

Apport de l'analyse variographique pour déterminer la taille et l'espacement des unités d'échantillonnage lors d'un inventaire d'occupation du sol en milieu naturel

The use of variographic analysis to determine the size and spacing of sampling units for a land cover inventory in a natural environment

Vincent GODARD

Université de Paris 8 & Centre de Biogéographie-Écologie (URA 1514 CNRS)

ENS Fontenay-St-Cloud, Le Parc, 92211 Saint-Cloud Cédex (France)

Résumé / Abstracts

Le but de cet article est de présenter quelques aspects de l'utilisation des variogrammes dans la préparation des inventaires d'occupation du sol par télédétection et enquête de terrain. Cette communication propose d'en analyser les apports et limites, à partir d'un exemple d'application en milieu naturel tropical, pour déterminer la taille et l'espacement des unités d'enquête lors d'un inventaire. L'exemple présenté s'appuie sur une étude réalisée dans le Sahel sud-mauritanien. Postérieure à l'enquête de terrain, la recherche présentée ici n'a pas contribué à l'élaboration du plan de sondage régissant l'inventaire d'occupation du sol. Elle a cependant servi à évaluer les choix initialement retenus et peut maintenant accroître l'opérationnalité de futurs sondages aréolaires dans différents milieux.

The purpose of this article is to present various aspects of the use of variograms in the preparation of land cover inventories by remote sensing and study on the ground. The scope and limits of this technique in geographical statistics are examined by reference to an application in a tropical environment, to determine the size and spacing of study units for an inventory. The exemple is taken from the Sahel in southern Mauretania. Taking place after the study on the ground, this research did not contribute to the sampling plan for this inventory. However it could contribute to future improvements in such surveys in various environments.

Mots clefs / Key-words

Enquête de terrain ; Géostatistique ; Mauritanie ; Sahel ; Sondage aréolaire ; Télédétection pour l'occupation du sol ; Variogramme

Area frame sampling ; Geostatistic ; Mauretania ; Remote sensing for land cover ; Sahel ; Variogram

Introduction

Cet article a pour contexte le suivi des ressources pastorales par télédétection et enquête de terrain de plusieurs zones tests du Sahel sud-mauritanien (De Wispelaere *et al.* 1989). Pour réaliser ce suivi, un inventaire d'occupation du sol a été mis en place sur plusieurs zones pilotes entre 1987 et 1989. La particularité de cet inventaire est de reposer sur un échantillonnage probabiliste (Godard 1991) où les unités d'enquête, appelées segments, sont des surfaces et non des points. Ce sondage est qualifié d'aréolaire ou surfacique. Tous les segments d'enquête ont la même surface, mais la taille des unités d'observation, ou parcelles, est variable en fonction des unités de paysages inventoriées.

GODARD (V.) - 1994 - Apport de l'analyse variographique pour déterminer la taille et l'espacement des unités d'échantillonnage lors d'un inventaire d'occupation du sol en milieu naturel tropical. *Bul. SFPT*, 1994-4 (136) : 33-44.

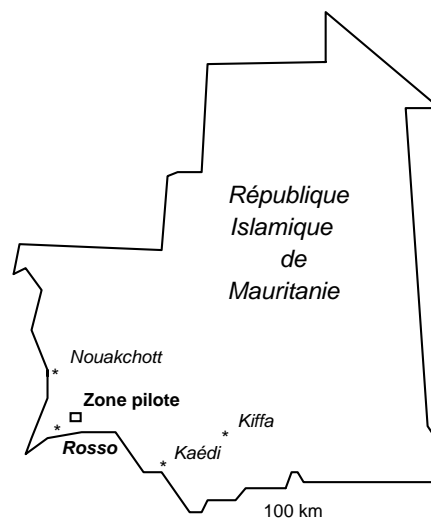
Le mode de tirage retenu est du type systématique non aligné. Il est systématique pour assurer une bonne couverture de l'ensemble de la zone d'étude et non aligné pour ne pas être biaisé par la présence de phénomènes répétitifs dans le paysage. Ce type de sondage requiert du chercheur qu'il détermine le nombre mais aussi la taille des unités d'enquête. Il n'y a pas de règle absolue, le choix est en général emprunt d'un certain pragmatisme. Nous nous sommes donc demandés si grâce à l'imagerie satellitaire et aux techniques de la géostatistique, il ne serait pas possible d'affiner la détermination de la taille et de l'espacement des segments.

En dehors de la recherche minière, son premier domaine d'application, l'analyse variographique a déjà intéressé de nombreux spécialistes des Sciences de la Terre pour la détermination des plans d'échantillonnage (Curran 1988, Rossi *et al.* 1992, Webster *et al.* 1989, Woodcock *et al.* 1988, ...). L'analyse variographique n'avait cependant pas encore été utilisée pour déterminer la taille et l'espacement des unités d'enquête. Avant de décrire les avantages et les inconvénients de cette technique, nous allons caractériser la zone d'étude et le contexte de l'inventaire, puis un rapide descriptif théorique de l'analyse variographique sera proposé et enfin, les résultats obtenus seront présentés et discutés.

1 - Un milieu particulier

Avec un peu plus d'un million de kilomètres carrés, la République Islamique de Mauritanie (RIM) est un des pays les plus vastes du continent africain, mais aussi l'un des plus désertiques. Les deux tiers de son territoire sont occupés par le désert du Sahara. Seule, sa frange sud échappe à ce domaine hyper-aride et permet à l'homme des activités telles que l'élevage et, plus aléatoirement, les cultures.

