



**HAL**  
open science

## Texture et images de télédétection

Michel Albuissou, Jean-Marie Monget, Lucien Wald

► **To cite this version:**

Michel Albuissou, Jean-Marie Monget, Lucien Wald. Texture et images de télédétection. Hétérogénéité en Télédétection, May 1987, Strasbourg, France. hal-00467962

**HAL Id: hal-00467962**

**<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00467962>**

Submitted on 19 Apr 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



TEXTURE ET IMAGES DE TELEDETECTION

M. ALBUISSON, J.M. MONGET, L. WALD

Centre de Télédétection et d'Analyse des Milieux Naturels  
Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris  
Rue Claude Daunesse  
Sophia-Antipolis, 06565 Valbonne Cédex (France)  
Tél. : 93.33.05.58

RESUME

Cet article présente quelques-uns des travaux effectués dans des domaines très divers, de l'océanographie à la géologie, au Centre de Télédétection et d'Analyse des Milieux Naturels (CTAMN) de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, concernant l'étude de la texture d'images aéroportées ou satellitaires. La texture y est décrite à l'aide du variogramme ou fonction de structure. Ce variogramme est réduit à un ou plusieurs paramètres, selon les buts de l'étude. Cette réduction est soit déterministe, soit effectuée à l'aide de méthodes d'analyse de données.

Pour l'estimation du bruit de mesure affectant les images, seule la valeur vers laquelle tend le variogramme à l'origine est calculée. La manière dont l'énergie turbulente océanique est transférée entre les différentes échelles est évaluée en approchant le variogramme expérimental par une loi en puissance. A partir d'images radar ou de modèles numériques de terrain, différents faciès lithologiques et leur altération sont mis en évidence en examinant l'intensité et l'échelle du premier maximum local du variogramme, ainsi que la pseudo-période qu'il présente. En effectuant tout d'abord une segmentation de l'image en zones similaires du point de vue de la texture, puis un krigeage adaptatif utilisant le variogramme local, un lissage optimal de l'image n'éliminant que le bruit de mesure a été réalisé. Les variogrammes ont alors été recodés en privilégiant les petites échelles, afin d'utiliser pleinement les propriétés du comportement à l'origine du variogramme. De même, diverses signatures de texture issues des variogrammes ont été définies et comparées afin de classer automatiquement les objets selon leur texture.

ABSTRACT

This paper reviews some studies made in various domains, from oceanography to geology, at CTAMN of Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, and dealing with the texture of remote sensing imagery. It is shown that the texture is adequately described by the variogram also called structure function. The variogram is usually reduced to a set of parameters called the signature of the texture. The size of this set as well as the definition of the parameters differ widely according to the scopes of a study. The reduction can be made by the mean of methods of data analysis and pattern recognition techniques.

To estimate the salt and pepper noise in the image, the nugget effect is studied and the value the variogram is tending towards as the scale tends towards 0 is equal to the variance of noise. Fitting the experimental variogram by a power law demonstrates the way the turbulent energy in the ocean is transferred from scales to scales. Variograms are computed of radar imagery or digital relief models. A strong relationship is found between lithological facies and their weathering and the texture signature composed of the intensity and the scale of the first local maximum and of the pseudo-period of the variogram. Making first a segmentation of the image into domains of similar texture, then an adaptative kriging using local variogram, gives an optimal smoothing which eliminates the pepper and salt noise with respect to the local texture. In this case, variograms are recoded to produce a texture signature. The smallest scales are enhanced to plainly use the properties of the behaviour of the variogram towards origin. In a fifth study, various texture signatures are defined from the variograms. Their ability to characterize various objects in an image composed of homogeneous texture lots is examined by classification methods.

## 1. INTRODUCTION

Au cours de cet Atelier "Hétérogénéité en Télédétection", deux problèmes ont été principalement évoqués.

Le premier est celui que l'on rencontre lorsque l'on compare une mesure au sol, ponctuelle et intégrée dans le temps, à un pixel, moyenne spatiale instantanée. Comment étendre les propriétés mesurées en un point au pixel ? La géostatistique peut certainement apporter une réponse à ce problème qui existe également lorsque l'on désire comparer deux images de résolutions spatiales différentes. Le deuxième problème évoqué est celui de la dépendance de l'hétérogénéité vis-à-vis de l'échelle.

Les discussions ont porté sur l'espace, mais il faut souligner que ces problèmes interviennent aussi dans les autres dimensions concernées par la télédétection : le temps et la longueur d'onde. Dans le domaine du traitement d'image, le mot texture traduit identiquement l'hétérogénéité avec tout au moins une restriction au domaine spatial. La texture est la distribution spatiale de l'information au sein d'un même objet, ou unité d'image, ou, selon le vocabulaire de la télédétection, unité de paysage. Des exemples immédiats de la texture sont les trames d'un tissu.

Pour l'utilisateur thématique de la télédétection, une telle définition ne peut être utile que si elle débouche sur un ensemble de critères précis et fiables. Faisant l'hypothèse que l'image vue par le satellite n'est qu'une réalisation d'un processus aléatoire, la texture peut être décrite de manière statistique. Le choix des descripteurs statistiques se pose alors. Certains descripteurs s'imposent davantage que d'autres en fonction des problèmes à résoudre. Pour des raisons évidentes, on cherchera à diminuer et le nombre de descripteurs, et la complexité de calcul et d'interprétation de ceux-ci. La modélisation du phénomène est généralement d'une grande aide dans cette approche.

Toutefois, il ne faut pas trop simplifier. Par exemple, la variance du voisinage d'un point n'est généralement pas un bon descripteur de la texture. Elle ne décrit que la variabilité de l'amplitude de la fonction aléatoire, sans tenir compte de la distribution spatiale de cette variabilité. La seule connaissance des variances ne permet pas, sans de très grandes confusions, de discriminer des zones de texture différente ou de rapprocher des zones de texture similaire. Le descripteur doit donc contenir des informations sur la variabilité du processus aléatoire et sur la distribution spatiale de cette variabilité.

