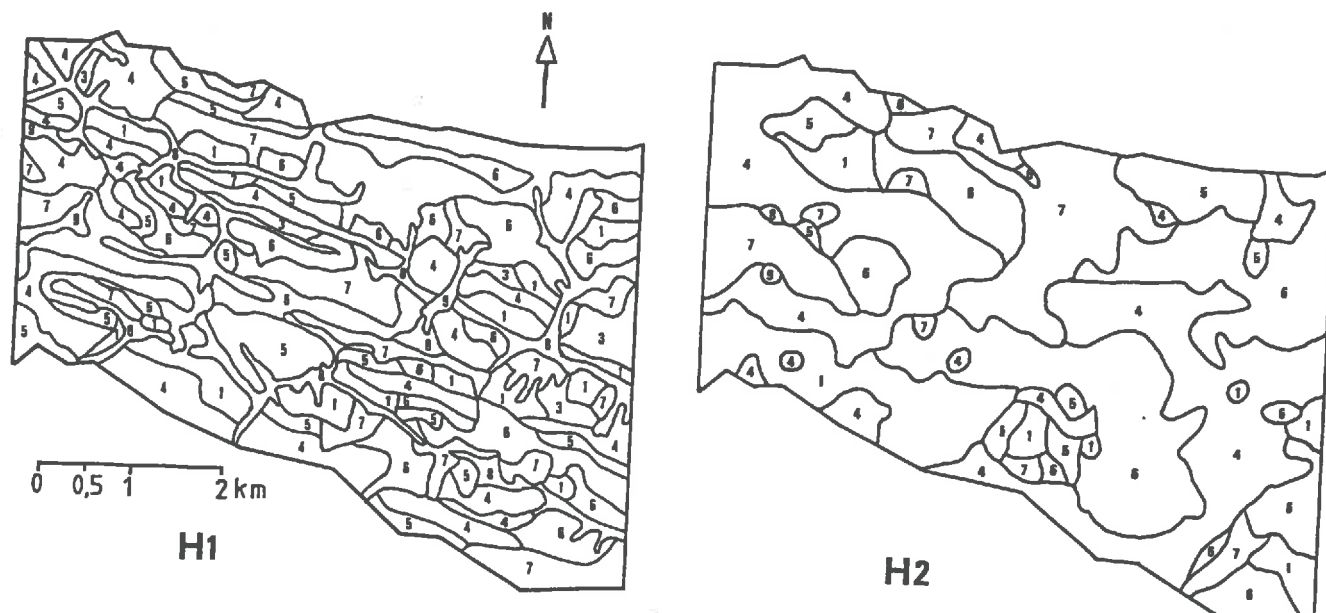


Figure III.2: Cartes de la classe d'hydromorphie sur le secteur 2  
 H1: Carte dérivée de la carte pédologique au 1/25.000  
 H2: Carte obtenue par krigeage indicatif

## 2.2 Comparaison des estimations aux noeuds d'une grille

Pour quantifier les différences d'estimation correspondant à cette différence d'aspect très nette, nous disposons des estimations obtenues par les deux méthodes aux 691 noeuds d'une grille.

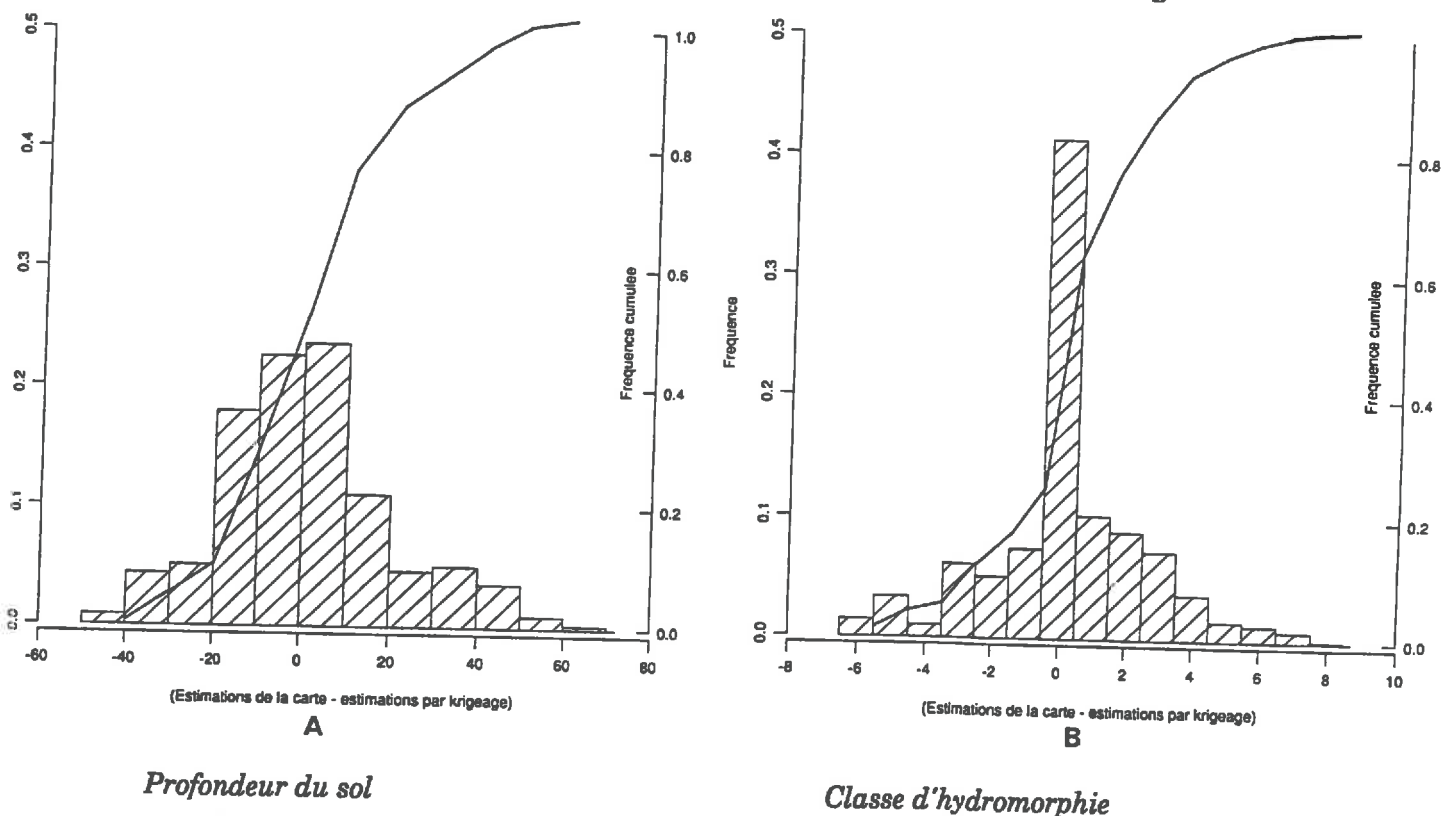


Figure III.3: Histogrammes des différences d'estimation aux noeuds d'une grille régulière entre la carte pédologique et le krigeage

En tout point, on peut ainsi calculer l'écart entre l'estimation obtenue à partir de la carte pédologique et celle obtenue par krigeage. La figure III.3 représente les histogrammes de ces écarts. Ces histogrammes montrent que les écarts d'estimation sont centrés sur 0: pour 45 % des points, les écarts pour la profondeur du sol ne dépassent pas 10 cm en valeur absolue et pour 42 % des points, la classe d'hydromorphie prédite est identique.

Il est intéressant d'analyser les écarts extrêmes et de définir dans quelles conditions de tels écarts se produisent. Pour cela, admettons que des écarts en valeur absolue de plus de 20 cm pour la profondeur du sol et de plus de 2 classes d'hydromorphie, constituent des différences d'estimation sérieuses. De telles situations sont rencontrées pour 25 % des points pour la profondeur du sol et pour 26 % des points pour la classe d'hydromorphie.

Si on met en parallèle ces écarts avec les estimations obtenues par la carte pédologique, on remarque qu'ils sont obtenus dans deux types de situation:

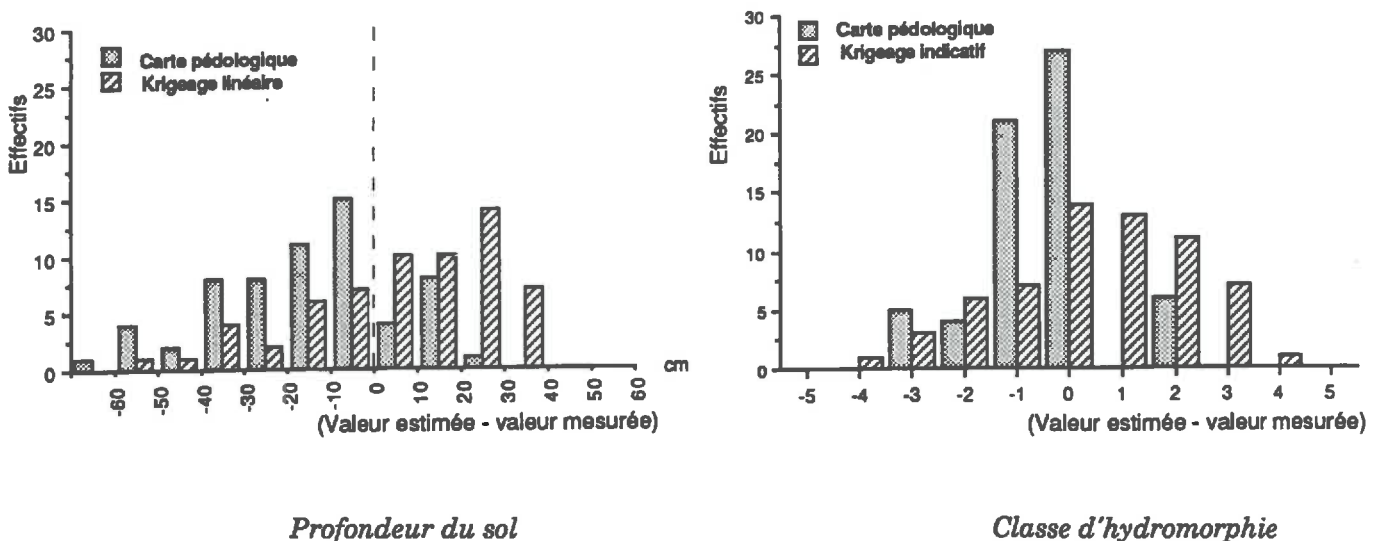
- quand les estimations de la carte pédologique sont supérieures à 1 mètre pour la profondeur du sol ou supérieures à la classe 7 pour l'hydromorphie. Dans ces cas, les écarts sont positifs, la carte pédologique fait des estimations plus grandes que celles du krigeage;
- quand les estimations de la carte pédologique sont inférieures à 40 cm pour la profondeur du sol ou correspondent aux sols non hydromorphes: dans ce cas, les écarts sont négatifs, les estimations de la carte pédologique sont plus petites que celles du krigeage.

*Les écarts entre les deux méthodes ne sont donc pas aléatoires, ils se produisent dans les cas où les valeurs estimées de la carte pédologique correspondent à des sol très profonds ou très peu profonds, ou encore à des sols sans traces d'hydromorphie ou très hydromorphes.*

### 2.3 Comparaison par rapport à un échantillonnage indépendant

Les deux unités cartographiques que nous avons choisies pour établir un échantillonnage indépendant présentent une double caractéristique: il s'agit de sols peu profonds (40 et 60 cm) et non ou peu hydromorphes.

Pour les 60 points choisis de façon aléatoire au sein de ces deux unités, on peut représenter les histogrammes des écarts entre les valeurs estimées et les valeurs mesurées lors du retour sur le terrain (Fig. III. 4).



**Figure III.4:** Histogrammes des écarts entre les valeurs estimées par la carte pédologique ou le krigeage et les valeurs mesurées sur le terrain, pour les 60 points d'un échantillonnage indépendant

Pour les deux variables, ces écarts sont de type différent:

- la carte pédologique a tendance à sous-estimer la profondeur du sol ou la classe d'hydromorphie;
- le krigeage tend au contraire à les sur-estimer.

Si on s'intéresse à nouveau à des écarts:

- dépassant 20 cm en valeur absolue pour la profondeur du sol, de telles situations sont obtenues dans 39 % des cas pour la carte pédologique et dans 46 % des cas pour le krigeage;
- de plus de deux classes d'hydromorphie en valeur absolue, cela se produit pour 24 % des cas pour la carte pédologique et dans 43 % des cas pour le krigeage.

Pour classer les deux méthodes d'estimation, nous retenons trois critères de comparaison:

- la moyenne des écarts entre la valeur estimée et la valeur mesurée;
- la moyenne de la valeur absolue de ces mêmes écarts;
- enfin, le rang moyen des deux méthodes d'estimation (Laslett et al., 1987).

Soit  $r_{ij}$  le rang de la  $i$  ème méthode au  $j$  ème point de vérification: le rang est de 1 pour la méthode donnant l'estimation la plus proche de la valeur mesurée, de 2 pour l'autre. Le rang moyen  $R_i$  de la méthode  $i$  est défini pour notre échantillonnage par:

$$R_i = \frac{\sum_{j=1}^{60} r_{ij}}{60}$$

De la sorte, la méthode fournissant majoritairement les estimations les plus précises, aura un rang moyen proche de 1, le rang moyen de l'autre méthode tendant vers 2. Ce calcul de rang moyen présente l'avantage d'être peu sensible à des écarts importants pouvant se produire en un faible nombre de points, mais influençant fortement des calculs de moyennes.

	Profondeur du sol			Classe d'hydromorphie		
	Moyenne des écarts* (cm)	Moyenne de la valeur absolue des écarts* (cm)	rang moyen	Moyenne des écarts*	Moyenne de la valeur absolue des écarts*	rang moyen
Estimations par la carte pédologique	-12.	18.0	1.5	-0.5	0.9	1.3
Estimations par le krigeage	6.0	19.8	1.5	1.6	2.0	1.7

\* écart = (valeur estimée - valeur mesurée)

Tableau III.1: Comparaison, pour deux unités cartographiques, de la précision des deux méthodes d'estimation employées.

La moyenne des écarts confirme les observations faites pour les histogrammes, à savoir une sous-estimation par la carte pédologique et une surestimation par les techniques de krigeage (Tab. III.1).

La moyenne de la valeur absolue des écarts permet de juger de l'importance des écarts par rapport à la valeur mesurée.

Pour la profondeur du sol, cette valeur est de 18 cm pour la carte pédologique et de 19.8 cm pour le krigeage. Les écarts à la profondeur mesurée sont donc en valeur absolue du même



ordre de grandeur pour les deux méthodes. Cette similarité est confirmée par le calcul du rang moyen qui est de 1.5 dans les deux cas: dans un cas sur deux, la carte pédologique fournit des estimations plus précises que le krigeage; le contraire est donc vrai pour l'autre moitié de points.

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

## Conclusion:

La comparaison des estimations de la profondeur du sol et de la classe d'hydromorphie, obtenues à partir de la carte pédologique ou par krigeage, amène à trois constats:

- les cartes obtenues par krigeage présentent un aspect beaucoup plus lissé que celles obtenues à partir de la carte pédologique, se traduisant par un nombre de plages cartographiques nettement plus faible.
- cette différence d'aspect induit des différences d'estimations jugées sérieuses (plus de 20 cm pour la profondeur du sol et plus de deux classes d'hydromorphie) pour environ 25 % des 691 noeuds d'une grille régulière superposée au secteur 2.
- confrontées à des valeurs mesurées issues d'un échantillonnage indépendant, les estimations obtenues par la carte pédologique sont d'une précision équivalente à celles obtenues par krigeage dans le cas de la profondeur du sol, et d'une précision supérieure pour la classe d'hydromorphie.

## 3. DISCUSSION

Au cours de cette discussion, nous revenons en premier lieu sur la comparaison des estimations obtenues par la carte pédologique et par le krigeage en essayant d'illustrer les raisons des différences observées. Dans un second point, nous nous interrogeons sur les conditions d'obtention de cartes plus précises par krigeage. Enfin, nous essayerons de situer l'apport des techniques géostatistiques à moyenne échelle.

### 3.1 Estimation spatiale par krigeage et à partir de la carte pédologique : une illustration des différences d'approche

La figure III.5 vise à illustrer à partir d'un exemple les différences de comportement du krigeage et de la carte pédologique en tant qu'estimateur de la profondeur du sol.

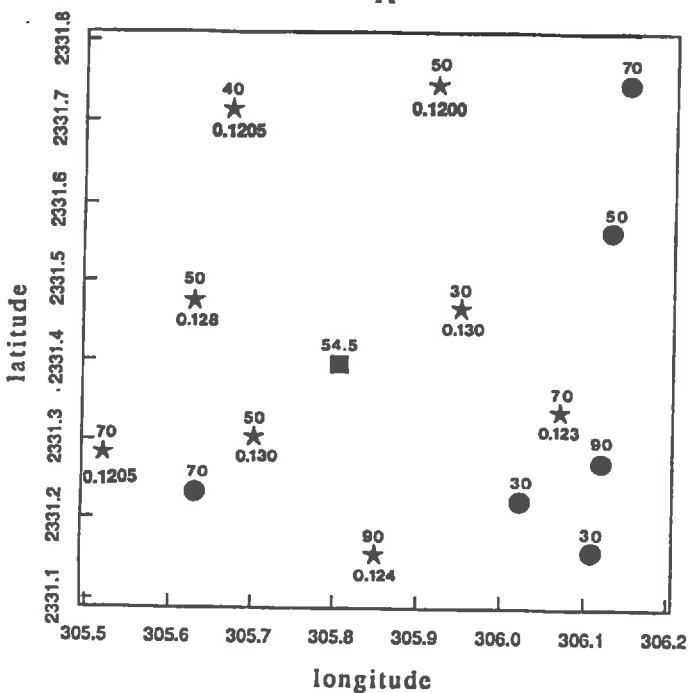
Considérons un point du secteur 2 de coordonnées [305.8 ; 2331.4] pour lequel on cherche à estimer la profondeur du sol. Les valeurs mesurées de profondeur du sol pour les observations voisines de ce point à estimer, varient entre 30 et 90 cm (Fig. III.5.A).

Le modèle employé dans l'estimation par krigeage est de type exponentiel isotrope tenant compte de 8 voisins. Le logiciel Bluepack choisit ces huit voisins à partir de la distance séparant les observations du point à estimer, mais en ayant le souci d'échantillonner dans les différentes directions de l'espace géographique. Il sélectionne ainsi huit voisins distants de 150 à 360 mètres du point à estimer. Cette pratique est légitime puisque l'observation du variogramme moyen de la profondeur du sol (Fig. II.7) a montré une dépendance spatiale des observations jusqu'à une distance de l'ordre du kilomètre.

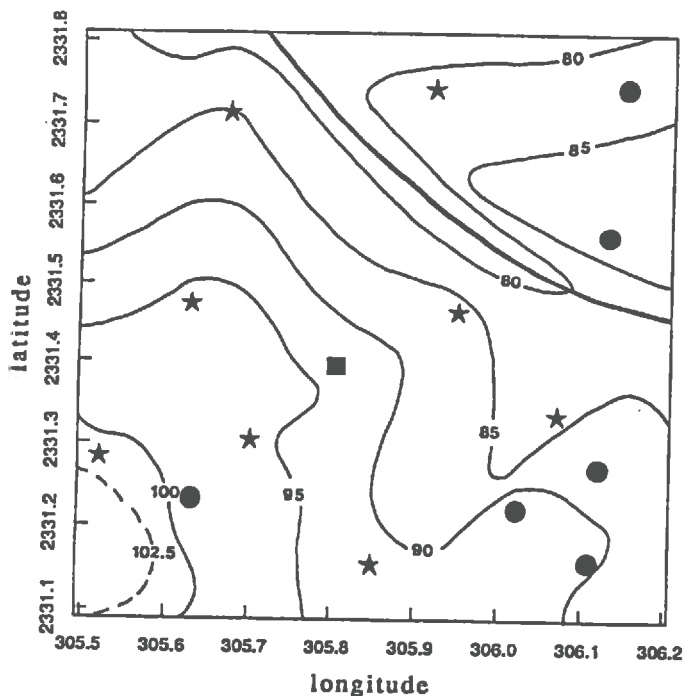
Les voisins les plus proches bénéficient des poids les plus importants dans l'estimation par krigeage (Fig. III.5.A). Mais la différence entre les différents poids est faible: (i) d'une part parce que le variogramme de la profondeur du sol présente un effet pépité très important ce qui tend à égaliser les poids (Journel et Huijbregts, 1978; Beucher-Darricau, 1981); (ii) d'autre part parce que les valeurs du variogramme pour des distances de 150 et 360 mètres sont proches.

L'estimation de 54.5 cm obtenue par krigeage au point considéré est de ce fait très proche de la moyenne des valeurs aux huit voisins (cette moyenne est de 56.2 cm).

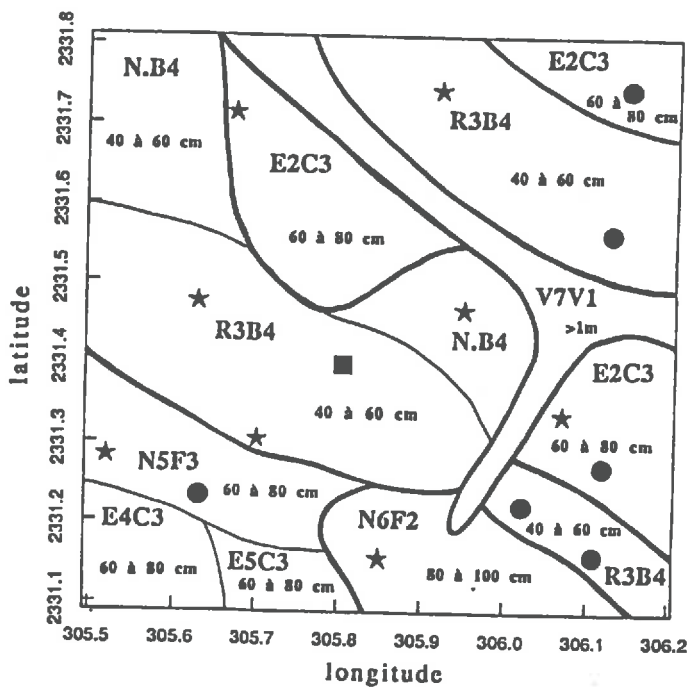
A



- point à estimer
- ★ point participant à l'estimation
- point exclu de l'estimation
- 50 70  
★ ● profondeur du sol aux points d'observation
- 0.128 ★ poids du point dans l'estimation



B



C

Figure III.5: Estimation de la profondeur du sol par krigage et par la carte pédologique: Illustration des différences d'approche pour un point du secteur 2.

A: Plan d'échantillonnage et poids des voisins dans une estimation par krigage linéaire avec un modèle exponentiel isotrope prenant 8 voisins: pépité = 250 cm<sup>2</sup>; palier - pépité = 150 cm<sup>2</sup>; portée de l'ordre de 0.9 km

B: Tracé des courbes de niveau

C: Représentation des limites de la carte pédologique

Nous expliquons de la sorte l'aspect lissé des cartes obtenues par krigeage: l'importance de l'effet de pépite induit une grande similarité dans les poids des voisins de l'estimation. Dans ce cas, le krigeage tend à faire la moyenne des observations pour estimer la valeur en un point. De la sorte, l'influence de valeurs très faibles ou très élevées est réduite.

Si on projette les courbes de niveau sur le plan d'échantillonnage précédent (Fig. III.5.B), on voit que le point à estimer se situe à mi-pente d'un versant d'orientation (sud ouest - nord est) avec un dénivelé de 20 mètres. Un talweg sépare ce versant d'un versant opposé.

Cette information topographique n'est pas utilisée dans le processus de krigeage qui ne se base que sur les observations ponctuelles.

Le tracé des limites de la carte pédologique est au contraire fondé pour une grande part sur ces variations topographiques (Fig. III.5.C). La plage "U7U1" caractérisant des sols hydromorphes profonds d'origine alluviale, est délimitée en l'absence de toute observation dans ce secteur grâce à la topographie et vraisemblablement à la végétation. Cet exemple est le plus frappant, mais la position des limites des plages cartographiques ne peut en aucun cas être justifiée à partir des seules observations ponctuelles du sol: le cartographe décide de l'existence d'une limite à partir des observations ponctuelles, il localise une limite en tenant compte de l'information extrinsèque au sol (topographie, végétation...) ou non répertoriée (états de surface..).

Cette méthode de cartographie suppose nécessairement une connaissance acquise en dehors de ce secteur, concernant les liens entre des modifications des facteurs extrinsèques et des variations des propriétés du sol.

Au sein d'une même plage cartographique ainsi délimitée, le nombre d'observations permettant de caractériser le contenu de cette plage cartographique est faible (de 1 à 3 observations). Il s'en suit qu'il n'est pas possible de quantifier, du fait d'un nombre insuffisant de données, la variabilité au sein des plages cartographiques.

*En définitive, l'importance de l'effet pépite observée sur les variogrammes conduit le krigeage à moyenniser les valeurs observées pour faire une estimation, ce qui aboutit à des cartes lissées pour lesquelles des valeurs extrêmes et isolées sont considérées comme un "bruit". Au contraire, l'auteur de la carte pédologique considère l'ensemble des informations comme un "signal" dont il est possible de délimiter l'extension spatiale en s'appuyant sur les caractéristiques extrinsèques du sol.*

*Les cartes obtenues par krigeage décrivent de ce fait les grandes tendances de variation des propriétés étudiées: elles permettent de déceler les zones où les observations sont globalement fortes ou faibles. Ces cartes sont intéressantes pour juger de la structure générale de la variabilité spatiale de la propriété étudiée, mais elles s'avèrent peu précises pour estimer la valeur en un point comme l'indique l'écart-type d'estimation.*

### **3.2 Conditions d'obtention de cartes plus précises par voie géostatistique**

L'intérêt du calcul du variogramme ne se limite pas au seul fait qu'il s'agit d'une étape préalable au krigeage; il permet également une analyse de la structure spatiale de la variable et en particulier de définir les conditions d'obtention de cartes plus précises (Bratney et Webster, 1981a; 1981b; 1983a).

Dans notre cas, le niveau de précision est limité par l'importance de l'effet de pépite. *Si on s'en tient à l'emploi des techniques géostatistiques se basant uniquement sur des observations ponctuelles du sol*, l'obtention d'une précision plus grande suppose un échantillonnage avec un pas plus serré, inférieur à 100 mètres dans notre cas. La définition exacte de ce pas d'échantillonnage suppose une étude préalable pour déterminer l'aspect du variogramme pour des distances inférieures à 100 mètres.

Merot et al. (1986) fournissent une première indication quant à l'aspect du variogramme de la profondeur du sol pour des distances inférieures à 100 mètres. Sur un secteur de 4 ha situé à quelques kilomètres de notre zone d'étude, présentant des limons acides sur schistes briovériens, ils définissent un variogramme de la profondeur du sol, calculé avec un pas de 10 mètres jusqu'à une distance de 200 mètres. Le variogramme est de type linéaire avec un effet de pépite de 150 cm<sup>2</sup>. Ce travail montre qu'un échantillonnage avec un pas de 50 mètres est nécessaire pour obtenir des estimations par krigeage associées à des écarts-type d'estimation de l'ordre de 15 cm. Un tel résultat conduirait à réaliser de l'ordre de 26800 sondages sur les 6700 hectares du secteur 1, ce qui est considérable.

*Dans le contexte de notre étude, il nous semble qu'il faille abandonner l'idée d'obtenir des cartes précises à partir de la seule information des observations ponctuelles du sol. Il semble préférable de tenir compte de l'information apportée par d'autres facteurs du milieu.*

Cette prise en compte peut être faite en utilisant deux voies:

- une première voie consiste à utiliser les corrélations existant entre la variabilité de propriétés du sol et la variabilité de facteurs extrinsèques du milieu (topographie, végétation) ou d'états de surface (travaux de Lagacherie en cours). Les techniques disponibles sont dans cette optique par exemple le co-krigeage (Bratney et Webster, 1983b; Vauclin et al., 1983; Stein et al., 1989) ou l'utilisation d'une dérive externe (Beucher-Darricau, 1981)
- une seconde voie consiste à se servir de ces facteurs pour découper l'espace géographique et mener une analyse géostatistique de façon séparée sur chacun des domaines ainsi définis (Voltz et Webster, 1990). Nous avons utilisé cette méthode en délimitant le secteur 2 sur la base de la structure géologique et nous avons montré qu'elle aboutissait à des cartes plus précises. Dans la seconde partie de ce mémoire, nous pousserons ce raisonnement plus loin en considérant que la carte pédologique existante fournit un bon découpage de la couverture pédologique et que c'est sur la base de ce découpage que nous mènerons l'analyse géostatistique à partir d'un échantillonnage complémentaire.

### **3.3 Intérêts des techniques géostatistiques à moyenne échelle.**

Les études mettant en oeuvre l'analyse géostatistique sur des secteurs étendus (plus de 100 hectares) restent peu nombreuses.

Mac Bratney et al. (1982) l'utilisent pour décrire la variabilité spatiale du cuivre et du cobalt extractibles des 20 premiers centimètres du sol grâce à un échantillonnage de 3500 parcelles du sud-ouest de l'Écosse. Les cartes des concentrations en métal qu'ils obtiennent par krigeage, leur permettent de reconnaître des zones de carence en cuivre ou en cobalt avec une précision que les auteurs jugent généralement satisfaisante.

Xu et Webster (1984) s'intéressent à la variabilité spatiale de six propriétés physico-chimiques de l'horizon de surface (pH, matière organique, phosphore total...) sur un domaine de 3635 km<sup>2</sup> du nord-est de la Chine. L'échantillonnage est composé de 102 profils répartis de façon régulière sur le domaine d'étude. Dans tous les cas, ils observent un effet pépite important, mais obtiennent des cartes de pH par krigeage sur des blocs de 1 km<sup>2</sup> permettant la reconnaissance des grands domaines de variation de cette variable.

Une approche similaire est employée: (i) par Vanderzaag et al. (1984) à l'échelle du Rwanda, soit 26000 km<sup>2</sup> pour diverses caractéristiques physico-chimiques; (ii) par Trangmar et al. (1984) pour des propriétés physico-chimiques dans une région de 1000 km<sup>2</sup> à Sumatra; (iii) par Ovalles et Collins (1986, 1988) pour décrire les variations texturales sur un secteur de 38000 km<sup>2</sup> en Floride; (iv) par Leleux et al. (1988), Cor et Aurousseau (1990) pour obtenir des cartes de teneur en argile, de pH et de besoin en chaux pour le département d'Ille-et-Vilaine et pour la région Bretagne.

Les références comparant des cartes thématiques dérivées d'une carte pédologique avec celles obtenues par des méthodes statistiques sont encore moins nombreuses. Kuilenberg et al. (1982) testent différentes méthodes d'interpolation pour décrire la variabilité spatiale de la réserve utile du sol à partir de 530 sondages répartis de façon aléatoire sur une région sableuse

des Pays-Bas. Ils comparent les résultats avec ceux obtenus à partir d'une carte pédologique. In fine, ils ne détectent aucune différence significative entre les prédictions par krigeage et celles basées sur la carte pédologique. Dans un autre secteur de 650 hectares des Pays-Bas, Bregt et al. (1987) effectuent ce même type de comparaison en s'attachant à l'épaisseur de l'horizon A, la profondeur d'apparition d'un niveau caillouteux et la profondeur d'apparition d'un niveau argileux. Là encore, les auteurs concluent à une précision similaire des deux méthodes.

En définitive, les techniques géostatistiques s'avèrent opérationnelles aux moyennes et petites échelles pour reconnaître les grandes tendances de variation de propriétés du sol, ce qui est en accord avec les résultats que nous avons obtenus.

## **CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE**

Nous avons présenté en introduction générale la difficulté à laquelle on est confronté dès lors que l'on cherche à estimer une propriété du sol sur une superficie importante:

- d'un côté, on dispose d'un ensemble de techniques géostatistiques, se basant sur les observations ponctuelles du sol et présentant l'avantage de fournir en même temps qu'une estimation, un indicateur de la fiabilité de cette estimation;
- de l'autre, on dispose de cartes pédologiques prenant en compte une information a priori plus diversifiée que les seules observations ponctuelles du sol, mais pour lesquelles on ne sait pas quantifier la variabilité au sein des unités cartographiques et donc indiquer la précision d'une estimation.

Lors de cette première partie, nous avons employé les techniques géostatistiques à l'échelle d'un secteur de plusieurs milliers d'hectares avant de comparer les estimations obtenues à celles dérivées de la carte pédologique. Les techniques géostatistiques ont permis de découvrir sur ce secteur, les grandes tendances de variation des deux propriétés étudiées, tendances qui sont difficilement perceptibles sur la carte pédologique.

Néanmoins, la difficulté éprouvée pour obtenir des documents cartographiques précis par la mise en oeuvre des techniques géostatistiques, nous amène à nous fonder sur la carte pédologique pour décrire la variabilité spatiale de propriétés du sol.

A partir d'un échantillonnage indépendant mené pour deux unités cartographiques, nous avons déjà noté une grande variabilité de la profondeur du sol au sein de deux unités cartographiques de la carte pédologique étudiée. Ce constat nous conforte dans la nécessité de quantifier la variabilité spatiale des propriétés du sol au sein des unités cartographiques. Il s'agit là de l'objet de la seconde partie de ce mémoire.

## Seconde partie

### VARIABILITE DE PROPRIETES DU SOL ET STRUCTURE SPATIALE DE CETTE VARIABILITE AU SEIN D'UNITES CARTOGRAPHIQUES

Au cours de cette seconde partie, nous retenons trois unités cartographiques de la carte pédologique étudiée et nous cherchons à quantifier la variabilité spatiale de propriétés du sol au sein de ces trois unités cartographiques. Pour cela, nous nous basons sur un échantillonnage indépendant de celui ayant servi au levé de la carte.

Les propriétés du sol étudiées sont des propriétés morphologiques provenant de la description de sondages et des propriétés physiques de l'horizon de surface (granulométrie, capacité d'échange cationique). La description de leur variabilité spatiale au sein des unités cartographiques comporte deux grandes étapes:

- (1) Une description globale de leur variabilité spatiale au sein des unités cartographiques (*Chapitre VI*)

Pour les propriétés qui sont des critères cartographiques, elle comprend une mesure de la concordance entre la définition de l'unité cartographique et les observations effectuées, à travers des mesures de pureté des unités cartographiques. Pour des propriétés qui ne sont pas des critères de cartographie, cette description s'attache à présenter leur loi de distribution.

- (2) Une description de la structure spatiale de la variabilité au sein des unités cartographiques (*Chapitre VII*).

Nous employons l'expression de "structure spatiale de la variabilité au sein d'une unité cartographique" pour distinguer la variabilité inter- et intra- plage cartographique et souligner l'existence de variations plus ou moins rapides au sein d'une même plage cartographique.

Nous cherchons également à savoir si les résultats concernant la variabilité spatiale au sein d'une unité cartographique sont généralisables à l'échelle régionale. Pour cela, nous refaisons, dans un autre secteur de l'Ille-et-Vilaine également cartographié, le même type d'étude pour une des trois unités cartographiques (*Chapitre VIII*).

Au préalable, nous présentons une revue bibliographique partant d'études existantes de la variabilité spatiale au sein d'unités cartographiques, pour analyser les méthodes employées et les résultats obtenus (*Chapitre IV*). Cette revue bibliographique permettra de situer nos propres choix d'échantillonnage et de méthodes de traitement (*Chapitre V*).

## Chapitre IV

### UNE REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Notre projet vise à étudier la variabilité de propriétés données du sol au sein d'unités cartographiques. Or la bibliographie disponible traite le plus souvent de la variabilité spatiale du sol au sein d'unités cartographiques.

Les auteurs introduisent donc le concept de "sol". Ce concept fait toujours l'objet de nombreuses discussions dans le monde pédologique (Boulaine, 1982; Fitzpatrick, 1988; Brabant, 1989). Notre propos ici n'est pas de contribuer à cette réflexion et nous admettons que le sol est considéré comme homogène, au sein d'une unité cartographique donnée, au regard des propriétés que le pédologue a choisies et que nous avons précédemment nommées "critères cartographiques".

#### 1. APPROCHE CLASSIQUE ET CRITIQUES FORMULEES A SON EGARD

##### 1.1. L'approche classique

De façon classique, le pédologue situe l'importance de la variabilité du sol au sein des unités cartographiques, en utilisant les notions "d'unités cartographiques simples" ou "d'unités cartographiques complexes". Cette approche a été proposée par exemple par le Soil Survey Manual (1951) et a été reprise dans la partie introductive de la CPCS (1967) en confondant les concepts "d'unités de classification" et "d'unités cartographiques".

Dans le cas d'une unité cartographique simple, le sol est considéré comme homogène au sein des plages cartographiques composant cette unité, au regard des propriétés choisies.

Dans le cas d'une unité cartographique complexe, le pédologue admet regrouper des sols qu'il a reconnus différents. Il peut préciser les relations géographiques existant entre ces sols différents en utilisant les notions d' "association", "juxtaposition", "séquence" et "chaîne" (CPCS, 1967). L'ensemble de ces notions a été largement précisé par Fridland (1974) ou Boulaine (1969; 1978; 1983; 1984) aboutissant à un ensemble de termes permettant de mieux caractériser les relations existant entre des sols différents, au sein d'une même unité cartographique complexe.

La mise en oeuvre pratique de ce cadre conceptuel s'est traduite par un mode de présentation assez constant des unités cartographiques. Sur la carte, les plages cartographiques appartenant à une même unité cartographique sont repérées par un figuré graphique et un code renvoyant à la légende de la carte. Cette légende indique si l'unité cartographique est simple ou complexe et donne un libellé synthétique de l'unité cartographique.

La notice reprend l'ensemble des unités cartographiques: pour chacune de ces unités, elle indique le type de situation où cette unité a été rencontrée et précise les caractéristiques morphologiques et analytiques jugées modales de cette unité. Enfin, elle fournit une caractérisation morphologique et analytique détaillée d'un sol jugé "représentatif" de l'unité cartographique.

##### 1.2 Critiques formulées à l'égard de cette approche.

Les critiques concernent essentiellement trois points:

*(1) Les critères cartographiques permettant de différencier les unités cartographiques sont trop souvent issus d'une classification des sols préexistante.*

La critique porte sur le fait que les critères pris en compte pour construire une classification des sols au niveau d'un pays, voire au niveau mondial ne sont pas nécessairement pertinents pour décrire la variabilité spatiale de la couverture pédologique au niveau d'une région donnée (Webster, 1968; Campbell et Edmonds, 1984; Dudal, 1986).

Ces critiques amènent à une disjonction de plus en plus nette entre la démarche cartographique et la démarche de classification des sols (Baize, 1986). Le cartographe peut choisir les critères de cartographie à l'issue d'une phase de reconnaissance de la zone à cartographier (Beckett et Bie, 1975; Nortcliff, 1978; Oliver et Webster, 1987) ou construire la typologie lui servant à distinguer des unités cartographiques différentes, en appliquant des méthodes d'analyse de données sur les observations qu'il a recueillies (Rayner, 1966; Norris, 1972; Girard, 1983; King, 1986).

*(2) La distinction entre unités cartographiques simples et complexes n'est pas fondée*

La distinction entre ces deux types d'unités repose sur un seuil d'impuretés, une impureté étant considérée comme une observation ne répondant pas aux critères de définition de l'unité cartographique. Le seuil retenu en théorie est celui de 15 % d'impuretés proposé par le Soil Survey Manual (1951). De façon évidente, ce seuil repose sur peu de résultats expérimentaux et de plus le pédologue, sans échantillonnage complémentaire, ne peut vérifier le degré d'impuretés au sein des unités cartographiques qu'il définit (Legros, 1978a, 1978b; Wilding, 1984; Favrot, 1989; Girard et al., 1989).

On reproche de la sorte au cartographe d'être trop imprécis quant à la définition de la variabilité du sol au sein des unités cartographiques, ou d'être trop optimiste quant à l'homogénéité du sol au sein de ces unités. En effet, d'un côté les pédologues utilisent rarement les notions d'unités complexes, surtout à moyenne ou grande échelle, de l'autre les études ayant pris soin de mesurer le degré d'impuretés (par exemple Wilding et al., 1965; Beckett et Webster, 1971) aboutissent toujours à des degrés d'impuretés de plus de 15 %.

Une étude des notices des cartes publiées, surtout les plus récentes, montre pourtant que les cartographes sont conscients de la variabilité spatiale du sol au sein des unités cartographiques et en informent l'utilisateur de la carte. Crahet (1981), dans la notice de la feuille au 1/100.000 de Chartres, fournit un tableau récapitulatif de l'ensemble des unités cartographiques, dans lequel elle précise le degré d'homogénéité de ces unités: elle apporte une indication de type qualitatif (assez homogène, assez hétérogène, hétérogène) concernant l'homogénéité globale de l'unité et précise par ailleurs la variabilité de certaines propriétés. Dans d'autres cartes, les auteurs indiquent les variantes par rapport au type central pouvant exister au sein des unités cartographiques (Edeline, 1981; Hardy et Maucorps, 1984) ou mettent en garde le lecteur sur l'existence d'impuretés (USDA, 1981; Fandos, 1984; Favrot et al., 1987). Notons également l'approche employée dans le cadre de la cartographie au 1/50.000 de la région Centre en France, où des analyses demandées par des agriculteurs et localisées de façon précise, sont employées pour établir les histogrammes de variables physico-chimiques des horizons de surface pour les principaux types de sol rencontrés sur la carte (par exemple, Lafréchoux et al., 1983; Nicoulaud, 1984).

A partir de son expérience de terrain, le cartographe dispose d'indications certes souvent qualitatives, mais effectives de la variabilité au sein des unités cartographiques. C'est ce jugement d'expert que certains auteurs proposent de mieux exploiter pour décrire la variabilité au sein des unités cartographiques (King, 1984; Baize, 1986; Dudal, 1986).



(3) *La notion de "profil représentatif de l'unité cartographique" est douteuse.*

Pour décrire de façon précise une unité cartographique, le pédologue choisit le lieu d'implantation d'un profil qu'il décrit et analyse; ce profil est jugé représentatif de l'unité cartographique.

Cette façon de faire rencontre deux types de critiques:

- les premiers jugent qu'on ne peut réduire la définition d'une unité cartographique à la description d'une succession verticale d'horizons en un point donné, mais qu'il est nécessaire de préciser l'organisation verticale et latérale tridimensionnelle des horizons. Cette conception est fortement représentée en France (Bocquier, 1971; Roussel, 1980; Boulet et al., 1982; Brabant, 1989; Pedro, 1989; Ruellan et al., 1989).
- les seconds, à partir d'une vision plus statistique de la variabilité spatiale des propriétés du sol, notent le biais introduit par l'implantation non aléatoire du profil et par l'impossibilité d'un calcul d'incertitude à partir d'observations et d'analyses menées sur un (ou quelques) profils censés représenter souvent des dizaines d'hectares (Webster, 1977). Girard et King (1988) et King et Girard (1988) proposent de ce fait de remplacer la notion de profil représentatif par celle de "profil de référence", défini en employant des techniques d'analyse de données, et indiquant les caractéristiques modales des horizons et de leur succession, au sein d'une unité cartographique.

Le profil représentatif constitue pourtant souvent la seule information dont on dispose pour certaines propriétés du sol qui ne peuvent être reconnues par un sondage à la tarière (la structure en particulier) ou qui supposent des analyses de laboratoire. Les informations ainsi obtenues sur les profils représentatifs ont de ce fait été utilisées pour interpréter la carte pédologique en terme de comportement du sol (Bouma et al. 1980; Bregt, 1988).

Conclusion:

A travers cette présentation rapide, nous relevons diverses approches visant à mieux caractériser la variabilité spatiale du sol au sein des unités cartographiques; ces approches procèdent souvent de modes de raisonnement scientifique assez différents. On peut citer:

- (1) *L'emploi du jugement d'expert du cartographe* consiste à faire préciser à celui-ci de façon plus détaillée la variabilité au sein des unités cartographiques. Le mode de raisonnement est ici empirique.
- (2) *La description détaillée de la distribution verticale et latérale des horizons au sein des unités cartographiques* correspond à la volonté de mieux décrire l'organisation et l'évolution de la couverture pédologique.
- (3) *La description quantitative, par des procédures statistiques, de la variabilité spatiale au sein des unités cartographique* cherche à obtenir des informations de type statistique (loi de distribution, structure spatiale...) pour caractériser la variabilité au sein d'unités cartographiques, de propriétés qui sont ou ne sont pas des critères de cartographie. Elle suppose l'emploi d'un échantillonnage indépendant et non biaisé.

Nous n'insistons pas sur les différences profondes qui existent entre les modes de raisonnement de type (2) et (3). Chatelain (1979), avec la terminologie qui lui est propre, parle d'opposition entre des tempéraments scientifiques "réalistes" (type 2) et "nominalistes" (type 3). Notre propos n'est pas d'approfondir cette dimension épistémologique du problème et nous avons fait un choix net: nous avons retenu le troisième mode de raisonnement pour lequel nous poursuivons la revue bibliographique.

## 2. DESCRIPTION QUANTITATIVE DE LA VARIABILITE SPATIALE AU SEIN D'UNITES CARTOGRAPHIQUES

Nous essayons de synthétiser les travaux portant sur la description quantitative de propriétés du sol au sein d'unités cartographiques en examinant successivement les objectifs poursuivis, les méthodes d'échantillonnage et de traitement utilisées et enfin les résultats obtenus.

La grande majorité des études s'attachant à une description quantitative de la variabilité au sein des unités cartographiques à partir d'un échantillonnage complémentaire, partent d'un document cartographique établi à une échelle toujours plus grande que le 1/50.000.

### 2.1 Les objectifs poursuivis

Les objectifs peuvent être regroupés sous trois grandes rubriques:

- *mesurer le degré d'impuretés au sein des unités cartographiques*, à savoir le nombre ou la surface occupée par des observations ne répondant pas à la définition centrale de l'unité cartographique (Wilding et al., 1965; Beckett et Webster, 1971; Bascomb et Jarvis, 1976; Steers et Hajek, 1979; Ragg et Henderson, 1980; Wang, 1982; Edmonds et al., 1985; Wösten et al., 1985; Edmonds et Lentner, 1986; Marsman et De Gruijter, 1986; Thomas et al., 1989).

- *décrire la variabilité globale de propriétés choisies au sein d'unités cartographiques*, c'est à dire essayer d'appréhender la loi de distribution de la variable étudiée, calculer sa moyenne et son intervalle de confiance ou encore calculer le nombre d'échantillons nécessaires au calcul d'une moyenne avec une précision donnée.

Les variables étudiées sont très diverses et les auteurs s'intéressent généralement à plusieurs variables (Wilding et al., 1965; Bascomb et Jarvis, 1976; Wright et al., 1979; Ameyan, 1986; Edmonds et Lentner, 1986; Iris, 1986).

Notons que les études qui s'attachent à analyser les corrélations entre différentes variables au sein d'une même unité cartographique sont rares (Banfield et Bascomb, 1976; Nortcliff, 1978).

- *rechercher la structure spatiale de propriétés du sol au sein des unités cartographiques*. Il s'agit dans ce cas de rechercher des indicateurs permettant d'analyser la structure spatiale de la variable étudiée.

Thomas et al. (1989) comparent la variabilité inter- et intra- plages cartographiques d'une même unité cartographique. Wilding et Drees (1983) comparent la variabilité au sein d'unités cartographiques d'une part avec celle observée au sein des séries de sols, d'autre part avec celle observée au niveau de pedons. Wang (1982) compare la variabilité de propriétés de sols au sein d'une unité cartographique en analysant de façon distincte les plages cartographiques de plus de 50 ha et celles de moins de 50 ha. Iris (1986) choisit des secteurs de l'ordre d'un hectare au sein de deux unités cartographiques et analyse la structure spatiale détaillée de la densité apparente au sein de ces deux secteurs en s'appuyant sur les techniques géostatistiques.

Souvent, ces objectifs ne sont pas des buts en soi, mais correspondent à des moyens pour répondre à des questions plus générales: (i) la comparaison de la variabilité au sein des unités cartographiques par rapport à la variabilité au sein de la couverture pédologique (Wilding et al., 1965; McBratney et al., 1983), (ii) la comparaison de différentes méthodes de cartographie des sols (Marsman et De Gruijter, 1986), (iii) l'emploi de la carte pédologique pour spatialiser des modèles hydrologiques (Wösten et al., 1985) ou plus généralement pour extrapoler des études locales sur le fonctionnement du sol.

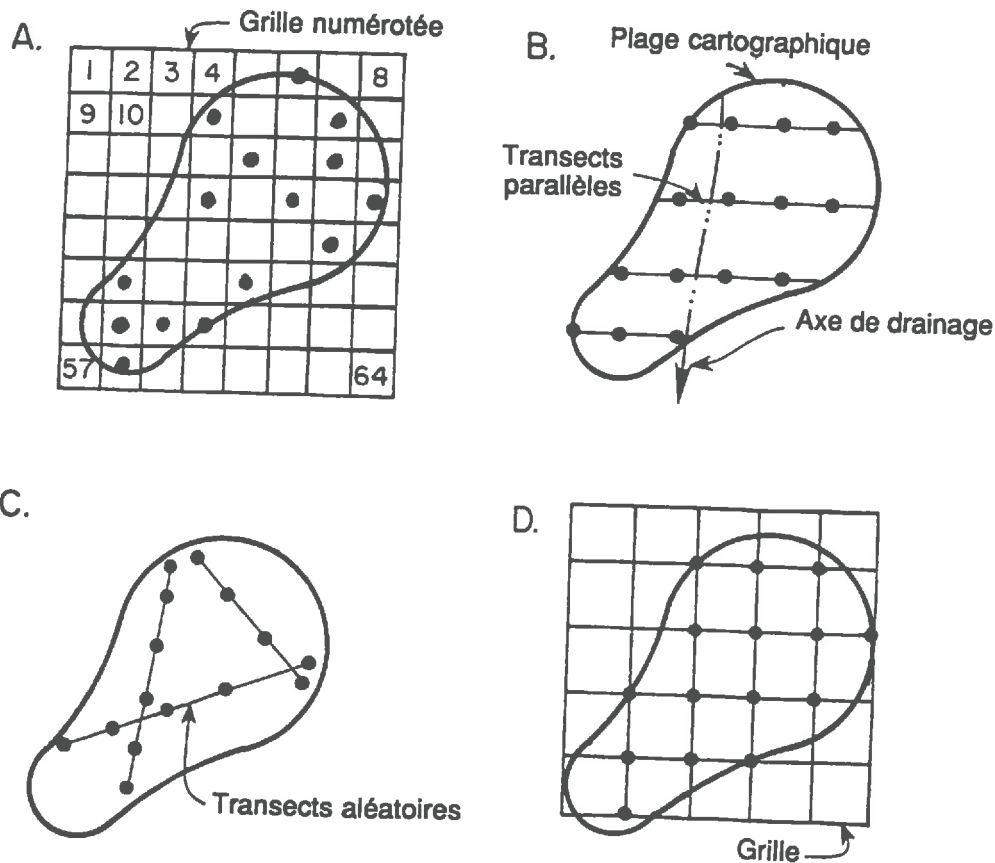
## 2.2 Les techniques d'échantillonnage des unités cartographiques.

Le problème d'échantillonnage posé concerne la population de l'ensemble des plages cartographiques constituant une unité cartographique. Ce nombre de plages cartographiques peut être élevé et représenter plusieurs centaines d'hectares. De plus, il existe souvent de nombreuses unités cartographiques et cette phase d'échantillonnage complète déjà un effort important de recueil de données pour lever la carte. Le nombre d'échantillons pouvant généralement être consacré à de telles études, sera donc pour une unité cartographique assez faible. Gruijter et Marsman (1986) situent ce chiffre de 10 à 100. On conçoit que le problème d'échantillonnage soit a priori délicat.

Nous allons successivement analyser les possibilités d'échantillonnage d'une plage cartographique, puis aborder le problème du choix des plages cartographiques étudiées.

### 2.2.1 L'échantillonnage d'une plage cartographique

Wilding et Drees (1983) présentent différentes possibilités d'échantillonnage d'une plage cartographique et discutent de l'intérêt et des défauts des différentes approches: échantillonnage aléatoire, échantillonnage par transects et échantillonnage systématique aux noeuds d'une grille (Fig. IV.1). D'autres plans d'échantillonnage ont été adoptés, par exemple un plan d'échantillonnage de type stratifié par Youden et Mehlich (1937), Edmonds et al., (1985), Oliver et Webster (1986b) ou Thomas et al., (1989).



**Figure IV.1 :** Principales méthodes d'échantillonnage pour déterminer la composition d'une plage cartographique (tiré de Wilding et Drees, 1983). Les observations (•) sont localisées aléatoirement en (A), le long de transects parallèles en (B), le long de transects d'orientation aléatoire en (C) ou aux noeuds d'une grille régulière en (D). Dans chaque cas, le nombre d'observations est le même.

Il s'agit de choisir un plan d'échantillonnage, mais également de définir le nombre d'échantillons qui seront implantés au sein d'une plage cartographique ou dans certains cas, le nombre de transects retenus, leur orientation aléatoire ou systématique et la distance séparant les points établis sur ces transects...

Les éléments de décision dont il faut tenir compte dans ces choix sont au nombre de cinq:

(1) *le choix dépend en premier lieu de la conception préalable qu'on a de la variabilité au sein de la plage cartographique;*

On peut supposer que la variabilité spatiale au sein de la plage cartographique est distribuée de façon aléatoire ou qu'elle présente une organisation spatiale.

(2) *le choix dépend ensuite des objectifs fixés;*

Si on ne s'intéresse qu'à la variabilité globale au sein de la plage cartographique, c'est-à-dire au calcul des paramètres statistiques des lois de distribution de la variable, on peut retenir un échantillonnage de type aléatoire. Cet objectif peut être fixé soit parce qu'on considère que la variabilité au sein de la plage cartographique est de type aléatoire, soit parce qu'on pense qu'on ne dispose pas de moyens suffisants pour analyser la structure spatiale au sein de la plage cartographique.

Dès lors que l'on cherche à obtenir des indications quant à la structure spatiale de la variable, des échantillonnages par transect, aux noeuds d'une grille ou stratifié sont les plus utilisés.

(3) *le choix dépend ensuite de considérations statistiques;*

Les plans d'échantillonnage n'ont pas tous la même efficacité et il faut en tenir compte. Divers auteurs discutent de ces problèmes (Cochran, 1977; Russo, 1984; Warrick et Myers, 1987).

(4) *le choix dépend du milieu étudié ;*

Le nombre d'échantillons nécessaires pour estimer par exemple la moyenne d'une variable avec une précision donnée est d'autant plus grand que la variance de cette variable est forte; il est par conséquent d'autant plus grand que sa variabilité au sein de la plage cartographique est importante.

(5) *le choix dépend enfin de considérations pratiques.*

Ces considérations pratiques sont liées au coût de l'échantillonnage. Ce coût est d'autant plus élevé que le nombre d'échantillons est grand, que les déplacements requis sur le terrain sont importants et que le besoin de se repérer de façon précise sur le terrain est fréquent. Sur cette dernière considération, on préférera un échantillonnage par transect où l'effort de repérage porte principalement sur un seul point, à un échantillonnage aléatoire où pour tout point, cet effort doit être renouvelé.

Ces remarques expliquent la très grande diversité des méthodes d'échantillonnage employées dans les études publiées. Il apparaît également que la définition d'un plan d'échantillonnage performant suppose la collaboration d'un pédologue et d'un statisticien.

### **2.2.2 Choix des plages cartographiques échantillonnées.**

Les méthodes d'échantillonnage d'une plage cartographique apparaissent assez bien définies et on sait globalement les avantages et les défauts des diverses techniques. Mais, l'échantillonnage d'une unité cartographique suppose également de choisir les plages cartographiques dans lesquelles les techniques précédemment décrites seront appliquées.

Le choix des plages cartographiques retenues dans l'échantillonnage peut être appréhendé suivant deux approches:

- on choisit un nombre très limité de plages cartographiques (1 ou 2 plages) pour lesquelles on réalise une analyse détaillée de la variabilité spatiale des propriétés du sol suivant un des schémas précédemment décrits. Cette démarche permet de concentrer un échantillonnage nécessairement limité sur une surface restreinte et de construire un plan d'échantillonnage permettant une analyse détaillée de la variabilité spatiale au sein des plages cartographiques retenues. De nombreuses études adoptent ce principe (Protz et al., 1968; Campbell, 1978a et b;

Nortcliff, 1978; Wright et Wilson, 1979; Ameyan, 1986; Iris, 1986; Goovaerts et al., 1989; Meirvenne et Hofman, 1989).

Ce choix repose sur l'hypothèse que la variabilité au sein d'une unité cartographique peut être appréhendée à travers la variabilité décrite au sein d'une de ses plages constitutives. De la sorte, on définit par analogie à la notion de "profil représentatif" celle de "plage cartographique représentative". On néglige ainsi la variabilité entre plages cartographiques d'une même unité pour privilégier la variabilité au sein d'une plage cartographique.

- on intègre le choix des plages cartographiques dans la méthode d'échantillonnage.

On considère dans ce cas que la variabilité entre les plages cartographiques existe et qu'il convient d'en tenir compte dans l'échantillonnage.

