CARTOGRAPHIE DE LA MANGROVE DU DELTA DE LA MAHAJAMBA (NORD-OUEST DE MADAGASCAR) PAR CLASSIFICATION D'UNE IMAGE SPOT SELON UNE APPROCHE ORIENTÉE OBJET

Marc ROBIN [1], Eddy RENOUX [1], Françoise DEBAINE [1], Dabé RAKOTONAVALONA HOBIALISOA [2], Christine LAMBERTS [1]

[1] Université de Nantes, UMR CNRS 6554 LETG – Géolittomer BP 81227 44312 Nantes cedex 3 ; téléphone : +33 02 40 14 11 55 ; courriel : marc.robin@univ-nantes.fr

[2] Université d'Antananarivo, département de géographie, UFR géographie, Faculté des lettres et sciences humaines 101 Antananarivo ; courriel : hdrakotonavalona@yahoo.fr

Soumis le 2 mars 2009; accepté le 6 juillet 2010 - © *Revue Télédétection*, 2010, vol. 9, n° 3-4, p. 195-208

Résumé :

Cette étude est effectuée dans le cadre du programme de recherche Ecosystème tropicaux financé par le MEEDDAT et portant sur les « Perceptions, pratiques, gestions traditionnelles et modernes d'un écosystème forestier tropical : les mangroves du nord-ouest de Madagascar : mise en place d'une méthode d'optimisation des plans de gestion ». Ce programme nécessite une bonne connaissance de la ressource bois dans ces mangroves. L'objet de cet article est de faire l'état des lieux d'une des zones à mangroves étudiées (delta de la Mahajamba) à l'aide de l'imagerie satellitale et de relevés de terrains. Une approche orientée objet est adoptée dans cette étude car elle permet 1) d'améliorer considérablement la cartographie de la mangrove par rapport à la cartographie issue des méthodes plus traditionnelles pixel à pixel, 2) d'accéder à des informations précises sur les taux de recouvrement et la diversité floristique de la mangrove et 3) d'envisager l'utilisation améliorée de relations allométriques pour l'estimation de la ressource bois.

***Mots-clés** : savanes Madagascar, mangrove, cartographie, télédétection, approche orientée objet*

Object Based Image Analysis for mapping of Mahajamba delta mangrove forest (Madagascar)

Abstract

This article presents new results on the structure and above-ground biomass of the Mangrove forest of Madagascar north-western coast. These are part of French research program (ECOFOR) which aims at a better understanding of human pressure and management of this ecosystem. In such a context, we need more spatial information on the mangrove area and wood resources. Hence, we use satellites images and ground surveys to improve knowledge on the forest resource by i) using rule-based classification of spot imagery after object-oriented segmentation, ii) reaching an accurate information on vegetation cover and species diversity of mangrove, iii) attempting to set up a relation between allometric equation and image objets in order to assess wood resources.

***Keywords**: mangrove forest, Madagascar, cartography, remote sensing, object based image analysis.*

1. INTRODUCTION

Selon une évaluation de la FAO (mars 2003), les surfaces couvertes par les mangroves dans le monde sont passées de 19.8 millions d'hectares en 1980 à moins de 15 millions en 2000. A Madagascar, les surfaces de mangroves sont estimées à environ 300 000 ha en 1997 (Spalding, 1997) puis à 453 000 ha en 1999 à l'aide de données Spot 4 (http://www.fao.org/forestry/20071/fr/mdg/). Les données de base pour ces estimations diffèrent par nature ce qui entraîne un biais important dans l'estimation spatialisée de la ressource. L'ensemble des estimations convergent toutefois vers une valeur approximative comprise entre 300 000 et 400 000 ha.

La bonne connaissance de la répartition spatiale de la végétation passe par une cartographie statique à différentes échelles afin de disposer d'une vision synoptique de l'occupation spatiale à petite échelle et de visions à plus grande échelle au cas par cas (Murray, 2003 ; Saleh, 2007). Il est d'autre part nécessaire de prendre en compte l'évolution sur le dernier demi siècle si possible des surfaces à mangroves en vue de leur gestion (Giri, 2007). Le recours à l'imagerie satellitale devient alors essentiel afin de mesurer précisément l'extension de la ressource en fonction d'une typologie physionomique standard. Pour ce faire, la cartographie des mangroves tend encore à se faire par des approches pixel à pixel (Andriamalala, 2007 ; Giri, 2008) avec des résultats qui ne sont pas toujours d'une grande précision dès lors que l'on dépasse la simple dichotomie mangrove dense/mangrove peu dense ou encore mangrove à avicenniacées / mangrove à rhizophoracées.

Afin d'aller vers plus de précision et accéder aux associations d'essences ou aux essences, on peut imaginer utiliser des données hyperspectrales. Bien que ces données soient encore peu développées, les premiers résultats montrent leur potentiel même si la proximité des réponses spectrales des essences n'est pas de nature à en favoriser facilement la discrimination (Chaichoke, 2006).

L'amélioration de la résolution spatiale entraîne de même une amélioration dans la discrimination des essences, à condition toutefois de prendre en compte, dans le processus de classification, la complexité des éléments constitutifs d'une parcelle de mangrove à savoir la couronne des arbres, les ombres portées, l'espace entre les arbres (Krause, 2004).

Associée à la très haute résolution spectrale, la très haute résolution spatiale offre ainsi une configuration optimale idéale pour cette discrimination. De ce fait, l'introduction des paramètres de texture dans l'analyse des signatures améliore considérablement la discrimination des essences (Proisy, 2007).

L'approche orientée objet se situe dans cette droite ligne (Oruc, 2004, Benz, 2004, Lopez-Ornelas, 2005) et a été récemment appliquée aux mangroves à partir d'images à très haute résolution (Wang, 2004) ou de photographies aériennes (Krause, 2004). L'idée sous-jacente est de pouvoir identifier de façon fiable des groupements d'essences à défaut de pouvoir identifier individuellement chaque essence, en se focalisant sur les objets multi résolutions et, ce qui est nouveau, en injectant dans ces objets des attributs dépendant du contexte de l'objet mangrove, ce qui fait l'originalité de cette approche.

Cette démarche laisse envisager la spatialisation des relations allométriques (Fromard, 1998) au niveau de certaines essences (Kovacs, 2005). Il a déjà été démontré l'existence de bonnes relations entre le Leaf Area index (LAI) et le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Kovacs, 2004) et il devient possible avec précision d'établir des relations entre données spectrales et indicateurs de biomasse (Ramsey, 1996 ; Green, 1997 ; Kovacs, 2005) pour calculer une quantité de ressource disponible.

Cette étude apporte un éclairage sur la possibilité d'améliorer la discrimination des mangroves et ouvre des perspectives sur la spatialisation des relations allométriques afin d'accéder à l'estimation quantifiée de la ressource bois disponible à partir de l'imagerie satellitale.

2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE : LA MANGROVE DE MAHAJAMBA

Située sur la côte nord-ouest de Madagascar, cette mangrove est la plus étendue de l'île. Elle représente environ 10% du total des mangroves malgaches (figure 1).

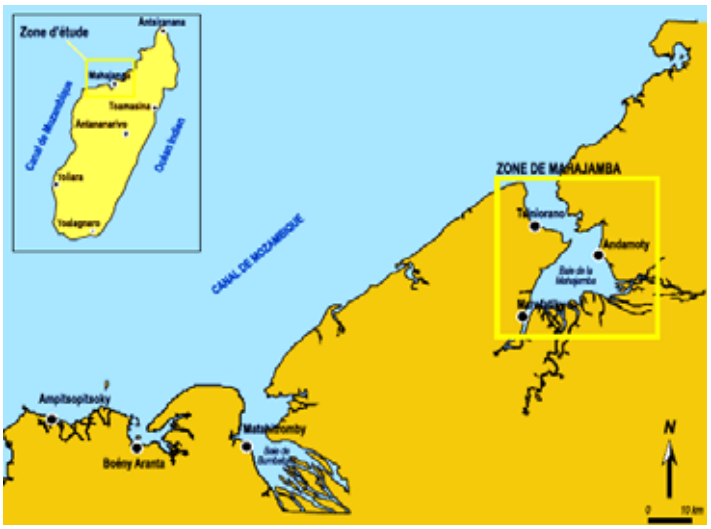


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

Plusieurs études se sont intéressées à son inventaire écologique et à son évolution -ou à celui des mangroves voisines- (Lebigre, 1988 ; Rasolofoharinoro, 1998 ; Pasqualini, 1998, Andriamalala, 2007). Cette mangrove est actuellement dans une dynamique de croissance puisqu'elle est passée de 36 000 hectares en 1973 à 42 000 hectares en 2006 (Guillet, 2008).