Le CTAMN étudie depuis longtemps la texture des images de télédétection dans divers domaines, de l'océanographie à la géologie. Plusieurs types d'analyse ont été utilisés : filtrage, analyse syntaxique, variogrammes. C'est ce dernier type qui a fait l'objet des études les plus systématiques, et nous présentons dans cet article les principaux travaux utilisant les variogrammes pour caractériser la texture en télédétection.

On appellera signature de la texture un ensemble des descripteurs permettant de caractériser la texture. Le choix de la signature est donc très large, et dépend des problèmes à résoudre. Les travaux ici présentés font usage de signatures différentes, issues des variogrammes.

La signature peut être assez simple : constante de pépite, ou ajustement du variogramme par une loi en puissance, ou coordonnées du premier maximum local et pseudo-période. Dans ce cas, la définition des descripteurs composant la signature est effectuée de manière déterministe.

Cependant, la caractérisation de la texture peut requérir une signature comportant davantage de descripteurs. Si ce nombre devient important, il sera alors nécessaire de recourir à des méthodes d'analyse de données permettant de définir des formes typiques de variogrammes et de réduire la taille de la signature selon les démarches suivies par Albuissou et al. (1974) et Albuissou et Monget (1975).

Le variogramme, ou fonction de structure, n'est pas un outil largement répandu, et nous présentons tout d'abord certaines de ses propriétés. Ensuite, cinq études seront exposées ; elles concernent :

- le bruit de mesure des images,
- la turbulence océanique de moyenne échelle,
- la caractérisation des faciès lithologiques et de leur altération,
- le lissage optimal d'images bruitées respectant la texture locale,
- la classification automatique d'objets par une signature texturale.

## 2. LE VARIOGRAMME OU FONCTION DE STRUCTURE

### 2.1. Rappels et définitions

La fonction aléatoire  $Z(\underline{x})$  est stationnaire si sa loi est invariante par translation (indépendance vis-à-vis du point d'appui). L'espérance mathématique  $m = E [Z(\underline{x})]$  est alors une constante. Si  $Z(\underline{x})$  et  $Z(\underline{x} + \underline{h})$  admettent des variances finies, elles admettent aussi une covariance  $K(\underline{x}, \underline{h})$ . L'hypothèse de stationnarité entraîne l'indépendance de  $K(\underline{x}, \underline{h})$  vis-à-vis de  $\underline{x}$  :

$$K(\underline{h}) = E [Z(\underline{x}) Z(\underline{x} + \underline{h})] \quad (1)$$

et la variance de  $Z(\underline{x})$  est donnée par  $K(0)$ .

La fonction aléatoire  $Z(\underline{x})$  est stationnaire d'ordre 2 si la variable aléatoire  $Z(\underline{x}_0)$  admet une espérance  $m$  indépendante du point d'appui  $\underline{x}_0$ , et si pour tout vecteur  $\underline{h}$  la covariance :

$$K(\underline{h}) = E [Z(\underline{x}_0 + \underline{h}) Z(\underline{x}_0)] - m^2 \quad (2)$$

existe et ne dépend pas de  $\underline{x}_0$ . Cette hypothèse, qui n'entraîne pas la stationnarité au sens strict, suppose l'existence d'une variance a priori finie  $K(0)$ .

Une autre hypothèse plus faible est l'hypothèse intrinsèque ou hypothèse de stationnarité des accroissements. La variance a priori de  $Z$  peut ne pas exister.  $Z$  vérifie l'hypothèse intrinsèque si, pour tout vecteur  $\underline{h}$ , l'accroissement  $Z(\underline{x}_0 + \underline{h}) - Z(\underline{x}_0)$  admet une espérance et une variance indépendante du point d'appui  $\underline{x}_0$ , soit :

$$m(\underline{h}) = E [Z(\underline{x}) - Z(\underline{x} + \underline{h})] \tag{3}$$

$$D(\underline{h}) = E [(Z(\underline{x} + \underline{h}) - Z(\underline{x}))^2] / 2 \tag{4}$$

$m(\underline{h})$  est la dérivée linéaire en  $\underline{h}$  ;  $D(\underline{h})$  s'appelle le demi-variogramme ou fonction intrinsèque, ou fonction de structure. Dans la suite, pour des raisons de simplicité d'écriture, nous utiliserons le terme "variogramme" pour désigner  $D(\underline{h})$ .

On peut bien entendu calculer le variogramme d'une fonction aléatoire stationnaire d'ordre 2. Il existe alors une relation entre la covariance  $K(\underline{h})$  et  $D(\underline{h})$  :

$$D(\underline{h}) = K(0) - K(\underline{h}) \tag{5}$$

Si  $K(\infty) = 0$ , alors  $D(\infty) = K(0)$ , et :

$$K(\underline{h}) = D(\infty) - D(\underline{h}) \tag{6}$$

### 2.2. Propriétés du variogramme

Le variogramme est une fonction symétrique, positive ou nulle, et nulle en 0.

Il donne un sens précis à la notion de zone d'influence : sa croissance plus ou moins rapide reflète la manière dont se détériore l'influence d'un point sur des zones de plus en plus lointaines. Un variogramme monotone traduit un processus aléatoire sans échelle caractéristique (ex. : turbulence dans les fluides). S'il existe une échelle caractéristique  $\underline{h}_0$ , le variogramme présentera alors un palier atteint pour cette distance  $\underline{h}_0$ . Cette dernière est encore appelée portée, et correspond à la longueur ou distance de corrélation que l'on définit à partir de la covariance  $K(\underline{h})$  si celle-ci existe.

Plusieurs paliers peuvent être présents dans le variogramme. Ils sont alors le signe de structures emboîtées ou gigognes.