Cette prise en compte est permise en adoptant des plans d'échantillonnage stratifiés pour lesquels on choisit dans une première étape les plages cartographiques, puis en second lieu l'implantation de points d'échantillonnage au sein des plages cartographiques retenues. Là encore les variantes sont nombreuses.

Wang (1984), Gruijter et Marsman (1986) exposent les principes de deux méthodes d'échantillonnage qui reposent dans une première étape sur un choix aléatoire de plages cartographiques en tenant éventuellement compte de leur surface, puis dans une seconde étape sur la localisation d'un certain nombre de points sur des transects disposés au sein de ces plages cartographiques.

Thomas et al. (1989) choisissent au hasard 5 plages cartographiques. Au sein de chacune de ces plages, ils retiennent aléatoirement 4 sites et en chacun de ces sites, ils observent trois profils sélectionnés au hasard dans un rayon de 7 mètres. Cette méthode d'échantillonnage permet la mise en oeuvre des techniques d'analyse de variance et la comparaison de la variabilité spatiale appréhendée à trois niveaux: au sein des sites, au sein des plages cartographiques et entre les plages cartographiques.

Ces méthodes prennent ainsi en compte la variabilité pouvant exister entre plages cartographiques. La contrepartie réside néanmoins dans le fait que la structure spatiale de la variable au sein d'une plage cartographique est moins bien connue.

*En conclusion de cette revue des différentes techniques d'échantillonnage d'une unité cartographique, trois points doivent être soulignés:*

- le choix d'un mode de raisonnement "statistique" est certes clarifiant, mais il conduit en fait à la possibilité d'utiliser des procédures d'échantillonnage très diverses;
- il n'existe pas de recette et une stratégie d'échantillonnage doit être réfléchie en fonction des objectifs poursuivis. Ces objectifs touchent soit au choix de l'objet scientifique étudié (une plage cartographique donnée ou une population de plages), soit aux présupposés que l'on s'autorise quant à l'organisation spatiale de l'objet choisi;
- cette stratégie d'échantillonnage doit tenir compte aussi des moyens d'exécution disponibles (coût de l'échantillonnage et notamment de son repérage, coût des analyses, ...)

## 2.3 Les résultats obtenus.

Ces résultats concernent les trois grands types d'objectifs que nous avons définis précédemment.

### 2.3.1 La mesure de la pureté au sein des unités cartographiques

La pureté correspond à une mesure de concordance entre des observations effectuées lors d'un retour sur le terrain et la définition de l'unité cartographique étudiée. Le tableau IV.1 synthétise pour quelques études les résultats de différents auteurs. Les plans d'échantillonnage adoptés, souvent différents, et le nombre variable de points de vérification, incitent à la prudence lors de la comparaison de ces résultats.

La mesure de pureté retenue est le pourcentage d'observations respectant strictement l'ensemble des éléments de définition de l'unité cartographique. Il s'agit d'un critère grossier puisqu'il ne tient pas compte de l'importance des écarts par rapport à la définition de l'unité cartographique.

Ces quelques exemples montrent en premier lieu que le critère de pureté, défini de la sorte, est complètement inadapté pour comparer la qualité de cartes établies sur la base de légendes différentes, puisque comme le note Baize (1986), la carte fournissant l'information la plus sommaire sera considérée de la sorte comme la meilleure carte.

Nous retenons trois idées de ce tableau: (i) il semble difficile d'obtenir des cartes présentant des degrés de pureté de l'ordre de 85 % même à grande échelle; (ii) cette pureté apparaît plus ou moins grande selon l'unité cartographique considérée; (iii) le critère de pureté ainsi défini n'est pas assez précis et il faut détailler l'origine des écarts par rapport à la définition de l'unité cartographique (Marsman et de Gruijter, 1986).

Auteurs	Lieu	Echelle de la carte	Nombre d'UC étudiées	Echantillonnage de vérification	Référence utilisée	% d'observations respectant strictement la définition de l'UC
(1) Wilding et al 1985	Ohio Etats-Unis	?	4	aléatoire stratifié	Classification Am. et série Américaine	96 / 85 / 42 / 39 (*)
(2) Ragg et Henderson 1980	Ecosse	1/25.000	4	aléatoire stratifié	Série	53 / 43 / 51 / 66 suivant UC
(3) Edmonds et Lentner 1986	Virginie Etats-Unis	1/24.000	3	aléatoire stratifié	Série	78 / 59 / 19 suivant UC
(4) Marsman et De Gruijter 1986	Gelderland Pays-Bas	1/10.000	toutes UC confondues	transects aléatoires stratifiés	Légende détaillée	8.0 à 10.7 suivant méthode de cartographie
	Gelderland Pays-Bas	1/50.000	toutes UC confondues	transects aléatoires stratifiés	Légende générale	7.4 à 12.5 suivant méthode de cartographie
(5) Thomas et al 1989	Virginie Etats-Unis	1/24.000	1	aléatoire stratifié	Série américaine	58

UC = Unité cartographique

(\*) Pourcentages obtenus suivant la référence retenue: successivement l'Ordre, le Grand Groupe, le Sous Groupe de la 7<sup>ème</sup> Approximation puis la Série

Tableau IV.1: Quelques exemples de mesure de pureté au sein d'unités cartographiques.

### 2.3.2 La variabilité spatiale des propriétés du sol.

Différents auteurs se sont attachés à distinguer les propriétés du sol en fonction de leur variabilité spatiale (Beckett et Webster, 1971; Vauclin, 1982; Wilding, 1984). Pour ce faire, ils se basent sur une compilation des paramètres statistiques de la loi de distribution d'une propriété.

Le critère de différenciation retenu pour juger de la variabilité spatiale plus ou moins grande d'une propriété est le coefficient de variation CV défini comme:

$$CV (\%) = \frac{\text{Ecart-type}}{\text{Moyenne}} \cdot 100$$

Le choix de ce critère s'explique par le fait qu'on peut relier le coefficient de variation au nombre de mesures nécessaires pour estimer la moyenne d'une propriété avec une précision donnée, cela sous les hypothèses d'indépendance spatiale des observations et de normalité de la loi de distribution.

Cette approche amène Wilding (1984, p. 175) aux considérations suivantes quant à la variabilité spatiale des propriétés du sol:

*" Following are a few generalities that should be kept in mind in considering spatial variability in soil surveys.*

*[...]*

- *Spatial variability in soils is closely allied with the nature of the parent material from which soils are formed. Parent materials from least to most variable include: loess, till, fluvial deposits, tectonic rocks and drastically disturbed soil materials.*
- *Static soil properties are less variable than dynamic ones (i.e. organic matter, texture, mineralogy, solum depth, soil color versus hydraulic conductivity, soil moisture content, salt content, microorganisms, exchangeable cations and redox conditions. [...])*
- *Properties which can be closely calibrated to a standard (or quantified in the field) are less variable than those which are qualitative (i.e. texture, color, pH versus structure, consistence, porosity, root abundance, etc.).* "

Ces considérations sont intéressantes pour avoir une idée générale de la variabilité spatiale des propriétés du sol. Elles ne sont pas à notre avis suffisamment généralisables pour construire un plan d'échantillonnage dans un milieu donné, parce que:

- (i) les résultats concernant les coefficients de variation d'une même variable sont différents d'une étude à l'autre. Ils varient par exemple entre 14 % et 53 % pour le taux d'argile de l'horizon de surface dans la liste publiée par Beckett et Webster (1971). Dans le premier cas, le nombre d'échantillons nécessaires pour estimer la moyenne de cette variable à un niveau de signification de 0.95 et avec une précision de 10 %, est de 8. Dans le second cas, ce même nombre est de 108.
- (ii) il est difficile de juger a priori si les conditions requises pour le test précédent à savoir normalité de la variable et indépendance spatiale des observations, sont vérifiées dans le secteur étudié.

### **2.3.3 Structure spatiale au sein des unités cartographiques**

Les études analysant la structure spatiale de propriétés du sol pour des secteurs de quelques hectares sont très nombreuses, en particulier en utilisant les techniques géostatistiques. Vauclin (1982) en a effectué une synthèse et conclut à une impossibilité de généralisation des résultats. Il semble qu'on ne puisse appliquer les résultats concernant la structure spatiale d'une variable en dehors du contexte expérimental dans lequel ils ont été acquis (Burrough, 1983; Voltz, 1986).

Dès lors qu'on s'intéresse à des échelles plus petites, et en particulier à la structure spatiale de propriétés au sein d'unités cartographiques, les résultats disponibles sont rares et les possibilités de généralisation encore plus faibles. On se limitera donc à quelques exemples:

Wilding (1965) utilise un échantillonnage aléatoire stratifié pour comparer la variabilité intra- et inter- plages cartographiques, de propriétés morphologiques du sol. L'utilisation de l'analyse de variance lui permet de conclure à une variabilité significativement moindre au sein des plages cartographiques qu'entre plages cartographiques, cela pour la plupart des propriétés retenues mais non pour la profondeur d'illuviation et l'épaisseur du loess.

Thomas et al. (1989) procèdent suivant une démarche analogue. Pour le taux d'argile de l'horizon Bt, ils montrent que 23 % de la variance totale au sein de l'unité cartographique étudiée provient de différences entre plages cartographiques, 53 % de différences entre des sites d'une même plage cartographique, enfin 24 % de différences entre 3 profils distants de moins de 7 mètres. Pour le taux de saturation de l'horizon BC, ces chiffres sont de 49 %, 36 % et 15 %. Enfin,

pour la profondeur du sol, ils montrent qu'il n'y a pas de différence entre la variabilité inter et intra- plage.

## Conclusion du chapitre IV:

Cette revue bibliographique nous a permis de discuter des différentes approches permettant de caractériser la variabilité spatiale au sein des unités cartographiques, en privilégiant les approches quantitatives supposant un échantillonnage indépendant de vérification.

Les idées forces que nous retenons à l'issue de cette synthèse sont les suivantes:

1. Les résultats obtenus concernant la variabilité au sein des unités cartographiques (pureté, coefficients de variation de propriétés, structure spatiale) ne sont pas généralisables, car ils sont obtenus pour des unités cartographiques définies de façon très diverses, dans des milieux très différents et avec des plans d'échantillonnage très variables. L'analyse des méthodes employées apparaît plus instructive que celle des résultats obtenus.
2. La variabilité des propriétés du sol au sein des unités cartographiques a souvent été sous-estimée. Dans de nombreuses études, cette variabilité apparaît considérable. Il est nécessaire d'informer l'utilisateur de la carte pédologique de son importance. Cela peut se faire en indiquant des indices de pureté et des paramètres caractérisant la loi de distribution de propriétés du sol au sein des unités cartographiques (minimum, maximum, quartiles, moyenne, médiane, écart-type..). C'est ce que nous appelons une description globale de la variabilité spatiale au sein des unités cartographiques. De la sorte, l'utilisateur peut juger si l'existence de cette variabilité spatiale modifie son jugement quant à l'utilisation du sol ou encore peut tester la sensibilité d'un modèle à cette variabilité spatiale.
3. On dispose de peu de références sur la structure spatiale des propriétés du sol au sein des unités cartographiques. Or, à notre avis, de tels renseignements seraient fort utiles dans le cadre de l'exploitation d'une carte pédologique. La variabilité spatiale au sein des unités cartographiques est-elle répartie de façon aléatoire, provient-elle de différences entre les plages cartographiques, provient-elle de variations très rapides au sein d'une même plage cartographique....?

De telles informations concernant la structure spatiale permettraient de juger non pas uniquement des conséquences de la variabilité spatiale, mais permettraient également de compléter ce jugement par une connaissance de l'effort d'échantillonnage à fournir pour obtenir des documents cartographiques plus précis ou répondant à un degré de précision donné.



## Chapitre V

### MATERIEL ET METHODES D'ETUDE

Nous présentons successivement au cours de ce chapitre les unités cartographiques étudiées, la stratégie d'échantillonnage employée, les propriétés du sol que nous avons retenues et enfin les méthodes d'expression des résultats.

#### 1. LES UNITES CARTOGRAPHIQUES ETUDIEES

Nous avons choisi trois unités cartographiques au sein desquelles nous essayons de quantifier la variabilité spatiale. Les unités cartographiques présentant la plus grande extension spatiale, à l'exclusion des zones de bas-fonds (Tab. I.2, p.11), ont été retenues. Il s'agit des unités cartographiques dont les codes sont les suivants et dont nous rappelons la signification (*Annexes A*):

- N.B4* : Sol brun (B) sur schiste briovérien (N), d'une profondeur de 40 à 60 cm (4), sans tache d'oxydo-réduction (.)
- R3B4*: Sol brun (B) sur grès schisteux (R), d'une profondeur comprise entre 40 et 60 cm (4), avec la présence de taches d'oxydo-réduction peu abondantes à plus de 40 cm (3)
- O.B4*: Sol brun (B) sur schiste d'Angers (O), d'une profondeur de 40 à 60 cm (4) et sans tache d'oxydo-réduction (.)

Des "profils jugés représentatifs" de ces unités cartographiques sont donnés en Annexes B.

##### 1.1 Rattachement à des systèmes taxonomiques

Si on adopte la démarche du Référentiel Pédologique Français (RPF, 1990), les profils représentatifs de ces trois unités cartographiques peuvent être rattachés aux références suivantes:

- pour le profil représentatif de l'unité *N.B4*  
BRUNISOL MESOSATURE, cultivé, de schiste briovérien
- pour le profil représentatif de l'unité *R3B4*  
BRUNISOL MESOSATURE rédoxique, mésosaturé en surface, cultivé, de grès schisteux
- pour le profil représentatif de l'unité *O.B4*  
BRUNISOL MESOSATURE, cultivé, de schiste ardoisier

Dans le cadre de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975), ces trois profils peuvent être qualifiés de "*Dystric Eutrochrept*" (*N.B4*), "*Aquic Eutrochrept*" (*R3B4*) et "*Dystric Eutrochrept*" (*O.B4*).

La distinction sur le terrain, même à la tarière, de ces trois unités cartographiques ne pose pas de façon générale de problèmes, malgré leur proximité dans les systèmes taxonomiques.

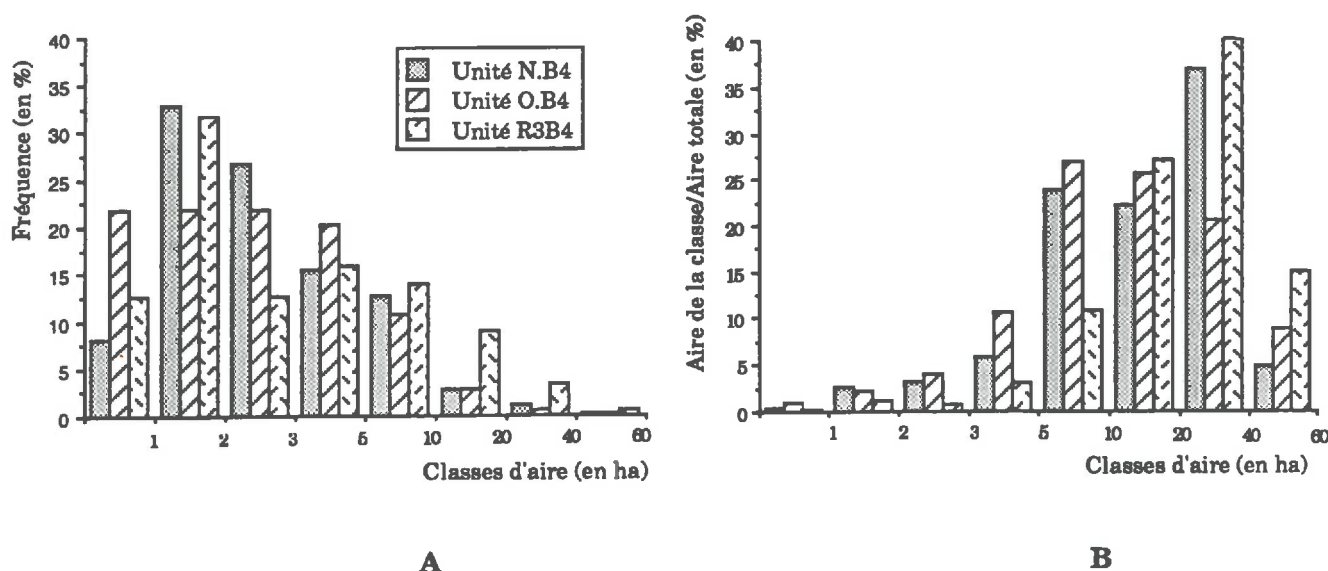
## 1.2 Superficie des plages cartographiques constitutives de ces unités

Pour définir un plan d'échantillonnage permettant l'analyse de la variabilité intra-unité cartographique, il est important au préalable de connaître le nombre et l'aire des plages constitutives d'une unité cartographique.

Sur l'ensemble du secteur d'étude décrit au chapitre I, l'unité *N.B4* est représentée par 106 plages cartographiques totalisant une superficie de 910 ha; l'unité *R3B4* est représentée par 52 plages totalisant 695 ha; l'unité *O.B4* est représentée par 65 plages totalisant 327 ha.

L'histogramme de l'aire des plages cartographiques de chacune des unités (Fig. V.1.A) montre la prédominance en terme d'effectifs, de plages cartographiques de petites tailles inférieures à 5 ha.

Pour l'unité cartographique *N.B4* par exemple, 8 % des plages cartographiques font moins d'un hectare, 33 % ont une aire comprise entre 1 et 2 hectares, 27 % ont une aire comprise entre 2 et 3 hectares et 15 % ont une aire comprise entre 3 et 5 hectares. Ainsi, 82 % des plages cartographiques de l'unité *N.B4* ont une aire inférieure à 5 ha.



**Figure V.1:** Analyse de l'aire des plages constitutives des trois unités cartographiques étudiées.  
 A: Histogramme de l'aire des plages cartographiques regroupées en 7 classes d'aire  
 B: Pourcentage de l'aire totale de l'unité cartographique occupé par les plages cartographiques d'une classe d'aire donnée.

Par contre, ce sont les plages cartographiques de plus de 5 ha qui contribuent le plus fortement à l'aire totale d'une unité cartographique (Fig. V.1.B). Si on considère successivement pour l'unité *N.B4* les plages cartographiques comprises entre ] 5 - 10] ha, ]10 - 20] ha, ]20 - 40] ha et ]40 - 60] ha, on remarque que ces différentes classes représentent respectivement 24 %, 22 %, 37 % et 5 % de l'aire totale de l'unité, soit de façon cumulée 88 % de l'aire totale.

*Ainsi, le nombre fortement prédominant des plages cartographiques de moins de 5 ha ne correspond pas à une proportion importante de l'aire totale de l'unité cartographique. Ce sont au contraire les plages cartographiques de plus de 5 ha qui représentent, pour les trois unités cartographiques, plus de 80 % de leur aire totale.*

*Ce résultat a fortement influencé le choix de notre stratégie d'échantillonnage au sein des unités cartographiques. En effet, il nous incite à adopter un plan d'échantillonnage, pour lequel la probabilité d'une plage cartographique d'être échantillonnée est d'autant plus grande que son aire est grande.*

*Au vu de ces résultats, on a choisi également de ne pas tenir compte des plages cartographiques d'une superficie inférieure à 2 ha, cela pour pouvoir comparer des points distants de 100 mètres au sein d'une même plage cartographique.*

## **2. STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE.**

Rappelons en premier lieu les objectifs que nous cherchons à atteindre:

- décrire la variabilité globale de propriétés du sol au sein de chacune des unités cartographiques;
- obtenir des informations sur la structure spatiale des propriétés au sein des unités cartographiques.

### **2.1 Description de la méthode d'échantillonnage.**

La stratégie d'échantillonnage que nous avons adoptée est schématisée par la figure V.2. Cette stratégie comporte deux étapes principales (Walter, 1989a):

#### **2.1.1 Le choix de 30 points localisés au sein des plages cartographiques d'une unité.**

Sur la carte pédologique de l'ensemble du secteur étudié, nous disposons un support transparent comportant une grille de pas 150 mètres et numérotée suivant l'abscisse et l'ordonnée. Dans notre cas, cette grille comporte 90 noeuds suivant l'abscisse et 70 noeuds suivant l'ordonnée.

Nous choisissons de façon aléatoire un couple  $(x_0, y_0)$ ,  $x_0$  étant compris entre 1 et 90,  $y_0$  étant compris entre 1 et 70. Ce couple  $(x_0, y_0)$  nous permet de repérer sur la grille la position d'un noeud. Si le point ainsi repéré appartient à une plage cartographique de plus de 2 ha de l'une des unités étudiées, nous retenons ce point. Si ce point correspond à une zone perturbée repérable sur la carte (route, haies...), nous le déplaçons de 30 mètres dans une direction aléatoire avec la contrainte de rester au sein de la plage cartographique.

Nous répétons cette démarche jusqu'à l'obtention de la localisation de trente points pour chacune des unités cartographiques. De plus, nous définissons pour chacune des unités deux points que nous tenons en réserve; ces deux points sont utilisés quand lors du retour sur le terrain, nous constatons une modification très importante du milieu par rapport au document cartographique (travaux de terrassement ...).

On notera qu'une même plage cartographique peut être retenue plusieurs fois et que sa probabilité d'être échantillonnée est d'autant plus grande que son aire est grande.

Cette première étape est faite au bureau. La figure V.3 indique, pour chacune des trois unités cartographiques, la localisation des trente points obtenus à l'issue de cette étape. On remarque que ces trente points proviennent, respectivement pour les unités *N.B4*, *R3B4* et *O.B4*, de 26, 24 et 23 plages différentes.

### 2.1.2 Le choix de 3 points supplémentaires par pas successifs de 100, 25 et 5 mètres.

L'étape suivante part de chacun des trente points ainsi définis au sein de chacune des unités cartographiques.

Considérons l'un de ces points. On tire de façon aléatoire un nombre compris entre 1 et 360, indiquant une direction en degrés pouvant être repérée sur le terrain grâce à une boussole. Le point distant de 100 mètres dans cette direction est retenu dans l'échantillonnage, s'il appartient toujours à la même plage cartographique et s'il n'est pas dans une zone perturbée (routes, haies...). Dans le cas contraire, on refait un nouveau tirage aléatoire de la direction jusqu'à l'obtention d'un point satisfaisant ces conditions.

On procède de même pour obtenir deux nouveaux points distants de 25 mètres et 5 mètres, à partir du point choisi dans l'étape précédente (Fig. V.2).

Cette deuxième phase du choix des points échantillonnés est effectuée directement sur le terrain et elle suppose l'emploi d'une calculatrice disposant d'un générateur de nombres aléatoires, d'une boussole, d'un topofil, des cartes pédologiques, topographiques et des photos aériennes.

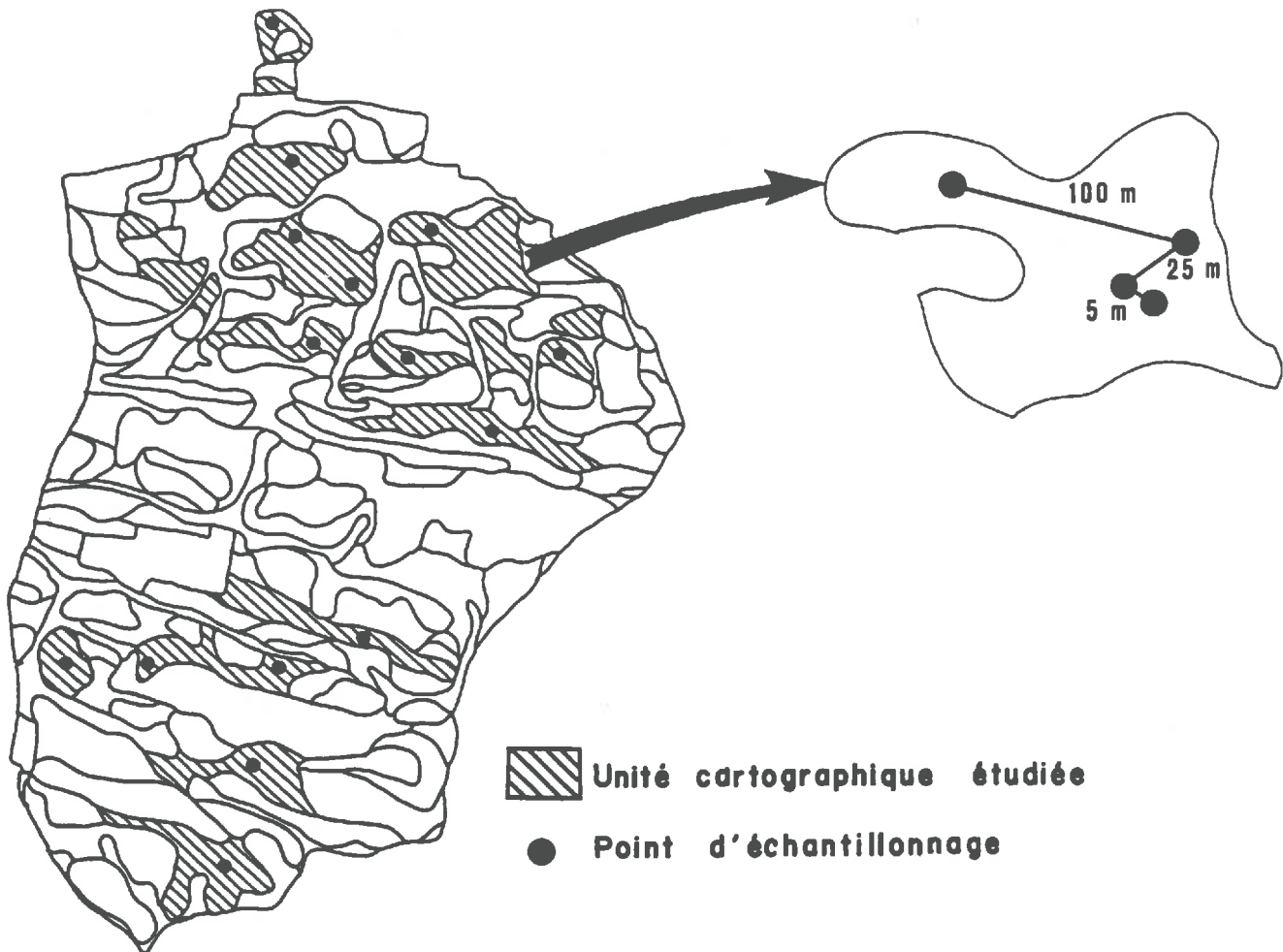


Figure V.2 : Schématisation de la stratégie d'échantillonnage d'une unité cartographique.

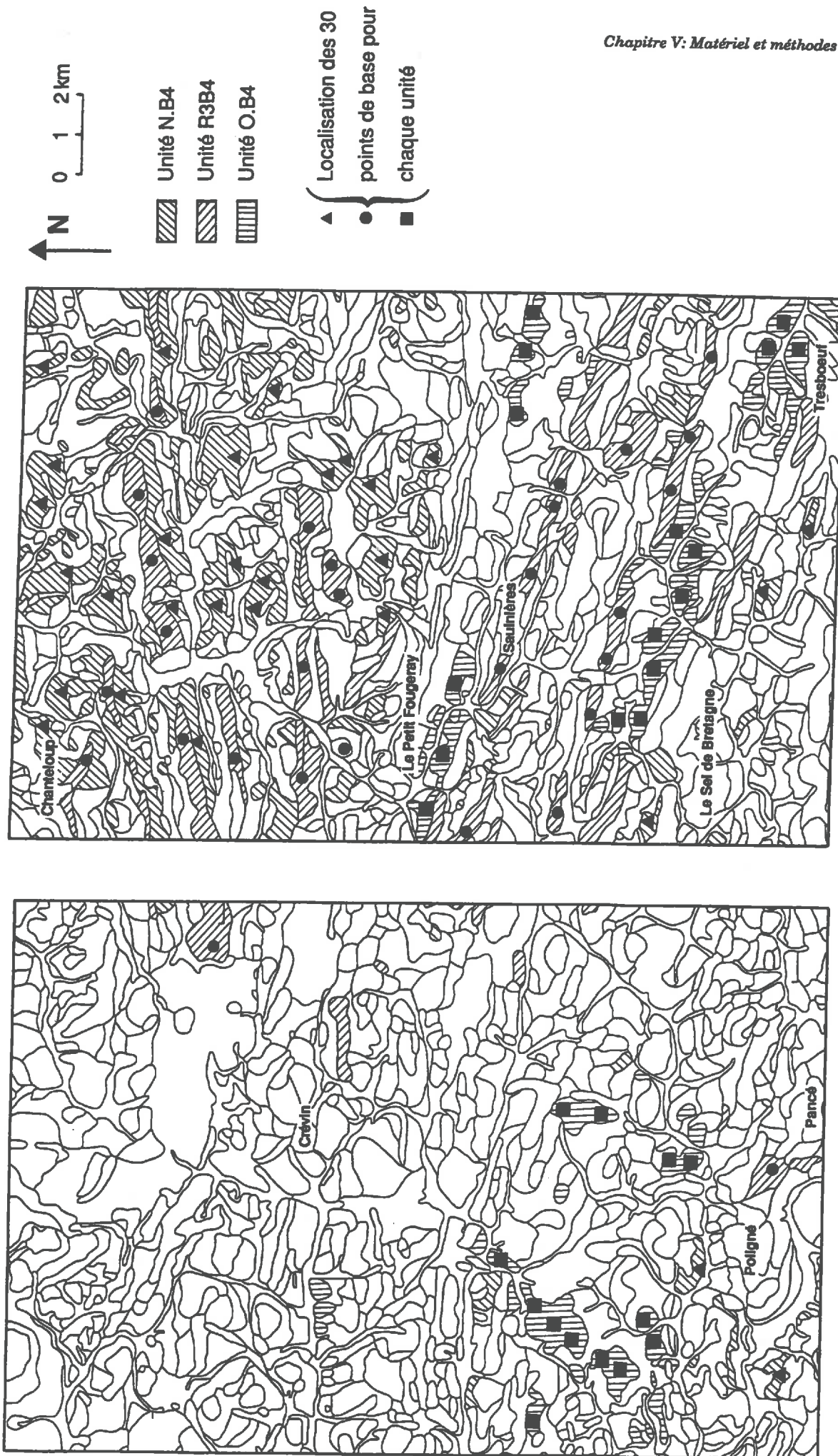


Figure V.3: Localisation des 30 points d'échantillonnage de chacune des unités cartographiques définies à l'issue de la première phase de l'échantillonnage

A l'issue de la phase de définition du plan d'échantillonnage, nous disposons pour chacune des unités cartographiques de la localisation de 120 points tels que:

- 30 couples de points sont distants de 5 mètres
- 30 couples de points sont distants de 25 mètres
- 30 couples de points sont distants de 100 mètres
- 16 fois le nombre de combinaisons de 30 objets pris deux à deux, soit 6960 couples de points, sont distants de plus de 100 mètres et appartiennent dans la majorité des cas à des plages cartographiques différentes.

## 2.2 Pourquoi cette méthode ?

Cette méthode d'échantillonnage d'une unité cartographique est originale et n'a pas à notre connaissance été employée. Elle est néanmoins proche de celle adoptée par Youden et Mehlich (1937). Son intérêt principal réside dans le fait qu'elle permet d'analyser la structure spatiale de propriétés du sol au sein d'une unité cartographique, en tenant compte de la variabilité inter-plages cartographiques.

En effet, les couples de points distants de 5, 25 et 100 mètres au sein d'une plage cartographique doivent nous permettre de mettre en évidence des variations plus ou moins rapides des propriétés du sol au sein d'une même plage cartographique. Les points distants de plus de 100 mètres et appartenant dans la plupart des cas à des plages cartographiques différentes, sont destinés à décrire la variabilité inter-plages cartographiques ou se produisant à grande distance au sein d'une plage cartographique de grande superficie.

Par rapport à des échantillonnages aléatoires stratifiés, cette méthode présente l'avantage de ne pas aboutir à un nombre de couples de points séparés d'une distance faible, très supérieur au nombre de couples de points séparés d'une distance plus importante. En effet, on attend en général que deux observations proches se ressemblent davantage que deux observations éloignées. Il ne nous a donc pas semblé intéressant de concentrer l'effort d'échantillonnage sur les courtes distances, aux dépens de distances plus importantes.

La faiblesse de la méthode réside dans le fait qu'elle ne distingue pas la variabilité entre les plages cartographiques de celle se produisant à grande distance au sein d'une même plage de grande superficie.

## 3. LES PROPRIETES DU SOL ETUDIEES.

En chaque point localisé suivant la méthode précédemment décrite, une observation du sol à la tarière est effectuée et l'horizon de surface est échantillonné selon les modalités suivantes:

- trois observations sont effectuées dans un mètre carré et l'observation la plus profonde est décrite. Le risque de bloquer sur un caillou ou une pierre explique cette pratique qui n'est pas appliquée dès lors qu'une observation a pu être faite jusqu'à 1.20 mètres, longueur de la tarière;
- l'observation retenue fait l'objet d'une description de l'environnement du site (topographie, culture, aménagement, abondance et nature de la pierrosité de surface) et d'une description morphologique des horizons distingués à l'aide des variables suivantes: haut et bas de l'horizon en cm; humidité; texture estimée au doigt; couleurs de la matrice et des taches relevées grâce à une charte Munsell; nature et abondance des taches; abondance des éléments grossiers; compacité de l'horizon; nature, abondance, dimension et dureté des concrétions; abondance des racines.

L'ensemble de ces observations a été relevé en utilisant les modalités décrites dans le glossaire STIPA (Bertrand et al., 1984) et en utilisant des fiches de sondage basées sur les fiches de description STIPA;

- cette même observation retenue est interprétée sur le terrain en utilisant les critères de cartographie ayant servi à l'élaboration de la carte pédologique et un code en quatre critères lui est affecté (Annexes A);
- un échantillon est prélevé à une profondeur comprise entre 10 et 20 cm et fait l'objet des mesures analytiques suivantes: granulométrie en cinq fractions, carbone organique suivant la méthode Anne et capacité d'échange cationique (CEC) suivant la méthode Metson.

## 4. EXPRESSION DES RESULTATS

Nous présentons ici deux aspects du traitement des données et de l'expression des résultats qui nous semblent peu courants, à savoir les mesures de pureté au sein des unités cartographiques et l'expression de la structure spatiale de propriétés du sol permise par notre échantillonnage.

Nous utiliserons par ailleurs au cours des chapitres suivants des méthodes statistiques classiques (analyse des lois de distribution, comparaison de médiane, ...) et des méthodes multidimensionnelles d'analyse de données, soit un ensemble de techniques qui nous semblent à présent suffisamment courantes en science du sol pour ne pas nécessiter de présentation préalable.

### 4.1 Analyse de la variabilité des critères cartographiques par des mesures de pureté.

On a vu lors de la revue bibliographique que la pureté d'une unité cartographique correspondait à une mesure de la concordance entre la définition d'une unité cartographique et des observations faites de façon indépendante en son sein. Pour comparer diverses études, nous avons pris comme estimation de cette pureté le pourcentage d'observations satisfaisant strictement à la définition de l'unité cartographique. Cette méthode n'est pas très satisfaisante puisqu'elle ne permet pas d'interpréter les résultats.

Marsman et De Gruijter (1985) proposent différents indices de pureté que nous utiliserons ici.

Considérons une unité cartographique  $k$  définie par  $m$  critères de cartographie.

#### 4.1.1 Indice de pureté partielle

L'idée est de mesurer pour un critère cartographique  $j$  donné, le nombre de fois où la définition de l'unité cartographique est respectée. Pour cela, considérons une fonction binaire  $p$  telle que pour tout point de vérification  $i$  :

$$\begin{cases} p_{ijk} = 1 & \text{si le point } i \text{ satisfait à la définition du critère } j \text{ pour l'unité cartographique } k \\ p_{ijk} = 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Si  $n$  observations de vérification ont été effectuées au sein de l'unité  $k$ , on peut définir la moyenne des valeurs de  $p$  en ces observations. On définit de la sorte la "pureté partielle de l'unité cartographique  $k$  pour le critère  $j$ ", notée  $\bar{p}_{jk}$  :

$$\bar{p}_{jk} = 1/n \sum_{i=1}^n p_{ijk}$$

De la sorte,  $\bar{p}_{jk}$  est égal à 1 si toutes les observations satisfont à la définition de l'unité cartographique par rapport au critère  $j$ ; il est égal à 0 si toutes les observations n'y satisfont pas.

Dans notre cas, nous sommes amenés à définir 4 puretés partielles correspondant aux quatre critères cartographiques: pour le type de substrat, pour la classe d'hydromorphie, pour le développement de profil et pour la profondeur du sol.

#### 4.1.2 Pureté moyenne et pureté stricte d'une unité cartographique

##### a) La pureté moyenne

La pureté moyenne d'une unité cartographique  $k$  est définie par la moyenne arithmétique des puretés partielles des critères cartographiques. Avec les 4 critères cartographiques précédemment cités, la pureté moyenne  $\bar{P}_m k$  de l'unité  $k$  est calculée par:

$$\bar{P}_m k = 1 / 4 \sum_{j=1}^4 \bar{p}_{jk}$$

##### b) La pureté stricte

La pureté stricte d'une unité cartographique correspond à la proportion d'observations respectant strictement la définition de l'unité cartographique. Soit  $p_{sik}$  une fonction binaire telle qu'en tout point d'observation  $i$  de l'unité cartographique  $k$ :

$$\begin{cases} p_{sik} = 1 & \text{si le point } i \text{ satisfait à tous les critères cartographique de l'unité } k \\ p_{sik} = 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La pureté stricte  $\bar{P}_s k$  de l'unité  $k$  est par définition égale à la moyenne arithmétique des valeurs  $p_{sik}$ :

$$\bar{P}_s k = 1 / n \sum_{i=1}^n p_{sik} \quad \text{où } n \text{ est le nombre d'observations}$$

Le critère de pureté stricte est bien plus sévère que celui de pureté moyenne.

Dans un cas schématique, considérons que l'ensemble des observations fournissent des valeurs de profondeur du sol différentes de celles attendues d'après la définition de l'unité cartographique et que par contre, pour les trois autres critères, cette définition est vérifiée pour toutes les observations.

Dans un tel schéma, la pureté moyenne sera de 0.75 traduisant le fait que les trois quarts de l'information sont exactes, alors que la pureté stricte sera de 0, traduisant le fait que la définition de l'unité cartographique n'est pas respectée dans son intégralité.

#### Conclusion:

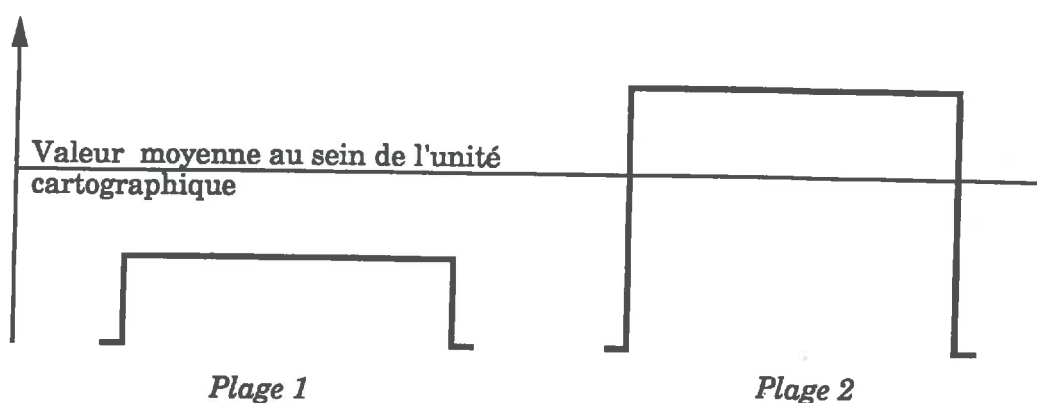
En adoptant différentes mesures de pureté, nous décrivons la variabilité des critères cartographiques au sein des unités cartographiques. A priori, on attend pour ces critères cartographiques une variabilité moindre au sein des unités cartographiques qu'au sein de la couverture pédologique dans son ensemble.



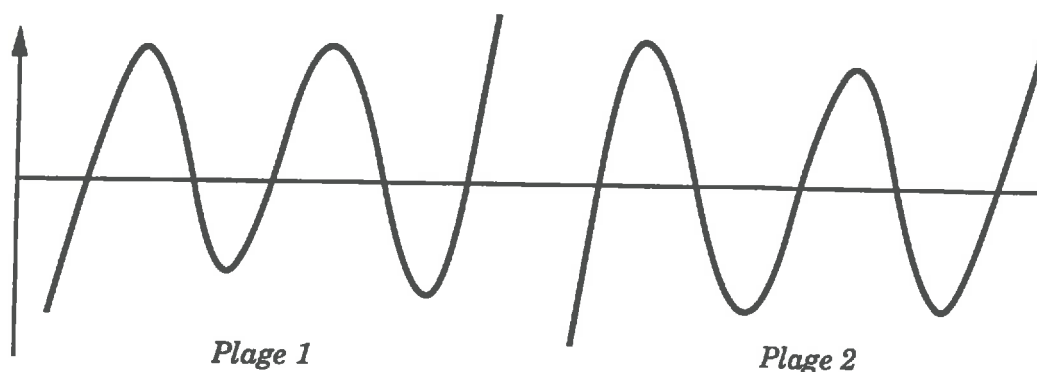
#### 4.2 Expression de la structure spatiale de propriétés du sol au sein des unités cartographiques.

Quand nous cherchons à décrire la structure spatiale d'une propriété au sein d'une unité cartographique, nous voulons d'une part comparer la variabilité intra- et inter- plages cartographiques, nous voulons d'autre part comparer la variabilité entre des observations distantes de 5, 25 et 100 mètres au sein d'une même plage cartographique.

Pour illustrer l'intérêt d'une telle approche, considérons la figure V.4. Elle représente deux cas schématiques de variabilité spatiale d'une propriété au sein d'une même unité cartographique. Dans ces deux cas, les paramètres de moyenne et de variance au sein de l'unité cartographique sont du même ordre de grandeur. Dans le cas A, le nombre d'échantillons nécessaires, pour obtenir pour la plage cartographique 1 une meilleure estimation que la moyenne générale de l'unité, sera de toute évidence faible. Dans le cas B, ce nombre sera élevé.



**Cas A: La propriété étudiée est stable au sein d'une même plage cartographique, mais varie entre les plages 1 et 2.**



**Cas B: La propriété étudiée varie fortement au sein d'une même plage cartographique.**

**Figure V.4:** Deux exemples schématiques de variabilité spatiale d'une propriété au sein d'une unité cartographique.

Ce type de résultat nous semble important pour juger des conséquences de la variabilité spatiale d'une propriété au sein d'une unité cartographique. L'analyse de la structure spatiale au sein d'une unité cartographique doit nous permettre d'aboutir à ces conclusions.

Nous basons l'expression de la structure spatiale des propriétés du sol sur le calcul de la semi-variance (§ II.1.1.1, p. 17) pour différentes distances séparant les points échantillonnés au sein d'une même unité cartographique.

Pour des distances de 5, 25 et 100 mètres, ce calcul est effectué à partir des 30 couples de points dont on dispose pour chacune de ces distances.

Pour des distances supérieures à 100 mètres, les points ne sont pas répartis de façon régulière et il nous faut accepter une certaine tolérance dans le choix des couples de points par rapport à une distance donnée. Nous avons retenu une tolérance de 100 mètres. Le calcul de la semi-variance pour une distance théorique de 500 mètres tient donc compte des couples de points distants de 400 à 600 mètres; le choix des couples étant fait sur cette base, on tient compte de la distance moyenne séparant réellement ces points.

Pour s'assurer que les résultats de semi-variance pour des distances supérieures à 100 mètres sont robustes, on ne retient la semi-variance pour une distance donnée que si elle a été calculée à partir d'un nombre de couples de points supérieur à 200. Outre une assurance de robustesse, le fait de fixer ce seuil de 200 couples a également pour effet dans le cas étudié, de ne conserver que des semi-variances calculées à partir de couples de points situés dans des plages cartographiques différentes. De la sorte, les semi-variances pour des distances supérieures à 100 mètres sont révélatrices de la variabilité entre les plages cartographiques.

Le résultat de ces calculs peut être synthétisé sous une forme analogue au variogramme classique: pour cela, on représente la semi-variance en fonction du logarithme népérien de la distance séparant les points. Sur ce même graphique, on peut représenter la variance calculée à partir de la population totale. La figure V.5 fournit un exemple de ce mode de représentation pour la profondeur du sol.

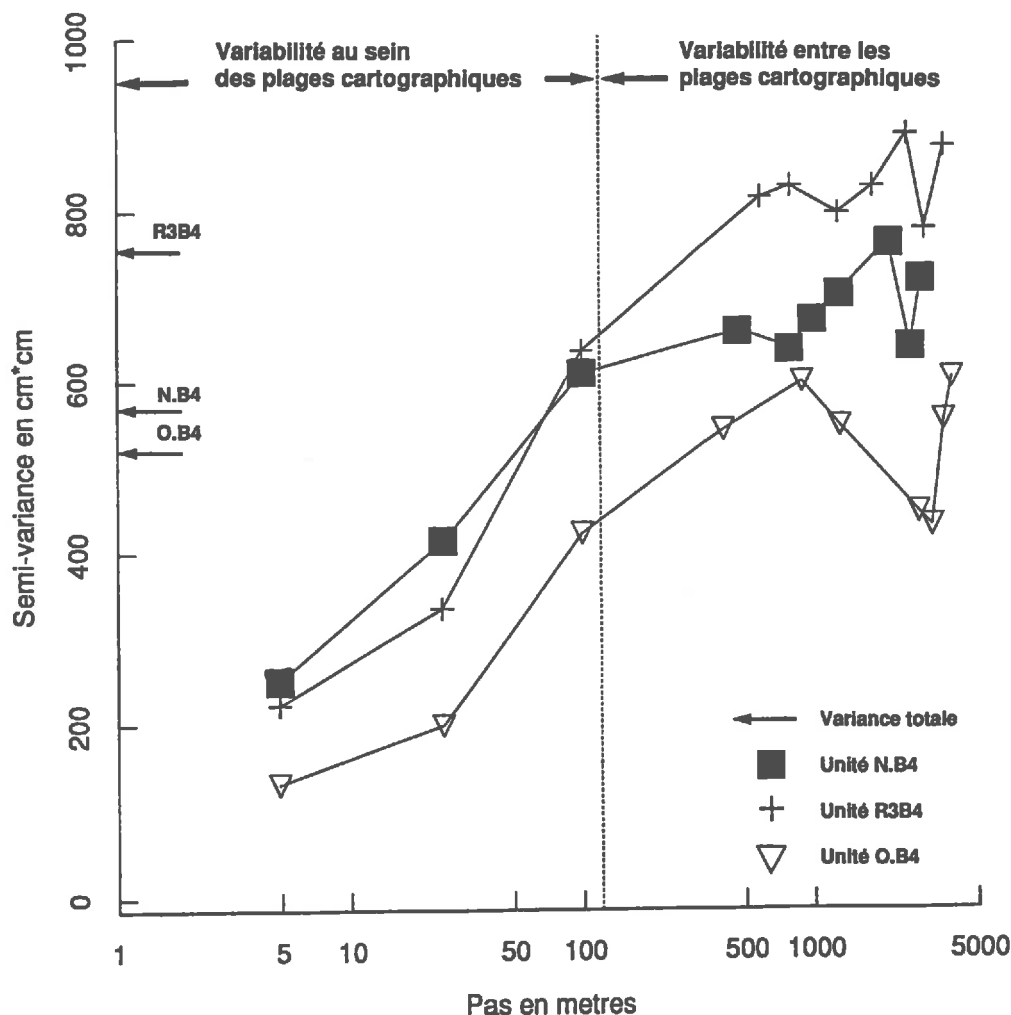


Figure V.5: Variogrammes de la profondeur du sol pour les trois unités cartographiques étudiées.

On peut de la sorte analyser l'évolution de la semi-variance en fonction de la distance séparant les points au sein d'une unité cartographique et également comparer différentes unités cartographiques.

Pour la profondeur du sol par exemple, il est frappant de constater: (i) l'importance de la semi-variance pour le pas le plus court étudié qui est de 5 mètres; (ii) le fait que la semi-variance observée pour un pas de 100 mètres est presque maximale. Pour cette variable, l'essentiel de la variabilité spatiale au sein de l'unité cartographique peut donc être rencontrée au sein d'une même plage cartographique dès que l'on parcourt une distance de 100 mètres. On retrouve là la difficulté déjà évoquée d'une cartographie précise de la profondeur du sol.

A partir des variogrammes ainsi définis, nous comptons comparer, dans une plage cartographique, la variabilité d'une propriété pour des distances courtes (5 ou 25 mètres) à celle observée pour une distance moyenne (100 mètres); nous voulons également repérer l'effet d'un changement de plage cartographique.

L'échantillonnage nécessaire pour obtenir, en un point ou une surface donnée de l'unité cartographique, une estimation plus précise que celle fournie par un paramètre de position (moyenne, médiane...) calculé pour l'ensemble de l'unité cartographique, sera d'autant plus important que la variabilité sera importante pour de courtes distances au sein d'une même plage cartographique. Cette notion est intuitive; elle peut également être démontrée sur le plan théorique (Mc Bratney et Webster, 1981 a et b).

## Conclusion du chapitre V:

A l'issue de ce chapitre, il est important de récapituler les choix effectués en fonction de nos objectifs, du milieu étudié et des moyens disponibles:

- (1) trois unités cartographiques sont retenus sur la base de leur extension spatiale;
- (2) la procédure d'échantillonnage de ces unités cartographiques tient compte de la superficie des plages cartographiques et exclue les plages cartographiques de moins de 2 hectares;
- (3) cette procédure d'échantillonnage permet l'analyse de la variabilité spatiale de propriétés du sol au sein d'une unité cartographique pour des points distants de 5, 25, 100 et plus de 100 mètres; de la sorte, on peut comparer la variabilité spatiale se produisant à courte distance au sein d'une même plage cartographique et la variabilité spatiale induite par un changement de plage cartographique;
- (4) les propriétés étudiées sont les critères cartographiques du pédologue, des caractéristiques morphologiques des horizons rencontrés et des propriétés analytiques de l'horizon de surface.

*La présentation des résultats obtenus comprend par la suite trois chapitres:*

- dans le chapitre VI, nous décrivons de façon globale la variabilité spatiale au sein des trois unités cartographiques. Dans ce cas, nous considérons l'unité cartographique comme un tout, sans nous soucier de l'origine de la variabilité en son sein. Cela correspond à l'attitude adoptée quand on utilise la carte pédologique à des fins d'application et que l'unité cartographique est l'unité spatiale sur laquelle repose l'interprétation;
- dans le chapitre VII, nous décrivons la structure spatiale de la variabilité précédemment constatée. Nous cherchons alors à définir les conditions d'obtention d'un document cartographique plus précis.
- dans le chapitre VIII, nous testons les possibilités de généralisation à l'échelle régionale des résultats acquis pour les propriétés analytiques de l'horizon de surface. Pour cela, nous refaisons le même type d'étude pour l'unité cartographique O.B4 dans un autre secteur du département d'Ille-et-Vilaine.

## Chapitre VI

### DESCRIPTION GLOBALE DE LA VARIABILITE AU SEIN DES UNITES CARTOGRAPHIQUES

Au cours de ce chapitre, nous présentons les résultats concernant la variabilité spatiale au sein des unités cartographiques, des propriétés du sol que nous avons retenues.

Le plan adopté dans cette présentation comprend quatre grands points:

1. *Pour les critères cartographiques*, nous présentons les indices de pureté obtenus pour chaque unité cartographique. Nous précisons ensuite la nature des "impuretés" et nous comparons les trois unités cartographiques.
2. *Pour les propriétés analytiques de l'horizon de surface*, nous fournissons un ensemble de critères statistiques permettant de décrire leur variabilité au sein d'une unité cartographique. Nous comparons ensuite les résultats des trois unités cartographiques pour savoir s'ils correspondent à des populations statistiquement différentes. Enfin, nous situons ces résultats dans le cadre général de la variabilité de ces propriétés à l'échelle départementale.
3. *L'étude des relations entre la pureté des unités cartographiques et la variabilité des propriétés analytiques* doit nous permettre de juger si l'existence d'impuretés est à l'origine de la variabilité des propriétés analytiques au sein d'une unité cartographique.
4. *Dans une discussion*, nous illustrons les conséquences de la variabilité intra-unité cartographique en matière d'utilisation de la carte pédologique.

#### 1. INDICES DE PURETE AU SEIN DES TROIS UNITES CARTOGRAPHIQUES

##### 1.1 Les résultats

Pour les trois unités cartographiques, on a calculé les indices de puretés partielles, pureté moyenne et pureté stricte définis au chapitre V. Le tableau VI.1 regroupe l'ensemble de ces résultats.

Pour le type de substrat et le développement de profil, les puretés partielles sont comprises entre 84 % et 100 %, soit des niveaux de pureté élevés quelle que soit l'unité cartographique considérée.

Pour la classe d'hydromorphie, la pureté partielle est de l'ordre 70-80 % pour les unités *NB4* et *OB4*, qui sont des unités cartographiques ne présentant pas de traces d'hydromorphie. Pour l'unité *R3B4*, présentant par définition des taches d'oxydo-réduction peu abondantes à partir de 40 cm, la pureté partielle de la classe d'hydromorphie est plus faible, puisqu'elle est de 25 %.

Pour la profondeur du sol enfin, les puretés partielles sont comprises entre 31 et 37 %, la pureté la plus faible étant comme précédemment obtenue pour l'unité *R3B4*.

La pureté moyenne correspond à la moyenne des 4 puretés partielles: ses valeurs comprises entre 61 % et 77 % prennent donc à la fois en compte les puretés partielles élevées pour le substrat et le développement de profil, et celles plus faibles de la classe d'hydromorphie et surtout de la profondeur du sol. La pureté moyenne de l'unité *R3B4* est la plus faible.

Unités cartographiques / Mesures de pureté (%)	Unité N.B4	Unité R3B4	Unité O.B4
<b>Puretés partielles</b>			
Substrat	96	97	100
Développement de profil	97	92	84
Classe d'hydromorphie	78	25	70
Profondeur du sol	39	31	37
<b>Pureté moyenne</b>	<b>77</b>	<b>61</b>	<b>73</b>
<b>Pureté stricte</b>	<b>37</b>	<b>12</b>	<b>32</b>

*Tableau VI.1: Puretés partielles, moyennes et strictes estimées pour les 120 observations effectuées dans chacune des trois unités cartographiques*

Enfin, les valeurs de pureté stricte sont faibles: 37 % des observations satisfont strictement à la définition de l'unité N.B4, 32 % à celle de l'unité O.B4 et enfin seulement 12 % à celle de l'unité R3B4.

## 1.2 Incertitudes sur les indices de pureté.

Les indices de pureté correspondent à des moyennes faites sur un certain nombre d'observations (§ V.4.1). Pour traduire l'incertitude sur ces indices, on pourrait donc calculer l'intervalle de confiance de ces moyennes en tenant compte de la loi de distribution des résultats obtenus.

En fait, cette méthode ne prendrait pas en compte l'origine principale de l'incertitude sur ces indices, à savoir la difficulté éprouvée dans certains cas pour situer l'observation de vérification effectuée, dans la typologie de la carte pédologique. Parmi les difficultés que nous avons le plus fréquemment rencontrées, on citera le problème, parfois difficile à résoudre à la tarière, de la distinction entre les schistes briovériens et ceux d'Angers, le problème de la mesure de la profondeur du sol sur l'unité R3B4...

Pour quantifier l'effet de ces incertitudes sur les puretés partielles, nous procédons comme suit. Pour chaque unité cartographique et pour chaque critère, nous ne retenons en premier lieu que les observations pour lesquelles aucune difficulté majeure d'interprétation n'est apparue et nous calculons les puretés partielles à partir de ces observations. Nous obtenons de la sorte les valeurs centrales du tableau VI.2.

Nous prenons ensuite en compte les observations incertaines et considérons de façon "pessimiste", que toutes ne satisfont pas à la définition de l'unité. Nous obtenons de la sorte des valeurs minimales de puretés partielles (colonne de gauche du tableau VI.2).

Unités cartographiques	Unité N.B4	Unité R3B4	Unité O.B4
Puretés partielles (%)			
<i>Substrat</i>	87 - 95 - 96	97 - 97 - 97	86 - 99 - 100
<i>Développement de profil</i>	92 - 96 - 96	79 - 90 - 92	75 - 83 - 84
<i>Classe d'hydromorphie</i>	78 - 82 - 82	25 - 28 - 38	65 - 73 - 74
<i>Profondeur du sol</i>	38 - 39 - 40	31 - 35 - 43	37 - 38 - 41

**Tableau VI.2:** Incertitudes sur les indices de puretés partielles.

*La valeur centrale est calculée à partir des observations "certaines", celles de gauche et de droite en considérant respectivement qu'aucune ou toutes les observations incertaines satisfont à la définition de l'unité cartographique.*

Enfin, nous considérons dans une vision "optimiste" que toutes les observations incertaines satisfont à la définition de l'unité. Nous obtenons ainsi des valeurs maximales de puretés partielles (colonne de droite du tableau VI.2).

Les intervalles ainsi obtenus dépendent à la fois de l'unité cartographique et du critère considérés. Ils sont dans certains cas assez larges puisqu'ils varient par exemple entre 86 % et 99 % pour le type de substrat sur l'unité O.B4, entre 65 % et 74 % pour la classe d'hydromorphie sur l'unité O.B4 ou encore entre 31% et 43 % sur l'unité R3B4.

