

CORRELATION ENTRE INDICE FOLIAIRE ET LES PARAMETRES SPECTRAUX DE L'IMAGE SPOT 5 DU COMPLEXE D'AIRES PROTEGEES DE ZAHAMENA (MADAGASCAR)

RANAIVOARIMANANA S.⁽¹⁾; RAKOTONIAINA, S.⁽¹⁾; EDMOND, R.⁽²⁾; FARAMALALA, M.,
H.⁽²⁾; RAKOTONDRAOMPIANA, S.⁽³⁾; RUDANT, J.P.⁽⁴⁾; DUBOIS, M.⁽⁵⁾; RIERA, B.⁽⁶⁾.

1-Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo (Madagascar)

2-Faculté des Sciences. Université d'Antananarivo (Madagascar)

3-Ecole Supérieur Polytechnique. Université d'Antananarivo (Madagascar)

4-Université de Marne-la-Vallée (France)

5- Commissariat à l'Energie Atomique (France)

6-CNRS-Muséum National d'Histoire Naturelle, UMR 7179, Paris (France)

Mots clés : Traitement d'images SPOT 5, indice foliaire, indices de végétation (NDVI, Ratio, TVI, PVI, TSAVI, MSAVI, SAVI, WdVI), structure forestière, forêt tropicale humide.

Résumé

L'un des paramètres qui est utile pour la conception d'une carte des données écologiques est l'indice foliaire. L'indice foliaire ou LAI (Leaf Area Index) aide à l'interprétation de la variation des types et des sous types de la végétation d'un écosystème forestier. D'autre part, la télédétection spatiale nous informe sur ces variations à l'aide des valeurs radiométriques des pixels des bandes. Des mesures de LAI ont été faites sur les complexes aires protégées de Zahamena. Ceci, dans le but de corréliser les réponses spectrales de la végétation sur les capteurs multispectraux de SPOT 5 avec les mesures in situ de LAI, afin d'avoir une idée sur la structure de la végétation de cette zone. Les mesures de LAI passent d'abord à des prétraitements (saisie des données filtrage par la méthode des ondelettes...) Les traitements par ondelette permettent de réaliser des cartes de distribution des surfaces foliaires avec une bonne adéquation aux données structurales des parcelles (surface terrière, distribution spatiale des arbres). Des analyses permettent de montrer des corrélations entre les données de télédétection pour les bandes infrarouges, vert et les valeurs de LAI,

INTRODUCTION

La caractérisation des structures forestières en vue d'un meilleur suivi et d'une gestion des espaces naturels nécessite d'obtenir des informations quantifiées sur des grandes zones. L'approche traditionnelle de mesures des paramètres structuraux sur le terrain est assez coûteuse en temps et en moyens pour une couverture de zone de petites surfaces. C'est l'approche classique pour de nombreux projets : réalisation de plan d'aménagements forestiers, estimation des stocks de carbone, suivi et gestion des aires protégées, ...Les inconvénients sont les coûts et les surfaces couvertes variables suivant les taux de sondage utilisés par exemple. Les images satellitales présentent l'intérêt de couvrir de grande surface. Les traitements de ces images permettent bien de distinguer des types

de couverture du sol : eau, sols, nus, végétation (Caloz et Collet, 2001). De nombreux indices de végétation ont été créés pour essayer de cartographier les types de végétation. Mais peu de travaux permettent de distinguer des types de végétation dès que la couverture au niveau du sol par la végétation est continue. Dans les différents canaux spectraux existent-ils des corrélations entre les paramètres structuraux et données des pixels de l'image ? Chez les végétaux verts, les feuilles sont les principaux moyens de capturer l'énergie solaire grâce à la photosynthèse.

Nous abordons une approche nouvelle en comparant ces indices foliaire réalisées sur une zone présentant plusieurs types de végétation : forêt naturelle de haut de pente, forêt de transition, forêt sur pente, forêt de bas de pente, forêt de replat et recru après coupe.

L'indice foliaire ou LAI (Leaf Area Index) est un paramètre important pour la détermination de la pénétration de la lumière dans la canopée. Ses propriétés de réflectance sont caractérisées par une absorption des rayonnements dans le domaine du visible (rouge, vert, bleu), une réflexion pour l'infrarouge (totale) et une part pour le vert. Il existe donc une atténuation de l'énergie lumineuse en passant à travers la canopée d'après la loi de Beer-Lambert : $I = I_0 e^{-k \cdot LAI}$ (Cournac et al. 2002 et 2003).

