

PREDIRE LA STRUCTURE DES FORETS TROPICALES HUMIDES CALÉDONIENNES : ANALYSE TEXTURALE DE LA CANOPEE SUR DES IMAGES PLÉIADES

Elodie Blanchard^{1,4}, Philippe Birnbaum², Christophe Proisy³, Thomas Ibanez¹,
Hervé Vandrot¹, Céline Chambrey¹, Vanessa Hequet⁴, Pierre Couteron³

1 : Institut Agronomique néo-Calédonien (IAC) - Diversité biologique et fonctionnelle des écosystèmes terrestres, Nouméa, Nouvelle-Calédonie. blanchard@iac.nc

2 : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD)-IAC-UMR AMAP, biologique et fonctionnelle des écosystèmes terrestres, Nouméa, Nouvelle-Calédonie.

3 : Institut de Recherche pour le Développement (IRD)-UMR AMAP, Montpellier, France.

4 : Institut de Recherche pour le Développement (IRD)-UMR AMAP, Laboratoire de botanique et d'écologie végétale appliquées, Nouméa, Nouvelle-Calédonie.

Résumé

Cartographier et classer les forêts denses humides (FDH) selon une typologie structurale objective est un enjeu majeur pour leur conservation et leur gestion. Les principales contraintes dans l'étude des FDH sont dues à leur forte hétérogénéité et à leur faible accessibilité. Les images satellitaires Pléiades offrent de nouvelles opportunités pour l'étude, à large échelle, de l'organisation structurale de ces forêts. Dans cet article nous avons évalué à travers une étude de cas en Nouvelle-Calédonie leur potentiel pour construire une typologie des FDH à partir d'une analyse de texture de la canopée. La méthode FOTO (FOurier-based Textural Ordination) a été appliquée à des images à très haute résolution spatiale pour produire des indices de texture du grain de la canopée, qui associent la distribution des tailles des couronnes des arbres et leur répartition spatiale. Les résultats ont montré que cette méthode permettait, d'une part d'isoler la FDH des autres formations végétales, et d'autre part de mettre en évidence leur diversité structurale à large échelle. Enfin, cette étude de cas a montré que l'utilisation d'images Pléiades est prometteuse pour prédire la structure des forêts denses humides.

Mots-clés : Structure de la canopée, analyse de texture, forêt dense humide, Nouvelle-Calédonie, télédétection, image à très haute résolution

Abstract

Large-scale characterization of tropical rainforest is a challenge for their conservation and management. Very high spatial resolution images as provided by the Pléiades satellites offer new opportunities to study the structural organization of heterogeneous rainforests with limited accessibility. In this study, we have evaluated the potential of Pléiades images to map structural parameters of New Caledonian rainforests by analyzing texture of forest canopies. We have applied the Fourier transform textural ordination (FOTO) method to very high spatial resolution images to compute texture indices of canopy grain (i.e. a combination of size distribution and spatial pattern of tree crowns). The results have showed that this method was promising to isolate the rainforest from other types of vegetation, and to highlight their structural diversity on a large scale. Finally, this case study showed that the use of Pléiades images is promising to predict the structure of rainforests.

Keywords : Canopy structure, textural analysis, rainforest, New Caledonia, remote sensing, very high resolution imagery

1. Introduction

La Nouvelle-Calédonie est un archipel reconnu pour sa flore native exceptionnelle, riche et diversifiée (Morat *et al.*, 2012). Cette flore est cependant soumise à un niveau de menace élevé, aujourd'hui essentiellement engendré par l'activité minière, les incendies et le développement d'espèce exotiques invasives (Jaffré *et al.*, 1998, 2010). La conjugaison de cette richesse et de ces menaces font de la Nouvelle-Calédonie un « hotspot » majeur pour la conservation de la biodiversité mondiale (Myers *et al.*, 2000 ; Mittermeier *et al.*, 2004).

La forêt dense humide (FDH) constitue la formation végétale la plus diversifiée avec 2106 espèces recensées. Plusieurs typologies de la FDH ont été proposées sur la base des différences de composition floristique et/ou de facteurs abiotiques, hydrométriques, altitudinaux, édaphiques ou topographiques (Viot, 1951 ; 1956 ; Schmid, 1979 ; Hoff, 1983 ; Jaffré, 1993). Cependant de récents résultats basés sur un important réseau d'inventaire forestier, ont montré que les FDH sont caractérisées par une dissimilarité floristique très

élevée, faiblement expliquée par ces facteurs abiotiques (Ibanez *et al.*, 2014). Pour être généralisable à l'ensemble du territoire, la typologie des FDH ne peut donc pas se baser exclusivement sur des paramètres floristiques et environnementaux.

Au contraire, très peu d'études se sont intéressées à la diversité structurale des FDH de Nouvelle-Calédonie. Pourtant ces paramètres sont plus stables et fréquemment employés pour la description et l'étude de la dynamique des peuplements forestiers hétérogènes (par exemple Montgomery *et al.*, 2001 ; West 2009). Jaffré et Veillon (1991 et 1995) ont caractérisé les FDH à partir de paramètres floristiques et structuraux, mais leurs résultats sont basés sur des zones d'étude spatialement restreintes et souffrent d'un manque de données quantitatives et standardisées. Plus récemment Ibanez *et al.* (2014) ont mis en évidence, à partir du réseau de parcelles « New Caledonian Plant Inventory and Permanent Plot Network » (NC-PIPPN, 201 parcelles de 0.04 hectares), une diversité structurale importante au sein des forêts humides mixtes sur l'île principale. Néanmoins, ces

auteurs ont conclu que la taille des parcelles étudiées limitait l'interprétation des résultats structuraux et ont préconisé d'intégrer des parcelles d'un hectare dans le réseau NC-PIPPN afin d'améliorer les connaissances sur la diversité structurale des forêts humides mixtes néo-calédoniennes.

