

# Détection de changement de l'occupation du sol dans une commune à la périphérie de la forêt humide de Fianarantsoa

## Land use change in a commune of Fianarantsoa humid forest

A. ANDRIANARIVO <sup>1</sup>  
É DELAÎTRE <sup>2</sup>  
A-É LAQUES <sup>2</sup>  
S. M. CARRIÈRE <sup>3</sup>  
D. HERVÉ <sup>3</sup>

(1) Département de Géographie, Université d'Antananarivo, BP 907, Antananarivo 101, Madagascar

(2) Institut de Recherche pour le Développement (IRD UMR 228), Maison de la Télédétection - 500 rue Jean-François Breton, 34093 Montpellier, France

(3) Institut de Recherche pour le Développement (IRD UMR 220), BP 64501, 34394 Montpellier, France

### Résumé

Cartographier et suivre la dynamique de la superficie forestière et de l'occupation du sol à la périphérie de la forêt humide malgache est l'une des préoccupations des décideurs et des institutions impliquées dans le domaine de l'environnement. Une commune rurale est choisie, Androy (Région Haute Matsiatra), dans la zone périphérique du parc de Ranomafana, pour la part de forêt de son territoire. Les changements d'occupation du sol et l'évolution du couvert forestier sont analysés dans cette commune sur 20 ans, à partir de deux images SPOT : SPOT5 de 2009 et SPOT1 de 1989. La méthode utilisée de classification des images par arbre de décision est détaillée ainsi que l'obtention des classes d'occupation du sol sur lesquelles porte la détection de changement. L'algorithme de détection de changement repose sur la superposition spatiale des résultats des classifications aux deux dates. Les résultats de la matrice de transition sont discutés et des recommandations sont suggérées.

**Mots clés :** détection de changement, forêt humide, occupation du sol, SPOT

## Abstract

Map and monitor the dynamics of the forest area and land use on the outskirts of the Madagascar rainforest is one of the concerns of policy makers and institutions involved in the field of the environment. A rural community is chosen, Androy (Haute Matsiatra Region) in the peripheral zone of Ranomafana park for the part of forest territory. Changes in land use and forest cover are analyzed in this community for 20 years, from two SPOT images: SPOT5 of 2009 and SPOT1 1989. The method used for image classification decision tree is detailed as well as obtaining the land use classes to which the change detection is applied. The change detection algorithm is based on spatial superposition of the results of both classifications, 1989 and 2009. The results of the transition matrix are discussed and recommendations are suggested.

**Keywords:** change detection, rainforest, land use, SPOT

## Introduction

À Madagascar, depuis l'indépendance en 1960, la problématique de la conservation du patrimoine forestier est au centre des préoccupations des pouvoirs publics. Dans le but de mieux conserver son patrimoine forestier, l'État malgache a favorisé la création d'un réseau dense d'aires protégées qui couvre près de 2 000 000 d'hectares, et s'est même engagé à tripler cette superficie pour atteindre 6 000 000 ha. La forêt humide à l'Est de Fianarantsoa – désignée par le décret de septembre 2006 « corridor forestier d'Ambositra-Vondrozo (COFAV) » – figure sur la liste des forêts à ériger en aire protégée. Ce corridor était destiné à relier entre eux les parcs de Ranomafana, Andringitra et Ivohibe. La localisation du COFAV le place à cheval sur plusieurs régions car le corridor représente une frontière entre pays Betsileo à l'Ouest et pays Tanala à l'Est. Nous partons donc de l'intersection entre ce domaine forestier et une seule de ces régions, la Haute Matsiatra à l'Ouest (Carte A1), soit un ensemble de 10 communes concernées par la forêt (Carte A2).

D'après la FAO, le taux de déforestation tropicale a été en moyenne de 0,6 % par an entre 1990 et 1995, soit une perte annuelle de près de 14 millions ha (FAO, 1999 cité par Tsayem *et al.*, 2002). La divergence des sources de données et des méthodes de traitement, ajoutée aux difficultés de collecte et d'harmonisation, entraînent souvent des différences notables dans les différentes évaluations des superficies déforestées (Lambin 1994 cité par Tsayem *et al.*, 2002). Avec l'acquisition et la fourniture régulière d'images satellitaires depuis 1972, la télédétection a été perçue comme une source d'informations renouvelables permettant d'affiner ces évaluations. Ainsi, lors de la conférence des Nations Unies tenue à Stockholm en 1972, elle fut suggérée comme outil de « suivi global direct ». Dès lors, plusieurs projets de cartographie ont été mis en place par les organismes internationaux et les agences de coopération et de développement (FAO, 1980, 1990 et 1996 cités par Tsayem *et al.*, 2002). Les techniques de détection de changement (soustraction d'images, corrélation, rectification spatiale, etc.) sur les images numériques ont été mises en œuvre par Lillestrand dès 1972. Elles intègrent les techniques du traitement de données satellites : correction radiométrique, correction géométrique, classification et extraction des formes (Ashbindu, 1989).

Dans cette contribution, les différentes étapes de la méthodologie adoptée sont détaillées et discutées en se limitant à la comparaison entre deux dates pour une seule commune, la commune d'Androy. L'intervalle de 20 ans permet de comparer la situation avant et après la création de l'aire protégée de Ranomafana qui date de 1991. Le changement d'occupation du sol est analysé à partir de la comparaison de deux images satellitaires prises le même mois de juin à 20 ans d'intervalle (1989-2009).

# Matériels et méthodes

## ZONE D'ÉTUDE

Le corridor forestier Ranomafana-Andringitra est localisé dans le Centre-sud-est de Madagascar. Il est situé entre 21°13' et 22°05' de latitude Sud et entre 47°05' et 47°25' de longitude Est, dans le haut bassin de la rivière Matsiatra. La forêt qui le compose est du type dense humide sempervirent de moyenne altitude, série à *Weinmannia* et *Tambourissa* selon la division biogéographique de Madagascar de Humbert et Cours-Darne (1965). Sur le plan administratif, la zone d'étude est située à la limite Est des régions de Haute-Matsiatra et à la limite ouest de la région de Vatovavy Fitovinany.