Ainsi, la mesure de LAI utilise cette énergie transmise (qui passe à travers les feuilles). Des mesures de LAI ont été faites sur le complexe d'aires protégées de Zahamena. Nous commençons par des prétraitements qui consistent à l'interpolation linéaire et au filtrage par la méthode des ondelettes des mesures de LAI. Ensuite, on essaie de corrélérer le LAI ainsi filtré avec les paramètres spectraux de l'image SPOT 5 de 10m:

- Valeurs radiométriques des bandes XS1, XS2, XS3, XS4 ;
- Valeurs des indices de végétations NDVI, RATIO, TVI, PVI, MSAVI, TSAVI, SAVI, WDV ;

1. Matériels et Méthodes

1.1. Descriptions de la zone d'études

a. Localisation

Située dans la région Alaotra-Mangoro, dans l'ancienne province de Toamasina, l'aire protégée de Zahamena est à cheval entre le district d'Ambatondrazaka et celui de Vavatenina. Elle est limitée au Nord par la rivière de Maningory-Sahatavy et au Sud par le fleuve Onibe, la région se trouve à 50 km de l'Océan Indien et à 20 km du Lac Alaotra (Figure 1) entre 48°49' - 49°03' EST et 17°30' - 17°43' SUD, sur le rebord oriental de la falaise qui limite les « Hautes Terres » (Anonyme, 2006).

L'altitude est comprise entre 750 et 1512 m. La réserve bénéficie du statut de Réserve Naturelle depuis 1927. Depuis 1997, elle est constituée de deux parcelles une en « **Parc National** » et une autre parcelle en « **Réserve Naturelle Intégrale** ».

A partir de Vavatenina, le district le plus proche à l'Est, Zahamena se trouve à deux jours de marche tandis qu'à l'Ouest, la région est plus ou moins accessible par véhicule jusqu'à une distance de trois heures de marche séparant la route carrossable et l'entrée du parc.

b. Climat

Cornet (1974) distingue deux types de végétation en fonction de l'altitude. La végétation au dessous de 800 m est de type per-humide avec des températures moyennes comprises entre 15 à 20°C, des précipitations supérieures à 1500 mm et l'absence de saison sèche. Au dessus de 800 m, le climat est de type humide avec des températures plus fraîches comprises en moyenne entre 10 et 15 °C et des précipitations supérieures à 1500 mm avec une saison sèche d'environ quatre mois (juin à septembre). A partir de 1200 m, les brouillards favorisent un type de forêt riche en Ptéridophytes.

Dans cette région, on assiste à deux saisons bien distinctes : hiver (Mai-Octobre) et été (Novembre-Avril).

- L'influence du vent d'Alizé en hiver : vent permanent et du secteur Sud-Est offre beaucoup de pluie ;
- L'arrivée de la Mousson en été : vent saisonnier de Nord-Ouest et pluvieux renforce la hauteur de pluie entre Novembre et Avril.