L'imagerie satellitaire à très haute résolution spatiale a ouvert de nouvelles perspectives dans la compréhension de la complexité structurale des FTH à large échelle spatiale (Asner *et al.*, 2014 ; Barbosa *et al.*, 2014). Des analyses de la structure des FTH basées sur les informations radiométriques (Thenkabail *et al.*, 2004), ou sur la délimitation manuelle (Asner *et al.*, 2002 ; Read *et al.*, 2003) ou automatiques (Zhou *et al.*, 2010 ; Broadbent *et al.* 2008) des houppiers des arbres, ont montré que l'exploitation des propriétés géométriques des images à très haute résolution (THR) de la canopée représente une voie de recherche prometteuse pour la caractérisation structurale des forêts (Song *et al.*, 2002 ; Frazer *et al.*, 2005).

Des résultats encourageants ont été obtenus à partir d'analyse de texture de la canopée, pour la prédiction des paramètres structuraux des FDH (Wulder *et al.*, 1998 ; Ploton *et al.*, 2012 ;). Cette texture résulte de l'abondance relative des différentes tailles des houppiers (petits, moyens et grands) et leur distribution spatiale. Ainsi il existe une relation directe entre la texture de la canopée et la structure du peuplement forestier qui la compose, et ceux indépendamment des espèces. Néanmoins, la diversité texturale de la canopée au sein d'une FDH, c'est-à-dire la diversité des tailles de houppiers, dépend de la conjonction 1) des paramètres environnementaux et 2) de la dynamique forestière. En effet le diamètre des houppiers va par exemple augmenter avec la l'âge d'une forêt (Proisy *et al.* 2007).

Depuis une dizaine d'année, une méthode originale permettant d'inférer la structure des peuplements forestier à partir de l'analyse de texture du grain de la canopée a été développée (Couteron *et al.* 2005 ; Proisy *et al.* 2007 ; Barbier *et al.*, 2012 ; Ploton *et al.*, 2012). Cette méthode, appelée FOTO (pour FOurier transform Textural Ordination) et développée par Couteron en 2002, produit à partir d'images THR, des

indices de texture relatifs à la répétition de motifs dans la canopée. Ces indices traduisent l'importance relative des petites, moyennes et grandes fréquences spatiales dans les spectres de Fourier, et reflètent l'abondance relative des différentes tailles de houppier (petit, moyen et grand).

Dans cet articles nous présentons comment la méthode FOTO appliquée à des images THR Pléiades permettrait de prédire la structure des FDH de Nouvelle-Calédonie et d'améliorer leurs typologie. Il s'agit donc de démontrer que la méthode FOTO appliquée aux images Pléiades peut être un outil performant pour (1) fournir une cartographie fiable de les forêts denses humides et, (2) capturer leur diversité structurale.

2. Matériels et méthodes

Site d'étude

La Nouvelle-Calédonie est un archipel du Pacifique Sud, situé juste au-dessus du tropique du Capricorne (20-23 ° S 164-, 167 ° E), environ 1500 km à l'est de l'Australie et 2000 km au nord de la Nouvelle-Zélande. L'île principale (environ 400 km de long et 40 km de large), appelée la Grande Terre, est traversée sur toute sa longueur par une chaîne de montagnes, dont le point culminant s'élève à 1628 m dans le nord (Mont Panié) et 1618 m dans le sud (Mont Humboldt). Les forêts denses humides (FDH) se répartissent sur les massifs montagneux, sur les substrats volcano-sédimentaire et ultramafique, le long d'un gradient altitudinal du niveau de la mer jusqu'à plus de 1500 m d'altitude et dans une gamme de précipitation annuelle moyenne de 800 à 4500 mm (METEO-FRANCE 2007).

Notre zone d'étude s'étend sur la Province Nord (Fig. 1). Pour cet article nous présentons une première étude de cas effectuée sur les FDH situées à "Forêt Plate" (Fig. 1), afin de nous affranchir des effets des gradients environnementaux et d'aborder exclusivement les effets de la dynamique forestière sur la diversité structurale des FDH, en considérant que les faibles variations d'altitude (460-520 m) et de précipitations (1700-1900mm/an) sont négligeables et sans impact sur cette diversité.

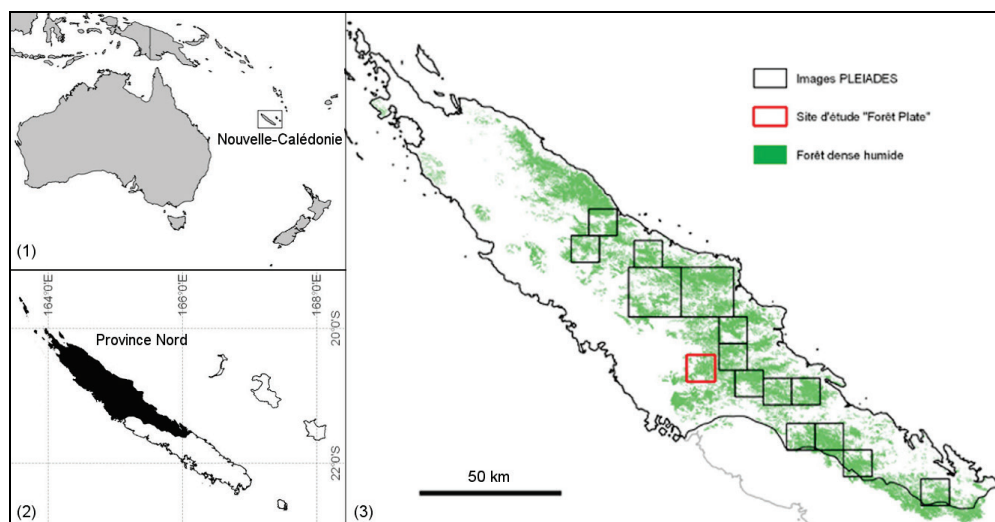


Figure 1 : Localisation des Images Pléiades et du site d'étude "Forêt Plate" dans la Province Nord de la Nouvelle-Calédonie.

