

GODARD (V.), SIMON (L.) - 1998 - Analyse des structures forestières des forêts de Saint-Gobain et Coucy-Basse (Aisne, France) à l'aide de l'imagerie satellitaire et de l'enquête de terrain : choix d'un pas d'échantillonnage. VII^{es} journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF. Sainte-Foy, 13-17 octobre 1997. Éd. par DUBOIS J.M.M. et al. in : *La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes*. Montréal (Qué., Canada), AUPELF-UREF, Col. Universités francophones, Actualité scientifique : 45-53.

Analyse des structures forestières des forêts de Saint-Gobain et de Coucy-Basse (Aisne, France) à l'aide de l'imagerie satellitaire et de l'enquête de terrain : choix d'un pas d'échantillonnage

Vincent GODARD¹ et Laurent SIMON²

1 Université de Paris 8 et Centre de Biogéographie-Écologie UMR 180 CNRS - ENS
Le Parc, 92211 Saint Cloud Cedex, France
Téléphone : 33 (0)1 41 12 35 41 / Télécopieur : 33 (0)1 41 12 35 40 /
CÉ : vgodard@univ-paris8.fr

2 Université de Paris 1 et Centre de Biogéographie-Écologie UMR 180 CNRS - ENS
Le Parc, 92211 Saint Cloud Cedex, France
Téléphone : 33 (0)1 41 12 35 34 / Télécopieur : 33 (0)1 41 12 35 40 /
CÉ : biogeo@ens-fcl.fr

Résumé

L'utilisation, dans le cadre d'un inventaire des structures forestières, de méthodes d'échantillonnage relevant des sondages spatiaux, où l'échantillon est une surface élémentaire appelée ici segment, nécessite de déterminer la taille de l'échantillon, le nombre de ces échantillons et leur espacement. Dans la mesure où nous souhaitons comparer nos résultats à ceux de l'Inventaire Forestier National (IFN), nous avons calé la taille des segments sur ceux de l'IFN, dont la surface est d'un hectare. En revanche, l'espacement de nos échantillons était incompatible avec celui, trop lâche, de l'IFN, déterminé, en l'occurrence, pour l'échelle départementale. Nous avons donc eu recours à une technique de géostatistique, l'analyse variographique, ici sur imagerie satellitaire, pour déterminer le pas d'échantillonnage des segments. Avec des données satellitaires des capteurs HRV de SPOT, enregistrées à trois dates différentes et dans les deux modes (panchromatique et multibande), nous avons analysé et comparé la dépendance spatiale du secteur forestier public de Saint-Gobain/Coucy-Basse (Aisne, France) où devait se dérouler l'inventaire. L'analyse des variogrammes indique que le pas d'échantillonnage le plus adapté est d'au moins 900 m sur l'axe N-S et d'au moins 750 m sur l'axe E-O. Ce pas permet de tracer un carroyage systématique où, à l'intérieur de chaque maille, sera tiré aléatoirement un segment de un hectare, soit un taux de 0,85 p.100 correspondant à 76 segments répartis sur le massif forestier de Saint-Gobain/Coucy-Basse.

1. Introduction

Dans cet article nous présentons la phase préparatoire à l'enquête de terrain d'un inventaire des structures forestières, en termes de traitements sylvicoles, dans le massif forestier public des forêts domaniales de Saint-Gobain et de Coucy-Basse (département de l'Aisne, France). Le but de cet inventaire est de recenser et de localiser les modes de conduite (futaie, taillis et taillis sous futaie), la nature de la futaie (régulière ou équienne, irrégulière, jardinée), la répartition de la densité du couvert, la mono- ou la plurispécificité des peuplements, etc. Ce massif forestier représente 12 000 ha, dont seulement 8 900 ha sont gérés par l'Office National des Forêts (ONF). C'est cette dernière partie qui fait l'objet de notre étude.

La procédure d'échantillonnage utilisée relève des sondages spatiaux, où l'unité d'enquête est une surface élémentaire, appelée segment, et non un point sans dimension. L'image satellitaire y sert de base de sondages pour le tirage des segments. Elle sert aussi à améliorer les estimations issues de l'enquête de terrain et à cartographier les résultats. Cependant, la particularité des sondages spatiaux est qu'il faut non seulement déterminer le nombre d'échantillons mais également leur taille et leur espacement. Dans la mesure où nous souhaitons comparer nos résultats à ceux de l'Inventaire Forestier National (IFN) français, nous avons décidé de retenir la même taille d'unité d'échantillonnage au sol que celle utilisée par cet organisme, soit un hectare. Il restait donc à déterminer l'espacement optimal entre deux échantillons.