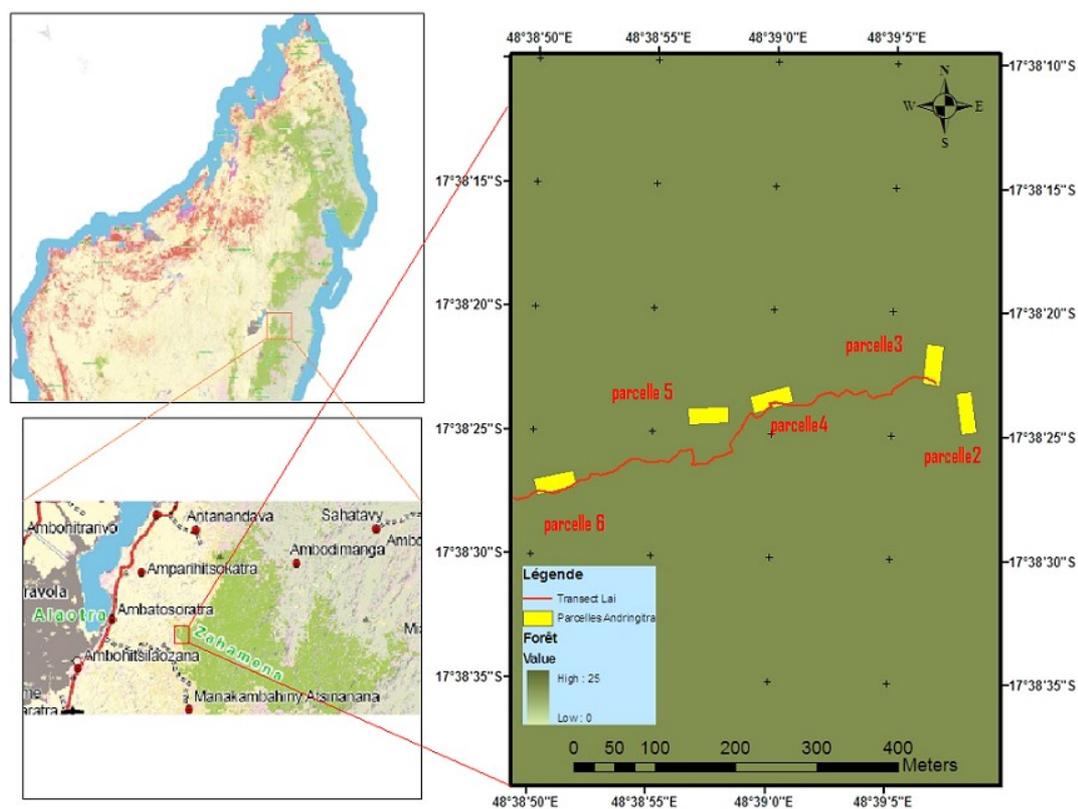


Fig.1 : Images de la zone d'études Andringitra

Le **tableau I** suivant montre les données pluviométriques dans cette zone sur trois années successives.

Tableau I : Données pluviométriques de las *Stations météorologiques d'Ambatomafana*.

Année	Jan.	Fév.	Mar	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Hauteur
2000	109,8	185,2	198,8	13,3	2,8	10,9	15,1	7,3	3,2	1,1	19,3	196,5	763,3
2001	711,1	129,1	52,7	28,8	2,7	5,7	1,1	4,3	1,3	18,1	0,1	189,8	1144,8
2002	29,9	474,1	83,9	53,1	13,2	9,2	13,4	11,8	8,6	0,9	45,8	389,6	1133,5

Source : Direction des exploitations météorologiques
La température

La température la plus chaude coïncide avec la période de forte pluie (mois de Janvier). Lorsqu'on calcule la moyenne annuelle, nous constatons qu'elle reste supérieure à 20°C pendant ces trois années.

c. Données de végétation

Le travail a été réalisé entre 1000m à 1414 m. A cette altitude, on observe une forêt dense humide de moyenne altitude (Humbert et Cours-Darne, 1965). La taille et la hauteur des arbres de cette forêt diminuent avec l'altitude. Les épiphytes sont de plus en plus développées (Perrier de la Bâthie, 1932). Koechlin et al (1974) distingue la forêt à sous-bois herbacé (ou forêt dense humide de montagne) rencontrée entre 800 m et 1200 m d'altitude ; et la sylve à lichens (ou forêt sclérophylle de montagne) localisée entre 1200 m et 2000 m d'altitude.

On observe plusieurs types de végétation : Forêt sclérophylle, forêt naturelle de haut de pente, forêt de transition, forêt sur pente, forêt de bas pente, forêt de replat et recru après coupe. Cette zone est en bordure d'espaces où l'agriculture et les pâturages sont importants et constituent d'autres types de végétation aisément caractérisées par la télédétection.

Des relevées floristiques et de structures de végétation ont été réalisés sur des parcelles de 20 x 50 m. Les noms vernaculaires des individus et les mesures de diamètre à 1,3 de hauteur totale et du fut ont été réalisés en positionnant les individus.

d. Mesures d'indices foliaires

Les mesures ont été faites avec un capteur LAI léger développé pour des mesures rapides de terrain (Cournac et al, 2002 et 2003).

Du sommet de l'Andringitra, à partir d'une zone brûlée, nous avons effectué un transect de LAI sur 1200m. Des points GPS ont été pris tous les 10m. Les mesures sont faites de 11h à 14h (la période où les rayonnements lumineux sont plus ou moins perpendiculaires avec une situation zénithale du soleil au dessus de la route forestière).