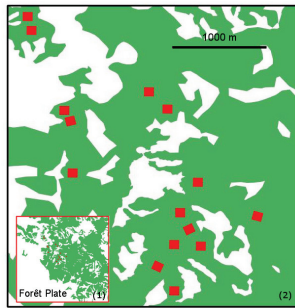


Figure 2 : Localisation des parcelles d'1 hectare (carrés rouges) sur le site de Forêt Plate.

Images satellitaires Pléiades

Quinze images des satellites Pléiades ont été acquises sur la zone d'étude entre les mois de mai et de juin 2014. Elles couvrent une superficie totale de 2492 km², répartie sur 15 sites (Fig. 1.3). Les longueurs d'onde des bandes spectrales utilisées sont comprises entre 0,48 et 0,83µm (panchromatique), 0,430 et 0,55µm (bleu), 0,49 et 0,61µm (vert), 0,60 et 0,72µm (rouge), et 0,75 et 0,95µm (proche infrarouge). Les images panchromatiques et multispectrales ont respectivement une résolution spatiale rééchantillonnée à 0,5m (résolution native 0,7 m) et à 2m (résolution native 2,80m). Les images ont été livrées dans un format JPEG2000 codées sur 16 bits. Chaque image a été orthorectifiée et géoréférencée selon une projection RGNC 1991-93 Lambert New Caledonia. Dans cet article nous présenterons les résultats obtenus sur l'image Pléiades de "Forêt Plate" (fig. 2.2).

Analyse de texture du grain de la canopée

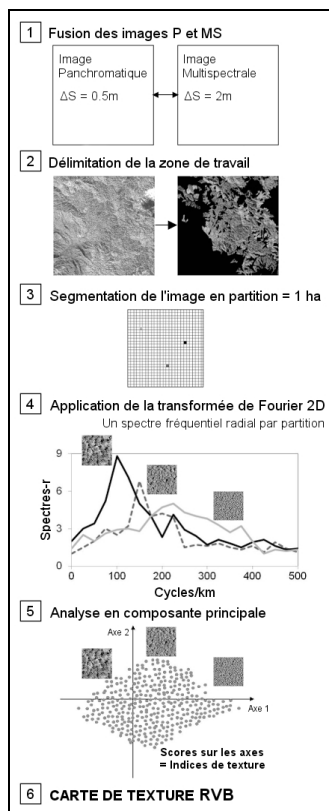


Figure 3 : Algorithme du programme Matlab 'TEXTUREMOD' de la méthode FOTO, de l'image satellitaire THR étudiée à la carte de texture codée en Rouge/Vert/Bleu.

La méthode FOTO (FOurier-based textural Ordination) est utilisée pour la classification structurale de peuplements végétaux à partir de l'analyse de texture d'images à très haute résolution spatiale (THR). FOTO associe une transformée de Fourier bidimensionnelle suivie d'une analyse en composante principale (ACP) pour produire des indices de texture. Nous avons appliqué cette méthode sur une image THR Pléiades en suivant la procédure présentée dans Proisy *et al.* (2007) et en utilisant des routines développées pour le logiciel MatLab (MathWorks 2002).

Les quatre canaux de l'image multispectrale (MS) ont été fusionnés avec le canal panchromatique (P) et moyennés dans une couche en niveau de gris à une résolution spatiale de 0,5 m à l'aide du logiciel ER Mapper 7.0 (Earth Resource Mapping Ltd.) (Fig. 3 étape 1). Le canal panchromatique est utilisé pour sa résolution spatiale supérieure à celle des canaux multispectraux (Proisy *et al.* 2007), qui est ainsi en mesure de capturer l'ensemble du gradient de texture observé dans l'image. La méthode FOTO s'applique uniquement sur des surfaces de végétation dont la canopée est suffisamment fermée (Proisy *et al.*, 2007). Une cartographie visuelle au 1/3000 ème des FDH de la zone d'étude a été digitalisée visuellement à partir des images Pléiades panchromatique et multispectrale. Nous avons également cartographié les autres formations végétales : la savane à Niaoulis (*Melaleuca quinquenervia*), le maquis, les plantations de Pin des Caraïbes (*Pinus caribaea*), et les zones à exclusion de l'analyse de texture : les nuages, leurs ombres, les cours d'eau, les routes, les sols nus et les zones anthropisées. (Fig. 3 étape 2). Les analyses ont été réalisées en incluant les quatre formations végétales et en ne sélectionnant que la FDH.