Le but est de ne pas surenquêter des paysages trop semblables car trop proches, tout en ayant quand même suffisamment de points d'inventaire. Pour cela, il ne nous était pas possible de reprendre la procédure d'inventaire IFN qui s'appuie sur l'étude par photo-interprétation puis enquête de terrain d'un tirage systématique sur photographies aériennes dont l'échelle de pertinence est celle du département. En effet, si le tirage initial sur photographies assure la représentativité de 30 à 40 ha de terrain par point-échantillon tiré, lors de la phase de photo-interprétation (CHEVROUX, 1988), la phase de terrain n'en visite plus que dix fois moins. Cela ne nous aurait permis, au mieux, que d'enquêter une trentaine de segments, ce que nous jugeons insuffisants pour constituer deux sous-groupes, l'un pour initier les classifications, l'autre pour les contrôler. Nous avons donc décidé, pour déterminer l'espacement des segments, d'analyser la diversité spatiale du massif forestier. Pour ce

GODARD (V.), SIMON (L.) - 1998 - Analyse des structures forestières des forêts de Saint-Gobain et Coucy-Basse (Aisne, France) à l'aide de l'imagerie satellitaire et de l'enquête de terrain : choix d'un pas d'échantillonnage. VII^{es} journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF. Sainte-Foy, 13-17 octobre 1997. Éd. par DUBOIS J.M.M. et al. in : *La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes*. Montréal (Qué., Canada), AUPELF-UREF, Col. Universités francophones, Actualité scientifique : 45-53.

faire, nous avons étudié l'homogénéité des peuplements forestiers avec un des outils de la géostatistique, l'analyse variographique sur imagerie satellitaire, puis nous avons comparé cette régularité sur plusieurs dates pour voir s'il y avait une variabilité dans le temps.

2. Matériel

Grâce à l'appui du Centre National d'Études Spatiales (CNES), nous avons pu disposer, à des tarifs très avantageux, de trois images satellitaires fournies par la société SPOT Images. Ces images, prises à trois dates différentes en mode panchromatique pour la première et multibande pour les deux autres, sont centrées sur le massif forestier. Il s'agit des scènes enregistrées par le capteur HRV-1 de SPOT-1 du 23-04-88 pour le mode panchromatique, par les capteurs HRV-1 de SPOT-1 du 06-05-93 et HRV-2 de SPOT-2 du 30-06-93 pour le mode multibande.

La majorité des traitements est effectuée sur des PC à l'aide du logiciel IDRISI. Il s'agit entre autres de tout ce qui concerne les corrections géométriques, radiométriques et masquage de la forêt non domaniale. Le calcul des variogrammes est réalisé sur des stations SUN à l'aide du logiciel TRIAS développé par des chercheurs du Centre d'Analyse et de Mathématique Sociale (CAMS) de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales (EHESS).

3. Méthodologie

La première étape consiste à délimiter la partie utile de la base de sondage, celle qui correspond à la zone forestière à enquêter, pour nous la forêt soumise (8 900 ha). Pour cela, nous avons d'abord numérisé la carte topographique au 1:25 000 de l'Institut Géographique National (IGN) français, couvrant en une seule feuille le massif forestier, pour saisir interactivement la vingtaine de points amers nécessaires aux corrections géométriques des images satellitaires. Ensuite, nous avons saisi les limites de la forêt soumise (gérée par l'ONF) afin d'éliminer par masquage les forêts privées, les terres agricoles, etc. des fichiers satellitaires préalablement géoréférencés.

La deuxième étape a consisté à mettre en réflectance ces fichiers pour les rendre comparables.

Enfin, la dernière étape consiste à calibrer la taille du segment sur la diversité des paysages forestiers pour que l'échantillon soit le plus diversifié et le plus nombreux possible. La méthode proposée s'appuie sur l'analyse variographique d'un certain nombre de bandes spectrales des capteurs HRV de SPOT sélectionnées en raison de leur pertinence radiométrique et thématique. Une comparaison des différents variogrammes permet d'appréhender l'évolution de la structure spatiale du paysage forestier, donc de la base de sondage, et d'évaluer le pas d'échantillonnage qui sert à la répartition de l'échantillon de segments sur l'ensemble de la zone d'étude. Nous avons, en effet, retenu un tirage systématique non aligné qui, comme cela est maintenant connu depuis le début des années 1960 (COCHRAN, 1963), offre les meilleurs résultats en terme de répartition, de précision et de fiabilité.

Présente depuis les années 1970 dans les sciences de la Terre, l'analyse variographique est un des outils de la géostatistique utilisé pour analyser la dépendance spatiale des échantillons entre eux. Son utilisation sur des données satellitaires est plus récente, elle date des années 1980.