Mais, il apparaît que les ordres de grandeur du tableau VI.1 sont respectés.

### 1.3 Nature des "impuretés" au sein des unités cartographiques.

Les indices de pureté constituent des critères synthétiques permettant de juger de l'adéquation entre la définition de l'unité cartographique et les observations de vérification. Mais, ils ne rendent pas compte de la nature des observations qui ne satisfont pas à cette définition, observations que l'on peut appeler "impuretés".

Pour avoir une idée de ces impuretés, nous présentons pour chaque unité cartographique l'histogramme des codes rencontrés quand on applique la légende de la carte pédologique (Fig. VI.1).

En comparant les listes des codes relevés pour chaque unité cartographique, il apparaît en premier lieu que l'intersection de ces listes se limite au seul code "N.B3" que l'on trouve à la fois dans l'unité N.B4 et dans l'unité R3B4, mais dans cette dernière avec une fréquence de 1%. Par rapport aux critères cartographiques retenus, les trois unités cartographiques constituent donc des populations différentes.

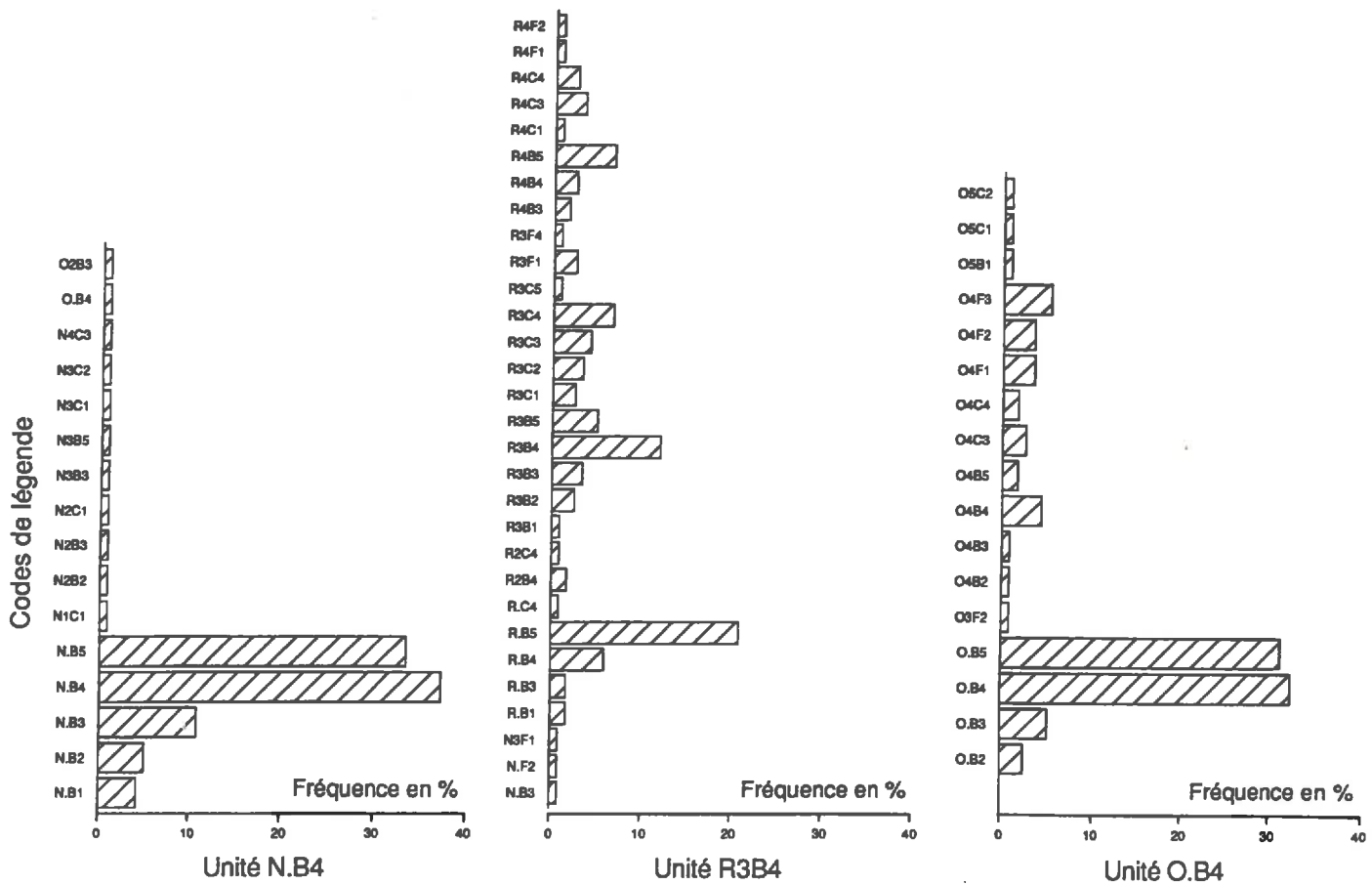


Figure VI.1: Histogrammes des codes de légende relevés dans l'échantillonnage de vérification pour chacune des trois unités cartographiques.

Les histogrammes présentent des allures très différentes pour les unités *N.B4* et *O.B4* d'une part, pour l'unité *R3B4* d'autre part (Fig. VI.1):

- pour les unités cartographiques *N.B4* et *O.B4*, l'histogramme présente un mode dominant respectant la définition de l'unité cartographique et un ou deux modes secondaires correspondant à une variation d'une classe de la profondeur du sol par rapport à la définition de l'unité cartographique. Les autres codes présentent des fréquences très faibles inférieures à 5 %.
- pour l'unité cartographique *R3B4*, le nombre de codes différents est plus grand et de plus aucun mode n'apparaît vraiment dominant. Le code le plus fréquent "R.B5" correspond à des sols bruns sur grès schisteux, non hydromorphes, de 20 à 40 cm de profondeur; il représente 22 % des observations. Le code "R3B4" correspondant à la définition de l'unité, présente une fréquence de 12 % uniquement. L'ensemble des autres codes provient principalement de variations d'une ou deux classes de la classe d'hydromorphie ou de la profondeur du sol.

## 1.4 Discussion

### 1.4.1 Que penser de ces niveaux de pureté ?

Il est difficile de juger dans l'absolu des indices de pureté, car on ne dispose pas de références fiables sur ce que peut être un niveau de pureté acceptable.

La pureté stricte ne dépasse dans aucun cas 40 % et par conséquent le seuil classique d'impuretés de 15% est loin d'être atteint. Mais, on a vu lors de la revue bibliographique que ce seuil n'a été atteint dans aucune étude s'attachant à mesurer par un échantillonnage indépendant ces impuretés. Ce seuil ne semble donc pas réaliste et ne peut à notre avis servir de référence.

Si on admet avec Wösten et al. (1987) qu'une pureté moyenne de 70 % est un objectif réaliste, on voit qu'un tel objectif est dépassé pour les unités cartographiques *N.B4* et *O.B4* et presque atteint pour l'unité *R3B4*. Mais là encore, cet objectif a été défini pour un milieu et en considérant des critères cartographiques différents des nôtres.

En définitive, le jugement que l'on peut porter sur l'existence d'impuretés au sein des unités cartographiques va dépendre de l'emploi envisagé de la carte pédologique.

Si on veut utiliser ce document pour définir les zones où un drainage est utile et que la classe d'hydromorphie 4 constitue le seuil de décision, les niveaux de pureté seront toujours satisfaisants: on aboutit, pour les trois unités cartographiques et pour au moins 85 % des observations, à une décision de drainage inutile.

Si on cherche à utiliser ce même document pour estimer dans l'espace les rendements potentiels en blé, le jugement porté sera différent: en effet, les références existantes en Bretagne (Rassineux et Walter, 1988; Walter et al., 1989c) indiquent des rendements potentiels en blé nettement différents pour des parcelles de type "N.B4" et "N.B5", surtout lors d'une année à fort déficit hydrique. Le fait qu'au sein d'une même unité cartographique, ces deux types soient observés avec une fréquence du même ordre de grandeur, rend problématique l'utilisation de la carte pédologique pour une telle thématique. Notons néanmoins que pour ces deux types, les rendements potentiels sont nettement inférieurs à ceux observés pour les sols sur limons profonds du Bassin de Rennes. A l'échelle départemental, la carte pédologique permet donc de localiser des secteurs pour lesquels les potentiels de production permis par le sol, sont de niveaux différents.

### 1.4.2 Variabilité des propriétés morphologiques des horizons au sein d'une unité cartographique.

On a vu que la pureté partielle du développement de profil s'avérait élevée quelle que soit l'unité cartographique considérée. En fait, ce résultat masque une assez grande variabilité des propriétés morphologiques des horizons et il nous paraît intéressant d'illustrer cette variabilité à partir des observations faites sur l'unité cartographique O.B4.

Dans une première étape, nous avons fait l'inventaire détaillé des différents types d'horizons que nous avons observés dans cette unité cartographique: pour cela, nous tenons compte de la couleur de la matrice, de l'abondance des éléments grossiers, de la compacité, de l'abondance et de la couleur des taches et de la présence de concrétions. Cet inventaire nous amène à distinguer 12 horizons différents qui sont définis dans le tableau VI.3.

Les horizons distingués dans ce tableau présentent des degrés de similarité variables: les horizons 10 à 12, qui correspondent à des altérites, se distinguent nettement des autres horizons. A l'opposé, les horizons 3 et 4 ne se distinguent que par une différence de couleur d'une classe de pureté ("chroma"), mais l'expérience montre que cette différence est détectable sur le terrain.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>COULEUR</b>	10yr33	10yr46	10yr54	10yr56	10yr64	10yr66	10yr66	10yr66	10yr56	25y66	5bg71	5gy61
<b>ELEMENTS GROSSIERS</b>	5%	15%	15%	15%	15%	15%	30%	>40%	40%	25%	30%	40%
<b>COMPACITE</b>	peu compact	peu compact	peu compact	peu compact	peu compact	compact	très compact	très compact	compact	compact	très compact	compact
<b>TACHES abondance</b>	-	-	-	-	-	-	assez nombr.	-	-	assez nombr.	nombr.	nombr.
<b>TACHES couleur</b>							75yr58			75yr58	10yr72 75yr58	10yr72 75yr58
<b>CONCRETIONS</b>							assez nombr.					

Tableau VI. 3: Définition des horizons distingués sur l'unité cartographique O.B4

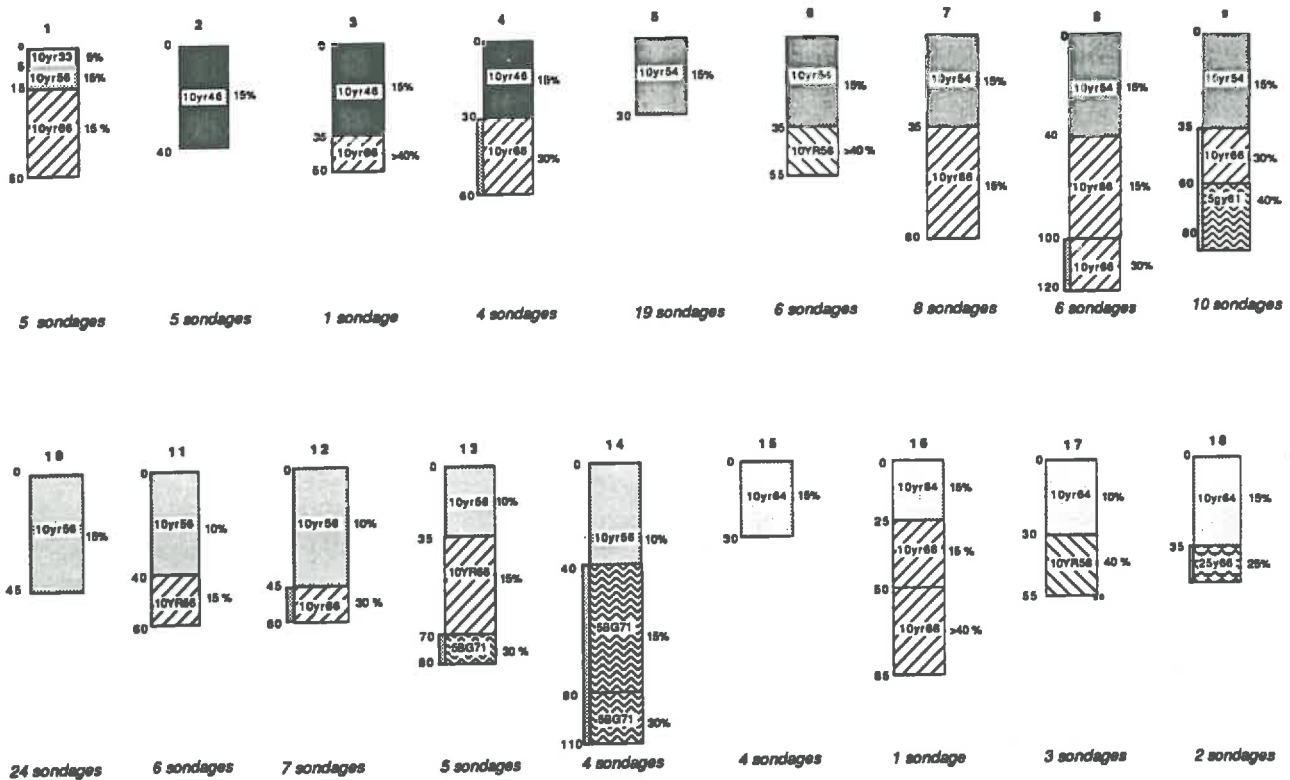


Figure VI.2: Les successions d'horizons observées sur l'unité cartographique O.B4.

Quand on s'attache à étudier les successions de ces horizons observées dans la population des sondages de l'unité *O.B4*, on dénombre 18 successions différentes (Fig.VI.2). Les successions notées 5 et 10 présentent des effectifs nettement supérieurs aux autres, mais elles ne prennent en compte que 38 % des sondages effectués.

On est frappé par le nombre élevé de successions d'horizons différentes, représentées chacune par un faible nombre de sondages.

Ce constat amène à deux types de questions:

- les distinctions entre les horizons fondées sur des critères morphologiques correspondent-elles à des différences de fonctionnement ou peut-on procéder à des regroupements d'horizons? Les observations à la tarière ne sont pas suffisantes pour répondre à cette question. Des études plus fines sont requises.
- à quelles conditions peut-on envisager une cartographie permettant de mieux tenir compte de la variabilité de ces propriétés morphologiques? Nous tenterons d'aborder ce problème au cours du chapitre 7.

### Conclusion:

Nous avons quantifié la pureté des trois unités cartographiques en nous fondant sur les critères cartographiques retenus lors de l'établissement de la carte. Nous obtenons des puretés moyennes comprises entre 61 % et 73 % et nous mettons en évidence que:

- par rapport aux critères cartographiques retenus, les trois unités cartographiques constituent des populations effectivement différentes;
- pour les unités cartographiques *N.B4* et *O.B4*, le code de légende le plus fréquent est celui définissant l'unité et la grande majorité des impuretés provient de variations d'au plus une classe de la profondeur du sol;
- pour l'unité cartographique *R3B4*, le code le plus fréquent ne correspond pas à la définition de l'unité cartographique, mais aucun code ne semble dominant ce qui traduit la difficulté de définir cette unité cartographique.

Le nombre important de successions différentes d'horizons souligne l'importance des choix effectués par le pédologue pour délimiter ses unités cartographiques. Celles-ci regroupent des observations du sol jugées proches sur la base de critères cartographiques donnés, ce qui n'exclue pas l'existence d'une variabilité importante des propriétés morphologiques du sol.

## 2. VARIABILITE DES PROPRIETES ANALYTIQUES DE L'HORIZON DE SURFACE

Dans le paragraphe précédent, l'objet d'étude concernait l'ensemble des horizons du sol; nous restreignons à présent cet objet d'étude et nous nous limitons aux seules propriétés analytiques qui ont été mesurées pour l'horizon de surface.

Nous décrivons en premier lieu la variabilité des propriétés analytiques au sein des unités cartographiques en nous aidant de représentations graphiques et en calculant des paramètres statistiques. Pour juger de cette variabilité, nous cherchons ensuite des références: pour cela, nous sommes amenés à comparer les trois unités cartographiques entre elles, ou encore à faire appel à des résultats obtenus à une échelle plus petite, en l'occurrence l'échelle départementale.

### 2.1 La variabilité au sein de chacune des unités.

L'observation de l'histogramme constitue l'approche la plus parlante pour percevoir la distribution d'une variable (Fig. VII.3.A). Il serait néanmoins trop fastidieux de les présenter tous ici.

Une façon simple de synthétiser les caractéristiques de ces histogrammes consiste à indiquer leurs valeurs extrêmes, leurs quartiles supérieurs et inférieurs et leur médiane. Ces différents paramètres peuvent être représentés de façon simultanée en adoptant un graphisme explicité dans la figure VI.3.B (Becker et Chambers, 1984). Ce graphisme permet également de signaler l'existence de valeurs très éloignées de la distribution des autres échantillons.

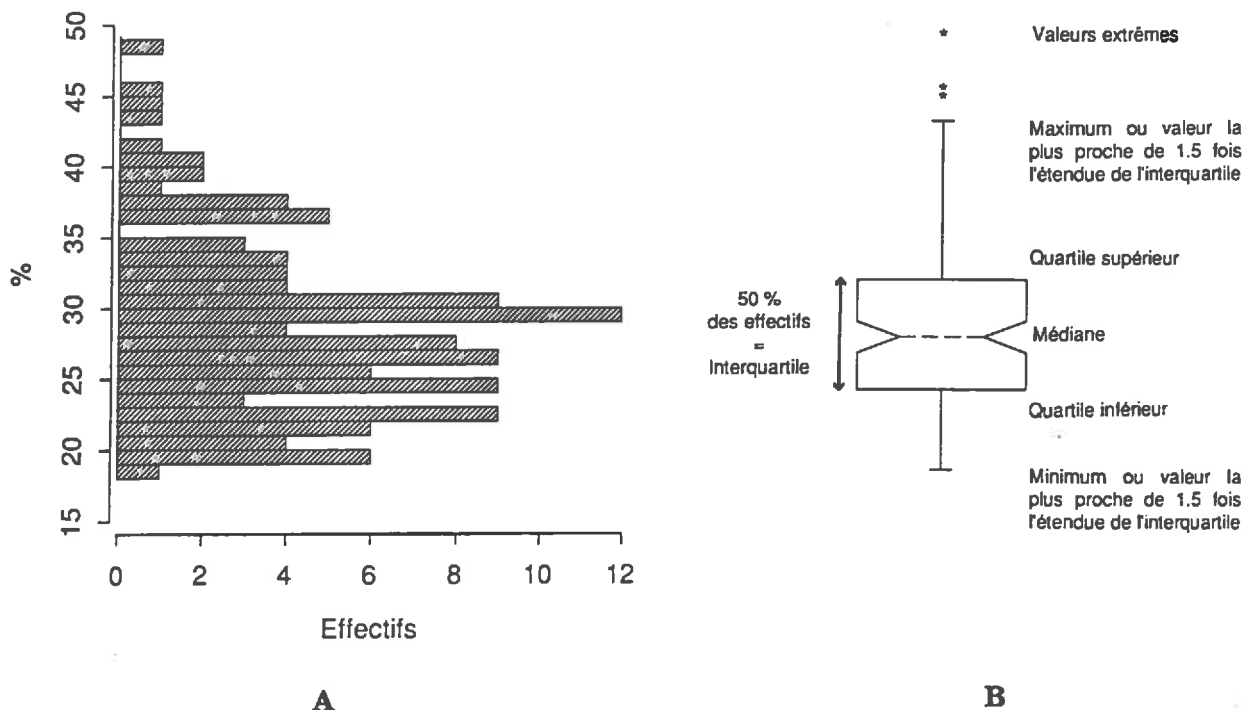
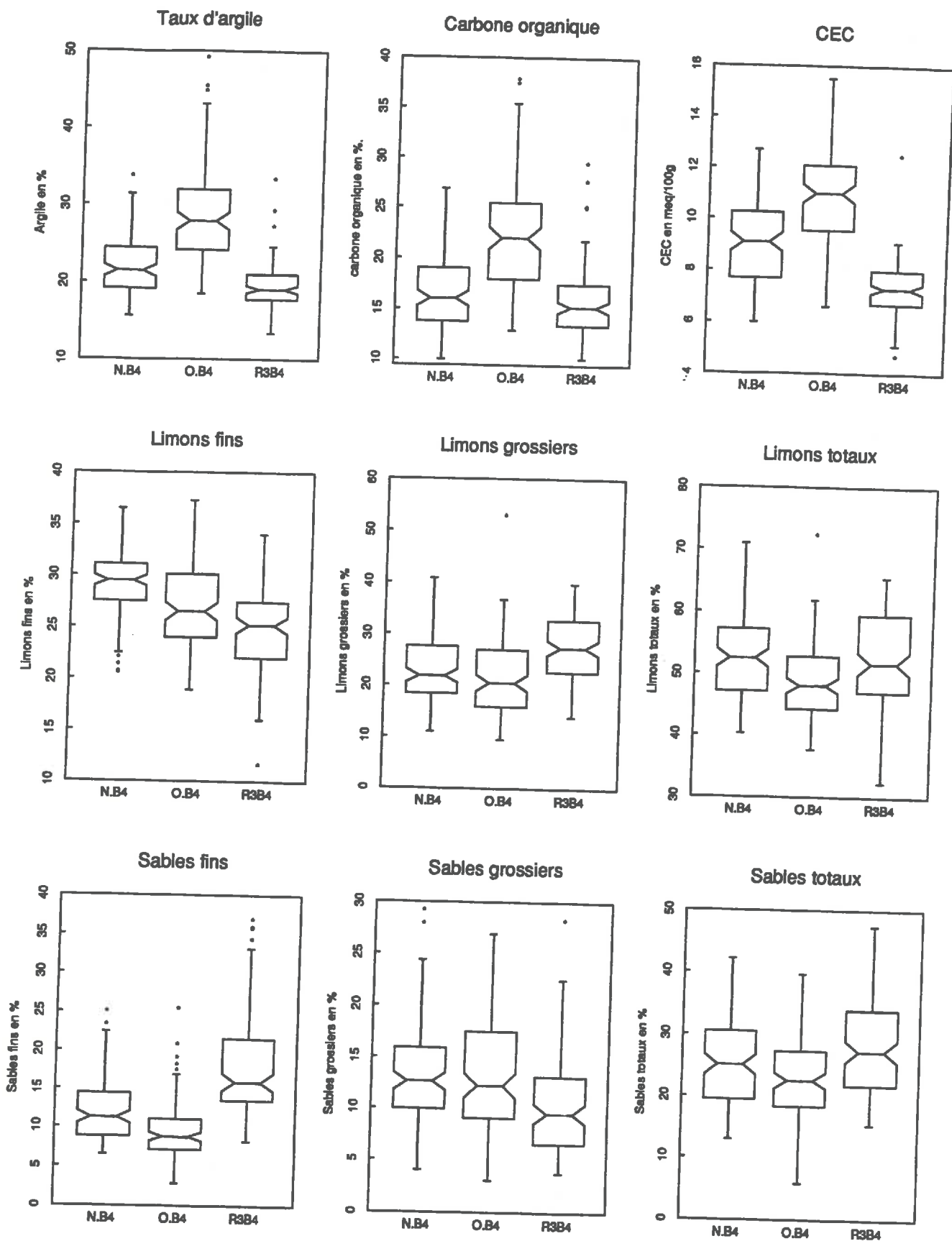


Figure VI.3: Distribution du taux d'argile sur l'unité cartographique O.B4

A: Histogramme du taux d'argile

B: Représentation des valeurs extrêmes, des quartiles supérieurs et inférieurs, et de la médiane de la distribution, suivant une représentation proposée par Becker et Chambers (1984)

La figure VI.4 regroupe suivant ce graphisme l'ensemble de ces paramètres statistiques pour chacune des propriétés étudiées et pour les trois unités cartographiques.



**Figure VI.4:** Valeurs extrêmes, quartiles supérieurs et inférieurs, et médiane pour l'ensemble des propriétés analytiques de l'horizon de surface des trois unités cartographiques. Une non-intersection des encoches centrées sur les médianes, traduit une différence significative entre deux médianes avec un niveau de signification de 0.05 (Becker et Chambers, 1984).

Cette présentation est complétée par le calcul des paramètres statistiques classiques (moyenne arithmétique, écart-type, coefficient de variation) et l'emploi d'un test du chi-2 <sup>(1)</sup> pour déterminer si une loi normale ou lognormale peut être ajustée à la population de l'échantillon (Tab. VI.4). Ce test de recherche de la loi de distribution suppose l'indépendance spatiale des observations, condition qui n'est vraisemblablement pas vérifiée si on tient compte de l'ensemble des 120 points échantillonnés au sein d'une unité cartographique: parmi ces points, certains ne sont distants que de 5 mètres.

Nous présentons de ce fait également le calcul de ces mêmes paramètres statistiques en ne tenant compte que des 30 points obtenus à l'issue de la première phase de la stratégie d'échantillonnage (§ V.2.1, p. 67), pour lesquels l'hypothèse d'indépendance spatiale est plus vraisemblable: en effet, rappelons que ces trente premiers points ont été localisés par un tirage aléatoire aux noeuds d'une grille régulière disposée sur la carte pédologique.

VARIABLE	120 échantillons					30 échantillons				
	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Coef. de variation %	Loi de distribution	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Coef. de variation %	Loi de distribution
<b>ARGILE (%)</b>										
Unité N.B4	21.4	22.1	3.9	17.9	LN	21.3	21.8	3.7	16.7	LN
Unité R3B4	19.0	19.4	2.8	14.4	N	18.7	19.3	2.7	12.3	N
Unité O.B4	27.8	28.6	6.3	22.0	?	28.3	28.3	6.0	21.3	?
<b>LIMONS (%)</b>										
Unité N.B4	52.5	52.7	7.1	13.4	?	50.9	51.9	7.6	14.6	?
Unité R3B4	51.6	52.4	7.4	14.2	?	50.7	51.5	8.9	13.5	?
Unité O.B4	48.0	48.9	6.1	12.5	LN	48.3	48.7	6.6	13.5	LN
<b>SABLES (%)</b>										
Unité N.B4	25.1	25.2	7.0	27.1	?	25.7	26.2	6.0	22.9	?
Unité R3B4	27.2	28.1	7.6	27.1	?	27.2	29.1	8.8	30.2	?
Unité O.B4	22.5	22.6	6.9	30.6	N	22.5	22.9	7.2	31.3	N
<b>C. ORGA. (‰)</b>										
Unité N.B4	16.0	16.7	3.7	22.2	?	16.2	17.0	3.3	19.2	LN
Unité R3B4	15.2	15.8	3.4	21.7	LN	14.5	15.8	3.6	23.2	LN
Unité O.B4	22.0	22.4	5.5	24.5	LN	21.5	22.1	5.6	25.2	LN
<b>CEC (meq/100g)</b>										
Unité N.B4	9.1	8.9	1.6	18.1	N	9.5	9.2	1.8	19.4	N
Unité R3B4	7.3	7.3	0.9	12.9	N	7.0	7.3	1.4	18.7	N
Unité O.B4	11.0	10.9	1.8	16.6	N	10.7	10.8	1.6	14.5	N

**Tableau VI.4:** Paramètres statistiques estimés des propriétés analytiques de l'horizon de surface, en tenant compte de l'ensemble des 120 échantillons d'une unité cartographique, ou en ne gardant que les 30 points obtenus à l'issue de la première phase d'échantillonnage.

<sup>(1)</sup> Rappelons que ce test compare les fréquences observées sur l'échantillon aux fréquences théoriques définies par la loi de distribution ajustée à l'échantillon (Dagnélie, 1980)

Notons en premier lieu que les estimations des paramètres statistiques sont peu affectées par le choix de l'ensemble des 120 échantillons d'une unité cartographique ou des 30 échantillons issus de la première phase de la stratégie d'échantillonnage (Tab VI.4). Nous choisissons de ce fait de raisonner à partir de l'ensemble des 120 échantillons.

Les histogrammes expérimentaux des propriétés étudiées présentent de façon générale une allure unimodale: les unités cartographiques peuvent donc être considérées de façon générale comme homogènes, dans le sens que l'on ne distingue pas différentes populations en leur sein.

A ces histogrammes peuvent être ajustés dans certains cas des lois normales ou lognormales, mais il ne s'agit pas d'un cas général (Tab VI.4). On pourrait envisager des transformations de variable pour essayer d'obtenir des distributions normales, mais ces transformations diffèrent d'une unité cartographique à l'autre. Par souci d'homogénéité, nous préférons garder les données initiales.

Si on tient compte du coefficient de variation pour juger de l'importance de la variabilité spatiale au sein des unités cartographiques, on s'aperçoit que ce coefficient varie globalement entre 15 % et 30 % quelle que soit l'unité ou la variable considérée (Tab VI.4). Si on se rattache à la nomenclature adoptée par Wilding et Drees (1978) ou Vauclin (1982), de tels coefficients de variation correspondent à une variabilité spatiale qualifiée de moyenne.

De façon plus précise, on relève néanmoins des différences notables que nous allons essayer d'illustrer en considérant successivement les différentes unités:

- pour l'unité *R3B4*, l'écart-type d'échantillonnage du taux d'argile est de 2.8 % ce qui se traduit par des valeurs très groupées autour de la moyenne: 50 % des effectifs sont compris dans l'intervalle [17.8 - 21.0] %. Une faible variabilité est également notée sur cette unité pour le carbone organique et la capacité d'échange cationique. Une variabilité plus importante est présente pour les fractions limoneuses et sableuses pour lesquelles l'écart-type d'échantillonnage est de l'ordre de 7 %.
- pour l'unité *O.B4*, l'écart-type d'échantillonnage du taux d'argile est de 6.0 % correspondant à une variabilité plus importante de cette variable: l'interquartile est compris dans l'intervalle [24.1 - 31.9] % et les valeurs minimales et maximales sont respectivement de 18.5 % et 48.9 %. Une variabilité forte est également notée pour le carbone organique et la capacité d'échange cationique. Pour les fractions limoneuses et sableuses, la variabilité est du même ordre de grandeur que celle notée pour l'unité *R3B4*, les écart-type d'estimation étant de l'ordre de 7 %.
- l'unité cartographique *N.B4* présente enfin pour le taux d'argile, le carbone organique et la capacité d'échange cationique, une variabilité intermédiaire entre celle de l'unité *R3B4* et celle de l'unité *O.B4*; l'écart-type du taux d'argile est de 3.7 %. De plus, excepté pour les limons fins pour lesquelles la variabilité est plus faible au sein de cette unité, la variabilité des fractions limoneuses et sableuses est celle déjà évoquée pour les autres unités.

*En résumé, sur la base de différents critères statistiques (écart-type, interquartile, étendue de la variable...), la variabilité intra-unité cartographique apparaît différente d'une unité à l'autre pour le taux d'argile, le carbone organique et la capacité d'échange cationique. Pour ces variables, l'ordre de variabilité croissante au sein des unités cartographiques est le suivant:  $R3B4 < N.B4 < O.B4$ .*

## 2.2 Comparaison des trois unités cartographiques.

Nous venons de décrire la variabilité au sein de chacune des unités cartographiques et de montrer qu'elle était d'importance variable suivant l'unité cartographique. Mais, les trois unités cartographiques correspondent-elles à des populations différentes pour les différentes propriétés étudiées ?

Pour répondre à cette question, nous comparons à présent les trois unités cartographiques, d'abord suivant une approche monoparamétrique consistant à comparer les trois unités pour chacune des propriétés, ensuite suivant une approche multiparamétrique tenant compte des corrélations entre les propriétés.

Cette comparaison des trois unités cartographiques doit nous permettre de situer l'apport de la cartographie pédologique dans la description de la variabilité spatiale des propriétés analytiques retenues.

### 2.2.1 Approche monoparamétrique.

Pour chaque propriété étudiée, on cherche à savoir si les échantillons prélevés au sein des différentes unités, proviennent d'une même population ou de populations différentes.

Une façon simple pour conclure par la négative, consiste à vérifier par un test statistique que leurs mesures de position (moyenne, médiane) sont significativement différentes.

Un tel test est effectué graphiquement sur la figure VI.4 suivant une méthode proposée par Chambers et Becker (1984): sur cette figure, si les encoches centrées sur les médianes de deux échantillons ne se superposent pas, on peut conclure à une différence significative des médianes avec un niveau de signification de 0.05. Il s'agit là d'un test robuste, indépendant de la loi de distribution des propriétés.

L'analyse graphique montre que pour toutes les propriétés étudiées, au moins deux unités cartographiques présentent des médianes significativement différentes. Pour le taux d'argile, le carbone organique, la capacité d'échange et les sables fins, on arrive à la conclusion que les médianes des trois unités cartographiques, prises deux à deux, sont toujours significativement différentes.

### 2.2.2 Approche multiparamétrique.

Dans l'approche monoparamétrique précédente, nous ne tenons pas compte de l'existence de corrélations entre les propriétés. Or, la matrice des corrélations entre les différentes propriétés étudiées (Tab VI.5) montre l'existence de relations linéaires souvent fortes <sup>(1)</sup>. Il semble intéressant de tenir compte de ces corrélations dans la procédure de comparaison des trois unités cartographiques, pour définir de façon synthétique les facteurs de différenciation des trois unités cartographiques.

---

(1) On trouvera en annexes C, une brève analyse des possibilités d'estimation de la Capacité d'Echange Cationique à partir des caractéristiques granulométriques et du carbone organique.

	ARGI	LIMF	LIMG	LIMT	SABF	SABG	SABT	CORG	CEC
ARGI	1.00								
LIMF	<u>0.42</u>	1.00							
LIMG	<u>-0.60</u>	-0.30	1.00						
LIMT	<u>-0.34</u>	0.30	<u>0.82</u>	1.00					
SABF	<u>-0.57</u>	<u>-0.69</u>	0.13	-0.28	1.00				
SABG	-0.04	-0.15	<u>-0.53</u>	<u>-0.61</u>	-0.07	1.00			
SABT	<u>-0.48</u>	<u>-0.64</u>	-0.26	<u>-0.64</u>	<u>0.73</u>	<u>0.62</u>	1.00		
CORG	<u>0.54</u>	0.11	<u>-0.46</u>	<u>-0.40</u>	-0.26	0.22	-0.06	1.00	
CEC	<u>0.75</u>	0.28	<u>-0.61</u>	<u>-0.44</u>	<u>-0.50</u>	0.30	-0.19	<u>0.64</u>	1.00

*Tableau VI.5 : Coefficients de corrélation entre les propriétés analytiques de l'horizon de surface en tenant compte des échantillons des trois unités cartographiques. Les valeurs soulignées sont significativement différentes de zéro au niveau 0.001, celles en gras sont supérieures à 0.6 en valeur absolue.*

Une telle approche est permise par l'Analyses en Composantes Principales dont nous rappelons brièvement le principe.

### 2.2.2.1 Principe de l'Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'ACP a pour objectif de décrire un tableau dont les lignes correspondent à des individus et les colonnes à des variables quantitatives mesurées sur ces individus.

Dans notre cas, les individus sont constitués par les 360 échantillons de l'horizon de surface prélevés sur les trois unités cartographiques. Les variables quantitatives correspondent aux propriétés analytiques mesurées sur ces échantillons.

Le but de l'ACP est de trouver des axes, nommés composantes principales, qui sont des combinaisons linéaires des variables initiales. Ces axes sont hiérarchisés, doivent être de variance maximale, non corrélés entre eux et décrire au mieux la variabilité des données de départ.

Pour donner le même poids aux différentes variables initiales, on travaille sur des variables centrées et réduites: l'ACP utilisée est de ce fait une ACP normée, mise en oeuvre sur le plan pratique en utilisant le logiciel SPAD.N (Lebart et al., 1987)

L'ACP a fait l'objet de très nombreuses présentations (Fenelon, 1981) et a été souvent utilisée en Science du Sol (Norris, 1971; Banfield et Bascomb, 1976; Oliver, 1984; Voltz, 1986).



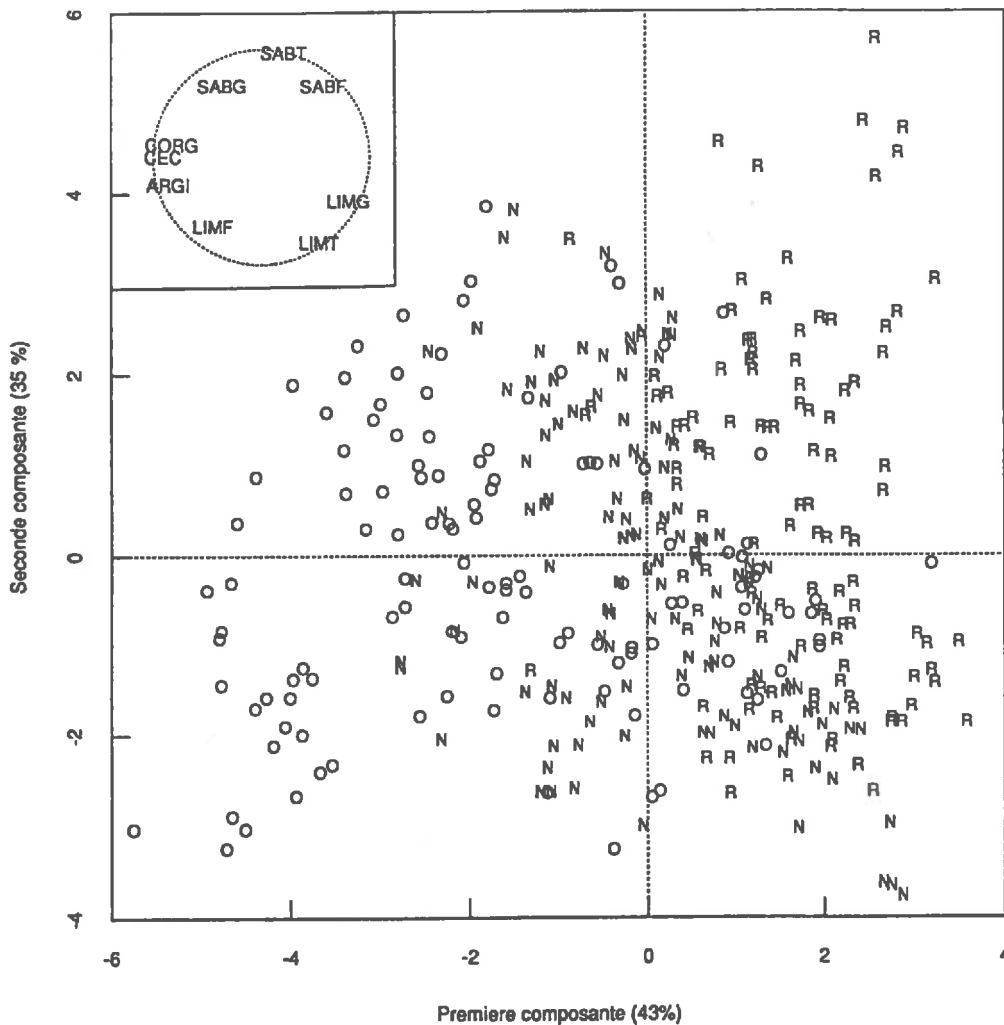
### 2.2.2.2 Les résultats de l'ACP

#### a) Signification des deux composantes principales.

L'interprétation de l'ACP repose en premier lieu sur l'observation des valeurs propres des composantes principales, traduisant la part de variation expliquée par chacune de ces composantes. Dans notre cas, la première composante explique 43% de la variance initiale et la seconde composante, 35 %. La projection des individus et des variables sur le plan défini par ces deux premières composantes, permet ainsi de visualiser 78 % de la variance initiale du tableau étudié. Nous nous limitons de ce fait à l'analyse de ces deux premières composantes.

La première composante est corrélée négativement à la CEC ( $r^2 = -0.91$ ), au taux d'argile ( $r^2 = -0.86$ ) et au carbone organique ( $r^2 = -0.83$ ), propriétés qui s'opposent aux limons grossiers ( $r^2 = 0.80$ ).

La seconde composante est liée de façon positive aux fractions sableuses, en particulier les sables totaux ( $r^2 = 0.97$ ); elle est liée négativement aux limons fins ( $r^2 = -0.65$ ) et limons totaux ( $r^2 = -0.80$ ).



**Figure VI.5:** Projection des individus dans le premier plan factoriel de l'ACP sur les propriétés analytiques de l'horizon de surface. Les individus sont repérés en fonction de leur unité cartographique d'origine (R = unité R3B4; N = Unité N.B4 ; O = Unité O.B4) Le cercle de corrélation, servant à interpréter les axes, est fourni en haut à gauche.

b) Projection des individus dans le premier plan factoriel.

La projection des individus dans le plan factoriel défini par les deux premières composantes principales, peut être faite en utilisant un code spécifique à l'unité cartographique dont est originaire un échantillon (Fig. VI. 5).

On remarque sur ce plan factoriel un regroupement des individus en fonction de leur unité cartographique d'origine, alors que l'appartenance d'un échantillon à une unité cartographique n'est pas une information directement prise en compte par l'ACP.

Cette distinction se fait selon la première composante principale: du côté négatif, les individus proviennent en majorité de l'unité *O.B4*; du côté positif, il s'agit d'individus issus de l'unité *R3B4*; enfin, la partie centrale de cet axe est constituée essentiellement d'individus originaires de l'unité *N.B4*.

La distinction des unités cartographiques est peu nette selon la seconde composante principale qui est corrélée positivement aux fractions sableuses, indiquant que la variabilité de ces fractions sableuses est peu liée à l'origine cartographique des échantillons.

Enfin, la variabilité plus forte au sein de l'unité *O.B4* pour la CEC, le taux d'argile et le carbone organique, déjà signalée (§ 2.1), se retrouve sur ce plan factoriel puisque des échantillons provenant de cette unité, sont présents dans toutes les parties de ce plan.

### 2.2.2.3 Discussion

En considérant la population de l'ensemble des échantillons obtenus sur les trois unités cartographiques, l'ACP montre que la principale composante de variation au sein de cette population, est liée à des variations de CEC, de taux d'argile et de carbone organique.

On montre que les échantillons sont très nettement rangés le long de cette composante en fonction de leur unité cartographique d'origine. On met ainsi en évidence que les trois unités cartographiques constituent effectivement des populations différentes et que les propriétés distinguant ces trois populations sont celles liées à la première composante de l'ACP.

Ce résultat se retrouve en employant l'analyse discriminante qui est une technique permettant de rechercher les propriétés discriminant des échantillons provenant de populations reconnues dès le départ comme différentes <sup>(1)</sup>. Cette technique confirme les différences significatives entre les trois unités cartographiques et montre que la CEC constitue la variable permettant la meilleure distinction entre ces unités.

### Conclusion sur la comparaison des trois unités cartographiques:

*Nous avons montré, à travers des approches monoparamétriques et multiparamétriques, que:*

- (i) pour toutes les propriétés analytiques considérées de l'horizon de surface, les médianes d'au moins deux unités cartographiques sont significativement différentes. En particulier, les médianes du taux d'argile, du carbone organique et de la CEC sont toutes significativement différentes.*
- (ii) la première composante principale de variation de ces propriétés, corrélée à la CEC, au taux d'argile et au carbone organique, discrimine clairement les échantillons en fonction de l'unité cartographique dont ils sont issus.*

*Les trois unités cartographiques correspondent donc à des populations différentes par rapport aux propriétés étudiées. Ce résultat concorde avec l'idée communément émise que la variabilité des propriétés analytiques de l'horizon de surface est corrélée, dans le Massif Armoricain, au substrat du sol.*

*Il apparaît donc intéressant de se baser sur la carte pédologique pour décrire la variabilité spatiale de ces propriétés analytiques qui ne sont pas des critères cartographiques.*

<sup>(1)</sup> Les résultats de l'analyse discriminante ne sont pas détaillés ici, ceux issus de l'ACP étant suffisamment nets.

## 2.3 Comparaison avec la variabilité observée à l'échelle départementale.

Pour replacer les résultats concernant la variabilité des propriétés analytiques dans un contexte plus général, nous disposons des analyses de terre effectuées au niveau départemental à la demande des agriculteurs; il s'agit d'échantillons provenant du mélange de différents prélèvements des horizons de surface au sein de zones "homogènes" au sein d'une même parcelle.

Cette source de données représente de l'ordre de 6900 échantillons analysés par le laboratoire départemental d'analyses des terres de Combourg (Ille-et-Vilaine). Ces données ont déjà été présentées (Leleux et al., 1988) et ont servi à la constitution de la base communale du Référentiel Agro-Pédologique d'Ille-et-Vilaine (Aurousseau, 1987; Dersigny, 1988; Cor, 1989).

La figure VI.6.A situe, dans le triangle du GEPPA (1963), la composition granulométrique de cette population de 6900 échantillons. Les caractéristiques majeures du nuage de points ainsi obtenu, sont les suivantes:

- (i) plus de 80 % des échantillons appartiennent à quatre classes de texture voisines, à savoir les classes *LAS* (Limon argilo-sableux), *La* (Limon argileux), *LSa* (Limon sablo-argileux) et *L* (Limon). Cela correspond à la partie très dense du nuage de points observée pour des taux d'argile compris entre 12 et 25 % et des taux de limons compris entre 40 et 70 %.
- (ii) les classes texturales sableuses (*SS*, *S*, *Sa*) et argileuses (*AA*, *A*, *As*) sont très peu représentées.

La figure VI.6.B représente dans le même triangle, la composition granulométrique des 360 échantillons prélevés sur les trois unités cartographiques. Les échantillons des unités *N.B4* et *R3B4* se retrouvent pour la plupart dans les classes *LAS* (Limon argilo-sableux) ou *La* (Limon argileux), alors que les échantillons de l'unité *O.B4* s'inscrivent dans les classes plus argileuses (*A*, *Als* et *Al*).

### - Discussion

Ces représentations amènent à deux types de commentaires:

1. La composition granulométrique des horizons de surface au niveau départemental n'est pas très variable et correspond en grande majorité à des classes limoneuses. Ce constat, associé au fait que les variations sont de plus corrélées au substrat du sol, explique que la texture de l'horizon de surface, n'ait pas été retenue comme un critère cartographique dans le cadre d'une cartographie au 1/25.000.
2. Par contraste, la variabilité de cette composition granulométrique sur le secteur étudié apparaît importante, puisque les taux d'argile observés sont compris entre 12% et 45 %, soit une fourchette de variation proche de celle observée au niveau départemental.

Les échantillons des trois unités cartographiques présentent des taux d'argile plus élevés que la médiane départementale qui est de 16 %. Cela était attendu pour l'unité cartographique sur schiste d'Angers, bien que l'importance de l'écart à cette médiane soit étonnant. Cela était beaucoup moins prévisible pour les unités cartographiques sur grès schisteux ou sur schiste briovérien. En effet, pour ces deux dernières unités, une compilation des profils pédologiques décrits sur ces deux types de substrat, indique des taux d'argile de l'horizon de surface compris entre 12 et 20 %, donc inférieurs aux médianes de 19 % observée sur *R3B4* et de 21% observée sur *N.B4*.

A partir d'analyses de terres précisément localisées, Leleux et al. (1988) ont publié une carte départementale du taux d'argile de l'horizon de surface. Ces auteurs mettent en évidence un maximum local au niveau de notre secteur d'étude, ce qui est en accord avec notre propre constat.

Notre démarche est descriptive et non explicative; nous ne pouvons donc qu'émettre des hypothèses pour expliquer ce résultat. Les hypothèses qu'on peut émettre sont les suivantes:

- l'existence de variations régionales des substrats peut induire dans certains secteurs des altérations plus argileuses;
- l'érosion des horizons de surface d'anciens sols lessivés a pu rapprocher de la surface des horizons d'illuviation plus argileux, qui ne peuvent plus être reconnus sur le terrain du fait du mélange d'horizons provoqué par le travail du sol. Une topographie marquée pourrait expliquer l'existence préférentielle de ce phénomène dans notre secteur.

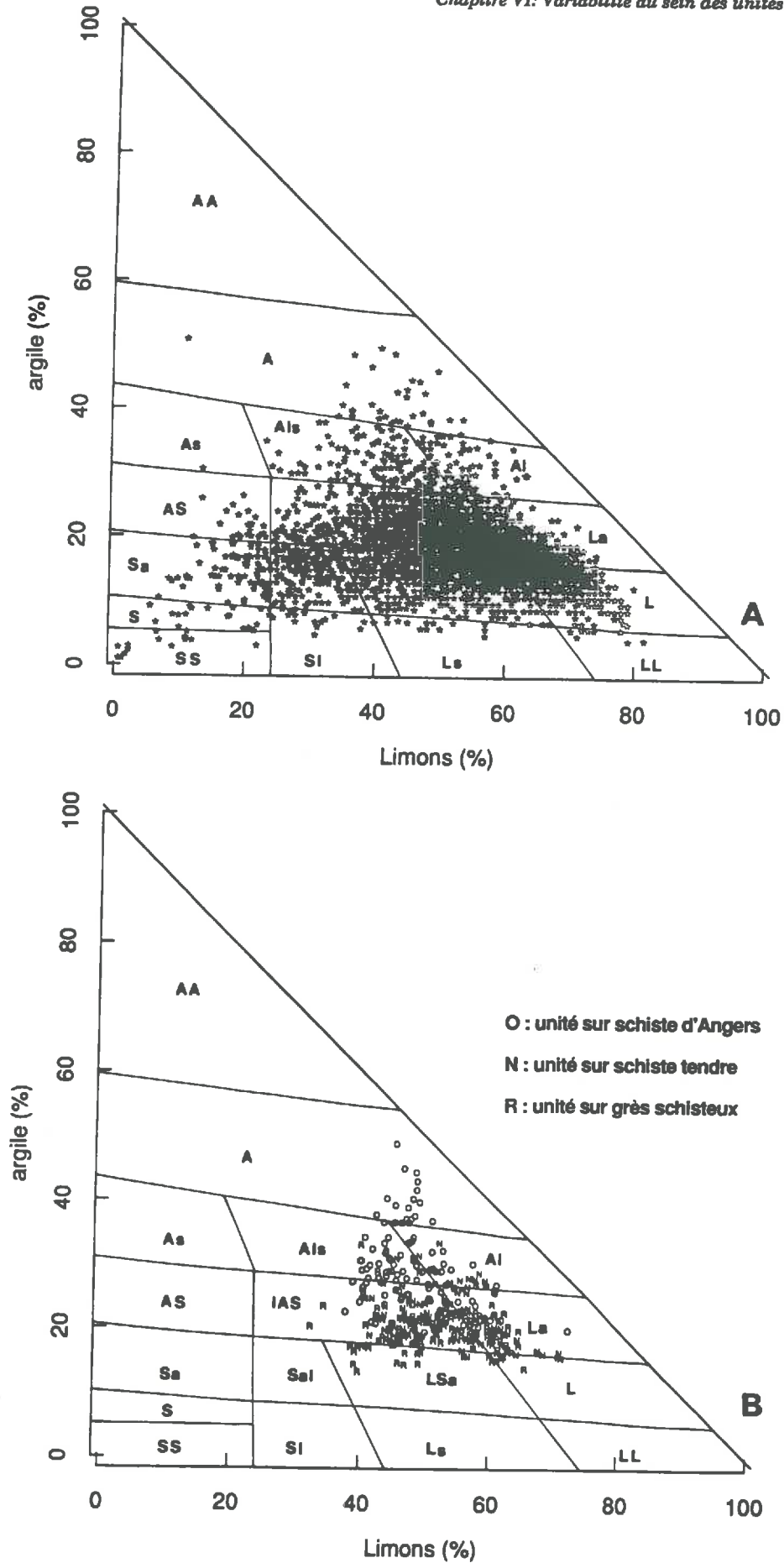


Figure VI.6: Situation dans le triangle du GEPPA de la composition granulométrique de 6900 analyses de terre réalisées en Ille-et-Vilaine (A) et des 360 échantillons des trois unités cartographiques étudiées (B).

### **Conclusion sur la variabilité des propriétés analytiques de l'horizon de surface:**

Pour les différentes propriétés analytiques de l'horizon de surface retenues, nous avons:

- décrit de façon globale la variabilité au sein de chacune des trois unités cartographiques. Cette variabilité est apparue d'importance variable suivant l'unité cartographique considérée;
- montré que les trois unités cartographiques constituent des populations statistiquement différentes, ce qui souligne l'intérêt du découpage pédologique pour décrire la variabilité spatiale de ces propriétés et justifie a posteriori l'intérêt de l'étude quantitative de la variabilité intra-unité cartographique;
- montré que les horizons de surface des trois unités cartographiques présentent des taux d'argile supérieurs à la médiane départementale et que la variabilité de ce taux sur notre secteur d'étude était proche de la variabilité observée à l'échelle départementale.

### **3. RELATION ENTRE LA PURETE DES UNITES CARTOGRAPHIQUES ET LA VARIABILITE DES PROPRIETES ANALYTIQUES.**

Une question intéressante est de savoir s'il existe une relation entre les niveaux de pureté d'une unité cartographique et la variabilité des propriétés analytiques étudiées. Par exemple, la variabilité du taux d'argile serait-elle moindre sur l'unité *O.B4* si la pureté stricte de cette unité avait été plus grande? Plus généralement, peut-on espérer obtenir, en utilisant les mêmes critères cartographiques, une variabilité moindre des propriétés analytiques au sein des unités cartographiques, en établissant des cartes dont les indices de pureté seraient plus élevés?

On remarque en premier lieu que l'unité cartographique *R3B4* pour laquelle les indices de pureté sont apparus les plus faibles (Tab VI.1) présente globalement la variabilité la plus faible des propriétés analytiques (Fig.VI.3).

Pour être plus précis, regroupons les sondages effectués au sein d'une unité cartographique en fonction du code de légende qui leur a été affecté (Fig.VI.1).

Nous pouvons comparer les résultats obtenus pour ces différents groupes à ceux obtenus pour l'ensemble des sondages de l'unité cartographique: pour disposer d'un effectif suffisant, nous ne retenons que les trois codes de légende les plus fréquemment rencontrés sur chaque unité cartographique; nous estimons ensuite pour les différents groupes ainsi définis, la moyenne et l'écart-type des propriétés analytiques (Tab. VI.6).

	Effectif	ARGILE (%)		CARB. ORG. (%)		CEC (meq/100g)		LIMONS (%)		SABLES (%)	
		Moy.	EC	Moy.	EC	Moy.	EC	Moy.	EC	Moy.	EC
<b>UNITE N.B4</b>	<b>120</b>	<b>22.1</b>	<b>3.9</b>	<b>16.7</b>	<b>3.7</b>	<b>8.9</b>	<b>1.6</b>	<b>52.7</b>	<b>7.1</b>	<b>25.1</b>	<b>7.0</b>
code N.B3	13	23.0	4.7	16.3	3.8	8.9	1.6	53.8	5.8	22.1	4.1
code N.B4	47	23.9	5.3	18.2	4.8	9.4	1.6	50.7	6.3	25.3	6.6
code N.B5	41	23.1	4.2	19.0	5.3	9.8	2.1	50.2	6.8	26.7	6.4
<b>UNITE R3B4</b>	<b>120</b>	<b>19.4</b>	<b>2.8</b>	<b>15.8</b>	<b>3.4</b>	<b>7.3</b>	<b>0.9</b>	<b>52.4</b>	<b>7.4</b>	<b>28.1</b>	<b>7.6</b>
code R.B5	25	19.5	4.7	16.5	2.8	7.6	0.9	48.5	7.4	31.9	7.6
code R3B4	18	19.6	3.3	14.3	2.1	7.1	0.6	55.6	6.3	24.8	6.7
code R3C4	11	17.8	2.8	14.6	3.7	7.2	1.1	59.0	7.0	23.2	4.2
<b>UNITE O.B4</b>	<b>120</b>	<b>28.6</b>	<b>6.3</b>	<b>22.4</b>	<b>5.5</b>	<b>10.9</b>	<b>1.8</b>	<b>48.9</b>	<b>6.1</b>	<b>22.6</b>	<b>6.9</b>
code O.B4	38	27.1	5.2	21.4	4.9	10.6	1.8	49.4	7.3	23.6	5.5
code O.B5	37	27.1	5.5	23.9	4.8	11.0	2.1	47.3	7.3	26.4	6.2
code O4F3	7	38.2	6.8	25.9	3.2	12.1	0.8	47.8	0.9	13.9	6.9

Moy= moyenne arithmétique; E.C= écart-type d'échantillonnage

**Tableau VI.6:** Moyenne et écart-type de différentes propriétés analytiques de l'horizon de surface estimés pour l'ensemble des échantillons d'une unité cartographique ou en regroupant les sondages de même code de légende.

La moyenne d'une propriété calculée pour les seuls sondages d'une unité cartographique présentant le même code de légende, est de façon générale proche de la moyenne générale de l'unité cartographique: à titre d'exemple, la moyenne de la CEC pour l'unité *N.B4* est de 8.9 meq/100g alors que celles des sondages rattachées respectivement aux codes "N.B3", "N.B4" et "N.B5" sont de 8.9 meq/100g, 9.4 meq/100g et 9.8 meq/100g.