Les images masquées ainsi produites ont été utilisées pour l'analyse de texture, sans aucune transformation radiométrique ou géométrique. Elles ont ensuite été segmentées en imagerie de 1 hectare auxquelles une transformée de Fourier à deux dimensions a été appliquée (Fig. 3 étape 3). La radiance spectrale exprimée dans le domaine spatial est transposée dans le domaine fréquentiel. Un spectre fréquentiel radial (spectre de Fourier, en cycles/km) est ensuite obtenu pour chaque imagerie. En d'autres termes, l'image est discrétisée en classe de fréquence spatiale (Fig. 3 étape 4). Les imageries avec une texture grossière sont généralement associées à des spectres asymétriques dans les basses fréquences, tandis que celles avec une texture fine sont généralement associées à des spectres plus équilibrés (voir Fig.3 étape 4).

La mesure de la dispersion entre les spectres radiaux (spectres-r) est ensuite analysée par ACP. Elle permet d'ordonner dans 3 nouveaux axes les spectres de Fourier obtenus pour chaque imagerie et moyennés dans toutes les directions. Les composantes principales de l'ACP, qui présentent les scores maximums du pourcentage de la variance expliquée, sont utilisées en tant qu'indices de texture (Fig. 3 étape 5). L'axe 1 de l'ACP oppose les textures grossières (scores négatifs) aux textures fines (scores positifs) du grain de canopée. L'axe 2 de l'ACP semble exprimer un gradient d'ouverture du milieu, d'une canopée fermée (scores négatifs) à une canopée ouverte (scores positifs) (Couteron *et al.*, 2005 ; Ploton *et al.*, 2012). Finalement une carte de texture est construite à partir des scores des imageries sur les trois premiers axes de l'ACP, rassemblés respectivement dans une image sous la

forme des canaux Rouge, Vert, Bleu (RVB) (Fig. 3 étape 6).

Les données de terrain

Dans l'objectif de valider les résultats de l'analyse de textures avec des données de structures issues d'inventaires forestiers, un dispositif comprenant 15 parcelles de 1 hectare (100 x 100m) a été mis en place sur le site de « Forêt Plate » (Fig. 2). Le choix de ces parcelles repose sur une sélection visuelle préalable de l'image Pléiades, afin de capturer la plus grande gamme de texture du grain de la canopée, des plus fines au plus grossières. Ces parcelles sont repérées et délimitées au sol. Sur chaque parcelle d'1 ha, toutes les plantes (incluant les arbres, palmiers, fougère arborescentes et lianes) dont le diamètre du tronc à

hauteur de poitrine (DHP) était supérieur ou égal à 10 cm ont été inventoriées. Pour chacune de ces plantes, le DHP a été mesuré et la position dans la strate verticale a été évaluée selon 4 modalités définies d'après l'éclairement reçu par leur houppier : (1) sous-bois lorsque le houppier ne reçoit jamais d'ensoleillement direct, (2) sous-canopée lorsque le houppier est partiellement exposé, (3) canopée lorsque le sommet du houppier est entièrement exposé et (4) émergent, les arbres dont le houppier surciment la canopée et bénéficie d'un ensoleillement total.

3. Résultats/Discussion

Cartographie des formations végétales

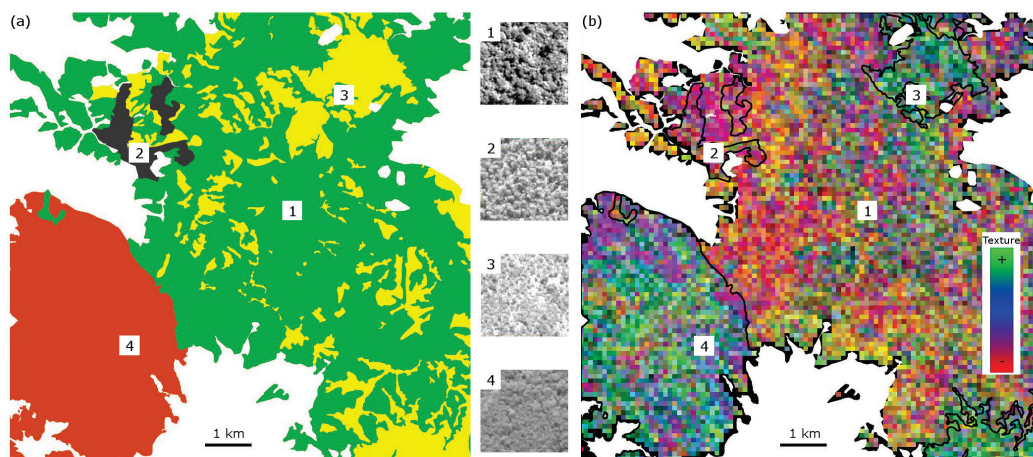


Figure 4 : (a) Cartographie des formations végétales sur l'emprise de l'image Pléiades "Forêt Plate". En vert la FDH, en rouge le maquis, en jaune les savanes à Niaoulis, en gris les plantations de pins et en blanc les zones masquée pour l'analyse de texture. (b) Carte de texture de la végétation, obtenue par codage RVB sur les scores des trois principaux axes de l'ACP (rouge = PC1, vert = PC2, bleu = PC3), qui expliquent 74 % de la variance observée dans les spectres-r. L'emprise de la carte est identique au (a). Les formations végétales sont délimitées en noire, représentées par un extrait de l'image Pléiades panchromatique, et numérotées, 1 pour le maquis, 2 pour la savane, 3 pour les plantations de pins et 4 pour la FDH.