Rappelons que les données satellitaires sont spatialement corrélées. Cela signifie que les voisins immédiats d'un pixel tiré au hasard lui sont en général plus ressemblant que des voisins plus lointains. Cette dépendance spatiale reflète l'extension des zones homogènes qui marquent les paysages à inventorier. Son étude permet de calibrer la taille des segments d'enquête (FOURNIER et al., 1997, GODARD, 1994) mais permet aussi de déterminer l'espacement entre les unités d'échantillonnage (CURRAN, 1988).

Pour connaître les distances caractérisant les changements de paysage, on tire un échantillon de points et l'on compare chaque point à son voisinage immédiat puis sur des distances de plus en plus grandes et cela dans un certain nombre de directions. On en tire une variance par distance et par direction que l'on représente en général à l'aide d'une courbe, le variogramme. La formule utilisée pour calculer cette variance est la suivante :

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

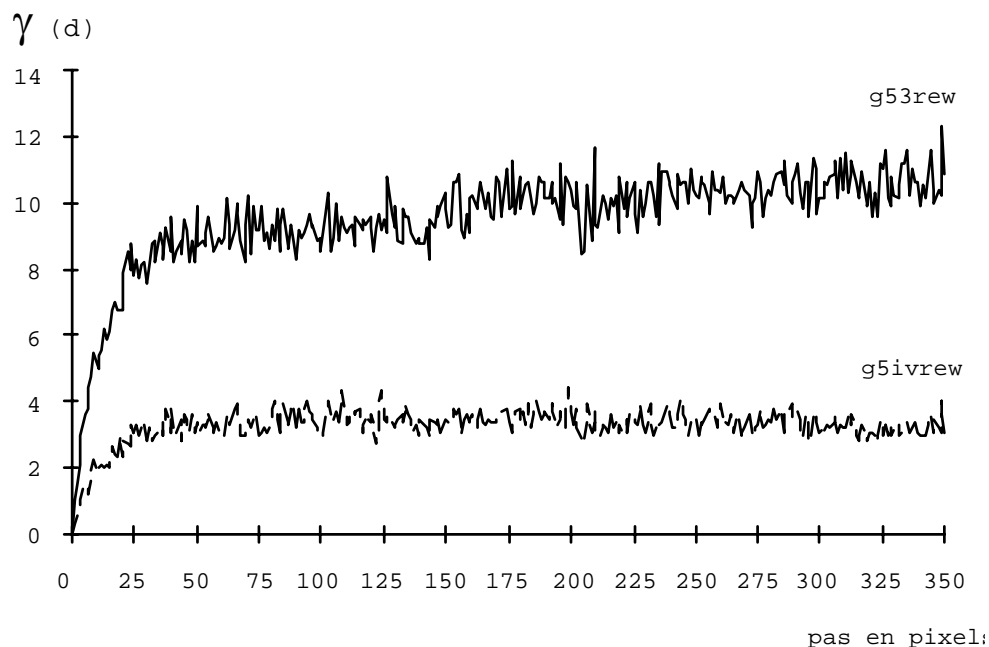
où y_i est la valeur radiométrique du premier point tiré au hasard, y_{i+d} la valeur radiométrique du deuxième point du couple pris à une distance "d" de y_i dans la direction "D" (DUPLAT et PERROTTE, 1981). La recherche des points d'inflexion sur la courbe informe des ruptures dans la dépendance spatiale et donc dans la continuité des paysages. Sur de grandes zones d'études, nous avons, jusqu'à présent, considéré que des segments dont la taille serait calée sur ces distances "d" devraient permettre une prise en compte satisfaisante de la diversité des paysages présents (FOURNIER et al., 1997 ; GODARD, 1994). En revanche, comme ici sur des secteurs plus restreints, et avec une taille de segment pré définie (1 ha), cette distance "d" permet d'espacer les segments pour que l'information qu'ils contiennent ne soit plus redondante et que de ce fait le plan d'échantillonnage soit allégé.

GODARD (V.), SIMON (L.) - 1998 - Analyse des structures forestières des forêts de Saint-Gobain et Coucy-Basse (Aisne, France) à l'aide de l'imagerie satellitaire et de l'enquête de terrain : choix d'un pas d'échantillonnage. VII^{es} journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF. Sainte-Foy, 13-17 octobre 1997. Éd. par DUBOIS J.M.M. et al. in : *La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes*. Montréal (Qué., Canada), AUPELF-UREF, Col. Universités francophones, Actualité scientifique : 45-53.