Cette mangrove, jusqu'ici particulièrement bien préservée, se trouve confrontée aujourd'hui à des pressions accrues. L'activité aquacole a débuté dans la baie de Mahajamba à partir de 1993 (société Aqualma) sur deux sites : la ferme aquacole, lieu d'élevage des crevettes, et l'usine, lieu de traitement et de conditionnement pour l'exportation. En 1993, les bassins atteignaient une superficie de 223 hectares. Depuis cette date, l'activité a connu une extension importante et les bassins représentent aujourd'hui une superficie de plus de 800 ha soit presque 2 % de la surface de la mangrove. Par les emplois créés, l'implantation de l'usine et de la ferme aquacole ont entraîné un développement très rapide du village le plus proche (Besakoa). En 1990, ce village comptait moins de 10 maisons. On en dénombre aujourd'hui 600 et la population y atteint près de 3 800 habitants. Les données démographiques obtenues depuis 2003 montrent plus généralement une forte augmentation de la population dans la baie, puisque l'on est passé de 10 000 habitants en 2003 à plus de 17 000 en 2005.

La mangrove de la Mahajamba appartient au type de mangrove orientale indo-pacifique, plus riche que la mangrove occidentale atlantique, mais moins riche en espèces que celles de l'insulinde. Elle s'apparente plutôt à celle de l'Afrique orientale par sa situation géographique. Huit espèces sont recensées à Madagascar (voire neuf si on inclut *Hibiscus tiliaceus* L. famille des malvacées) ainsi donc que dans la Mahajamba, réparties en 6 familles (tableau 1)

Tableau 1 : les essences de la mangrove ouest malgache

Famille	**Espèce**	**Nom vernaculaire (Sakalava)**
Sonneratiacées	*Sonneratia alba* Sm.	Farafaka
Avicenniacées	*Avicennia marina* (Forsk.) Vierh.	Afiafy
Rhizophoracées	*Rhizophora mucronata* Lam	Honkolahy
	Bruguiera gymnorrhiza Lam	Tsitolonina
	Ceriops tagal (Perr.) C.B.Rob	Honkovavy
Combretacées	*Lumnitzera racemosa* Willd.	Lovintso
Meliacées	*Xylocarpus granatum* Koen.	Sarigavy ou Antavela
Sterculiacées	*Heritiera littoralis* Aiton	Moromony

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1. Inventaire et classification des données

Les relevés sur le terrain ont commencé à être réalisés en juillet 2006 en suivant deux objectifs principaux : (i) l'identification des différentes essences de palétuviers et leur disposition spatiale ; (ii) la prise de mesures précises au sein de 54 quadrats variant de 100 à 400 m^2 pour calibrer l'imagerie satellitale. Des relevés de végétation ont été effectués dans 33 quadrats dans le delta de la Mahajamba (figure 2), les autres l'ont été dans le delta du Bombetoka et dans la baie du Boeny (secteur de Boeny Aranta). L'analyse floristique a été menée sur les 54 quadrats de façon à bénéficier d'une assiette statistique plus large. En plus de ces 54 relevés exhaustifs ont été réalisés 69 relevés « à la volée » géolocalisés au GPS mais avec un descriptif simplifié d'une zone (essence dominante, estimation du recouvrement) afin de d'évaluer les approches de classifications.

Pour chaque quadrat ont été relevés : les types d'arbres et, par type, la hauteur de la cime, la hauteur du fût, le diamètre du tronc à hauteur de poitrine, la largeur du houppier. La fréquence relative des espèces au sein des relevés (nombre de relevés où l'espèce est présente / nombre total de relevés, ici exprimée en pourcentage) a été calculée. *Avicennia marina* arrive en tête (61%) suivie de, successivement, *Rhizophora mucronata* (50%), *Ceriops tagal* (26%), *Bruguiera gymnorrhiza* (24%), *Xylocarpus granatum* (19%), *Sonneratia alba* (13%), *Heritiera littoralis* (4%), *Lumnitzera racemosa* (2%).

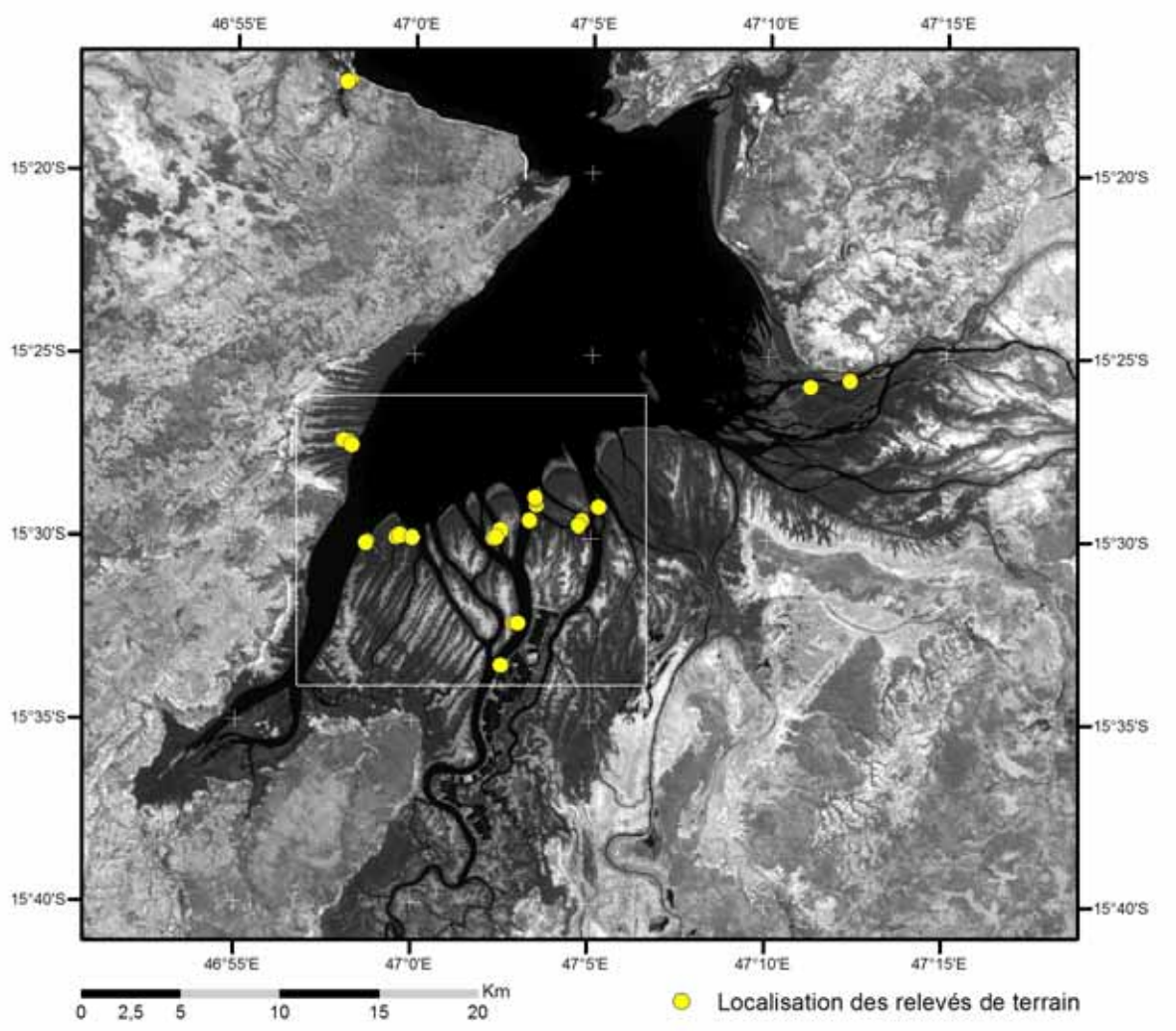


Figure 2 : Localisation des quadrats relevés dans la zone de la Mahajamba représentés sur un fond d'image Spot en mode Hi, bande B4. Le rectangle indique la localisation de la figure 6.