L'analyse texturale du couvert végétal a permis de différencier la forêt dense humide des autres formations végétales. Les plantations de pins sont représentées spécifiquement sur la carte de texture par un gradient de rose (Fig. 4b). La spécificité de la texture des plantations de pins est liée à la répétition de petits houppiers (dû au port en cône des Pins des Caraïbes) répartis régulièrement dans l'espace (Fig. 4, extrait de l'image Pléiades panchromatique), ce qui leur confère une texture très homogène, facilement différenciable des FDH qui présentent naturellement, à tous les stades de croissance une organisation plus anarchique (Zhou *et al.* 2013), et donc une texture plus hétérogène. Le maquis et la savane à Niaoulis sont représentés sur la carte de texture (Fig. 4b) par un gradient de vert. Les études de texture de la canopée des forêts tropicales à partir de la méthode FOTO ont montré que la couleur verte était généralement associée à une texture grossière, correspondant à des stades matures de la forêt tropicale humide (Couteron *et al.*, 2005) ou à des stades sénescents, dans le cas des mangrove de Guyane française (Proisy *et al.*, 2007). Or l'organisation structurale de la savane à Niaoulis et du maquis ne correspond pas aux descriptions de ces formations forestières. Ce résultat est donc vraisemblablement lié à l'aspect "lisse" de la texture des maquis et à l'aspect "perforé" de la texture des savanes (Fig. 4, extrait de

l'image Pléiades panchromatique), plutôt qu'à la répétition de larges houppiers absents dans ces formations. En effet l'organisation spatiale des savanes à Niaoulis définie par une strate de graminées continue parsemée de Niaoulis arborescents leur confère cet aspect textural "perforé". L'aspect "lisse" de la texture du maquis vient vraisemblablement du fait qu'il est caractérisé par une végétation arbustive basse (McCoy *et al.*, 1999), non stratifiée, qui lui confère une organisation horizontale et verticale très homogène. Précisément, comme Ploton *et al.* (2012) l'ont montré, le spectre-r des imagerie affichant un degré élevé d'hétérogénéité spatiale sont orientées vers les basses fréquences en raison de la contribution des motifs de plus grande taille (cas des savanes). De la même manière les spectre-r des imagerie qui affichent un degré d'homogénéité très élevé dus à l'absence de houppiers (cas des maquis), sont également caractérisées par des fréquences basses. De cette manière ces imagerie peuvent être faussement interprétées comme contenant des arbres à larges houppiers.

Ainsi cette analyse globale de texture semble intéressante pour extraire spatialement les plantations, les maquis et les savanes des forêts denses humides même si la méthode FOTO a été développée initialement pour travailler sur un seul type de

végétation plutôt que sur une mosaïque de formation végétale (forestière et non forestière).

Cartographie des FDH

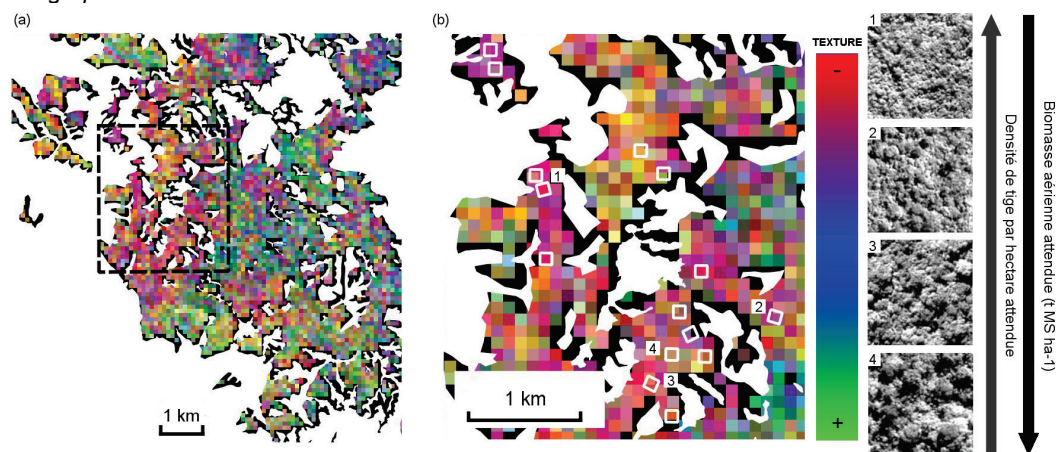


Figure 5 : (a) Carte de texture de la canopée de la FDH sur l'emprise de l'image Pléiades "Forêt Plate", obtenue par codage RVB sur les scores des trois principaux axes de l'ACP (rouge = PC1, vert = PC2, bleu = PC3). En blanc les surfaces masquées. (b) Zoom sur la zone de mise en place des 15 parcelles de validation du modèle FOTO, représentée par des carrés blancs. Les emprises de l'image Pléiades des parcelles numérotées de 1 à 4 sont affichées sur la droite avec les gradients de densité de tige et de biomasse aérienne à l'hectare qui leur sont associés.

Le gradient de texture obtenu était en accord avec la classification visuelle qui a pu être faite à partir des images THR de la canopée. La carte de texture a révélé un fort contraste de couleur (Fig. 5a). Les indices de texture issus des trois principaux axes de l'ACP des spectres de Fourier (expliquant 70 % de la variance observée dans les spectres-r) ont confirmé leur capacité à capturer l'ensemble du gradient du grain de canopée. Les imagerie de quatre parcelles (Fig. 5b), extraites de l'image Pléiades panchromatique, illustrent le gradient de texture de la zone d'étude, des plus fines au plus grossières. Ces imagerie sont caractérisées sur la carte de texture par les couleurs rouge, violet et marron, expression des indices de texture issus de la moyenne des scores de chaque fenêtre sur les 3 premiers axes de l'ACP. Le rouge caractérise les textures fines (répétition de petits et de moyens houppiers), le marron à l'inverse marque les textures grossières (répétition de larges houppiers).