De même, les écarts-type d'échantillonnage des sondages regroupés par leur code de légende sont de façon générale du même ordre de grandeur que ceux observés sur l'unité: l'écart-type de la CEC pour l'unité *N.B4* est de 1.6 meq/100g, alors qu'il est de 1.6 meq/100g, 1.6 meq/100g et 2.1 meq/100g pour les sondages rattachés respectivement aux codes "N.B3", "N.B4" et "N.B5".

*Ainsi, la variabilité des propriétés analytiques retenues pour des types de sol définis à partir des critères cartographiques, est du même ordre de grandeur que celle observée sur l'unité cartographique. La voie d'une meilleure description de la variabilité spatiale de ces propriétés analytiques à travers l'obtention de cartes plus "pures" vis-à-vis des critères cartographiques, semble donc peu prometteuse.*

Notons néanmoins une exception qui est celle des sondages rattachés au code "O4F3", pour lesquels une altérite de schiste a été rencontrée surmontant le schiste peu altéré. Les taux d'argile des échantillons prélevés pour ces sondages sont très élevés (38.2 %) et correspondent aux valeurs maximales observées pour cette variable sur l'unité *O.B4*. La distinction cartographique de ces sondages aurait donc permis une réduction de la variabilité du taux d'argile au sein de l'unité *O.B4*, qui est apparue considérable.

## 4. DISCUSSION

### 4.1 Bilan des principaux résultats acquis.

Nous nous sommes efforcés au cours de ce chapitre de décrire la variabilité de propriétés du sol au sein de trois unités cartographiques, en distinguant les propriétés qui ont servi à l'établissement de la typologie du document cartographique (les critères cartographiques) et des propriétés qui ne sont pas des critères cartographiques (propriétés analytiques de l'horizon de surface).

Un bilan synthétique de cette analyse peut être établi comme suit:

- (1) sur la base des critères cartographiques, les observations effectuées dans les trois unités cartographiques se rattachent à des ensembles typologiques non sécants.  
La profondeur du sol et la classe d'hydromorphie constituent les critères le plus fréquemment à l'origine des écarts par rapport à la définition de l'unité cartographique; les puretés vis à vis du substrat et du développement de profil sont par contre élevées.  
Au sein d'une unité cartographique, le nombre de successions différentes d'horizons est apparu important, soulignant l'importance des choix effectués par le cartographe pour construire sa typologie.
- (2) la variabilité des propriétés analytiques retenues a fait l'objet d'une description pour chaque unité cartographique. La CEC, le taux d'argile et de carbone organique sont les propriétés discriminant le plus nettement les populations d'échantillons provenant des trois unités cartographiques. Pour ces trois mêmes propriétés, on peut établir un ordre de variabilité croissant au sein des trois unités cartographiques, qui est le suivant:  
R3B4 < N.B4 < O.B4.
- (3) une meilleure prise en compte de la variabilité spatiale de ces propriétés analytiques ne semble pas pouvoir être obtenue par l'obtention de cartes dont la pureté vis à vis des critères cartographiques actuels, serait meilleure.

### 4.2 Conséquences de la variabilité intra-unité cartographique en matière d'utilisation du document cartographique

Pour dépasser la simple description de la variabilité de propriétés du sol au sein d'une unité cartographique, il nous semble important de mesurer les conséquences de cette variabilité en matière d'utilisation du document cartographique.

Pour cela, nous considérons successivement deux exemples d'application de la carte pédologique.

#### 4.2.1 Premier exemple: l'estimation des risques de battance.

Rémy et Marin-Lafèche (1974) proposent un indice R, destiné à estimer les risques de battance. Cet indice est obtenu en considérant le rapport:

$$R = \frac{1,5 \cdot \text{Limons fins} + 0,75 \cdot \text{Limons grossiers}}{\text{Argile} + 10 \cdot \text{Matière organique}}$$

Les auteurs fournissent une grille d'interprétation de cet indice, en distinguant différentes classes (Tab. VI.7).

En calculant cet indice pour les 120 échantillons prélevés par unité cartographique, nous obtenons une répartition des résultats dans les différentes classes de l'indice, exposée dans le tableau VI.7.

Valeur de R	< 1.4	1.4 à 1.6	1.6 à 1.8	1.8 à 2	>2
Interprétation	<i>non battant</i>	<i>peu battant</i>	<i>assez battant</i>	<i>battant</i>	<i>très battant</i>
Unité N.B4	25 %	38 %	25 %	10 %	2 %
Unité R3B4	25 %	44 %	19 %	10 %	2 %
Unité O.B4	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %

**Tableau VI.7:** Fréquence des différentes classes d'indice de battance pour les échantillons des trois unités cartographiques

Les échantillons des unités *N.B4* et *R3B4* se répartissent principalement entre les classes considérées comme "non battantes", "peu battantes" et "assez battantes". L'estimation des risques de battance à partir de la carte pédologique sera donc pour ces deux unités cartographiques, peu précise, bien qu'une tendance générale de sols peu battants soit mise en évidence.

Par contre, les échantillons de l'unité *O.B4* sont tous considérés comme "non battants", alors que la variabilité de leurs propriétés analytiques était apparue dans l'absolu comme la plus forte.

Ainsi, pour cet indice de battance, la variabilité observée au sein de l'unité *O.B4* n'entraîne pas d'incertitude sur l'estimation du risque de battance. L'incertitude sur cette estimation est plus élevée pour les unités *R3B4* et *N.B4*, bien que la variabilité intra-unité cartographique des propriétés analytiques soit apparue moindre.

#### 4.2.2 Deuxième exemple: le calcul des besoins en chaux

Les méthodes d'estimation du besoin en chaux sont nombreuses. La plus utilisée repose sur la mesure du pH (Coppenet et al., 1986; Morel, 1988). Bourrié et Aurousseau (1987) proposent une méthode qu'ils qualifient de plus fiable, reposant sur la mesure de l'aluminium échangeable, de l'acidité d'échange et de la désaturation du complexe absorbant.

Pour les sols que nous étudions, le pH est compris entre 5 et 7. A ces pH, la part des ions acides comme  $Al^{3+}$  et  $H^+$  est habituellement faible ou nulle. L'approche peut donc être simplifiée et Bourrié et Aurousseau (1987) proposent de déterminer la quantité de cations à apporter, à partir de la détermination de la capacité d'échange cationique (notée ici T) et du taux de saturation (S/T), suivant la formule:

$$SS = T ( S/T - S/T ) \quad (1)$$

- où :
- SS** est la quantité de cations à apporter en milliéquivalents pour 100 g de terre
  - T** est la capacité d'échange cationique mesurée à pH 7 (méthode Metson)
  - S/T** est le taux de saturation souhaité
  - S/T** est le taux de saturation initial mesuré à pH 7.
  - (S/T - S/T)** correspond à un accroissement souhaité du taux de saturation.



En considérant que 80 % des cations doivent être apportés sous forme de  $\text{Ca}^{2+}$  et en admettant que l'on a 4000 tonnes de terre par hectare, l'équation (1) permet de déterminer le besoin en chaux (BEC) suivant:

$$BEC = 1,12 T (S/T - S/T) \quad (2)$$

où : BEC est le besoin en chaux exprimé en tonnes de CaO par hectare.

Dans un objectif de simulation, nous faisons varier l'accroissement souhaité du taux de saturation entre 4 % et 60 %, pour chacun des 120 échantillons des trois unités cartographiques; nous calculons ensuite le besoin en chaux. Nous faisons ce même calcul en tenant compte de la valeur médiane de la capacité d'échange cationique observée sur le département, à savoir 10 milléquivalents pour 100 grammes.

La figure VI.7 présente les résultats obtenus. Pour les trois unités cartographiques, on indique l'estimation, en fonction du pourcentage d'accroissement du taux de saturation, de cinq paramètres statistiques décrivant la variabilité du besoin en chaux: le premier décile, le quartile inférieur, la médiane, le quartile supérieur et le 9<sup>ème</sup> décile. La lecture de ces graphiques est simple.

Considérons l'unité *O.B4* et supposons que le pourcentage d'accroissement du taux de saturation soit de 40 %; dans ce cas, le besoin en chaux exprimé à travers les résultats analytiques obtenus sur cette unité, est compris dans 80 % des cas entre les courbes 1 et 5, soit entre 3.8 tonnes de CaO par hectare et 5.8 tonnes par hectare; la médiane est de 4.8 tonnes de CaO par hectare. Cette présentation nous semble intéressante parce qu'elle permet de raisonner en terme de risque d'accepter de sur-chauler ou de sous-chauler. Dans l'exemple précédent, en retenant la valeur de 5.8 tonnes par hectare correspondant au 9<sup>ème</sup> décile, on accepte de sur-chauler dans 90 % des situations; en retenant la valeur médiane de 4.8 tonnes par hectare, on va sur-chauler dans 50 % des situations et sous-chauler dans 50 % des situations.

L'analyse de la figure VI.7 montre que les besoins en chaux diffèrent sensiblement dans les différentes situations décrites.

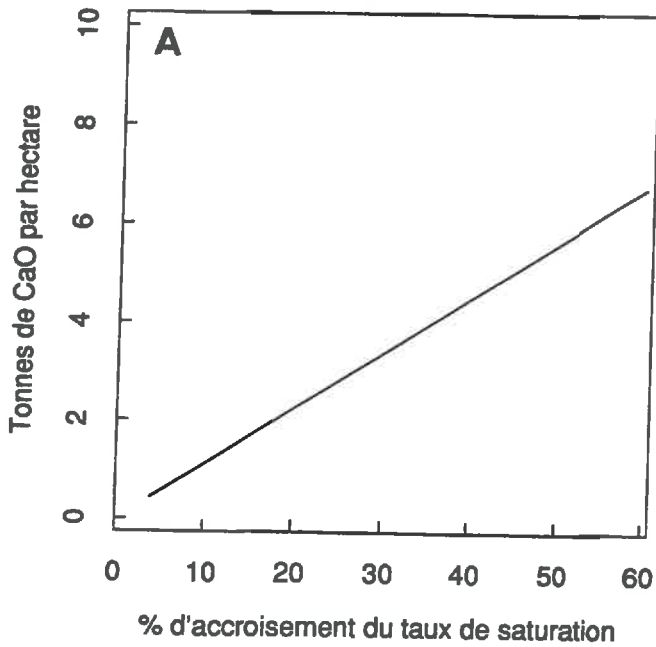
La prise en compte de valeurs médianes départementales aboutirait, dans le contexte de nos trois unités cartographiques, à un sur-chaulage systématique sur l'unité *R3B4*, à un sur-chaulage dans trois-quarts des cas sur l'unité *N.B4* et par contre à un sous-chaulage dans trois-quarts des cas sur l'unité *O.B4*.

Par ailleurs, pour un même pourcentage d'accroissement du taux de saturation, les besoins en chaux sont croissants pour les unités cartographiques rangées dans l'ordre: *R3B4* < *N.B4* < *O.B4*

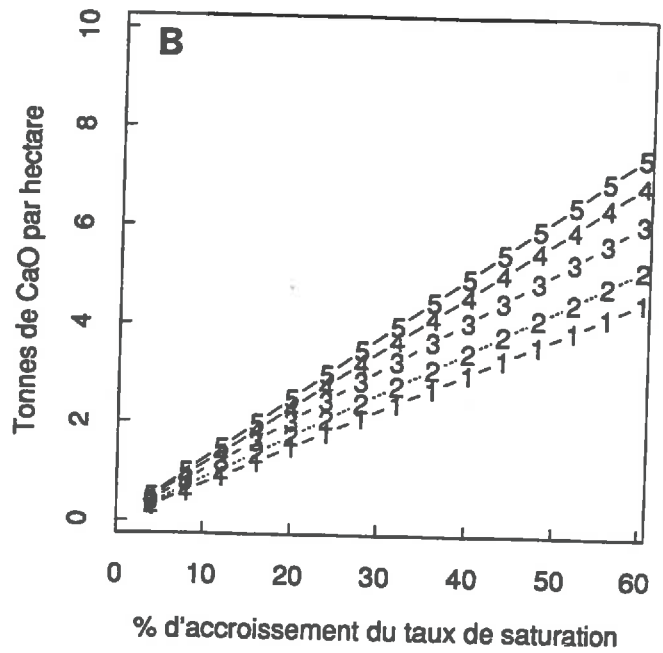
L'effet de la variabilité intra-unité cartographique dépend du pourcentage d'accroissement du taux de saturation souhaité: il est faible quand le taux de saturation souhaité est proche du taux de saturation initial, les valeurs du premier et du neuvième décile étant proches; il est de plus en plus important au fur et à mesure que l'écart entre le taux de saturation souhaité et le taux de saturation initial augmente.

Pour l'unité *R3B4*, l'étendue entre le premier et le neuvième décile est relativement faible: il reste inférieur dans toutes les situations à 1.5 tonnes par hectare. Cet écart est nettement plus important pour les unités *N.B4* et surtout *O.B4*: pour cette dernière unité, il atteint 2.5 tonnes par hectare pour un pourcentage d'accroissement du taux de saturation de 40 %

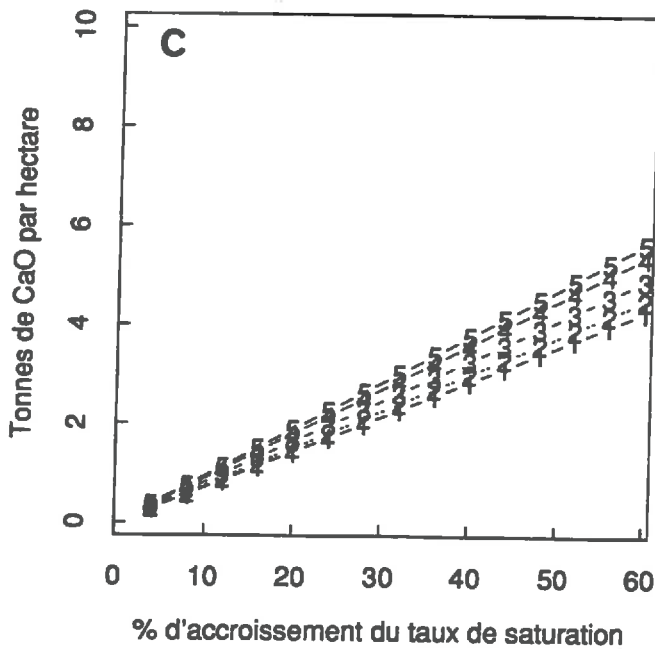
Mediane departementale



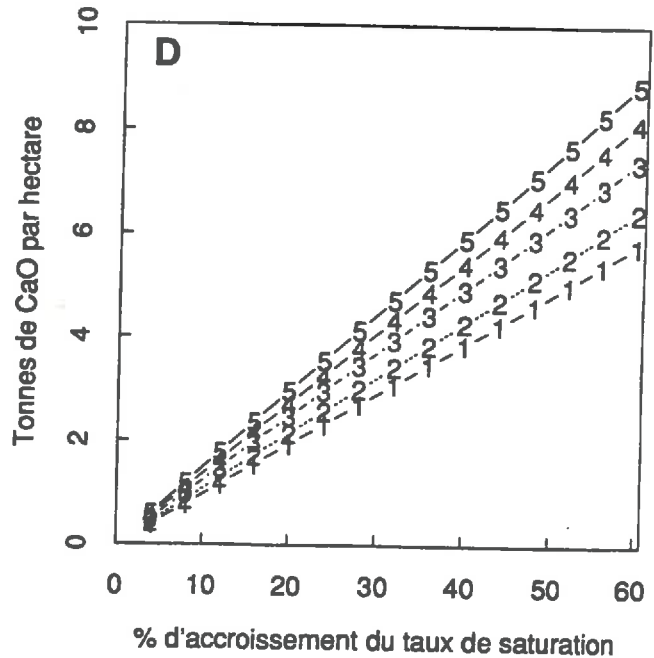
unite N.B4



unite R3B4



unite O.B4



Légende:

- 1: Premier décile
- 2: Quartile inférieur
- 3: Médiane

- 4: Quartile supérieur
- 5: Neuvième décile

Figure VI.7: Paramètres statistiques estimés du besoin en chaux en fonction de l'accroissement souhaité du taux de saturation.

A: Evolution du besoin en chaux en considérant une capacité d'échange cationique de 10 meq/100g (médiane départementale)

B, C, D: Paramètres statistiques du besoin en chaux estimés pour les 120 échantillons prélevés sur les unités N.B4, R3B4 et O.B4.

En résumé, les modèles utilisés dans ces deux exemples, estimation des risques de battance et estimation du besoin en chaux, présentent donc des sensibilités très différentes à la variabilité spatiale des propriétés du sol au sein des unités cartographiques. Pour l'unité *O.B4*, l'effet de cette variabilité sera nul pour l'estimation du risque de battance; cet effet sera au contraire très important en matière d'estimation du besoin en chaux puisqu'il se traduit par un intervalle d'incertitude élevé sur ce besoin.

Les réactions que l'on peut envisager face à ce dernier type de situation, c'est-à-dire une incertitude importante sur la décision à prendre, sont au moins au nombre de trois:

- on peut remettre en cause le modèle utilisé et vérifier que sa grande sensibilité à la variabilité des propriétés du sol, n'est pas due à un emploi inadéquat dans le contexte d'étude;
- on peut ensuite essayer d'obtenir des estimations plus précises des propriétés du sol entrant en jeu. Dans cette optique, la seule connaissance globale de la variabilité au sein des unités cartographiques, ne fournit que peu d'indications sur la stratégie à mettre en place à cet effet.
- on peut enfin informer sur l'existence de cette incertitude.

### **Conclusion du chapitre VI:**

En nous aidant d'outils simples (histogrammes, indices de pureté, paramètres statistiques), nous avons décrit de façon globale la variabilité de propriétés du sol au sein de trois unités cartographiques, les propriétés retenues étant ou non des critères cartographiques.

La variabilité intra-unité cartographique existe et elle s'avère importante pour certaines propriétés ou certaines unités cartographiques: deux exemples frappants que nous avons rencontrés concernent la variabilité des propriétés morphologiques des horizons au sein d'une unité cartographique et la variabilité du taux d'argile ou de la CEC au sein de l'unité *O.B4*.

Pour juger de cette variabilité, nous avons cherché des références, ce qui nous a amené à comparer les trois unités cartographiques ou encore à replacer la variabilité observée dans un contexte plus général (le département).

Nous montrons ainsi que les trois unités cartographiques correspondent à des contextes pédologiques différents: sur la base des critères cartographiques, il n'y a pas de recoupement entre les types de sol observés dans les trois unités; pour les propriétés analytiques de l'horizon de surface, les distributions observées correspondent à des populations statistiques différentes.

Nous établissons ainsi l'intérêt de la prise en compte de la carte pédologique pour estimer dans l'espace les critères cartographiques, mais également pour estimer d'autres propriétés du sol du fait de l'existence de corrélations entre ces propriétés et les critères cartographiques.

Nous montrons que les conséquences de cette variabilité en matière d'utilisation du document cartographique dépendent du modèle employé. L'apport important de la connaissance de la variabilité intra-unité cartographique réside justement dans le fait que la sensibilité d'un modèle à la variabilité spatiale des propriétés du sol, peut être testée.

La limite d'une seule caractérisation globale de la variabilité intra-unité cartographique réside dans le fait qu'on aboutit à un constat et qu'on ne dispose que de peu d'indications sur les conditions d'obtention d'estimations plus précises: dans certains cas, ce simple constat est suffisant car la variabilité apparaît faible (exemple: le taux d'argile au sein de l'unité *R3B4*); dans d'autres cas, ce constat semble insuffisant (ex: le taux d'argile sur *O.B4*) et il faut envisager des moyens d'obtention d'estimations plus précises.

Nous espérons fournir des indications concernant ces moyens d'obtention, en analysant dans le chapitre suivant la structure spatiale de propriétés du sol au sein des unités cartographiques.

## Chapitre VII

# STRUCTURE SPATIALE AU SEIN DES UNITES CARTOGRAPHIQUES

A l'issue du chapitre VI, nous avons mis en évidence l'existence d'une variabilité intra-unité cartographique d'une part pour des propriétés morphologiques des sols, d'autre part pour des propriétés analytiques de l'horizon de surface.

Au cours du chapitre VII, nous reprenons successivement ces deux groupes de propriétés et nous cherchons à fournir des indications sur la structure spatiale de leur variabilité au sein des unités cartographiques. La description de la structure spatiale de la variabilité d'une propriété au sein d'une unité cartographique, consiste d'une part en la comparaison de la variabilité intra- et inter- plages cartographiques, d'autre part en la comparaison de la variabilité entre des observations distantes de 5, 25 et 100 mètres au sein d'une même plage cartographique.

Le chapitre VII comprend ainsi deux points principaux:

### 1. *La structure spatiale des propriétés morphologiques du sol.*

Elle est analysée à travers deux approches, l'une se basant sur la présence-absence d'horizons distingués par leurs propriétés morphologiques, l'autre se basant sur la comparaison des sondages à différents niveaux de profondeur.

### 2. *La structure spatiale des propriétés analytiques de l'horizon de surface.*

Il s'agit des propriétés précédemment étudiées: les fractions granulométriques, le carbone organique et la capacité d'échange cationique (CEC).

## 1. STRUCTURE SPATIALE DES PROPRIETES MORPHOLOGIQUES DU SOL

### 1.1 Le choix de deux approches.

L'inventaire des horizons observés sur l'unité cartographique *O.B4* nous a amené à distinguer douze types d'horizons différents (Tab. VI.3), distingués sur la base de critères de couleur, de compacité, de couleur et d'abondance des taches, et de présence de concrétions.

Si on s'attache à analyser les successions verticales de ces horizons, on dénombre dix huit successions d'horizons différentes (Fig. VI.2) observées dans 120 sondages.

Ce constat a deux types de conséquences dès lors que l'on cherche à étudier la structure spatiale des propriétés morphologiques du sol:

- on dispose de trop peu d'observations concernant une succession d'horizons donnée pour espérer analyser son occurrence entre les 23 plages cartographiques ou au sein d'une même plage cartographique;
- il en est de même pour certains horizons qui n'ont été observés que dans de rares sondages.

Nous pensons néanmoins pouvoir fournir des indications concernant la structure spatiale des propriétés morphologiques du sol au sein des unités cartographiques, en utilisant successivement deux types d'approche:

- (1) en analysant *la présence-absence des horizons les plus fréquemment observés*; cette analyse de la présence-absence est faite entre plages cartographiques et au sein d'une plage cartographique;
- (2) en *comparant les sondages à différents niveaux de profondeur* grâce à des méthodes d'analyses multidimensionnelles.

## 1.2 Première approche: la présence-absence de certains horizons

### 1.2.1 Les horizons retenus.

Nous présentons cette approche à partir des observations faites sur l'unité *O.B4* et nous retenons cinq types d'horizons que nous avons précédemment définis (Tableau VI.3), à savoir:

- Horizon 3* : Couleur 10YR54, environ 15 % d'éléments grossiers, peu compact, sans taches ni concrétions;
- Horizon 4* : Couleur 10YR56, environ 15 % d'éléments grossiers, peu compact, sans taches ni concrétions;
- Horizon 6* : Couleur 10YR66, environ 15 % d'éléments grossiers, compact, sans taches ni concrétions;
- Horizon 7* : Couleur 10YR66, environ 30 % d'éléments grossiers, très compact, taches de couleur 75YR58 assez nombreuses et concrétions assez nombreuses;
- Altérite* : Regroupement des horizons 11 et 12 du tableau VI.3, se caractérisant par une couleur vert ou bleu grisâtre, une forte compacité et de nombreuses taches de couleur 75YR58 ou 10YR72.

Les horizons 3 et 4 sont des horizons de surface; les horizons 6 et 7 sont des horizons intermédiaires se superposant éventuellement et surmontant soit une altérite, soit le schiste peu altéré; enfin les horizons d'altérite sont des horizons profonds observés au-dessus du schiste.

### 1.2.2. Analyse de la présence-absence de ces horizons dans les différentes plages cartographiques

Pour les 120 sondages effectués dans 23 plages cartographiques différentes de l'unité cartographique *O.B4*, on dénombre en premier lieu les sondages où un horizon donné a été décrit. On dénombre ensuite les plages cartographiques dans lesquelles cet horizon a été décrit dans au moins un sondage. Par différence avec le nombre total de plages cartographiques, on déduit le nombre de plages cartographiques dans lesquelles cet horizon n'a jamais été décrit (Tab VII.1).

	<i>Horizon 3</i>	<i>Horizon 4</i>	<i>Horizon 6</i>	<i>Horizon 7</i>	<i>Altérite</i>
Nombre de sondages parmi 120 sondages, où l'horizon est apparu	49	51	31	27	19
Nombre de plages parmi 23 plages, où l'horizon a été décrit au moins une fois	18	20	14	13	8
Nombre de plages parmi 23 plages, où l'horizon n'a jamais été décrit	5	3	9	10	15

**Tableau VII.1:** Dénombrement de la présence d'horizons dans les 120 sondages et les 23 plages cartographiques de l'unité *O.B4*

Ce dénombrement montre que:

- aucun horizon n'a été décrit dans plus de la moitié des sondages effectués dans cette unité cartographique;
- quel que soit l'horizon considéré, il existe toujours plusieurs plages cartographiques dans lesquelles cet horizon n'a pas été observé.
- dans une plage cartographique où un horizon a été décrit, il existe en moyenne au moins un sondage pour lequel cet horizon est apparu absent. En effet, le rapport ["Nombre de sondages où un horizon a été décrit"/ "Nombre de plages où l'horizon a été décrit au moins une fois"] est toujours inférieur à 3, alors qu'au moins quatre sondages ont été implantés dans une même plage cartographique.

L'absence d'un horizon au sein d'une plage cartographique est soit liée à son absence effective, soit à une fréquence d'apparition faible qui n'a pas pu être décelée à partir de notre échantillonnage.

*Ainsi, la variabilité, au sein de l'unité cartographique O.B4, de la présence ou de l'absence d'un horizon, ne peut être expliquée uniquement par des différences entre plages cartographiques. Une variabilité concernant la présence-absence d'un horizon, existe au sein d'une même plage cartographique.*

### **1.2.3 Analyse de la présence-absence de ces horizons pour des couples de sondages distants de 100, 25 et 5 mètres.**

Le constat d'une variabilité intra-plage cartographique étant établi, à quelles conditions peut-on espérer cartographier au sein d'une même plage cartographique les zones où un horizon donné est présent ou absent ?

Pour obtenir des éléments de réponse, nous comparons les couples de sondages distants de 100, 25 et 5 mètres et analysons en terme de fréquence, leur similarité par rapport à la présence ou l'absence des horizons retenus.

#### **1.2.3.1 Présence d'un horizon.**

Le tableau VII.2 présente les fréquences de présence d'un horizon dans un sondage distant de 100, 25 ou 5 mètres d'un premier sondage où cet horizon a été décrit.

Pour expliquer l'obtention de ces chiffres, rappelons brièvement les caractéristiques de l'échantillonnage (§ V.2.1). Sa première phase a consisté en l'implantation par tirage aléatoire aux noeuds d'une grille, de 30 points  $A_i$  au sein des plages cartographiques de l'unité. A partir de chacun de ces points, on a défini la position de trente autres points  $B_i$  à 100 mètres, puis de trente points  $C_i$  à 25 mètres, enfin de trente points  $D_i$  à 5 mètres. On dispose ainsi de trente couples de points ( $A_i$ ,  $B_i$ ) distants de 100 mètres, de trente couples ( $B_i$ ,  $C_i$ ) distants de 25 mètres et de trente couples de points ( $C_i$ ,  $D_i$ ) distants de 5 mètres.

Considérons à présent l'exemple de l'horizon 3.

Cet horizon 3 a été décrit 12 fois parmi les trente sondages  $A_i$  implantés lors de la première phase de la stratégie d'échantillonnage de l'unité O.B4. Ce même horizon a été décrit dix fois dans les sondages  $B_i$  distants de 100 mètres de ces douze premiers points. La fréquence de la présence de l'horizon 3 dans un sondage distant de 100 mètres d'un point où il a été observé, est donc estimée par le rapport  $10/12$  soit 83 %.

Parmi les trente points  $B_1$ , on dénombre 14 sondages dans lesquels l'horizon 3 a été décrit. Ce même horizon 3 a été retrouvé 11 fois dans les sondages  $C_1$  distants de 25 mètres de ces 14 sondages. On estime donc la fréquence de sa présence dans un sondage distant de 25 mètres d'un point où il a été observé, par le rapport 11/14.

Ce même calcul a été effectué pour les 5 types d'horizons retenus et les trois distances séparant les couples de sondages.

	Horizon 3	Horizon 4	Horizon 6	Horizon 7	Altérite
100 mètres	10/12 83 %	9/12 75 %	5/8 58 %	2/7 28 %	2/5 40 %
25 mètres	11/14 79 %	10/11 90 %	6/7 87 %	5/6 83 %	5/5 100 %
5 mètres	11/12 92 %	12/14 86 %	8/8 100 %	7/7 100 %	4/5 80 %

**Tableau VII.2:** Fréquence de la présence d'un horizon dans un sondage distant de 100, 25 ou 5 mètres d'un sondage où il a été observé.

Le faible nombre de couples de sondages disponible pour chaque pas de distance, incite à la prudence. Néanmoins, les fréquences apparaissent nettement différentes pour les horizons 3 et 4 d'une part, pour les horizons 6, 7 et l'altérite d'autre part.

- Pour les horizons 3 et 4, la fréquence de leur présence dans un sondage distant de 100, 25 ou 5 mètres d'un sondage où ils ont été observés, est toujours supérieure à 75 %.
- Pour les horizons 6, 7 et l'altérite, cette même fréquence diminue fortement entre 25 mètres et 100 mètres. Pour une distance de 100 mètres, elle n'est plus que de 28 % pour l'horizon 7 et de 40 % pour l'altérite.

### 1.2.3.2 Absence d'un horizon.

Dans le tableau VII.3, on s'intéresse à la fréquence de l'absence d'un horizon dans un sondage distant d'une distance donnée d'un sondage où il n'a pas été observé.

Reprenons l'horizon 3. Cet horizon n'a pas été observé dans 18 des trente sondages  $A_1$  implantés lors de la première phase de la stratégie d'échantillonnage. Si on considère les sondages  $B_1$  distants de 100 mètres de ces 18 sondages, ce même constat d'absence a été fait pour 12 sondages. La fréquence de l'absence de cet horizon à 100 mètres d'un point où il n'a pas été observé, est estimée par le rapport 12/18 soit 67 %.

	Horizon 3	Horizon 4	Horizon 6	Horizon 7	Altérite
100 mètres	12/18 67 %	13/18 72 %	21/22 95 %	19/23 83 %	22/25 88 %
25 mètres	14/16 87 %	15/19 79 %	21/23 91 %	21/24 83 %	24/25 96 %
5 mètres	18/18 100 %	15/16 94 %	21/22 95 %	23/23 100 %	25/25 100 %

**Tableau VII.3:** Fréquence de l'absence d'un horizon dans un sondage distant de 100, 25 ou 5 mètres d'un sondage où il est apparu absent.

Ces résultats amènent aux mêmes regroupements d'horizons que précédemment:

- pour les horizons 3 et 4, la fréquence de leur absence dans un sondage décroît avec la distance séparant ce sondage du sondage où l'absence a été constatée.
- pour les horizons 6,7 et l'altérite, cette fréquence est supérieure à 90% pour les trois distances.

### 1.2.4 Discussion

Pour expliciter les résultats précédents, examinons deux cas de figure.

Dans un premier exemple, supposons que l'on ait implanté un sondage au sein d'une plage cartographique de l'unité O.B4 et qu'en ce point, seul l'horizon 3 ait été observé. En implantant un autre sondage à 100 mètres dans une direction aléatoire, les deux événements les plus probables sont:

- d'une part, la disparition de l'horizon 3 avec une fréquence de (100 moins 83) %, soit environ dans deux cas sur dix (Tab. VII.2);
- d'autre part, l'apparition de l'horizon 4 avec une fréquence de (100 moins 72) %, soit environ dans trois cas sur dix (Tab. VII.3).

Dans un second exemple, supposons qu'un premier sondage ait révélé la présence des horizons 4, 7 et de l'altérite. En implantant un nouveau sondage à 100 mètres, les événements les plus probables sont les suivants: (i) la disparition des horizons 4, 7 et de l'altérite dans respectivement deux cas sur dix, sept cas sur dix et six cas sur dix (Tab. VII.2); (ii) l'apparition de l'horizon 3 dans trois cas sur dix.

En matière de stratégie d'échantillonnage pour effectuer une cartographie de la présence-absence de ces horizons, ces résultats suggèrent:



*(1) une distance d'échantillonnage maximale de l'ordre de 100 mètres.*

Entre deux sondages distants de 100 mètres, le risque de franchir une limite d'apparition ou de disparition d'horizon est au moins de deux cas sur dix. Une distance d'échantillonnage de 100 mètres semble donc une distance maximale dès lors que l'on cherche à cartographier de façon précise ces limites de présence-absence;

*(2) une distance d'échantillonnage dépendante des observations déjà effectuées.*

Si lors d'une première observation, seuls les horizons 3 ou 4 ont été repérés, le risque d'apparition ou de disparition d'un des cinq horizons considérés est de l'ordre de 3/10 pour une distance de 100 mètres. Si lors de cette première observation, la présence d'un des horizons 6,7 ou de l'*altérite* a été notée, le risque d'apparition ou de disparition d'un des cinq horizons, est de l'ordre de huit sur dix. Cette différence de risque justifie un échantillonnage plus dense dans la deuxième situation pour espérer localiser de façon précise les zones de présence des horizons 6, 7 ou de l'*altérite* qui apparaissent peu étendues.

L'approche que nous venons de présenter peut faire l'objet de trois critiques:

1. On n'a tenu compte que de la présence-absence des cinq horizons les plus fréquents en négligeant leur position dans le profil, leur épaisseur et en négligeant également l'existence d'autres horizons. Ce choix a été fait en raison d'un échantillonnage initial faible par rapport au nombre d'horizons observés. La cartographie conjointe d'autres horizons nous conduirait à un échantillonnage encore plus dense. L'échantillonnage proposé est donc bien un échantillonnage minimal.
2. Ne peut-on procéder à des regroupements d'horizons ce qui simplifierait la cartographie, ce regroupement se faisant par exemple sur la base d'un fonctionnement identique? Cela nécessite des études plus fines et notre approche ne permet pas de le faire de façon fiable. Notons néanmoins que notre approche permettrait de fournir des indications sur les conditions de cartographie des horizons regroupés sur de telles bases.
3. On ne tient pas compte des relations entre les horizons et de leur position dans le paysage. Mais, pour connaître par exemple les relations entre les horizons, il faut disposer au préalable d'études détaillées de l'organisation tridimensionnelle de la couverture pédologique. Pour localiser les horizons, notre approche propose donc de compenser un manque de connaissances en matière d'organisation des horizons et de leur distribution dans le paysage, par une densité d'échantillonnage plus élevée.

## CONCLUSION:

En analysant des indices de présence-absence des cinq horizons les plus fréquemment décrits dans l'unité *O.B4*, nous montrons qu'il existe au sein d'une même plage cartographique des limites d'apparition et de disparition d'horizons. Nous montrons ensuite, qu'en l'absence d'une connaissance des relations entre les horizons, la cartographie de ces limites requiert une distance d'échantillonnage inférieure à 100 mètres.

### **1.3 Deuxième approche: la comparaison des sondages à différents niveaux de profondeur**

Dans la première approche, nous avons examiné les possibilités d'une meilleure description de la variabilité des propriétés morphologiques au sein d'une unité cartographique, à travers une cartographie de la présence ou de l'absence d'horizons.

Nous changeons à présent de vision et nous ne nous intéressons plus à l'horizon mais au profil, constitué d'une succession verticale d'horizons en nombre et d'épaisseur variables; les horizons sont décrits par différentes propriétés morphologiques. L'objectif dans ce cas est de s'interroger sur les conditions d'une cartographie de la variabilité des propriétés morphologiques au niveau du profil.

Comme l'information recueillie porte sur les propriétés des horizons, le passage de la comparaison d'horizons à celle de profils suppose nécessairement un certain nombre de choix.

Girard (1983) a présenté une revue bibliographique des différentes possibilités envisageables pour résoudre cette difficulté. Lui même propose avec King (1986) une méthode basée successivement sur la construction "d'horizons de référence" puis de "profils de référence".

Nous avons préféré utiliser pour notre objectif d'analyse de la structure spatiale des propriétés morphologiques du sol, une autre méthode qui nous permette de comparer deux à deux des sondages.

### **1.3.1 Le principe de la méthode**

De nombreux auteurs proposent de comparer des descriptions de profils (Rayner, 1966; Oliver, 1984; King, 1986; Simmoneaux, 1987) en les comparant à différents niveaux de profondeur.

Nous nous sommes inspirés de ces différents travaux pour établir une méthode de comparaison entre sondages qui comporte les étapes suivantes:

1. Le choix du nombre et des profondeurs de comparaison des sondages.  
Ce choix s'appuie sur l'histogramme des profondeurs d'apparition des horizons.
2. La construction d'un tableau comportant en lignes les sondages et en colonnes des variables correspondant aux modalités des propriétés morphologiques des horizons présents à chacun des niveaux de comparaison.
3. La recherche d'axes, indépendants entre eux, tenant compte du maximum de l'information du tableau étudié, en utilisant l'Analyse Factorielle des Correspondances Multiples (AFCM).

Rappelons que l'Analyse Factorielle des Correspondances Multiples est une simple extension de l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC), elle même très proche de l'ACP déjà évoquée. Alors que l'AFC met en correspondance un ensemble de lignes constitué d'individus avec un ensemble de colonnes constitué de variables ordonnées, l'AFCM croise ce même ensemble de lignes avec un ensemble de colonnes constitué cette fois des modalités des variables.

L'intérêt de l'AFCM est triple: (i) elle permet de traiter à la fois des variables qualitatives et des variables qualitatives ordonnées; (ii) des liaisons éventuellement non linéaires entre les modalités des variables peuvent être mises en évidence; (iii) la projection des modalités des variables dans les plans factoriels facilitent l'interprétation de ceux-ci.

### **1.3.2 Sa mise en oeuvre pratique**

#### **1.3.2.1 Choix des niveaux de comparaison.**

Le choix des niveaux de comparaison est facilité par les histogrammes d'apparition et de disparition des horizons décrits dans les sondages des trois unités cartographiques. La figure VII.1 présente l'histogramme des profondeurs d'apparition des 721 horizons décrits dans les 360 sondages effectués lors de l'échantillonnage des unités *N.B4*, *R3B4* et *O.B4*.

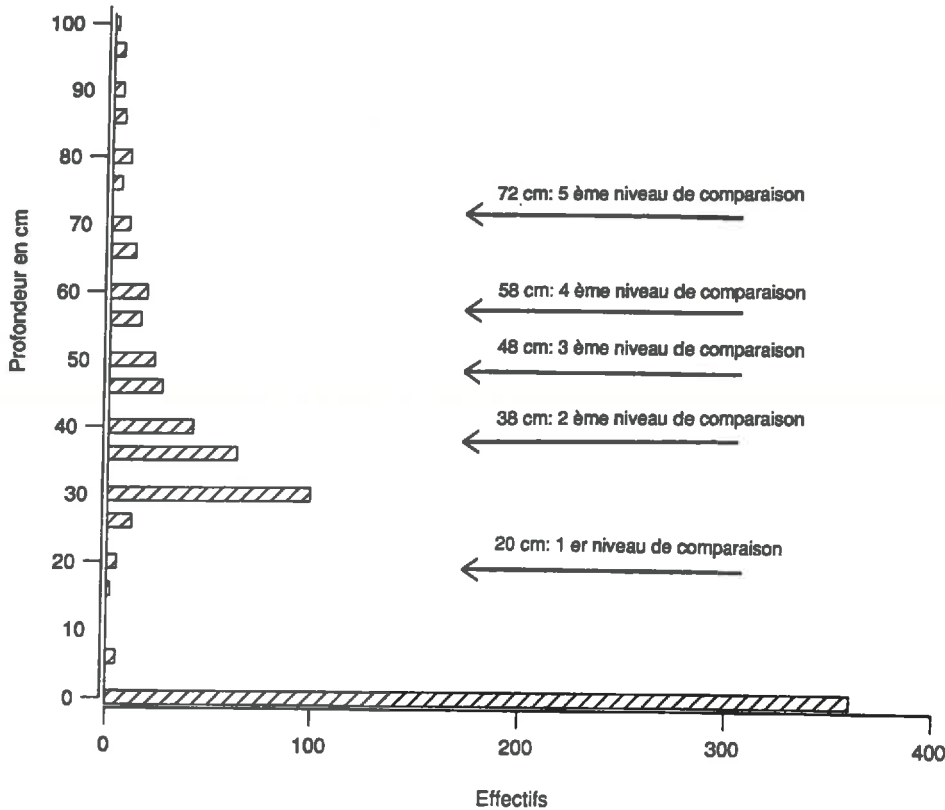


Figure VII.1: Histogramme des profondeurs d'apparition des 721 horizons décrits pour les 360 sondages implantés au sein des trois unités cartographiques N.B4, R3B4 et O.B4

Il semble intéressant de comparer les sondages à des niveaux de profondeur compris entre deux modes successifs de profondeur d'apparition d'horizons, de telle sorte à échantillonner au mieux la variabilité verticale des propriétés morphologiques d'un sondage.

En tenant compte de cette règle, le choix final des niveaux de comparaison ne peut être fait que par approximations successives et en faisant des choix. Nous avons retenu en définitive 5 niveaux de comparaison à 20 cm, 38 cm, 48 cm, 58 cm et 72 cm, privilégiant les comparaisons pour des profondeurs comprises entre 30 et 70 cm.

Ce choix s'explique par deux raisons:

- (i) dans une étude précédente (Leparoux, 1988), il est apparu que la variabilité des propriétés morphologiques du sol à des profondeurs comprises entre 40 et 70 cm, pouvait être reliée à des différences de perception par les agriculteurs, du comportement de leur parcelle.
- (ii) le fait de retenir des niveaux de comparaison profonds (>80 cm) donne un poids excessif à la profondeur d'apparition des substrats qui s'échelonne dans nos sondages entre 30 cm et 120 cm. Tous les principaux axes factoriels sont dans ce cas définis par cette profondeur d'apparition. Les niveaux de comparaison profonds ont de ce fait été exclus.

### 1.3.2.2 Le choix et le codage des propriétés morphologiques aux différents niveaux de comparaison.

Le choix des niveaux de comparaison étant fait, nous construisons un tableau comprenant en lignes les sondages et en colonnes l'ensemble des propriétés morphologiques des horizons présents à ces niveaux, à savoir: l'humidité, la couleur de la matrice, l'abondance des éléments grossiers, la compacité de l'horizon, l'abondance des taches d'oxydation, l'abondance des taches de réduction, l'existence d'un autre type de tache, l'abondance des concrétions.

Par la suite, on observe à chaque niveau de comparaison, l'histogramme de chacune des propriétés morphologiques. Cette observation des histogrammes débouche:

- sur une décision de retenir ou non une propriété dans la suite de l'analyse. Une propriété est abandonnée dès lors qu'elle est toujours décrite par une même modalité à ce niveau de profondeur (exemple: les taches d'oxydation sont toujours absentes à 20 cm);

- sur un codage des propriétés morphologiques; ce codage résulte d'un compromis entre des considérations pédologiques (exemple: regrouper les couleurs que l'on sait proche...) et des considérations statistiques (un nombre de modalités des différentes propriétés du même ordre de grandeur, le regroupement de modalités faiblement représentées avec d'autres modalités).

A l'issue de ces trois phases successives de choix des niveaux de comparaison, de choix des propriétés morphologiques retenues à chaque niveau de comparaison et de codage de ces propriétés, on dispose d'un tableau de 360 sondages décrits par 32 propriétés morphologiques auxquelles sont associées 117 modalités. C'est sur ce tableau qu'une Analyse Factorielle des Correspondances Multiples est effectuée.

On complète ce tableau par un certain nombre de variables dites "illustratives" car ne contribuant pas à la définition des axes principaux de l'AFCM, mais que l'on sait situer sur ces axes. Les variables "illustratives" retenues sont principalement les critères cartographiques utilisées lors de l'établissement de la carte pédologique: profondeur du sol, classe d'hydromorphie, type de développement de profil, substrat ... La prise en compte de ces variables illustratives doit faciliter l'interprétation des axes factoriels.

### 1.3.3 L'interprétation des Axes Principaux de l'AFCM

On trouvera les résultats complets de l'AFCM en annexes D.

L'histogramme des valeurs propres de l'Analyse Factorielle des Correspondances Multiples nous amène à limiter notre analyse aux quatre premiers axes, les valeurs propres des axes suivants étant faibles.

L'axe 1 est défini par les profondeurs d'apparition du substrat. Il oppose les sondages pour lesquels le substrat apparaît dès 30 cm aux sondages pour lesquels le substrat n'a pas encore été observé à 72 cm. Entre ces deux extrêmes, les différentes profondeurs d'apparition du substrat sont disposées de façon quasi-linéaire le long de l'axe.

Cet axe peut donc être interprété de façon aisée comme un axe de profondeur croissante du sol. Cette interprétation est confirmée par l'étude des corrélations entre cet axe et la variable "profondeur du sol" prise en tant que variable supplémentaire.

L'axe 2 est défini par les modalités décrivant l'abondance des taches d'oxydation ou de réduction aux niveaux 38, 48, 58 et 72 cm. Il oppose les sondages pour lesquels des taches d'oxydo-réduction nombreuses ont été observées dès le niveau 38 cm, aux sondages pour lesquels aucune de ces taches n'a été décrite au niveau 72 cm.

De façon synthétique, il s'agit d'un axe d'hydromorphie décroissante, cet axe étant bien corrélé au critère cartographique "classe d'hydromorphie".

L'axe 3 est à nouveau défini par les profondeurs d'apparition du substrat. Il oppose les sondages pour lesquels le substrat apparaît à 48 ou 58 cm, aux sondages pour lesquels ce substrat est présent dès 38 cm ou n'est pas encore apparu à 72 cm. A cet axe sont de ce fait associées, aux niveaux 38 et 48 cm, des modalités de couleur, de compacité et d'abondance d'éléments grossiers qui sont plus fréquentes pour des sondages dont la profondeur d'apparition du substrat se situe à 48 ou 58 cm: une compacité élevée, une abondance des éléments grossiers importante, une couleur brun jaune claire (10YR66).

Il s'agit donc d'un axe opposant les sondages moyennement profonds (entre 40 et 60 cm) aux sondages très peu profonds (< 40 cm) ou profonds (>70 cm).

L'axe 4 est défini par les modalités de la couleur de la matrice, de l'abondance des éléments grossiers, de la compacité et de l'abondance des taches au niveau 38, 48 et 58 cm. Il oppose au reste de la population, les sondages présentant entre 38 et 58 cm un horizon de couleur 10YR64, peu compact, avec une charge en éléments grossiers inférieure à 20 % et des taches d'oxydo-réduction peu nombreuses.

L'axe 4 discrimine ainsi les sondages en fonction des propriétés de l'horizon présent entre 38 et 48 cm.

Bien qu'il ne s'agisse pas d'une variable explicitement prise en compte, la profondeur du sol constitue ainsi un facteur prépondérant pour expliquer l'organisation du tableau analysé: elle définit deux des quatre premiers axes définis par l'AFCM.

Si on considère en tant que variable illustrative, l'unité cartographique dont provient chacun des sondages, on remarque que cette variable est corrélée uniquement au deuxième axe factoriel. En effet, les sondages provenant de l'unité cartographique *R3B4* sont associés au pôle "hydromorphe" de cet axe et les sondages provenant des unités *N.B4* et *O.B4* au pôle "non hydromorphe". On note avec intérêt que ce constat correspond à la définition des trois unités cartographiques.

*En conclusion, la mise en oeuvre de l'AFCM sur un tableau permettant de comparer les propriétés morphologiques des sondages à différents profondeurs nous amène à définir quatre axes principaux révélateurs de l'organisation de ce tableau: un premier axe interprété comme un axe de profondeur croissante; un second axe interprété comme un axe d'hydromorphie décroissante; un troisième axe interprété comme un axe opposant les sondages moyennement profonds aux sondages peu profonds ou très profonds; un quatrième axe discriminant enfin les sondages en fonction des propriétés de l'horizon présent entre 38 et 48 cm.*

### **1.3.4 Le calcul des variogrammes moyens des quatre premiers axes de l'AFCM**

La position des sondages sur les axes de l'AFCM permet de juger de la similarité de deux sondages quelconques par rapport aux propriétés définissant ces axes. Par exemple, un sondage dont la coordonnée sur l'axe 1 est positive, est associé aux sols profonds; un autre sondage dont la coordonnée sur cet axe est négative, est associé aux sols peu profonds. La distance séparant ces deux sondages sur l'axe 1 peut donc être interprétée en terme de similarité entre ces deux sondages par rapport à la profondeur du sol.

Pour analyser l'évolution de cette similarité en fonction de la distance géographique séparant les sondages, nous avons calculé les variogrammes moyens des positions des sondages sur les quatre premiers axes factoriels suivant une démarche analogue à celle employée par Nortcliff (1978) ou Oliver (1984). La figure VII.2 représente les variogrammes moyens ainsi obtenus pour les trois unités cartographiques *N.B4*, *R3B4* et *O.B4*.

Les traits marquants de ces différents variogrammes sont les suivants:

*- tous les variogrammes sont croissants jusqu'à une distance de 100 mètres;*

Cette croissance se produit selon des modalités différentes suivant l'axe ou l'unité cartographiques considérés. Par exemple, elle est faible entre 5 et 25 mètres, puis forte entre 25 mètres et 100 mètres pour l'unité cartographique *R3B4* sur le premier axe factoriel. Elle est au contraire très forte entre 5 et 25 mètres, puis faible entre 25 mètres et 100 mètres pour l'ensemble des unités cartographiques sur le troisième axe factoriel.

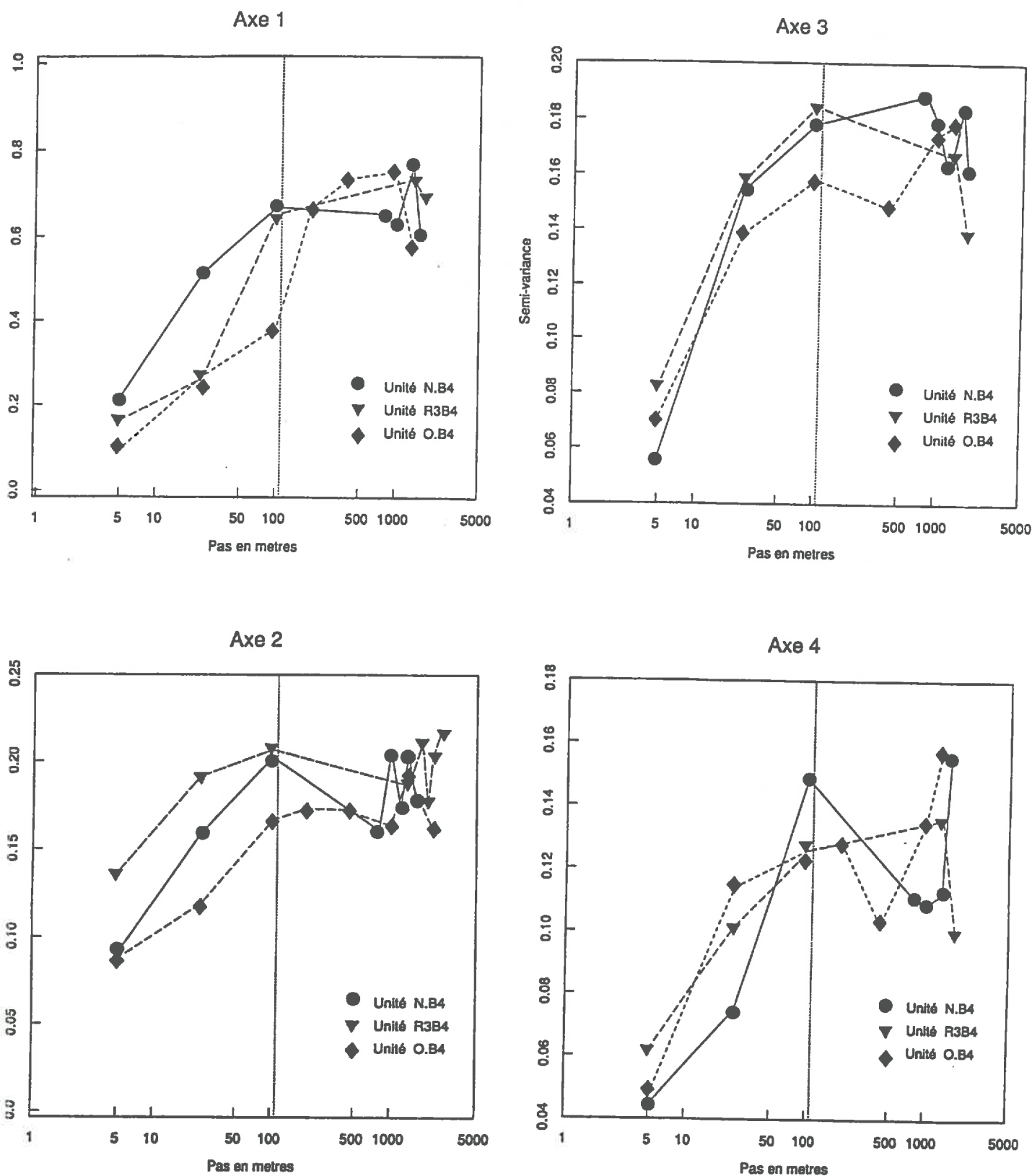


Figure VII.2: Variogrammes moyens des quatre premiers axes factoriels de l'AFCM sur les propriétés morphologiques des horizons, à 5 niveaux de comparaison, des sondages des 3 unités cartographiques

*- l'existence d'une variabilité pour une distance de 5 mètres.*

Pour le premier axe factoriel, la semi-variance pour une distance de 5 mètres représente de l'ordre de 20 % de celle pour une distance de 100 mètres. Ce même rapport est de l'ordre de 30 % sur le second axe, de l'ordre de 40 % pour les troisième et quatrième axes factoriels.

Cette variabilité pour une distance de 5 mètres peut s'expliquer par des raisons classiques, à savoir des erreurs d'observation ou l'existence d'une variabilité présente à un pas inférieur à 5 mètres. Une autre raison peut être invoquée dans ce cas, à savoir la qualité de la projection des sondages sur les axes factoriels, pouvant varier d'un sondage à l'autre.

*- le palier des variogrammes est atteint pour une distance de 100 mètres;*

La semi-variance pour une distance de 100 mètres est du même ordre de grandeur que les semi-variances pour des points séparés d'une distance supérieure. Le palier des variogrammes est donc atteint pour une distance de 100 mètres.

Il s'en suit que la variabilité observée au sein d'une même plage cartographique pour une distance de 100 mètres est du même ordre de grandeur que celle observée pour des points situés dans des plages cartographiques différentes.

Notons néanmoins une exception qui est celle de l'unité *O.B4* sur le premier axe factoriel pour laquelle la semi-variance pour une distance de 100 mètres est très nettement inférieure à celle observée pour des distances supérieures.

### **1.3.5 Discussion**

Pour appréhender la variabilité des propriétés morphologiques d'une succession verticale d'horizons (profil), nous avons adopté une démarche consistant à comparer deux sondages en comparant les modalités des propriétés morphologiques des horizons présents à différents niveaux de profondeur.

L'Analyse Factorielle de Correspondances Multiples a permis de définir des axes synthétisant les différences principales entre sondages observées lors de cette comparaison: ces différences sont liées essentiellement à des différences de profondeur du sol, à des différences d'abondance et de profondeur d'apparition d'indices d'hydromorphie et à des différences d'aspect des horizons entre 40 et 60 cm.

*Le calcul des variogrammes moyens montre en premier lieu que la proximité des sondages sur les axes factoriels, établie indépendamment de leur proximité géographique, n'est pas spatialement aléatoire: les variogrammes sont croissants jusqu'à une distance de 100 mètres montrant que la proximité sur les axes factoriels décroît avec la distance séparant les sondages.*

*Ce calcul des variogrammes montre ensuite que la variabilité des propriétés morphologiques prises en compte par les axes factoriels, est du même ordre de grandeur pour des points distants de 100 mètres et pour des points distants de plus de 100 mètres: il s'en suit que l'essentiel de la variabilité au sein d'une unité cartographique des propriétés morphologiques ainsi prises en compte, est présent dans une des plages cartographiques constituant cette unité cartographique.*

*De plus, au sein d'une même plage cartographique, la variabilité observée pour des points distants de 25 mètres est parfois importante et proche de celle observée pour une distance de 100 mètres.*

*Ces résultats permettent d'envisager les moyens d'obtention d'une cartographie des propriétés morphologiques du sol au sein d'une plage cartographique:*

- dans le cadre d'une cartographie utilisant les seules observations ponctuelles du sol (par exemple le krigeage), la distance d'échantillonnage doit nécessairement être inférieure à la portée de 100 mètres pour qu'une structure spatiale puisse être mise en évidence. La définition optimale de cette distance suppose une définition plus fine du variogramme entre 25 et 100 mètres. Néanmoins, l'importance de la variabilité pour des points distants de 25 mètres, suggère que la distance d'échantillonnage doit être proche de cette distance.*
- dans le cadre d'une cartographie tenant compte de la variabilité des facteurs extrinsèques du sol, des relations doivent être recherchées entre des variations des propriétés morphologiques du sol et des facteurs extrinsèques du milieu dont l'échelle de variation est de l'ordre de 25 à 100 mètres: dans le contexte de notre étude, il peut s'agir de variations de pente.*

On peut reprocher à cette démarche le fait que la variabilité des propriétés morphologiques du sol à un niveau donné ne soit pas bien prise en compte.