Sur les parcelles de 20m x 50m, des transects de LAI ont été réalisés suivant les longueurs avec une distance d'inter profilage de 2,5 m.

e. L'image SPOT 5

L'image que nous avons utilisée est l'image SPOT 5 de **Zahamena (Fig. 2)** acquis en Novembre 2008. Elle est caractérisée par ses 4 capteurs multispectraux XS1 (vert : 540nm), XS2 (rouge : 650nm), XS3 (Proche Infrarouge : 835nm), XS4 (Moyen infrarouge:1630nm) de 10m de résolution spectrale (www.spotimage.fr)

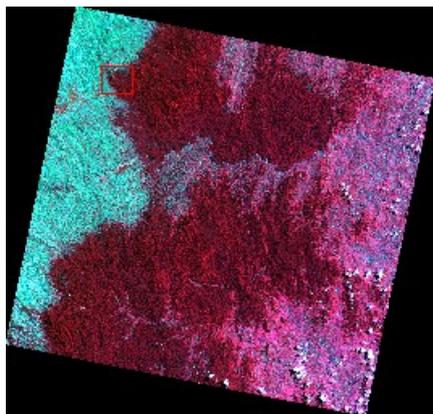


Fig. 2: Composition colorée de XS3, XS2, XS1 de SPOT 5,

1.2. Les prétraitements des données de LAI

Ils s'effectuent en différents étapes :

- Saisie et correction des données ;
- Filtrage par la méthode des ondelettes.

a- Saisie et correction des données

A chaque valeur collectée sur terrain, et suivant les capteurs utilisés, on applique une correction en fonction de la luminosité B, L, C (Cournac et al., 2002 et 2003) aux valeurs de LAI mesurées.

b- Filtrage par la méthode des ondelettes

L'image que nous utilisons est l'image SPOT 5 dont la résolution spectrale est de 10 m pour les bandes XS1, XS2, XS3, XS4 et 2,5 m pour celle du panchro. Les collectes in situ de mesures de LAI avec un pas de 1m peuvent entraîner des variations à haute fréquence des valeurs mesurées. Un filtrage est nécessaire (Buades, et al., 2005).

La décomposition en ondelette est une technique de filtrage des signaux qui utilise des filtres moyens et des filtres produisant des détails (Abdelmour et al., 2003, Buades, et al., 2005).

1.3. Les traitements des données de l'indice foliaire

a- Corrélation avec les paramètres spectraux de l'image SPOT 5 10m

Les valeurs de LAI (filtrées et non filtrées) sur 762m de transect, et sur quelques parcelles, ont été corrélées avec les paramètres spectraux de l'image SPOT5. Les valeurs radiométriques des pixels des bandes ainsi que des valeurs d'indice de végétation et de ratio ont été utilisées pour la corrélation.

b- Corrélation avec les indices de végétation

Nous avons utilisé deux types d'indice de végétation :

- Indice de végétation sans compensation des effets des sols ;
- Indice de végétation avec la compensation des effets des sols.

b.1. Indice de végétation sans compensation des effets des sols

Parmi les indices de végétation sans compensation des effets des sols nous avons utilisé :

- $Ratio = \frac{XS3}{XS2}$ (Colwell et Suits, 1975) ;
- $NDVI = \frac{XS3 - XS2}{XS3 + XS2}$ (Indice de la différence normalisé) (Rouse et al., 1974) ;
- $TVI = \sqrt{NDVI + 0.5}$ (Indice de végétation transformé) (Rouse et al., 1974) ;

b.2. Indice de végétation avec compensation des effets des sols.

Lorsque la végétation ne couvre que partiellement le sol, le signal du sol se mélange avec celui du couvert (Baret et al., 1989b). Il existe 2 approches qui permettent de réduire la contribution spécifique du sol de telle façon que la sensibilité de l'indice ne concerne que la végétation. La première repose sur une modification de la formulation du NDVI par une différentiation des apports respectifs des bandes rouge et proche infrarouge (par exemple le SAVI décrit ci-dessous) ; la deuxième prend comme référence la droite des sols et PVI. Une troisième catégorie d'indices combine ces deux approches (TSAVI, MSAVI)

Dans la littérature (Caloz et Collet, 2001), il existe des nombreux indices de végétation qui tient compte des effets des sols. On en a choisi 5 parmi les plus utilisés :

- SAVI (Huete, 1989), indice de végétation avec la compensation des effets de sol (*Soil Adjusted Vegetation Index*) :

$SAVI = \frac{XS3 - XS2}{XS3 + XS2 + L} (1 + L)$, L peut être égale à 1 pour de faible densité de végétation ; 0,5 pour de densité moyenne ; 0.25 concernant les fortes densités.

- PVI (Richardson et Wiegand, 1977) ou Indice perpendiculaire de végétation (*Perpendicular Vegetation Index*) :

$PVI = \frac{XS3 - aXS2 - b}{\sqrt{a^2 + 1}}$, a et b sont respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite des sols dans l'espace (XS2, XS3)

- TSAVI (Baret et al. 1989a): *Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*

$TSAVI = \frac{a(XS3 - aXS2 - b)}{XS2 + aXS3 - ab + 0.08(1 + a^2)}$, a et b sont respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite des sols.