La continuité et la régularité dans l'espace de  $Z(\underline{x})$  s'expriment par le comportement du variogramme au voisinage de l'origine. Par ordre de régularité décroissante, on peut observer trois types :

- Parabolique (Figure 1.a) :

$D(\underline{h})$  est deux fois dérivable en  $h = 0$ .  $Z$  est alors dérivable en moyenne quadratique, donc présente un haut degré de régularité dans l'espace.

- Linéaire (Figure 1.b) :

$D(\underline{h})$  est continue en  $h = 0$ , mais non dérivable.  $Z$  est continue en moyenne quadratique, mais non dérivable, donc moins régulière.

- Effet de pépite (Figure 1.c) :

$D(\underline{h})$  est discontinue à l'origine.  $Z$  n'est même pas continue en moyenne quadratique et est donc très irrégulière.

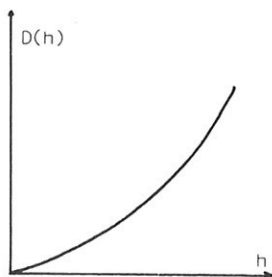


Figure 1.a

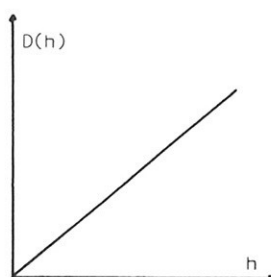


Figure 1.b

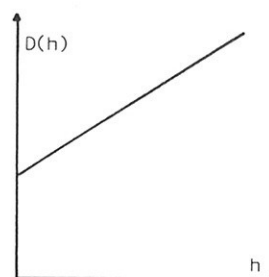


Figure 1.c

Figure 1

Types de comportement à l'origine du variogramme (parabolique, linéaire, avec effet de pépite)

### 2.3. Genèse d'un effet de pépite

L'effet de pépite est une réminiscence d'une structure dont les dimensions sont bien inférieures à l'échelle à laquelle on travaille. Les caractéristiques de cette structure ne sont plus perceptibles, et l'échelle supérieure n'a conservé qu'un paramètre unique la constante de pépite, qui donne une sorte de mesure globale indifférenciée de "l'intensité" de cette structure dépassée.

Soit une structure primaire de dimension  $a$  existant seule, et soit la variable correspondante  $Z(\underline{x})$ , une réalisation de la fonction aléatoire  $Z(\underline{x})$  stationnaire d'ordre 2. Alors, le variogramme  $D_1(\underline{h})$  présente un palier de portée  $a$ , et s'exprime en fonction de la covariance :

$$D_1(h) = K(0) - K(h) \quad (7)$$

Si maintenant, à cette structure primaire, se superpose une structure secondaire de dimensions beaucoup plus grandes, on devra en tenir compte en ajoutant une deuxième composante  $D_2(h)$ , qui représente la structure secondaire et ne varie qu'avec une extrême lenteur à l'échelle  $a$  de la première structure (Figure 2) :

$$D(h) = D_1(h) + D_2(h) = K(0) - K(h) + D_2(h) \quad (8)$$

Au voisinage de l'origine,  $D(h)$  possède une zone de croissance très rapide, dont la dimension est de l'ordre de  $a$ . A l'échelle de la structure secondaire,  $D(h)$  présentera donc un effet de pépité d'amplitude  $K(0)$ . L'effet de pépité apparaît comme la schématisation de toutes les structures de portée petite vis-à-vis de l'échelle d'observation.

En particulier, l'effet de pépité traduit le bruit de la mesure, caractéristique du capteur. Si l'on suppose que l'on observe  $Z^*(x)$ , qui est une mesure de  $Z(x)$  entachée d'une erreur  $e(x)$ , alors le variogramme observé  $D^*(h)$  est la somme des variogrammes de  $Z(x)$  et de  $e(x)$ , auxquels s'ajoute un terme croisé :

$$D^*(h) = D(h) + D_e(h) + E \{ [Z(x+h) - Z(x)] [e(x+h) - e(x)] \} \quad (9)$$

Si l'on suppose l'erreur stationnaire, sans corrélation spatiale (bruit blanc) et indépendante de la variable  $Z(x)$ , alors :

$$D^*(h) = D(h) + K_e(0) \quad (10)$$

La variance de l'erreur se répercute sur le variogramme comme une constante de pépité additionnelle.

#### 2.4. Lissage et variogramme

On définit la régularisée  $Z_p(x)$  d'une fonction  $Z(x)$  par une fonction de pondération  $P(x)$  comme le produit de convolution :

$$Z_p(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} Z(x+y) P(y) dy = Z * P \quad (11)$$

La régularisée est donc le résultat d'un lissage par moyenne mobile pondérée par la fonction  $P(y)$ . On montre que  $Z_p(x)$  a même espérance que  $Z(x)$ , pourvu que :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} P(y) dy = 1 \quad (12)$$

On montre également que, pour toute fonction aléatoire dont les accroissements sont stationnaires et sans condition d'existence sur la covariance, la régularisée répond encore à l'hypothèse intrinsèque, et le variogramme  $D_p(h)$  de la régularisée est donné par :

$$D_p(h) = D * Q - A \quad (13)$$

où  $Q$  est le carré de convolution de  $P$ , et  $A$  une constante définie par  $D_p(0) = 0$ .