L'effet "profondeur du sol" est en effet prépondérant. Les variations de couleur de la matrice, de compacité, de couleur ou d'abondance des taches,...., ne sont donc que partiellement prises en compte dans les premiers axes factoriels. Leur influence est surtout perceptible sur les axes factoriels secondaires, mais il s'avère que l'interprétation de ces axes est souvent délicate.

Pour gommer cet effet de profondeur du sol, il nous faudrait soit travailler niveau par niveau (on réalise une AFCM à 20 cm, une autre à 38 cm...), soit retenir uniquement des niveaux de comparaison proches de la surface.

De toute évidence, la démarche consistant à comparer à différents niveaux de profondeur des sondages, est intéressante dans le cas de sols dont la profondeur varie peu; elle est moins satisfaisante dans le cas d'une très grande variabilité de la profondeur du sol.

## **Conclusion sur la structure spatiale des propriétés morphologiques.**

Rappelons qu'au cours du chapitre VI, la pureté partielle du critère cartographique "développement de profil", tenant compte de la variabilité de certaines propriétés morphologiques du sol, a été estimée à plus de 80 % et semblait donc satisfaisante. L'inventaire des horizons décrits sur une unité cartographique avait néanmoins montré que le nombre de ces horizons et le nombre de successions différentes d'horizons, étaient élevés. Nous avons alors souligné l'importance des choix faits par le pédologue pour délimiter ses unités cartographiques.

Dans cette première partie du chapitre VII, nous sommes intéressés aux conditions d'obtention d'une cartographie plus précise de la variabilité des propriétés morphologiques du sol. La première difficulté consistait à choisir une façon d'appréhender la variabilité des propriétés morphologiques du sol. Aucune méthode ne semblait pleinement satisfaisante, nous avons choisi successivement deux approches, l'une se basant sur la présence-absence de certains horizons, l'autre consistant à comparer les sondages à différents niveaux de profondeur.

Les résultats concernant la structure spatiale des propriétés morphologiques du sol concordent pour les deux approches employées: la variabilité de ces propriétés observées au sein d'une unité cartographique est présente pour une grande part au sein d'une des plages cartographiques la constituant. De plus, cette variabilité est souvent importante pour des sondages distants de 25 mètres.

Une cartographie détaillée de la variabilité des propriétés morphologiques à travers l'une ou l'autre des deux approches utilisées, passe donc par un échantillonnage dense au sein d'une même plage cartographique, la distance d'échantillonnage étant nécessairement inférieure à 100 mètres et vraisemblablement proche de 25 mètres.



## 2. STRUCTURE SPATIALE DES PROPRIETES ANALYTIQUES DE L'HORIZON DE SURFACE

La variabilité des propriétés analytiques de l'horizon de surface est apparue précédemment différente suivant l'unité cartographique ou la propriété considérées: pour le taux d'argile par exemple, elle est apparue faible sur l'unité *R3B4*, l'écart-type d'échantillonnage étant de 2.8 %; elle est apparue forte au contraire sur l'unité *O.B4*, l'écart-type d'échantillonnage étant de 6.3 %.

Nous cherchons à présent à analyser la structure spatiale de chacune de ces propriétés et pour cela nous avons calculé leurs variogrammes moyens pour chacune des trois unités cartographiques *N.B4*, *R3B4* et *O.B4*. Tous ces variogrammes sont présentés dans les figures VII.3, VII.4 et VII.5; les échelles des graphiques sont identiques pour les trois unités cartographiques, afin de permettre une comparaison visuelle des variogrammes.

### 2.1 Les variogrammes moyens du taux d'argile, du carbone organique et de la CEC (Figure VII.3)

Nous allons analyser les résultats en considérant successivement les trois unités cartographiques.

#### 2.1.1 L'unité cartographique *N.B4*

Pour l'unité cartographique *N.B4*, les variogrammes du taux d'argile, du carbone organique et de la CEC présentent une semi-variance faible pour des points distants de 5 mètres: elle est de 0.8 (%)<sup>2</sup> pour le taux d'argile, de 1.8 (%<sup>o</sup>)<sup>2</sup> pour le carbone organique et de 0.18 (meq/100g)<sup>2</sup> pour la CEC. Les résultats obtenus pour des points distants de 5 mètres sont donc très proches et les différences observées peuvent vraisemblablement s'expliquer par des erreurs de mesure.

Entre 5 et 100 mètres, les variogrammes sont croissants: la semi-variance pour un pas de 100 mètres est de 3.9 (%)<sup>2</sup> pour le taux d'argile, de 8.1 (%<sup>o</sup>)<sup>2</sup> pour le carbone organique et de 0.7 (meq/100g)<sup>2</sup> pour la CEC.

Pour les distances supérieures à 100 mètres, les valeurs de semi-variance sont plus élevées et sont de l'ordre de grandeur de la variance des propriétés sur l'ensemble de l'unité cartographique.

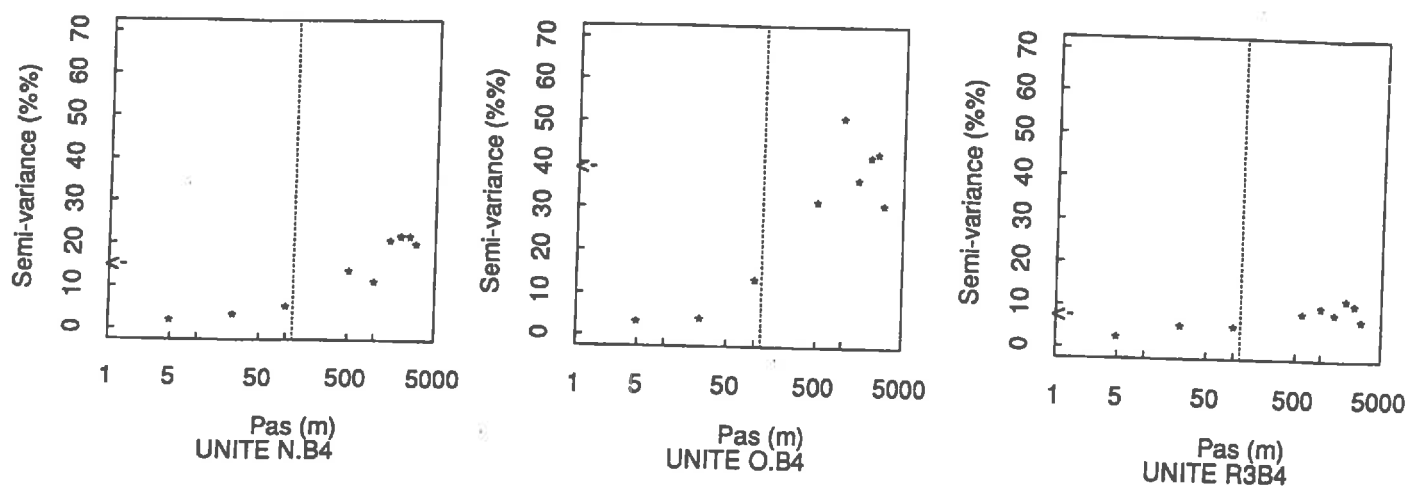
#### 2.1.2 L'unité cartographique *O.B4*

De façon générale, les semi-variances calculées sur l'unité cartographique *O.B4* sont plus grandes que pour l'unité *N.B4*; on retrouve ainsi le fait déjà noté, d'une variabilité plus grande sur cette unité, du taux d'argile, du carbone organique et de la CEC..

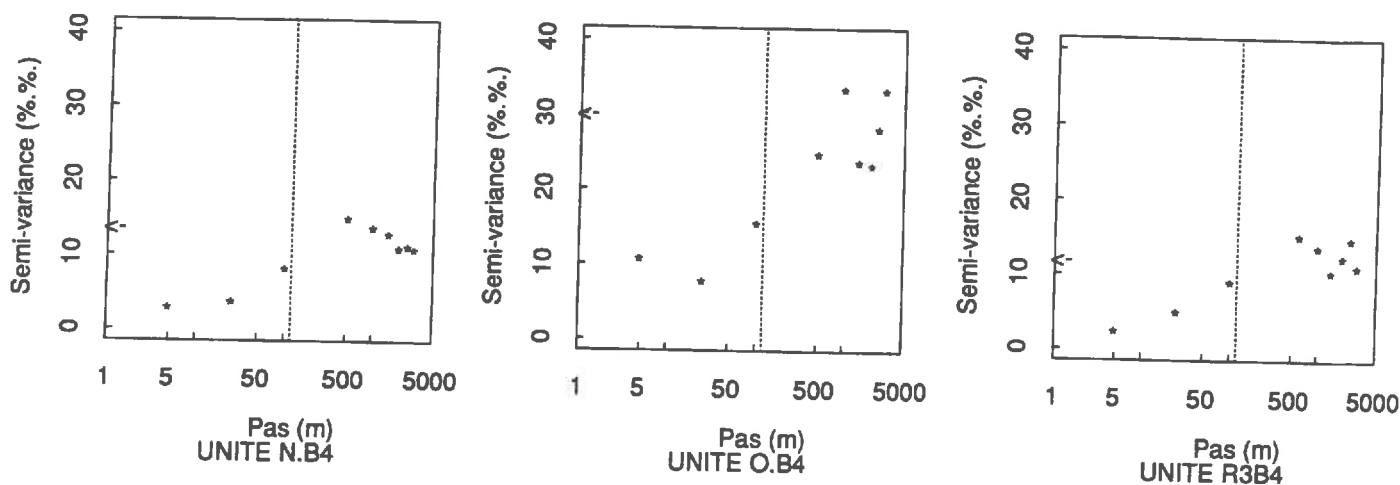
Jusqu'à 100 mètres, on retrouve les caractéristiques précédentes: pour un pas de 5 mètres, les semi-variances sont plus grandes que précédemment mais restent faibles; entre 5 et 100 mètres, les variogrammes sont croissants.

Au-delà de 100 mètres, les valeurs de semi-variance sont nettement plus élevées et on note un saut très net entre ces valeurs et celles observées pour des distances inférieures à 100 mètres.

### VARIOGRAMME DU TAUX D'ARGILE



### VARIOGRAMME DU CARBONE ORGA.



### VARIOGRAMME DE LA CEC

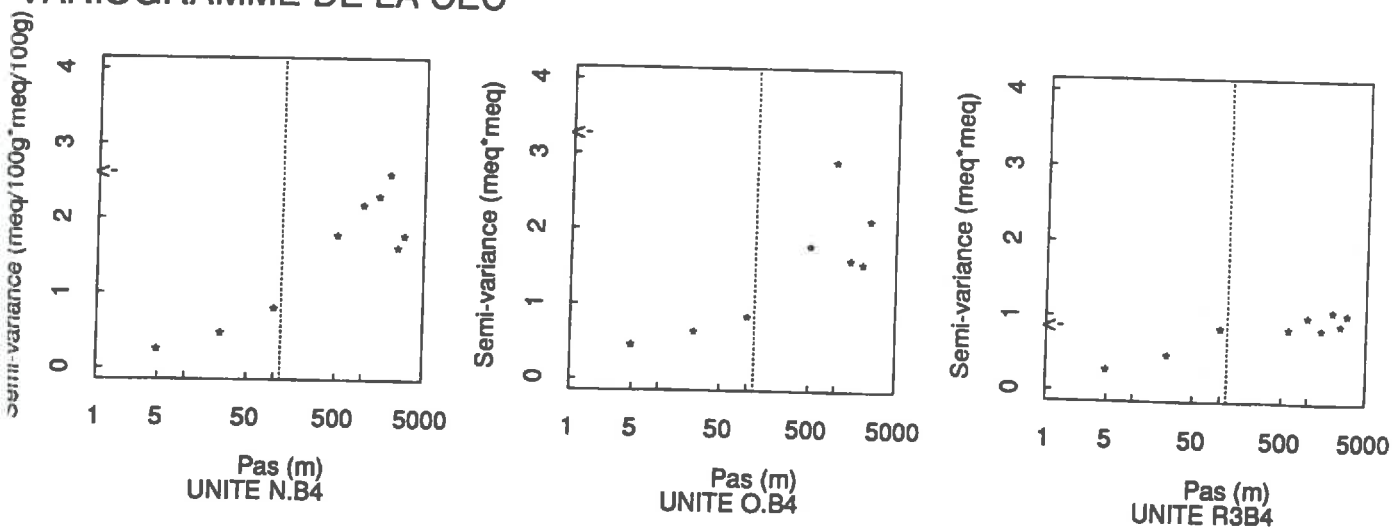


Figure VII.3: Variogrammes moyens du taux d'argile, du carbone organique et de la CEC de l'horizon de surface, pour les trois unités cartographiques.  
(La flèche <- , disposée sur l'axe des ordonnées, indique la variance de la propriété)

### **2.1.3 L'unité cartographique R3B4**

Les variogrammes des trois propriétés présentent les valeurs les plus faibles sur cette unité, et cela pour chaque pas de distance. La variabilité de ces propriétés était déjà apparue, pour cette unité cartographique, comme la plus faible des trois unités étudiées.

L'allure des variogrammes présente des caractéristiques évoquées précédemment, à savoir une semi-variance faible pour une distance de 5 mètres et une croissance du variogramme jusqu'à une distance de 100 mètres.

L'aspect particulier de ces variogrammes réside dans le fait que la semi-variance pour une distance de 100 mètres est du même ordre de grandeur que les semi-variances pour des distances supérieures à 100 mètres et que cette semi-variance est proche de la variance calculée pour l'ensemble de l'unité.

*En résumé de l'observation des variogrammes du taux d'argile, du carbone organique et de la CEC, on retient:*

- *les valeurs des variogrammes sont d'autant plus grandes que la variabilité des propriétés étudiées est grande pour l'ensemble des unités cartographiques et on retrouve l'ordre de variabilité croissante déjà évoqué:  $R3B4 < N.B4 < O.B4$ ;*
- *pour les trois unités, la semi-variance pour une distance de 5 mètres est faible et le variogramme est croissant jusqu'à 100 mètres;*
- *pour les unités N.B4 et O.B4, la semi-variance pour une distance de 100 mètres est inférieure à celles pour des distances supérieures et très nettement inférieure à la variance calculée pour l'ensemble de l'unité cartographique;*
- *pour l'unité R3B4, la semi-variance pour une distance de 100 mètres est proche de la variance de l'ensemble de l'unité.*

## **2.2 Les variogrammes moyens des fractions limoneuses (Fig.VII.4)**

### **2.2.1 L'unité cartographiques N.B4**

Jusqu'à 100 mètres, les caractéristiques des variogrammes des fractions limoneuses sont les suivantes: une semi-variance faible ( $< 3 (\%)^2$ ) pour une distance de 5 mètres et une croissance du variogramme jusqu'à 100 mètres vers des valeurs nettement inférieures à celles de la variance sur l'ensemble de l'unité.

Au-delà de 100 mètres, les semi-variances sont nettement supérieures et proches de la variance sur l'ensemble de l'unité.

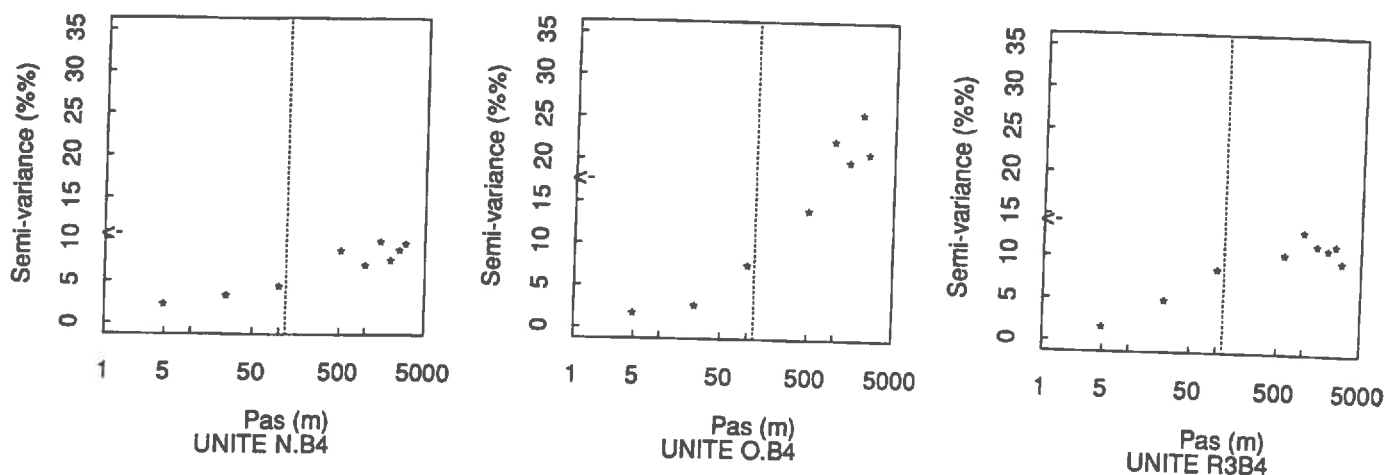
### **2.2.2 L'unité cartographique O.B4**

Pour les limons fins et les limons grossiers, les semi-variances sont élevées correspondant à une variabilité élevée de ces deux fractions sur cette unité. La variabilité élevée de ces deux fractions ne se répercute pas sur les limons totaux, somme des deux fractions précédentes, pour lesquels les semi-variances apparaissent modérées.

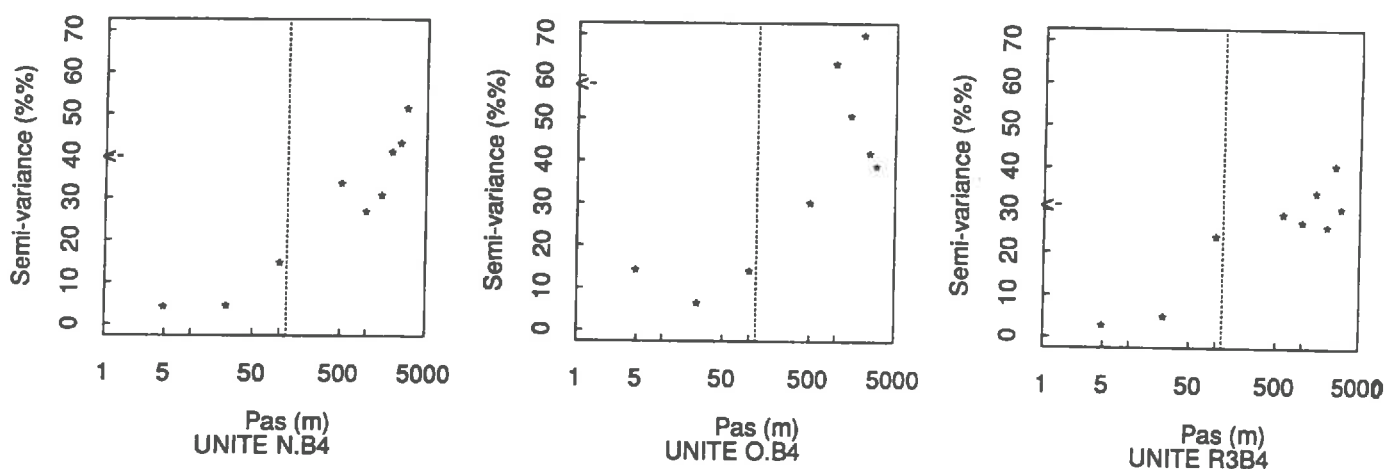
Pour les limons fins, le variogramme est croissant jusqu'à une distance de 100 mètres; par contre, pour les limons grossiers et totaux, la semi-variance pour une distance de 5 mètres est proche de celle pour une distance de 100 mètres; la variabilité de ces deux fractions au sein d'une même plage cartographique ne semble donc pas ordonnée spatialement.

Enfin, la semi-variance pour une distance de 100 mètres est très nettement inférieure à celles calculées pour des distances supérieures ou à la variance calculée sur l'ensemble de l'unité.

### VARIOGRAMME DES LIMONS FINS



### VARIOGRAMME DES LIMONS GROSSIERS



### VARIOGRAMME DES LIMONS TOTAUX

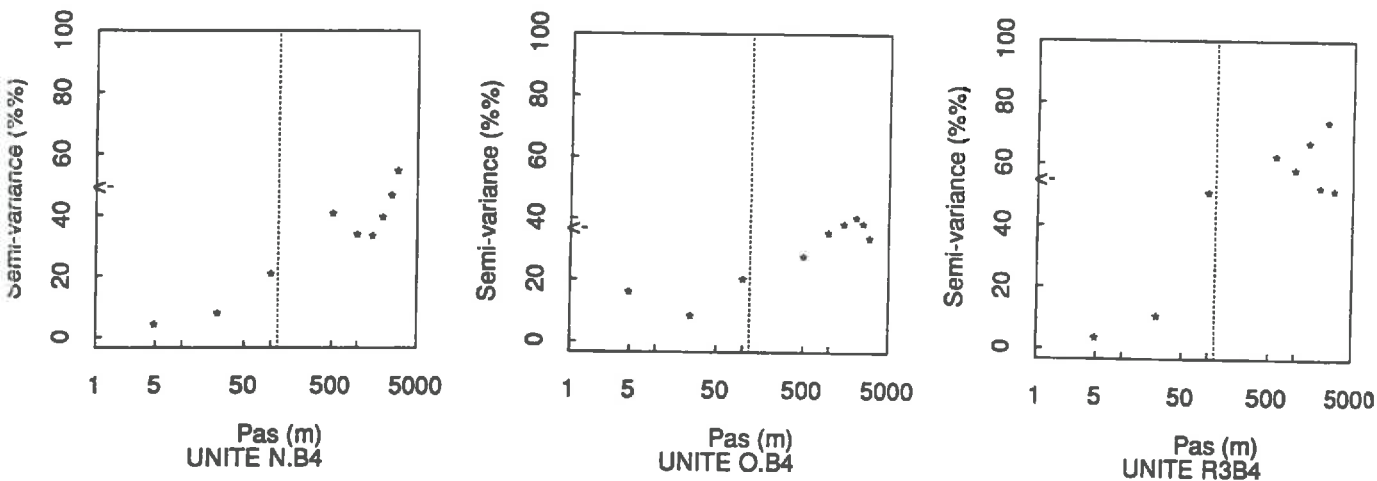
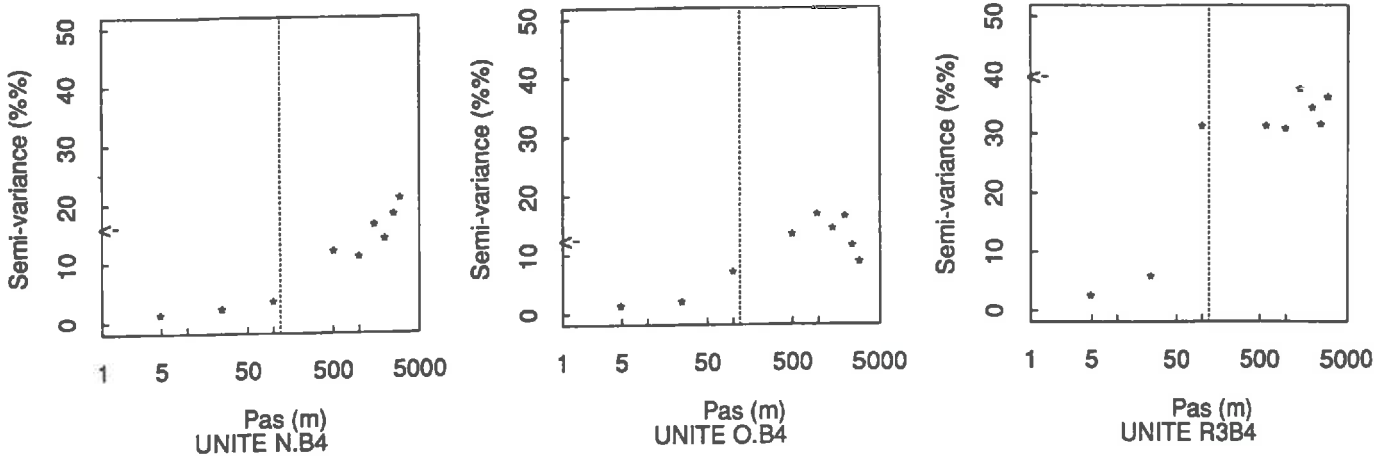
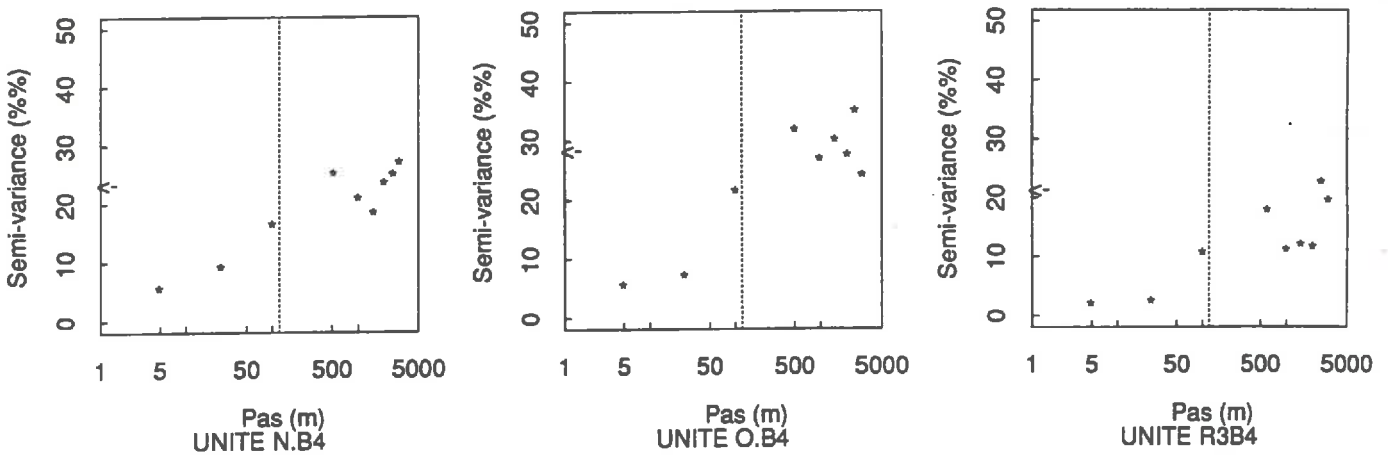


Figure VII.4: Variogrammes moyens des limons fins, des limons grossiers et des limons totaux de l'horizon de surface, pour les trois unités cartographiques.  
(La flèche <, disposée sur l'axe des ordonnées, indique la variance de la propriété)

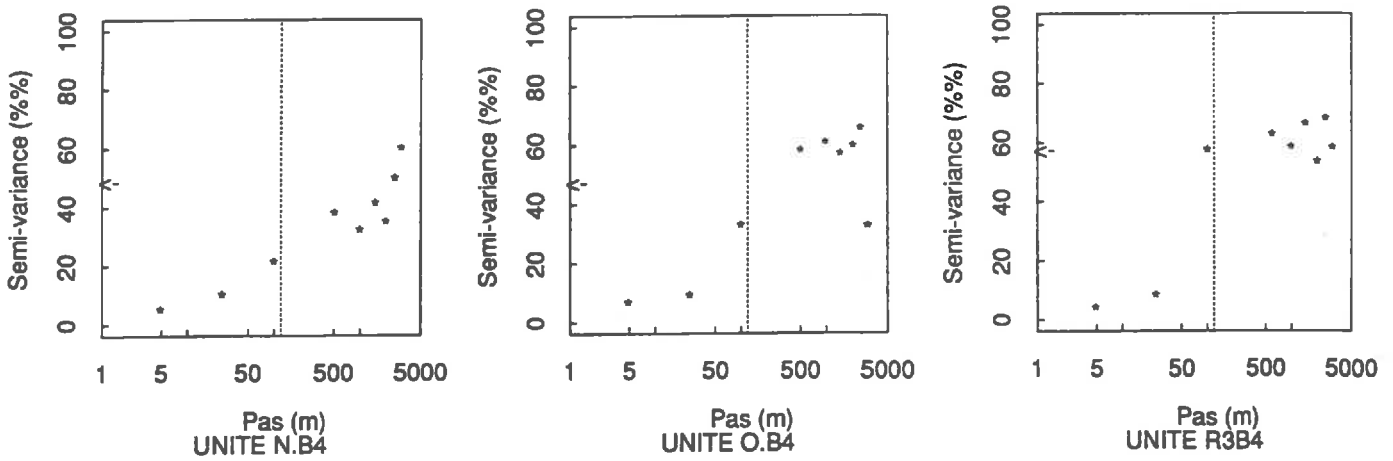
### VARIOGRAMME DES SABLES FINS



### VARIOGRAMME DES SABLES GROSSIERS



### VARIOGRAMME DES SABLES TOTAUX



**Figure VII.5:** Variogrammes moyens des sables fins, des sables grossiers et des sables totaux de l'horizon de surface, pour les trois unités cartographiques.  
(La flèche <-, disposée sur l'axe des ordonnées, indique la variance de la propriété)

### 2.2.3 L'unité cartographique R3B4

Le trait marquant des variogrammes des fractions limoneuses de cette unité réside dans une augmentation importante entre 25 et 100 mètres des semi-variances, la semi-variance pour une distance de 100 mètres étant proche de la variance sur l'ensemble de l'unité.

## 2.3 Les variogrammes moyens des fractions sableuses (Figure VII.5).

### 2.3.1 Les unités cartographiques N.B4 et O.B4

Pour les sables fins et les sables totaux, les caractéristiques des variogrammes sont les suivantes: semi-variance faible pour une distance de 5 mètres, variogramme croissant jusqu'à une distance de 100 mètres, semi-variance pour une distance de 100 mètres inférieure à celles pour des distances supérieures et à la variance sur l'unité dans son ensemble.

Pour les sables grossiers, on note une augmentation importante de la semi-variance entre 25 et 100 mètres; la semi-variance atteinte à 100 mètres est proche de la variance de l'ensemble de l'unité.

### 2.3.2 L'unité cartographique R3B4

Le caractère spécifique des variogrammes des fractions sableuses sur cette unité réside dans l'importance de la semi-variance pour une distance de 100 mètres, proche des valeurs maximales de la semi-variance et de la variance sur l'ensemble de l'unité.

## 2.4 Discussion

### 2.4.1. Bilan de l'analyse des variogrammes

Le bilan de l'analyse des variogrammes précédents peut comporter quatre points:

- (1) Les valeurs de la semi-variance des propriétés analytiques pour des distances de 5 et 25 mètres sont faibles quelle que soit l'unité cartographique. *La variabilité des propriétés analytiques à courte distance (< 25 mètres) apparaît donc faible.*
- (2) Les variogrammes sont généralement croissants jusqu'à une distance de 100 mètres indiquant l'existence d'une dépendance spatiale des observations au sein d'une même plage cartographique.
- (3) Pour les unités cartographiques N.B4 et O.B4, les variogrammes du taux d'argile, du carbone organique, de la CEC et des fractions limoneuses, présentent une valeur de la semi-variance pour une distance de 100 mètres, très nettement inférieure aux valeurs de la semi-variance pour des distances plus grandes. Dans ce cas, la variabilité des propriétés analytiques, pour des points distants de 100 mètres au sein d'une même plage cartographique, apparaît donc moindre que celle observée sur l'ensemble de l'unité cartographique. *La structure spatiale se caractérise dans ce cas par l'importance des différences entre les plages cartographiques.*
- (4) Pour l'ensemble des propriétés sur l'unité R3B4 et pour les fractions sableuses sur l'unité O.B4, la valeur de la semi-variance pour une distance de 100 mètres est proche des valeurs de la semi-variance pour des distances plus grandes et de la variance sur l'ensemble de l'unité. Dans ce cas, la variabilité des propriétés analytiques pour des points distants de 100 mètres au sein d'une même plage cartographique est du même ordre de grandeur que celle observée sur l'ensemble de l'unité. *La variabilité au sein de l'unité cartographique correspond donc à une variabilité intra-plage cartographique.*

### 2.4.3 Comment obtenir des estimations plus précises ?

Si on ne dispose que d'une connaissance globale de la loi de distribution d'une propriété au sein d'une unité cartographique, la seule estimation que l'on puisse faire de la valeur d'une propriété en un point appartenant à cette unité, est d'employer un paramètre de position (moyenne, médiane) de cette distribution. L'erreur d'estimation que l'on fera en procédant de la sorte, sera d'autant plus grande que la variabilité de la propriété sera importante au sein de l'unité cartographique. On peut se contenter d'une telle estimation dès lors que la variabilité au sein de l'unité cartographique apparaît faible (Fig. VII.6.A)

Grâce au calcul des variogrammes, nous disposons d'indications sur la structure spatiale de la variabilité d'une propriété au sein d'une unité cartographique, ce qui nous permet de réfléchir aux conditions d'obtention d'estimations plus précises de ces propriétés.

Ces conditions diffèrent selon que la variabilité intra-plage cartographique est moindre ou du même ordre de grandeur que la variabilité intra-unité cartographique (Fig. VII.6.B):

- *si la variabilité intra-plage cartographique est moindre que la variabilité intra-unité cartographique.*

Une telle situation a été rencontrée par exemple pour le taux d'argile, le carbone organique ou la CEC sur les unités *O.B4* et *N.B4*

Dans ce cas, un paramètre de position (moyenne, médiane) défini pour une plage cartographique donnée, constitue une estimation d'une propriété plus précise qu'un paramètre de position défini pour l'ensemble de l'unité cartographique. En effet, la variabilité au sein d'une plage étant moindre que la variabilité au sein de l'unité, l'incertitude sur un paramètre de position défini pour une plage donnée, sera plus faible que l'incertitude sur ce paramètre défini pour l'ensemble de l'unité.

Comment définir ces paramètres de position pour chacune des plages cartographiques constitutives d'une unité cartographique ?

La première solution consiste à échantillonner chacune des plages cartographiques. Par exemple, en supposant que la variance du taux d'argile au sein d'une plage cartographique, soit de l'ordre de grandeur de la semi-variance calculée pour un pas de 100 mètres, il faut environ 4 échantillons indépendants par plage cartographique pour estimer la moyenne au sein d'une plage avec un intervalle de confiance de 3 % et un niveau de signification de 0.90 (Dagnélie, 1980).

Une seconde solution envisageable consiste à croiser la carte pédologique avec un fichier d'analyses de terre demandées par des agriculteurs et précisément localisées; on pourrait ainsi calculer la moyenne ou la médiane des résultats obtenus pour chacune des plages cartographiques. Un tel fichier n'existe pas encore dans le sud de l'Ille-et-Vilaine.

- *si la variabilité intra-plage cartographique est du même ordre de grandeur que la variabilité intra-unité cartographique.*

Une telle situation est par exemple rencontrée pour les sables totaux sur l'unité *R3B4*.

Dans ce cas, un paramètre de position, défini pour une plage cartographique donnée, ne constitue pas une estimation plus précise de la valeur d'une propriété en un point, que le paramètre de position défini pour l'ensemble de l'unité cartographique.

L'obtention d'estimations plus précises suppose dans ce cas une cartographie de la propriété étudiée au sein de la plage cartographique. La connaissance par les variogrammes de la variabilité de la propriété pour des points distants de 5, 25 et 100 mètres au sein d'une même plage cartographique, fournit des indications sur les conditions d'une telle cartographie.

En premier lieu, une telle cartographie n'apparaît intéressante que si le variogramme est croissant entre 5 et 100 mètres, c'est-à-dire qu'il existe une dépendance spatiale entre les observations et que la variabilité n'est pas aléatoire. (Fig. VII.6.C)

Pour le taux de sables totaux sur l'unité R3B4 par exemple, la distance d'échantillonnage doit nécessairement être inférieure à la portée de 100 mètres pour qu'une structure spatiale puisse être mise en évidence (Fig. VII.5). Par contre, la variabilité pour des points distants de 25 mètres est assez faible. La distance d'échantillonnage semble donc devoir être comprise entre 25 et 100 mètres. La définition optimale de cette distance suppose une définition plus fine du variogramme entre 25 et 100 mètres.

Si le variogramme n'est pas croissant entre 5 et 100 mètres, la variabilité apparaît aléatoire au sein d'une plage cartographique. Dans ce cas, la cartographie de la propriété ne présente pas d'intérêt et l'estimation la plus précise que l'on puisse faire est à nouveau un paramètre de position défini pour la plage cartographique ou l'unité cartographique.

En résumé, la connaissance de la structure spatiale de la variabilité d'une propriété au sein d'une unité cartographique, permet de proposer une stratégie pour estimer une propriété avec une précision donnée; cette stratégie est résumée dans la figure VII.6.

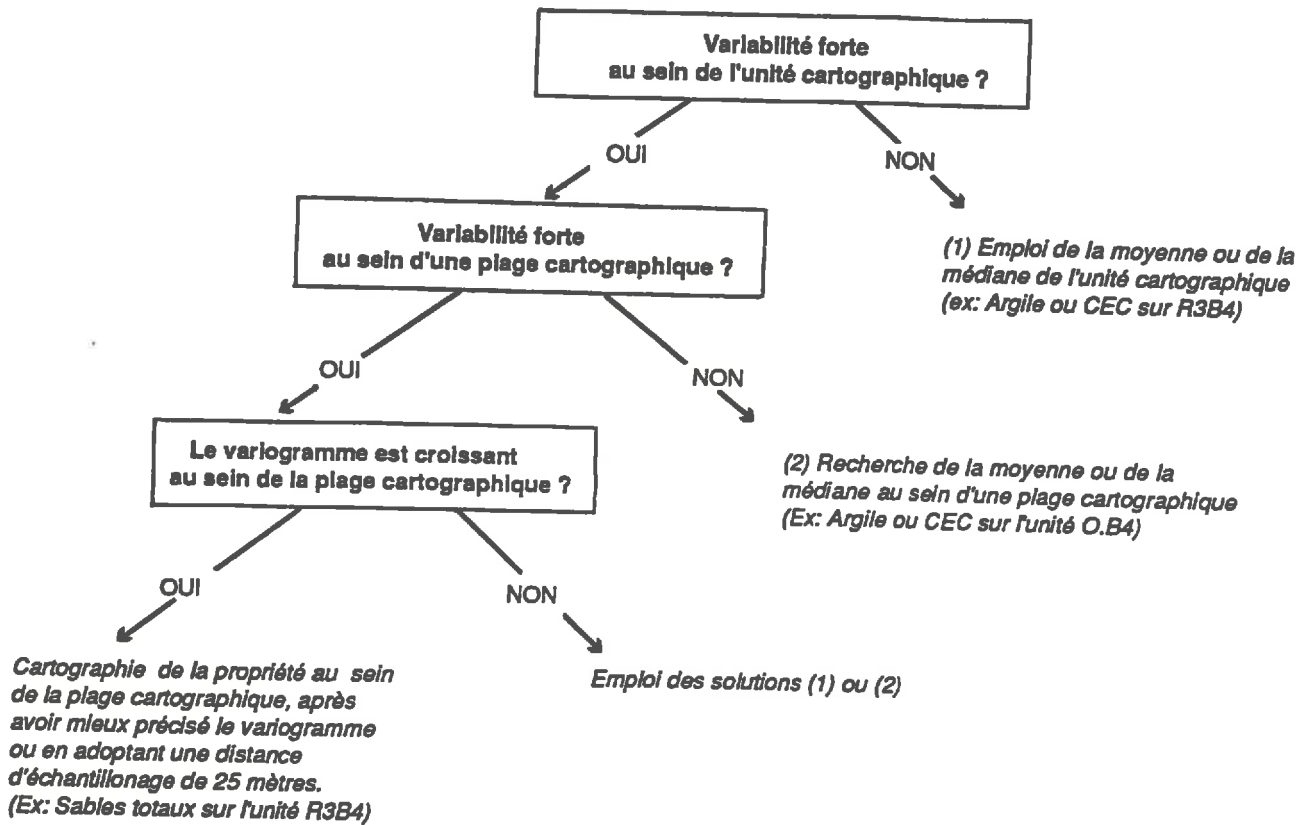


Figure VII.6: Stratégie pour obtenir des estimations précises de la valeur d'une propriété en un point appartenant à une unité cartographique.



## **Conclusion sur la variabilité des propriétés analytiques et leur structure spatiale.**

Pour les propriétés analytiques de l'horizon de surface retenues, nous avons décrit au chapitre VI leur variabilité au sein de chacune des trois unités cartographiques. Le calcul des variogrammes nous a permis ensuite de décrire la structure spatiale de cette variabilité.

Une synthèse de ces différents résultats peut comporter trois cas de figure principaux:

**1. La variabilité de la propriété est faible au sein de l'unité cartographique et une grande part de cette variabilité est présente au sein d'une même plage cartographique**

Un exemple caractéristique de ce cas de figure est la CEC sur l'unité cartographique *R3B4*: 80 % des échantillons ont une CEC comprise entre 6.4 et 8.4 meq/100g et l'écart-type observé sur l'unité est de 0.9 meq/100g. Par ailleurs, le variogramme de cette propriété a atteint son palier pour une distance de 100 mètres au sein d'une même plage cartographique. En règle générale, on se contentera dans ce cas de la moyenne ou de la médiane établie sur l'ensemble de l'unité cartographique

**2. La variabilité de la propriété est importante au sein de l'unité cartographique mais s'avère modérée au sein d'une même plage cartographique.**

L'exemple typique est le taux d'argile sur l'unité *O.B4* : 80 % des échantillons ont un taux d'argile compris entre 21 et 37 % et l'écart-type est de 6.3 %. Par contre, la semi-variance pour une distance de 100 mètres ne représente qu'environ 30 % de la variance sur l'ensemble de l'unité cartographique.

Dans ce cas, on peut essayer de calculer la valeur moyenne ou médiane pour chaque plage cartographique.

**3. La variabilité de la propriété est importante au sein de l'unité cartographique et une grande part de cette variabilité est présente au sein d'une même plage cartographique.**

Un exemple caractéristique de ce cas de figure est le taux de sables totaux sur l'unité *R3B4* : 80 % des échantillons ont un taux de sables totaux compris entre 19 et 38 %, l'écart-type étant de 7.6 %. Par ailleurs, le variogramme a atteint son palier pour une distance de 100 mètres au sein d'une même plage cartographique.

Dans ce cas, une cartographie au sein de la plage cartographique est nécessaire pour obtenir des estimations plus précises d'une propriété.

## Conclusion du chapitre VII:

En comparant des observations distantes de 5, 25 ou 100 mètres au sein d'une même plage cartographique ou situées dans des plages cartographiques différentes, nous avons cherché à décrire la structure spatiale de propriétés du sol au sein d'une unité cartographique, à savoir: (i) l'importance de la variabilité intra- et inter- plage cartographique, (ii) l'évolution, en fonction de la distance, de la dépendance spatiale d'observations situées au sein d'une même plage cartographique.

Pour les propriétés morphologiques du sol, nous montrons que la variabilité observée à l'échelle de chacune des trois unités cartographiques, est présente pour une grande part au sein de chacune des plages cartographiques constitutives de ces unités. La résolution de cette variabilité suppose donc une cartographie à grande échelle.

Des différences entre plages cartographiques sont mises en évidence pour les propriétés analytiques de l'horizon de surface au sein de l'unité *N.B4* et surtout de l'unité *O.B4*. Pour cette dernière unité, la variabilité du taux d'argile ou de la CEC était apparue très importante sur l'ensemble de l'unité; on montre qu'au sein d'une même plage cartographique, cette variabilité est nettement moindre. On peut donc espérer obtenir des estimations précises de ces propriétés en étudiant la distribution de ces variables au sein d'une plage cartographique.

## Chapitre VIII

# UN TEST DES POSSIBILITES DE GENERALISATION REGIONALE DE LA VARIABILITE INTRA- UNITE CARTOGRAPHIQUE

Au cours de ce dernier chapitre, nous posons le problème de la généralisation régionale des résultats concernant la variabilité spatiale au sein d'une unité cartographique.

Les résultats précédents ont été obtenus pour un secteur de l'ordre de 10.000 hectares cartographié à l'échelle du 1/25 000. Or, environ 400.000 hectares ont fait l'objet d'une cartographie pédologique dans le Massif Armoricain. La description de la variabilité intra-unité cartographique supposant un investissement assez lourd, il serait donc intéressant de pouvoir généraliser les résultats acquis.

Par exemple, considérons l'unité cartographique *O.B4* souvent décrite et délimitée dans les cartes pédologiques disponibles dans le sud du Massif Armoricain. A l'issue du travail mené précédemment, peut-on dire que le taux d'argile moyen en surface de cette unité cartographique est de 28 % et que l'écart-type d'échantillonnage est de l'ordre de 6% ? Ces résultats sont-ils spécifiques au secteur d'étude que nous avons retenu, ou peut-on les généraliser à l'ensemble des plages cartographiques rattachées à cette unité dans le Massif Armoricain?

Nous réalisons au cours de ce chapitre un test afin de fournir des éléments de réponse à cette problématique de généralisation. Pour cela, nous définissons la variabilité des propriétés analytiques de l'horizon de surface au sein de l'unité *O.B4*, pour des plages cartographiques de cette unité délimitées dans un autre secteur de l'Ille-et-Vilaine. Nous comparons les résultats ainsi obtenus à ceux précédemment acquis.

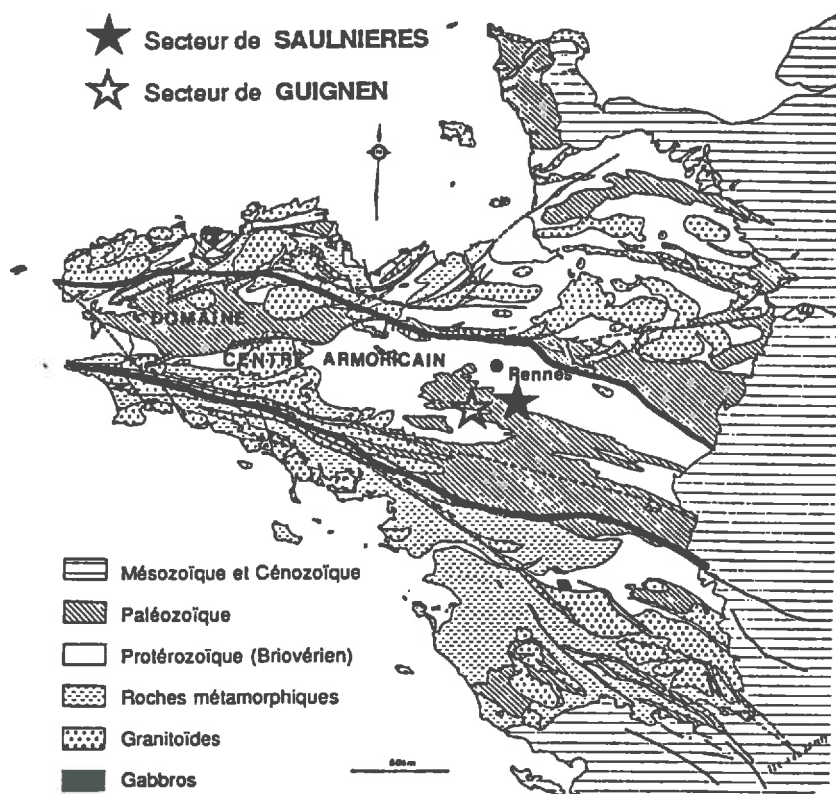
Ce chapitre comprend trois parties:

1. Une brève *présentation du nouveau secteur d'étude retenu*, que l'on appelle "secteur de Guignen" du nom d'une commune de ce secteur.
2. Une *description globale de la variabilité des propriétés analytiques* au sein de l'unité *O.B4* pour ce nouveau secteur de Guignen. On s'attache à comparer les résultats avec ceux obtenus sur le secteur étudié jusque là (Cf. le chapitre I) et que nous appelons à présent "secteur de Saulnières".
3. Une *description de la structure spatiale de ces propriétés analytiques* au sein de l'unité *O.B4* sur le secteur de Guignen. Là encore, les résultats sont comparés à ceux obtenus sur le secteur de Saulnières.

## 1. PRESENTATION DU NOUVEAU SECTEUR D'ETUDE DE GUIGNEN.

### 1.1 Localisation.

Le nouveau secteur d'étude retenu est un secteur d'environ 8000 hectares situé au nord et à l'ouest de la commune de Guignen (Ille-et-Vilaine). Ce secteur est distant d'une trentaine de kilomètres du secteur précédemment étudié (Fig. VIII.1). Il couvre les territoires de plusieurs communes rurales: Bovel, Mernel, la Chapelle-Bouëxic, Lassy et Guignen.



*Figure VIII.1: Localisation du nouveau secteur d'étude (secteur de Guignen) et du secteur d'étude précédent (secteur de Saulnières).  
Extrait de la carte géologique de France au 1/1.000.000*

## 1.2 Géologie et topographie

Le secteur de Guignen, tout comme celui de Saulnières, se rattache à l'ensemble des synclinaux du Sud de Rennes. Au sein de cet ensemble, les deux secteurs font partie du synclinorium de Martigné-Ferchaud.

Le secteur de Guignen est situé à la limite sud de ce synclinorium en bordure du bassin de Guipry-Messac, constitué tout comme le Bassin de Rennes de formations protérozoïques connues sous le nom de "schistes briovériens".

La topographie est marquée par la structure géologique du secteur d'étude; elle se caractérise par une succession de crêtes (altitudes de 90 à 110 mètres) et de dépressions (altitudes de 45 à 70 mètres) parallèles.

## 1.3 Cartographie pédologique.

Le secteur de Guignen a fait l'objet d'une cartographie pédologique à l'échelle du 1/25.000 dans le cadre du levé de la feuille de Janzé. La méthode de cartographie est identique à celle employée sur le secteur de Saulnières (§ I.2, p.7) et les cartographes sont les mêmes.

## 1.4 Méthodologie d'échantillonnage de l'unité O.B4

L'unité cartographique O.B4 a été retenue dans le secteur de Guignen pour étudier la variabilité intra-unité cartographique.

La stratégie d'échantillonnage de cette unité est celle présentée au chapitre V et comprend deux principales étapes:

- le choix de 30 points localisés au sein des plages cartographiques de l'unité, par un tirage aléatoire aux noeuds d'une grille régulière avec une maille de 150 mètres de côté;
- à partir de chacun des 30 points précédents, l'implantation de trois nouveaux points implantés dans une direction aléatoire, successivement à une distance de 100, 25 et 5 mètres.

En chacun des 120 points ainsi localisés, trois sondages sont effectués à la tarière sur une surface de 1 m<sup>2</sup> et le sondage le plus profond fait l'objet d'une description des propriétés morphologiques des horizons distingués. Suite à cette description, le sondage est rattaché à la légende "4 critères" utilisée pour le levé de la carte. Enfin, un échantillon est prélevé entre 10 et 20 cm de profondeur et fait l'objet d'une détermination de la granulométrie, du carbone organique et de la CEC.

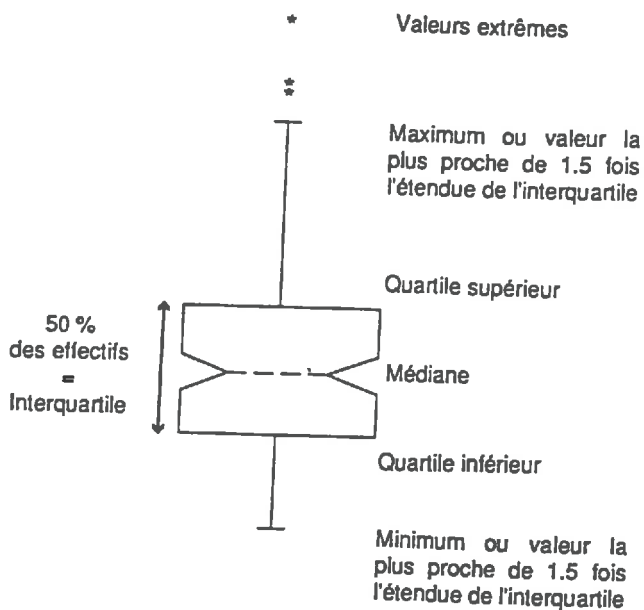
*En résumé, le secteur de Guignen appartient au même ensemble géologique que le secteur de Saulnières précédemment étudié. Il a fait l'objet d'une cartographie pédologique fondée sur la même démarche de cartographie que celle appliquée sur le secteur de Saulnières. Enfin, l'échantillonnage adopté pour déterminer la variabilité au sein de l'unité O.B4, est identique sur les deux secteurs.*

## 2. DESCRIPTION GLOBALE DE LA VARIABILITE DES PROPRIETES ANALYTIQUES de L'HORIZON DE SURFACE au sein de l'UNITE O.B4

Nous limitons la présentation des résultats obtenus aux seules propriétés analytiques de l'horizon de surface (1).

### 2.1 Les résultats

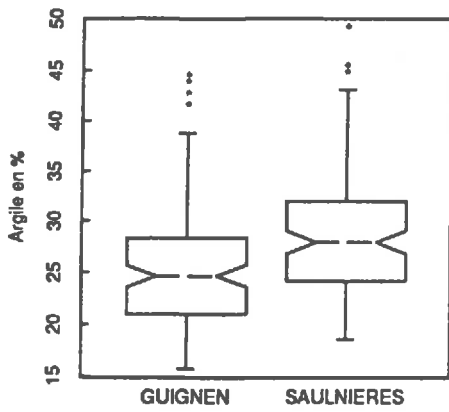
Pour les différentes propriétés de l'horizon de surface analysées, la figure VIII.2 résume les principales caractéristiques de leurs histogrammes selon un graphisme déjà explicité et utilisé (Cf. § VI.2.1, p. 83).



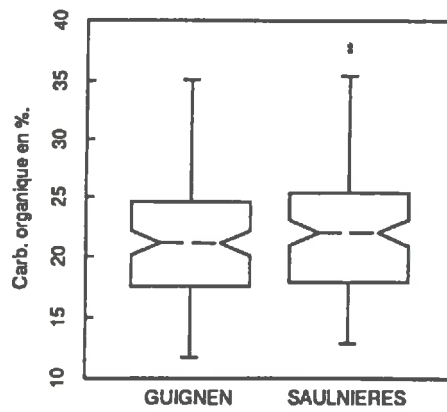
Rappelons que cette représentation graphique permet d'indiquer, suivant le schéma ci-contre, les valeurs extrêmes, les quartiles supérieurs et inférieurs et la médiane de la distribution d'une propriété (Becker et Chambers, 1984).

(1) On notera néanmoins que les deux codes de légende les plus fréquemment attribués à nos sondages de vérification sont d'une part le code "O.B4", correspondant à la définition de l'unité cartographique, d'autre part le code "O.B5", différant de la définition de l'unité cartographique d'une classe de profondeur du sol. Comme sur le secteur de Saulnières, l'origine majeure des impuretés au sein de l'unité cartographique O.B4 provient donc de la profondeur du sol.