Des analyses numériques ont été menées sur les relevés à l'aide du logiciel JUICE© (*program for management, analysis and classification of ecological data*, Tichý 2002) après calcul de l'indice d'abondance-dominance de Braun-Blanquet (Braun-Blanquet , 1965). La classification effectuée permet de mettre en évidence 7 classes ou groupes et 3 sous-groupes de relevés en fonction de leur similitude et les combinaisons d'espèces caractérisant chacun des groupes (tableau 2).

Tableau 2 : Classification des relevés (après calcul de l'indice d'abondance-dominance de Braun-Blanquet, classification des quadrats en 7 classes et 3 sous-classes en fonction de leur similitude. Chaque groupe est caractérisé par une à deux espèces dominantes).

n° classe	Espèces caractéristiques	nombre de quadrats
1	*Sonneratia alba : peuplement monospécifique*	4
2	*Peuplement caractérisé par la présence d'Hibiscus thiliaceus*	2
3	*Peuplement à Avicennia marina dominant*	20
3.4	*associé à Xylocarpus granatum*	1
3.5	*associé à Rhizophora mucronata*	2
4	*Peuplement à Ceriops tagal et Xylocarpus granatum dominants*	7
4.5	*associé à Rhizophora mucronata*	4
5	*Rhizophora mucronata dominant*	4
6	*Peuplement caractérisé par la présence de Bruguiera gymnorhiza*	8
7	*Rhizophora mucronata : peuplement monospécifique*	9

3.2. L'imagerie satellitale

Pour cette étude sur le delta de la Mahajamba, deux images Spot 5 acquises sur programme CNES-ISIS ont été utilisées : une image Spot 2B à 2.5m (mode THR) et une image Spot 2B à 10m (4 bandes B1, B2, B3 et B4, mode HI). Elles ont été enregistrées le 24 juin 2006.

Afin de travailler sur des données sémantiquement comparables spatialement et temporellement (pour des études futures) et de s'affranchir des effets potentiels de l'atmosphère dans le calcul des divers indices de végétation, l'image Spot 5 en mode HI a été calibrée de façon à convertir les comptes radiométriques en réflectance au sol par l'application de la méthode empirique de la ligne (empiric line correction, Roberts, 1986 ; Kruse, 1990 ; Karpouzli, 2003), en utilisant une référence blanche prélevée sur le terrain (cible apparaissant homogène sur l'image au sein d'une surface d'au minimum 400m^2 en haut de plage), d'une référence grise (choix d'une cible apparaissant homogène sur l'image au sein d'une surface d'au minimum 400m^2 dans un tanne) puis sombre (eau non turbide au large correspondant aux valeurs numériques les plus basses sur l'image, avec utilisation d'un spectre standard) suivant une méthodologie utilisée par Méléder (2003). A cet effet, des échantillons sédimentaires de tannes et de sables dunaires géolocalisés ont été analysés à l'aide d'un spectroradiomètre de type GER 3700 (Geophysical and Environmental Research Corporation) mesurant la luminance en mW.m^{-}2.sr^{-}1.nm^{-1} entre 350 and 2550 nm en parallèle à la mesure d'un diffuseur parfait (Spectralon®). Les étapes méthodologiques ont été ensuite les suivantes : (i) Les spectres mesurés sont dégradés à la résolution spectrale de Spot ; (ii) l'image est transformée en luminance par l'utilisation des coefficients de calibration puis en réflectance apparente tenant compte de l'éclairement solaire spectral, d'un coefficient de correction terre/soleil et de l'angle solaire zénithal ; (iii) les pixels de l'image correspondant géométriquement aux cibles sont alors comparés aux spectres dégradés ; (iii) une régression est calculée entre pixels de l'image correspondant aux cibles et les cibles permettant le passage global en réflectance de l'image, sachant que l'hypothèse d'une atmosphère standard n'est pas totalement établie ce qui est de nature à générer des erreurs (Karpouzli, 2003).

3.3. Approche Orientée Objet

3.3.1. Segmentation multirésolution

L'objectif de la segmentation multirésolution est d'approcher au mieux la structuration scalaire de la formation végétale mangrove. Depuis le niveau le plus fin vers le niveau le moins fin, on distingue en effet des emboitements d'au moins 3 structures discernables sur une image satellitale de type Spot THR : au niveau le plus fin, le motif arbre / ombre portée / sol à nu intercalaire ; au niveau au dessus, la tache qui est un ensemble homogène, composée par la répétition du motif arbre / ombre portée / sol à nu intercalaire ; au niveau supérieur, l'ensemble des taches constituant la mosaïque végétale mangrove. Le problème vient du seuil de segmentation représentatif des 3 niveaux recherchés.

Une segmentation multirésolution (Baatz, 2000, Benz, 2004) est ainsi effectuée utilisant le logiciel Definiens© sur l'image THR panchromatique à 2.5m de résolution afin de bénéficier du maximum d'information texturale. Le principe général est de créer à chaque niveau des groupes de pixels répondant à des critères de similarités spectrale et texturale (Definiens, 2006). Afin d'établir une segmentation adéquate, c'est-à-dire correspondant aux niveaux souhaités, une série de segmentations est menée depuis le niveau le plus fin (niveau pixellaire) jusqu'à des segmentations au niveau le plus grossier (intégrant les mosaïques). Les objets crées par la segmentation à chaque niveau sont enrichis attributairement par des informations spectrales (par exemple les réflectances dans les bandes multispectrales ou encore les valeurs d'indices de végétation), texturales (par exemple les textures calculées à partir des matrices de co-occurrences en niveaux de gris), contextuelles (par exemple la distance aux chenaux de marées). Plus précisément, afin de déterminer un seuil au-delà duquel une perte d'information est préjudiciable à la reconnaissance de l'élément scalaire étudié (motif, tache, mosaïque) tout en conservant un bon compromis avec le temps de calcul, deux variables sont calculées à chaque niveau et constituent donc les attributs de tous les objets de chaque niveau retenu (voir plus loin). Cette démarche de suivi d'évolution des valeurs de variable en fonction de la croissance scalaire rejoint diverses démarches du suivi de diverses variables telles que la variance, la structure des classes de classifications pixellaires ou de diverses métriques spatiales en fonction de l'agrégation scalaire (Woodcook, 1987 ; Benson, 1995 ; Manson, 2003 par exemple),

En créant un emboitement d'objets par segmentations successives depuis le niveau le plus fin jusqu'au niveau le plus grossier, nous pouvons observer le comportement spectral et textural d'un objet qui change de nature avec la progressive agrégation d'autres objets au fur et à mesure de l'extension de sa surface. Ainsi, depuis un objet-quadrat situé dans une zone à C*eriops tagal* dominant (classe 4.5) à équidistance de chenaux de marée, on peut observer à chaque niveau de segmentation une variation du comportement spectral et textural à partir de la lecture de deux variables : le NDVIc (Corrected Normalized Difference Vegetation Index, Nemani, 1993) et la dissimilarité (GLCM dissimilarity, Haralick, 1973 ; Definiens, 2006) (figure 3). Le choix de ces deux variables repose sur deux critères : (i) on cherche une variable représentative de l'entrée spectrale la plus corrélée aux taux de recouvrement estimés à partir des mesures faites dans les quadrats (NDVIc) et l'autre représentative de l'entrée texturale (GLCM Dissimilarity) ; (ii) ces deux variables sont les moins corrélées dans l'image (voir tableau 3, partie A) et leur comportement n'est a priori pas redondant.

Ainsi, au niveau du quadrat de départ *Ceriops tagal* de 100 m^2, le NDVIc est de 0.62 et la dissimilarité de 1.9. On observe un comportement opposé entre l'évolution du NDVIc et de la dissimilarité passant par des seuils : du haut vers le bas sur la figure : un premier seuil s'observe vers 20 000 m^2, un second vers 1 500-2 000 m^2 et un troisième vers 500m^2.

Dans le contexte de ce quadrat, ces seuils ont la signification suivante : premier seuil (super objets) : niveau de la mosaïque végétale exprimant, au-delà de l'assemblage de taches de végétation, les grandes tendances en matière de recouvrement végétal (notion de densité) ; second seuil (objets) : il s'agit des taches individualisées au sein de cette mosaïque ; troisième seuil (sub objets) : il s'agit des motifs arbres / ombres portées / sols à nu intercalaires. Chaque élément de ces motifs peut être analysé au niveau du pixel constituant ces sub objets.