Les indices de texture fournissent ainsi une classification quantitative des différents types structuraux composant la FDH. Ils sont associés à des gradients de structure, tel que la densité de tige par hectare, très élevée pour les textures fines et plus faible pour les textures grossières (des densités de 1580 et 870 tiges/ha ont été mesurées respectivement sur les parcelles 1 et 4, Fig. 5). D'après les relations allométriques entre le diamètre du tronc, la hauteur et la taille du houppier d'un arbre (Chave *et al.*, 2005, 204 ; Muller-Landau *et al.*, 2006 ; Antain *et al.*, 2013), l'étude de la structure des FDH par analyse de texture repose sur le principe que le nombre et la taille des houppiers des arbres visibles du dessus de la canopée permet de prédire des paramètres structuraux forestiers. Le raisonnement, lorsque l'on considère, par exemple, la biomasse aérienne d'un peuplement, est basé sur le principe que les gros arbres, qui atteignent généralement la canopée (cf. allométrie DHP-Hauteur Feldpausch *et al.*, 2011), contribuent majoritairement à la biomasse totale du peuplement dans les forêts tropicales humides (Clark *et al.*, 2001 ; Rutishauser *et al.*, 2010 ; Slik *et al.*, 2013). La biomasse aérienne est ainsi logiquement plus élevée dans les peuplements

caractérisés par une texture grossière que par une texture fine (Fig. 5b), ceci a été montré à plusieurs reprises dans la littérature (Proisy *et al.*, 2007 ; Ploton *et al.*, 2012).

Compte tenu de l'homogénéité des conditions environnementales à « Forêt Plate », la variabilité spatiale de la texture observée (Fig. 5b) résulte des différences d'états dynamiques. La cartographie des formations végétales (Fig. 4a) a montré que la FDH était fragmentée avec la présence de savanes à Niaoulis incluses dans la matrice forestière. Ces savanes sont le résultat d'incendies répétés qui peuvent avoir un impact sur la dynamique des FDH avoisinantes (dynamiques de savanisation et de recolonisation, voir par exemple Ibanez *et al.*, 2013). Ainsi, la présence de patches forestiers issus de recolonisations plus ou moins avancées pourrait expliquer la variabilité structurale observée. De ce fait nous observons un gradient allant des peuplements forestiers caractérisés par une densité élevée de petite tige que nous pouvons associer à des jeunes stades de recolonisation, aux peuplements caractérisés par une faible densité de grosse tige, que nous pouvons associer à des stades plus matures.

4. Conclusion

Cette étude de cas nous a permis de montrer que la méthode FOTO appliquée à une image THR Pléiades permettait d'une part d'isoler la FDH des autres formations végétales et d'autre part de mettre en évidence la diversité structurale des FDH à large échelle. De plus, l'utilisation d'images Pléiades semble prometteuse pour prédire la structure des FDH car la très haute résolution du canal panchromatique permet de capturer l'ensemble du gradient de texture observé dans l'image.

L'application prévue de la méthodologie sur les quatorze autres images Pléiades devrait fournir une première classification structurale des FDH néo-calédoniennes. Cependant, la multiplication des sites d'études nécessitera la prise en compte de l'influence de la topographie sur la texture de la canopée. Mais aussi de la diversité des paramètres d'acquisition des

images, tel que les angles d'incidence des capteurs. La généralisation de la typologie des FDH à large échelle permettra d'étudier les relations entre la diversité structurale des FDH et les gradients environnementaux.

Remerciements

Nous remercions la Province Nord pour le financement du projet dans lequel s'intègre ce travail. L'étude a été supportée par le CNES dans le cadre du programme RTU, qui nous a permis d'obtenir des images Pléiades (© CNES 2014, distribution AIRBUS DS / Spot Image). Nous remercions particulièrement Claire Tinel pour son aide lors de la programmation des images. Nous remercions l'IGN et particulièrement Michel Pausader pour l'orthorectification et le géoréférencement des images Pléiades. Enfin un grand merci aux personnes qui nous ont aidé à collecter les données sur le terrain.