Dans la région Haute Matsiatra située dans le Centre-sud-est de Madagascar en limite entre les hautes terres centrales à l'Ouest et le corridor forestier à l'Est (Carte A1), Parmi les 10 communes forestières entre les parcs de Ranomafana et d'Andringitra (Carte A2), le traitement des images de la commune d'Androy (Carte A2) vise à détecter les changements d'occupation du sol entre 1989 et 2009.

## DONNÉES EXISTANTES

Dans notre traitement, nous nous sommes appuyés sur des données cartographiques et vectorielles de l'Institut Géographique et Hydrologique National (FTM). Ainsi nous avons utilisé l'Inventaire Écologique et Forestier National (IEFN) qui est une carte d'occupation du sol au niveau national à l'échelle 1/1 000 000<sup>e</sup> produite en 2006. Les limites administratives, les limites des aires protégées existantes, les villages, les courbes de niveau et les cours d'eau sont issus des bases de données géographiques au 1/100 000<sup>e</sup> et au 1/500 000<sup>e</sup>.

Comme document de travail de référence nous avons utilisé l'estimation de l'évolution de la couverture des forêts naturelles en 1990-2000-2005 produite par MEFT *et al.* en 2009 ; et l'évolution entre 2005 et 2010 produite par l'ONE *et al.* en 2013.

## IMAGES SATELLITAIRES

Les images satellitaires proviennent du satellite Système Pour l'Observation de la Terre (SPOT), de "Airbus Defence and Space" (ADS), obtenues dans le cadre du programme ISIS d'incitation à l'utilisation scientifique des images SPOT. Les images SPOT5 2009, multispectrales à 10 m (XS) et panchromatique à 2,50 m (PAN), sont combinées pour pouvoir travailler à une échelle spatiale la plus fine possible tout en gardant des signatures spectrales capables de différencier les classes d'occupation du sol auxquelles l'analyse s'intéresse. Pour la date la plus ancienne de 1989, seule la version SPOT1 est disponible, avec une moindre résolution spatiale, celle d'une image panchromatique à 10 m combinée à une image multispectrale à 20 m.

## MÉTHODES

### Sur le terrain

Le long de transects parcourus en voiture ou à pied, on identifie les principaux composants paysagers : forêt dense, forêt claire ou dégradée, bois d'eucalyptus dense, eucalyptus sur souche, plantation de pins et d'eucalyptus mélangés, éricacées, prairie permanente (*kifafa*), culture, jachère herbacée (*kilanjy*), sol nu / roche, rizière, plan d'eau / rivière. Ces composants sont géolocalisés à l'aide du dispositif du *Global Positioning System* (GPS) en début et en fin de chaque unité où ils sont observés *in situ*. Les transects parcourus sont eux-mêmes géolocalisés de façon continue par GPS (mode track).

Les composants paysagers de l'image 2009 ont été vérifiés pendant des observations sur le terrain effectuées en décembre 2011 et juin 2012. Par contre pour l'image 1989, les ROI ont été construits par photo-interprétation de la composition colorée.

## Au retour du terrain

On affiche les tracés des parcours journaliers sur Google Earth ainsi que dans un SIG contenant les images SPOT prétraitées en fausses couleurs, afin de rechercher les correspondances entre les composants observés sur le terrain et les agrégats de pixels qui se différencient sur l'image. Des polygones (qui seront utilisés par la suite comme, *Region Of Interest*, ROI, dans ENVI) sont ensuite tracés sur les images du satellite SPOT afin de délimiter les classes d'occupation du sol homogènes issues des observations de terrain. Une dizaine de polygones ont été créés par catégorie d'occupation du sol, chaque polygone se compose en moyenne de 100 pixels.

## Méthode de classification

Nous étudions les dynamiques sur 20 ans entre 1989 (25/06/1989) et 2009 (26/06/2009), le mois de juin se situant en saison sèche. La figure B1 indique le déroulement des étapes de prétraitement en distinguant d'une part les images panchromatiques et les indices de texture (Dedieu et al., 1997), d'autre part les images multispectrales et les indices radiométriques (végétation, humidité, couleur) (Jackson and Huete, 1991). La seconde étape correspond au traitement, c'est-à-dire la réalisation de la classification des images et la troisième étape le post-traitement, c'est-à-dire la détection de changement.

**Tableau I : Liste des indices radiométriques**

- Indices de végétation
RVI: <i>ratio vegetation index</i> ,
PVI: <i>perpendicular vegetation index</i> ,
SAVI: <i>soil adjusted vegetation index</i> ,
MSAVI: <i>modified soil vegetation index</i> ,
MSAVI 2: <i>modified soil vegetation index 2</i> ,
TSAVI: <i>transformed soil vegetation index</i> ,
GEMI: <i>global environment monitoring index</i> ,
WDVI: <i>weighted difference modified vegetation index</i> ,
IPVI: <i>infrared percentage vegetation index</i> ,
TNDVI: <i>transformed normalized difference vegetation index</i> ,
AVI: <i>angular vegetation index</i> ,
NDVI: <i>normalized difference vegetation index</i> (Rousse et al., 1973).
- Indices de sol et de couleur
RI: <i>redness index</i> ,
CI: <i>color index</i> ,
BI: <i>brightness index</i> ,
BI 2: <i>brightness index 2</i> .
- Indices d'humidité
NDWI: <i>normalized difference water index</i> (Gao, 1996),
NDWI 2: <i>normalized difference water index 2</i> (Mc Feeters, 1996),
MNDWI: <i>modified normalized difference water index</i> (Xu, 2006),
NDPI: <i>normalized difference pond index</i> (Lacaux et al., 2007),
NDTI: <i>normalized difference turbidity index</i> (Lacaux et al., 2007).