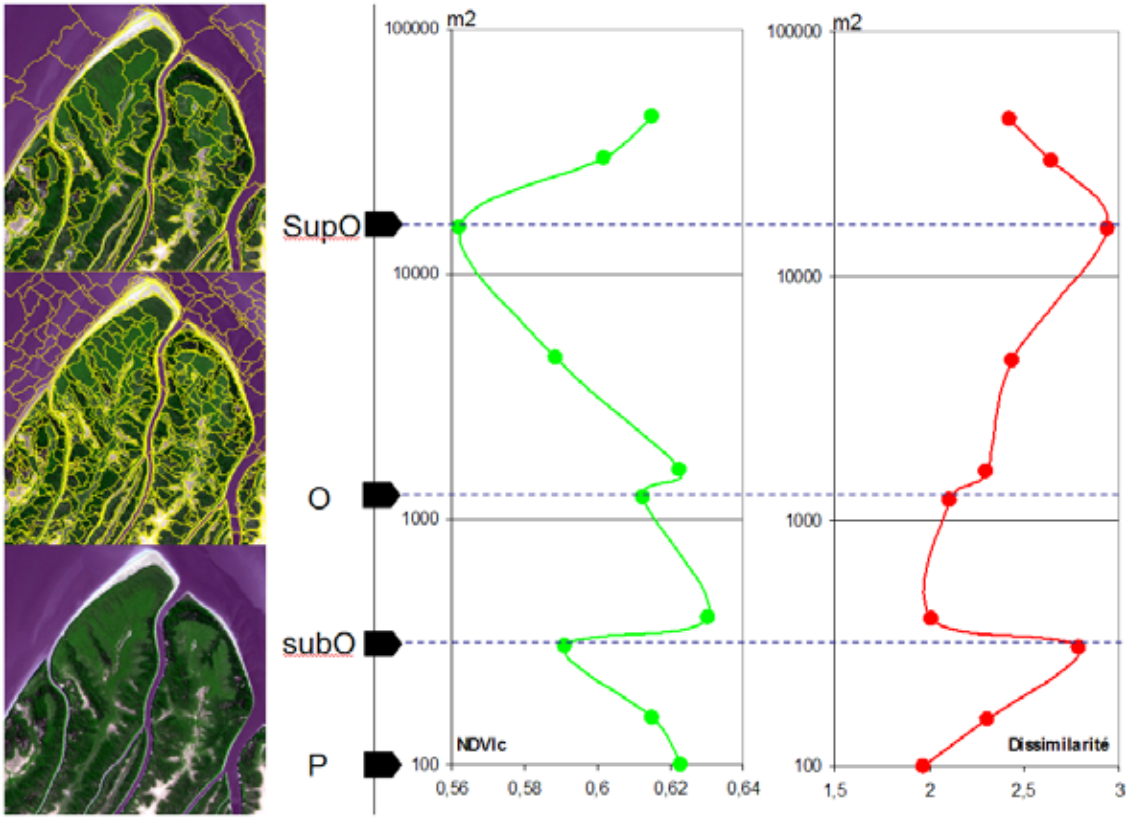


Figure 3 : Le choix des seuils de segmentation (SupO = super objet ; O = objet ; subO = sub objet ; P = pixel. NDVIc et Dissimilarité : voir légende tableau 3).

Dans cette étude ne sont retenus que les deux premiers niveaux : le niveau général des super objets pour la mise en évidence du recouvrement et le niveau plus précis des objets pour tenter de définir la nature floristique de ces taches.

total	R	NIR	NDVIc	SLAVI	dissimilarité	sec. mom. ang
R	1					
NIR	0,231	1				
NDVIc	-0,625	0,429	1			
SLAVI	-0,775	0,094	0,892	1		
dissimilarité	0,301	0,245	0,003	-0,257	1	
sec. mom. ang	-0,279	-0,496	-0,242	0,129	-0,725	1

quadrats	R	NIR	NDVIc	SLAVI	dissimilarité	sec. mom. ang
R	1					
NIR	0,975	1				
NDVIc	-0,951	-0,879	1			
SLAVI	-0,855	-0,763	0,966	1		
dissimilarité	0,975	0,989	-0,879	-0,776	1	
sec. mom. ang	-0,912	-0,873	0,911	0,817	-0,861	1

Tableau 3 : Les corrélations entre les variables sur l'ensemble de l'image (total)) et sur les seuls parties à mangroves (quadrats)
R = bande Rouge ; NIR = bande Proche Infrarouge ; NDVIc = NDVI corrigé (Nemani, 1993),
SLAVI = Specific Leaf Area Vegetation Index (Lymburner, 2000), dissimilarité = Grey Level Co-occurrence Matrix dissimilarity ;
Ang. 2nd moment = Grey Level Co-occurrence Matrix angular second momentum (Haralick, 1973)

3.3.2. Intersection avec les quadrats

Chaque niveau d'objet est croisé avec la localisation des quadrats, de façon à injecter dans les segments intégrant les quadrats l'information spectrale, texturale et contextuelle issue de la segmentation. Il devient alors possible de mettre en relation les données du terrain au niveau des quadrats avec les données issues du traitement de l'image aux différents niveaux scalaires. Ceci dans l'objectif (i) de permettre d'établir une série de parcelles d'entrainement améliorant considérablement la qualité de la classification de cette formation végétale (ii) de bâtir l'amorce d'un modèle de la ressource ligneuse.

3.3.2. Choix des variables

Chaque objet ainsi créé contient ainsi des attributs qui peuvent être spectraux, texturaux ou contextuels. Ces attributs sont amenés à être comparés avec les données de terrain au niveau des quadrats. Il s'agit dès lors de sélectionner les variables images les plus discriminantes. En fonction d'un objectif de classification est testée une série d'indices de nature à mettre en évidence de la façon la plus discriminante possible le long d'un transect test la décroissance du couvert végétal depuis un chenal de marée jusqu'aux tannes. Ce test est effectué sur un groupe de variables spectrales (indices de végétation) et sur un groupe de variables de texture (calculées à partir des matrices de co-occurrences en niveau de gris). Sur la figure 4, un groupe de variables spectrales (réflectances verte, rouge, proche infrarouge, moyen infrarouge), de variables combinées en indices spectraux (NDVI, NDVIc, slavi), de variables de textures (homogénéité, second moment angulaire, corrélation, contraste, dissimilarité, entropie) est présenté dans les plans factoriels 1 et 2 d'une ACP. On devine les redondances entre ces variables et la nécessité de choisir les meilleures variables les plus décorrélées. On retient un groupe de 2 variables spectrales (réflectance rouge, réflectance moyen infrarouge, de 2 variables indiciaires (NDVIc et Specific Leaf Area Vegetation Index, SLAVI, Lymburner, 2000) et de 2 variables de texture (GLCM dissimilarity, GLCM Angular Second Moment, Haralick, 1973 ; Definiens, 2006). Malgré la bonne discrimination des variables au niveau de l'image Spot, la matrice de similarité au niveau des quadrats montre une proximité inhérente au fait que les surfaces de mangroves sont spectralement et texturalement assez proches les unes des autres, du moins dans leurs parties denses (tableau 3 : matrice du haut : plan spot ; matrice du bas : plan quadrats).