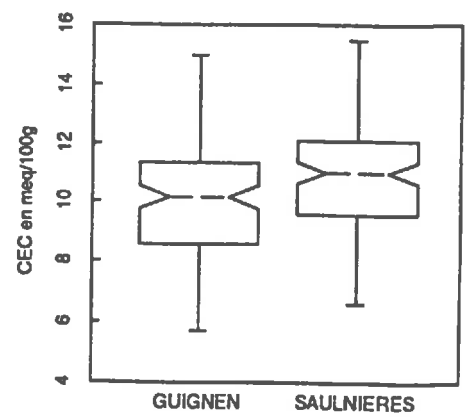
Taux d'argile



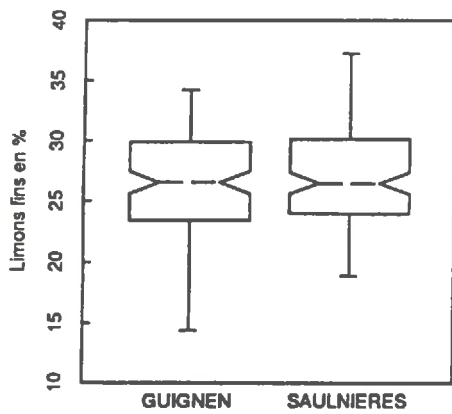
Carbone organique



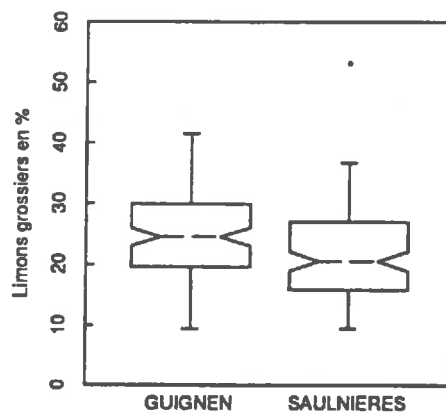
CEC



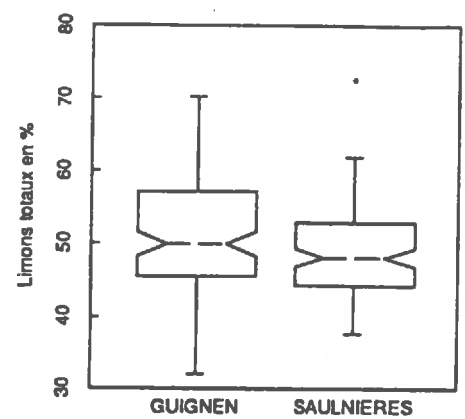
Limons fins



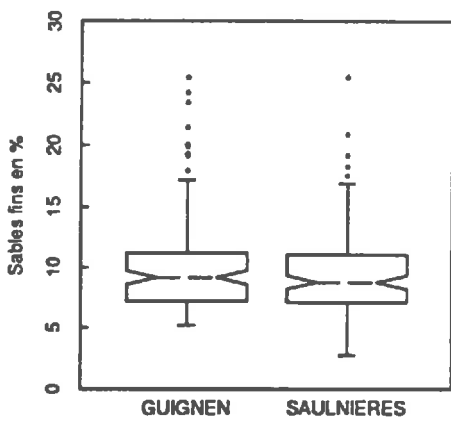
Limons grossiers



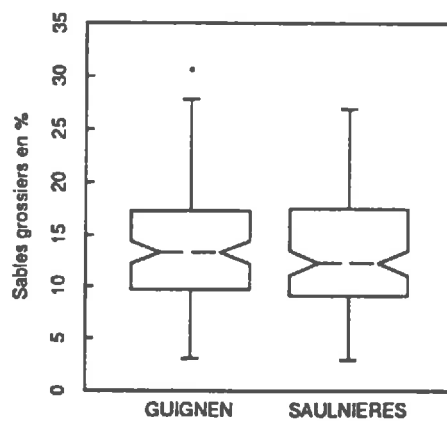
Limons totaux



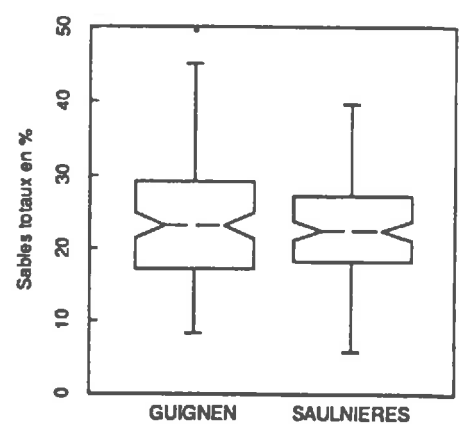
Sables fins



Sables grossiers



Sables totaux



**Figure VIII.2:** Etendue, quartiles supérieurs et inférieurs, et médiane pour différentes propriétés analytiques de l'horizon de surface de l'unité O.B4 sur les secteurs de Guignen et de Saulnières. Une non-intersection des encoches centrées sur les médianes, traduit une différence significative entre deux médianes avec un niveau de signification de 0.05 (Becker et Chambers, 1984).

	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
<b>Argile (%)</b>					
<i>Guignen</i>	<u>24.6</u>	25.2	6.0	15.7	44.2
Saulnières	<u>27.8</u>	28.6	6.3	18.5	48.9
<b>Carbone organique (%°)</b>					
<i>Guignen</i>	21.1	21.3	5.2	11.7	35.1
Saulnières	22.0	22.4	5.5	12.9	37.6
<b>CEC (meq/100g)</b>					
<i>Guignen</i>	<u>10.1</u>	10.0	1.9	5.7	15.0
Saulnières	<u>11.0</u>	10.9	1.8	6.6	15.5
<b>Limons fins (%)</b>					
<i>Guignen</i>	26.5	26.4	4.2	14.4	34.2
Saulnières	26.5	27.3	4.2	18.9	37.3
<b>Limons grossiers (%)</b>					
<i>Guignen</i>	<u>24.4</u>	24.7	7.4	9.4	41.5
Saulnières	<u>20.5</u>	21.6	7.6	9.5	52.5
<b>Sables fins (%)</b>					
<i>Guignen</i>	9.1	10.0	4.2	5.2	25.1
Saulnières	8.8	9.5	3.6	2.8	25.1
<b>Sables grossiers (%)</b>					
<i>Guignen</i>	13.3	13.7	6.2	3.1	30.2
Saulnières	12.2	13.1	5.4	3.0	26.9

**Tableau VIII.1: Paramètres statistiques estimés de différentes propriétés analytiques de l'horizon de surface sur l'unité O.B4 sur les secteurs de Guignen et Saulnières.**  
Les médianes significativement différentes sont soulignées.

Pour permettre une comparaison visuelle, on représente côte à côte les résultats obtenus pour chaque propriété sur le secteur de Guignen et sur le secteur de Saulnières (Fig. VIII.2). Cette approche graphique est complétée par l'indication précise des estimations de différents paramètres statistiques (médiane, moyenne, écart-type, minimum et maximum) fournie dans le tableau VIII.1.

A partir de ces résultats, on peut globalement distinguer deux types de situation selon que les distributions d'une propriété sont analogues sur les deux secteurs ou qu'elles diffèrent:

(1) *les distributions d'une propriété sont analogues sur les deux secteurs.*

C'est le cas pour le carbone organique, les limons fins et l'ensemble des fractions sableuses. Pour le carbone organique par exemple, la médiane est de 21.1 pour mille sur le secteur de Guignen et de 22.0 pour mille sur le secteur de Saulnières. L'écart-type quant à lui est de 5.2 pour mille sur le secteur de Guignen et de 5.5 pour mille sur le secteur de Saulnières. Ces chiffres sont donc très proches et aucune différence significative ne peut être décelée.

(2) *les distributions d'une propriété diffèrent sur les deux secteurs.*

C'est le cas pour le taux d'argile, la CEC et les limons grossiers. Les médianes de ces propriétés sont significativement différentes sur les deux secteurs à un niveau de signification de 0.05.

Pour le taux d'argile, les médianes sont respectivement pour les secteurs de Guignen et de Saulnières de 24.6 % et de 27.8 %. Pour la CEC, ces deux médianes sont de 10.1 meq/100g et de 11.0 meq/100g.

Les paramètres de position des distributions (médiane, moyenne) diffèrent donc pour les deux secteurs; les paramètres de dispersion (variance, étendue de l'interquartile) sont par contre très proches. L'écart-type du taux d'argile est de 6.0 % sur le secteur de Guignen et de 6.3 % sur le secteur de Saulnières. Sur les deux secteurs, la variabilité du taux d'argile et de la CEC est importante: les valeurs observées du taux d'argile sont comprises dans une fourchette de 16 % à 45 %, celles de la CEC dans une fourchette de 6 meq/100g à 15 meq/100g.

## 2.2 Discussion

Les résultats précédents nous placent devant une difficulté nouvelle, à savoir un cas d'absence de stabilité régionale des paramètres de position des distributions de certaines propriétés: en effet, la médiane du taux d'argile ou de la CEC de l'unité *O.B4* sur Guignen n'est pas incluse dans l'intervalle de confiance de cette médiane déterminé à partir des données de Saulnières. Un tel résultat est obtenu également si on s'intéresse aux moyennes. Pour ces deux paramètres de position, leurs estimations sont inférieures sur le secteur de Guignen à celles calculées sur le secteur de Saulnières. Ce constat concorde avec l'idée déjà émise au chapitre VI que les valeurs du taux d'argile pour l'unité *O.B4* sur le secteur de Saulnières, semblent étonnamment élevées par rapport aux résultats dont on dispose par ailleurs. Nous avons déjà proposé des explications à ce phénomène sans pouvoir les prouver: variations dans la nature du substrat, rôle de l'érosion ...?

La première conséquence est qu'il ne faut pas trop se fier à des calculs d'incertitude établis localement, dès lors que l'on a des préoccupations régionales.

Ces résultats remettent-ils pour autant en cause les conclusions obtenues lors des chapitres précédents concernant l'intérêt de la carte pédologique pour décrire la variabilité spatiale de ces propriétés analytiques?

Notons en premier lieu que pour la CEC, les médianes, même statistiquement différentes, apparaissent très proches, l'écart n'étant que de 0.9 meq/100g.

Notons ensuite que pour le taux d'argile et la CEC, ces mêmes médianes restent statistiquement supérieures à celles précédemment obtenues pour les unités *N.B4* ou *R3B4* sur le secteur de Saulnières. Cet écart est encore plus net quand on tient compte de la médiane départementale du taux d'argile qui est de 16 %.

Notons enfin que l'on retrouve sur le secteur de Guignen une très grande variabilité du taux d'argile, du carbone organique et de la CEC; ce caractère distinguait déjà l'unité cartographique *O.B4* sur le secteur de Saulnières.

Ainsi, on retrouve bien les principales caractéristiques de la variabilité des propriétés analytiques au sein de l'unité *O.B4*, qui avaient permis de distinguer cette unité cartographique par rapport aux unités *N.B4* et *R3B4* et par rapport à la variabilité observée à l'échelle départementale.

## Conclusion:

En comparant les distributions des propriétés analytiques de l'horizon de surface de l'unité *O.B4* sur les secteurs de Guignen et de Saulnières, on met en évidence des différences significatives entre les paramètres de position des distributions du taux d'argile, de la CEC et des limons grossiers. Ce résultat incite à la prudence quant à un emploi trop strict au niveau régional des paramètres de position des distributions des propriétés.

Les caractéristiques de la variabilité des propriétés de surface au sein de l'unité *O.B4*, qui sont apparues spécifiques à cette unité, sont néanmoins confirmées: en particulier, un taux d'argile moyen de l'ordre de 24 à 28 % associé à une grande dispersion des résultats observés, une CEC moyenne de l'ordre de 10 à 11 meq/100g associée également à une grande dispersion des résultats.



### 3. STRUCTURE SPATIALE DES PROPRIETES ANALYTIQUES DE L'HORIZON DE SURFACE AU SEIN DE L'UNITE O.B4

Au cours du chapitre VII, le calcul des variogrammes moyens nous avait permis de conclure pour l'unité O.B4 à une variabilité intra-plage cartographique des propriétés analytiques de l'horizon de surface nettement moindre à celle observée pour l'ensemble de l'unité. Ce résultat nous avait permis d'envisager diverses voies d'obtention d'estimations plus précises de ces propriétés.

Les figures VIII.3, VIII.4 et VIII.5 présentent côte à côte les variogrammes moyens du taux d'argile, du carbone organique, de la CEC, des limons fins, des sables grossiers et totaux, établis pour l'unité O.B4 à partir de l'échantillonnage sur Guignen et de celui sur Saulnières.

Cette comparaison montre que les principales conclusions tirées de l'analyse des variogrammes pour le secteur de Saulnières restent valables pour le secteur de Guignen:

*- une variabilité faible pour des points distants de 5 mètres*

Pour le secteur de Guignen, les semi-variances pour des points distants de 5 mètres sont dans tous les cas faibles; cette semi-variance est de  $0.8 (\%)^2$  pour le taux d'argile et de  $0.2 (\text{meq}/100\text{g})^2$  pour la CEC. Une telle variabilité est vraisemblablement très proche de celle induite par les erreurs analytiques.

*- un variogramme croissant ou stable jusqu'à une distance de 100 mètres*

Excepté pour les limons fins pour lesquels le variogramme reste stable jusqu'à une distance de 100 mètres, le variogramme est croissant jusqu'à une distance de 100 mètres.

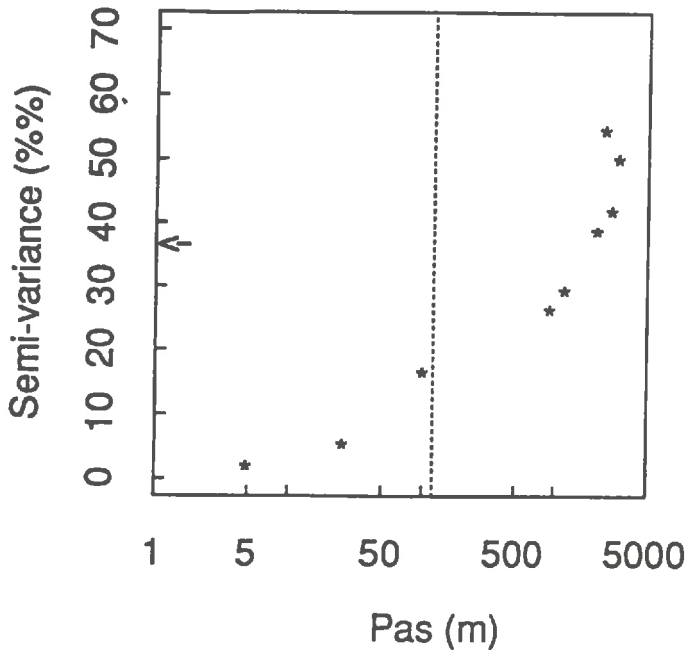
Par ailleurs, les semi-variances calculées pour des points distants de 100 mètres sont souvent très proches sur les deux secteurs. Ainsi, pour le taux d'argile, la semi-variance pour une distance de 100 mètres est de  $15 (\%)^2$  sur Guignen et de  $12 (\%)^2$  sur Saulnières. Pour la CEC, cette semi-variance est de  $0.9 (\text{meq}/100\text{g})^2$  sur Guignen et de  $0.8 (\text{meq}/100\text{g})^2$  sur Saulnières.

*- une semi-variance pour des points distants de 100 mètres nettement inférieure aux semi-variances pour des distances de plus de 100 mètres et à la variance sur l'ensemble de l'unité*

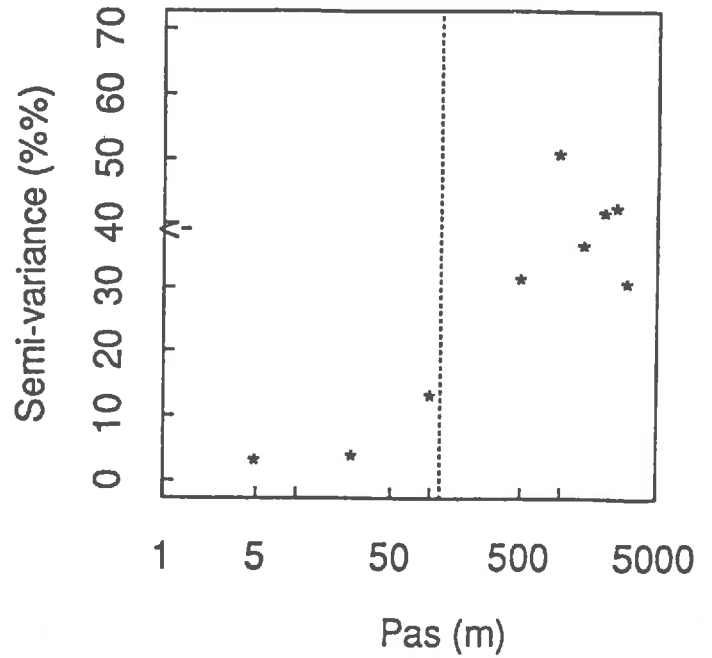
Pour toutes les propriétés étudiées, le variogramme présente un "saut" entre la semi-variance calculée pour un pas de 100 mètres et celles calculées pour des distances supérieures. De plus, la semi-variance pour un pas de 100 mètres représente généralement moins de 50 % de la variance totale sur l'ensemble de l'unité cartographique.

Ainsi, la structure spatiale des propriétés analytiques de l'horizon de surface apparaît similaire sur les deux secteurs d'étude: la variabilité au sein d'une unité cartographique provient pour une grande part de différences entre plages cartographiques; au sein d'une plage cartographique, cette variabilité est nettement moindre.

VARIOGRAMME DU TAUX D'ARGILE

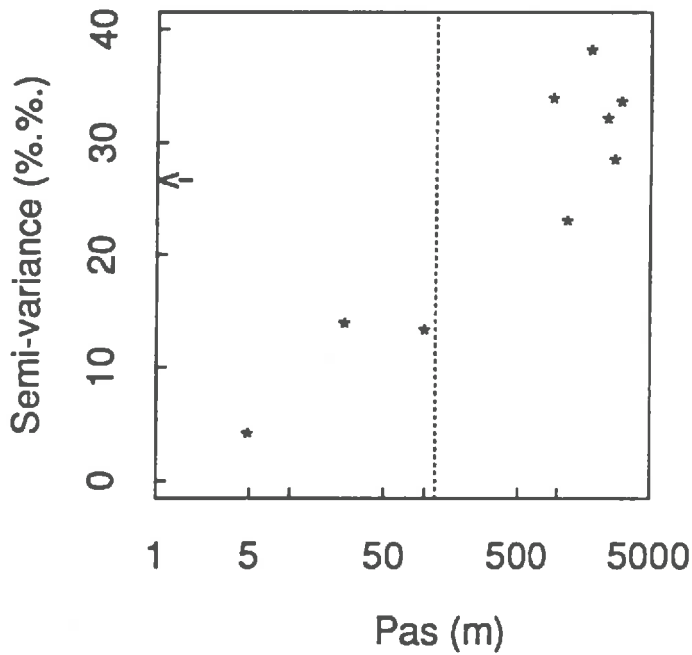


Secteur de Guignen

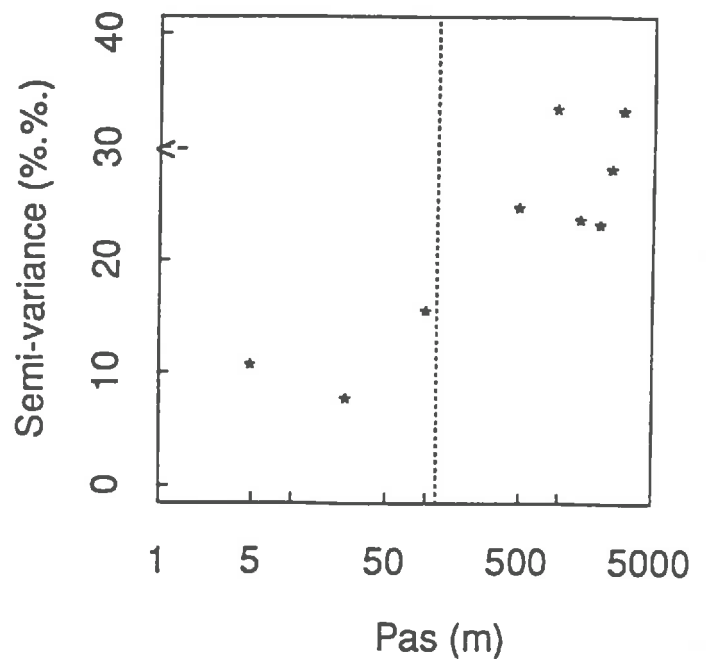


Secteur de Saulnières

VARIOGRAMME DU CARBONE ORGANIQUE

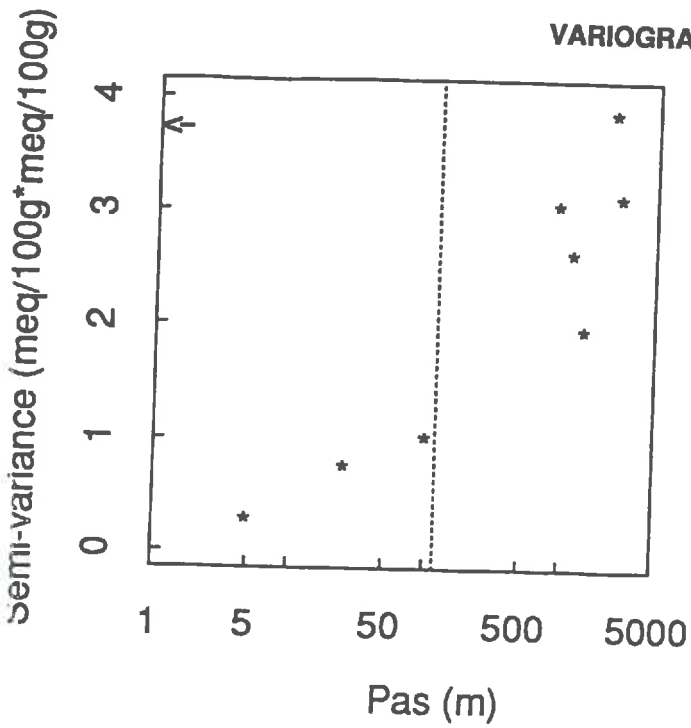


Secteur de Guignen

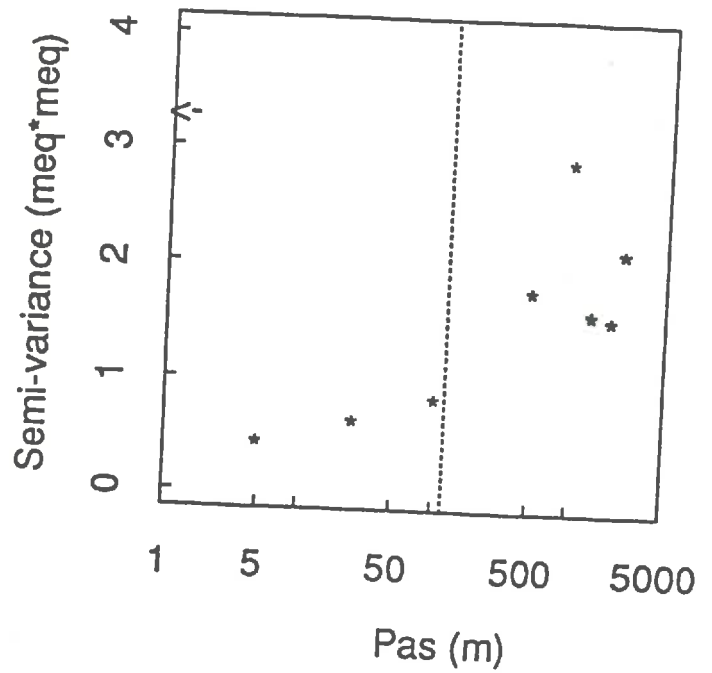


Secteur de Saulnières

Figure VIII.3: Variogrammes moyens du taux d'argile et du carbone organique de l'horizon de surface pour l'unité cartographique O.B4 dans les secteurs de Guignen et Saulnières. (la flèche ,<- , sur l'axe des ordonnées indique la variance de la propriété)

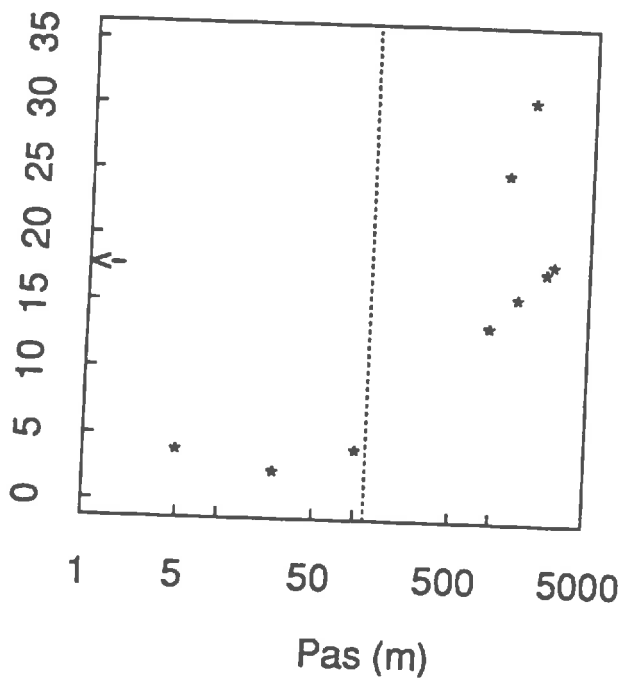


Secteur de Guignen

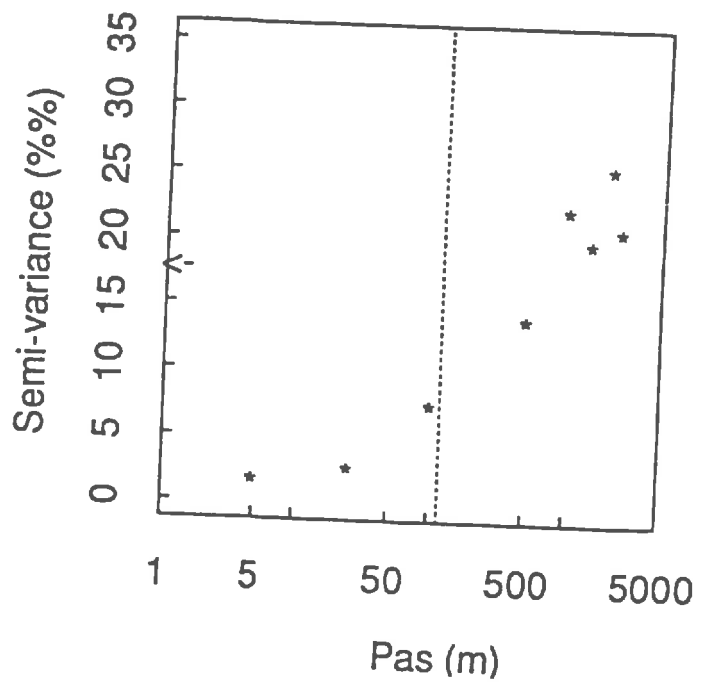


Secteur de Saulnières

**VARIOGRAMME DES LIMONS FINS**



Secteur de Guignen



Secteur de Saulnières

Figure VIII.4: Variogrammes moyens de la CEC et des limons fins de l'horizon de surface pour l'unité cartographique O.B4 dans les secteurs de Guignen et Saulnières. (la flèche <- sur l'axe des ordonnées indique la variance de la propriété)

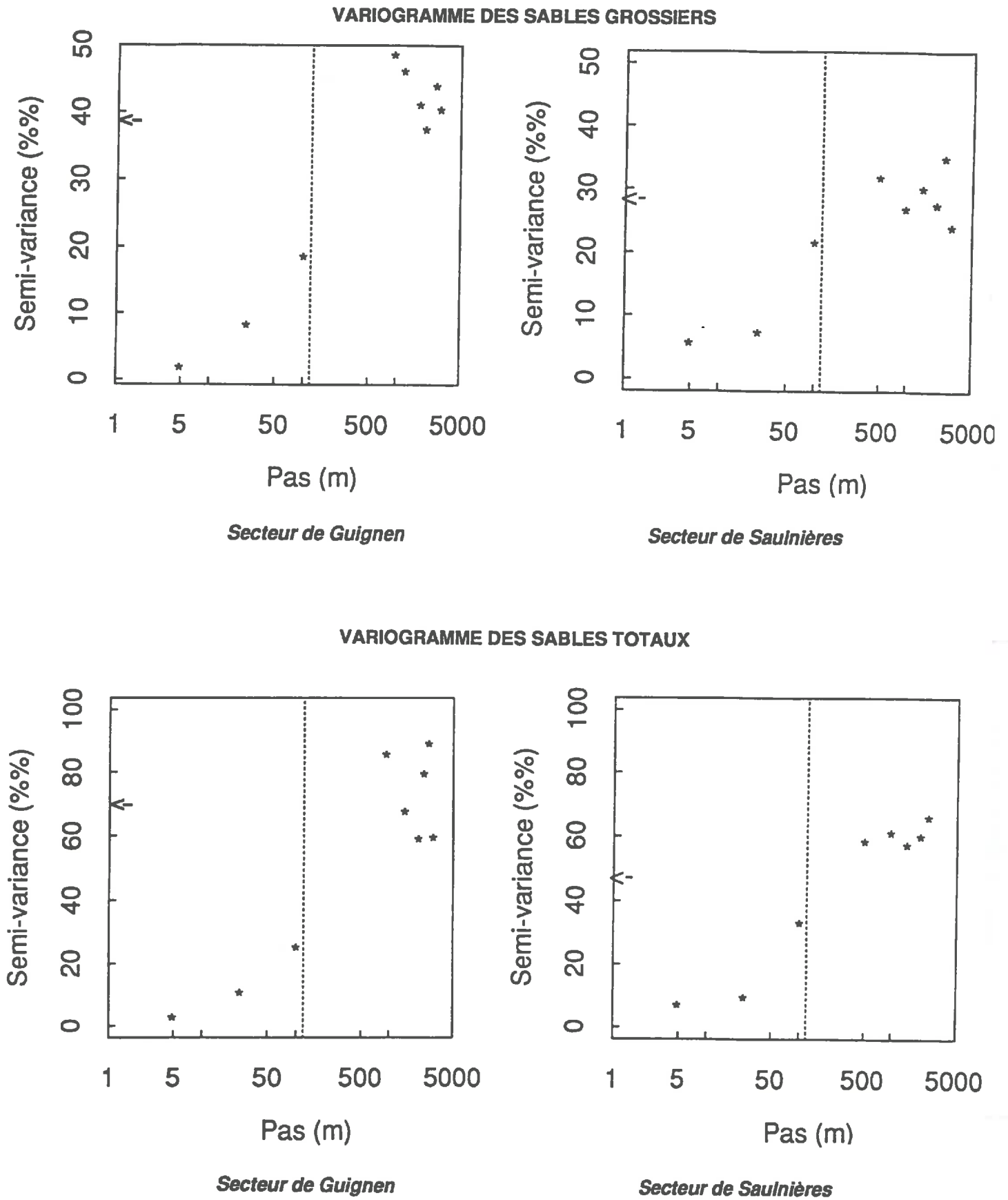


Figure VIII.5: Variogrammes moyens des sables grossiers et totaux de l'horizon de surface pour l'unité cartographique O.B4 dans les secteurs de Guignen et Saulnières. (la flèche ,<- , sur l'axe des ordonnées indique la variance de la propriété)

## Conclusion du chapitre VIII:

Pour tester les possibilités de généralisation régionale de la variabilité de propriétés du sol au sein d'une unité cartographique, nous avons comparé les résultats de deux études, menées selon une approche similaire, pour l'unité cartographique *O.B4* dans deux secteurs distincts de l'Ille-et-Vilaine.

Ce test a montré que les paramètres de position de certaines propriétés analytiques retenues étaient significativement différents dans les deux secteurs d'étude, ce qui montre que l'incertitude sur de tels paramètres est vraisemblablement plus grande que celle calculée à partir de la distribution d'une propriété dans un secteur restreint.

Néanmoins, confrontés aux résultats obtenus pour d'autres unités cartographiques ou à la variabilité à l'échelle départementale, les traits spécifiques à l'unité cartographique *O.B4* se retrouvent dans les deux secteurs, à savoir un taux d'argile de l'horizon de surface élevé dans le contexte du Massif Armoricaïn et une grande variabilité de ce même taux. De plus, cette variabilité apparaît modérée dans ces deux secteurs pour des points distants de 100 mètres au sein d'une même plage cartographique.

L'existence d'une carte pédologique à l'échelle du 1/25.000 dans le sud de l'Ille-et-Vilaine permet de localiser des sols dont les propriétés analytiques de l'horizon de surface présentent des traits spécifiques par rapport aux sols du sud du Massif Armoricaïn.

# CONCLUSION GENERALE

L'objectif général de ce travail était d'estimer des propriétés du sol à moyenne échelle en associant à une telle estimation une indication de sa fiabilité. Cet objectif s'inscrit dans un double contexte, scientifique et technique. Le premier correspond à la mise en évidence récente de l'importance de la variabilité des propriétés du sol à très courte distance, jetant le doute sur les méthodes cartographiques de représentation de cette variabilité sur des secteurs plus larges. Le second contexte permet, grâce aux Systèmes d'Information Géographique, de gérer aisément l'information spatiale dont on dispose sur les sols, pour répondre à un problème donné d'utilisation des sols.

Pour répondre à cet objectif, nous avons procédé de deux façons:

- d'une part, nous avons testé les possibilités d'emploi des techniques géostatistiques à moyenne échelle. Ces techniques présentent en effet l'intérêt de fournir en même temps qu'une estimation, un indicateur de la qualité de cette estimation, ce qui n'est pas le cas pour la carte pédologique.
- d'autre part, nous avons cherché à décrire, par un échantillonnage indépendant, la variabilité de propriétés du sol au sein d'unités cartographiques. Ces unités ont été définies par les pédologues en privilégiant certaines propriétés du sol (les critères cartographiques); elles ont été délimitées en tenant compte d'observations ponctuelles du sol, mais également des variations de facteurs extrinsèques au sol (géologie, végétation, topographie, états de surface...). Grâce à cet échantillonnage indépendant, nous avons déterminé les domaines de variation de propriétés du sol au sein de ces unités cartographiques; nous avons également donné un ordre de grandeur de la densité d'échantillonnage que nécessite une cartographie plus détaillée de la variabilité de ces propriétés.

Cette étude a été menée sur un secteur de l'ordre de 10 000 hectares dans le sud de l'Ille-et-Vilaine pour lequel on disposait d'une carte pédologique à l'échelle du 1/25 000. Différents facteurs laissent supposer une variabilité importante des sols: une grande variété de substrats d'âge ancien (protérozoïque ou paléozoïque), une topographie marquée, un réseau de talwegs dense. De plus, la distance médiane entre les limites des plages cartographiques de la carte pédologique est de l'ordre de 100 mètres. Comparé aux mesures effectuées sur d'autres cartes pédologiques, ce résultat laissait présager une forte variabilité à courte distance des sols.

## 1. Résultats cartographiques

### 1.1 La variabilité des propriétés du sol au sein des unités cartographiques

Pour tenter de représenter cette variabilité, le pédologue choisit un nombre limité de propriétés, les critères cartographiques, qu'il espère corrélés à d'autres propriétés du sol et dont les variations peuvent être reliées à celles de facteurs extrinsèques au sol.

*Par rapport aux critères cartographiques, les trois unités constituent des populations différentes.* Les indices de pureté, tenant compte des critères cartographiques, constituent des critères synthétiques permettant de juger de l'adéquation entre la définition d'une unité cartographique et les observations faites en son sein lors d'un échantillonnage indépendant. Dans notre cas, ces indices montrent que la profondeur du sol ou la classe d'hydromorphie sont le plus fréquemment à l'origine de déviations par rapport à cette définition.

L'histogramme des différents codes de légende rencontrés dans les unités cartographiques, précise ces indices: (i) il n'y a pas de recouvrement entre les listes des codes de légende relevés dans les trois unités cartographiques étudiées; (ii) pour deux unités cartographiques, le code le plus fréquemment relevé correspond bien à la définition de l'unité cartographique; dans une troisième unité, aucun code de légende n'apparaît dominant soulignant la difficulté de définir cette unité.

*L'intérêt de la carte pédologique pour décrire la variabilité spatiale de propriétés qui ne sont pas des critères cartographiques, est également démontré; il n'en reste pas moins qu'une variabilité intra-unité cartographique existe et qu'il convient de la préciser.*

Cet intérêt a été testé en prenant comme exemple les fractions granulométriques, le taux de matière organique et la Capacité d'Echange Cationique de l'horizon de surface. La variabilité de ces propriétés est décrite en se servant d'outils simples (histogrammes, paramètres statistiques); elle s'avère différente suivant l'unité cartographique ou la propriété considérées. Pour juger de cette variabilité, on a cherché des termes de comparaison. Cela nous a conduit à comparer les unités cartographiques entre elles et nous avons montré que, par rapport aux propriétés de l'horizon de surface étudiées, ces unités correspondaient à des populations différentes. De même, la comparaison par rapport à la variabilité observée à l'échelon départemental souligne les traits spécifiques de la distribution des propriétés étudiées au sein de ces trois unités cartographiques.

En disposant d'une description de cette variabilité, nous pouvons juger de l'incertitude qu'elle induit dans la résolution d'un problème d'application. A titre d'exemple, l'incertitude sur le besoin en chaux induit par la variabilité intra-unité cartographique de la CEC de l'horizon de surface, est fonction de l'accroissement souhaité du taux de saturation du complexe d'échange. Cette incertitude est généralement inférieure à 1 tonne par hectare de CaO pour une des unités cartographiques étudiées; pour une autre unité, cette même incertitude est de l'ordre de 2.5 tonnes par hectare de CaO pour un accroissement souhaité de 40 % du taux de saturation.

En comparant la variabilité de propriétés du sol entre des couples de points situés dans des plages cartographiques différentes, ou plus ou moins proches au sein d'une même plage cartographique, on peut décrire la variabilité inter- et intra- plage cartographique. Cette description permet de proposer des stratégies d'échantillonnage pour obtenir des estimations plus précises d'une propriété donnée.

### ***1.2 La variabilité spatiale des propriétés du sol dans le sud du Massif Armoricain.***

L'existence d'une forte variabilité à courte distance des propriétés du sol a été confirmée à travers différents résultats.

D'une part, les variogrammes de la profondeur du sol ou de la classe d'hydromorphie montrent l'importance de la variabilité spatiale de ces deux propriétés pour une distance inférieure à 100 mètres. On a pu préciser cette variabilité pour trois unités cartographiques et confirmer la persistance d'une variabilité importante de la profondeur du sol pour une distance de 25 mètres.

Un autre exemple allant dans le même sens a été fourni par l'étude des horizons distingués sur la base de critères morphologiques. Au sein d'une même unité cartographique, douze horizons différents ont été décrits et dix huit successions verticales différentes de ces horizons ont été inventoriées. L'analyse de la présence-absence de ces horizons dans des sondages voisins montre que la cartographie de leurs limites d'apparition ou de disparition supposerait une distance d'échantillonnage comprise entre 25 et 100 mètres.

Ces différents résultats permettent une prise en compte raisonnée de la carte pédologique à des fins d'application.

De nombreux problèmes d'utilisation des sols peuvent être reliés à ces critères cartographiques: le besoin en drainage, la définition d'un potentiel de production en sont des exemples. L'histogramme des codes de légende relevés au sein de chaque unité cartographique fournit des indications précieuses pour juger de la fiabilité de la carte pédologique pour répondre à un tel problème: on peut en effet calculer la proportion d'observations pour lesquelles la réponse au problème posé s'avère identique et ainsi juger des possibilités de fournir une réponse précise pour les sols d'une unité cartographique.

Pour des propriétés du sol qui ne sont pas des critères cartographiques, nous associons à la description globale de la variabilité intra-unité cartographique, une indication de la structure spatiale de cette variabilité. Ainsi, on n'est pas limité au simple constat de l'existence d'une variabilité intra-unité cartographique pouvant induire une incertitude élevée dans des problèmes d'application, mais on peut enrichir ce constat par un exposé des méthodes d'obtention d'estimation plus précises et indiquer éventuellement le coût de leur mise en oeuvre.

## 2. Résultats méthodologiques

Les résultats méthodologiques obtenus au cours de ce travail concernent l'emploi des techniques géostatistiques à moyenne échelle et les méthodes d'étude de la variabilité intra-unité cartographique.

### 2.1 L'emploi des techniques géostatistiques à moyenne échelle

Nous avons testé l'emploi des techniques géostatistiques à moyenne échelle. Les propriétés étudiées et l'existence d'une anisotropie marquée dans le milieu d'étude nous ont conduit à employer des méthodes peu courantes.

En premier lieu, l'ajustement de modèles anisotropes aux variogrammes expérimentaux permet de mieux décrire ces variogrammes et de mettre en évidence des directions maximales d'anisotropie pouvant être reliées à la structure géologique du secteur d'étude. Néanmoins, le krigeage s'avère une méthode d'estimation robuste peu sensible à des différences mineures de ces ajustements.

En second lieu, le krigeage indicatif est une méthode indépendante de la fonction de répartition de la variable et de ce fait adaptée à l'analyse de variables qualitatives ordonnées. De plus, en fixant de façon judicieuse les valeurs-seuil, par exemple au niveau de seuils de décision, on peut cartographier les secteurs où cette valeur-seuil sera dépassée, et cela avec une probabilité plus ou moins grande. Cette méthode mérite de ce fait d'être davantage testée en science du sol.

### 2.2 Méthodes d'étude de la variabilité intra-unité cartographique

L'échantillonnage d'une unité cartographique en vue de déterminer sa variabilité interne pose différents problèmes: existence de nombreuses plages cartographiques, plages cartographiques de tailles très différentes... La méthode originale d'échantillonnage que nous avons proposée est basée sur différents choix que nous avons explicités. Elle suppose en premier lieu la localisation aléatoire de trente points au sein des plages cartographiques constitutives d'une unité cartographique, puis, à partir de chacun de ces points, l'implantation au sein de la même plage, de trois autres points distants de 100, 25 et 5 mètres. Cette méthode présente à notre avis deux intérêts majeurs: (i) on ne fait pas le choix a priori d'une plage cartographique "représentative" de l'unité cartographique; (ii) on ne concentre pas l'effort d'échantillonnage sur des distances très courtes.

Cette méthode nous a permis à la fois de décrire de façon globale la variabilité au sein des unités cartographiques et de définir un ordre de grandeur de l'échantillonnage nécessaire pour estimer des propriétés du sol avec une précision donnée.

Il est néanmoins clair que cette méthode d'échantillonnage ne peut être appliquée à l'ensemble des unités cartographiques définies sur la carte pédologique étudiée: d'une part, parce que dans la forme proposée, elle n'est pas réalisable pour des unités cartographiques représentées par un faible nombre de plages cartographiques, d'autre part, parce que l'effort d'échantillonnage serait finalement lourd. C'est pourquoi, dans un travail en cours, nous adoptons une méthode plus simple par tirage aléatoire de 15 points au sein de chacune de 20 autres unités cartographiques. Dans ce cas, nous déterminons d'abord si la variabilité au sein d'une unité cartographique est importante avant de décider s'il est utile d'en analyser la structure spatiale.



## BIBLIOGRAPHIE

- AMEYAN O.** (1986) - *Surface soil variability of a map unit on Niger River alluvium*. Soil Sci. Soc. Am. J., 50, 1289-1293.
- AUROSSEAU P.** (1987) - *Analyses de terre et banque de données régionales. L'exemple du Référentiel Agro-Pédologique d'Ille-et-Vilaine*. Les premières Journées de l'Analyse de Terre. Publication GEMAS, 16 p.
- BAIZE D.** (1986) - *Couvertures pédologiques, cartographie et taxonomie*. Science du Sol, vol. 24(3), 227-243.
- BANFIELD C.F. et BASCOMB C.L.** (1976) - *Variability in three areas of the Denchworth soil map unit. II. Relationships between soil properties and similarities between profiles using laboratory measurements and field observations*. J. of Soil Sci., 27 (3), 438-450.
- BASCOMB C.L. et JARVIS M.G.** (1976) - *Variability in three areas of the Denchworth soil map unit. I. Purity of the map unit and property variability within it*. J. of Soil Sci., 27 (3), 420-437.
- BECKER R.A et CHAMBERS J.M.** (1984) - *S: an interactive environment for data analysis and graphics*. Wadsworth advanced book program. Belmont, California, 549 p.
- BECKETT P.H.T et BIE S.W.** (1975) - *Reconnaissance for soil survey I. Pre-survey estimates of the density of soil boundaries necessary to produce pure mapping units*. J. of Soil Sci., Vol.26 (2), 144-154.
- BECKETT P.H.T et WEBSTER R.** (1971) - *Soil variability: A review*. Soils fert., 34, 1-15.
- BELLEIL P.** (1989) - *Discours d'introduction à la Journée Régionale d'Agronomie "La Terre Enjeu d'Avenir"*. Pontivy . 30 novembre 1989 . Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne. 5 p.
- BERTRAND R., FALIPOU P. et LEGROS J.P.** (1984) - *Système de Transfert de l'Information Pédologique et Agronomique (STIPA): 1. Notice pour l'entrée des descriptions et analyses de sols en banque de données*. Agence de Coopération Culturelle et Technique. INRA - IRAT, 136 p.
- BEUCHER-DARRICAU H.** (1981) - *Approche géostatistique du passage des données de terrain aux paramètres des modèles en hydrogéologie*. Thèse de doct. Ing., E.N.S.M.P., Fontainebleau, 118 p.
- BLYTH J.F. et MACLEOD D.A.** (1978) - *The significance of soil variability for forest soil studies in North-East Scotland*. J. of Soil Sci., 29, 419-430.
- BOCQUIER G.** (1971) - *Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad*. Interprétation biogéodynamique. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. IX, n° 4, Bondy.
- BOIVIN P.** (1988) - *Geostat PC: Logiciel Interactif pour calcul géostatistique. Notice d'utilisation*. Orstom Bondy 69 p.
- BOIVIN P. et TOUMA J.** (1988) - *Variabilité spatiale de l'infiltrabilité d'un sol mesurée par la méthode du double anneau*. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXIV, N° 3, 227-234.
- BOULAIN J.** (1969) - *Sol, pedon et Genon ; Concepts et définitions*. Science du Sol, n°2, 31-40.
- BOULAIN J.** (1978) - *Les unités cartographiques en pédologie. Analyse de la notion de génon*. Science du Sol, 1, 15-30.
- BOULAIN J.** (1980) - *Pédologie appliquée*. Ed. Masson 220 p.
- BOULAIN J.** (1982) - *Problèmes épistémologiques de la classification des sols*. Livre Jubilaire de G.LUCAS. Mém. Géol. de l'Univ. Dijon, BRGM Orléans, 120-127
- BOULAIN J.** (1983) - *Remarques sur la méthode cartographique en pédologie*. C.R. Académie d'Agriculture de France, 69(1), 63-68.
- BOULAIN J.** (1984) - *Les unités cartographiques complexes en pédologie*. C.R. Académie d'Agriculture de France, 70(4), 542-550.

- BOULET R., CHAUVEL A., HUMBEL F.X. et LUCAS Y. (1982)** - *Analyse structurale et cartographie en pédologie. I. Prise en compte de l'organisation bidimensionnelle de la couverture pédologique.* Cahiers de l'O.R.S.T.O.M, Pédologie, vol. XIX, 4, 309-321.
- BOULET R., GODON P., LUCAS Y., WOROU S. (1984)** - *Analyse structurale de la couverture pédologique et expérimentation agronomique en Guyane Française.* Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXI, n°1, 21-31.
- BOUMA J. (1986)** - *Using soil survey information to characterize the soil-water state.* J. of Soil Sci., 37, 1-7.
- BOUMA J., De LAAT P.J.M, HOLST Van A.F. et VAN DE NES (1980)** - *Predicting the effects of changing water-table levels and associated soil moisture regimes from soil survey interpretations.* Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, 797-802.
- BOURRIE G. et AUROUSSEAU P. (1987)** - *pH et besoin en chaux.* Colloque AFES " CEC et fertilisation des sols agricoles", CAEN 19 et 20 novembre 1987, 155-173
- BRABANT P. (1989)** - *La cartographie des sols dans les régions tropicales: une procédure à 5 niveaux coordonnées.* Science du Sol, Vol.27, 4, 369-394.
- BREGT A.K. (1988)** - *Quality of representative profile descriptions for predicting the land quality moisture deficit at different scales.* in Land Qualities in Space and Time. Bouma et Bregt (Eds). Pudoc Wageningen, 169-172.
- BREGT A.K., BOUMA J. et JELLINEK M. (1987)** - *Comparison of thematic maps derived from a soil map and from kriging of point data.* Geoderma, 39, 281-291.
- BURGESS T.M. et WEBSTER R. (1980a)** - *Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging.* J. of Soil Sci., 31: 315-331
- BURGESS T.M. et WEBSTER R. (1980b)** - *Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. II. Block kriging.* J. of Soil Sci., 31: 333-341
- BURGESS T.M. et WEBSTER R. (1984a)** - *Optimal sampling strategies for mapping soil types. I. Distribution of boundary spacings.* J. of Soil Sci., 35, 641-654.
- BURGESS T.M. et WEBSTER R. (1984b)** - *Optimal sampling strategies for mapping soil types. II. Risk functions and sampling intervals.* J. of Soil Sci., 35, 655-665.
- BURGESS T.M., WEBSTER R. et McBRATNEY A.B. (1981)** - *Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. IV. Sampling strategy.* J. of Soil Sci., 32: 643-659
- BURROUGH P.A. (1983)** - *Multiscale sources of spatial variation in soil. I. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation.* J. of Soil Sci., 34, 577-597.
- BURROUGH P.A. (1986)** - *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment.* Monographs on soil and resources survey n° 12, Oxford University Press, 194 p.
- BURROUGH P.A. et KOOL J.B. (1981)** - *A comparison of statistical techniques for estimating the spatial variability of soil properties in trial fields.* Revue Sols, INAPG, 29-37.
- BURROUGH P.A., Van DEURSEN W., JETTEN V. et Van KEULEN J. (1988)** - *PC-Geostat: a set of programs for geostatistics and landform analysis.* Department of Physical Geography, University of Utrecht.
- CAMPBELL J.B. (1978a)** - *Spatial variation of sand content and pH within single delineations of two soil mapping units.* Soil Sci. Soc. of America J., Vol. 42 (3), 460-464.
- CAMPBELL J.B. (1978b)** - *Locating boundaries between mapping units.* Mathematical Geology, Vol.10 (3), 289-299.
- CAMPBELL J.B. (1979)** - *Spatial variability of soils.* Annals of the Ass. of Am. Geographers. Vol.69 (4).
- CAMPBELL J.B. et EDMONDS W.J. (1984)** - *The missing geographic dimension to Soil Taxonomy.* Annals of the Ass. of Am. Geographers, 74(1), 83-97.
- CHANTRAINE J., CHAUVEL J.J, BALE P., DENIS E. et RABU D. (1988)** - *Le Briovérien (Protérozoïque supérieur à terminal) et l'orogénèse cadomienne en Bretagne (France).* Bull. Soc. Géol. Fr., 5, 815-831.

- CHANTRAINE J., CHAUVEL J.J., DUPRET L., GATINOT F., ICART J.C., LE CORRE C., RABU D., SAUVAN P., VILLEY M.** (1982) - *Inventaire lithologique et structural du Briovérien (Protérozoïque supérieur) de la Bretagne Centrale et du Bocage Normand*. Bull. du BRGM, 2 ème série, Section 1, n° 1-2, 3-18
- CHATELIN Y.** (1979) - *Une épistémologie des sciences du sol*. Mémoire O.R.S.T.O.M, n° 88, Paris
- CHAUVEL J.J., ROBARDET M. et LEFORT J.P.** (1979) - *Massif Armoricaïn*. Bull. Soc. Géol. Minéral. Bretagne, Série C,XI,(1-2), 191 p.
- CHILES J.P., DELHOMME J.P., DELFINER P.** (1982) - *Notice Gamma eng. Release 2.0*. Centre de géostatistique. Ecole des Mines. Fontainebleau.
- COCHRAN W.G.** (1977) - *Sampling techniques*. Wiley, New York.
- COPPENET M., AILLIOT B., CARIOU G., COLOMB B., DARRE J., HAUT R.** (1986) - *Etat calcique des sols et fertilité: Le chaulage*. Comité Français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée. Editions ACTA, 174 p.
- COR O.** (1989) - *Mise à jour et intégration de données morphologiques au sein du référentiel agro-pédologique d'Ille et Vilaine*. Mémoire DAA, ENSA Rennes, 47 p.
- COR O. ET AUROUSSEAU P.** (1990) - *Rapport sur l'estimation des pH et des besoins en chaux en Bretagne et l'estimation des quantités et de la localisation des besoins en chaulage en Ille-et-Vilaine*, Rapport ENSA-INRA Rennes, 28 p.
- COURTNEY F.M. et NORTCLIFF S.** (1977) - *Analysis techniques in the study of soil distribution*. Progr. Phys. Geogr., Vol.1 (1), 40-64.
- CPCS** (1967) - *Classification des sols; Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols*. Doc. Multi., INRA Grignon, 96 p.
- CRAHET M.** (1981) - *Notice explicative de la carte pédologique de France à 1/100 000. Feuille de Chartres*. publication n° 14, J-8. S.E.S.C.P.F - INRA , 233 p.
- CREUTIN J.D. et OBLED. C.** (1982) - *Objective analysis and mapping techniques for rainfall fields: on objective comparison*. Water Resour. Res., 18 (2), 413-431.
- DAGNELIE P.** (1980) - *Théorie et méthodes statistiques, Vol.1*. Ed. Presses Agronomiques de Gembloux, 378p
- DAVIS B.M.** (1984) - *Indicator kriging as applied to an alluvial gold deposit*. Geostatistics for Natural Resources Characterization. Part I., G. Verly et al. (Eds), D. Reidel Publishing Company, 337-348.
- DELFINER P., DELHOMME J.P., CHILES J.P.** (1976) - *Bluepack Manual*. Centre de géostatistique. Ecole des Mines Fontainebleau.
- DELHOMME J.P.** (1976) - *Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau*. Thèse de Docteur-Ingénieur, E.N.S.M de Paris, 130 p.
- DERSIGNY C.,** (1988) - *Collection, organisation et mise à disposition de données agro-pédologiques au sein d'un référentiel pour l'Ille-et-Vilaine*. ENSA-INRA Rennes, SDS 403, 65 p.
- DUBRULE O.** (1984) - *Comparing splines and kriging*. Computers & Geosciences, 10: 327-338.
- DUDAL R.** (1986) - *The role of pedology in meeting the increasing demands on soils*. Congrès AISS, Hambourg, Vol.1., 80-94.
- DUPONT C. et EDELINE P.** (1985) - *Comment lire la carte des sols ?* Ch. d'Agriculture d'Ille-et-Vilaine, Section pédologie, 9 p.
- DURAND S.** (1977) - *Guides géologiques régionaux: Bretagne*. Masson, 207 p.
- EDELINE P.** (1981) - *Secteur de référence de Retiers (grès armoricaïn)*. Opération Drainage - ONIC - Ministère de l'Agriculture. Réalisée par la Chambre d'Agriculture d'Ille-et-Vilaine.
- EDELINE P. et KRIEGK O.** (1977) - *Etude pédologique préalable au remembrement de la commune de Guichen*. ENSA-INRA Rennes, CREBS, SDS 74, 128 p.

- EDMONDS W.J. et LENTNER M.** (1986) - *Statistical evaluation of the taxonomic composition of the taxonomic composition of three map units in Virginia*. Soil Sci. Soc. Am. J., 50, 997-1001.
- EDMONDS W.J., CAMPBELL J.B. et LENTNER M.** (1985) - *Taxonomic variation within three soil mapping units in Virginia*. Soil Sci. Soc. of America J., Vol. 49 (2), 394-401.
- ENGLUND E. et SPARKS A.** (1988) - *GEO-EAS (Geostatistical Environmental Assessment Software) user's guide*. Environmental Monitoring Systems Laboratory. Office of research and development. US Environmental Protection Agency, Las Vegas.
- FANDOS M.** (1984) - *Rapport de l'étude pédologique du secteur de référence de Guemene-Penfao*. ONIC . SICA Ancenis, 95 p.
- FAVROT J.C.** (1989) - *Une stratégie d'inventaire cartographique à grande échelle: la méthode des secteurs de référence*. Science du Sol, Vol.27, 4, 351-365.
- FAVROT J.C., LAGACHERIE P., BOUZIGUES R., ANDRIEUX P., BARTHES B. et VINCENT B.** (1987) - *Etude des sols du secteur de référence de la savane guyanaise. Rapport de synthèse*. INRA Montpellier, SES n°581.
- FENELON J.P.** (1981) - *Qu'est-ce que l'analyse des données?* Lefonen, 311 p.
- FITZPATRICK E.A.** (1988) - *Soil horizon designation and classification: a coordinate system for defining soil horizons and their use as the basic elements in soil classification for different purposes*. ISRIC, Technical Papers 17, Wageningen, 142 p.
- FOURNIGUET J. et TRAUTMANN F.** (1985) - *Notice explicative, Carte géol. France (1/50.000), feuille Redon (419)* - BRGM, 69 p.
- FRIDLAND V.M.** (1974) - *Structure of the soil mantle*. Geoderma, vol.12, 35-41
- GAJEM Y.M., WARRICK A.W. et MYERS D.E.** (1981) - *Spatial dependance of physical properties of a typic torrifluent soil*. Soil Sci. Soc. Am. J., 45, 709-715.
- GASCUEL-ODOUX C.** (1984) - *Application de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol*. Thèse doct.Ing. ENSM Fontainebleau & ENSA-INRA Rennes, 235 p.
- GASCUEL-ODOUX C.** (1987) - *Variabilité spatiale des propriétés hydriques, méthodes et résultats, cas d'une seule variable: revue bibliographique* . Agronomie, 7(1), 61-71.
- GIRARD M.C.** (1979) - *Analyse des types de données pédologiques pour la cartographie*. Informatique et Biosphère. Actes du Colloque d'Abidjan, 89-105.
- GIRARD M.C.** (1983) - *Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique*. Thèse Doct. d'Etat. Sols, 12, 430 p.
- GIRARD M.C. et KING D.** (1988) - *Un algorithme interactif pour la classification des horizons de la couverture pédologique*. Science du Sol, Vol. 26 (2), 81-103.
- GIRARD M.C., AUROUSSEAU P., KING D., LEGROS J.P.** (1989) - *Apport de l'informatique à l'analyse spatiale de la couverture pédologique et à l'exploitation des cartes*. Science du Sol, Vol. 27 (4), 335-350.
- GOOVAERTS P., GERARD G. et FRANKART R.** (1988) - *Etude de la variabilité spatiale de quelques propriétés chimiques du sol en Fagne de Chimay, Belgique*. Pedologie, XXXIX-2, 191-207.
- GOULARD M., VOLTZ M., MONESTIEZ P.** (1987) - *Comparaison d'approches multivariées pour l'étude de la variabilité spatiale des sols*. Agronomie, 7(9), 657-665.
- GRUIJTER De J.J. et MARSMAN B.A.** (1984) - *Transect sampling for reliable information on mapping units*. Proceedings of a workshop on the ISSS and the SSSA. Las Vegas USA. Pudoc Wageningen. 150-165
- GUTJAHR A.** (1984) - *Spatial variability: geostatistical methods*. Proceedings of a workshop of the ISSS and the SSSA. Las Vegas USA. Pudoc Wageningen, 9-31
- HARDY R. et MAUCORPS J.** (1984) - *Etudes préliminaires en vue du drainage des terres agricoles du territoire de Belfort*. Secteur de Référence du Sundgau. Onic - INRA 212 p.