figure 1 - Localisation de la zone d'enquête de Rosso



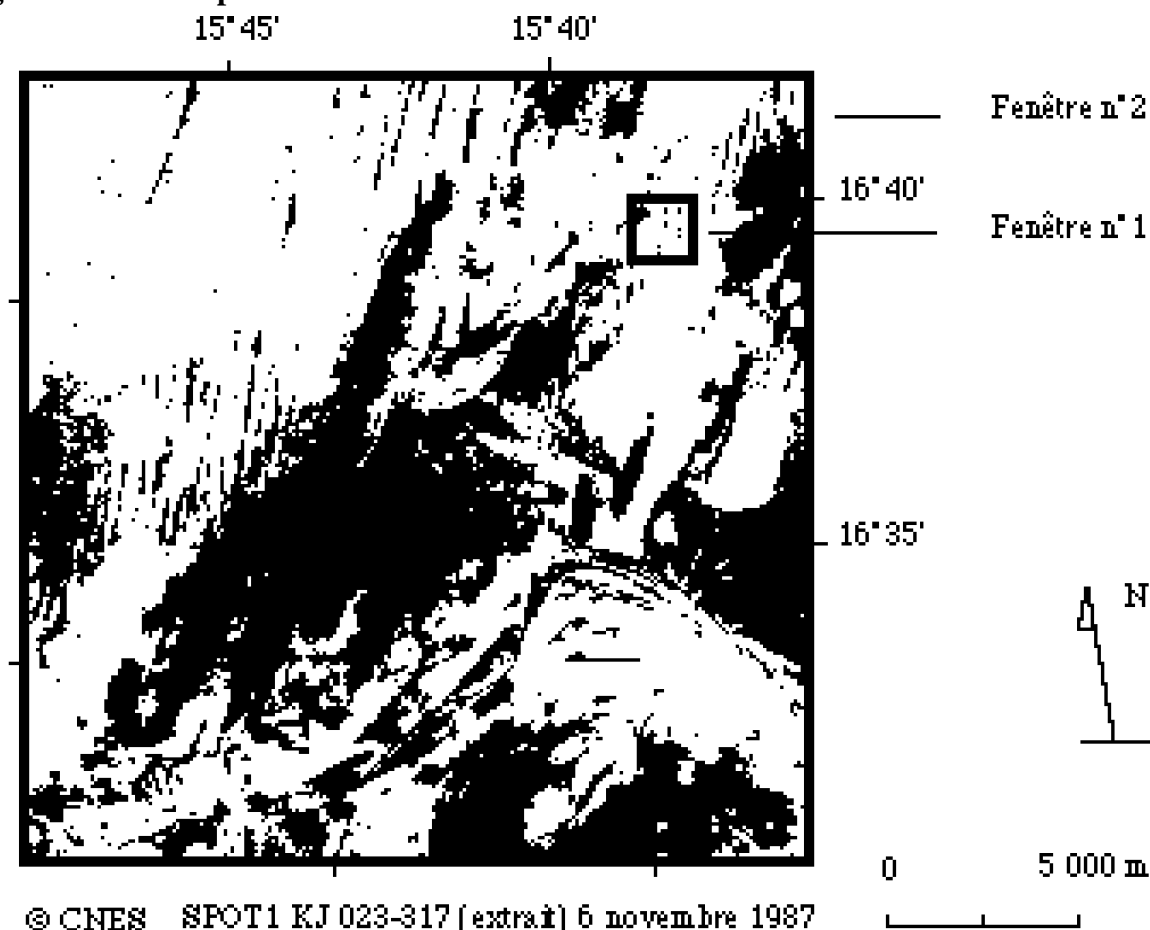
La recherche méthodologique présentée ici s'est déroulée à l'intérieur de cette bande de territoire sur une zone test située près de la ville de Rosso dans le Trarza (zone pilote de Rosso, cf. fig. 1).

Situé dans le domaine sahélien, notre champ d'expérimentation peut être caractérisé comme suit (Leroux 1983). Schématiquement, les précipitations sont comprises entre 100 et 5 à 600 mm par an, l'été est chaud et affecté d'une évaporation forte tandis que la période hivernale est fraîche ; les maxima de température interviennent aux périodes intermédiaires. Le domaine aérologique est également partagé durant l'année entre l'Harmattan en hiver et la mousson en été. La saison des pluies concentre d'ailleurs sur les mois de juillet, août et septembre 90 p.100 des précipitations (Godard 1991). Cependant, comme pour de nombreuses autres régions sahéliennes, depuis trente ans la péjoration climatique est nettement perceptible sur les relevés pluviométriques (Toupet 1990).

Dans la mesure où l'objectif de l'inventaire qui a servi de support à cette recherche était le suivi de la végétation spontanée, les dates des prises de vue et d'enquête sont fonction des dernières pluies utiles. Un modèle probabiliste de précipitation nous a permis d'estimer que les dates optimales de prises de vue et d'enquête se situaient un peu avant la mi-octobre (Godard 1991). Notons toutefois qu'en fonction des contraintes de prises de vue, nous n'avons pu obtenir qu'une image de début novembre (6 novembre 1987).

Située sur le bassin cénozoïque sénégal-mauritanien, la zone pilote de Rosso est représentative des paysages que l'on peut rencontrer dans toute cette partie nord du fleuve Sénégal. Ces paysages sont pour la plupart constitués d'affleurements quaternaires. Le *diéri*, terme toucouleur qui englobe les zones qui ne sont jamais inondées par les crues du fleuve Sénégal, est caractérisé par une couverture de dunes rouges de l'Ogolien. De même, le *wallo*, lit majeur du fleuve, est constitué d'éléments étagés entre les terrasses du Nouakchottien et les dépôts actuels ou sub-actuels (Michel 1973). La zone de Rosso est donc marquée par une succession de dunes et d'interdunes orientées pratiquement N-S et, le long du fleuve, de secteurs majoritairement argileux et dépressionnaires. Les deux fenêtres sur lesquelles nous avons pratiqué des essais d'analyse variographique sont d'une part situées dans le *diéri*, pour mettre en évidence des phénomènes de répétitivité et d'alignement et d'autre part sur l'ensemble *wallo-diéri*, pour mettre en évidence les problèmes d'interaction entre milieux différents (cf. fig. 2).

figure 2 - La zone pilote de Rosso



La végétation de ces secteurs nord-sahéliens est une steppe "armée" aux peuplements arbustifs lâches et aux formations herbacées discontinues (Rougery 1988). Parfois, des fourrés épineux plus denses et de larges plages herbeuses se rencontrent dans les zones déprimées aux conditions hydriques favorables, comme les interdunes. Les "arbres" et arbustes ont en général une taille comprise entre trois et six mètres avec une nette domination des légumineuses épineuses comme les acacias. La strate herbacée est dominée par des graminées pérennes des genres *Aristida* et *Cenchrus*. L'inégale répartition

GODARD (V.) - 1994 - Apport de l'analyse variographique pour déterminer la taille et l'espacement des unités d'échantillonnage lors d'un inventaire d'occupation du sol en milieu naturel tropical. *Bul. SFPT*, 1994-4 (136) : 33-44.

de la végétation est bien sûr un marqueur important de l'imagerie satellitaire, elle aura de ce fait une place de tout premier plan dans l'analyse des résultats des variogrammes.

En raison de la faiblesse des précipitations, les cultures pluviales sont absentes de la zone pilote de Rosso. Seules, les cultures de décrues et les cultures irriguées ont pu être échantillonnées et donc étudiées lors de l'inventaire. Toutefois, en raison des dates de prises de vue, seules les cultures irriguées étaient perceptibles sur l'image utilisée, car les zones de cultures de décrue étaient encore ennoyées à la même époque (octobre-novembre 1987). Elles n'ont pu être identifiées que lors de la mission de contrôle de saison sèche (mars-avril 1988). La faible extension des cultures de décrues ne nous a pas permis de leur consacrer une analyse de structure particulière, et ce malgré l'intérêt des phénomènes répétitifs liés au parcellaire.

Le milieu d'expérimentation choisi comporte donc des caractéristiques de régularité tant du point de vue géomorphologique que du point de vue végétal.