Bibliographie

- Antin C., Pelissier R., Vincent G., Couteron P., 2013. *Crown allometries are less responsive than stem allometry to tree size and habitat variations in an Indian monsoon forest*. *Trees-Structure and Function*, 27(5) : 1485-1495.
- Asner G. P., Anderson C. B., Martin R. E., Knapp D. E., Tupayachi R., Sinca F., Malhi Y., 2014. *Landscape-scale changes in forest structure and functional traits along an Andes-to-Amazon elevation gradient*. *Biogeosciences*, 11(3) : 843-856.
- Asner G. P., Palace M., Keller M., Pereira R., Silva J. N. M., Zweede J. C., 2002. *Estimating canopy structure in an Amazon Forest from laser range finder and IKONOS satellite observations*. *Biotropica*, 34(4) : 483-492.
- Barbier N., Couteron P., Gastelly-Etchegorry J. P., Proisy C., 2012. *Linking canopy images to forest structural parameters : potential of a modeling framework*. *Annals of Forest Science*, 69(2) : 305-311.
- Barbosa J. M., Melendez-Pastor I., Navarro-Pedreño J., Bitencourt M. D., 2014. *Remotely sensed biomass over steep slopes : An evaluation among successional stands of the Atlantic Forest, Brazil*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 88(0) : 91-100.
- Broadbent E. N., Asner G. P., Pena-Claros M., Palace M., Soriano M., 2008. *Spatial partitioning of biomass and diversity in a lowland Bolivian forest : Linking field and remote sensing measurements*. *Forest Ecology and Management*, 255(7) : 2602-2616.
- Chave J., Andalo C., Brown S., Cairns M. A., Chambers J. Q., Eamus D., Folster H., Fromard F., Higuchi N., Kira T., Lescure J. P., Nelson B. W., Ogawa H., Puig H., Riera B., Yamakura T., 2005. *Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests*. *Oecologia*, 145(1) : 87-99.
- Chave J., Rejou-Mechain M., Burquez A., Chidumayo E., Colgan M. S., Delitti W. B., Duque A., Eid T., Fearnside P. M., Goodman R. C., Henry M., Martinez-Yrizar A., Mugasha W. A., Muller-Landau H. C., Mencuccini M., Nelson B. W., Ngomanda A., Nogueira E. M., Ortiz-Malavassi E., Pelissier R., Ploton P., Ryan C. M., Saldarriaga J. G., Vieilledent G., 2014. *Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees*. *Global Change Biology*, 20(10) : 3177-3190.
- Clark D. A., Brown S., Kicklighter D. W., Chambers J. Q., Thomlinson J. R., Ni J., 2001. *Measuring net primary production in forests : Concepts and field methods*. *Ecological Applications*, 11(2) : 356-370.
- Couteron P., 2002. *Quantifying change in patterned semi-arid vegetation by Fourier analysis of digitised aerial photographs*. *International Journal of Remote Sensing*, 23 : 3407-3425.
- Couteron P., Pelissier R., Nicolini E. A., Dominique P., 2005. *Predicting tropical forest stand structure parameters from Fourier transform of very high-resolution remotely sensed canopy images*. *Journal of Applied Ecology*, 42(6) : 1121-1128.
- Feldpausch T. R., Banin L., Phillips O. L., Baker T. R., Lewis S. L., Quesada C. A., Affum-Baffoe K., Arets E., Berry N. J., Bird M., Brondizio E. S., De Camargo P., Chave J., Djabbletey G., Domingues T. F., Drescher M., Fearnside P. M., Franca M. B., Fyllas N. M., Lopez-Gonzalez G., Hladik A., Higuchi N., Hunter M. O., Iida Y., Salim K. A., Kassim A. R., Keller M., Kemp J., King D. A., Lovett J. C., Marimon B. S., Marimon B. H., Lenza E., Marshall A. R., Metcalfe D. J., Mitchard E. T. A., Moran E. F., Nelson B. W., Nilus R., Nogueira E. M., Palace M., Patino S., Peh K. S. H., Raventos M. T., Reitsma J. M., Saiz G., Schrod F., Sonke B., Taedoumg H. E., Tan S., White L., Woll H., Lloyd J., 2011. *Height-diameter allometry of tropical forest trees*. *Biogeosciences*, 8(5) : 1081-1106.
- Frazer G. W., Wulder M. A., Niemann K. O., 2005. *Simulation and quantification of the fine-scale spatial pattern and heterogeneity of forest canopy structure : A lacunarity-based method designed for analysis of continuous canopy heights*. *Forest Ecology and Management*, 214(1-3) : 65-90.
- Hoff, M., 1983. *Quelques aspects des forêts de Nouvelle-Calédonie et de leurs structures*. *Bulletin de Liaison-SEPANRIT*, 12 : 113-118.
- Ibanez T., Munzinger J., Dagostini G., Hequet V., Rigault F., Jaffré T., Birnbaum P., 2014. *Structural and floristic diversity of mixed tropical rain forest in New Caledonia : new data from the New Caledonian Plant Inventory and Permanent Plot Network (NC-PIPPN)*. *Applied Vegetation Science*, 17(3) : 386-397.
- Ibanez T., Munzinger J., Gaucherel C., Curt T., Hely C., 2013. *Inferring savannah-rainforest boundary dynamics from vegetation structure and composition : a case study in New Caledonia*. *Australian Journal of Botany*, 61(2) : 128-138.
- Jaffré T., 1993. *Relation between ecological diversity and floristic diversity in New Caledonia*. *Biodiversity Letters*, 1 : 82-91.
- Jaffré T. et Veillon J.M., 1991. *Etude floristique et structurale de deux forêts denses humides sur roches ultrabasiques en Nouvelle-Calédonie*. *Adansonia*, 12 : 243-273.
- Jaffré T. et Veillon J.M., 1995. *Structural and floristic characteristics of a rain forest on schist in New Caledonia : a comparaison with an ultramafic rain forest*. *Adansonia*, 4 (17) : 201-226.
- Jaffré T., Bouchet P. & Veillon J.M., 1998. *Threatened plants of New Caledonia : is the system of protected areas adequate?* *Biodiversity and Conservation*, 7 : 109-135.
- Jaffré T., Munzinger J., Lowry, P.P., 2010. *Threats to the conifer species found on New Caledonia's ultramafic massifs and proposals for urgently needed*