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} D(u) Q(u) du \quad (14)$$

Cette formule n'est pas très pratique, et on peut lui en substituer une plus simple, dans le cas où le noyau de convolution est l'indicatrice du domaine ou support de régularisation  $V(0)$  implanté en  $x = 0$  :

$$P(y) = \begin{cases} 1 & \text{si } y \text{ appartient à } V(0) \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (15)$$

Schématiquement, la régularisation est alors un lissage par moyenne arithmétique glissante sur la fenêtre  $V$ . Le variogramme  $D_V(h)$  de la régularisée est alors la variance de l'estimation de la valeur moyenne,  $Z_V(x)$ , de  $Z(x)$  sur le support  $V(x)$  par la valeur moyenne,  $Z_{Vh}(x+h)$ , de  $Z(x)$  sur le support  $V(x+h)$ , translaté de  $V(x)$  par le vecteur  $h$  :

$$D_V(h) = E \{ [Z_{Vh}(x+h) - Z_V(x)]^2 \} / 2 \quad (16)$$

Cette variance s'exprime également ainsi (Matheron, 1970) :

$$D_V(h) = \bar{D}(V, V_h) - \bar{D}(V, V) \quad (17)$$

où  $\bar{D}(V, V_h)$  désigne la valeur moyenne du variogramme ponctuel  $D(u)$  lorsque l'une des extrémités du vecteur  $u$  décrit le support  $V(x)$ , et l'autre extrémité le support  $V(x+h)$  :

$$\bar{D}(V, V_h) = (1 / VV_h) \int_V du \int_{V_h} D(u' - u) du' \quad (18)$$

et  $\bar{D}(V, V)$  désigne la valeur moyenne du variogramme ponctuel  $D(u)$  lorsque  $u$  reste confiné à  $V$  :

$$\bar{D}(V, V) = (1 / VV) \int_V \underline{du} \int_V D(\underline{u}' - \underline{u}) \underline{du}' \quad (19)$$

Dans le cas simple où V est un segment de longueur L, et où le variogramme est linéaire,  $D(h) = Ch$  avec  $C > 0$ .

$$\bar{D}(V, V_h) = (C / L^2) \int_0^L \underline{du} \int_h^{L+h} |u' - u| \underline{du}' \quad (20)$$

et en distinguant deux cas :

$$\begin{aligned} h > L \text{ ou } V \cap V_h &= \emptyset \\ h < L \text{ ou } V \cap V_h &\neq \emptyset \end{aligned}$$

l'équation (17) donne alors :

$$\begin{aligned} D_L(h) &= (C / 3L^2) h^2 (3L - h) & \text{si } 0 \leq h < L \\ &C [h - (L / 3)] & \text{si } h \geq L \end{aligned} \quad (21)$$

Le variogramme  $D_L(h)$  de la régularisée conserve, à un terme soustractif près, proportionnel à la taille du support de régularisation, le comportement linéaire de  $D(h)$  pour les distances supérieures ou égales à la taille du domaine de régularisation. Pour les distances inférieures, le variogramme de la régularisée est parabolique (Figure 3).

Puisque le variogramme conserve sous forme d'un effet de pépite une mesure globale des structures d'échelle inférieure au pouvoir résolvant du variogramme, on peut imaginer de déconvoluer celui-ci afin d'accéder aux structures inférieures. On peut ainsi espérer passer du variogramme  $D_{\sqrt{h}}$  calculé à partir d'une variable connue sur un pixel (support V) au variogramme ponctuel  $D(h)$ .

Deux obstacles s'opposent à cette démarche. Le premier est lié à l'analyse numérique et aux difficultés, notamment l'instabilité, de réaliser une déconvolution d'un variogramme expérimental. Le second est dû à la fonction de transfert du capteur, qui n'est pas linéaire en intensité. Un objet de dimension très inférieure à la taille du pixel, mais dont le signal est très intense, apparaîtra comme occupant entièrement le pixel au détriment de son environnement. Enfin, la réponse des objets est intégrée sur une certaine bande spectrale, parfois très large, et cette réponse dépend de la nature même des objets qui n'ont pas tous la même signature spectrale.

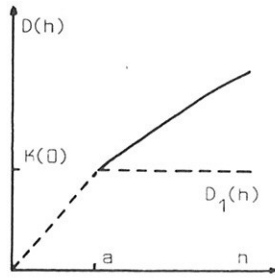


Figure 2

Genèse d'un effet de pépite : a est la portée de  $D_1(h)$

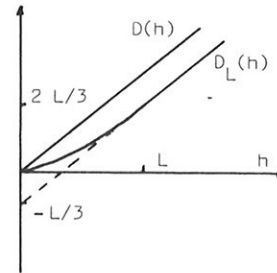


Figure 3

Variogramme linéaire  $D(h)$  et sa régularisée  $D_L(h)$

### 2.5. Transformée de Fourier et variogramme

L'usage de la transformée de Fourier est plus répandu que celui du variogramme. On peut relier ce dernier au spectre de variance E dans l'espace des vecteurs d'onde  $\underline{k}$ . Pour une variable aléatoire stationnaire d'ordre 2, on sait exprimer D en fonction de la covariance :

$$D(h) = K(0) - K(h)$$

la covariance s'exprimant elle-même en fonction de  $E(\underline{k})$ .

Pour un champ monodimensionnel, on obtient :

$$D(h) = \int_0^\infty (1 - \cos 2 \pi kh) E(k) dk$$

et pour un champ isotrope bidimensionnel :

$$D(h) = 2 \int_0^\infty [1 - J_0(hk)] E(k) dk$$

où  $J_0$  est la fonction de Bessel de première espèce d'ordre 0.

A l'aide de ces relations, on peut montrer que

si  $E(k) \sim k^{-n} \quad n > 1$

alors  $D(h) \sim h^{-p} \quad \text{avec } n = p + 1$

Si le champ étudié présente une certaine périodicité, celle-ci se traduira par une série de pics (fondamental + harmoniques) dans le spectre  $E(k)$  et par une série de bosses dans le variogramme  $D(h)$ . Il vaut toutefois mieux utiliser le spectre de variance pour mettre en évidence les phénomènes périodiques.

### 3. ESTIMATION DU BRUIT AFFECTANT LES IMAGES SATELLITAIRES

Pour les mesures satellitaires, nous pouvons distinguer trois "incertitudes" :

- l'incertitude absolue, qui est l'écart entre la vraie valeur de la variable et la valeur mesurée par le capteur. Elle dépend de la physique des problèmes examinés, et en particulier de l'absorption du signal par l'atmosphère ;
- la précision nominale, qui est caractéristique du pouvoir séparateur du radiomètre et de la discrétisation des mesures. Cette précision dépend généralement du niveau du signal d'entrée ;
- le bruit de mesure, qui caractérise la dispersion des mesures radiométriques pour un même signal d'entrée.