- MSAVI (Qi et al. 1994): *Modified Soil Adjusted Vegetation Index*

$MSAVI = \frac{(1 + L)(XS3 - XS2)}{XS3 + XS2 + L}$, avec $L = 1 - 2a * NDVI * (XS3 - aXS2)$ et a la pente de la droite des sols.

➤ WdVI (Leprieur et al. 1996): *Weighted Difference Vegetation Index*

$$WDVI = XS3 - aXS2$$

Résultats

1-Allure des spectres des signaux de LAI

Selon les niveaux de décomposition utilisés lors de la décomposition en ondelette, les hautes fréquences (Fig. 3) présentes dans notre signal sont éliminées (Fig. 4).

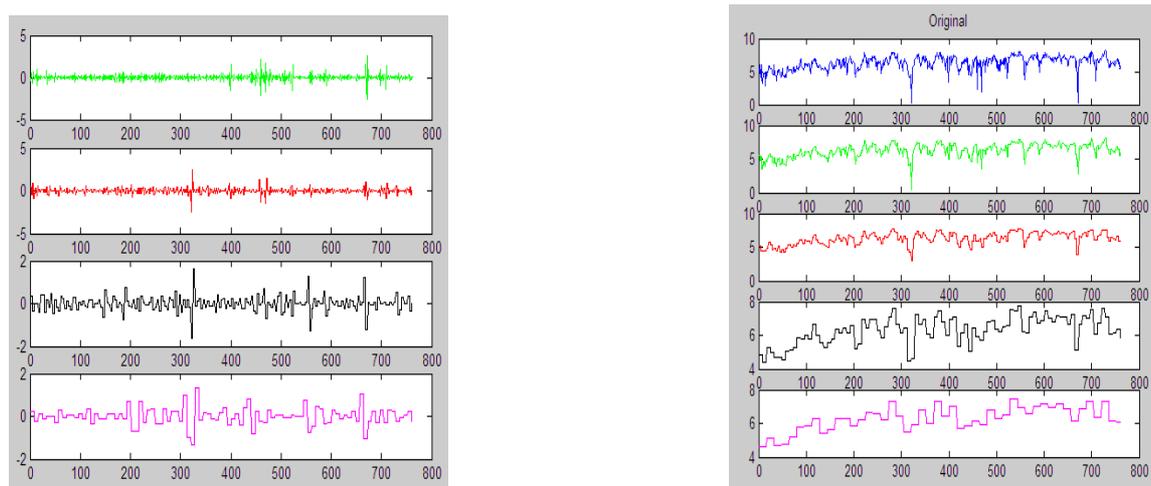


Fig. 3 : Signal de LAI original (en bleu), les 4 approximations (en bas) et les détails correspondant (à droite)

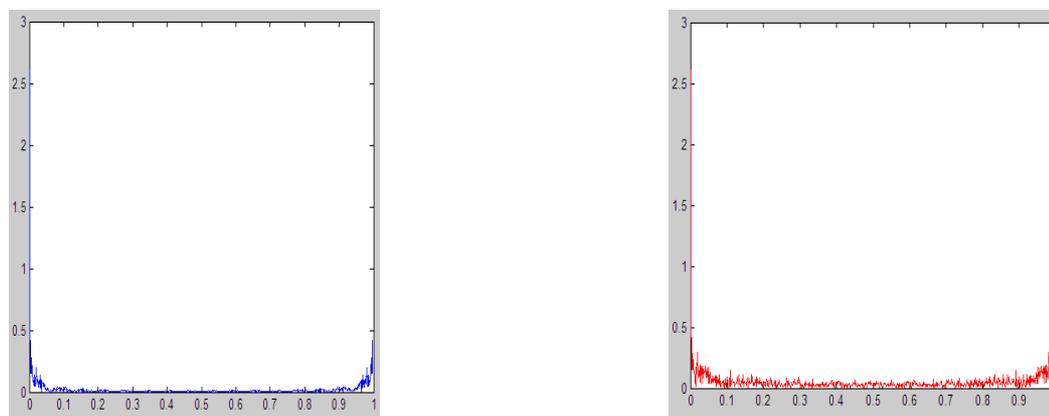


Fig.4 : Spectre du signal original(en rouge), et celle de la 4em décomposition (en bleu)

1- Les corrélations entre les variables

Le Long du transect

Les corrélations du signal de LAI et les paramètres de l'image augmentent selon le niveau de décomposition en ondelette du signal (Figs 3 et 4). Le type de corrélation présenté par les tableaux ci-dessous est la corrélation de Pearson(n) (Jobson, 1992).