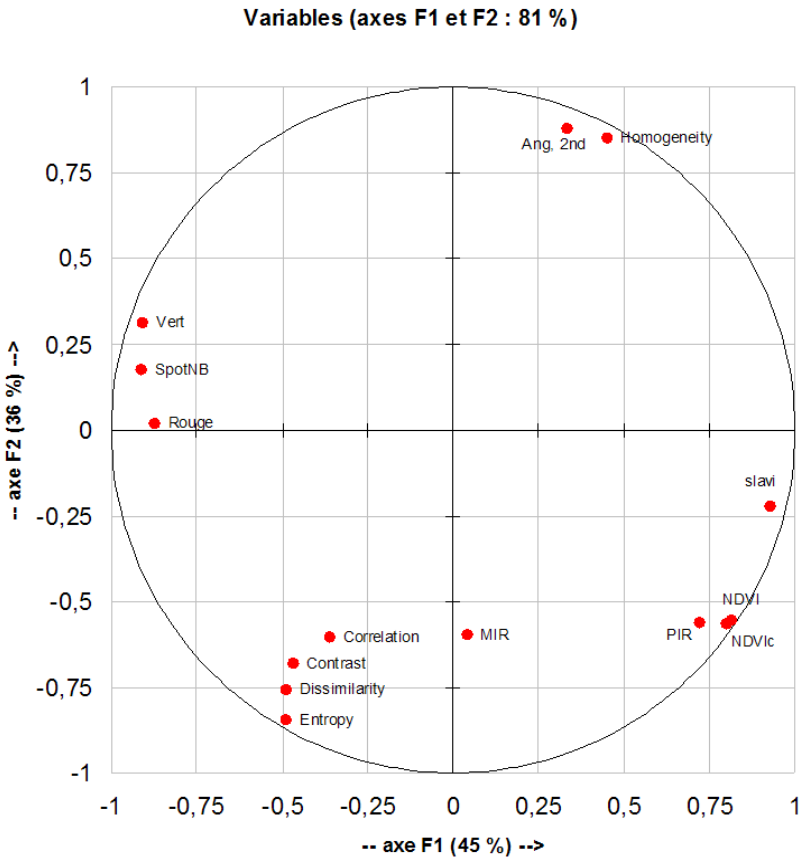


Figure 4 : Les variables dans le plan factoriel

3.3.4. Classification des objets

Chaque segment (super objets et objets) est ensuite classé en fonction de règles présentées ci-après (figure 5).

Les supers objets sont classés de façon à faire ressortir le taux de recouvrement. On utilise pour ce faire des fonctions d'appartenance calculées sur les variables NDVIc et dissimilarité (GLCM Dis.). Ces deux variables sont retenues en raison de leur faible corrélation au niveau de l'image globale. Même si le SLAVI est moins corrélé que le NDVIc avec la variable GLCM Dissimilarity au niveau des objets-quadrats, nous faisons l'hypothèse que la distinction est un peu meilleure au niveau des autres objets de l'image hors quadrat probablement dans les zones à densité moindre. Les quadrats en effet sont en majorité situés dans des zones de recouvrement importants et ne sont pas révélateurs des secteurs à recouvrement moindre. Les fonctions d'appartenance sont articulées autour des seuils fixés par moyennes spectrales et texturales relevées par classes de quadrats, seuils extrapolés à l'ensemble de l'image. La variable PIR est aussi retenue pour distinguer les surfaces immergées au moment de la prise de vue des vasières. La variable contextuelle distance aux chenaux est retenue car la dégradation de la mangrove depuis le front jusqu'aux tannes est en effet une variable très discriminante en matière notamment de taux de recouvrement.

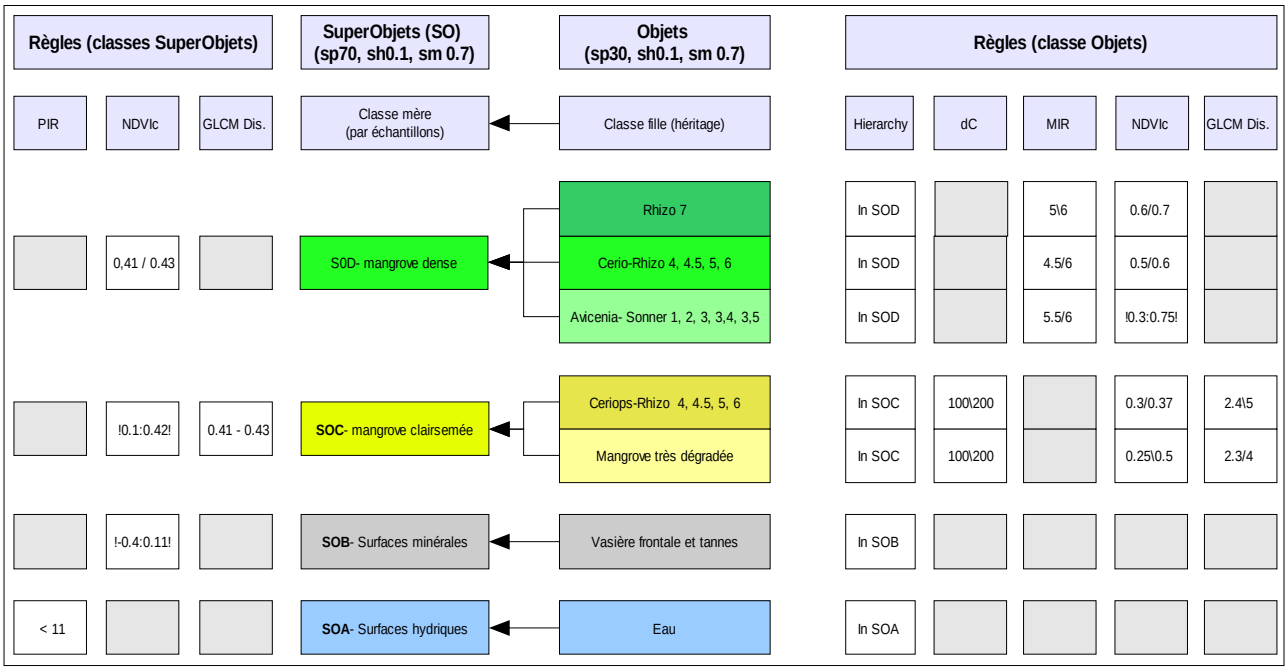


Figure 5 : Les règles d'affectation des objets et des super objets

Les objets quant à eux sont classés de façon à tenter de faire ressortir des associations floristiques correspondant aux classes construites à partir des quadrats. Les règles d'affectation des fonctions d'appartenance utilisent la relation d'héritage des variables spectrales (MIR, NDVIc), des variables de texture (dissimilarité) et une variable contextuelle (distance aux chenaux dC). Les critères par fonction d'appartenance sont précisés par classe et par variable. Par exemple, la classe objet Rhizo 7 est l'une des trois classes appartenant au super objet mangrove dense. Elle est incluse hiérarchiquement dans cette classe (In SOD), elle est de plus définie par une sigmoïde entre les valeurs 5 (probabilité maximum) et 6 (probabilité minimum) dans la bande MIR et par une autre sigmoïde entre 0.6 (probabilité minimum) à 0.7 (probabilité maximum) calculée pour l'indice NDVIc. Ces valeurs sont déduites de la confrontation dans la base de données des attributs terrain des quadrats et des attributs image de ces même quadrats au niveau des objets-quadrats. Une simple moyenne par classe de quadrat donne la valeur centrale et une valeur d'écart-type. Cette dernière valeur sert de part et d'autre de la valeur seuil à fixer les bornes de la fonction d'appartenance.