C'est ce dernier que nous allons examiner. Il est usuellement estimé par transformée de Fourier, mais l'allure très accidentée de cette dernière est très difficilement exploitable dans les grands nombres d'ondes. En-dehors des considérations déjà évoquées au paragraphe 2 et relatives aux hypothèses sur la fonction aléatoire étudiée, le variogramme offre une invariance totale vis-à-vis des erreurs systématiques (par exemple : dérive dans le temps des caractéristiques d'un capteur). En outre, sa détermination expérimentale est beaucoup moins perturbée que celle de la transformée de Fourier par de grandes variations aléatoires du signal et présente par conséquent une meilleure lisibilité.

Il est évident que la texture du bruit de mesure ne peut être appréciée que si l'intensité de ce bruit n'est pas masquée par l'intensité des structures propres au phénomène étudié. Si ce n'est pas le cas, on ne tirera du variogramme que la constante de pépité qui est égale à la variance du bruit, et ceci même en présence de fortes variations du signal utile.

Deux exemples d'estimation de la variance du bruit sont présentés ci-après. Ils concernent les capteurs AVHRR et CZCS, mais cette technique a été utilisée au CTAMN à propos de la plupart des capteurs mis en service dans le monde, aéroportés et spatiaux, actif et passifs.

#### 3.1. Estimation du bruit du capteur AVHRR/NOAA

Les résolutions thermiques du capteur AVHRR sont respectivement, pour les canaux 3, 4 et 5, de 0,05°C, 0,09°C et 0,09 à 23°C. D'après la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), la différence de température équivalente au bruit est de 0,12°C à cette même température et pour les trois canaux pré-cités. Pour les deux canaux visibles (1 et 2), le rapport signal sur bruit, noté S/N, est égal à 3. Le calcul de variogrammes sur des images AVHRR permet d'une part de vérifier si les spécifications de la NOAA sont respectées, et d'autre part d'estimer l'influence du vieillissement du capteur.

La Figure 4 présente des exemples de variogrammes pour différents canaux AVHRR. Malgré leurs formes très diverses traduisant les variations spatiales du signal, ces variogrammes ont tous une origine commune pour chaque canal.

Le Tableau 1 présente les valeurs moyennes de l'écart-type du bruit (racine carrée de la constante de pépité). Trois exemplaires du capteur AVHRR (satellites NOAA-6, 7 et 8) ont été examinés. Ce Tableau démontre que les spécifications de la NOAA sont respectées pour le canal 2, mais pas toujours pour le canal 1. Il y a également une légère décroissance des performances avec le temps. Le canal 3 a toujours posé problème également, et nous n'en parlerons pas. Quant aux canaux infra-rouge 4 et 5, le bruit est nettement inférieur à la résolution thermique, et ce avec une grande stabilité dans le temps. Ceci est une confirmation quantitative de la très bonne qualité visuelle des images.

Satellite		NOAA-6		NOAA-7		NOAA-8
Age (ans)		1,5	5	2	3	1
Canal						
VIS	1	2,550	2,750	2,320	2,950	2,820
NIR	2	3,280	4,000	2,590	3,500	2,920
IR	3	0,056	0,133	0,110	0,380	0,420
IR	4	0,060	0,064	0,044	0,040	0,050
IR	5	0,060	0,064	0,049	0,048	0,050

Tableau 1

Valeurs moyennes de l'écart-type du bruit des 5 canaux AVHRR.  
 Pour les canaux 1 et 2, les valeurs indiquent un rapport signal/bruit,  
 et, pour les autres, une différence de température équivalente au bruit en °C.  
 (In Heyraud, 1985).

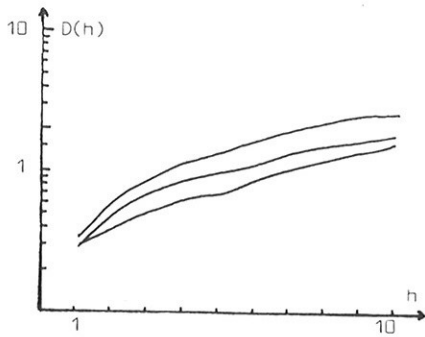


Figure 4.a - Canal 1 (Visible)

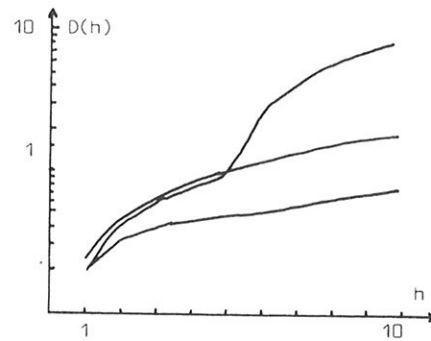


Figure 4.b - Canal 2 (Proche IR)

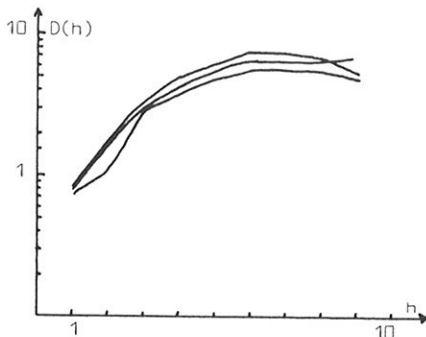


Figure 4.c - Canal 3 (IR moyen)

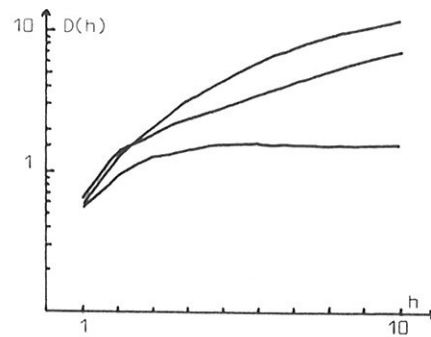


Figure 4.d - Canal 5 (IR)

Figure 4

Exemples de variogrammes d'images AVHRR/NOAA pour l'estimation du bruit de mesure (In Heyraud, 1985)

### 3.2. Estimation du bruit du capteur CZCS/NIMBUS-7

La démarche est la même que pour le capteur AVHRR. On a également tenu compte des quatre valeurs de gain possibles. Le **Tableau 2** présente les valeurs moyennes du rapport signal sur bruit. Les spécifications de la NASA sont largement respectées, sauf pour le canal thermique 6, qui est assez bruité. En règle générale, il y a une décroissance du rapport signal/bruit avec le temps.