Enfin, pour calculer les variogrammes, la dépendance spatiale est analysée sur quatre directions (N-S, E-O, NO-SE et NE-SO) et sur des distances qui n'excèdent pas le tiers des sites d'étude. Seule, l'analyse des variogrammes N-S et E-O est présentée ici, car ce sont les deux directions retenues pour tracer le carroyage d'appui au tirage des segments.

4. Résultats

figure 1 : Variogrammes non ajustés de la direction E-O

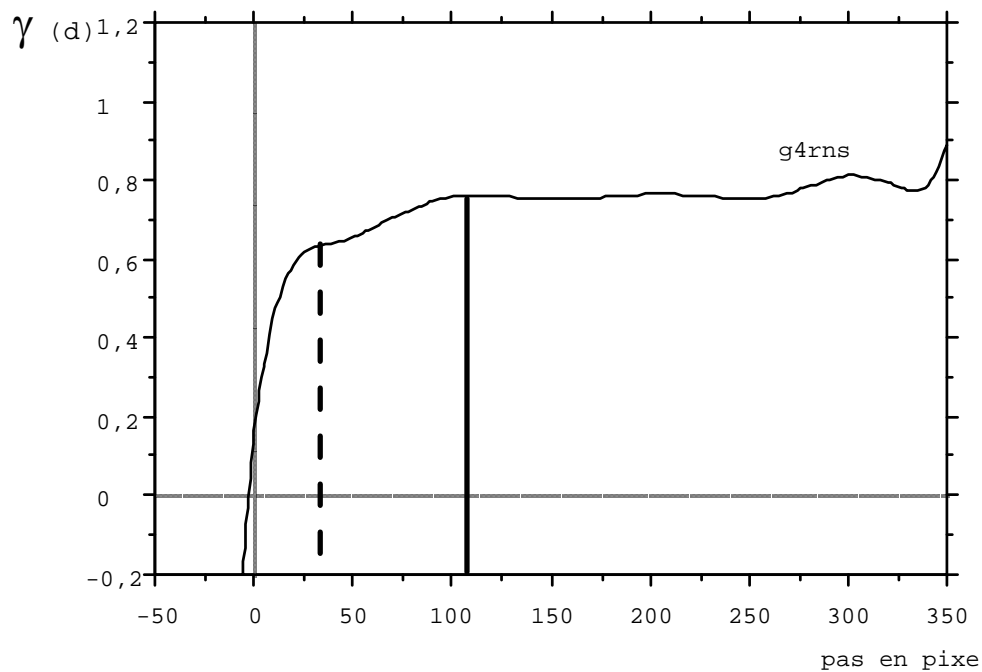
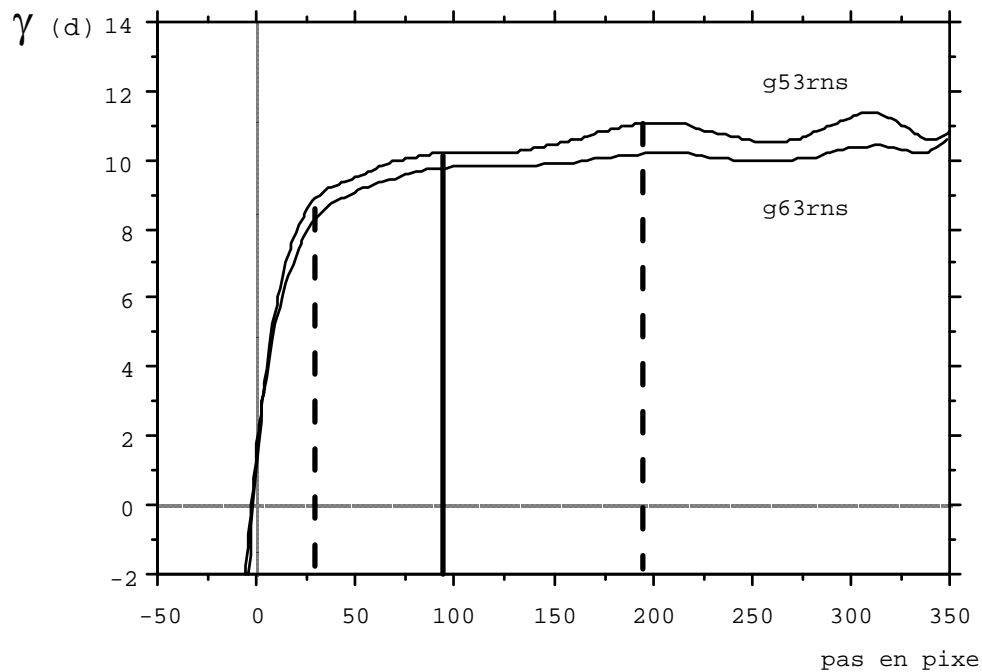