2- Le variogramme : contexte d'utilisation

Cette recherche s'appuie sur un inventaire d'occupation du sol où l'enquête de terrain fournit une estimation des superficies d'après un échantillonnage probabiliste. La télédétection sert à redresser les estimations de superficie en établissant des corrélations entre les unités d'échantillonnage, appelées segments, enquêtées sur le terrain et les résultats cartographiques (Meyer-Roux *et al.* 1981). La méthode d'investigation utilisée repose sur une répartition systématique non alignée des segments (Godard 1992). La qualité des résultats d'inventaire est de ce fait liée à la taille et au nombre des unités d'enquête.

Cette méthode a été mise au point pour élaborer des statistiques agricoles en zone tempérée (Fournier 1986). En l'absence d'étude comparable en milieu naturel tropical, nous nous en sommes inspirés et l'avons adaptée à notre problématique. Un des paramètres utilisables pour déterminer la taille des segments est le temps d'inventaire par unité d'enquête. Celui-ci semble optimal si l'enquêteur peut réaliser l'inventaire du segment, en terme de formation végétale, en une demi journée maximum (Fournier et Meyer-Roux 1985). Le caractère expérimental de cette recherche nous a volontairement fait limiter la taille des zones d'étude à 40 000 ha. Ces zones pilotes de 20 km de côtés ont été sondées à raison de 20 segments de 36 ha chacun (Godard 1992).

Cependant, bien que cette approche très pragmatique se soit révélée payante en terme d'efficacité (Godard 1992), nous avons cherché à mettre au point une méthode moins empirique qui permet de moduler la taille et la répartition des segments en fonction de chaque type de paysage, avant d'aller sur le terrain. Il nous a semblé que l'imagerie satellitaire pouvait permettre d'affiner le tirage de l'échantillon, et cela avant une quelconque visite du terrain d'enquête. Pour cela, il convient de rechercher dans le fichier numérique les relations qui peuvent unir des pixels ou des groupes de pixels entre eux. Une certaine régularité peut être le signe d'un parcellaire ou d'un phénomène répétitif sous-jacent dans le paysage et dont il faut tenir compte pour élaborer le plan de sondage.

Les techniques de la géostatistique ont justement pour objet de mettre à jour les différents niveaux de liaison qui unissent un pixel à ses voisins plus ou moins proches. Dans cette approche, on ne considère plus l'image-satellite comme un ensemble de pixels indépendants bien que contigus, mais comme un tissu d'interrelation dont il convient de révéler l'intensité et la périodicité. On parle alors d'**autocorrélation spatiale**. Une donnée est dite spatialement autocorrélée lorsque, pour la variable qui la décrit, la probabilité de présence en un lieu est liée à sa présence ou à son absence dans les zones voisines et ce de façon régulière. Les données satellitaires sont particulièrement adaptées à l'étude de ce phénomène en raison de la relation qui unit longueur d'onde, résolution du capteur et physiologie du paysage.

Nous avons essayé d'évaluer sur nos différentes zones d'étude le degré de dépendance des pixels avec leur voisinage. Pour cela, nous n'avons pas eu recours aux "classiques" corrélogrammes mais à une

GODARD (V.) - 1994 - Apport de l'analyse variographique pour déterminer la taille et l'espacement des unités d'échantillonnage lors d'un inventaire d'occupation du sol en milieu naturel tropical. *Bul. SFPT*, 1994-4 (136) : 33-44.

autre technique de géostatistique, **l'analyse variographique**. Ces deux approches ne sont pas très différentes.

L'analyse variographique a pour objet de déceler la présence de structures régulières dans le paysage. Plusieurs niveaux de régularité peuvent être mis en évidence par cette analyse. En dehors du fait qu'il faut prendre certaines précautions vis-à-vis de la dépendance spatiale pour utiliser la plupart des algorithmes de traitement (Campbell 1981), certains niveaux de régularité peuvent nous intéresser dans la détermination de la taille optimale du segment. Cette analyse s'effectue sur les radiométries des canaux bruts ou celles des néo-canaux. Il est également possible d'utiliser l'analyse variographique pour déterminer la taille des fenêtres mobiles utilisées lors des analyses locales du type moyenne ou écart-type local.

Nous pouvons considérer que le paysage se décompose en trois niveaux de relations. Le premier niveau est **textural**, il concerne la distribution des pixels entre eux. Ce que l'on en perçoit, les variations locales de niveau de gris par exemple, s'effectuent sur de petites distances, quelques pixels [ordre de la dizaine à la centaine de mètres (sauf mention contraire, c'est le capteur HRV de SPOT en mode multibande qui sert de référence tout au long de cette étude)]. Le second niveau est **micro-structural**, il concerne l'organisation des textures ou des éléments texturaux, les parcelles thématiques. Les variations micro-structurales se réalisent sur des distances plus importantes, quelques dizaines de pixels (ordre de la centaine de mètres au kilomètre), voire plus exceptionnellement quelques centaines de pixels. Enfin le dernier niveau, que nous appellerons **macro-structural**, à l'échelle d'un fichier satellitaire, prend en considération les variations dépassant la centaine de pixels (ordre du kilomètre à la dizaine de kilomètres), voire le millier de pixels (plusieurs dizaines de kilomètres). Nous allons voir sur des exemples précis, quels sont les niveaux rencontrés et quelle interprétation il est possible de leur attribuer.

Si l'on considère que la valeur spectrale des pixels est une **variable régionalisée**, c'est-à-dire dont la valeur dépend de l'endroit où ils se trouvent, alors cette variable régionalisée est une réalisation d'une fonction aléatoire intrinsèque (Duplat et Perrotte 1981). Cela signifie que celle-ci admet une espérance mathématique et une variance, ou moment d'ordre deux. Or, le demi-moment d'ordre deux est le variogramme de cette fonction. Relatant les travaux de G. Matheron (Matheron 1970), qui le premier présenta le variogramme comme une généralisation de la covariance, P. Duplat et G. Perrotte nous proposent une formule applicable aux données de télédétection :

$$\gamma(D,d) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(y_{i+d} - y_i)^2}{2}$$