Tableau II: Corrélation entre les bandes $XSi(i=1, 2, 3, 4)$ et les LAI décomposé en ondelette de niveau $i=1, 2, 3, 4$

Variables	LAI
LAI	1
XS1	0.272
XS2	0.248
XS3	0.306
XS4	0.333

Variables	LAI_Filt1	Variables	LAI_Filt2	Variables	LAI_Filt3	Variables	LAI_Filt4
LAI_Filt1	1	LAI_Filt2	1	LAI_Filt3	1	LAI_Filt4	1
XS1	0.289	XS1	0.311	XS1	0.342	XS1	0.403
XS2	0.265	XS2	0.284	XS2	0.311	XS2	0.376
XS3	0.326	XS3	0.350	XS3	0.378	XS3	0.447
XS4	0.353	XS4	0.374	XS4	0.417	XS4	0.502

Le **tableau II** montre bien que les valeurs du coefficient de corrélation entre les variables canaux XSi ($i=1, 2, 3, 4$) (Figures 5,6 et 7), les indices de végétation, et les signaux de LAI augmentent avec le niveau de décomposition. Le niveau maximal de décomposition est 4.

Les valeurs du coefficient de corrélation (0,50 pour le canal XS4, et 0,45 pour le canal XS3) montrent l'abondance de la végétation dans cette zone.

Les indices de végétation avec les compensations des effets des sols présentent aussi des corrélations assez importantes par rapport à l'autre type d'indice de végétation qu'on a utilisé. Elle est maximale dans le PVI, WdVI, TSAVI (**Tableaux III et IV**).

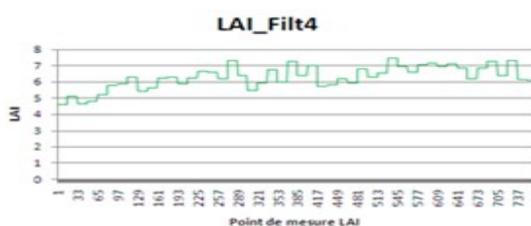


Fig.5: LAI décomposé par la méthode des ondelettes de niveau 4

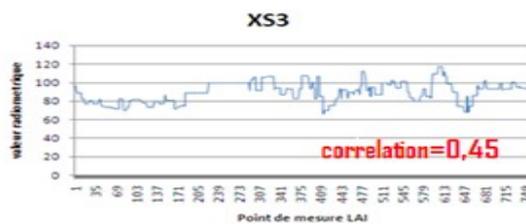


Fig.6: Valeur radiométrique dans XS3

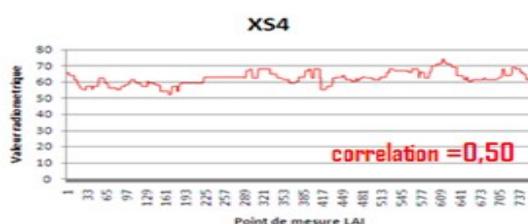


Fig.7: Valeur radiométrique dans XS4

Tableau III: Corrélation entre les indices de végétation sans compensation des effets de sol (NDVI, RATIO, TVI) et le LAI filtré par la méthode des ondelettes (niveau de décomposition $i=1, 2, 3, 4$).

Variables	LAI
LAI	1
ratio	0.267
ndvi	0.274
tvi	0.275

Variables	LAI Filt1	Variables	LAI Filt2	Variables	LAI Filt3	Variables	LAI Filt4
LAI_Filt1	1	LAI_Filt2	1	LAI_Filt3	1	LAI_Filt4	1
ratio	0.285	ratio	0.307	ratio	0.328	ratio	0.386
ndvi	0.293	ndvi	0.315	ndvi	0.336	ndvi	0.392
tvi	0.294	tvi	0.316	tvi	0.337	tvi	0.393

Tableau IV : Coefficient de Corrélation entre les indices de végétation avec la compensation des effets des sols (PVI,MSAVI, TSAVI, SAVI1, SAVI2, WdVI) et LAI filtré par la méthode des ondelettes de niveau de décomposition $i=1, 2, 3, 4$.