Il convient, dans un premier temps, de repérer pour chaque date la bande spectrale la plus pertinente, celle pour laquelle le variogramme indique la plus forte dynamique. C'est en général la même pour les quatre directions. Il faut également éliminer les canaux inutilisables car aspatiaux ou au contraire dotés d'une variance continue et indéfiniment croissante (CURRAN, 1988), à notre échelle. Comme cela est nettement visible sur la figure 1, la bande proche infrarouge (PIR) du HRV de SPOT montre une plus grande dynamique que le néocanal indice de végétation normalisé (IVN) qui a également été testé. En mode multibande, pour ces dates et ce paysage, les bandes du PIR (mai et juin 1993) se sont systématiquement montrées plus pertinentes que les autres bandes spectrales et néocanaux ; elles sont donc les seules à être étudiées et comparées entre elles et avec la bande panchromatique d'avril 1988.

À la lecture des variogrammes (figure 1), il ressort que l'aspect non lissé de ces courbes, lié à la technique d'échantillonnage qui les a établies, nuit à leur analyse. Il est donc recommandé de réaliser un ajustement. Certains auteurs préconisent des ajustements très performants issus des techniques de krigeage (McBRATNEY and WEBSTER, 1986 ; WEBSTER 1989) mais dont les programmes ne sont disponibles que sur des logiciels de statistiques spatiales comme GMap. Nous avons, pour notre part, opté pour un logiciel de statistique plus courant, Statview, dont les programmes de régressions polynomiales permettent des ajustements satisfaisant pour notre démarche. Ce sont ces courbes d'ajustement (régression polynomiale d'ordre 9 dans tous les cas) qui sont présentées sur les figures 2 et 3.

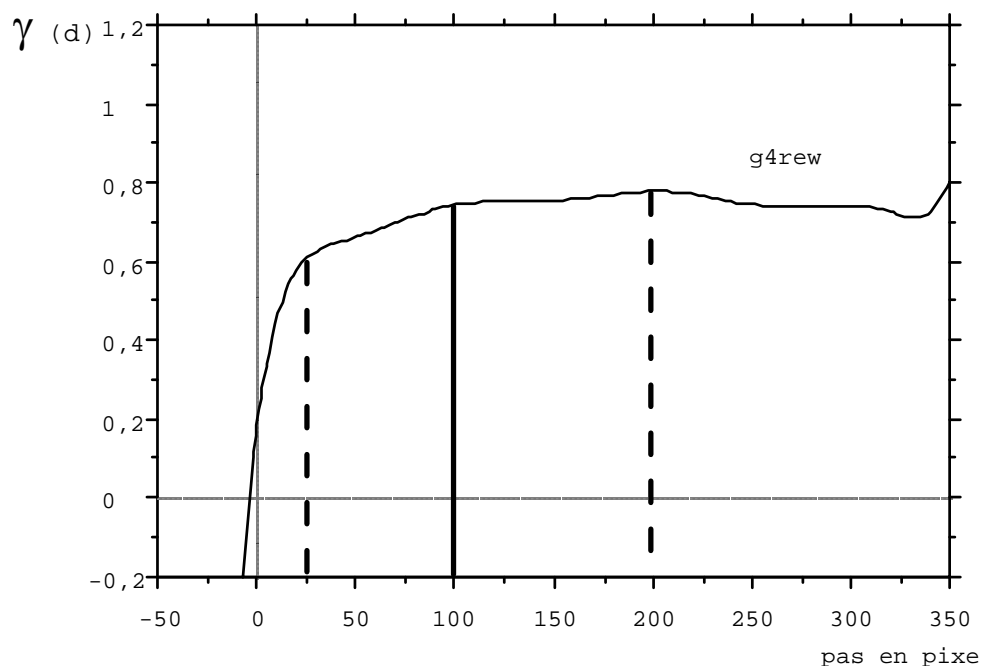
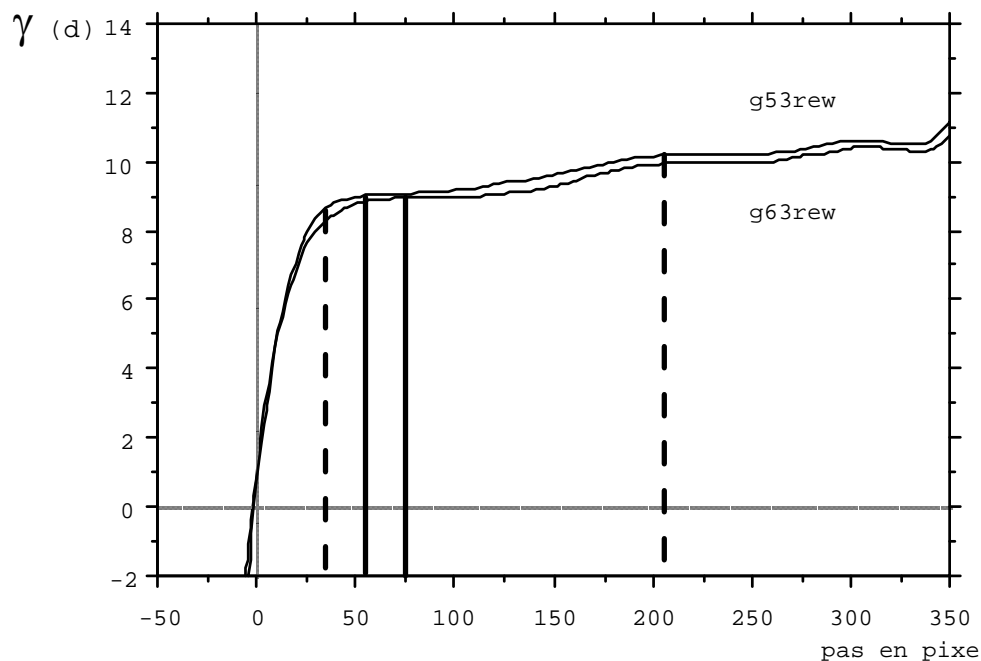
Il ressort de l'analyse des différents variogrammes, qu'après une croissance rapide à l'origine, la courbe s'infléchit et décrit un plateau plus ou moins sinueux (figures 2 et 3). Cela signifie que la diversité radiométrique, et donc thématique, croît rapidement sur les premières dizaines voire centaines de mètres et qu'ensuite cette diversité se stabilise, la corrélation entre les valeurs radiométriques devenant nulle. La rupture de pente sur le variogramme, lorsque la courbe se stabilise sur un palier, marque la dimension moyenne des peuplements homogènes forestiers. Cette distance est appelée la "portée". Si l'on espace les segments de l'échantillon d'une distance égale ou supérieure à celle de la portée, leur information ne sera pas redondante. La détermination de cette rupture de pente est effectuée de manière visuelle.