formule n°1

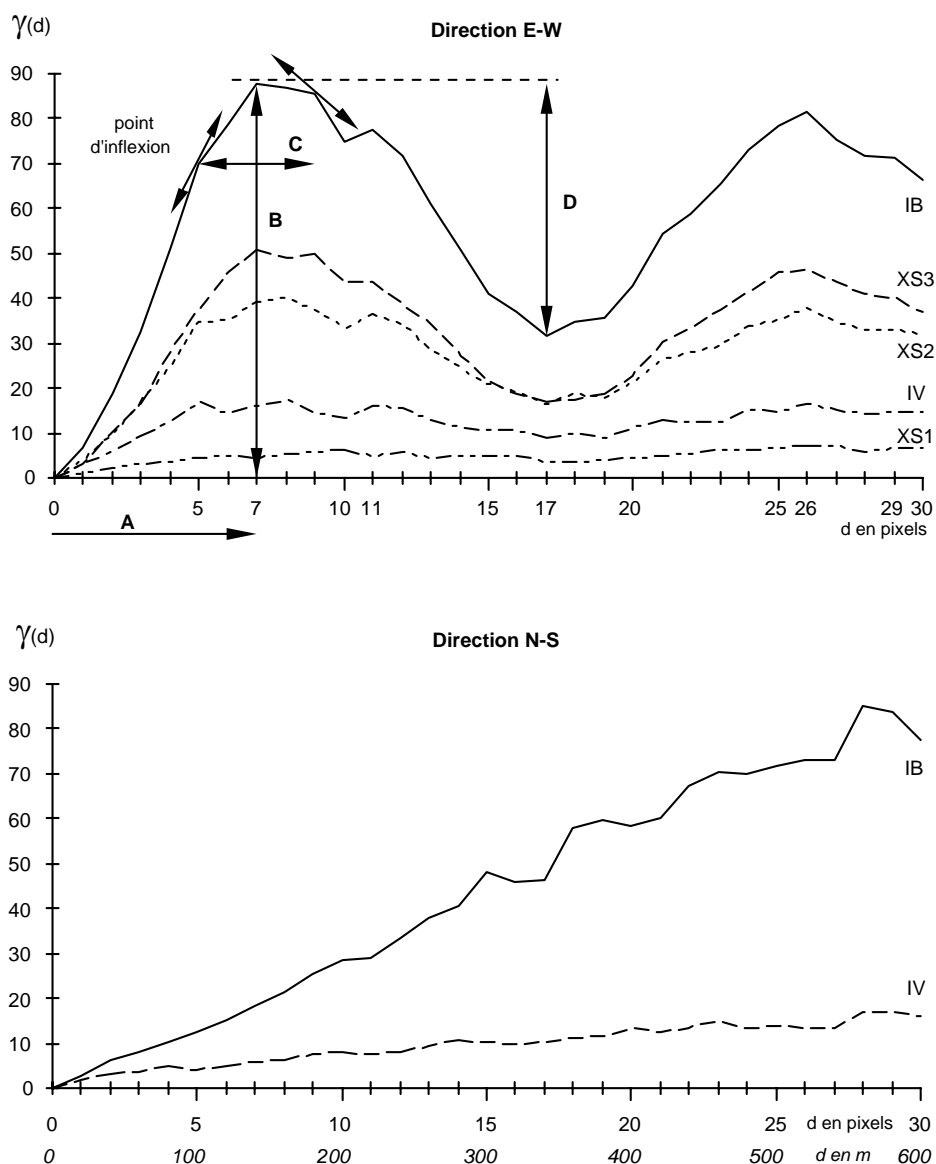
où y_i est la valeur radiométrique du premier point tiré au hasard, y_{i+d} la valeur radiométrique du deuxième point du couple pris à une distance "d" de y_i dans la direction "D". Le nombre de couples "n" tirés aléatoirement par distance et par direction a été fixé arbitrairement à 500. La distance maximale étudiée "d" n'a jamais dépassé la moitié du fichier sur la fenêtre n°1 (70 pixels de côté, soit 1 400 m) et le tiers du fichier sur la fenêtre n°2, c'est-à-dire l'ensemble de la zone pilote, dont la taille est de 1 024 pixels de côté, soit 20 480 m (cf. fig. 2). Enfin, rappelons que cette analyse a été réalisée sur les données brutes pour différents canaux et néo-canaux.

3 - Résultats et discussion

Avant de passer à l'application méthodologique des variogrammes sur la zone pilote entière, un premier exemple va être analysé. Il porte sur une fenêtre, ou strate, relativement homogène de la zone pilote. Il est plus particulièrement destiné à décrire sur un exemple didactique la procédure d'interprétation d'un variogramme dans une analyse de paysages.

3.1 - Analyse variographique d'un paysage homogène

figure 3 - Variogrammes d'un secteur dunaire de Rosso (fenêtre n°1)



Nous avons donc sélectionné une petite fenêtre (70*70 pixels) de la zone pilote de Rosso dans les ondulations dunaire d'axes sommitaux pratiquement N-S (cf. fig. 2). Ce sont les alignements dunaire de la petite phase sèche [- 8 000 à - 6 000 *Before Present*, (Michel 1973)]. D'une longueur avoisinant les deux kilomètres, ces dunes ont une dénivelée de l'ordre de la dizaine de mètres. Leur espacement est généralement compris entre 300 et 400 m.

Deux variogrammes sur les quatre analysés sont reproduits ici (cf. fig. 3). Nous avons sélectionné, d'une part une direction perpendiculaire à l'axe des dunes (E-W), et d'autre part une direction proche de cet axe (N-S). Ces deux directions sont les plus significatives en raison de leur orientation. Les deux directions obliques (NW-SE et NE-SW) ne sont, dans le cas présent, qu'une combinaison de ce qui va être décrit sur les variogrammes retenus et ne sont donc pas présentées dans ce travail.

Sur la figure 3, les cinq canaux et néo-canaux sont représentés. On constate nettement que leur comportement n'est pas identique. Certains, comme le néo-canal de l'Indice de Brillance (IB), le canal du proche infrarouge (XS3), etc., expriment une dynamique beaucoup plus marquée (succession de "trous et de bosses") que d'autres comme le néo-canal de l'Indice de Végétation normalisé (IV) ou le canal du "vert-jaune" (XS1), dont la courbe est beaucoup plus plate en raison de leur forte corrélation spatiale.

GODARD (V.) - 1994 - Apport de l'analyse variographique pour déterminer la taille et l'espacement des unités d'échantillonnage lors d'un inventaire d'occupation du sol en milieu naturel tropical. *Bul. SFPT*, 1994-4 (136) : 33-44.

Avec :

$$IB = \sqrt{XS3^2 + XS2^2}$$

$$IV = \frac{XS3 - XS2}{XS3 + XS2}$$

XS3, le canal du proche infrarouge de SPOT HRV [0,79 μm ; 0,89 μm] ;

XS2, le canal du rouge de SPOT HRV [0,61 μm ; 0,68 μm]

XS1, le canal du vert-jaune de SPOT HRV [0,50 μm ; 0,59 μm].

On peut schématiquement décrire les variogrammes de la façon suivante. Le variogramme calculé sur la direction E-W est remarquable par l'ampleur de "l'effet de trou" central surtout marqué sur l'Indice de Brillance (IB) et pas du tout sur l'Indice de Végétation (IV). La courbe présente une allure quasi périodique qui évoque les ondulations dunaires de la petite phase sèche. On notera également l'anisotropie entre les directions E-W et N-S. Il s'agit d'en décrypter la signification.

Rappelons que plus la croissance de la courbe à l'origine est rapide, plus l'influence d'un point sur son voisinage s'estompe rapidement. La corrélation spatiale nous apparaît donc globalement plus marquée pour l'Indice de Végétation que pour l'Indice de Brillance. Cette opposition est due en grande partie à une date de prise de vue très tardive (6 novembre 1987) pour saisir l'activité chlorophyllienne de la strate herbacée (cf. fig. 3, courbe de l'IV). L'étude de ce néo-canal n'apporte pas beaucoup d'information. En revanche, l'Indice de Brillance (IB) a une dynamique plus importante qui caractérise mieux les ondulations dunaires. Ce néo-canal reste sensible au contraste entre les sommets dunaires relativement décapés et les interdunes où se concentrent les herbacées (sénescences à la date de prise de vue) et quelques rares ligneux.