- HENDERSON R. et RAGG J.M.** (1980) - *A reappraisal of soil mapping in an area of southern Scotland. Part II: The usefulness of some morphological properties and of a discriminant analysis in distinguishing between the dominant taxa of four mapping units.* J. Soil Sci., 31(3), 573-580.
- HERROUIN Y., DADET P., GUIGUES J., LAVILLE P. et TALBO H.** (1989) - *Notice explicative, Carte géol. France (1/50.000), feuille Bain-de-Bretagne (388)* - BRGM, 82 p.
- IRIS J.M.** (1986) - *Analyse et interprétation de la variabilité spatiale de la densité apparente dans trois matériaux ferrallitiques.* Science du Sol, Vol. 24, 245-256.
- JAMAGNE M.** (1967) - *Bases et techniques d'une cartographie des sols.* Ann. agron. 18 (No h.s.), 142 p.
- JAMAGNE M.** (1977) - *La cartographie des sols.* In : Duchaufour P., Bonneau M. et Souchier B. (Eds). Pédologie. 2. Constituants et propriétés du sol. Masson, Paris, 419-439.
- JOHNSON N.M et DREISS S.J.** (1989) - *Hydrostratigraphic interpretation using indicator geostatistics.* Water Resources Research, Vol.25, n° 12, 2501-2510.
- JOURNEL A.G.** (1984) - *The place of non parametric geostatistics.* Geostatistics for Natural Resources Characterization. Part I., G. Verly et al. (Eds), D. Reidel Publishing Company, 307-335.
- JOURNEL A.G. et HUIGBREGTS C.J.** (1978) - *Mining geostatistics.* Academic Press . New York. 600 p.
- KELLEY J.C. et Mc MANUS D.A.** (1970) - *Hierarchical analysis of variance of shelf sediment texture.* J. of sedimentary petrology., Vol.40 (4), 1335-1366.
- KING D.** (1984) - *Analyse de quelques concepts en cartographie des sols, basée sur une automatisation des cartes thématiques dérivées.* Agronomie, 4(5), 461-472.
- KING D.** (1986) - *Modélisation cartographique du comportement des sols basée sur l'étude de la mise en valeur du "Marais de Rochefort".* Thèse de Doct. Ing. INAPG, 159 p.
- KING D. et GIRARD M.C.** (1989) - *Réflexion sur la classification des profils de la couverture pédologique. Proposition d'un algorithme: VLADIMIR.* Science du Sol, 26, 239-254.
- KOZIN V.K.** (1989) - *Variability characteristics of soil properties from the black sea coast of Krasnodar territory.* Soviet Soil Science, 119-125.
- KUILENBERG Van J., GRUIJTER de J.J., MARSMAN B.A. et BOUMA J.** (1982) - *Accuracy of spatial interpolation between point data on soil moisture supply capacity, compared with estimates from mapping units.* Geoderma 27, 311-325.
- LAFRECHOUX M.** (1983) - *Notice explicative de la carte des sols de la région centre - Feuille de Selles-sur-Cher.* Chambre d'Agriculture de l'Indre, 190 p.
- LASLETT G.M, McBRATNEY A.B., PAHL P.J. et HUTCHINSON M.F.** (1987) - *Comparison of several spatial prediction methods for soil pH.* Journal of Soil Science, 1987, 38, 325-341.
- LEBART L., MORINEAU A. et LAMBERT T.** (1987) - *SPAD.N: Système portable d'Analyse des Données. Manuel de Référence.* Publication du Centre International de Statistique et d'Informatique Appliquées (CISIA), 237 p.
- LEGROS J.P.** (1978a) - *Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique. I. Précision dans la délimitation des sols.* Ann. Agron. 29(5), 499-519
- LEGROS J.P.** (1978b) - *Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique. II. Précision dans la caractérisation des sols.* Ann. Agron. 29(6), 583-601.
- LEGROS J.P. et BONNERIC Ph.** (1979) - *Modélisation informatique de la répartition des sols dans le parc naturel régional du Pilat.* Ann. de l'Univ. de Savoie. Sci. Nat., T.IV, 63-68
- LELEUX A., AUROUSSEAU P. et ROUDAUT A.** (1988) - *Synthèse cartographique régionale à partir de données d'analyse de terre.* Science du Sol, Vol. 26 (1), 29-41.

- LEMMER I.C.** (1984) - *Estimating local recoverable reserves via indicator kriging*. Geostatistics for Natural Resources Characterization. Part I., G. Verly et al. (Eds), D. Reidel Publishing Company, 349-364.
- LEPAROUX P.** (1988) - *Recherche de relations entre les contraintes agronomiques et les caractéristiques pédologiques du sol : L'exemple de la région agricole de Castelbriantais*. ENSA-INRA Rennes, SDS 399, 80 p.
- MAIGNIEN R.** (1969) - *Manuel de prospection pédologique. Initiation*. Documentation Technique n°11. ORSTOM, Paris, 132 p.
- MALLET J.L.** (1976) - *Programmes de cartographie automatique. Bibliothèque Cartolab. Sciences de la Terre, Sér. Inf. Géol. 7, 202 p.*
- MARSMAN B.A. et GRUIJTER De J.J** (1986) - *Quality of soil maps. A comparison of soil survey methods in a sandy area*. Soil Survey Papers n° 15, Stiboka, Wageningen
- MATHERON G.** (1965) - *Les variables régionalisées et leur estimation*. Masson, Paris, 305 p.
- MATHERON G.** (1971) - *The theory of regionalized variables and its applications*. Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, Fontainebleau, N°5.
- McBRATNEY A.B.** (1985) - *The role of geostatistics in the design and analysis of field experiments with reference to the effect of soil properties on crop yield*. In NIELSEN D.R and BOUMA J (Eds), Soil spatial variability. Proceedings of a workshop of the ISSS and SSSA. Pudoc, Wageningen, 3-8.
- McBRATNEY A.B. et WEBSTER R.** (1981a) - *The design of optimal sampling schemes for local estimation and mapping of regionalized variables. I. Theory and method*. Computers and Geosciences, Vol.7(4), 331-334.
- McBRATNEY A.B. et WEBSTER R.** (1981b) - *The design of optimal sampling schemes for local estimation and mapping of regionalized variables II. Program and examples*. Computers & Geosciences Vol.7 (4), 335-365.
- McBRATNEY A.B. et WEBSTER R.** (1983a) - *How many observations are needed for regional estimation of soil properties?* Soil Sci., 135(3), 177-183.
- McBRATNEY A.B. et WEBSTER R.** (1983b) - *Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties V. Co-regionalisation and multiple sampling strategy*. J. of Soil Sci., 34, 137-162
- McBRATNEY A.B., WEBSTER R., MCLAREN R.G. et SPIERS R.B.** (1982) - *Regional variation of extractible copper and cobalt in the topsoil of south-east Scotland*. Agronomie, 2(10), 969-982.
- MEIRVENNE Van M. et HOFMAN G.** (1989) - *Spatial variability of soil texture in a polder area 1. Kriging*. Pedologie, XXXIX-1, 69-87.
- MEROT P., GASCUEL-ODOUX C. et CHEVASSU G.** (1986) - *Application de la prospection magnéto-tellurique artificielle à l'étude de la profondeur d'un sol*. Agronomie, 6(1), 59-68.
- MERRY R.H., TILLER K.G. et RICHARDS A.F.** (1990) - *Variability in characteristics of some acidic pasture soils in South Australia and implications for lime application*. Aust. J. Soil Res., 28, 27-38.
- MILLER F.P., CORMACK D.E. et TALBOT J.R.** (1979) - *Soils surveys: Review of data-collection, methodologies, confidence limits, and uses*. Transportation Research Record, National Academy of Sciences, 733, 57-65.
- MINISTERE DE L'INDUSTRIE** (1964) - *Notice explicative, Carte géol. France (1/80.000), feuille Redon (90)*. Service de la carte géologique, 3 ème édition, 8 p.
- MINISTERE DE L'INDUSTRIE** (1966) - *Notice explicative, Carte géol. France (1/80.000), feuille Rennes (75)*. Service de la carte géologique, 3 ème édition, 8 p.
- MOREL R.** (1989) - *Les sols cultivés*. Technique et Documentation - Lavoisier, Paris, 362 p.
- NICOULLAUD B.** (1984) - *Notice explicative de la carte des sols de la région Centre au 1/50 000 - Feuille de Saint-Gaultier*. Chambre d'Agriculture de l'Indre. 159 p.

- NORRIS J.M.** (1971) - *The application of multivariate analysis to soil studies. I. Grouping of soils using different properties.* J. of Soil Sci., Vol. 22 (1), 69-80.
- NORRIS J.M.** (1972) - *The application of multivariate analysis to soil studies. III. Soil variation.* J. of Soil Sci., Vol.23 (1), 62-75.
- NORTCLIFF S.** (1978) - *Soil variability and reconnaissance soil mapping: a statistical study in Norfolk.* J. of Soil Sci., 29(3), 403-418.
- OLIVER M.A.** (1984) - *Soil variation in the Wyre Forest: its elucidation and measurement.* Ph.D thesis, University of Birmingham, 230 p.
- OLIVER M.A. et WEBSTER R.** (1986a) - *Semi-variograms for modelling the spatial pattern of landform and soil properties.* Earth Surface processes and Landforms, Vol.11, 491-504.
- OLIVER M.A. et WEBSTER R.** (1986b) - *Combining nested and linear sampling for determining the scale and form of spatial variation of regionalized variables.* Geographical Analysis, Vol.18 (3), 227-242.
- OLIVER M.A. et WEBSTER R.** (1987) - *The elucidation of soil pattern in the Wyre Forest of the West Midlands, England. II. Spatial distribution.* J. of Soil Sci., 38, 293-307.
- OVALLES F.A. et COLLINS M.E.** (1986) - *Soil landscape relationships and soil variability in north-central Florida.* Soil Sci. Soc. Am. J., 50, 401-408.
- OVALLES F.A. et COLLINS M.E.** (1988) - *Evaluation of soil variability in Northwest Florida using geostatistics.* Soil Sci. Soc. Am. J. 52: 1702-1708.
- PEDRO G.** (1989) - *L'approche spatiale en pédologie. Fondements de la connaissance dans le milieu naturel. Réflexions liminaires.* Science du Sol, Vol.27, 4, 287-301.
- PONCE-HERNANDEZ R. et BECKETT P.H.T.** (1988) - *Land qualities in space: Complementary use on soil maps and trend modelling for spatial interpolation of soil properties by kriging.* in Land Qualities in Space and Time. Bouma et Bregt (Eds).Pudoc Wageningen, 109-112.
- PROTZ R., PRESANT E.W. et ARNOLD R.W.** (1968) - *Establishment of the modal profile and measurement of variability within a soil landform unit.* Can. J. Soil. Sci., Vol. 48, 7-19.
- RAGG J.M. et HENDERSON R.** (1980) - *A reappraisal of soil mapping in an area of southern Scotland. Part I: The reliability of four soil mapping units and morphological variability of their dominant taxa.* J. Soil Sci., 31 (3), 559-572.
- RASSINEUX P. et WALTER C.** (1988) - *Potentialités de rendement en fonction du milieu pédoclimatique. Application à la culture du blé en Bretagne.* Rapport de fin de contrat Relance Agronomique Bretagne, ENSA-INRA Rennes, SDS 407, 47 p.
- RAYNER J.H.** (1966) - *Classification of soils by numerical methods.* J. of Soil Sci., vol.17, 1, 79-82.
- REMY J.C. et MARIN-LAFLECHE A.** (1974) - *L'analyse de terre: Réalisation d'un programme d'interprétation auto-matique.* Ann. agron.,25(4), 607-632
- RGA** (1989) - *Recensement Général de l'Agriculture. Région Bretagne.* Ministère de l'Agriculture.
- RIVIERE J.M.** (1989) - *Méthode de caractérisation des sols : Méthode tarière.* In " La terre, enjeu d'avenir", Journée Régionale d'Agronomie, Chambre Régionale d' Agriculture de Bretagne, 4 p.
- RIVIERE J.M., DUPONT C., TICO S., ANNEZO J.F.** (1989) - *Caractérisation des sols de Bretagne, méthode tarière.* Document mult., Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, 26 p
- ROGALA J.P.** (1982) - *Approche numérique de l'espace agricole. Analyse de l'hétérogénéité et de la structure des unités cartographiques.* Thèse de Docteur-Ingénieur. INA-PG, 224 p.
- ROSS G.J.S.** (1980) - *MLP Maximum likelihood program.* The Statistics Department, Rothamsted Experimental Station, Harpenden.
- ROSS G.J.S.** (1990) - *Nonlinear estimation.* Springer Series in Statistics, Springer Verlag New York, 189 p.

- ROUSSEL F.** (1980) - *Etude d'une toposéquence sur schistes pourprés de Montfort. Application aux problèmes de mise en valeur forestière sur les sols dégradés dans la région de Rennes.* Thèse, Univ. de Rennes, 215 p.
- RPF.** (1990) - *Référentiel Pédologique Français; 3 ème Proposition.* Publié par L'Association Française d'Etude des Sols. 279 p.
- RUELLAN A., DOSSO M. et FRITSCH E.** (1989) - *L'analyse structurale de la couverture pédologique.* Science du Sol, Vol.27, 4, 319-334.
- RUSSO D.** (1984) - *Design of an optimal sampling network for estimating the variogram.* Soil Sci. Soc. Am. J., Vol.48, 708-716
- SABBE W.E. et MARX D.B.** (1987) - *Soil sampling: spatial and temporal variability.* Soil testing: Sampling, Correlation, Calibration, and Interpretation. SSSA special Publication, n° 21, 1-14.
- SCET AGRI** (1983) - *Carte départementale des terres agricoles au 1/50.000 de Janze XII-19.* Ministère de l'Agriculture, 45 p.
- SIMONNEAUX V.** (1987) - *Mesure de la ressemblance entre des groupes de sondages à la tarière et des profils de référence. Application au classement des sols.* Mémoire de DAA - INA-PG, 61 p.
- SNEDECOR G.W et COCHRAN W.G.** (1971) - *Méthodes statistiques.* Ed. Association de Coordination Technique Agricole. Paris 12 è, 649 p.
- SOIL SURVEY STAFF** (1951) - *Soil Survey Manual.* US Department of Agriculture, Washington, 503 p.
- SOIL SURVEY STAFF** (1975) - *Soil Taxonomy, a Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soils Surveys.* Soil Conserv. Serv., US Dept. of Agric., U.S Govt. Printing Office, Washington, D.C., Handbook N° 436, 754 p.
- STEERS C.A et HAJEK B.F** (1979) - *Determination of map unit composition by a random selection of transects.* Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 43, 156-160.
- STEIN A., BOUMA J., MULDER M.A et WETERINGS M.H.W** (1989) - *Using co-kriging in variability studies to predict physical land qualities of a level river terrace.* Soil Technology, Vol.2, 385-402.
- SULLIVAN J.** (1984) - *Conditional recovery estimation through probability kriging - Theory and practice.* Geostatistics for Natural Resources Characterization. Part I., G. Verly et al. (Eds), D. Reidel Publishing Company, 365-384.
- THOMAS P.J., BAKER J.C. et SIMPSON T.W.** (1989) - *Variability of the Cecil Map unit in Appomattox County, Virginia.* Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 53, 1470-1474.
- TRANGMAR B.B, YOST R.S. et UEHARA G.** (1985) - *Application of geostatistics to spatial studies of soil properties.* Advances in Agronomy, Vol. 38, 45-93.
- TRANGMAR B.B, YOST R.S., SUDJADI M. et UEHARA G.** (1984) - *Regional variation of selected topsoil properties in Sitiung, West Sumatra, Indonesia.* Res. Series 026, Hawaii Inst. of Trop. Agr. and Human Resources, 30 p.
- U.S.D.A.** (1981) - *Soil survey of Grand Forks County North Dakota.* United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 191 p.
- UEHARA G., TRANGMAR B.B. et YOST R.S.** (1984) - *Spatial variability of soil properties.* In Nielsen D.R. et Bouma J. (Eds), "Soil spatial variability", Proceedings of a workshop of the ISSS and the SSSA, 61-91.
- VALENTINE K.W.G.** (1981) - *How soil map units and delineations change with survey intensity and map scale.* Can. J. Soil Sci. 61 (4), 535-551.
- VANDER ZAAG P., YOST R.S., TRANGMAR B.B., HAYASHI K. et FOX R.L.** (1984) - *An assessment of chemical properties for soils of Rwanda with the use of geostatistical techniques.* Geoderma, 34, 293-314.
- VAUCLIN M.** (1982) - *Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol.* Ed. INRA, Publ.: Les colloques de l'INRA n°15, 9-43.



- VAUCLIN M., VIERA S.R., VACHAUD G. et NIELSEN D.R.**(1983) - *The use of cokriging with limited field soil observations*. Soil Sci. Soc. Am. J., 47,175-184.
- VOLTZ M.** (1986) - *Variabilité spatiale des propriétés physiques en milieu alluvial. Essai de cartographie quantitative des paramètres hydrodynamiques*. Thèse de Docteur-Ingénieur, ENSAM, 198 p.
- VOLTZ M., WEBSTER R.** (1990) - *A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information*. J. of Soil Science, 41, 473-490.
- WALTER C.** (1989a) - *Analyse de la variabilité spatiale de propriétés du sol au sein de trois unités cartographiques*. Science du Sol, 27(1), 73-76.
- WALTER C., AUROUSSEAU P., LE BORGNE C.** (1989b) - *Notice de Descartes*. Doc. ENSA-INRA Rennes, 15 p.
- WALTER C., DUPONT C., BLONDEL R., MATTHIEU J.** (1989c) - *Le potentiel de production en fonction du milieu pédoclimatique*. In " La terre, enjeu d'avenir", Journée Régionale d'Agronomie, Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, 16 p.
- WANG C.** (1982) - *Variability of soil properties in relation to size of map unit delineation*. Can J. Soil Sci. 62,657-662.
- WANG C.** (1984) - *La méthode du transect et son application aux problèmes de la prospection pédologique*. Bul. Tech. 1984-4F de la Dir. Gale de la Rech. du Canada, 35 p.
- WARRICK A.W et MYERS D.E.** (1987) - *Optimization of sampling locations for variogram calculations*. Water Resources Res., Vol. 23, (3), 496-500.
- WEBSTER R.** (1968) - *Fundamental objections to the 7 th approximation*. Journal of Soil Science, 19, 354-366.
- WEBSTER R.** (1977) - *Quantitative and numerical methods In soil classification and survey*. Monographs on Soil Survey. Clarendon Press. Oxford 269 p.
- WEBSTER R.** (1985) - *Quantitative spatial analysis of soil in the field*. In Advances in Soil Science, Vol.3, Springer-Verlag New-York Inc.
- WEBSTER R. et BECKETT P.H.T.** (1968) - *Quality and usefulness of soil maps*. Nature London 219, 680-682
- WEBSTER R. et BURGESS T.M.** (1980) - *Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. III. Changing Drift and Universal kriging*. J. Soil Sc., 31, 505-524.
- WEBSTER R. et OLIVER M.A.** (1985) - *Utilisation exploratoire de la géostatistique pour la cartographie du sol dans la forêt de Wyre (G.B.)*. "Etudes géostatistiques", Séminaire CFSG, In Sci. de la Terre, Sér. Inf., n°24.
- WEBSTER R. et OLIVER M.A.** (1989) - *Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. VI. Disjunctive kriging and mapping the conditional probability*. J. of Soil Science.
- WEBSTER R. et OLIVER M.A.** (1990) - *Statistical methods in soil and land resource survey*. Spatial Information Systems, Oxford University Press, 316 p.
- WILDING L.P.** (1984) - *Spatial variability: its documentation, accomodation and implications to soil surveys*. In Nielsen D.R. et Bouma J. (Eds), "Soil spatial variability", Proceedings of a workshop of the ISSS and the SSSA, 166-189.
- WILDING L.P. et DREES L.R.** (1983) - *Spatial variability and pedology*. in Wilding L.P., SMECK N.E. et HALL G.F. (Eds), Pedogenesis and Soil Taxonomy I. Concepts and Interactions. Chap. IV, 83-116.
- WILDING L.P., JONES R.B. et SCHAFER G.M.** (1965) - *Variation of soil morphological properties within Miami, Celina, and Crosby mapping units in West-Central Ohio*. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Vol.29, 711-717.
- WIT De C.T. et KEULEN Van H.** (1987) - *Modelling production of field crops and its requirements*. Geoderma 40, 253-265.
- WOPEREIS M.C., GASCUEL-ODOUX C., BOURRIE G., SOIGNET G.** (1988) - *Spatial variability of heavy metals in soil on a one-hectare scale*. Soil Science, Vol.146, 2, 113-118.

- WÖSTEN J.H.M., BANNINK M.H. et BOUMA J.** (1987) - *Land evaluation at different scales: You pay for what you get!* Soil survey and Land evaluation, 7, 13-24.
- WÖSTEN J.H.M., BOUMA J. et STOFFELSEN G.H.** (1985) - *Use of soil survey data for regional soil water simulation models.* Soil Sci. Soc. Am. J., 49, 1238-1244.
- WRIGHT R.L. et WILSON S.R.** (1979) - *On the analysis of soil variability, with an example from Spain.* Geoderma, 22, 297-313.
- XU J. et WEBSTER R.** (1984) - *A geostatistical study of topsoil properties in Zhangwu County, China.* Catena, vol.11, 13-26.
- YATES S.R. et YATES M.V.** (1988) - *Disjunctive kriging as an approach to management decision making.* Soil Sci. Soc; Am. J. 52, 1554-1558.
- YATES S.R. et YATES M.V.** (1989) - *Geostatistics for waste management: a user's manual for the GEOPACK (Version 1.0).* Geostatistical Software System. 70 p.
- YERIMA B.P.K, WILDING L.P, HALLMARK C.T. et CALHOUN F.G.** (1989) - *Statistical relationships among selected soil properties of Northern Cameroun vertisols and associated alfisols.* Soil Sci. Soc. Am. J., 53,1758-1763.
- YOST R.S., UEHARA G. et FOX R.L.** (1982) - *Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas, II. Kriging.* Soil Sci. Soc. Am. J., 46, 1033-1037.
- YOU DEN W.J. et MEHLICH A.** (1937) - *Selection of efficient methods for soil sampling.* Contributions of the Boyce Thompson Institute for Plant Research, Vol. 9, 59-70.

**ANNEXES :**

<b>Annexes A: Carte pédologique des feuilles Janze 6 et Janze 7</b>	<b>p.153</b>
<b>Annexes B: Profils jugés représentatifs des unités cartographiques</b>	<b>p.159</b>
<b>Annexes C: Estimation de la CEC à partir des données granulométriques</b>	<b>p.162</b>
<b>Annexes D: Les résultats de l'AFCM sur les propriétés morphologiques à 5 niveaux de comparaison des sondages des trois unités cartographiques</b>	<b>p.164</b>

## Annexes A

# CARTE PEDOLOGIQUE DES FEUILLES JANZE 6 ET JANZE 7

---

### Introduction à la lecture des cartes pédologiques des feuilles JANZE 6 et JANZE 7

#### 1) Les auteurs de la carte

Les feuilles Janze 6 et Janze 7 ont fait l'objet d'une cartographie pédologique à l'échelle du 1/25.000 dans le cadre du levé au 1/100.000 de la feuille de Janzé (Ille-et-Vilaine), financé par le Ministère de l'Agriculture et coordonné par le SESCOF (Service d'Etudes des Sols et de la Carte Pédologique de France). Les auteurs de ce levé sont Jean-Marie RIVIERE (ENSA-INRA Rennes), Catherine DUPONT et Patrick EDELINE (Chambre d'Agriculture d'Ille-et-Vilaine).

#### 2) La digitalisation et la représentation des cartes

Ces deux feuilles ont été digitalisées au laboratoire ENSA-INRA de Rennes à l'aide d'un scanner. Cette digitalisation étant faite, le dessin en couleurs des cartes a supposé l'emploi de deux logiciels: (i) le logiciel G (Leborgne, 1988) qui permet de transformer l'information matricielle issue du scanner en une information vectorielle utilisée par exemple par une table traçante; (ii) le logiciel Descartes (Walter et al, 1989) qui est un logiciel de représentation automatique de cartes pédologiques et thématiques.

#### 3) Mode de représentation des documents pédologiques.

Le nombre d'unités cartographiques différentes sur ces deux feuilles étant élevé, il est difficile de les distinguer toutes par des couleurs différentes. Les couleurs représentant les unités cartographiques résultent donc d'un choix dont les principes sont les suivants:

- la couleur de base de l'unité cartographique est définie par le type de substrat de l'unité cartographique (vert clair pour les schistes briovériens, jaune pour le grès armoricain...);
- l'espacement entre les hachures définissant cette couleur de base dépend du type de développement de profil et de la profondeur du sol;
- un hachurage vertical bleu indique la présence éventuelle d'indices d'hydromorphie. Il est absent pour les sols jugés sains ou peu hydromorphes (classes d'hydromorphie . à 2), peu serré pour les sols d'hydromorphie moyenne (classes 3 à 5), serré enfin pour les sols présentant une hydromorphie importante (supérieure à 5).

Cette méthode de représentation permet de visualiser aisément les grandes tendances de répartition des sols. En regard de chaque figuré graphique, on indique en légende:

- les caractéristiques qui sont communes aux unités cartographiques regroupées sous ce figuré;
- les codes de l'unité ou des unités cartographiques les plus fréquentes;
- la superficie en hectares occupée par les unités ainsi regroupées

Enfin, si la taille de la plage cartographique le permet, on indique en son sein le code de l'unité cartographique à laquelle elle se rattache. Ce code est composé:

- d'une première lettre, indiquant le type de substrat;
- d'un chiffre définissant la classe d'hydromorphie;
- d'une seconde lettre, caractérisant le type de développement de profil
- d'un dernier chiffre précisant la classe de profondeur du sol.

Le report du code permet ainsi une lecture plus précise de la carte pédologique, mais la compréhension de ce code suppose de se reporter à la liste suivante qui en explicite les modalités.

## Signification des codes de la légende (Extrait de Rivière et al., 1989)

### I. Le type de substrat

<b>L</b>	Limon	<b>K</b>	Poudingue
<b>S</b>	Sable	<b>T</b>	Terrasse caillouteuse
<b>N</b>	Schiste tendre (de type Briovérien ou de Riadan)	<b>E</b>	Eboulis de pente
<b>O</b>	Schiste moyen (de type Angers)	<b>U</b>	Matériau d'apport colluvial
<b>P</b>	Schiste dur (type Pont-Réan)	<b>V</b>	Matériau d'apport alluvial
<b>Q</b>	Grès Armoricaïn	<b>A</b>	Altérite argileuse
<b>R</b>	Schiste gréseux		

### II. Hydromorphie <sup>(1)</sup>

- Classe .** : Absence de taches d'oxydo-réduction
- Classe 1** : Présence de taches d'oxydo-réduction apparaissant peu abondantes à une profondeur supérieure à 80 cm.
- Classe 2** : Présence de taches d'oxydo-réduction apparaissant abondante à une profondeur supérieure à 80 cm.
- Classe 3** : Présence de taches d'oxydo-réduction apparaissant peu abondantes à une profondeur comprise entre 40 et 80 cm.
- Classe 4** : Présence de taches d'oxydo-réduction apparaissant abondantes à une profondeur comprise entre 40 et 80 cm
- Classe 5** : Présence de taches d'oxydo-réduction apparaissant peu abondantes dès la surface.
- Classe 6** : Présence de taches d'oxydo-réduction apparaissant abondantes dès la surface.
- Classe 7** : Pseudogley généralisé
- Classe 8** : Pseudogley généralisé avec gley en profondeur
- Classe 9** : Pseudogley généralisé avec gley à faible profondeur.

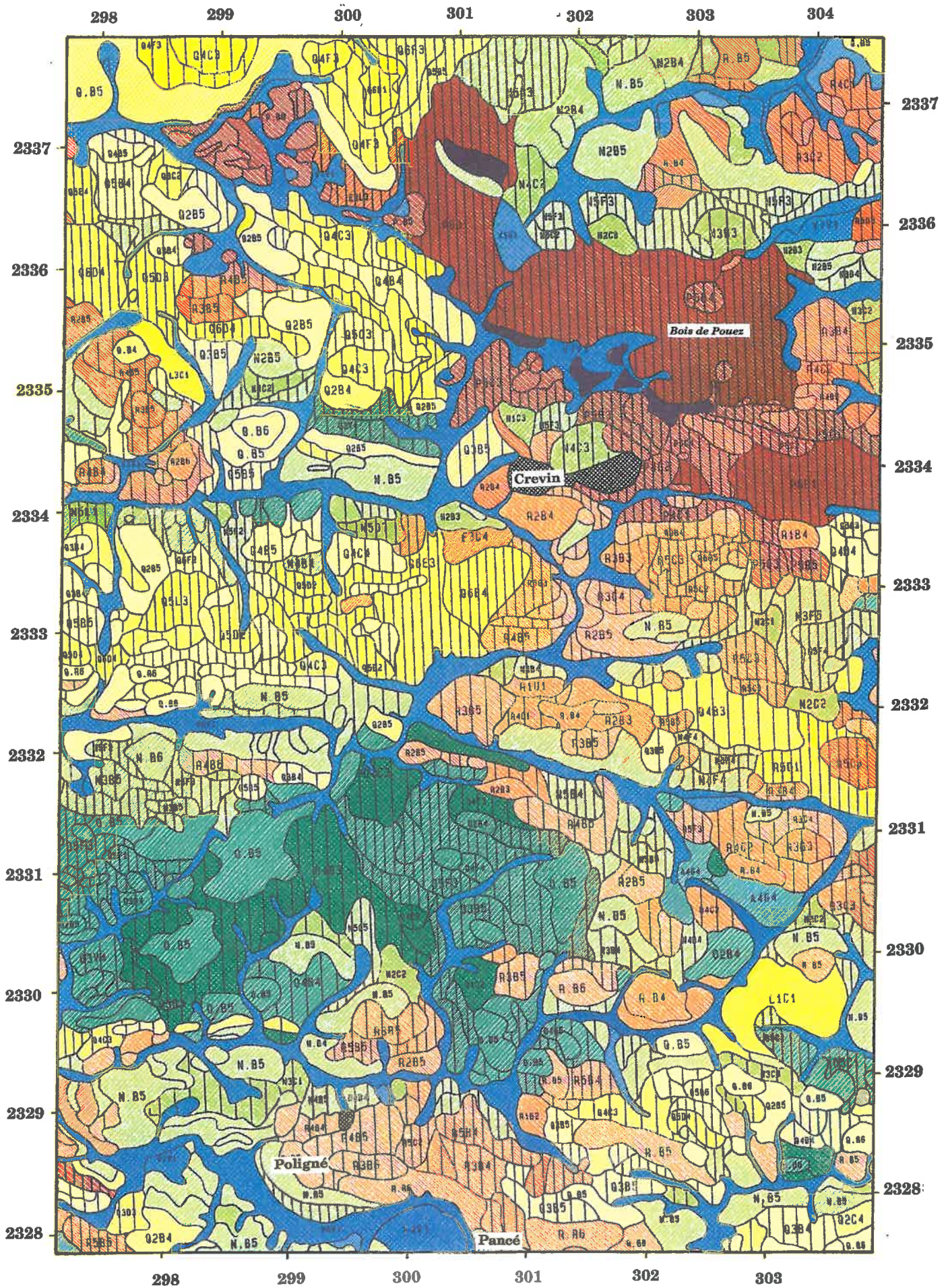
### III. Développement de profil

<b>N</b>	Sol minéral brut, très superficiel	<b>D</b>	Sol lessivé faiblement dégradé
<b>R</b>	Sol brun organique, superficiel, sous lande	<b>E</b>	Sol dégradé
<b>B</b>	Sol brun	<b>U</b>	Sol d'apport colluvial
<b>C</b>	Sol brun faiblement lessivé	<b>V</b>	Sol d'apport alluvial et colluvial
<b>L</b>	Sol lessivé		

### IV. Profondeur du sol

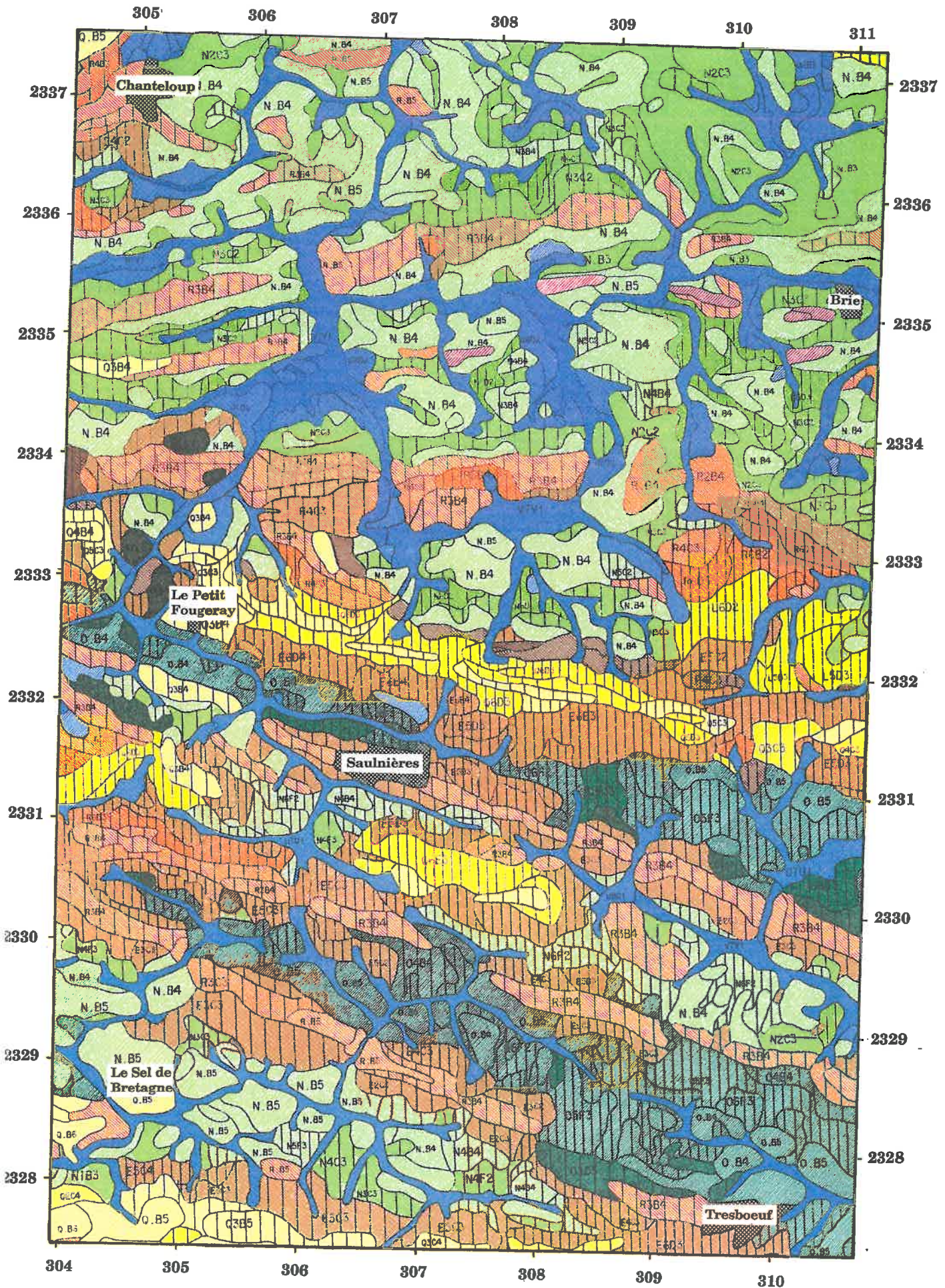
- Classe 1** : Profondeur de plus d'un mètre
- Classe 2** : Profondeur comprise entre 80 cm et 1m
- Classe 3** : Profondeur comprise entre 60 cm et 80 cm
- Classe 4** : Profondeur comprise entre 40 cm et 60 cm
- Classe 5** : Profondeur comprise entre 20 cm et 40 cm
- Classe 6** : Profondeur comprise entre 0 et 20 cm

(1) Les codes de la classe d'hydromorphie employés dans la première partie (chapitres 2 et 3) sont décalés par rapport à ceux présentés ici du fait de problèmes de codage - se reporter au tableau II.1)



**CARTE PEDOLOGIQUE DE LA FEUILLE JANZE 6**

Levé: RIVIERE J.M. (ENSA-INRA Rennes), DUPONT C. et EDELINE P. (C.A. 35)



**CARTE PEDOLOGIQUE DE LA FEUILLE JANZE 7**

Levé: RIVIERE J.M. (ENSA-INRA Rennes), DUPONT C. et EDELIN P. (C.A. 35)

1. Zone urbaine



- 2. Sols faiblement lessivés sur limons, peu hydromorphes, de plus d'un mètre - type L1C1 ( 70 ha)
- 3. Sols lessivés faiblement dégradés sur limons, hydromorphes, entre 60 et 100 cm - type L6D2 ou L5D3 ( 45 ha)

SOLS DEVELOPPES SUR LIMONS



SOLS DEVELOPPES SUR SCHISTE TENDRE (BRIOVERIEN)

- 4. Sols bruns ou bruns faiblement lessivés sur schiste tendre, peu hydromorphes, de moins de 60 cm - type N.B4 ou N.B5 (1880 ha)
- 5. Sols bruns ou bruns faiblement lessivés sur schiste tendre, peu hydromorphes, de plus de 60 cm - type N.C3 ou N2C2 ( 417 ha)
- 6. Sols bruns sur schiste tendre, moyennement hydromorphes, de moins de 60 cm - type NAB4 - ( 311 ha)
- 7. Sols bruns faiblement lessivés sur schiste tendre, moyennement hydromorphes, de plus de 60 cm - type N3C2 ou N4F2 ( 888 ha)
- 8. Sols bruns ou bruns faiblement lessivés sur schiste tendre, hydromorphes - type N5C2 ou N6F2 ( 588 ha)
- 9. Sols lessivés faiblement dégradés ou sols dégradés sur schiste tendre, hydromorphes - type N6D2 ( 133 ha)



SOLS DEVELOPPES SUR SCHISTE MOYEN ( D'ANGERS )

- 10. Sols bruns sur schiste moyen, peu hydromorphes, de moins de 60 cm - type O.B4 ou O.B5 ( 570 ha)
- 11. Sols bruns ou bruns faiblement lessivés sur schiste moyen, peu hydromorphes, de plus de 60 cm - type O1C2 ( 39 ha)
- 12. Sols bruns sur schiste moyen, moyennement hydromorphes, de moins de 60 cm - type O3B4 ou O4B4 ( 234 ha)
- 13. Sols bruns ou bruns faiblement lessivés sur schiste moyen, moyennement hydromorphes, de plus de 60 cm - type O3B3 ou O5F3 ( 264 ha)
- 14. Sols bruns ou bruns faiblement lessivés sur schiste moyen, hydromorphes - type O5F3 ou O5C4 ( 541 ha)
- 15. Sols lessivés faiblement dégradés ou sols dégradés sur schiste moyen, hydromorphes - type O6D3 ( 44 ha)



SOLS DEVELOPPES SUR SCHISTE DUR (PONT-REAN)

- 17. Sols bruns sur schiste dur, peu hydromorphes, de moins de 60 cm - type P.B4 ( 88 ha)
- 18. Sols bruns ou bruns faiblement lessivés sur schiste dur, peu hydromorphes, de plus de 60 cm - type P3C2 ( 21 ha)
- 19. Sols bruns ou bruns faiblement lessivés sur schiste dur, hydromorphes - type P4C3 ou P5C3 ( 201 ha)
- 20. Sols lessivés faiblement dégradés sur schiste dur, hydromorphes - type P6D1 ( 389 ha)

SOLS DEVELOPPES SUR GRES ARMORICAIN

- 21. Sols bruns sur grès armoricain, peu hydromorphes, de moins de 40 cm - type Q.B5 ou Q.B6 ( 402 ha)
- 22. Sols bruns sur grès armoricain, peu hydromorphes, de plus de 40 cm - type Q.B4 ou Q2B4 ( 87 ha)
- 23. Sols bruns sur grès armoricain, moyennement hydromorphes, de moins de 60 cm - type Q3B4 ( 506 ha)
- 24. Sols bruns ou bruns faiblement lessivés sur grès armoricain, moyennement hydromorphes, de plus de 60 cm - type Q4C3 ou Q4B3 ( 419 ha)
- 25. Sols bruns ou bruns faiblement lessivés sur grès armoricain, hydromorphes - type Q5C3 ( 335 ha)
- 26. Sols lessivés faiblement dégradés sur grès armoricain, hydromorphes - type Q6D3 ( 440 ha)



SOLS DEVELOPPES SUR GRES SCHISTEUX

- 27. Sols bruns sur grès schisteux, peu hydromorphes, de moins de 40 cm - type R.B5 ou R.B6 ( 355 ha)
- 28. Sols bruns sur grès schisteux, peu hydromorphes, de plus de 40 cm - type R.B4 ou R2B4 ( 188 ha)
- 29. Sols bruns sur grès schisteux, moyennement hydromorphes, de moins de 60 cm - type R3B4 ou R4B5 ( 1074 ha)
- 30. Sols bruns ou bruns faiblement lessivés sur grès schisteux, moyennement hydromorphes, de plus de 60 cm - type R4C3 ou R4B3 ( 399 ha)
- 31. Sols bruns ou bruns faiblement lessivés sur grès schisteux, hydromorphes - type R5C3 ou R5B4 ( 235 ha)
- 32. Sols lessivés faiblement dégradés ou dégradés sur grès schisteux, hydromorphes - type R6C3 ou R6E2 ( 210 ha)



SOLS DEVELOPPES SUR POUINGUE

- 33. Sols bruns sur poudingue, peu profonds - type K2B4 ou K1N4B4 ( 55 ha)



SOLS DEVELOPPES SUR TERRASSES

- 34. Sols bruns ou sols lessivés sur terrasses - type T4L4 ou T6B4 ( 23 ha)

SOLS DEVELOPPES SUR EBOULIS DE PENTE

- 35. Sols bruns sur éboulis de pente, peu hydromorphes, de moins de 60 cm - type E2B5 ( 26 ha)
- 36. Sols bruns faiblement lessivés sur éboulis de pente, peu hydromorphes, de plus de 60 cm - type E2C3 ( 16 ha)
- 37. Sols bruns faiblement lessivés sur éboulis de pente, moyennement hydromorphes, de plus de 60 cm - type E4C3 ( 271 ha)
- 38. Sols bruns ou bruns faiblement lessivés sur éboulis de pente, hydromorphes - type E5C3 ou E5B4 ( 281 ha)
- 39. Sols bruns faiblement lessivés ou lessivés sur éboulis de pente, hydromorphes - type E5D3 ou E5E3 ( 380 ha)



SOLS DEVELOPPES SUR MATERIAU D'APPORT COLLUVIAL

- 40. Sols bruns sur matériau d'apport colluvial, peu hydromorphes - type U2U1 ( 19 ha)
- 41. Sols lessivés faiblement dégradés ou dégradés sur matériau d'apport colluvial, hydromorphes - type U6D2 ou U7U1 ( 729 ha)



SOLS DEVELOPPES SUR MATERIAU D'APPORT ALLUVIAL

- 42. Sols d'apport alluvial, peu hydromorphes - type V2U1 ( 24 ha)
- 43. Sols d'apport alluvial, hydromorphes - type V7V1 ou V8V1 (1387 ha)



SOLS DEVELOPPES SUR UNE ALTERITE ARGILEUSE

- 44. Sols bruns sur altérite argileuse, hydromorphes, peu profonds - type A4G4 ( 40 ha)



- 45. Eau libre: Lacs, étangs ( 28 ha)





## Annexes B

**PROFILS JUGES REPRESENTATIFS  
DES UNITES CARTOGRAPHIQUES N.B4, O.B4 et R3B4  
ETUDIEES DANS LA SECONDE PARTIE DU MEMOIRE**

**1. UNITE CARTOGRAPHIQUE N.B4**

Libellé: *Limon moyen sableux sain brun jaune à cailloutis de schiste; substrat de schiste briovérien à 40-60 cm (sol brun)*  
 Référence RPF: BRUNISOL MESOSATURE, cultivé, sur schiste briovérien  
 Soil Taxonomy: Dystric EUTROCHREPT  
 Auteur: Edeline P. (1981)  
 Localisation: Secteur de référence de Retiers (Ille-et-Vilaine, France), altitude 80 m.  
 Géologie: Schiste Briovérien  
 Topographie: Profil situé à mi-hauteur d'une pente rectiligne sous prairie temporaire

*Description morphologique:*

- LA 0 - 20 cm:** Limon moyen sableux, brun jaune foncé (10YR4/4) - matière organique moyenne liée aux éléments minéraux - nombreux coprolithes - quelques cailloux aplatis et émoussés de schiste briovérien et quelques graviers de quartz - structure polyédrique subanguleuse nette de 20 mm associée à une structure grumeleuse nette de 3 mm - horizon poreux avec de nombreux pores de 1 à 2 mm au sein des agrégats - peu compact - transition sur 7 cm régulière.
- S 20 - 60 cm:** Limon moyen sableux brun jaune (10YR6/6) - matière organique faible revêtant les éléments minéraux - quelques cailloux de schiste briovérien aplatis émoussés et quelques cailloux de grès aplatis anguleux - structure polyédrique subanguleuse peu nette de 60 mm et sous-structure nette polyédrique subanguleuse de 2 mm - horizon très poreux avec de très nombreux pores <1 mm au sein des agrégats - ; nombreuses racines et traces d'activités biologiques - transition sur 5 cm régulière.
- C 60 - 200 cm:** Schiste altéré en plaquettes d'orientation oblique - revêtements locaux argileux, roche peu résistante - racines très peu nombreuses dans les fissures verticales - horizon très peu poreux.

*Caractéristiques analytiques:*

Horizon	Granulométrie (%)					Mat. organique(%)		
	A	LF	LG	SF	SG	MO	N	C/N
<b>LA</b>	14.0	34.3	33.3	9.8	8.3	33.0	1.9	10.1
<b>S</b>	16.3	29.5	36.7	9.1	8.1			
<b>C</b>	30.4	15.2	10.1	10.6	33.5			

Horizon	pH eau	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg	Capacité d'échange (meq/100g)					S/T
			T	Ca	Mg	K	Na	
LA	5.5	83	11.4	4.6	0.4	0.3	0.2	.49
S	6.0	33	10.6	4.6	0.5	0.1	0.4	.53
C	5.4	11	11.4	4.5	0.6	0.1	0.2	.47

## 2. UNITE CARTOGRAPHIQUE O.B4

Libellé: *Limon argileux brun sain à cailloutis de schiste; substrat de schiste d'Angers à 40-60 cm (sol brun)*

Référence RPF: BRUNISOL MESOSATURE, cultivé, sur schiste d'Angers

Soil Taxonomy: Dystric EUTROCHREPT

Auteur: Edeline et Kriegk (1977)

Localisation: Commune de Coesmes (Ille-et-Vilaine, France)

Géologie: Schiste d'Angers

Topographie: Pente moyenne

### Description morphologique:

- LA** 0 - 22 cm: Limon argilo-sableux brun jaune foncé à brun foncé (75 à 10YR4/4) - 10 % de graviers et cailloux altérés de schiste d'Angers - structure polyédrique subanguleuse nette de 15 mm juxtaposée à une structure grumeleuse de 3 mm - horizon poreux avec des pores peu nombreux au sein des agrégats - transition sur 3 cm régulière.
- S** 22 - 50 cm: Limon argilo-sableux brun foncé (75YR44) - 10 % de graviers et cailloux très altérés de schiste; structure polyédrique subanguleuse nette de 15 mm - horizon poreux avec des pores peu nombreux au sein des agrégats - transition sur 1 cm et ondulée.
- C1** 40 - 50 cm: 60 % de cailloux de schiste altéré avec quelques revêtements argileux - transition irrégulière.
- C2** >50 cm: schiste peu altéré à litage vertical.

### Caractéristiques analytiques

Horizon	Granulométrie (%)					Stabilité structurale		Mat. organique	
	A	LF	LG	SF	SG	Log10S	Log10K	MO	C/N
LA	25.8	39.3	21.5	10.8	15.0	0.90	1.38	39.3 %	8.72
S	28.6	27.7	21.0	8.9	13.8	0.95	1.52	-	-

Horizon	pH eau	pH KCl	Capacité d'échange (meq/100g)					S/T
			T	Ca	Mg	K	Na	
LA	5.6	4.7	11.7	6.2	0.9	0.5	0.1	0.65
S	5.8	4.9	9.8	5.1	0.5	0.6	0.1	0.65

### 3. UNITE CARTOGRAPHIQUE R3B4

Libellé: *Limon moyen sableux peu hydromorphe ; substrat de grès schisteux à 60 cm (sol brun)*  
 Référence RPF: BRUNISOL MESOSATURE, rédoxique, mésosaturé en surface, cultivé, sur grès schisteux  
 Soil Taxonomy: Aquic EUTROCHREPT  
 Auteur: Edeline P. (1981)  
 Localisation: Secteur de référence de Retiers (Ille-et-Vilaine, France)  
 Géologie: Grès schisteux  
 Topographie: Sommet d'une pente de 2 % d'une longueur de 900 mètres

#### Description morphologique:

- LA 0 - 22 cm:** Limon moyen sableux brun jaune (10YR43) - Matière organique moyenne - 20 % de cailloux irréguliers et anguleux - structure polyédrique subanguleuse peu nette de 20 mm juxtaposée à une structure grumeleuse peu nette de 2 mm - peu compact - horizon poreux avec de nombreux pores <1 mm au sein des agrégats - nombreuses racines et turricules - transition sur 2 cm régulière.
- S 22-40 cm:** Limon moyen sableux brun jaune (10YR64) - 20 % de graviers et cailloux structure polyédrique subanguleuse peu nette de 20 mm - horizon poreux avec nombreux pores <1 mm au sein des agrégats - racines peu nombreuses.
- Cg >40 cm:** Limon moyen sableux brun jaune (10YR64) - 80 % de cailloux et pierres de grès schisteux irréguliers et anguleux à litage vertical - structure polyédrique subanguleuse peu nette de 20 mm et sur-structure continue - Taches d'oxydation de couleur 10YR56 assez nombreuses, peu contrastées et peu nettes - Concrétions peu abondantes.

#### Description analytique:

Horizon	Granulométrie (%)					Matière organique(%)		
	A	LF	LG	SF	SG	MO	N	C/N
LA	10.4	28.0	43.7	12.4	5.2	32.	1.76	10.5
S	8.0	22.2	37.3	20.2	12.0			

Horizon	pH eau	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg	Capacité d'échange (meq/100g)					
			T	Ca	Mg	K	Na	S/T
LA	5.1	280	8.0	3.1	0.6	0.4	0.1	0.51
S	5.7	-	7.8	1.6	0.6	0.3	0.05	0.33

## Annexes C

# ESTIMATION DE LA CAPACITE D'ECHANGE CATIONIQUE A PARTIR DES DONNEES GRANULOMETRIQUES

### 1. Les données et l'objectif.

La population prise en compte provient de l'échantillonnage de 3 unités cartographiques (N.B4, R3B4 et O.B4) sur schiste Briovérien, sur grès schisteux et sur schiste d'Angers. On dispose ainsi de 360 échantillons de l'horizon de surface pour lesquels on connaît la Capacité d'Echange Cationique CEC (Méthode Metson), la granulométrie en 5 classes (ARGI, LIMF, LIMG, SABF, SABG) et le Carbone Organique (CORG).

L'objectif réside dans la prédiction de la CEC à partir des autres propriétés dont la mesure est plus courante.

### 2. La méthode.

La méthode utilisée est la régression linéaire qui permet d'étudier la relation entre une variable Y et des variables X1, X2, ..., Xp à l'aide du modèle:

$$Y = b_0 + b_1.Y_1 + b_2.Y_2 + \dots + b_p.X_p + \text{erreur}$$

La régression linéaire recherche les coefficients  $b_0$  à  $b_p$  en faisant des hypothèses sur les "erreurs" qu'il faut vérifier a posteriori: (i) moyenne nulle; (ii) variance constante; (iii) distribution normale; (iv) indépendance 2 à 2.

On fixe  $b_0$ , l'ordonnée à l'origine du modèle, égale à zéro.

### 3. Les résultats

Deux modèles s'avèrent très proches:

· Modèle 1 ( $r^2$  multiple = 0,97):

$$CEC (meq / 100g) = 0,15 \cdot ARG1 (\%) + 2,49 \cdot CORG (\%) + 0,05 \cdot LIMF + 0,07 \cdot LIMG (\%)$$

· Modèle 2 ( $r^2$  multiple = 0,95):

$$CEC (meq / 100g) = 0,18 \cdot ARG1 (\%) + 2,64 \cdot CORG (\%)$$

Le modèle 2 peut s'écrire, si on considère  $MO = 1,72 \cdot CORG$

$$CEC (meq / 100g) = 0,18 \cdot [ARG1 (\%) + 8,62 \cdot MO (\%)]$$

### 4. Brève discussion

Les régressions obtenues s'avèrent intéressantes puisqu'elles permettent d'estimer la CEC avec une erreur inférieure à 2 meq / 100 g pour 96 % des échantillons (Cf. figure infra).

En tenant compte des limons fins et des limons grossiers, on améliore légèrement la qualité de la régression. Cela peut s'expliquer par une meilleure discrimination, grâce à ces deux variables, d'échantillons dont la composition minéralogique ou de la matière organique diffèrent.

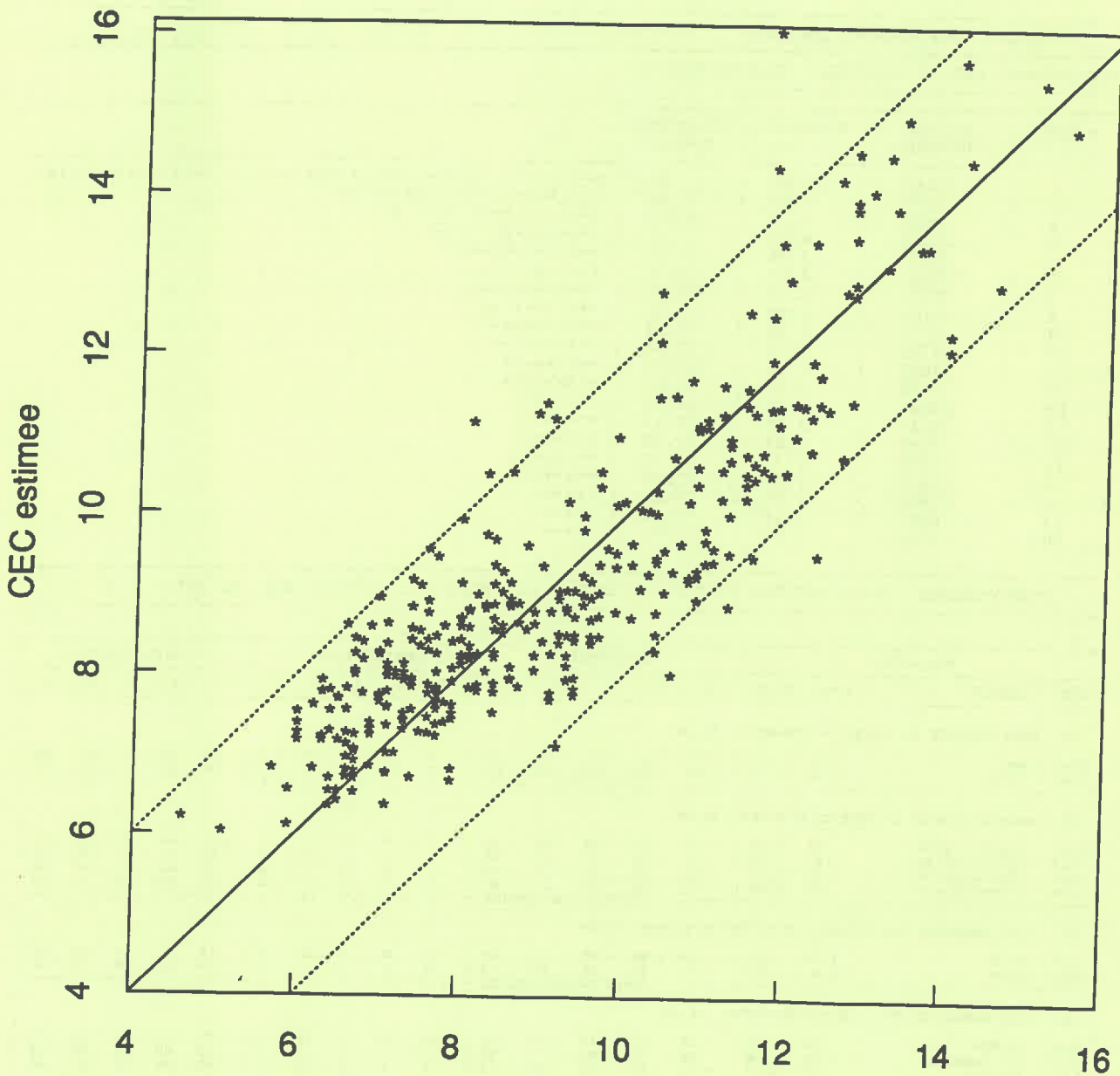
Cette relation ne tient pas explicitement compte de la nature minéralogique des argiles et de la composition de la matière organique. Son emploi ne peut donc être généralisée même à

l'échelle régionale. Elle s'applique pour des sols s'apparentant à ceux de cet échantillon d'apprentissage.