figure 2 : Variogrammes de la direction N-S



Ajustement polynomial d'ordre 9 avec pour : g53rns ($R^2=87,4\%$), g63rns ($R^2=86,4\%$) et g4rns ($R^2=63,8\%$)

figure 3 : Variogrammes de la direction E-O



Ajustement polynomial d'ordre 9 avec pour : g53rew ($R^2=88,2\%$), g63rew ($R^2=86,3\%$) et g4rew ($R^2=62\%$)

5. Discussion

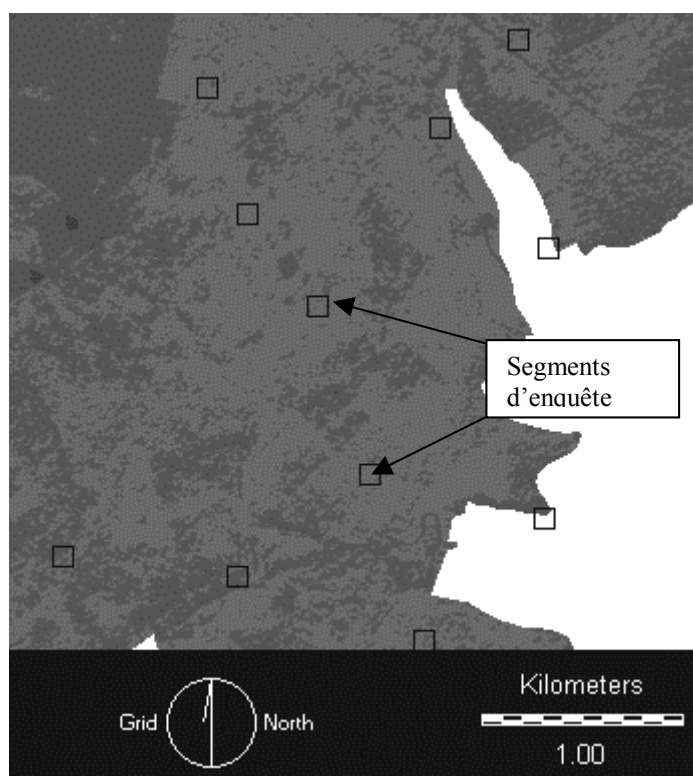
Les variogrammes ont été regroupés par direction pour faciliter leur interprétation. Cependant, celui de la bande panchromatique a toutefois été systématiquement isolé de ceux des bandes PIR en raison de sa trop faible dynamique (les valeurs de variance en ordonnées, figures 2 et 3).