Que nous apporte la lecture des variogrammes pour la préparation de l'inventaire ? Pour le savoir, il faut analyser chacune des directions puis en réaliser la synthèse. De celle-ci, il ressortira peut-être une ou plusieurs distances significatives pour nous aider à étalonner la taille des unités d'échantillonnage. Cette analyse est facilitée par la consultation des compositions colorées ou des classifications automatiques issues des données satellitaires de même saison, mais bien sûr antérieures à la mission de terrain. Elles permettent souvent de retrouver les ruptures constatées sur les variogrammes et de leur trouver une justification thématique, même en l'absence d'une bonne connaissance du terrain.

Comment interpréter le variogramme ? Rappelons que l'algorithme employé tire un premier point au hasard, puis, dans une direction donnée, tire un deuxième point à une distance "d". Cette opération est répétée cinq cents fois pour constituer un échantillon de couples de valeurs radiométriques. On mesure ainsi, sur un certain nombre de distances et pour une direction donnée, la différence qui existe, en terme de "niveaux radiométriques", entre deux points. On calcule ainsi une "demi" variance ($\gamma(d)$, cf. formule n°1) qui, reportée sur un graphe, le variogramme, décrit une succession de structures qu'il faut analyser. Pour cela on s'appuie sur quatre valeurs significatives (cf. fig. 3) :

- la portée du phénomène "A" qui indique à quelle distance de l'origine (en pixels ou en mètres) celui-ci atteint son maximum ;
- l'amplitude du phénomène "B" exprimée en niveaux de variance et mesurée de l'axe des x au maximum de la structure ;
- l'extension de la structure "C" qui indique sur quelle distance le phénomène marque le paysage (en pixels ou en mètres) ;
- et "D" le contraste entre deux structures successives (exprimée en niveaux de variance).

Concrètement, on va regarder ce qui se passe sur le variogramme E-W (cf. fig. 3) lorsque, par hypothèse, le point tiré au hasard tombe dans un creux interdunaire ($d = 0$ pixel). Thématiquement, ce point correspond fréquemment à un espace recouvert par une végétation à dominante herbacée et sénescence en raison de la date de prise de vue (6 nov. 1987). Cent quarante mètres plus loin ($d = 7$ p pour SPOT HRV), après une forte croissance (pour l'Indice de Brillance), le variogramme atteint un sommet, la portée "A" de la première structure. La variance est ici maximale, nous sommes, toujours

GODARD (V.) - 1994 - Apport de l'analyse variographique pour déterminer la taille et l'espacement des unités d'échantillonnage lors d'un inventaire d'occupation du sol en milieu naturel tropical. *Bul. SFPT*, 1994-4 (136) : 33-44.

selon l'hypothèse de départ, sur un sommet dunaire relativement décapé, donc très différent du creux interdunaire. Puis, après une faible décroissance, la variance reprend légèrement, constituant un dôme secondaire dont la portée est de 220 m ($d = 11$ p), soit 80 m de plus que la portée du premier phénomène.

En fait, cet emboîtement de structures indique que les ondulations dunaires de la petite phase sèche sus mentionnée ne sont ni symétriques ni parfaitement rectilignes. Au sommet, le versant ouest de ces séries de dunes est souvent plus décapé que le versant est, et l'on constate quelques sinuosités longitudinales. Ces structures ont une extension comprise entre 60 et 80 m. Elles sont pratiquement confondues dans la mesure où le contraste radiométrique "D" qui les sépare, est très faible. Il est donc possible de les appréhender comme une structure unique.

Passé cette double structure, le variogramme décroît jusqu'à 340 m de l'origine ($d = 17$ p), nous sommes de nouveau dans un creux interdunaire selon notre hypothèse de départ. Puis, il y a reprise de la variance jusqu'à 520 m de l'origine ($d = 26$ p) où l'on atteint le sommet de la troisième structure, également suivi à 580 m ($d = 29$ p) d'une quatrième structure emboîtée. Nous avons donc atteint un deuxième cordon dunaire, pratiquement en tout point identique au premier. Notons qu'une hypothèse de départ différente, sommet dunaire par exemple (en $d = 0$ p), présenterait la même périodicité de phénomènes. Cette hypothèse est émise pour faciliter la lecture du variogramme. Elle n'a aucune influence sur celui-ci.

Le variogramme N-S apporte une information sur la dépendance radiométrique des pixels parallèlement à l'axe des dunes. Globalement, sur une distance de 600 m ($d = 30$ p), la dépendance spatiale ne décroît que lentement, le paysage change peu sur cet axe, contrairement à l'axe E-W où la transition est brutale. Les deux directions obliques (NW-SE et NE-SW), non présentées ici, ont un comportement intermédiaire.

A l'issue de cet exemple didactique d'analyse variographique, il convient de s'interroger sur une telle approche dans notre problématique d'inventaire. Est-il possible, en fonction de l'organisation structurelle ainsi mise à jour, d'améliorer la détermination de la taille et de l'espacement des unités d'enquête de notre plan de sondage ? Pour cela, nous allons aborder l'analyse de la fenêtre n°2 (cf. fig. 2), d'une plus grande diversité thématique.

3.2 - Analyse variographique d'un paysage hétérogène

L'étude du variogramme calculé sur l'ensemble de la zone pilote (20 * 20 km) se révèle plus complexe, car le variogramme global correspond au cumul des variogrammes élémentaires (Dauphiné et Voiron-Canicio 1988).