Notons enfin que les erreurs d'estimation ne sont pas aléatoires (Cf. figure):

- pour des échantillons dont la CEC mesurée est inférieure à 9 meq/100g, il y a surestimation;
  - pour des échantillons dont la CEC mesurée est comprise entre 9 et 12 meq/100g, il y a sous-estimation;
  - pour des échantillons dont la CEC mesurée est supérieure à 12 meq/100g, il y a surestimation.
- Cela peut s'expliquer par des différences minéralogiques ou de composition de la matière organique.

*En résumé, pour les échantillons considérés, les différences de CEC sont liées essentiellement à des différences de teneur en argile et de matière organique, secondairement à des différences de composition de ces deux variables explicatives.*



**Figure :** Représentation de la CEC estimée par le modèle 1 en fonction de la CEC mesurée. On représente par ailleurs la bissectrice ( $y=x$ ) et les droites ( $y=x+2$ ) et ( $y=x-2$ )

## Annexes D

### ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES MULTIPLES SUR LES PROPRIETES MORPHOLOGIQUES A 5 NIVEAUX DE COMPARAISON DES SONDAGES DES TROIS UNITES CARTOGRAPHIQUES

LOGICIEL SPAD.N (LEBART et al., 1987)  
ANALYSE FACTORIELLE DES CORRESPONDANCES MULTIPLES  
DES PROPRIETES MORPHOLOGIQUES DES SONDAGES SUR N.B4, R3B4 et O.B4  
===== 5 niveaux de comparaison a 20, 38, 48, 58 et 72 cm =====

32 QUESTIONS ACTIVES  
117 MODALITES ASSOCIEES  
360 INDIVIDUS ACTIFS

#### EDITION DES VALEURS PROPRES

#### HISTOGRAMME DES 20 PREMIERES VALEURS PROPRES

NUMERO	VALEUR PROPRE	POURCENT.	POURCENT. CUMULE	
1	.6263	23.58	23.58	*****
2	.1879	7.08	30.65	*****
3	.1639	6.17	36.82	*****
4	.1192	4.49	41.31	*****
5	.1037	3.90	45.21	*****
6	.0947	3.56	48.78	*****
7	.0910	3.43	52.20	*****
8	.0808	3.04	55.25	*****
9	.0770	2.90	58.14	*****
10	.0721	2.71	60.86	*****
11	.0693	2.61	63.47	*****
12	.0653	2.46	65.93	*****
13	.0595	2.24	68.17	*****
14	.0531	2.00	70.17	*****
15	.0493	1.86	72.03	*****
16	.0470	1.77	73.79	*****
17	.0418	1.57	75.37	*****
18	.0409	1.54	76.91	*****
19	.0387	1.46	78.36	*****
20	.0366	1.38	79.74	*****

#### COORDONNEES, CONTRIBUTIONS ET COSINUS CARRES DES MODALITES ACTIVES SUR LES AXES 1 A 5

MODALITES	COORDONNEES					CONTRIBUTIONS					COSINUS CARRES							
	IDEN - LIBELLE	P.REL	DISTO	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
<b>45 . HUM1 HUMIDITE DE L'HORIZON PRESENT A 20 CM</b>																		
1hu1 - sec		1.66	.88	-.21	-.15	-.08	-.03	-.27	.1	.2	.1	.0	1.1	.05	.03	.01	.00	.08
1hu2 - frais		1.47	1.13	.24	.17	.09	.04	.30	.1	.2	.1	.0	1.3	.05	.03	.01	.00	.08
									CONTRIBUTION CUMULEE =									
									.3	.4	.1	.0	2.4					
<b>46 . MAT1 COULEUR DE LA MATRICE AU NIVEAU 20 CM</b>																		
1ma1 - 10yr33-10yr46		.30	9.29	-.33	.59	.08	-.20	-.14	.1	.6	.0	.1	.1	.01	.04	.00	.00	.00
1ma2 - 10yr53-10yr54-		1.42	1.20	.16	-.04	.12	.04	.21	.1	.0	.1	.0	.6	.02	.00	.01	.00	.04
1ma3 - 10yr56-10yr58		.95	2.27	-.06	.13	-.28	-.10	-.30	.0	.1	.5	.1	.8	.00	.01	.03	.00	.04
1ma4 - 10yr63-10yr64		.44	6.06	-.17	-.56	.16	.22	.07	.0	.8	.1	.2	.0	.00	.05	.00	.01	.00
									CONTRIBUTION CUMULEE =									
									.1	1.4	.7	.4	1.5					
<b>47 . GRO1 ABONDANCE DES ELEMENTS GROSSIERS AU NIVEAU 20 CM</b>																		
1gr1 - <10%		1.72	.82	.40	-.04	-.03	-.19	.15	.4	.0	.0	.5	.4	.19	.00	.00	.04	.03
1gr2 - >10%		1.41	1.22	-.48	.05	.03	.23	-.19	.5	.0	.0	.6	.5	.19	.00	.00	.04	.03
									CONTRIBUTION CUMULEE =									
									1.0	.0	.0	1.1	.9					
<b>48 . COM1 COMPACTE DE L'HORIZON AU NIVEAU 20 CM</b>																		
1co1 - meuble		.56	4.54	.19	.11	.18	.44	.21	.0	.0	.1	.9	.2	.01	.00	.01	.04	.01
1co2 - peu compact		2.26	.38	.03	.00	-.07	-.17	-.03	.0	.0	.1	.5	.0	.00	.00	.01	.07	.00
1co3 - compact		.30	9.29	-.56	-.18	.19	.43	-.18	.2	.1	.1	.5	.1	.03	.00	.00	.02	.00
									CONTRIBUTION CUMULEE =									
									.2	.1	.2	1.9	.3					
<b>51 . 2HUM HUMIDITE DE L'HORIZON PRESENT A 38 CM</b>																		
2hu1 - sec		.63	3.93	.07	.04	-.60	-.42	-1.05	.0	.0	1.4	1.0	6.7	.00	.00	.09	.05	.28
2hu2 - frais		1.64	.90	.57	.18	-.23	-.05	.30	.9	.3	.5	.0	1.4	.36	.03	.06	.00	.10
2huz - presence du substrat		.85	2.67	-1.16	-.37	.89	.41	.21	1.8	.6	4.1	1.2	.4	.50	.05	.30	.06	.02
									CONTRIBUTION CUMULEE =									
									2.7	.9	6.1	2.2	8.5					

MODALITES			COORDONNEES					CONTRIBUTIONS					COSINUS CARRES				
IDEN - LIBELLE	P.REL	DISTO	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
52 . MAT2 COULEUR DE LA MATRICE AU NIVEAU 38 CM																	
2ma1 - 10yr33-10yr46	.14	21.50	.12	.98	-.30	-.73	-.50	.0	.7	-.1	.6	.3	.00	.04	.00	.02	.01
2ma2 - 10yr53-10yr54	.36	7.57	.76	.14	.20	-.02	-.34	.3	.0	-.1	.0	.4	.08	.00	.01	.00	.02
2ma3 - 10yr56-10yr58	.77	3.04	.28	.69	-.22	-.08	-.70	.1	1.9	.2	.0	3.7	.03	.15	.02	.00	.16
2ma4 - 10yr63-10yr64	.24	11.86	.70	-.94	-.13	-1.00	.75	.2	1.1	.0	2.1	1.3	.04	.07	.00	.09	.05
2ma5 - 10yr66-10yr68	.58	4.37	.28	.00	-.84	-.07	.44	.1	.0	2.5	.0	1.1	.02	.00	.16	.00	.04
2ma6 - 10yr72-10yr74	.16	19.00	.93	-.88	-.57	.58	.91	.2	.7	.3	.4	1.2	.04	.04	.02	.02	.04
2maz - presence du substrat	.87	2.60	-1.12	-.40	.86	.42	.18	1.7	.8	3.9	1.3	.3	.48	.06	.28	.07	.01
CONTRIBUTION CUMULEE								2.6	5.2	7.1	4.5	8.3					
53 . GRO2 ABONDANCE DES ELEMENTS GROSSIERS AU NIVEAU 38 CM																	
2gr1 - <10%	.80	2.91	.84	-.15	.19	-.51	.11	.9	.1	.2	1.7	.1	.24	.01	.01	.09	.00
2gr2 - 10-20%	.94	2.33	.26	.32	-.40	-.01	-.61	.1	.5	.9	.0	3.3	.03	.04	.07	.00	.16
2gr3 - >20%	.54	4.81	.13	.26	-1.00	.13	.57	.0	.2	3.3	.1	1.7	.00	.01	.21	.00	.07
2grz - presence du substrat	.85	2.67	-1.16	-.37	.89	.41	.21	1.8	.6	4.1	1.2	.4	.50	.05	.30	.06	.02
CONTRIBUTION CUMULEE								2.8	1.4	8.5	3.0	5.4					
54 . COM2 COMPACITE DE L'HORIZON AU NIVEAU 38 CM																	
2co1 - meuble ou peu compac	1.45	1.16	.58	.15	-.02	-.32	-.32	.8	.2	.0	1.3	1.5	.29	.02	.00	.09	.09
2co2 - compact ou tres comp	.80	2.91	.16	.16	-.90	.13	.32	.0	.1	3.9	.1	.8	.01	.01	.28	.01	.03
2coz - presence du substrat	.88	2.56	-1.10	-.39	.85	.41	.25	1.7	.7	3.9	1.2	.5	.47	.06	.28	.07	.02
CONTRIBUTION CUMULEE								2.5	1.0	7.8	2.6	2.8					
55 . 2A0X ABONDANCE DES TACHES D OXYDATION AU NIVEAU 38 CM																	
2ao1 - pas de taches d'oxyd	1.69	.85	.39	.51	-.28	-.06	-.37	.4	2.3	.8	.1	2.3	.18	.31	.09	.00	.16
2ao2 - peu nombreuses	.47	5.67	.49	-.72	-.33	-.74	.66	.2	1.3	.3	2.1	2.0	.04	.09	.02	.10	.88
2ao3 - nombreuses	.11	26.69	.85	-1.88	-1.24	.92	1.24	.1	2.1	1.1	.8	1.7	.03	.13	.06	.03	.06
2aoz - presence du substrat	.85	2.67	-1.16	-.37	.89	.41	.21	1.8	.6	4.1	1.2	.4	.50	.05	.30	.06	.02
CONTRIBUTION CUMULEE								2.5	6.4	6.3	4.2	6.3					
56 . ARE2 ABONDANCE DES TACHES DE REDUCTION AU NIVEAU 38 CM																	
2ar1 - pas de taches	1.83	.71	.38	.43	-.32	-.04	-.32	.4	1.8	1.1	.0	1.8	.20	.26	.14	.00	.15
2ar2 - peu nombreuses ou no	.44	6.06	.67	-1.08	-.41	-.61	.92	.3	2.8	.5	1.4	3.6	.07	.19	.03	.06	.14
2arz - presence du substrat	.85	2.67	-1.16	-.37	.89	.41	.21	1.8	.6	4.1	1.2	.4	.50	.05	.30	.06	.02
CONTRIBUTION CUMULEE								2.5	5.2	5.7	2.6	5.8					
57 . 2CON ABONDANCE DES CONCRETIONS AU NIVEAU 38 CM																	
2co1 - absence	2.07	.51	.44	.29	-.27	-.19	-.16	.6	.9	.9	.6	.5	.38	.16	.14	.07	.05
2co2 - presence	.20	14.65	.36	-1.44	-1.05	.19	.73	.0	2.2	1.4	.1	1.0	.01	.14	.08	.00	.04
2coz - presence du substrat	.85	2.67	-1.16	-.37	.89	.41	.21	1.8	.6	4.1	1.2	.4	.50	.05	.30	.06	.02
CONTRIBUTION CUMULEE								2.5	3.7	6.4	1.9	1.9					
61 . 3HUM HUMIDITE DE L'HORIZON PRESENT A 48 CM																	
3hu1 - sec	.13	23.00	.73	-.44	-.60	-.35	-1.37	.1	.1	.3	.1	2.4	.02	.01	.02	.01	.08
3hu2 - frais	1.42	1.20	.94	.09	-.07	.13	.29	2.0	.1	.0	.2	1.2	.73	.01	.00	.01	.07
3huz - presence du substrat	1.57	.99	-.91	-.05	.12	-.09	-.15	2.1	.0	.1	.3	.3	.83	.00	.01	.01	.02
CONTRIBUTION CUMULEE								4.2	.2	.5	.4	3.9					
62 . MAT3 COULEUR DE LA MATRICE AU NIVEAU 48 CM																	
3ma1 - 10yr33-10yr46	.10	31.73	.91	.38	.25	-.65	-.33	.1	.1	.0	.3	.1	.03	.00	.00	.01	.00
3ma2 - 10yr56-10yr58	.41	6.66	.92	1.39	.43	.45	-.26	.6	4.2	.5	.7	.3	.13	.29	.03	.03	.01
3ma3 - 10yr63-10yr64	.21	14.00	1.15	-1.10	.23	-1.25	.69	.4	1.4	.1	2.7	.9	.09	.09	.00	.11	.03
3ma4 - 10yr66-10yr68	.58	4.37	.82	-.02	-.56	.24	.45	.6	.0	1.1	.3	1.1	.15	.00	.07	.01	.05
3ma5 - 10yr72-10yr74	.21	14.00	.98	-1.01	-.42	.55	.32	.3	1.1	.2	.5	.2	.07	.07	.01	.02	.01
3maz - presence du substrat	1.62	.93	-.85	-.09	.10	-.07	-.21	1.9	.1	.1	.1	.7	.78	.01	.01	.02	.05
CONTRIBUTION CUMULEE								3.9	6.8	2.0	4.6	3.3					
63 . GRO3 ABONDANCE DES ELEMENTS GROSSIERS AU NIVEAU 48 CM																	
3gr1 - <10%	.37	7.37	1.21	-.26	.70	-.55	.81	.9	.1	1.1	1.0	2.3	.20	.01	.07	.04	.09
3gr2 - 10-20%	.63	3.93	.94	.35	.07	-.07	-.37	.9	.4	.0	.0	.8	.22	.03	.00	.00	.03
3gr3 - >20%	.55	4.71	.69	-.09	-.89	.71	.31	.4	.0	2.6	2.3	.5	.10	.00	.17	.11	.02
3grz - presence du substrat	1.57	.99	-.91	-.05	.12	-.09	-.15	2.1	.0	.1	.1	.3	.83	.00	.01	.01	.02
CONTRIBUTION CUMULEE								4.3	.6	3.9	3.4	4.0					
64 . COM3 COMPACITE DE L'HORIZON AU NIVEAU 48 CM																	
3co1 - meuble ou peu compac	.79	2.96	1.09	.21	-.52	-.42	-.09	1.5	.2	1.3	1.2	.1	.40	.01	.09	.06	.00
3co2 - compact ou tres comp	.76	3.14	.74	-.12	-.80	.63	.38	.7	.1	3.0	2.5	1.0	.17	.00	.20	.13	.05
3coz - presence du substrat	1.58	.98	-.90	-.05	.12	-.09	-.14	2.0	.0	.1	.1	.3	.82	.00	.02	.01	.02
CONTRIBUTION CUMULEE								4.2	.3	4.4	3.8	1.4					
65 . 3A0X ABONDANCE DES TACHES D OXYDATION AU NIVEAU 48 CM																	
3ao1 - pas de taches d'oxyd	.82	3.83	.81	1.05	.01	.24	.10	.9	4.8	.0	.4	.1	.23	.39	.00	.02	.00
3ao2 - peu nombreuses	.47	5.67	1.07	-.72	.12	-.72	.32	.9	1.3	.0	2.0	.5	.20	.09	.00	.09	.02
3ao3 - nombreuses	.27	10.61	.98	-1.64	-.91	1.02	.01	.4	3.9	1.4	2.4	.0	.09	.25	.08	.10	.00
3aoz - presence du substrat	1.57	.99	-.91	-.05	.12	-.09	-.15	2.1	.0	.1	.1	.3	.83	.00	.01	.01	.02
CONTRIBUTION CUMULEE								4.2	9.9	1.5	4.9	.9					
66 . 3ARE ABONDANCE DES TACHES DE REDUCTION AU NIVEAU 48 CM																	
3ar1 - pas de taches	.97	2.21	.84	.86	-.03	.34	.14	1.1	3.8	.0	1.0	.2	.32	.33	.00	.05	.01
3ar2 - peu nombreuses	.44	6.06	1.01	-1.15	-.17	-.97	.47	.7	3.1	.1	3.5	1.0	.17	.22	.00	.16	.04
3ar3 - nombreuses	.14	21.50	1.16	-1.82	-.60	1.67	-.77	.3	2.4	.3	3.3	.8	.06	.15	.02	.13	.03
3arz - presence du substrat	1.57	.99	-.91	-.05	.12	-.09	-.15	2.1	.0	.1	.1	.3	.83	.00	.01	.01	.02
CONTRIBUTION CUMULEE								4.2	9.4	.5	7.8	2.3					

MODALITES			COORDONNEES					CONTRIBUTIONS					COSINUS CARRES				
IDEN - LIBELLE	P.REL	DISTO	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
<b>67 . JATA EXISTENCE D'UN AUTRE TYPE DE TACHES AU NIVEAU 48 CM</b>																	
3at1 - absence	1.43	1.18	.92	.03	-.06	-.03	.07	2.0	.0	.0	.0	.1	.72	.00	.00	.00	.00
3at2 - presence	.12	24.71	.85	.28	-.75	1.52	1.12	.1	.1	.4	2.4	1.5	.03	.00	.02	.09	.05
3atz - presence du substrat	1.57	.99	-.91	-.05	.12	-.09	-.15	2.1	.0	.1	.1	.3	.83	.00	.01	.01	.02
CONTRIBUTION CUMULEE = 4.2 .1 .6 2.5 1.9																	
<b>68 . 3CON ABONDANCE DES CONCRETIONS AU NIVEAU 48 CM</b>																	
3co1 - absence	1.28	1.45	.90	.43	.01	-.04	.24	1.7	1.2	.0	.0	.7	.57	.13	.00	.00	.04
3co2 - presence	.28	10.25	.98	-1.69	-.71	.67	-.25	.4	4.2	.9	1.0	.2	.09	.28	.05	.04	.01
3coz - presence du substrat	1.57	.99	-.91	-.05	.12	-.09	-.15	2.1	.0	.1	.1	.3	.83	.00	.01	.01	.02
CONTRIBUTION CUMULEE = 4.2 5.5 1.0 1.2 1.2																	
<b>72 . MAT4 COULEUR DE LA MATRICE AU NIVEAU 58 CM</b>																	
4ma1 - 10yr56-10yr58	.23	12.33	1.19	1.61	1.11	.54	.06	.5	3.2	1.8	.6	.0	.12	.21	.10	.02	.00
4ma2 - 10yr63-10yr64	.23	12.85	1.27	-.81	.53	-1.08	.42	.6	.8	.4	2.2	.4	.13	.05	.02	.09	.01
4ma3 - 10yr66-10yr68	.53	4.90	1.12	-.12	-.03	.27	.26	1.1	.0	.0	.3	.4	.26	.00	.00	.01	.01
4ma4 - 10yr72-10yr74	.12	24.71	1.09	-1.20	-.58	.77	-.29	.2	.9	.2	.6	.1	.05	.06	.01	.02	.00
4ma5 - teinte 25y ou 5BG	.08	39.00	1.20	-1.07	.00	.53	-2.17	.2	.5	.0	.2	3.6	.04	.03	.00	.01	.12
4maz - presence du substrat	1.94	.61	-.72	.05	-.15	-.08	-.02	1.6	.0	.3	.1	.0	.84	.00	.04	.01	.00
CONTRIBUTION CUMULEE = 4.2 5.5 2.7 4.0 4.4																	
<b>73 . GRO4 ABONDANCE DES ELEMENTS GROSSIERS AU NIVEAU 58 CM</b>																	
4gr1 - <10%	.23	12.85	1.30	-.13	1.03	-.57	1.05	.6	.0	1.5	.6	2.4	.13	.00	.08	.03	.09
4gr2 - 10-20%	.47	5.67	1.19	.17	.53	-.35	-.33	1.1	.1	.8	.5	.5	.25	.01	.05	.02	.02
4gr3 - >20%	.49	5.32	1.08	-.31	-.37	.91	-.08	.9	.3	.4	3.5	.0	.22	.02	.03	.16	.00
4grs - presence du substrat	1.94	.61	-.72	.05	-.15	-.08	-.02	1.6	.0	.3	.1	.0	.84	.00	.04	.01	.00
CONTRIBUTION CUMULEE = 4.2 .4 2.9 4.7 2.9																	
<b>74 . COM4 COMPACTITE DE L'HORIZON AU NIVEAU 58 CM</b>																	
4co1 - meuble ou peu compac	.49	5.32	1.24	.22	.86	-.64	-.02	1.2	.1	2.2	1.7	.0	.29	.01	.14	.08	.00
4co2 - compact ou tres comp	.69	3.56	1.11	-.31	-.21	.71	.05	1.4	.3	.2	2.9	.0	.35	.03	.01	.14	.00
4coz - presence du substrat	1.94	.61	-.71	.95	-.15	-.09	-.01	1.6	.0	.3	.1	.0	.83	.00	.03	.01	.00
CONTRIBUTION CUMULEE = 4.1 .5 2.7 4.7 .0																	
<b>75 . 4AOX ABONDANCE DES TACHES D OXYDATION AU NIVEAU 58 CM</b>																	
4ao1 - pas de taches d'oxyd	.47	5.67	1.13	1.26	.67	.43	.33	1.0	4.0	1.3	.7	.5	.23	.28	.08	.03	.02
4ao2 - peu nombreuses	.40	6.83	1.21	-.53	.39	-.83	.08	.9	.6	.4	2.3	.0	.22	.04	.02	.10	.00
4ao3 - nombreuses	.32	8.73	1.16	-1.50	-.55	.90	-.45	.7	3.8	.6	2.2	.6	.15	.26	.03	.09	.02
4aoz - presence du substrat	1.94	.61	-.72	.05	-.15	-.08	-.02	1.6	.0	.3	.1	.0	.84	.00	.04	.01	.00
CONTRIBUTION CUMULEE = 4.2 8.4 2.5 5.4 1.2																	
<b>76 . 4ARE ABONDANCE DES TACHES DE REDUCTION AU NIVEAU 58 CM</b>																	
4ar1 - pas de taches	.56	4.54	1.13	1.04	.48	.62	.18	1.1	3.3	.8	1.8	.2	.28	.24	.05	.08	.01
4ar2 - peu nombreuses	.41	6.66	1.21	-.90	.31	-1.23	.26	1.0	1.8	.2	5.2	.3	.22	.12	.01	.23	.01
4ar3 - nombreuses	.22	13.40	1.19	-1.49	-.46	1.45	-.75	.5	2.6	.3	3.8	1.2	.11	.17	.02	.16	.04
4arz - presence du substrat	1.94	.61	-.72	.05	-.15	-.08	-.02	1.6	.0	.3	.1	.0	.84	.00	.04	.01	.00
CONTRIBUTION CUMULEE = 4.2 7.6 1.6 10.9 1.6																	
<b>77 . 4ATA EXISTENCE D'UN AUTRE TYPE DE TACHES AU NIVEAU 58 CM</b>																	
4at1 - absence	1.08	1.90	1.18	-.13	.31	-.04	-.04	2.4	.1	.6	.0	.0	.73	.01	.05	.00	.00
4at2 - presence	.11	26.69	1.08	.33	-.34	1.77	.79	.2	.1	1.1	3.0	.7	.04	.00	.00	.12	.02
4atz - presence du substrat	1.94	.61	-.72	.05	-.15	-.08	-.02	1.6	.0	.3	.1	.0	.84	.00	.04	.01	.00
CONTRIBUTION CUMULEE = 4.2 .2 1.0 3.1 .7																	
<b>78 . 4CON ABONDANCE DES CONCRETIONS AU NIVEAU 58 CM</b>																	
4co1 - absence	.95	2.30	1.15	.34	.38	.01	.21	2.0	.6	.8	.0	.4	.57	.05	.06	.00	.02
4co2 - presence	.24	11.86	1.24	-1.74	-.25	.63	-.64	.6	3.9	.1	.8	1.0	.13	.26	.01	.03	.03
4coz - presence du substrat	1.94	.61	-.72	.05	-.15	-.08	-.02	1.6	.0	.3	.1	.0	.84	.00	.04	.01	.00
CONTRIBUTION CUMULEE = 4.2 4.5 1.2 .9 1.4																	
<b>81 . MAT5 COULEUR DE LA MATRICE AU NIVEAU 72 CM</b>																	
5ma1 - teinte 10yr.5678	.13	23.00	1.39	.43	1.09	.72	.87	.4	.1	.9	.6	.9	.08	.01	.05	.02	.03
5ma2 - teinte reduite	.21	14.00	1.36	-1.05	.43	-.04	-1.90	.6	1.2	.2	.0	7.3	.13	.08	.01	.00	.26
5maz - presence du substrat	2.37	.32	-.44	.09	-.23	-.04	.13	.7	.1	.8	.0	.4	.59	.03	.17	.00	.05
CONTRIBUTION CUMULEE = 3.0 1.5 3.5 .6 8.6																	
<b>82 . GRO5 ABONDANCE DES ELEMENTS GROSSIERS AU NIVEAU 72 CM</b>																	
5gr1 - <10%	.11	26.69	1.40	.06	1.23	.38	1.13	.4	.0	1.0	.1	1.4	.07	.00	.06	.01	.05
5gr2 - 10-20%	.29	9.91	1.39	-.32	.98	-.87	-.36	.9	.2	1.7	1.8	.4	.19	.01	.10	.08	.01
5gr3 - >20%	.36	7.78	1.34	-.37	.38	.82	-.92	1.0	.3	.3	2.0	2.9	.23	.02	.02	.09	.11
5grs - presence du substrat	2.37	.32	-.44	.09	-.23	-.04	.13	.7	.1	.8	.0	.4	.59	.03	.17	.00	.05
CONTRIBUTION CUMULEE = 3.0 .5 3.8 4.0 5.0																	
<b>83 . COM5 COMPACTITE DE L'HORIZON AU NIVEAU 72 CM</b>																	
5co1 - meuble ou peu compac	.20	14.65	1.39	.25	1.32	-.76	.34	.6	.1	2.1	1.0	.2	.13	.00	.12	.04	.01
5co2 - compact ou tres comp	.56	4.63	1.36	-.49	.52	.43	-.66	1.6	.7	.9	.9	2.4	.40	.05	.06	.04	.10
5coz - presence du substrat	2.37	.32	-.44	.09	-.23	-.04	.13	.7	.1	.8	.0	.4	.59	.03	.17	.00	.05
CONTRIBUTION CUMULEE = 3.0 .9 3.9 1.8 2.9																	
<b>84 . 5AOX ABONDANCE DES TACHES D OXYDATION AU NIVEAU 72 CM</b>																	
5ao1 - pas de taches d'oxyd	.20	14.65	1.34	1.25	1.21	.73	.40	.6	1.7	1.8	.9	.3	.12	.11	.10	.04	.01
5ao2 - peu nombreuses	.24	11.86	1.38	-.36	.83	-.30	-.59	.7	.2	1.0	.2	.8	.16	.01	.06	.01	.03
5ao3 - nombreuses	.31	9.00	1.37	-1.22	.35	.05	-.76	.9	2.5	.2	.0	1.7	.21	.16	.01	.00	.06
5aoz - presence du substrat	2.37	.32	-.44	.09	-.23	-.04	.13	.7	.1	.8	.0	.4	.59	.03	.17	.00	.05
CONTRIBUTION CUMULEE = 3.0 4.4 3.9 1.1 3.3																	
<b>85 . 5ARE ABONDANCE DES TACHES DE REDUCTION AU NIVEAU 72 CM</b>																	
5ar1 - pas de taches	.27	10.61	1.34	1.22	1.06	1.12	-.04	.8	2.1	1.9	2.8	.0	.17	.14	.11	.12	.00
5ar2 - peu nombreuses	.24	11.86	1.39	-.94	.76	-1.12	-.30	.8	1.1	.9	2.6	.2	.16	.07	.05	.11	.01
5ar3 - nombreuses	.24	11.86	1.36	-1.31	.35	.24	-.89	.7	2.2	.2	.1	1.9	.16	.14	.01	.01	.07
5arz - presence du substrat	2.37	.32	-.44	.09	-.23	-.04	.13	.7	.1	.8	.0	.4	.59	.03	.17	.00	.05
CONTRIBUTION CUMULEE = 3.0 5.6 3.7 5.5 2.4																	
<b>86 . 5CON ABONDANCE DES CONCRETIONS AU NIVEAU 72 CM</b>																	
5co1 - absence	.55	4.71	1.36	.03	.81	.05	-.16	1.6	.0	2.2	.0	.1	.39	.00	.14	.00	.01
5co2 - presence	.21	14.00	1.39	-1.13	.53	.28	-1.04	.6	1.4	.4	.1	2.2	.14	.09	.02	.01	.08
5coz - presence du substrat	2.37	.32	-.44	.09	-.23	-.04	.13	.7	.1	.8	.0	.4	.59	.03	.17	.00	.05



CONTRIBUTION CUMULEE - 3.0 1.5 3.4 .2 2.7 +

COORDONNEES ET VALEURS-TEST DES MODALITES ILLUSTRATIVES SUR LES AXES 1 A 5

MODALITES				COORDONNEES					VALEURS-TEST				
IDEN - LIBELLE	EFF.	P.ABS	DISTO	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
<b>3 . PENT PENTE (%)</b>													
pen1 - pente <2%	203	203.00	.77	.00	-.06	-.06	-.06	-.12	.0	-1.2	-1.2	1.3	-2.5
pen2 - pente >2%	156	156.00	1.31	.01	.07	.08	-.08	.15	.1	1.2	1.3	-1.2	2.6
<b>5 . TOPO POSITION TOPOGRAPHIQUE</b>													
top1 - bas de pente	30	30.00	11.00	.55	-.02	.40	-.12	-.21	3.2	-.1	2.3	-.7	-1.2
top2 - tiers inferieur de p	18	18.00	19.00	.04	-.60	-.05	-.08	-.52	.2	-2.6	-.2	-.3	-2.3
top3 - mi pente	173	173.00	1.08	-.03	.11	-.02	-.05	.02	-.6	2.1	-.3	-.9	.4
top4 - tiers sup de pente	32	32.00	10.25	.23	.15	.11	.03	.13	1.4	.9	.7	.2	.8
top5 - haut de pente	107	107.00	2.36	-.18	-.12	-.11	.12	.07	-2.3	-1.5	-1.3	1.5	.9
<b>7 . UNITE CARTOGRAPHIQUE</b>													
n.b4 - Unite N.B4	120	120.00	1.32	-.11	.43	.08	-.11	-.03	-1.9	7.1	1.2	1.8	-.5
r3b4 - Unite R3B4	117	120.00	2.08	.11	-.47	-.06	-.05	.27	1.4	-6.2	-.8	-.6	3.5
o.b4 - unite O.B4	120	120.00	3.09	.06	-.13	-.05	-.13	-.30	.6	-1.4	-.6	-1.4	-3.2
<b>8 . HYDR CLASSE D'HYDROMORPHIE</b>													
hyd1 - non hydromorphe	216	216.00	.67	-.40	.33	.00	.08	-.05	-9.4	7.7	.0	2.0	-1.2
hyd2 - peu hydromorphe (cla	67	67.00	4.37	.56	-.52	-.03	-.07	.16	5.1	-4.7	-.3	-.6	1.5
hyd3 - moyennement hydromor	55	55.00	5.55	.66	-1.01	-.22	-.27	.14	5.3	-8.1	-1.7	-2.1	1.1
<b>9 . TYPE DEVELOPPEMENT DE PROFIL</b>													
typb - sol brun	260	260.00	.38	-.36	.15	-.06	.04	.05	-10.9	4.6	-1.9	1.1	1.4
typc - sol faiblement lessi	36	36.00	9.00	.95	-.99	-.26	-.32	.27	6.0	-6.2	-1.7	-2.0	1.7
typf - sol sur alterite	23	23.00	14.65	1.26	-1.28	.14	.20	-1.01	6.2	-6.3	.7	1.0	-5.0
<b>10 . PROF PROFONDEUR DU SOL</b>													
pro1 - > 80 cm	55	55.00	5.55	1.36	-.14	.78	.22	-.33	11.0	-1.1	6.3	1.8	-2.7
pro2 - entre 60 et 80 cm	51	51.00	6.06	1.12	-.12	.18	-.04	-.03	8.6	-.9	1.4	-.3	-.2
pro3 - entre 40 et 60 cm	111	111.00	2.24	.07	.32	-.94	-.18	.19	.9	4.0	-11.9	-2.3	2.4
pro4 - < 40 cm	142	142.00	1.54	-.98	-.16	.37	.07	-.01	-15.0	-2.4	5.7	1.1	-.2
<b>11 . PIER PIERROSITE DE SURFACE (%)</b>													
pie1 - <5 %	87	87.00	3.14	.46	.07	.10	-.07	.15	4.9	.7	1.0	-.8	1.6
pie2 - 5-10 %	82	82.00	3.39	.30	-.04	-.19	-.18	-.01	3.1	-.4	-2.0	-1.9	-.1
pie3 - 10-15 %	81	81.00	3.44	-.24	-.07	-.07	-.24	-.11	-2.4	-.7	-.7	2.5	-1.1
pie4 - 15-20 %	40	40.00	8.00	-.42	-.02	.10	-.22	-.19	-2.8	-.1	.7	-1.4	-1.3
pie5 - > 20 %	60	60.00	5.00	-.50	.12	.10	.16	.05	-4.3	1.0	.8	1.3	.4
<b>22 . NHRZ NOMBRE D'HORIZONS</b>													
hrz1 - 1 horizon	122	122.00	1.95	-1.00	-.10	.40	.07	-.23	-13.5	-1.4	5.4	.9	-3.1
hrz2 - 2 horizons	136	136.00	1.65	.02	.17	-.64	-.11	.26	.2	2.4	-9.5	-1.7	3.8
hrz3 - 3 horizons	82	82.00	3.39	1.12	-.06	.30	.04	.06	11.6	-.6	3.1	.4	.6
hrz4 - 4 horizons	20	20.00	17.00	1.36	-.25	.71	.22	-.58	6.3	-1.2	3.2	1.0	-2.7

## LISTE DES FIGURES

<b>Fig. I. 1</b> :	Localisation du secteur d'étude et carte géologique du Massif Armoricain	p. 4
<b>Fig. I. 2</b> :	Carte géologique du secteur d'étude (extrait de la carte géologique au 1/80.000 de Redon)	p. 5
<b>Fig. I. 3</b> :	Topographie de la moitié "est" su secteur d'étude	p. 7
<b>Fig. I. 4</b> :	Plan d'échantillonnage sur le secteur 1 (moitié est de la zone d'étude)	p. 8
<b>Fig. I. 5</b> :	Distance moyenne à parcourir pour trouver de 1 à 10 voisins à partir d'un sondage donné	p. 9
<b>Fig. I. 6</b> :	Tri par ordre décroissant des unités cartographiques en fonction de leur surface	p. 11
<b>Fig. I. 7</b> :	Histogrammes cumulés des distances entre limites pour des transects d'orientation NS et EW	p. 12
<b>Fig. I. 8</b> :	Projection des modalités de variables descriptives d'horizons dans le premier plan factoriel d'une Analyse Factorielle des Correspondances (tiré de Girard, 1983)	p. 14
<b>Fig. II. 1</b> :	Un exemple de variogramme: Variogramme moyen de la profondeur d'apparition de l'altérite sur une parcelle de 0.5 hectare	p.19
<b>Fig. II. 2</b> :	Schématisation de la transformation d'une variable en une fonction indicatrice	p. 21
<b>Fig. II. 3</b> :	Localisation des secteurs 1 et 2	p. 22
<b>Fig. II. 4</b> :	Les analyses géostatistiques faites sur les secteurs 1 et 2	p. 23
<b>Fig. II. 5</b> :	Histogrammes de la profondeur du sol sur les secteurs 1 et 2	p. 25
<b>Fig. II. 6</b> :	Report des valeurs de la profondeur du sol dans l'espace géographique	p. 24
<b>Fig. II. 7</b> :	Variogrammes moyens de la profondeur du sol sur les secteurs 1 et 2	p. 28
<b>Fig. II. 8</b> :	Variogramme directionnel de la profondeur du sol sur le secteur 1	p. 29
<b>Fig. II. 9</b> :	Variogramme directionnel de la profondeur du sol sur le secteur 2	p. 30
<b>Fig. II.10</b> :	Schématisation d'un modèle linéaire anisotrope	p. 33
<b>Fig. II.11</b> :	Ajustement de modèles anisotropes au variogramme directionnel du secteur 2	p. 33
<b>Fig. II.12</b> :	Blocs-diagrammes des estimations par krigeage de la profondeur du sol du secteur 2	p. 36
<b>Fig. II.13</b> :	Comparaison des estimations obtenues sur le secteur 2 avec deux modèles de krigeage	p. 36
<b>Fig. II.14</b> :	Cartes en courbes d'isovaleurs de la profondeur du sol sur le secteur 2	p. 37
<b>Fig. II.15</b> :	Histogrammes de la classe d'hydromorphie sur les secteurs 1 et 2	p. 39
<b>Fig. II.16</b> :	Report des classes d'hydromorphie dans l'espace géographique	p. 39
<b>Fig. II.17</b> :	Variogrammes moyens de 5 fonctions indicatrices de la classe d'hydromorphie sur le secteur 1	p. 41
<b>Fig. II.18</b> :	Variogrammes moyens de 5 fonctions indicatrices de la classe d'hydromorphie sur le secteur 2	p. 41
<b>Fig. II.19</b> :	Blocs-diagrammes sur le secteur 2 des estimations par krigeage de 4 fonctions indicatrices de la classe d'hydromorphie.	p. 43
<b>Fig. II.20</b> :	Estimations par krigeage indicatif de la classe d'hydromorphie sur le secteur 2 A: Report de l'estimation de la classe d'hydromorphie aux noeuds d'une grille de pas 200 mètres B: Report de la probabilité que la classe d'hydromorphie soit égale à l'estimation faite.	p. 44
<b>Fig.III. 1</b> :	Cartes de la profondeur du sol sur le secteur 2 A: Carte dérivée de la carte pédologique au 1/25.000 B. Carte obtenue par krigeage linéaire avec un modèle exponentiel isotrope	p. 48
<b>Fig.III. 2</b> :	Cartes de la classe d'hydromorphie sur le secteur 2 A: Carte dérivée de la carte pédologique au 1/25.000 B. Carte obtenue par krigeage indicatif	p. 49
<b>Fig.III. 3</b> :	Histogrammes des différences d'estimation entre la carte pédologique et le krigeage aux noeuds d'une grille régulière de pas 200 mètres	p. 49
<b>Fig.III. 4</b> :	Histogrammes des écarts entre les valeurs estimées par la carte pédologique ou le krigeage et les valeurs mesurées sur le terrain, pour les 60 points d'un échantillonnage indépendant	p. 50
<b>Fig.III. 5</b> :	Estimation de la profondeur du sol par krigeage et par la carte pédologique: Illustration des différences d'approche pour un point du secteur 2	p. 53
<b>Fig.IV. 1</b> :	Principales méthodes d'échantillonnage pour déterminer la composition d'une plage cartographique (tiré de Wilding et Drees, 1983).	p. 62
<b>Fig. V. 1</b> :	Analyse de l'aire des plages cartographiques constitutives des trois unités cartographiques étudiées A: Histogramme de l'aire des plages cartographiques regroupées en sept classes d'aire B: Pourcentage de l'aire totale d'une unité cartographique occupé par les plages cartographiques d'une classe d'aire donnée	p. 69
<b>Fig. V. 2</b> :	Schématisation de la stratégie d'échantillonnage d'une unité cartographique	p. 71
<b>Fig. V. 3</b> :	Localisation des 30 points d'échantillonnage au sein de chacune des unités cartographiques, obtenus à l'issue de la première phase de l'échantillonnage	p. 72
<b>Fig. V. 4</b> :	Deux exemples schématiques de variabilité spatiale d'une propriété au sein d'une unité cartographique	p. 76
<b>Fig. V. 5</b> :	Variogrammes de la profondeur du sol pour les trois unités cartographiques étudiées	p. 77
<b>Fig.VI. 1</b> :	Histogrammes des codes de légende relevés dans l'échantillonnage de vérification pour chacune des trois unités cartographiques	p. 82

<b>Fig.VI. 2 :</b>	Les successions d'horizons observées sur l'unité cartographique O.B4	p. 84
<b>Fig.VI. 3 :</b>	Distribution du taux d'argile sur l'unité cartographique O.B4	p. 86
<b>Fig.VI. 4 :</b>	Valeurs extrêmes, quartiles supérieurs et inférieurs, et médiane pour l'ensemble des propriétés analytiques de l'horizon de surface des trois unités cartographiques	p. 87
<b>Fig.VI. 5 :</b>	Projection des individus dans le premier plan factoriel de l'ACP sur les propriétés analytiques de l'horizon de surface	p. 92
<b>Fig.VI. 6 :</b>	Situation dans le triangle du GEPPA de la composition granulométrique de 6900 analyses de terres réalisées en Ile-et-Vilaine (A) et des 360 échantillons des trois unités cartographiques étudiées (B)	p. 95
<b>Fig.VI. 7 :</b>	Paramètres statistiques estimés du besoin en chaux en fonction de l'accroissement souhaité du taux de saturation	p. 101
<b>Fig.VII. 1 :</b>	Histogramme des profondeurs d'apparition des 721 horizons décrétés pour les 360 sondages implantés au sein des trois unités cartographiques N.B4, R3B4 et O.B4	p.110
<b>Fig.VII. 2 :</b>	Variogrammes moyens des quatre premiers axes factoriels de l'AFCM pour les 3 unités cartographiques	p.113
<b>Fig.VII. 3 :</b>	Variogrammes moyens du taux d'argile, du carbone organique et de la CEC de l'horizon de surface	p.117
<b>Fig.VII. 4 :</b>	Variogrammes moyens des limons fins, des limons grossiers et des limons totaux de l'horizon de surface	p.119
<b>Fig.VII. 5 :</b>	Variogrammes moyens des sables fins, des sables grossiers et des sables totaux de l'horizon de surface	p.120
<b>Fig.VII. 6 :</b>	Stratégie pour obtenir des estimations précises de la valeur d'une propriété en un point appartenant à une unité cartographique	p.123
<b>Fig.VIII.1 :</b>	Localisation du nouveau secteur d'étude (secteur de Guignen) et du secteur d'étude précédent	p.127
<b>Fig.VIII.2 :</b>	Etendue, quartiles supérieurs et inférieur, et médiane pour différentes propriétés analytiques de l'horizon de surface de l'unité O.B4 sur les secteurs de Guignen et de Saulnières	p.129
<b>Fig.VIII.3 :</b>	Variogrammes moyens du taux d'argile et du carbone organique de l'horizon de surface pour l'unité cartographique O.B4 dans les secteurs de Guignen et de Saulnières	p.133
<b>Fig.VIII.4 :</b>	Variogrammes moyens de la CEC et des limons fins de l'horizon de surface pour l'unité cartographique O.B4 dans les secteurs de Guignen et de Saulnières	p.134
<b>Fig.VIII.5 :</b>	Variogrammes moyens des sables grossiers et totaux de l'horizon de surface pour l'unité cartographique O.B4 dans les secteurs de Guignen et de Saulnières	p.135

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tab. I. 1 :</b>	Caractéristiques modales des formations protérozoïques et paléozoïques présentes sur le secteur	p. 6
<b>Tab. I. 2 :</b>	Définition synthétique des vingt unités cartographiques les mieux représentées sur le secteur d'étude	p. 11
<b>Tab. II. 1 :</b>	Codage et définition des classes de profondeur du sol et d'hydromorphie	p. 23
<b>Tab. II. 2 :</b>	Nombre de couples et distance moyenne entre ces couples pour différentes distances des variogrammes de la profondeur du sol des secteurs 1 et 2	p. 27
<b>Tab. II. 3 :</b>	Ajustement de modèles au variogramme de la profondeur du sol du secteur 1	p. 34
<b>Tab. II. 4 :</b>	Ajustement de modèles au variogramme de la profondeur du sol du secteur 2	p. 34
<b>Tab.III. 1 :</b>	Comparaison, pour deux unités cartographiques, de la précision des deux méthodes d'estimation employées	p. 51
<b>Tab.IV. 1 :</b>	Quelques exemples de mesure de pureté au sein d'unités cartographiques.	p. 65
<b>Tab.VI. 1 :</b>	Puretés partielles, moyennes et strictes estimées pour les trois unités cartographiques	p. 80
<b>Tab.VI. 2 :</b>	Incertitudes sur les mesures de puretés partielles	p. 81
<b>Tab.VI. 3 :</b>	Définition des horizons distingués sur l'unité cartographique O.B4	p. 84
<b>Tab.VI. 4 :</b>	Paramètres statistiques estimés des propriétés analytiques de l'horizon de surface	p. 88
<b>Tab.VI. 5 :</b>	Coefficients de corrélation entre les propriétés analytiques de l'horizon de surface en tenant compte des échantillons des trois unités cartographiques	p. 91
<b>Tab.VI. 6 :</b>	Moyenne et écart-type de différentes propriétés analytiques de l'horizon de surface estimés pour l'ensemble des échantillons d'une unité cartographique en ou regroupant les sondages de même code de légende.	p. 97
<b>Tab.VI. 7 :</b>	Fréquence des différentes classes d'indice de battance pour les échantillons de trois unités cart.	p. 99
<b>Tab.VII.1 :</b>	Dénombrement de la présence d'horizons dans les sondages et les plages carto. de l'unité O.B4	p.104
<b>Tab.VII.2 :</b>	Fréquence de la présence d'un horizon dans un sondage distant de 100, 25 ou 5 mètres d'un sondage où il a été observé	p.106
<b>Tab.VII.3 :</b>	Fréquence de l'absence d'un horizon dans un sondage distant de 100, 25 ou 5 mètres d'un sondage où il a été observé	p.107
<b>Tab.VII.4 :</b>	Paramètres statistiques estimés de différentes propriétés analytiques de l'horizon de surface sur l'unité O.B4 sur les secteurs de Guignen et de Saulnières	p.130

# TABLE DES MATIERES

<b>Sommaire</b>	
Introduction générale	p. 1 p. 2
<b>Chapitre I: LE MILIEU ETUDIE ET SON EXPRESSION CARTOGRAPHIQUE</b>	
<b>1. Caractérisation générale du milieu</b>	
1.1 Le contexte socio-économique	
1.2 Le substrat géologique	p. 4
1.3 Topographie	p. 5
<b>2. La carte pédologique au 1/25.000</b>	p. 7
2.1 L'échantillonnage	
2.2 Regroupement des unités cartographiques: La légende "4 critères"	p. 8
2.3 Les unités cartographiques présentes sur le secteur	p. 9
2.3.1 Présentation sommaire et importance respective des unités cartographiques	
2.3.2 Les limites des plages cartographiques: L'analyse du contenant	p. 10
<b>3. L'estimation de propriétés du sol à partir de la carte pédologique</b>	p. 12
Conclusion	p. 13
<hr/>	
<b>Première partie :</b>	
<b>CARTOGRAPHIE PAR KRIGEAGE DE PROPRIETES DU SOL ET COMPARAISON AVEC DES CARTES THEMATIQUES DERIVEES DE LA CARTE PEDOLOGIQUE</b>	
<hr/>	
Introduction	p. 16
<b>Chapitre II: OBTENTION DE CARTES MONOFACTOIRELLES PAR KRIGEAGE</b>	
<b>1. Méthodes statistiques et objet d'étude</b>	
1.1 Les techniques géostatistiques: analyse du variogramme et krigeage	
1.1.1 Le variogramme	
1.1.2 Le krigeage linéaire et le krigeage indicatif	p. 18
1.2 Les secteurs d'étude: localisation des secteurs 1 et 2	p. 19
1.3 Les variables retenues	p. 22
<b>2. Emploi du krigeage linéaire pour la profondeur du sol</b>	p. 23
2.1 Les logiciels employés	
2.2 Caractérisation générale de la variable	p. 24
2.3 Description de la structure spatiale par le variogramme	p. 24
2.3.1 Analyse des variogrammes moyens	
2.3.2 Analyse des variogrammes directionnels	p. 27
2.4 L'ajustement d'un modèle au variogramme pour le krigeage linéaire	p. 29
2.4.1 Les fonctions d'ajustement possibles	
2.4.2 Comment choisir le meilleur ajustement ?	p. 31
2.4.3 Résultats	p. 32
2.5 Les estimations par krigeage	p. 33
2.5.1 Incidences du choix du modèle d'ajustement sur les estimations	
2.5.2 Signification des cartes obtenues et intérêt d'un partitionnement préalable au krigeage	p. 35
<b>3. Emploi du krigeage indicatif pour la classe d'hydromorphie</b>	p. 37
3.1 Caractérisation générale de la variable	
3.2 Analyse des variogrammes moyens des fonctions indicatrices	p. 38
3.3 Estimation par krigeage des fonctions indicatrices sur le secteur 2	p. 40
3.4 Estimation de la classe d'hydromorphie sur le secteur 2	p. 42
Conclusion	p. 45 p. 46
<hr/>	
<b>Chapitre III:</b>	
<b>COMPARAISON DES CARTES KRIGEEES ET DES CARTES DERIVEES DE LA CARTE PEDOLOGIQUE</b>	
<b>1. Procédures de comparaison des documents</b>	
<b>2. Les résultats de la comparaison</b>	p. 47
2.1 Comparaison visuelle des documents cartographiques obtenus	
2.2 Comparaison des estimations aux noeuds d'une grille	p. 48
2.3. Comparaison par rapport à un échantillonnage indépendant	p. 49 p. 50

<b>3. Discussion</b>	
3.1 Estimation spatiale par krigeage et à partir de la carte pédologique: illustration des différences d'approche	p. 52
3.2 Conditions d'obtention de cartes plus précises par voie géostatistique	p. 54
3.3 Intérêts des techniques géostatistiques à moyenne échelle	p. 55
<b>Conclusion</b>	p. 56

---

**Seconde partie:**  
**VARIABILITE DE PROPRIETES DU SOL ET STRUCTURE SPATIALE DE CETTE VARIABILITE**  
**AU SEIN D'UNITES CARTOGRAPHIQUES**

---

**Chapitre IV : UNE REVUE BIBLIOGRAPHIQUE**

<b>1. Approche classique et critiques formulées à son égard</b>	
1.1 L'approche classique	p. 58
1.2 Critiques formulées à l'égard de cette approche	p. 58
<b>2. Description quantitative de la variabilité spatiale au sein d'unités cartographiques</b>	
2.1 Les objectifs poursuivis	p. 61
2.2 Techniques d'échantillonnage des unités cartographiques	
2.2.1 L'échantillonnage d'une plage cartographique	p. 62
2.2.2 Choix des plages cartographiques échantillonnées	p. 63
2.3 Résultats obtenus	
2.3.1 La mesure de la pureté au sein des unités cartographiques	p. 64
2.3.2 La variabilité spatiale globale des propriétés du sol	p. 65
2.3.3 Structure spatiale au sein des unités cartographiques	p. 66

**Chapitre V: MATERIEL ET METHODES D'ETUDE.**

<b>1. Les unités cartographiques étudiées</b>	
1.1 Rattachement à des systèmes taxonomiques	p. 68
1.2 Superficie des plages cartographiques constitutives de ces unités cartographiques	p. 69
<b>2. Stratégie d'échantillonnage</b>	
2.1 Description de la méthode d'échantillonnage	
2.1.1 Le choix de 30 points localisés au sein des plages cartographiques d'une unité	p. 70
2.1.2 Le choix de 3 points supplémentaires par pas successifs de 100, 25 et 5 mètres	p. 71
2.2 Pourquoi cette méthode ?	p. 73
<b>3. Les propriétés du sol étudiées</b>	
<b>4. Expression des résultats</b>	
4.1 Analyse de la variabilité des critères cartographiques par des mesures de pureté	
4.1.1 Indice de pureté partielle	p. 74
4.1.2 Pureté moyenne et pureté stricte d'une unité cartographique	p. 75
4.2 Expression de la structure spatiale de propriétés du sol au sein des unités cartographiques	p. 76

**Chapitre VI:**

**DESCRIPTION GLOBALE DE LA VARIABILITE AU SEIN DES UNITES CARTOGRAPHIQUES**

<b>1. Indices de pureté au sein des trois unités cartographiques</b>	
1.1 Les résultats	p. 79
1.2 Incertitudes sur les indices de pureté	p. 80
1.3 Nature des "impuretés" au sein des unités cartographiques	p. 81
1.4 Discussion	
1.4.1 Que penser de ces niveaux de pureté ?	p. 83
1.4.2 Variabilité des propriétés morphologiques des horizons au sein d'une unité cartographique	p. 83
<b>2. Variabilité des propriétés analytiques de l'horizon de surface</b>	
2.1 La variabilité au sein de chacune des unités	p. 86
2.2 Comparaison des trois unités cartographiques	
2.2.1 Approche monoparamétrique	p. 90
2.2.2 Approche multiparamétrique	p. 90
2.2.2.1 Principe de l'Analyse en Composantes Principales	
2.2.2.2 Les résultats de l'ACP	
2.2.2.3 Discussion	
2.3 Comparaison avec la variabilité spatiale observée à l'échelle départementale	p. 94
<b>3. Relations entre la pureté des unités cartographique et la variabilité des propriétés analytiques</b>	p. 96
<b>4. Discussion</b>	
4.1 Bilan des principaux résultats acquis	p. 98
4.2 Conséquences de la variabilité intra-unité cartographique en matière d'utilisation du document cartographique	

4.2.1 Premier exemple: l'estimation des risques de battance	p. 98
4.2.2 Deuxième exemple: le calcul des besoins en chaux	p. 99
<b>Conclusion</b>	p.102

**Chapitre VII:**

**STRUCTURE SPATIALE DE LA VARIABILITE AU SEIN DES UNITES CARTOGRAPHIQUES**

<b>1. Structure spatiale des propriétés morphologiques du sol</b>	
1.1 Le choix de deux approches	
1.2 Première approche: la présence-absence de certains horizons	p.103
1.2.1 Les horizons retenus	
1.2.2 Analyse de la présence-absence de ces horizons dans les différentes plages cartographiques	p.104
1.2.3 Analyse de la présence-absence de ces horizons pour des couples de sondages distants de 100, 25 et 5 mètres	p.104
1.2.4 Discussion	p.105
1.3 Deuxième approche: la comparaison des sondages à différents niveaux de profondeur	p.107
1.3.1 Le principe de la méthode	
1.3.2 Sa mise en oeuvre pratique	p.109
1.3.3 L'interprétation des axes principaux de l'Analyse Factorielle des Correspondances Multiples (AFCM)	p.109
1.3.4 Le calcul des variogrammes moyens des quatre premiers axes de l'AFCM	p.111
1.3.5 Discussion	p.112
1.4 Conclusion	p.114
<b>2. Structure spatiale des propriétés analytiques de l'horizon de surface</b>	p.115
2.1 Les variogrammes moyens du taux d'argile, du carbone organique et de la CEC	
2.2 Les variogrammes moyens des fractions limoneuses	p.116
2.3 Les variogrammes moyens des fractions sableuses	p.118
2.4 Discussion	p.121
2.4.1 Bilan de l'analyse des variogrammes	p.121
2.4.2 Comment obtenir des estimations plus précises ?	p.122
Conclusion sur la variabilité des propriétés analytiques de l'horizon de surface	p.124
<b>Conclusion du chapitre VII</b>	p.125

**Chapitre VIII**

**UN TEST DES POSSIBILITES DE GENERALISATION REGIONALE DE LA VARIABILITE INTRA- UNITE CARTOGRAPHIQUE**

<b>1. Présentation du nouveau secteur d'étude de Guignen</b>	
1.1 Localisation	p.126
1.2 Géologie et topographie	p.127
1.3 Cartographie pédologique	p.127
1.4 Méthodologie d'échantillonnage	p.127
<b>2. Description globale de la variabilité des propriétés analytiques de l'horizon de surface</b>	
2.1 Les résultats	p.128
2.2 Discussion	p.131
<b>3. Structure spatiale des propriétés analytiques de l'horizon de surface</b>	p.132
<b>Conclusion</b>	p.136

**CONCLUSION GENERALE**

<b>1. Résultats cartographiques</b>	
1.1 La variabilité spatiale des propriétés du sol dans le sud du Massif Armoricaïn	p.137
1.2 La variabilité des propriétés du sol au sein des unités cartographiques	p.138
<b>2. Résultats méthodologiques</b>	
1.1 L'emploi des techniques géostatistiques à moyenne échelle	p.139
1.2 Méthodes d'étude de la variabilité intra-unité cartographique	p.139

**BIBLIOGRAPHIE**

<b>ANNEXES</b>	p.141
	p.151

**LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX**

<b>TABLE DES MATIERES DETAILLEE</b>	p.168
	p.170