**Tableau II : Liste des indices de texture** (Kennel, 2011)

- <i>Harralick 1</i> (calculé pour chaque bande, multispectrale et panchromatique)
<i>Energy</i>
<i>Entropy</i>
<i>Correlation</i>
<i>Inverse difference moment</i>
<i>Inertia</i>
<i>Cluster pro</i>
<i>Cluster shade</i>
<i>Harralick correlation</i>
- <i>Structural Feature Set</i> (SFS) (calculé pour chaque bande, multispectrale et panchromatique)
<i>Length</i>
<i>Width</i>
<i>Pixel Shape Index (PSI)</i>
<i>Weighted mean</i>
<i>Ratio</i>
Standard Deviation ( <i>SD</i> )
- <i>Harralick 2</i> (calculé pour chaque bande, multispectrale et panchromatique)
<i>Variance</i>
<i>Mean</i>
<i>Sum average</i>
<i>Sum variance</i>
<i>Sum entropy</i>
<i>Difference entropy</i>
<i>Difference variance</i>
<i>Information correlation</i>
<i>Information correlation 2</i>
- <i>PanTex</i> (calculé à partir de la bande panchromatique)

**ÉTAPE 1 : Calcul des indices**

Des indices sont calculés à partir des canaux bruts des images satellitaires. Nous prenons ensuite les valeurs moyennes de chaque polygone construits à partir des ROI dans chaque indice (sous ENVI). Sous le logiciel Monteverdi du CNES, nous procédons à des calculs d'indices. À partir de l'image multispectrale, nous calculons des indices radiométriques (Tableau I) : indices de végétation, indices d'humidité, indices de couleur pour le sol, la roche et le bâti. À partir de l'image panchromatique, nous calculons les indices de texture (Tableau II): Haralick 1 et 2 (Haralick *et al.*, 1973), PanTex et SFS (Xin Huang *et al.*, 2007).

À partir de ces valeurs obtenues pour les indices, nous effectuons une série d'analyses multivariées sous le logiciel R.

## a. Analyse en Composantes Principales (ACP)

➔ L'ACP est une méthode utilisée pour réduire  $p$  variables quantitatives corrélées en un nombre  $q$  de variables non corrélées de telles manières que les  $q$  variables soient des combinaisons linéaires des  $p$

variables initiales, que leur variance soit maximale et que les nouvelles variables soient orthogonales entre elles suivant une distance particulière.

➔ L'ACP nous permet simplement d'éliminer les indices qui seraient corrélés positivement ou négativement, et de n'en sélectionner qu'une dizaine parmi les quarante calculés (Tableaux 1 et 2). Les calculs sont faits à partir des valeurs moyennes obtenues pour chaque classe d'occupation du sol relevée sur le terrain (ROI).

b. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

➔ La CAH est une méthode d'attribution de classe ou catégorie à des objets (ou individus) en se basant sur des données statistiques. Elle est surtout utilisée dans le domaine de la description des données multidimensionnelles. À partir d'un ensemble  $\Omega$  de  $n$  individus, son but est de répartir ces individus dans un certain nombre de classes. La méthode suppose qu'on dispose d'une mesure de dissimilarité entre les individus ; dans le cas de points situés dans un espace euclidien, on peut utiliser la distance comme mesure de dissimilarité.

➔ À l'issue de la CAH nous obtenons des dendrogrammes (Figures C1, C2 et D1, D2) qui nous renseignent sur les différents groupes d'individus (les ROI) distingués en utilisant les variables (les indices) sélectionnées lors de l'ACP.

c. Test de ROC (*Receiving Operating Characteristics*)

La fonction d'efficacité du récepteur ou caractéristique de fonctionnement du récepteur ou caractéristique de performance (d'un test) ou courbe sensibilité/spécificité ou, plus fréquemment encore appelée la courbe ROC, est une mesure de la performance d'un classificateur binaire, c'est-à-dire d'un système qui a pour objectif de catégoriser des entités en deux groupes distincts sur la base d'une ou plusieurs de leurs caractéristiques. Graphiquement, on représente souvent la mesure ROC sous la forme d'une courbe qui donne le taux de vrais positifs (sensibilité : fraction des positifs qui sont détectés correctement en fonction du taux de faux positifs, c'est-à-dire la fraction des négatifs qui sont détectés incorrectement pour ce même groupe).

Elle est aussi utilisée pour estimer la valeur seuil optimale d'un test en tenant compte des données introduites en entrée, pour séparer les deux groupes d'individus.

➔ Pour le traitement, deux valeurs sont importantes : l'« *area under the curve*, aire sous la courbe » qui indique la pertinence de la variable testée pour un nœud donné du dendrogramme de la CAH ; et le « *threshold*, valeur seuil » qui donne la meilleure valeur pour séparer les 2 groupes testés (les ROI).

Dans cette étude nous avons utilisé l'algorithme non-paramétrique basé sur l'arbre de décision intégré nativement dans le logiciel ENVI de la société EXELIS VIS. Nous avons utilisé ce classificateur à cause de sa maniabilité. Les paramètres sont à introduire par l'utilisateur à partir des observations réalisées sur le terrain lors des deux missions de 2012 et 2013.

Chaque nœud du dendrogramme de la CAH a deux branches, en fonction d'un test réalisé sur un ou plusieurs indices (oui/non). Les courbes de ROC sont calculées pour chaque nœud du dendrogramme afin de définir les valeurs seuil des tests (oui/non). C'est ce qui a conduit à définir un arbre de décision pour chaque date (Figure C3 pour 1989 et figure D3 pour 2009).

### ÉTAPE 2 : Application de l'arbre de décision

Dans cette étape, nous effectuons la classification. Comme algorithme nous utilisons le classificateur non-paramétrique par arbre de décision. L'intérêt de ce classificateur est qu'il n'y a pas de paramètres intégrés *a priori*. En outre, nous pouvons intervenir sur chaque nœud. L'arbre de décision est élaboré suivant le groupe de ROIs individualisés, que nous nommons « classes », dans les dendrogrammes que nous avons obtenus de la CAH. Nous utilisons à chaque nœud les variables les plus pertinentes et en appliquant la meilleure valeur seuil donnée par le test de ROC.

### ÉTAPE 3 : Post-traitement

Nous calculons, pour chaque date, la matrice de confusion qui permet d'analyser le résultat obtenu par rapport aux classes testées, en termes de performance et ainsi détecter les classes qui posent des

problèmes. Par la suite s'il le faut, pour améliorer le résultat, nous combinons les classes les plus proches du point de vue radiométrique, et qui par conséquent créent des confusions.

Enfin, nous construisons à partir des deux classifications obtenues, la matrice de transition. Nous créons des polygones correspondant aux nuages et les enlevons de la combinaison pour les intégrer directement dans le résultat de chaque classification.