Année	1979	1980	1981	1982	1983	Spécifications NASA
Canaux						
1	276	268	211	218	197	> 150
2	289	277	201	201	191	> 140
3	256	243	174	192	159	> 125
4	148	131	126	123	112	> 100
5	241	348	239	284	348	> 100
6	0,28	0,28	0,28	0,30	0,57	0,22

Tableau 2

Valeurs moyennes du rapport signal sur bruit pour les 5 premiers canaux et de l'écart-type du bruit en °C pour le canal 6 en fonction du temps (In Heyraud, 1985).

## 4. THERMOGRAPHIES SATELLITAIRES ET TURBULENCE OCEANIQUE

L'analyse statistique de la structure turbulente du champ de température à moyenne échelle montre que la température est un traceur passif et confirme l'utilisation d'une équation d'advection instationnaire pour décrire le champ thermique (Wald, 1985).

Cette analyse a été effectuée à l'aide de variogrammes calculés sur des thermographies satellitaires. Dans cette étude, toutes les échelles sont présentes. Aussi le variogramme sera très régulier ; il sera approché par une loi en puissance dont l'exposant offre un très grand intérêt en turbulence, car définissant la manière dont les transferts d'énergie s'effectuent entre les différentes échelles.



La théorie de turbulence quasi-géostrophique de Blumen (1978) qui s'applique à la surface de l'océan suppose la conservation simultanée de l'énergie totale du système et de l'énergie potentielle à la surface. Ces hypothèses entraînent une cascade de cette dernière vers les plus grands nombres d'ondes. Le spectre de l'énergie potentielle disponible en fonction du nombre d'ondes horizontal  $k$  suit une loi en  $k$  de puissance d'exposant  $-5/3$ . La densité spectrale d'un scalaire passif suivra une loi similaire (Lesieur, Sadourny, 1981).

Vingt-cinq images provenant soit du capteur VHRR/NOAA-5, soit du capteur HCMR/AEM-1 et couvrant la Méditerranée et l'Atlantique Nord-Est ont été analysées pour leur contenu aléatoire, et les variogrammes correspondants ont été calculés (Deschamps et al., 1981 ; Wald, 1980). La Figure 5 présente des exemples de ces variogrammes.

Les résultats montrent que le variogramme  $D_{TT}(h)$  du champ turbulent thermique peut s'écrire, dans le domaine d'échelle 3 - 100 km :

$$D_{TT}(h) = D_{TT}(h, \mu) = A(\mu) h^{n-1}$$

où  $h$  désigne l'échelle et  $\mu$  l'angle polaire. L'anisotropie du champ de température est donc confinée dans l'amplitude de la fonction de structure, tandis que la valeur de l'exposant,  $n-1$ , est isotrope. A ce variogramme correspond, dans le cas homogène, une densité spectrale de variance de température :

$$E_T(k, \mu) = B(\mu) k^{-n}$$

La valeur de  $n$  varie entre 1,5 et 2,3 avec une valeur moyenne de 1,8 très proche de  $5/3$ . Des résultats similaires ont été trouvés à partir de mesures aéroportées (Saunders, 1972 ; Liu, Katsaros, 1984) ou par bateau (Fieux et al., 1978), et cet ensemble montre que la température se comporte comme un traceur passif.

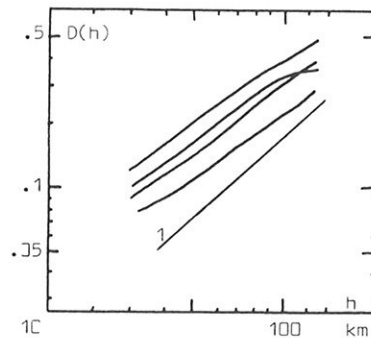


Figure 5

Exemples de variogrammes calculés à partir d'images AVHRR/NOAA  
(In Wald, 1980).

## 5. VARIOGRAMMES ET FACIES LITHOLOGIQUES

Cette étude, présentée en détail par Gilli (1985), examine les relations entre différents faciès lithologiques et la texture du gradient de la topographie ou d'une image radar latéral. L'image radar peut être assimilée à une cartographie de la rugosité du sol, et traduit souvent le relief d'un secteur par le jeu des zones d'ombre ; elle est par conséquent très proche de l'image du gradient de topographie. La texture de ces images radar ou gradient est évaluée à l'aide de variogrammes.

L'étude a porté sur trois jeux de données :

- Une image de gradient de topographie, issue d'un modèle numérique de terrain du Nord-Limousin (France) à résolution de 80 m,
- Une image radar d'une zone côtière du Gabon (Port-Gentil - Azingo) à résolution de 100 m,
- Une image radar et une image de gradient de topographie issue d'un modèle numérique de terrain du Nord du Gabon (Mitzi) à résolution de 100 m.

Les variogrammes ont été calculés sur des parcelles entièrement situées au sein d'un même faciès lithologique. Ils sont similaires, quels que soient le type d'image ou la parcelle. Ils présentent tous un effet de pépite et un effet de trou (c'est-à-dire une brusque croissance initiale du variogramme, suivie d'une décroissance), puis ont une allure pseudo-périodique (Figure 6).