Toujours en terme de dynamique, la courbe du mois de mai (g53ms ou ew) est, dans les exemples présentés, systématiquement au-dessus de celle du mois de juin (g63ms ou ew). La réponse spectrale de l'image de fin juin est plus uniforme et plus basse que celle de début mai, car le décalage phénologique et l'effet de sol sont annulés

GODARD (V.), SIMON (L.) - 1998 - Analyse des structures forestières des forêts de Saint-Gobain et Coucy-Basse (Aisne, France) à l'aide de l'imagerie satellitaire et de l'enquête de terrain : choix d'un pas d'échantillonnage. VII^{es} journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF. Sainte-Foy, 13-17 octobre 1997. Éd. par DUBOIS J.M.M. et al. in : *La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes*. Montréal (Qué., Canada), AUPELF-UREF, Col. Universités francophones, Actualité scientifique : 45-53.

dans la mesure où, à cette période et dans cette région, tous les arbres sont feuillus. Cette variabilité des réponses au cours de la saison, en revanche affecte peu les distances significatives mesurées sur les variogrammes. Sur le variogramme N-S (figure 2) des bandes PIR de mai (g53rns) et de juin (g63rns), il faut attendre un peu plus de 25 pixels, environ 30 pixels soit 300 m avec un pixel HRV de SPOT échantillonné à 10 m, pour voir la première rupture de pente significative. Cela indique que la plupart des peuplements homogènes ont une taille inférieure à 300 m. Cependant, la variance maximale de ce phénomène n'est réellement atteinte que pour une portée d'un peu moins de 100 pixels, soit environ 900 m. Il faudra donc dans cette direction espacer les segments d'au moins 900 m. Les sinuosités qui apparaissent ensuite sur la courbe de mai (g53rns) correspondent à des emboîtements de structure de second ou troisième ordre, blocs constitués de paysages homogènes deux à deux, ou plus. Le variogramme d'avril 88 (g4rns, figure 2), mode panchromatique, nous indique deux paliers, un premier palier de l'ordre de 30 pixels, soit 300 m, et un second à une distance de 100 pixels (1 000 m) proche de la portée déjà observée sur g53rns.

figure 4 : Semis des segments d'enquête sur un extrait de la carte IGN à 1 : 25 000



Il y a donc une forte concordance dans cette direction entre les données de 1988 et celles de 1993, mais concordance ne signifie pas égalité. Au final, une seule portée sera retenue pour déterminer le pas d'échantillonnage. La solution la plus judicieuse consiste à retenir la portée de la courbe qui connaît le meilleur ajustement, celle dont le coefficient de détermination (R^2) est le plus élevé. Pour cette direction, c'est g53rns qui a le coefficient de détermination le plus élevé (figure 2, $R^2 = 0,874$), c'est donc sa portée qui est retenue, soit 900 m.

Sur les variogrammes E-O (figure 3) des bandes PIR de mai (g53rew) et de juin (g63rew), une première rupture de pente se produit peu après 25 pixels, soit environ vers 300 m. Puis, le premier palier est atteint avec un léger décalage d'une quinzaine de pixels (150 m) entre les deux dates. La portée est d'environ 60 pixels mai (g53rew) et de 75 pixels pour juin (g63rew). Enfin, une légère reprise de variance se manifeste et laisse entrevoir une portée de second ordre vers 200 pixels (2 000 m) pour les deux courbes. Sur la bande du panchromatique (g4rew), la première rupture de pente se produit également vers 25 pixels, confirmant les observations réalisées précédemment, mais il faut attendre 100 pixels (1 000 m) pour atteindre un premier sommet d'ondulation (non observé sur g3rew), puis 200 pixels pour le deuxième sommet d'ondulation.

Pour cette direction, les concordances entre les dates restent correctes mais indiquent toutefois un décalage plus net que pour l'axe N/S. Est-elle plus sensible aux différences de stades phénologiques entre mai et juin 1993 ou, à l'action des forestiers entre 1988 et 1993 ? Rappelons que pendant cette période de cinq ans, le registre des ventes d'automne par adjudication de l'ONF indique que 196 parcelles sur les 754 du massif, soit 26 p.100, ont

GODARD (V.), SIMON (L.) - 1998 - Analyse des structures forestières des forêts de Saint-Gobain et Coucy-Basse (Aisne, France) à l'aide de l'imagerie satellitaire et de l'enquête de terrain : choix d'un pas d'échantillonnage. VII^{es} journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'AUPELF-UREF. Sainte-Foy, 13-17 octobre 1997. Éd. par DUBOIS J.M.M. et al. in : *La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes*. Montréal (Qué., Canada), AUPELF-UREF, Col. Universités francophones, Actualité scientifique : 45-53.