Les classifications sont exportées au format Grid pour être traitées sous le logiciel ArcGIS de la société ESRI. Pour décrire les changements d'occupation du sol intervenus entre 1989 et 2009, la méthode de la matrice de transition a été utilisée. La matrice de transition entre deux états (t0 et t1) est obtenue à partir des valeurs données par les logiciels de SIG et traitées dans Excel (Bamba *et al.*, 2008). Ces valeurs proviennent de la superposition des deux cartes grâce à un logiciel de SIG (ici la fonction « Combine Raster » de ArcGIS) en vue de détecter les changements opérés dans l'occupation du sol entre deux dates. La méthode de comparaison des classifications de deux scènes acquises à des dates différentes (Mas, 2000 ; Lu *et al.*, 2004) a été choisie pour détecter des changements de l'occupation du sol. Elle assigne d'abord des classes et détecte ensuite les changements d'occupation du sol entre ces classes, que l'on peut représenter sous forme de cartes (Yaun and Elvidge, 1998).

## Résultats

### ANNÉE 1989

À la suite de l'ACP, nous gardons moins d'une dizaine d'indices et la bande panchromatique dans les canaux bruts de l'image (Tucker, 1979). Dans les indices radiométriques nous gardons : NDVI (Rouse et Haas, 1973), NDWI, NDWI2 et RVI ; dans les indices texturaux nous gardons le PanTex.

#### Classification Ascendante Hiérarchique

À partir de la CAH, nous obtenons deux dendrogrammes : la figure C1 est calculée avec les indices radiométriques, et la figure C2 est calculée avec les indices texturaux. Les indices radiométriques séparent d'abord les classes "arboré" et "herbacé" (Figure C1). Dans "herbacé", la classe « Eau » est séparée des autres classes au niveau du nœud N2.1. Au niveau du nœud N3.1, les groupes « Brûlis », « Kifafa » et « Rizière » se séparent de « Culture » et « Rizière ».

Les indices texturaux affinent les classes dans "arboré" (Figure C2). Puisque la première séparation se fait dans la branche des indices radiométriques, le traitement de la partie arborée commence tout de suite au niveau 2. Au niveau du nœud N2.2, « Bois » est alors séparé de « Recrû », et la classe « Forêt » est déclinée en plusieurs classes au niveau du nœud N3.2.

#### Classification

L'arbre de décision aboutit à huit classes (Figure C3 et carte A3)

Dans la partie "herbacée", 5 classes sont identifiées : Rizière (classe 3), Eau (classe 2), Brûlis (classe 4), Culture (classe 5), Kifafa + Culture (classe 6). Cette dernière classe résulte d'un mélange mais est qualifiée de Kifafa car la prairie est dominante.

Dans la partie « arborée », 3 classes sont séparées : Forêt naturelle (classe 1), Recrû (classe 8), Bois (classe 7). Cette dernière classe résulte d'un mélange de reboisement (Eucalyptus + Pinus) et de plantations pérennes que les indices utilisés n'arrivent pas à séparer.

## ANNÉE 2009

À la suite de l'ACP, nous gardons moins d'une dizaine d'indices et le moyen infra-rouge (MIR) dans les canaux bruts de l'image. Dans les indices radiométriques nous gardons : NDVI, GEMI et BI ; dans les indices texturaux nous gardons le PanTex et SFS length.

### Classification Ascendante Hiérarchique

Nous obtenons deux dendrogrammes : un calculé avec les indices radiométriques (Figure D1), et l'autre calculé avec les indices texturaux (Figure D2).

Comme pour l'image de 1989, les indices radiométriques séparent "arboré" et "herbacé + minéral" (Figure D1). Dans "herbacé + minéral", les groupes « Eau » et « Rizière » se séparent des autres classes au niveau du nœud N2.1. Au niveau du nœud N3.1, « *Kifafa* (Prairie) » se sépare de « Culture ».

Les indices texturaux détaillent la partie "arboré" (Figure D2). Au niveau du nœud N2.2, les branches « Forêt Dense » et « Eucalyptus » se séparent de celles de « Recrû », « Forêt dégradée » et « Plantation ». Au niveau du nœud N3.3, « Plantation » se distingue de « Forêt dégradée » et « Recrû » qui se séparent à leur tour au niveau du nœud N4.1.

### Classification

L'arbre de décision aboutit à huit classes (Figure D3 et carte A4) :

- 3 classes dans la partie "herbacé" : Rizière et Eau libre (ri) (classe 6), Culture (cu) (classe 8), Prairie ou Kifafa (ki) (classe 7) ;
- 5 classes dans la partie "arboré" : Forêt dense (fd) (classe 1), Forêt dégradée (fc) (classe 5), Recrû (re) (classe 2), Plantation pérenne (pl) (classe 4), Eucalyptus (eu) (classe 3).

Nous constatons sur la figure D4 que 5 ensembles de courbes se distinguent sur les 4 canaux bruts de l'image multispectrale d'origine. Culture + Rizière-Eau + Mosaïque ont globalement les mêmes trajectoires mais se différencient entre elles. 2 groupes de classes : (1) Forêt dense et Eucalyptus, (2) Forêt dégradée, Recrû et Plantation, ont la même courbe mais se séparent. L'interprétation de la figure D4 dépend des seuls canaux bruts.

## POST-TRAITEMENT

### Combinaison des deux classifications

Cette combinaison a été réalisée par superposition spatiale des 2 rasters sous ArcGIS qui correspondent aux résultats des deux classifications auxquelles est rajoutée la délimitation des nuages. Nous obtenons 166 signatures (carte B2). Chaque signature ou classe-type de transition est représentée par un certain nombre de pixels.

### Regroupement de 8 classes à 5 classes

Nous avons fait le choix de regrouper de 8 classes à 5 classes selon leur proximité thématique plutôt que leur proximité spectrale. Nous discutons ensuite cette séparation thématique en fonction de la séparabilité du point de vue spectral. Pour procéder à ce regroupement de classes, nous nous référons aux figures des signatures spectrales des classes.