Variables	LAI
LAI	1
pvi	0.294
msavi	-0.242
tsavi	0.281
savi1	0.274
savi2	0.274
wdvi	0.294

Variables	LAI Filt1	Variables	LAI Filt2	Variables	LAI Filt3	Variables	LAI Filt4
LAI_Filt1	1	LAI_Filt2	1	LAI_Filt3	1	LAI_Filt4	1
pvi	0.313	pvi	0.338	pvi	0.368	pvi	0.427
msavi	-0.258	msavi	-0.282	msavi	-0.307	msavi	-0.365
tsavi	0.300	tsavi	0.324	tsavi	0.352	tsavi	0.406
savi1	0.291	savi1	0.315	savi1	0.342	savi1	0.393
savi2	0.291	savi2	0.315	savi2	0.342	savi2	0.393
wdvi	0.313	wdvi	0.338	wdvi	0.368	wdvi	0.427

Sur les parcelles (exemples : parcelle 4)

Le tableau V nous donne les corrélations statistiques entre les paramètres spectraux et le LAI (filtré et non filtré) de la parcelle 4. Des cartes d'isovaleurs de LAI ont été établies.

Tableau V : Corrélation entre les variables de la télédétection et celle du LAI

Variables	LAI	LAIFILT1	LAIFILT2	LAIFILT3	LAIFILT4
LAI	1	0.945	0.872	0.811	0.688
LAIFILT1	0.945	1	0.923	0.857	0.730
LAIFILT2	0.872	0.923	1	0.928	0.791
LAIFILT3	0.811	0.857	0.928	1	0.854
LAIFILT4	0.688	0.730	0.791	0.854	1
XS1	0.373	0.396	0.399	0.396	0.432
XS2	0.341	0.366	0.387	0.414	0.491
XS3	0.400	0.425	0.419	0.417	0.393
XS4	0.375	0.393	0.395	0.409	0.398
ratio	0.224	0.235	0.216	0.196	0.122
ndvi	0.221	0.233	0.212	0.191	0.118
tvi	0.221	0.232	0.211	0.189	0.117
pvi	0.322	0.340	0.327	0.315	0.260
msavi	-0.257	-0.270	-0.257	-0.247	-0.168
tsavi	0.251	0.265	0.246	0.227	0.161
savi1	0.222	0.233	0.213	0.191	0.119
savi2	0.222	0.233	0.212	0.191	0.118
wdvi	0.322	0.340	0.327	0.315	0.260

On voit toujours (Tableau V) qu'il y a une corrélation maximale dans le canal XS3, et XS4. Il en est de même pour les autres parcelles 5 et 6.

Sur la figure 8 la densité de LAI figurée correspond bien à la structure de la parcelle avec des zones de fortes densités (nombre d'individus important avec des diamètres élevés à l'opposé les zones plus claires correspondent à des zones moins denses au niveau des individus.

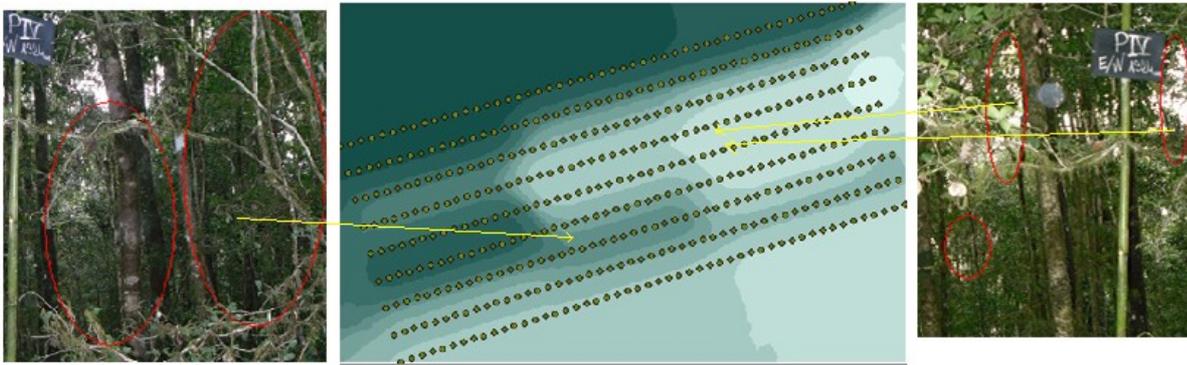


Fig.8 : Carte de LAI de la parcelle 4

IV-Conclusion :