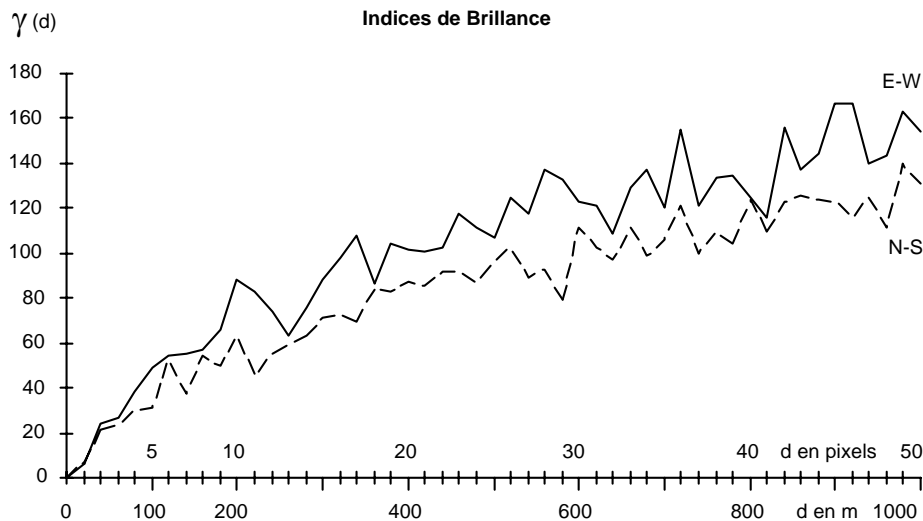
Le variogramme expérimental global est de plus en plus "bruité" avec l'accroissement de la distance "d" (cf. fig. 4), mais il est pratiquement toujours acceptable d'ajuster ce variogramme expérimental au variogramme théorique (Dauphiné et Voiron-Canicio 1988). Plusieurs modèles d'ajustement (linéaire, sphérique, exponentiel, ...) ont déjà été testés par différents auteurs sur des données de terrain ou de télédétection (Burgess *et al.* 1981, McBratney et Webster 1986, Webster *et al.* 1989, ...). Pour notre approche, l'ajustement retenu est un lissage par moyenne mobile avec une fenêtre glissante de valeur trois ($k = 3$, cf. fig. 5). Nous n'avons conservé sur les figures 4 et suivantes que le variogramme de l'indice de brillance (IB) pour les directions E-W et N-S. Cette juxtaposition permet une meilleure analyse des contrastes micro-régionaux exprimés par les deux directions les plus importantes pour ce paysage.

Avant de se lancer dans la description pas-à-pas des emboîtements de structures, il convient de s'interroger sur l'utilité d'une telle description. En effet, si celle-ci doit avoir lieu, c'est avant d'aller sur le terrain, donc en général avant d'avoir acquis la connaissance détaillée du paysage nécessaire à l'analyse fine des variogrammes. De ce fait, la mise en relation pas-à-pas du variogramme et de la réalité terrain, bien qu'intéressante, ne doit pas être un préalable indispensable dans la démarche proposée. On essayera

GODARD (V.) - 1994 - Apport de l'analyse variographique pour déterminer la taille et l'espacement des unités d'échantillonnage lors d'un inventaire d'occupation du sol en milieu naturel tropical. *Bul. SFPT*, 1994-4 (136) : 33-44.

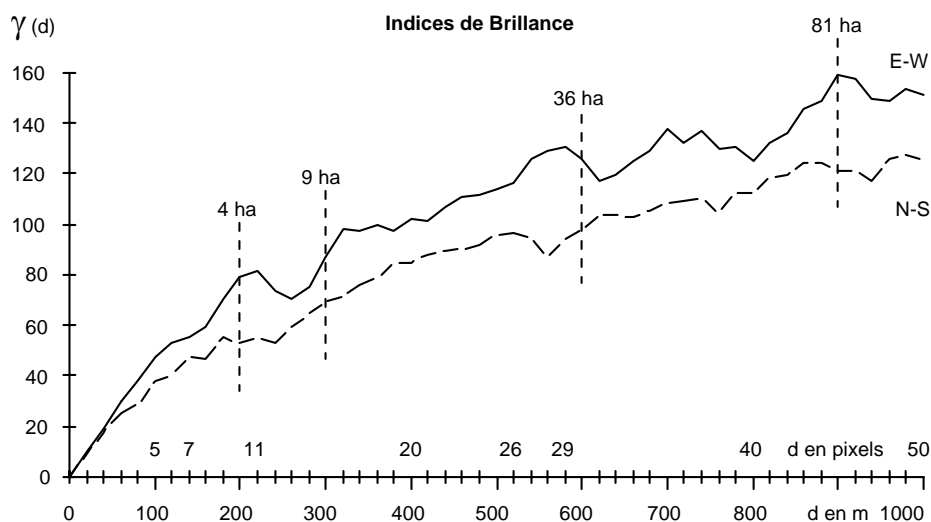
toutefois de contrôler, à l'aide de la documentation disponible (photos aériennes, études, etc.), que les structures majeures retenues à la lecture des variogrammes, en vue de déterminer la taille des unités d'enquête, ne sont pas des artefacts de calcul et comportent bien un intérêt pour l'étude. Cette vérification est bien sûr plus aisée sur des milieux où le parcellaire, agricole, urbain ou autre est net.

figure 4 - Variogramme global non lissé de la zone pilote (fenêtre n°2)



Même à l'échelle de la zone pilote, la courbe la plus intéressante reste celle de la direction E-W. Les effets de trou y sont toutefois moins spectaculaires que dans l'exemple précédent en raison de la diversité des phénomènes qui se superposent ou se contrecarrent sur cette distance. D'allure pseudo-périodique, la courbe E-W nous renseigne sur la succession des contrastes micro-régionaux (micro-structure de l'ordre de la centaine de mètres), et donc d'une certaine manière sur la régularité de ces paysages.

figure 5 - Variogramme global lissé de la zone pilote (fenêtre n°2, k = 3)



Contrairement à l'exemple centré sur les ondulations dunaires de la petite phase sèche, le variogramme E-W de la zone pilote (cf. fig. 5) indique une décroissance continue de l'autocorrélation spatiale. La courbe est globalement croissante et non plus sinusoidale avec une pente nulle, comme sur la figure 3. Elle n'est pas monotone, il y a des reprises de l'autocorrélation spatiale (courbe localement décroissante). C'est à ces paliers ou dômes qu'il faut s'intéresser. La courbe E-W (cf. fig. 5) est la plus significative de ce point de vue, car si la courbe N-S a une tendance analogue (lente décroissance de l'autocorrélation spatiale), les effets de trou et les emboîtements sont moins sensibles. Elle est donc moins pertinente pour la recherche de la taille des segments et de la grille de sondage.

GODARD (V.) - 1994 - Apport de l'analyse variographique pour déterminer la taille et l'espacement des unités d'échantillonnage lors d'un inventaire d'occupation du sol en milieu naturel tropical. *Bul. SFPT*, 1994-4 (136) : 33-44.

Trois structures majeures se détachent sur la figure 5. Il s'agit des dômes culminant aux distances sus-mentionnées : 220 m ($d = 11$ pixels) et 580 m ($d = 29$ p) ainsi que celui d'une portée de 900 m ($d = 45$ p). A celles-ci il faut ajouter deux structures d'aspects moins individualisés mais d'amplitude et de contraste marqués. Il s'agit des distances 320 m ($d = 16$ p) et 720 m (et associées). Comment intégrer l'analyse du variogramme dans la détermination du plan de sondage ?

3.3 - Du variogramme au plan de sondage

En théorie, pour obtenir la plus grande diversité à l'intérieur du segment, il convient de retenir une taille correspondant à la portée d'une structure en dôme. Rappelons que schématiquement, la diversité thématique croît ou décroît comme la courbe du variogramme, à l'inverse de l'autocorrélation.