- measures to improve their protection. *Biodiversity and Conservation*, 19 : 1485-1502.
- Mccoy S., Jaffre T., Rigault F., Ash J. E., 1999. *Fire and succession in the ultramafic maquis of New Caledonia*. *Journal of Biogeography*, 26(3) : 579-594.
- METEO-FRANCE, 2007. *Atlas climatique de la Nouvelle-Calédonie METEO-France en Nouvelle-Calédonie*. METEO-FRANCE, Nouméa, NC.
- Mittermeier R.A., Robles Gil.P., Hoffmann M., Pilgrim J., Brooks T., Mittermeier C.G., Lamoureux J., Da Fonseca G.A.B., 2004. *Hotspots revisited*. Chicago University Press, Chicago, IL, US.
- Montgomery R. A., Chazdon R. L., 2001. *Forest structure, canopy architecture, and light transmittance in tropical wet forests*. *Ecology*, 82(10) : 2707-2718.
- Morat P., Jaffre T., Tronchet F., Munzinger J., Pillon Y., Veillon J.M. & Chalopin M., 2012. *The taxonomic reference base "Floral" and characteristics of the native vascular flora of New Caledonia*. *Adansonia*, 34 : 179-221.
- Muller-Landau H. C., Condit R. S., Chave J., Thomas S. C., Bohlman S. A., Bunyavejchewin S., Davies S., Foster R., Gunatilleke S., Gunatilleke N., Harms K. E., Hart T., Hubbell S. P., Itoh A., Kassim A. R., Lafrankie J. V., Lee H. S., Losos E., Makana, Jr., Ohkubo T., Sukumar R., Sun I. F., Supardi N. M. N., Tan S., Thompson J., Valencia R., Munoz G. V., Wills C., Yamakura T., Chuyong G., Dattaraja H. S., Esufali S., Hall P., Hernandez C., Kenfack D., Kiratiprayoon S., Suresh H. S., Thomas D., Vallejo M. I., Ashton P., 2006. *Testing metabolic ecology theory for allometric scaling of tree size, growth and mortality in tropical forests*. *Ecology Letters*, 9(5) : 575-588.
- Myers N., Mittermeier R.A., Mittermeier C.G., Da Fonseca G.A.B., Kent J., 2000. *Biodiversity hotspots for conservation priorities*. *Nature*, 403 : 853-858.
- Ploton P., Péliissier R., Proisy C., Flavenot T., Barbier N., Rai S., Couteron P., 2012. *Assessing aboveground tropical forest biomass using Google Earth canopy images*. *Ecological Applications*, 22(3) : 993-1003.
- Proisy C., Couteron P., Fromard F., 2007. *Predicting and mapping mangrove biomass from canopy grain analysis using Fourier-based textural ordination of IKONOS images*. *Remote Sensing of Environment*, 109 : 379-392.
- Read J. M., Clark D. B., Venticinque E. M., Moreira M. P., 2003. *Application of merged 1-m and 4-m resolution satellite data to research and management in tropical forests*. *Journal of Applied Ecology*, 40(3) : 592-600.
- Rutishauser E., Wagner F., Herault B., Nicolini E.-A., Blanc L., 2010. *Contrasting above-ground biomass balance in a Neotropical rain forest*. *Journal of Vegetation Science*, 21(4) : 672-682.
- Schmid M., 1979. *Les écosystèmes forestiers mélanésien (Nouvelle-Calédonie, Nouvelles Hébrides, Fidji et Iles Salomon)*. Les écosystèmes forestiers tropicaux - Un rapport sur l'état des connaissances, UNESCO : 709-740.
- Slik J. W. F., Paoli G., Mcguire K., Amaral I., Barroso J., Bastian M., Blanc L., Bongers F., Boundja P., Clark C., Collins M., Dauby G., Ding Y., Doucet J. L., Eler E., Ferreira L., Forshed O., Fredriksson G., Gillet J. F., Harris D., Leal M., Laumonier Y., Malhi Y., Mansor A., Martin E., Miyamoto K., Araujo-Murakami A., Nagamasu H., Nilus R., Nurtjahya E., Oliveira A., Onrizal O., Parada-Gutierrez A., Permana A., Poorter L., Poulsen J., Ramirez-Angulo H., Reitsma J., Rovero F., Rozak A., Sheil D., Silva-Espejo J., Silveira M., Spironelo W., Ter Steege H., Stevart T., Navarro-Aguilar G. E., Sunderland T., Suzuki E., Tang J. W., Theilade I., Van Der Heijden G., Van Valkenburg J., Van Do T., Vilanova E., Vos V., Wich S., Woll H., Yoneda T., Zang R. G., Zhang M. G., Zweifel N., 2013. *Large trees drive forest aboveground biomass variation in moist lowland forests across the tropics*. *Global Ecology and Biogeography*, 22(12) : 1261-1271.
- Song C. H., Woodcock C. E., Li X. W., 2002. *The spectral/temporal manifestation of forest succession in optical imagery - The potential of multitemporal imagery*. *Remote Sensing of Environment*, 82(2-3) : 285-302.
- Thenkabail P. S., Enclona E. A., Ashton M. S., Legg C., De Dieu M. J., 2004. *Hyperion, IKONOS, ALI, and ETM plus sensors in the study of African rainforests*. *Remote Sensing of Environment*, 90(1) : 23-43.
- Virot R., 1951. *Associations végétales de la nouvelle-calédonie et leur protection*. *Journal de la Société des océanistes*, 7(7) : 263-269.
- Virot, R., 1956. *La végétation canaque*. Volume 7. Editions du Muséum.
- West G. B., Enquist B. J., Brown J. H., 2009. *A general quantitative theory of forest structure and dynamics*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(17) : 7040-7045.
- Wulder M. A., Ledrew E. F., Franklin S. E., Lavigne M. B., 1998. *Aerial image texture information in the estimation of northern deciduous and mixed wood forest leaf area index (LAI)*. *Remote Sensing of Environment*, 64(1) : 64-76.
- Zhou J., Proisy C., Descombes X., Le Maire G., Nouvellon Y., Stape J. L., Viennois G., Zerubia J., Couteron P., 2013. *Mapping local density of young Eucalyptus plantations by individual tree detection in high spatial resolution satellite images*. *Forest Ecology and Management*, 30 : 129-141.