L'effet de trou traduit l'alternance des zones sombres et éclairées. L'abscisse du premier maximum caractérise la taille de cette alternance ; quant à la valeur en ordonnée, elle traduit la dynamique des pentes associées aux secteurs sombres et éclairés.

L'étude montre que les variogrammes des images de gradient de topographie et des images radar caractérisent bien les ensembles géologiques (Gilli, 1985), excepté lorsque le relief est accidenté et de fort dénivelé, ainsi qu'à faciès relativement homogène (zone Nord Gabon). Dans ce dernier cas, le variogramme est essentiellement le reflet de l'information morphologique, et ne traduit plus la lithologie.

En ce qui concerne les deux autres zones, les variogrammes ont été réduits à trois paramètres : la pseudo-période, l'échelle du premier maximum local du variogramme, et l'intensité de ce maximum. Il a été trouvé que la pseudo-période associée à l'échelle du premier maximum caractérisait les formations lithologiques étudiés (granitiques et sédimentaires), sans aucune confusion. Ces

deux paramètres sont relativement insensibles aux variations géomorphologiques. L'intensité du premier maximum reflète l'état d'altération de la roche : plus l'intensité est élevée, plus la roche est dure. Il est ainsi montré que l'analyse texturale, représentée par le variogramme, permet d'effectuer une classification lithologique des images radar.

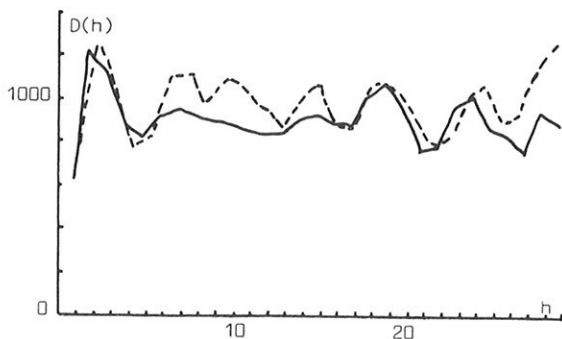


Figure 6.a - Faciès à texture fine (calcaire)

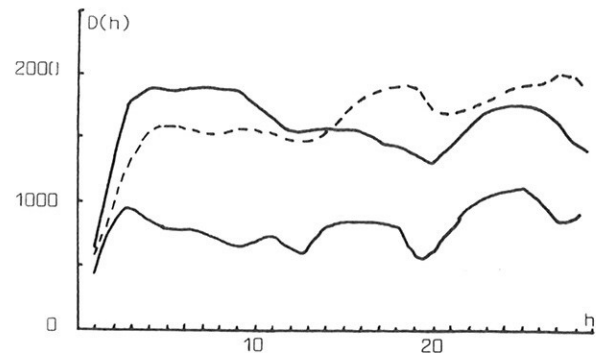


Figure 6.b - Faciès à texture grossière (migmatites)  
La valeur du premier maximum local décroît lorsque le degré d'altération croît.

Figure 6

Exemples de variogrammes d'image radar

## 6. ANALYSE DE TEXTURE ET LISSAGE OPTIMAL DES IMAGES

Dans l'étude précédente, la caractérisation des faciès lithologiques a été effectuée de manière déterministe en trouvant une relation simple entre les faciès et trois paramètres décrivant le variogramme. Ce nombre de paramètres peut être augmenté en utilisant l'analyse des correspondances.

Afin d'effectuer un lissage optimal de thermographies très bruitées, c'est-à-dire d'éliminer le bruit de mesure tout en conservant la texture, Albuissou (1976) a tout d'abord effectué une typologie de la texture. Un variogramme moyenné sur toutes les directions est calculé sur une fenêtre glissante inscrite dans l'image. Cet ensemble important de variogrammes est réduit en utilisant l'analyse des correspondances, et l'on définit ainsi des zones de texture similaire.

L'analyse des correspondances utilise la métrique du  $\chi^2$ , qui introduit dans ce cas certaines confusions dans le regroupement des variogrammes. En effet, la distance du  $\chi^2$  est une distance de similarité qui devient nulle pour deux vecteurs proportionnels. D'une façon générale, deux variogrammes affines auront même représentation dans l'espace factoriel. Ce défaut est pallié en utilisant un codage disjonctif complet. Pour cela, on remplace chaque composante d'un variogramme par un code d'appartenance à une classe d'isopopulation, en veillant à donner plus d'importance aux petites échelles, afin d'utiliser pleinement les propriétés du comportement à l'origine du variogramme.

Une fois les variogrammes regroupés et l'image segmentée, une image non bruitée est estimée en utilisant le krigeage en tant qu'opérateur de lissage. Cette opération revient à construire une fonction aléatoire dérivée de l'image initiale, présentant les mêmes variogrammes, mais pour lesquels l'effet de pépite aura disparu. Cette image dérivée conserve la texture de l'image initiale.

La typologie de texture définie précédemment fournit un variogramme moyen par groupe de texture. La construction de l'image lissée s'effectue par fenêtre glissante, et en utilisant le variogramme moyen du groupe auquel appartient la fenêtre. Ainsi, en tenant compte de la segmentation de l'image en zones similaires du point de vue de la texture et de la texture locale, on réalise un lissage optimal de l'image n'éliminant que le bruit de mesure.

## 7. ETUDE COMPARATIVE DE QUELQUES SIGNATURES DE TEXTURE ISSUES DES VARIOGRAMMES

En reprenant la démarche exposée précédemment, on peut imaginer de classer les différents objets présents sur une image satellitaire en fonction de leur texture. Le principe est le suivant : calculer sur chaque objet des variogrammes, réduire éventuellement chaque variogramme à quelques paramètres (signature de texture), puis classer, par une méthode de classification, ces différentes signatures.