De manière classique, pour déterminer la taille et le nombre optimal des segments, il faut tenir compte de deux aspects. Tout d'abord, les segments doivent être suffisamment nombreux pour que chaque thème bénéficie d'un nombre suffisant de relevés de terrain pour que ceux-ci puissent être scindés en deux groupes, l'un pour initialiser les traitements cartographiques, l'autre pour contrôler les cartes. Ensuite, le segment doit être suffisamment grand (en fait dépasser la taille moyenne des "différents types d'états de surface", c'est-à-dire des formations végétales, plages de sols nus...), pour réduire la variance des estimations (Bryant et Russwurm 1983). Enfin, pour des questions de précision de localisation (localisateur par satellite entre autre), nous avons déterminé, pour ce milieu d'étude, que le côté du segment devait être un multiple de 100 m avec, pour assurer sur le terrain la compatibilité entre les capteurs SPOT HRV (résolution 20 m) et Landsat TM (30 m), une préférence pour les longueurs suivantes : 300 ($15 * 20$ ou $10 * 30$ m), 600 et 900 m (Godard 1991).

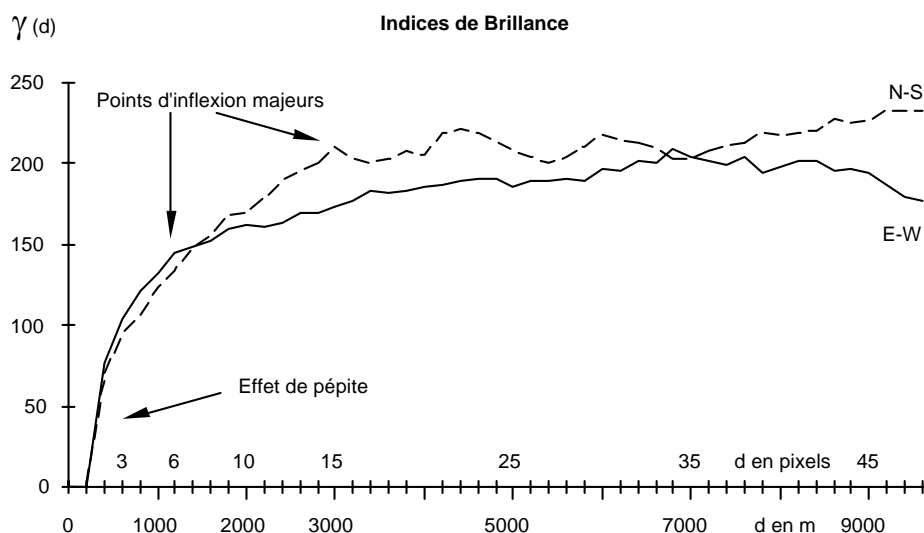
Comme nous l'avons déjà indiqué à plusieurs reprises, pour ce paysage mauritanien, le variogramme E-W apporte plus de renseignements que celui d'axe N-S. Il va donc permettre ici, pratiquement seul, de déterminer les deux côtés du segment carré, en relation avec les autres impératifs du plan de sondage. Notons que sur d'autres paysages, lorsque les variogrammes s'y prêtent, toutes les directions peuvent contribuer au choix de la taille du segment.

En première approche, on retiendra les distances les plus proches de la portée des structures marquantes identifiées sur le variogramme E-W, elles sont au nombre de cinq (cf. fig. 5). Il s'agit des distances 200, 300, 600, 700 et 900 m. Parmi celles-ci, trois satisfont à la complémentarité entre Landsat TM et SPOT HRV. Puisque cela est possible, on va choisir directement l'une d'entre elles. Reste à savoir laquelle et sur quel critère.

Le choix va être facilité par le changement d'échelle du variogramme. Celui-ci s'obtient en modifiant le pas de calcul. Sur la figure 6, le pas de calcul "d" n'évolue plus de pixel en pixel comme précédemment mais de 10 pixels en 10 pixels. Cette modification du pas de calcul "d" permet d'analyser en un temps plus réduit l'ensemble du champ d'étude. Cependant, elle génère un artefact de calcul appelé "**effet de pépité**" qui se traduit par une pente très forte de la courbe à l'origine. Cet effet de pépité indique que le pas de calcul n'est pas le plus approprié pour l'étude des petites distances. Notons que pour l'analyse des structures de grande taille, il est possible de recourir à l'étude du spectre de la série, ou transformée de Fourier (Dauphiné et Voiron-Canicio 1988).

Le variogramme au pas de 10 montre nettement sur les directions E-W et N-S que la dépendance décroît très vite. La courbe est presque parallèle à l'axe des y, puis après une inflexion, elle devient presque linéaire et horizontale, signifiant ainsi que la variance n'augmente plus et que donc le maximum de la diversité est dépassé.

sfigure 6 - Variogramme calculé avec un pas de 10 sur la zone pilote (lissage avec $k = 5$)



Concrètement, une maille de l'ordre de la portée de cette structure apporterait la plus grande diversité. Au-delà, le gain d'information n'est plus en rapport avec l'accroissement de la maille. Sur l'axe E-W, la portée de ce palier est à 1 200 m de l'origine ($d = 6$ p). Sur l'axe N-S, deux paliers sont possibles. Un premier vers 600 m ($d = 3$ p) et un second à 3 000 m ($d = 15$ p). Entre les deux, la pente reste forte donc, la diversité croît encore nettement entre les distances 600 et 3 000 m. On retiendra alors sur l'axe N-S, une maille de 3 000 m.

Dans le cas d'un segment et d'une maille rectangulaires, le pas de la maille serait logiquement en x de 1 200 m et en y de 3 000 m. Dans la mesure où le segment retenu est carré, soit on prend un moyen terme entre 1 200 et 3 000 m, soit, comme nous le préconisons, on retient la taille maximale dans un souci de diversité, c'est-à-dire 3 000 m de côté.

De nombreux inventaires ont obtenu des résultats satisfaisants avec des taux de sondage compris entre 1 et 2 p.100 (Fournier 1986, IATA 1989...). Donc avec une maille de 3 000 m de côté, et pour un taux de sondage conforme à cet ordre de grandeur, il faut retenir comme taille du côté d'un segment la distance $d = 300$ m.

Si le nombre des segments est assez élevé, un faible taux de sondage doit suffire pour rendre compte de la diversité du paysage. Dans le cas contraire, tout en restant en conformité avec les informations issues des variogrammes, on réduira légèrement le pas de la maille conjointement avec celle du segment pour conserver un nombre d'unités d'échantillonnage assez élevées, compatibles avec la diversité du paysage mais aussi avec l'utilisation de la statistique.

L'analyse des variogrammes du secteur de Rosso présentée ici est postérieure à l'inventaire d'occupation du sol. Le choix de la taille des segments utilisés lors de cet inventaire n'a donc pas bénéficié de cette recherche. Nous avons retenu de façon assez pragmatique, en fonction d'études menées sur d'autres milieux, un segment de 600 m de côté, soit 36 ha (Godard 1991). Malgré des résultats d'estimation très satisfaisants (Godard 1992), il semble, à l'issue de cette étude, que des segments de plus petites tailles, 300 m de côté soit 9 ha, s'avèrent plus pertinents en termes de finesse et de précision de l'inventaire pour ce paysage naturel sahélien, que ceux initialement retenus. La trop grande taille des segments avait d'ailleurs été signalée à l'issue de la campagne d'inventaires (De Wispelaere *et al.* 1989). L'amélioration de la détermination de la taille des unités d'échantillonnage était un aménagement à apporter pour rendre plus opérationnelle cette méthode d'enquête.