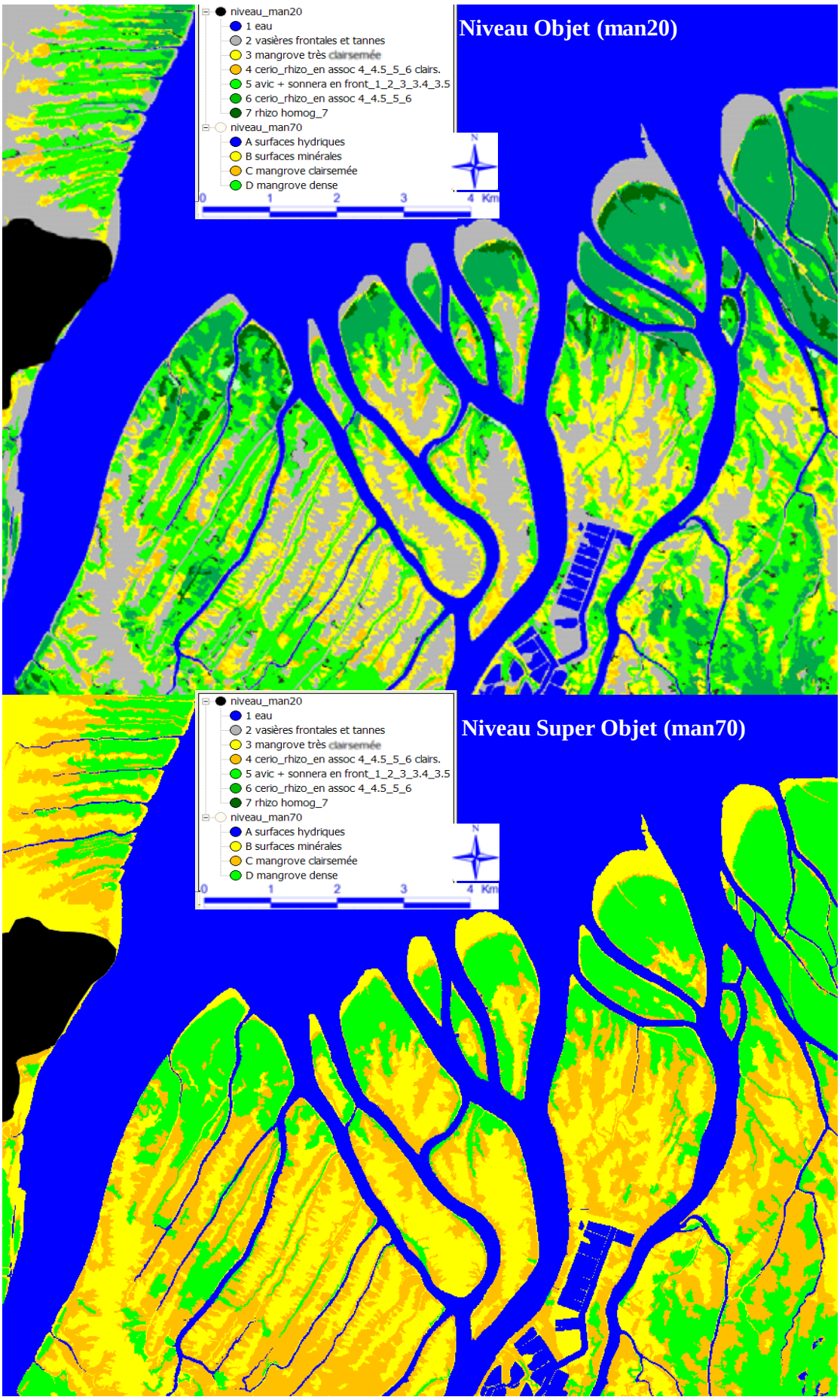


Figure 6 : Cartographie issue de la classification orientée objet (extrait du haut : objets ; extrait du bas : super objets)

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. Qualité et signification de la classification

La classification orientée objet sur un sous ensemble de la Mahajamba permet d'améliorer considérablement la qualité de l'affectation des surfaces biophysiques à des classes d'occupation du sol (figure 6). D'un coefficient de Kappa de 0.75 -calculé entre les classes de l'image et la série de 69 relevés GPS « à la volée »- atteint avec une classification pixel à pixel suivant une nomenclature simplifiée (Guillet, 2008), on passe à un coefficient de Kappa de 1 avec l'approche orienté objet au niveau des supers objets et de 0.92 au niveau des objets en améliorant de façon substantielle la nomenclature.

Des classifications de qualité peuvent en effet être atteintes dans ce domaine de mangroves mais cela ne se fait qu'en simplifiant les postes de classification à généralement deux : le couvert dense et le couvert moins dense (Giri, 2008) ou en focalisant sur la dichotomie Rhizophoracées / Avicenniacées (Krause, 2004). En utilisant des variables spectrales, texturales et contextuelle, l'accès aux associations devient possible sur deux niveaux de segmentation en intégrant au niveau des objets la dimension contextuelle (l'aspect clairsemé est inversement proportionnel à la distance aux tannes).

La segmentation multirésolution en 2 niveaux, l'un centré sur la densité du couvert végétal et l'autre centré sur les associations donne l'accès à une cartographie dynamique : à association égale, la plus ou moins grande densité dénote soit une colonisation, soit un dépérissement du fait d'une surélévation sédimentaire du tanne, diminuant les temps d'inondation, modifiant le degré de salinité et rendant difficile l'existence de telle ou telle essence. Ainsi la mangrove à *Avicennia marina* que l'on retrouve en diverses positions depuis la bordure des chenaux jusqu'aux tannes est différenciable écologiquement par son niveau de densité : à forte densité, le couvert d'*Avicennia marina* est généralement jeune (< 20-30 ans). Lorsque la densité diminue et que la distance aux chenaux augmente ou que la distance au front du delta s'accroît, les avicennias sont plus vieux, moins élancés, les houppiers diminuent et le diamètre des futs augmente avec une régénérescence devenant difficile. On y constate alors généralement peu ou pas de pneumatophores, une régénération exclusivement végétative les plantules ne pouvant germer, et, de ce fait, très peu voire pas de jeunes pousses-plants. Le tanne, en se surélevant et diminuant les temps d'inondation, étouffe ainsi progressivement la mangrove, amenant les avicennias en place à s'accomoder mais plus à se renouveler. Vu du haut, les sols argilo-limoneux rougeâtres prennent de plus en plus de place et tendent à s'indurer, caractéristique de la mangrove sénescente. On remarque à ce propos que la pression aquacole pesant sur la mangrove pèse en réalité sur les tannes : les bassins aquacoles repérables par leur géométrie sur les cartes et intégrés dans la classe surface hydrique s'y étendent en totalité. La lecture des cartes aux deux niveaux permet donc une approche dynamique de la mangrove.

4.2. La possibilité d'une spatialisation des relations allométriques

Une nombreuse bibliographie propose des formules allométriques permettant de relier des variables de structures entre elles et à la biomasse aérienne (Fromard, 1998 par exemple). Il a été de plus démontré de nombreuses fois des relations existantes entre des variables issues d'images aériennes ou satellitales sous la forme d'indices de végétation divers et la biomasse (Green, 1997 par exemple).

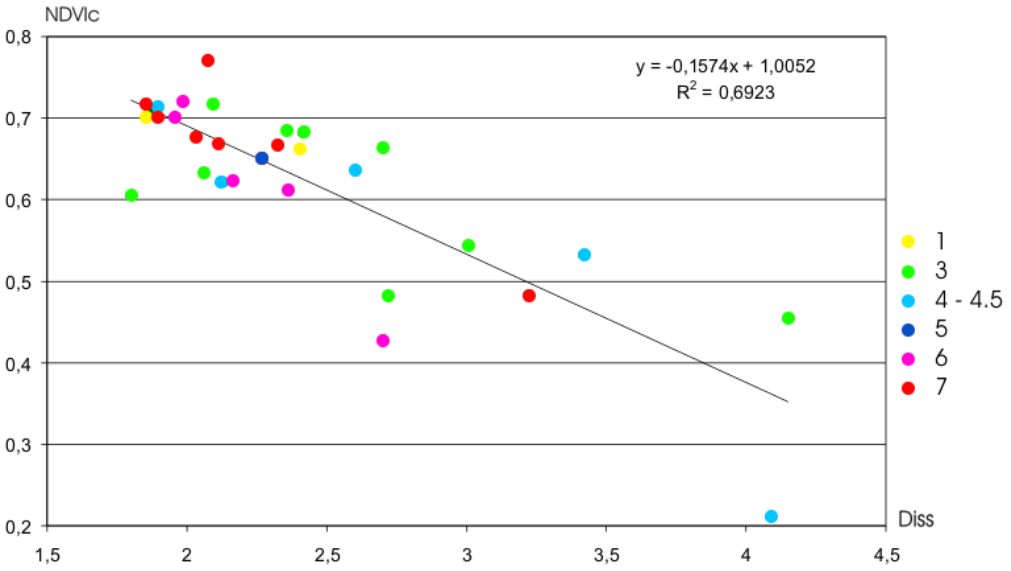


Figure 7 : relation NDVIc – dissimilarité pour les 33 objets quadrats de la Mahajamba

L'approche orienté objet peut permettre d'approcher de telles relations par la mise en relation, au sein des objets et classe par classe, des variables spectrales, texturales et contextuelles qui combinées peuvent produire des indices qu'on peut relier à des valeurs de biomasses et de morphologie végétale (diamètre, hauteur de fut etc…). Ainsi au sein des classes obtenues peuvent être spatialisées des relations allométriques classe par classe. Sur la figure 7, on constate une relation globale moyenne (0,69) entre une variable spectrale (NDVIc) et une variable texturale (dissimilarité) pour les 33 objets-quadrats de la Mahajamba. On devine toutefois l'existence d'une certaine corrélation entre l'augmentation du NDVIc et la diminution de la dissimilarité. On peut aussi visuellement souligner une relation qui n'est pas la même pour les différentes classes. De ce fait, la recherche d'une relation doit se faire à l'intérieur d'une classe et non globalement pour mieux mettre en lumière l'organisation de la végétation classe par classe.