Afin d'avoir une matrice de transition avec la même légende pour la carte des changements d'occupation du sol, nous procédons à un regroupement thématique des classes (Tableau III). Les classes ainsi obtenues correspondraient au niveau 2 de l'arbre de décision. La classification dirigée – algorithme par arbre de décision – est simplifiée par le regroupement des classes :

- la classe « Forêts » est la fusion de 'Forêt dense' et de 'Forêt dégradée',
- la classe « Bois » est un regroupement de 'Eucalyptus' et de 'Plantation',
- la classe « Mosaïque » est un regroupement de 'Culture' et de 'Prairie (*kifafa*)',

- la classe « Rizière » est un regroupement de 'Rizière' et de 'Eau'.

**Tableau III : Regroupement de 8 à 5 classes d'occupation du sol**

Classe	Occupation du sol	2009	1989
I	Forêts	1 + 5 (forêt dense + forêt claire)	1 (forêt dense, forêt claire)
II	Recrû	2	8
III	Bois + Plantation	3 + 4 (eucalyptus + pin)	7 (Bois, Plantation)
IV	Culture + Kifafa	7 + 8 (ki + cu)	4 + 5+ 6 (brulis, cu, ki)
V	Rizière + eau	6	2 + 3 (ea + ri)

## DÉTECTION DE CHANGEMENT 1989-2009

La matrice de transition (Tableau IV) représente le croisement des cinq classes entre les deux dates de 1989 et de 2009, une fois éliminés les nuages (Carte B2). En colonne, le pourcentage de pixels de l'image de l'occupation du sol en 1989 qui se retrouve dans les classes de 2009 en ligne. En diagonale, le pourcentage des pixels inchangés, restés dans la même classe en 2009.

**Tableau IV : Matrice de transition entre 1989 et 2009**

% de pixels	2009					Total	
	Forêt	Recrû	Bois	Culture	Rizière		
1989	Forêt	50,90	0,85	37,91	10,33	0,01	100
	Recrû	50,58	2,03	33,11	14,26	0,01	100
	Bois	48,94	3,17	29,57	18,17	0,14	100
	Culture	30,84	2,88	24,89	41,09	0,30	100
	Rizière	5,05	0,44	3,27	83,74	7,51	100

Pour avoir une idée sur les valeurs de chaque classe et chaque transition dans notre carte, nous calculons le pourcentage du nombre de pixels de chaque transition sur le nombre total de pixels de la classification.

Le tableau V donne le pourcentage du nombre de pixels de chaque transition (cellule) sur le nombre total de pixels de l'image. Ainsi nous constatons que la transition « Rizière » → « Forêt », que nous estimons comme impossible même en 20 ans, est en fait constituée de pixels isolés répartis sur toute l'image.

**Tableau V : Pourcentage de chaque transition par rapport au nombre total de pixels**

	2009					Total	
	Forêt	Recrû	Bois	Culture	Rizière		
1989	Forêt	7,48	0,12	5,57	1,52	0,00	14,70
	Recrû	4,81	0,19	3,15	1,35	0,00	9,50
	Bois	2,10	0,14	1,27	0,78	0,01	4,29
	Culture	20,12	1,88	16,23	26,8	0,19	65,22
	Rizière	0,32	0,03	0,21	5,26	0,47	6,28
Total	34,82	2,36	26,43	35,71	0,67	100	

La transition « Rizière » → « Culture » vient de la confusion entre rizière sèche et culture et ne peut pas s'interpréter comme une véritable transition d'occupation du sol, mais comme une confusion radiométrique (deux pratiques culturales peuvent avoir à un moment donné le même état de surface, et donc la même radiométrie). Généralement, la rizière reste stable à 90 %. En 20 ans, il est impossible qu'elle se transforme en forêt car lors de son installation elle est complètement dessouchée. Les études antérieures (Hervé *et al.*, 2007) montrent que la rizière reste rizière quel que soit le pas de temps, et dans leur modèle, une flèche partant de rizière n'existe pas dans la réalité.

### Calcul des surfaces

Chacun des pixels de la classification ayant une taille de 2,50 m x 2,50 m, nous estimons la superficie de chaque classe de transition en multipliant le nombre de pixels par leur taille (Tableau VI).

**Tableau VI : Estimation des superficies des changements (m<sup>2</sup>) entre 1989 et 2009**

		2009					Total (Ha)
		Forêt	Recrû	Bois	Culture	Rizière	
1989	Forêt	30 242 669	504 800	22 526 631	6 137 056	7 363	5 942
	Recrû	19 433 425	781 638	12 720 100	5 477 119	5 200	3 842
	Bois	8 496 156	551 075	5 133 200	3 155 119	24 400	1 736
	Culture	81 336 238	7 605 106	65 633 619	108 344 613	780 956	26 370
	Rizière	1 283 256	111 594	829 994	21 276 513	1 907 831	2 541
	Total (Ha)	14 079	955	10 684	14 439	273	40 431

La classe « Bois » inclut « reboisement » (eucalyptus, pin et acacia) et « plantation pérenne » (bananier, canne à sucre et plantation de thé de Sahambavy). En 2007, Hervé *et al.*, ont montré que des parcelles cultivées en plantation pérenne resteront définitivement en plantation ; et les parcelles reboisées resteront dans cet état jusqu'à ce que les arbres atteignent une hauteur d'environ 10 m exploitable pour le bois. Normalement il n'y a pas de transition « Culture » → « Forêt » mais plutôt « Recrû » → « Forêt ». L'écart de 20 ans entre les deux dates laisse supposer que plusieurs transitions se sont succédées, mais reste insuffisant pour une régénération en forêt après une phase de culture.

Il en est de même pour la transition « Forêt » → « Bois », qui n'existe pas dans la réalité. Les plantations se font normalement sur Culture ou sur Kifafa mais pas sur Forêt. Par contre, une culture pérenne après une défriche de la forêt est plausible dans un délai de 20 ans.

Dans 100 pixels trouvés comme forêt en 2009 alors qu'ils ne l'étaient pas en 1989 (voir matrice de transition), 73 proviennent de culture, 18 de recrû, 8 de bois et 1 de rizière.

## Discussion

La proportion des pixels mal classés est plus élevée en 1989 qu'en 2009.