été concernées par des coupes et autres travaux, 21 l'ont d'ailleurs été plus d'une fois. Ici aussi, la sélection d'un pas d'échantillonnage unique impose de retenir la portée du variogramme dont l'ajustement est le plus élevé, à savoir, 750 m (figure 3, g_{53rew} , $R^2=0,882$)

Sur les variogrammes N-O/S-E et N-E/S-O (non représentés ici), la portée est d'environ 35 pixels, soit environ 500 m (la diagonale du pixel vaut 14,14 m). Les variogrammes révèlent l'anisotropie de ces paysages forestiers, toutes les directions n'ont pas la même dépendance spatiale, celle-ci va de 500 à 1 000 m selon les orientations. Pour des raisons pragmatiques, tirage informatisé des échantillons, la direction retenue pour établir la grille de sondage est N-S et E-O. La maille d'échantillonnage est donc de 900 m en abscisses et 750 m en ordonnées. C'est à l'intérieur de ce carroyage qu'est tiré aléatoirement chaque segment (tirage systématique non aligné). Une fois le tirage des segments effectué, ils sont reportés sur l'image numérisée d'une carte ou sur une image satellitaire pour constituer le support "graphique" de l'enquête (figure 4).

6. Conclusion

L'analyse variographique de fichiers satellitaires a permis de déterminer l'espacement des segments échantillon destinés à un inventaire des structures forestières. Pour faciliter le tirage, c'est un carroyage orienté N-S et E-O qui a été retenu. Son pas est de 900 m en abscisses et de 750 m en ordonnées. C'est à l'intérieur de chacune des mailles que l'on tire aléatoirement un segment assurant ainsi une répartition homogène et suffisante de l'échantillon sur l'ensemble du massif forestier. Les fichiers satellitaires, en raison de la forme du massif, couvrent une surface de 21 km (E-O) sur 14km (N-S). Cependant, sur les 394 mailles théoriques couvrant ces fichiers, seuls un peu plus de 80 segments "tomberont" en forêt. Seront-ils assez nombreux pour assurer une représentativité satisfaisante de l'ensemble des structures forestières identifiées lors de l'enquête ? Par extension, existe-t-il une taille minimale de zone d'étude en deçà de laquelle les contraintes d'espacement des segments, calculées par analyse variographique, réduisent par trop le nombre de segments, rendant impossible une représentation satisfaisante de l'ensemble des thèmes en particulier les plus petits ?

7. Remerciements

Nous remercions la société SPOT Image et le Centre National d'Études Spatiales pour nous avoir fourni les données HRV de SPOT dans le cadre du programme de soutien ISIS ainsi que H. GEROYANNIS et B. JULIEN-LAFERRIERE, de l'atelier PASTEL du Centre de Biogéographie, pour leur aide et leurs conseils.

8. Références

- CHEVROU, R.B.1988. *Inventaire forestier national. Méthodes et procédures*. Montpellier, Ministère de l'agriculture, Inventaire Forestier National, 105 p.
- COCHRAN, W.G. 1963. *Sampling techniques*. New-York, John Wiley and Son, 413 p.
- CURRAN, P.J. 1988. The Semivariogram in Remote Sensing: An Introduction. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 24, p. 493-507.
- DUPLAT, P. et PERROTTE, G. 1981. *Inventaire et estimation de l'accroissement des peuplements forestiers*. Paris, Office National des Forêts, 432 p.
- FOURNIER, Ph., GEROYANNIS, H. et GODARD, V. 1997. Analyse variographique de données satellitaires pour déterminer la taille des unités d'échantillonnage. Exemple d'un inventaire d'occupation du sol en milieu agricole et forestier. in : Deuxièmes rencontres de Théo Quant, Besançon, 4-5 octobre 1995. *Annales Littéraires de l'Université de Franche-Comté*, Cahiers de Géographie n° 35, p. 85-89.
- 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. *Bulletin de la SFPT*, Vol. 94-4, n°136, p. 33-44.
- INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL, 1980, Forêts de Saint-Gobain et de Coucy-Basse, Série Office National des Forêts, n°408, Paris, 2ème édition, 1:25 000.
- McBRATNEY, A.B. and WEBSTER, R. 1986. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Science*, Vol. 37, p. 617-639.
- WEBSTER, R., CURRAN, P.J. and MUNDEN, J.W. 1989. Spatial Correlation in Reflected Radiation from the Ground and Its Implications for Sampling and Mapping by Ground-Based Radiometry. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 29, p. 67-78.