GODARD (V.) - 1994 - Apport de l'analyse variographique pour déterminer la taille et l'espacement des unités d'échantillonnage lors d'un inventaire d'occupation du sol en milieu naturel tropical. *Bul. SFPT*, 1994-4 (136) : 33-44.

Conclusion

Bien que l'on sache depuis plus de 10 ans que les données satellitaires sont autocorrélées, l'analyse spatiale de celles-ci n'a pas encore donné un volume de publications comparable à celui concernant l'analyse spectrale. Pour notre part, nous souhaitons savoir si des techniques simples de géostatistique pouvaient nous permettre de préparer notre plan de sondage en terme de taille et nombre d'unités d'enquête. L'analyse variographique nous a apportée une réponse satisfaisante.

A l'aide d'exemples issus du milieu naturel sahélien, nous avons montré, s'il le fallait encore, qu'il existait bien une liaison spatiale entre les pixels qui constituent le fichier image, que cette liaison était plus ou moins forte selon les canaux utilisés et qu'elle était plus ou moins durable selon les distances et les directions. Cette dépendance spatiale est anisotropique et mesurable. Son analyse permet donc d'adapter la taille des unités d'enquête aux régularités du paysage, que celles-ci soient géomorphologiques, végétales ou autre. Ce qui a été testé en milieu naturel tropical peut s'adapter à d'autres milieux. Des essais sont actuellement en cours sur des secteurs agricoles et forestiers tempérés.

Remerciements : Mes remerciements vont à Jean Claude Bergonzini et à Nathalie Coquille du CIRAD pour tout le temps qu'ils ont bien voulu consacrer à mes problèmes d'analyse variographique. Que Nathalie trouve ici aussi la marque de mon amitié pour les heures qu'elle a passées à réaliser le programme informatique, sans lequel une partie de cette recherche n'aurait jamais vu le jour.

Ouvrages cités :

BRYANT (C.R.), RUSSWURM (L.H.) - 1983 - *Les méthodes d'échantillonnage aréolaire selon les besoins et objectifs de la surveillance de l'utilisation des terres*. Environnement Canada, Direction Générale des terres, 76 p. (doc. de travail n°24).

BURGESS (T.M.), WEBSTER (R.), McBRATNEY (A.B.) - 1981 - Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. IV Sampling strategy. *Journal of Soil Science*, 32 : 643-659.

CAMPBELL (J.B.) - 1981 - Spatial Correlation Effect upon Accuracy of Supervised Classification of Land Cover. *PE&RS*, 47-3 : 355-363.

CURRAN (P.J.) - 1988 - The Semivariogram in Remote Sensing: An Introduction. *Remote Sens. Environ.*, 24 : 493-507.

DAUPHINE (A.), VOIRON-CANICIO (Ch.) - 1988 - *Variogrammes et structures spatiales*. Montpellier, GIP RECLUS, 56 p. (Col. Reclus Modes d'Emploi n°12).

DE WISPELAERE (G.), GODARD (V.), CARRIERE (M.) - 1989 - *Expérimentation méthodologique pour le suivi de l'environnement par télédétection dans le Trarza, le Gorgol et l'Assaba (Mauritanie)*. Maisons-Alfort, IEMVT, 181 p.

DUPLAT (P.), PERROTTE (G.) - 1981 - *Inventaire et estimation de l'accroissement des peuplements forestiers*. Paris, ONF, 432 p.

FOURNIER (Ph.) - 1986 - *Enquête sur l'utilisation du territoire effectuée en 1985 par la méthode des segments*. Paris, SCEES, Série S, 63 p., (Méthodes et Applications Scientifiques n°13).

FOURNIER (Ph.), MEYER-ROUX (J.) - 1985 - Observations terrain et télédétection. *Cahiers de Statistique Agricole*, n°1/6 : 5-11, janvier-février.

GODARD (V.) - 1991 - *Utilisation conjointe de la télédétection et de l'enquête de terrain lors des inventaires d'occupation du sol. Recherche appliquée au Sahel sud-mauritanien*. Maisons-Alfort, IEMVT. Thèse de doctorat de l'EHESS, 433 p.

GODARD (V.) - 1992 - Évaluation des surfaces naturelles par télédétection et enquête de terrain en Mauritanie. *STATECO*, n°71 : 27-58.

IATA - 1989 - Inventaires régionaux. *Flash Télé-Agri-News*, Inst. des Applic. de la Téléd., Service Spécialisé Agriculture (CCRCCE), Ispra (Italie), 2/89 : 2-15.

LEROUX (M.) - 1983 - *Le climat de l'Afrique tropicale*. Paris, ed. Champion, 633 p.

- GODARD (V.) - 1994 - Apport de l'analyse variographique pour déterminer la taille et l'espacement des unités d'échantillonnage lors d'un inventaire d'occupation du sol en milieu naturel tropical. *Bul. SFPT*, 1994-4 (136) : 33-44.
- McBRATNEY (A.B.), WEBSTER (R.) - 1986 - Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Science*, 37 : 617-639.
- MATHERON (G.) - 1970 - *La théorie des variables régionalisées et ses applications*. Paris, École des Mines, 212 p.
- MEYER-ROUX (J.), SIGMAN (R.), CRAIG (M.), OZGA (M.) - 1981 - Cartographie et statistique en télédétection. *Cahiers de la statistique agricole*, n°6/6 : 9-14, novembre-décembre.
- MICHEL (P.) - 1973 - *Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Étude géomorphologique*. Paris, ORSTOM, 3 tomes, 752 p. + cartes (Mémoire ORSTOM n°63).
- ROSSI (E.R.), MULLA (D.J.), JOURNEL (A.G.), FRANZ (E.H.) - 1992 - Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs*, 62(2) : 277-314.
- ROUGERY (G.) - 1988 - *Géographie de la biosphère*. Paris, Armand Colin, 288p.
- TOUPET (Ch.) - 1990 - La perception des climats secs. *Sécheresse*. Vol. 1, n°1 : 240-245.
- WEBSTER (R.), CURRAN (P.J.), MUNDEN (J.W.) - 1989 - Spatial Correlation in Reflected Radiation from the Ground and Its Implications for Sampling and Mapping by Ground-Based Radiometry. *Remote Sens. Environ.*, 29 : 67-78.
- WOODCOCK (C.E.), STRAHLER (A.H.), JUPP (D.L.) - 1988 - The Use of Variograms in Remote Sensing: I. Scene Models and Simulated Images. *Remote Sens. Environ.*, 25 : 323-348.