La transformation d'une parcelle de forêt en 1989 en plantation ou reboisement en 2009, représentée par la classe « bois », est la transition la plus représentative dans cette zone (77 %). C'est pourtant la moins probable car, après le défrichage de la forêt et sa mise en culture, il faudrait que l'état de fertilité ne permette plus la poursuite de la culture pour qu'on pense à replanter, et enfin au moins 10 ans pour qu'une plantation apparaisse visible avec une réponse spectrale sur l'image de 2009.

La surreprésentation de la classe « rizière » en « culture » entre les deux dates est due à un effet saisonnier. En effet, les deux images étant prise au mois de juin en saison sèche, les rizières prennent l'aspect d'un tapis herbeux qui les rapprochent d'un point de vue spectral au « kifafa (savane ou prairie) » ; les pixels restant classés en rizière correspondent à des eaux libres.

Selon Hervé *et al.* (2007), les rizières ne peuvent être issues que de la transformation des bas-fonds ou marais, le pourcentage de classes qui deviennent « rizières » suit cette logique.

La classe « Recrû » qui correspond à la jachère post-culturelle est sans aucun doute la classe la plus hétérogène et celle qui est à utiliser avec prudence. En 20 ans, plusieurs cycles culturels se sont écoulés, et les pixels qui sont restés en « recrû » ne représentent que 2 % des pixels qui étaient initialement en « recrû ». Mais le « recrû » étant un état de transition, pour les pixels affectés à cette classe, différents états et transitions se seraient succédé en 20 ans.

Sur un plan méthodologique, le procédé de construction de l'arbre de décision reproduit le modèle et l'information contenus dans les dendrogrammes des CAH. Dans notre démarche, il s'agit de se donner la possibilité d'intervenir sur chaque nœud avec un indice et une valeur seuil précis.

Nous suggérons cependant l'utilisation d'une ou de deux dates intermédiaires pour suivre les probables transitions existantes entre 1989 et 2009.

## Conclusion

Nous avons présenté une chaîne de traitement d'images SPOT multitudes pour détecter les changements d'occupation du sol en milieu forestier et péri-forestier tropical humide entre deux dates. La chaîne commence par le calcul d'indices radiométriques et texturaux à partir des canaux bruts de l'image. Ensuite, parmi tous ces indices, les plus pertinents sont sélectionnés pour discriminer nos groupes de ROI qui correspondent pour la date la plus récente à des relevés de terrain, et pour la date la plus ancienne à la photo-interprétation de l'image. Les regroupements des différents ROI se font automatiquement par CAH. Des arbres de décision sont ensuite construits en fonction des nœuds des dendrogrammes pour distinguer différentes classes selon les groupes discriminés par un indice donné avec une valeur donnée calculée préalablement par les courbes de ROC. Puis les classes qui font confusion sont regroupées thématiquement, ce qui simplifie le travail d'analyse par rapport au but recherché, enfin sont détectés les changements d'assignation de chaque pixel en vingt ans. Pour les classes « Recrû » et « Rizière » se pose le problème de l'hétérogénéité dans le temps et dans l'espace.

Les dates des images délimitant une période de 20 ans, les changements d'occupation du sol ne peuvent pas s'interpréter comme une transition directe sinon comme une succession de transitions au cours de ces 20 ans. Par ailleurs, les images ayant des résolutions spatiales différentes (20 et 10 m pour 1989, 10 et 2,5 m pour 2009), les qualités de la classification diffèrent, ce qui rend leur comparaison délicate. Nous proposons pour la suite d'analyser de nouveau les transitions sur une dizaine d'années en utilisant d'autres images à des dates intermédiaires, 1999 ou 2004 par exemple après vérification de leur existence. La qualité de la classification pourrait être améliorée en énonçant des règles ou critères de répartition spatiale de l'occupation du sol (proximité spatiales de certaines classes par rapport à certains objets, forme). Une autre possibilité est de procéder à une segmentation et en utilisant l'algorithme de classification orientée objet.

Nous proposons en outre l'utilisation des modèles numériques de terrain pour l'extraction des talwegs afin d'obtenir une classe « Rizière » plus conforme à la réalité et indépendante de son utilisation qui est variable dans le temps (labour, rizière inondée, riz récolté, culture de contre-saison).

## Références bibliographiques

- Ashbindu S., 1989 : « Review Article Digital change detection techniques using remotely-sensed data ». *International Journal of Remote Sensing*, 10(6) : p. 989-1003.
- Bamba I., Mama A., Neuba D. F. R., Koffi K. J., Traoré D., Visser M., Sinsin B., Lejoly J., Bogaert J., 2008 : « Influence des actions anthropiques sur la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans la province du Bas-Congo (R.D. Congo) ». *Sciences & Nature*, 5(1) : p. 49-60.
- Dedieu, Bornicchia F., Kerkache R, Pella H., 1997 : « Apport des informations de texture en télédétection pour l'étude de l'occupation des sols ». *Revue de géographie alpine*, 85(3) : p. 9-26.
- Durrieu S., Boureau J.G., 1997 : « Détection de changements forestiers a l'aide d'images satellitales ». *Forêt méditerranéenne*, XVII (3) : p. 242-244.
- Gao B. C., 1996 : « NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space ». *Remote Sensing of Environment*, 58 : p. 257-266.
- Haralick R.M., Shanmugan K., Dinstein I., 1973 : « Textural features for image classification ». *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics*, vom SMC-3(6) : p. 610-621.
- Humbert H., Cours-Darne G., 1965 : *Notice de la carte de Madagascar. Carte Internationale du Tapis Végétal et des Conditions Ecologiques à 1/1.000.000è Cnrs/Orstom*. Extrait des travaux de la Section Scientifique et Technique de l'Institut Français de Pondichéry n° 6, 82 p. + 3 cartes.
- IEFN, 2006 : *Carte de la végétation de Madagascar*. Rapport d'activité Ministère de l'environnement, des eaux et forêts. Antananarivo Madagascar: FTM.
- Jackson R.D., Huete A.R., 1991 : « Interpreting vegetation indices ». *Preventive Veterinary Medicine*, 11 : p. 185-200.
- Jordan C.F., 1969 : « Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor ». *Ecology*, 50 : p. 663-666.
- Kennel P., 2011: *Segmentation d'images par texture. Application aux images satellites pour la caractérisation de l'occupation du sol*. These de Doctorat, LIRMM – CIRAD UMR AMAP – IFP.
- Lacaux J.P., Tourre Y.M., Vignolle C., Ndione J.A., Lafaye M., 2007 : « Classification of Ponds from High-Spatial Resolution Remote Sensing: Application to Rift Valley Fever Epidemics in Senegal ». *Remote Sensing of Environment*, 106 : p. 66-74.
- Lillestrand R., 1972 : « Techniques for change detection ». *IEEE Trans. on Computers*, 21(7) : p. 654-659.
- Lu D., Mausel P., Brondizio E., Moran E., 200 : « Change detection techniques ». *International Journal of Remote Sensing*, 25(12) : p. 2365-2407.
- Mas J.F., 1999 : « Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques ». *International Journal of Remote Sensing*, 20(1) : p. 139-152.
- McFeeters S.K., 1996 : « The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features ». *International Journal of Remote Sensing*, 17 : p. 1425-1432.
- MEFT, USAID, CI, 2009 : *Evolution de la couverture de forêts naturelles a Madagascar, 1990-2000-2005*. Antananarivo : Conservation International.