Sarrat (1977) a proposé et comparé quatre signatures de texture issues des variogrammes. Afin d'effectuer la comparaison, des blocs de texture homogène ont été extraits d'images Daedalus et équi-répartis dans huit classes différentes. Sur chacun de ces blocs  $64 \times 64$ , cinq variogrammes ont été calculés : deux suivant lignes et colonnes, deux suivant les diagonales, et un en intégrant selon l'angle polaire. Pour chaque bloc, quatre signatures sont calculées :

### 7.1. Variogrammes directionnels

Les valeurs d'un variogramme directionnel sont ramenées à six paramètres en privilégiant le comportement à l'origine du variogramme. Ces paramètres sont respectivement les deux premières valeurs du variogramme, les moyennes des respectivement troisième et quatrième valeurs et de la cinquième à la huitième valeur, la moyenne et l'écart-type de la partie du variogramme pour les échelles supérieures à la portée.

### 7.2. Variogramme moyen (Intégration sur l'angle polaire)

La signature est constituée des 24 premières valeurs du variogramme intégré selon l'angle polaire.

### 7.3. Variogramme représentant la direction privilégiée

La direction privilégiée est celle qui prédomine dans la texture considérée. Un critère de sélection complexe définit alors le variogramme la représentant le mieux, et les 24 premières valeurs de ce variogramme constituent la troisième signature.

### 7.4. Variogrammes factoriels

On veut disposer d'une signature dont les paramètres seraient les coordonnées des quatre variogrammes directionnels sur une base de variogrammes typiques. On peut envisager de décomposer les variogrammes sur une base de fonctions orthogonales dont la dimension peut devenir importante. Sarrat a préféré effectuer, pour chaque direction, une analyse des correspondances entre l'ensemble des échantillons de texture et l'ensemble des variogrammes dans cette direction. La signature est alors composée des six premières composantes factorielles sur chacune de ces directions, soit 24 paramètres.

L'aptitude de chacune de ces signatures à distinguer plusieurs types de texture est ensuite étudiée en les soumettant au même algorithme de classification. En fait, plusieurs tests ont été réalisés en utilisant méthode supervisée (Nuées Dynamiques) et méthode non supervisée (Freeman), distance euclidienne et distance du  $\chi^2$ . Il a été trouvé que les meilleures classifications étaient obtenues à l'aide d'une méthode non supervisée, utilisant la distance du  $\chi^2$ .

Le résultat de cette comparaison est que la première signature (directionnel) est sensiblement meilleure que la quatrième (factoriel), qui distance la troisième (direction privilégiée) et la deuxième (moyenne). Dans la meilleure classification réalisée, on n'a obtenu que 17 % de confusion entre classes.

## 8. CONCLUSION

Nous avons présenté quelques-uns des travaux effectués dans les domaines très divers, et concernant l'étude de la texture d'images de télédétection. Pour chacune des cinq études exposées, le variogramme s'est imposé comme le meilleur descripteur de la texture. Le variogramme est réduit à un certain ensemble de paramètres. Le nombre et la définition de ces paramètres sont très différents selon les études, mais on retiendra que les valeurs du variogramme pour les plus petites échelles sont généralement privilégiées, afin d'utiliser pleinement les propriétés du comportement du variogramme à l'origine.

## REFERENCES

- ALBUISSON M. (1976) - Analyse de texture et lissage optimal des images thermographiques par satellite. Thèse, Institut de Statistique des Universités de Paris, Paris-VI.
- ALBUISSON M., MONGET J.M., BORDET J.P. (1974) - Pattern recognition of structure functions as an aid for understanding the morphology of two dimensional field data. In : Proceedings of the Second Joint Congress on Pattern Recognition, Copenhagen, 460-464.
- ALBUISSON M., MONGET J.M. (1975) - The structure function as a criterion for data quality assessment of oceanographic time-series, MODE News, Vol. 79.
- BLUMEN W. (1978) - Uniform potential vorticity flow, Part 1 : Theory of wave interactions and two dimensional turbulence. Journal of Atmospheric Sciences, 35, 774-783.
- DESCHAMPS P.Y., FROUIN R., WALD L. (1981) - Satellite determination of the mesoscale variability of the sea surface temperature. Journal of Physical Oceanography, 11, 6, 864-870.
- FIEUX M., GARZOLI S., GONELLA J. (1978) - Contribution à la connaissance de la structure spatiale des courants superficiels au large du Golfe du Lion. Journal de Recherches Océanographiques, 3, 4, 13-26.
- GILLI J. (1985) - Analyse numérique de l'image radar du secteur Port-Gentil - Azingo, Lambarene Ouest : contribution à l'étude géologique du bassin sédimentaire gabonais. Thèse 3ème Cycle, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris - Université de Nice.
- HEYRAUD P. (1985) - Analyse statistique appliquée à l'imagerie satellitaire. Internal report, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, CTAMN/85/R/28.
- LESIEUR M., SADOURNY R. (1981) - Satellite-sensed turbulent ocean structure. Nature, 294, 673.
- LIU W.T., KATSAROS K.B. (1984) - Spatial variations of sea surface temperature and flux-related parameters measured from aircraft in the Jasin experiment. Journal of Geophysical Research, 89, C6, 10651-10644.
- MATHERON G. (1970) - La théorie des variables régionalisées et ses applications. Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 212 p.
- SARRAT D. (1977) - Analyse de la texture des images de réflectance terrestre. Thèse 3ème Cycle, Université de Toulouse.

SAUNDERS P.M. (1972) - Space and time variability of temperature in the upper ocean. Deep-Sea Research, 19, 467-480.

WALD L. (1980) - Utilisation du satellite NOAA-5 à la connaissance de la thermique océanique. Etude de ses variations saisonnières en mer Ligure et de ses variations spatiales en Méditerranée. Thèse 3ème Cycle, Université Paris-VI.

WALD L. (1985) - Apport de la télédétection spatiale en infrarouge proche et moyen à la connaissance du milieu marin : relations entre le champ de température et le champ de courant, observations de l'état de surface et mesures de la vitesse du vent, la dynamique de la couche superficielle en mer Ligure. Thèse d'Etat, Université de Toulon et du Var.