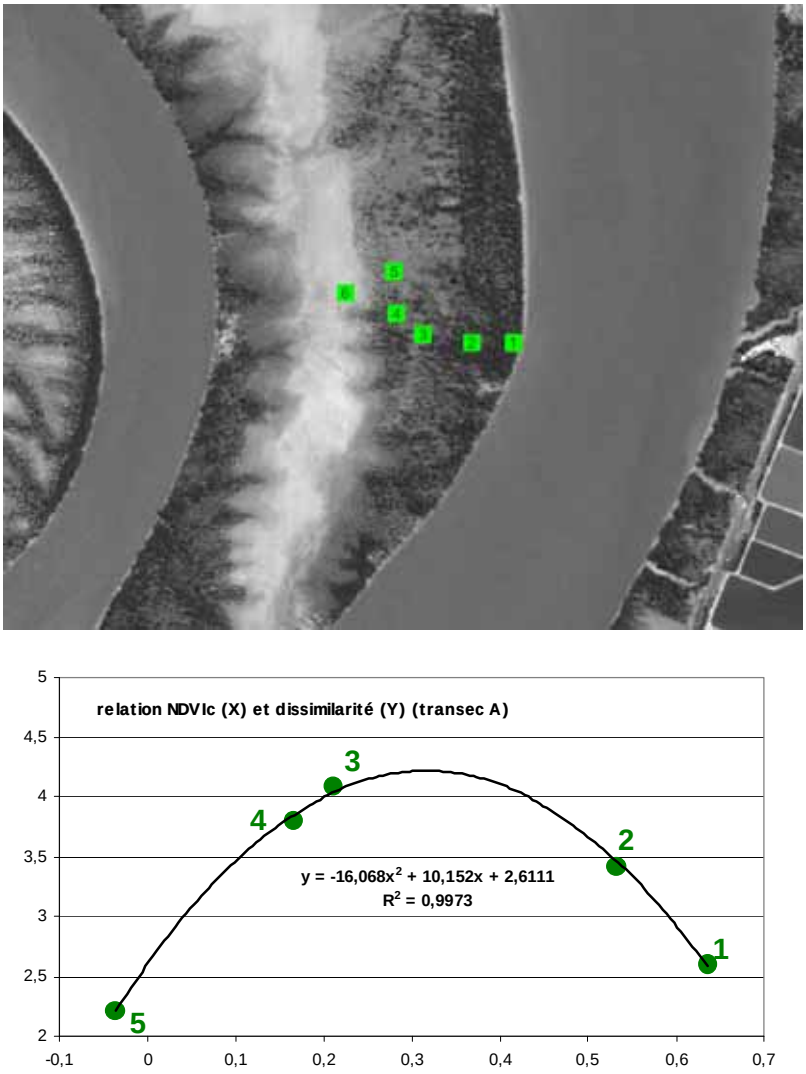


Figure 8 : relation NDVIc – dissimilarité sur un transect de 6 objets quadrats (les points 5 et 6 sont confondus)

A titre d'exemple, cette relation prise à l'intérieur d'une classe permet de mettre en évidence une signification entre ces deux variables le long d'un transect floristiquement homogène mais où la densité du couvert varie (figure 8). Le long de ce transect en classe 4, une bonne relation attendue entre le NDVIc et le taux de recouvrement est constatée (0,96) ainsi qu'entre le taux de recouvrement et la cubature estimée sur le terrain au sein des quadrats inventoriés (0,98) (figure 9). Ainsi, du quadrat n°1 situé le long du chenal jusqu'au n° 6 situé à 500m de ce chenal, on passe d'un taux de recouvrement de 55,6% correspondant à une cubature totale –estimée à partir de la mesure du diamètre à hauteur de poitrine et de la longueur du fût- de 55,4m^3/ha à un recouvrement et une cubature nulle au niveau des tannes en passant par une décroissante rapide du recouvrement et de la cubature au niveau des quadrats n°2 et n°3 (respectivement : recouvrement de 49% puis de 18%, cubature de 8,1 puis de 0,9m^3/ha). Calculés sur un simple transect, ces résultats préliminaires montrent que l'approche permet d'envisager la spatialisation d'une relation entre l'imagerie satellitale et des variables allométriques.

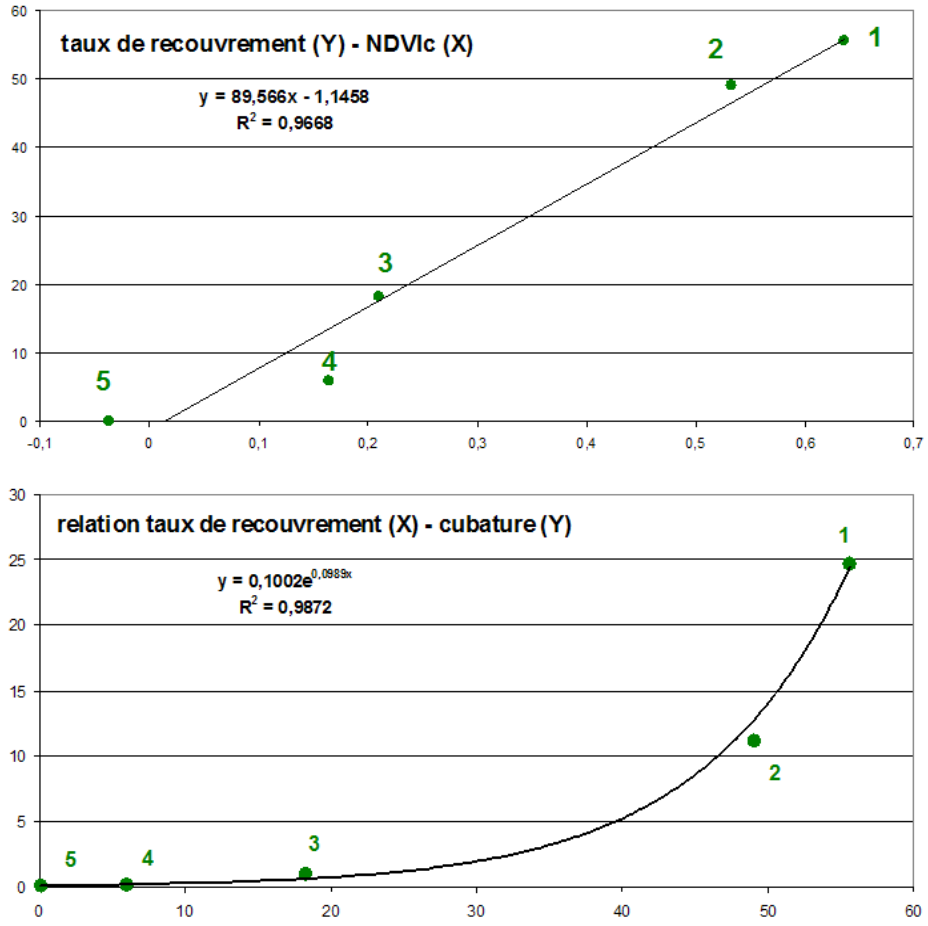


Figure 9 : relations NDVIc – taux de recouvrement - cubature

Il n'est pas envisageable d'appliquer une relation allométrique à l'ensemble du massif de mangrove car chaque essence est caractérisée par une relation qui lui est propre. Il est de même difficile a priori d'appliquer ces relations à des classes trop hétérogènes floristiquement. En revanche, il est possible de rechercher de telles relations au sein de classes moins hétérogènes floristiquement.

5. CONCLUSION

Une amélioration de la spatialisation de la ressource bois par télédétection est mise en évidence par une approche orientée-objet. L'utilisation de variables spectrales, texturales et contextuelles, calculées à deux niveaux de segmentation sur des objets et super objets, montre 1) qu'une nette amélioration de la cartographie de la ressource mangrove devient possible, 2) qu'il est possible d'affiner la nomenclature généralement utilisée à un niveau scalaire donné 3) qu'une spatialisation des relations allométriques devient ainsi envisageable. Des relevés complémentaires effectués fin 2008 et en cours d'intégration dans la base de données vont permettre d'améliorer les modèles proposés, notamment en affinant la partie contextuelle des objets (intégration de la dynamique sédimentaire du delta par comparaison multidate à l'aide de l'archive Landsat), puis d'extrapoler la spatialisation à l'ensemble du delta de la Mahajamba ainsi qu'aux autres massifs forestiers de la zone d'étude ou de la région de Mahajanga (Bombetoka, Boeny et Namakia). L'accès à une information quantifiée inédite à ce niveau de précision est le gage d'une bonne gestion de la ressource bois sur la côte nord-ouest de Madagascar, avec des perspectives de reproductibilité à d'autres massifs de mangroves en zone intertropicale.