N'Guessan E., Dibi N'Da H., Bellan M. F., Blasco F., 2007 : « Pression anthropique sur une réserve forestière en Côte d'Ivoire : apport de la télédétection ». *Télédétection*, 5(4) : p. 307-323.

ONE, DGF, FTM, MNP, CI, 2013 : *Évolution de la couverture de forêts naturelles à Madagascar 2005-2010*. Antananarivo : ONE, DGF, FTM, MNP, CI, 48 p.

Oszwald J., Kouacou Atta J.M., Kergomard C., Robin M., 2007 : « Représenter l'espace pour structurer le temps : approche des dynamiques de changements forestiers dans le sud-est de la Côte d'Ivoire par télédétection ». *Télédétection*, 7(1-2-3-4) : p. 271-282.

Rakotoarimanana R.S., Rakotoniaina S., Rakotondraompiana S., 2008 : « Algorithmes à arbre de décision appliqués à la classification d'une image satellitaire », dans Ratsivalaka S., Rakotondraompiana S. (eds.), *Résumé des communications aux Journées Scientifiques AUF Télédétection*. Antananarivo, p. 197-198.

Rouse J.W. Jr, Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., 1973 : *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation*. Prog. Rep. RSC 1978-1, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station, nr. E73-106393, 93. (NTIS No. E73106393), 69 p.

Sako N., Beltrando G., Lazare Atta K., Dibi N'Da H., Brou T., 2013 : « Dynamique forestière et pression urbaine dans le Parc national du Banco (Abidjan, Côte d'Ivoire) ». *Vertigo*, 13(2) : 24 p.

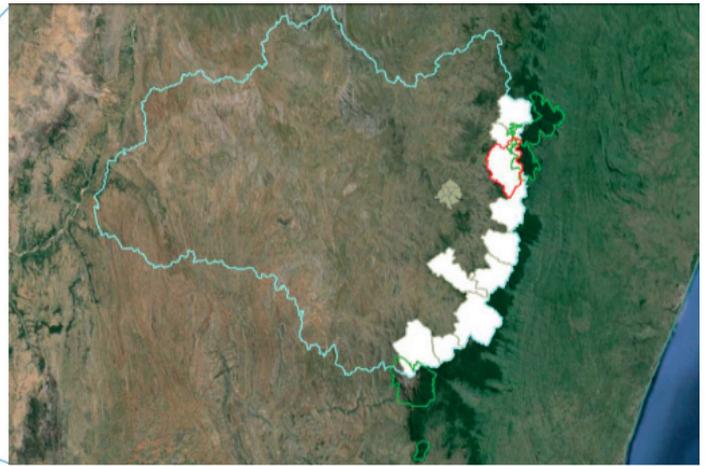
Tsayem Demaze M., Fotsing J.-M., Huynh F., 2002 : « La déforestation dans la région de Saint-Georges de l'Oyapock (Guyane française) ». *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 55 (218) : p. 197-222.

Tucker C.J., 1979 : « Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation ». *Remote Sensing of Environment*, 8 : p. 127-150.

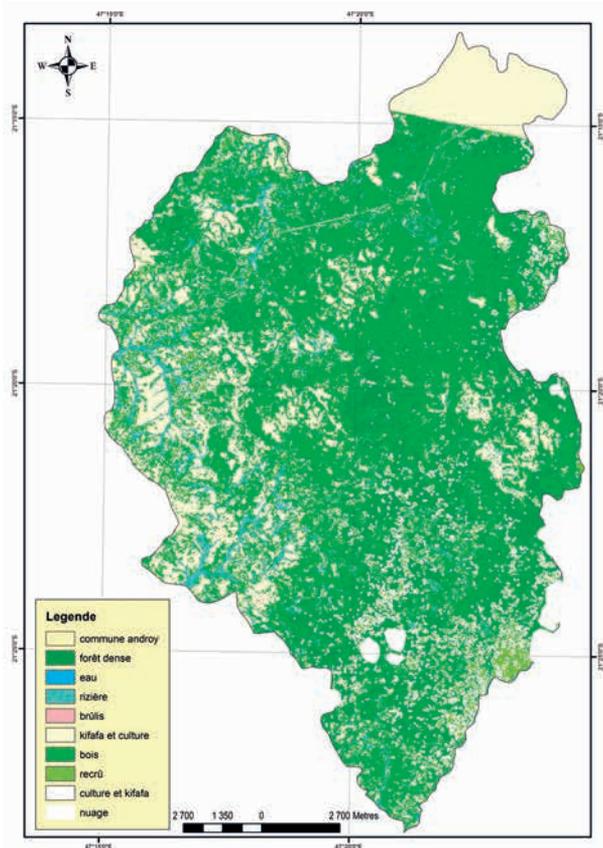
Yuan D., Elvidge C., 1998 : « NALC Land Cover Change Detection Pilot Study: Washington D. C. Area Experiments ». *Remote Sensing of Environment*, 66(2) : p. 166-178.