Le traitement des données des images comparées aux données de terrain permet de mettre en évidence des corrélations dans les canaux XS3 et XS4 et dans les indices de végétation PVI, WDV et TSAVI. Le traitement en ondelette des données de LAI mesurés au niveau du sol montre une bonne corrélation avec les données de structures de la végétation notamment en ce qui concerne les densités et la distribution des diamètres des individus. Cependant ces traitements n'ont pas encore permis de trouver un indice qui permet de bien corrélés les données de terrain et des canaux des images. Il est probable que la géolocalisation avec les GPS n'ait pas permis un bon positionnement et un bon calage des données. Les traitements futurs tiendront compte de ces faits.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- ABDELMOUR, A. F. ; SELESNICK, I. W., Symmetric nearly orthogonal and orthogonal nearly symmetric wavelets. Research Report, 2003.
- Anonyme, 2006, Inventaire des fougères de Zahamena, Madagascar. Eds. Missouri Botanical Garden and Madagascar Research Conservation Programm, version pdf, 120 p
- BARET, F. ; GUYOT, G. ; MAJOR D., 1989b. Crop biomass evaluation using radiometric measurements. Photogrammetria, 43, 241-256.
- BARET, F. ; GUYOT, G. ; MAJOR D., 1989a, TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS'90, Vancouver, Canada, 3, 1355-1358.
- BROGE, N.H. ; LEBLANC, E., 2000. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. Remote Sensing of Environment, 76, pp.156–172.
- BUADES, A. ; COLL, B. ; MOREL, J. M., 2005. A review of image denoising algorithms, with a new one. Multiscale Modeling and Simulation (SIAM interdisciplinary journal).
- CALOZ, R. ; COLLET, C., 2001. Précis de Télédétection, Traitements numériques d'images de télédétection, vol. 3, Presses de l'Université de Québec, Agence Universitaire de la Francophonie, 386 pages.
- COLWELL, J.E. ; SUITS, G.H., 1975. Yield prediction by analysis of multispectral scanner data, NASA – CR 141865, ERIIm 109600-17-F, NASA. _

- CORNET, A., 1974. Essai de cartographie bioclimatique à Madagascar. Notice explicative. Orstom, 28p + carte.
- COURNAC, L. ; DUBOIS, M.;CHAVE ,J.; RIÉRA, B. 2002. Fast determination of light availability and leaf area index in tropical forests. *Journal of Tropical Ecology*, 18 : 295-302.
- COURNAC, L. ; DUBOIS, MA A.; RIÉRA, B. (2003). Rapids methods for characterizing forest structure in Madagascar, pp. 96-103. *in* The Natural History of Madagascar, Goodman, S. & Benstead, J. (Eds).
- DONOHO, D. L. ; JOHNSTONE, I. M,1994. Threshold selection for wavelet shrinkage of noisy data. *Proceedings of the 16th Annual International Conference of the IEEE*.
- HUETE, A.R., 1989. Soil influences in remotely-sensed vegetation canopy spectra, Chapter 4. In: G. Asrar (ed.), *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*. John Wiley & Sons, N.Y., pp. 107-141.
- HUMBERT, H. ; COURS DARNE, G., 1965. Carte internationale du tapis végétal et des conditions écologiques. Institut Français du Pondichery, Paris.
- JOBSON, J.D. (1992). *Applied multivariate data analysis. Volume II: Categorical and Multivariate Methods*. Springer-Verlag, New York.
- KOECHLIN, J. ; GUILLAUMET, J. L. ; MORAT, P., 1974. Flore et végétation de Madagascar. J. Cramer, Vaduz, 687p.
- LEGENDRE, P. ; LEGENDRE, L. (1998). *Numerical Ecology. Second English Edition*. Elsevier, Amsterdam, 403-406.
- LEPRIEUR, C. ; KERR, Y.H. ; PICHON, J.M. ,1996. Critical assessment of vegetation indices from AVHRR in a semiarid environment. *International Journal of Remote Sensing*.
- PERRIER DE LA BÂTHIE, H., 1932. Distribution dans l'île. *In* : Christensen C. ; *The Pteridophyta of Madagascar. Dansk. Bot.*
- QI ,J. ; CHEHBOUNI, A. ; HUETE, A.R. ; KERR ,Y.H., 1994. Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI). *Remote Sens Environ.*
- RICHARDSON, A.J. ; WIEGAND, C.L. (1977) . Distinguishing vegetation from soil background information, *Photogram. Engineer. Remote Sensing*
- ROUSE, J.W. ; HAAS, R.H. ; SCHELL, J.A. ; DEERIG, D.W. ;HARLAN, J.C. ,1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation, Maryland, USANASA/GSFC, Greenbelt.
- STEIN, C., , 1994. «Estimation of the mean of multivariate normal distribution», *Annals of statistics*, 9:195-211.
- TRUCHETET, F., 1998. «Ondelettes pour le signal numérique», Edition Hermès, Paris.