Remerciements

Cet article a bénéficié du programme Ecosystèmes Tropicaux co-animé par le GIP ECOFOR et le MEEDDAT (Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire), ainsi que du programme « Actions de Recherche en Réseau, Réseau de chercheurs Environnement et développement durable 2008-2009». Cette étude a de plus été permise par l'acquisition de 3 images Spot dans le cadre du programme CNES-ISIS 0606-882 sur aide du BQR de l'Université de Nantes.

Références

Andriamalala, C., 2007. Etude écologique pour la gestion des mangroves à Madagascar : comparaison d'une mangrove littorale et d'estuaire à l'aide de la télédétection, thèse, Basel, 280 p.

Baatz, M., and Schaepe, A., 2000. Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In J. Strobl, & T. Blaschke (Eds.), Angewandte geographische informationsverarbeitung, vol. XII., Heidelberg, Germany7 Wichmann, 12 – 23.

Benson B. J. and MacKenzie M. D., 1995. Effects of sensor spatial resolution on landscape structure parameters, Landscape Ecology vol. 10 no. 2 pp 113-120.

Benz, U., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I., Eynen M., 2004. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 58, p. 239-258.

Braun-Blanquet, J. 1965. The study of plant communities : plant sociology. Masson, New York and London. 439p

Chaichoke Vaiphasa, 2006. Remote Sensing Techniques for Mangrove Mapping, thesis, Wageningen University.

Definiens, 2006, Definitiens Professional 5 User Guide. Document version 5.0.6.1. Definiens AG, Munchen, Germany.

Fromard F., Puig H., Mougin E., Marty G., Betoulle J.L., Cadamuro L., 1998. Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: new data from French Guiana Oecologia (1998) 115:39±53

Giri C., Pengra B., Zhu Z., Singh A., Tieszen L.L., 2007. Monitoring mangrove forest dynamics of the Sundarbans in Bangladesh and India using multi-temporal satellites data from 1973 to 2000. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 10 p.

Giri C. and Muhlhausen J., 2008. Mangrove Forest Distributions and Dynamics in Madagascar (1975–2005), Sensors 2008, 8, 2104-2117

Green E.P., Mumby P.J., Edwards A.J., Clark C.D, Ellis A.C., 1997. Estimating leaf area index of mangroves from satellite data. Aquatic Botany, n° 58, p. 11-19.

Guillet M, Renoux E, Robin M, Debaine F, Rakotonavalona Hobialisoa D., Ratsivalaka S, 2008. Suivi et analyse de l'évolution de la mangrove de Mahajamba (nord-ouest de Madagascar), Colloque International Pluridisciplinaire IFRÉSI/MESHS, TVES, IMN, DYRT, EREIA et CLERSE Lille 2008 : Le littoral, Subir, Dire, Agir - 16, 17, 18 janvier 2008

Haralick R.M., Shanmugam K., Its'hak Dinstein, 1973. Textural Features for Image Classification. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics SMC-3 (6), p. 610–621.

Karpouzli E. and Malthus T., 2003, The empirical line method for the atmospheric correction of IKONOS imagery, 2003, vol. 24, n°5, 1143–1150

Kovacs J.M., Flores-Verdugo F., Wang J., Aspdena L.-P., 2004. Estimating leaf area index of a degraded mangrove forest using high spatial resolution satellite data Aquatic Botany 80 (2004), p. 13–22

Kovacs J.M., Wang J., Flores-Verdugo F., 2005. Mapping mangrove leaf area index at the species level using IKONOS and LAI-2000 sensors for the Agua Brava Lagoon, Mexican Pacific, Estuarine, Coastal and Shelf Science 62 (2005), p. 377–384

Krause G., Bock M., Weiers S., Braun G., 2004. Mapping Land-Cover and Mangrove Structures with Remote Sensing Techniques: A Contribution to a Synoptic GIS in Support of Coastal Management in North Brazil, Environmental Management Vol. 34, No. 3, p. 429–440.

Kruse F.A., Kierein-Young K.S., Boardman J.W., 1990, Mineral mapping at Cuprite, Nevada with a 63-channel imaging spectrometer, Photogramm. Eng. Remote Sens. 56 p. 83–92.

Lebigre J.M., 1988. Le marais maritime de la Tsiribihina (Madagascar) : paysage végétal et dynamique. Bois et Forêts des Tropiques, 215, p. 37-60.,

Lopez-Ornelas E., Sèdes F., Flouza G., Laporterie-Déjean F., 2005. Une approche objets pour la description des images à très haute résolution spatiale et l'extraction de connaissances, revue Télédétection, Vol. 5, n°(1-2-3), p. 261-273

Lymburner, L., Beggs, P.J., Jacobson, C.R., 2000. Estimation of canopy-average surface-specific leaf area using Landsat TM data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 66 (2), p. 183–191.

Manson F.J., Loneragan N.R., Phinn S.R., 2003. Spatial and temporal variation in distribution of mangroves in Moreton Bay, subtropical Australia: a comparison of pattern metrics and change detection analyses based on aerial photographs, Estuarine, Coastal and Shelf Science 57 (2003) 653–666.

Méléder V., Launeau P., Barillé L., Rincé Y., 2003. Cartographie des peuplements du microphytobenthos par télédétection spatiale visible-infrarouge dans un écosystème conchylicole, C. R. Biologies 326 (2003) 377–389 Biologie et pathologie animales

Murray M.R., Zisman S.A., Furley P.A., Munro D.M., Gibson J., Ratter J., Bridgewater S., Minty C.D., Place C.J., 2003. The mangroves of Belize. Part.1: Distribution, composition and classification. Forest, Ecology and Management, n° 174, p. 265-279.

Nemani, R., Pierce, L., Running, S., 1993. Forest ecosystem process at the watershed scale: sensitivity to remotely-sensed leaf area index estimates. International Journal of Remote Sensing 14, 2519–2539.

Oruc, M., Marangoz, A.M., Buyuksalish, G., 2004. Comparison of pixel-based and object -oriented classification approaches using Landsat-7 ETM spectral bands. Proceedings of the ISRPS 2004 Annual Conference, Istanbul, Turkey, p. 19-23.

Pasqualini V., Iltis J., Dessay N., Lointier M. et Polidori L., 1998. Cartographie par télédétection (SPOT-XS, radar SIR-C) des mangroves d'un marais côtier du Nord-Ouest de Madagascar. ORSTOM, Maison de la Télédétection, Montpellier, 9 p.

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 (3), 15 August 2007, p. 379-392.

Ramsey W.E., Jensen J.R., 1996. Remote sensing of mangrove wetlands : relating canopy spectra to site-specific data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62, n°. 8, p. 939-948.

Rasolofoharinoro M., Blasco F., Bellan M.F., Aizpuru M., Gauquelin T., Denis J., 1998. A remote sensing based methodology for mangroves studies in Madagascar. International Journal Remote Sensing, vol. 19, n°10, p. 1873-1886.

Roberts D.A., Yamagushi Y., Lyon R.J.P., 1986, Comparison of various techniques for calibration of AIS data, in : G. Vane, A.F.H. Goetz (Eds.), Proc. 2nd Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop.

Saleh M.A, 2007. Assessment of mangrove vegetation on Abu Minqar Island of the Red Sea. Journal of arid Environnments, n°68, p. 331-336.

Spalding M., Blasco F., Field C., 1997. World Mangrove Atlas, ISME, WCMC, ITTO, 178 p.

Tichý L., 2002. JUICE, software for vegetation classification, *Journal of Vegetation Science*, 13, p. 451-453.

Wang L., Sousa W.P., Gong P., 2004. Integration of object-based and pixel-based classification for mapping mangroves with IKONOS imagery, Int. J. Remote Sensing, 2004, 25 (24), p.5655–5668

Woodcock C.E., Stralher A.H., 1987. The factor of scale in remote sensing, remote sensing of Environment, 21, p. 311-332.