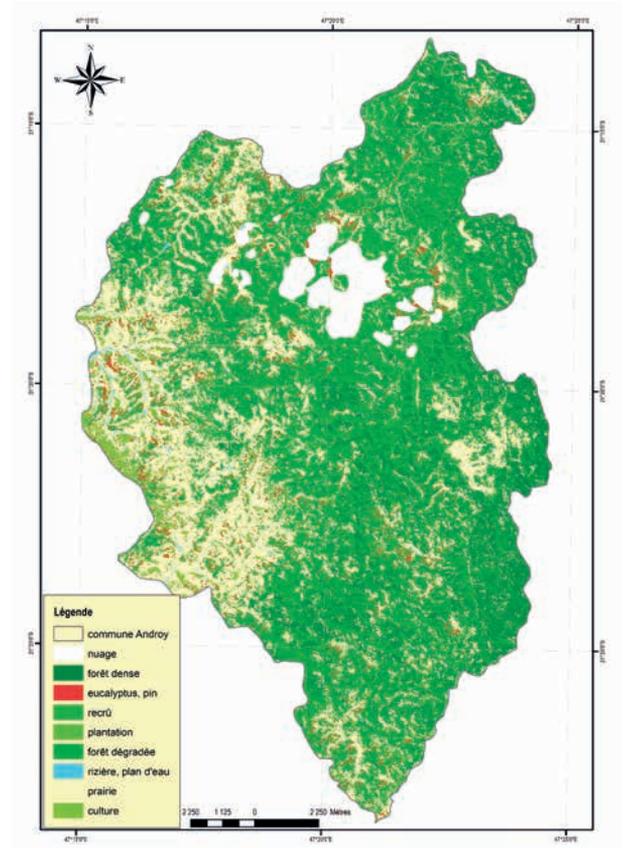
Carte A1 : La région Haute Matsiatra



Carte A2 : Les 10 communes forestières de la Haute Matsiatra



Carte A3 : Carte d'occupation du sol de la commune d'Androy (1989)



Carte A4 : Carte d'occupation du sol de la commune d'Androy (2009)

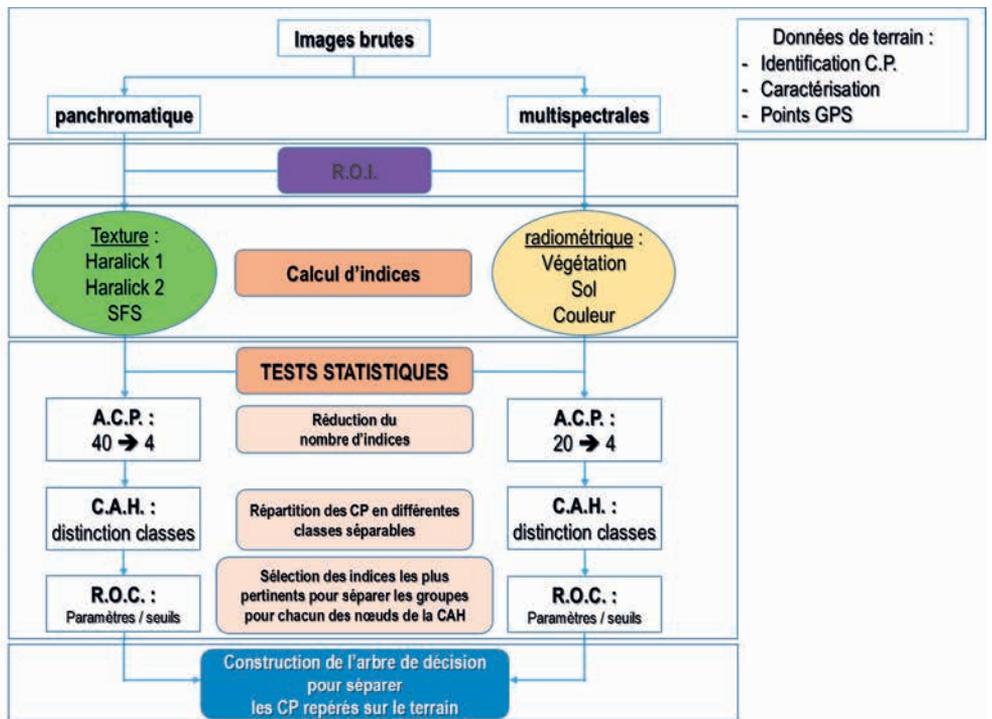
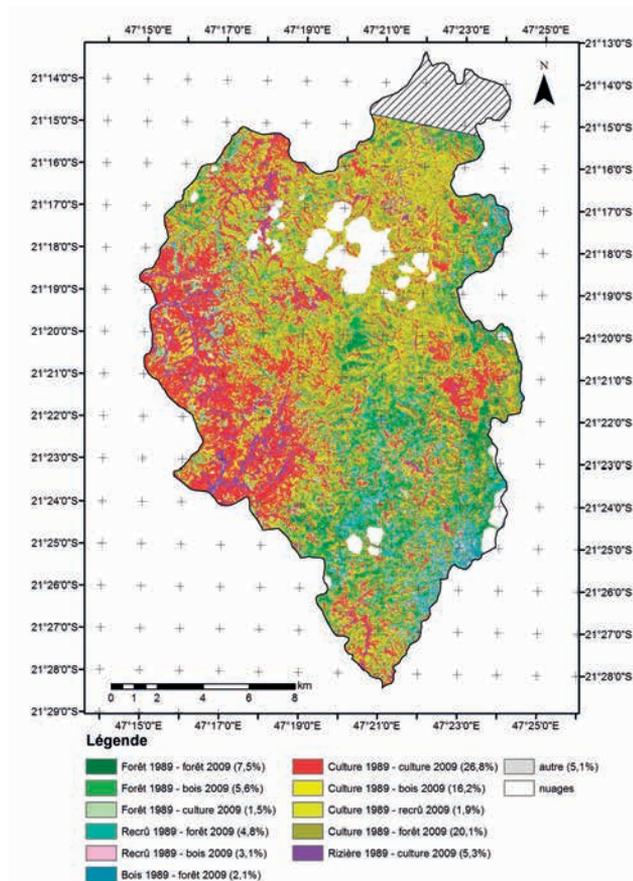


Figure B1 : Méthode de prétraitement pour la classification



Carte B2 : Détection de changement entre 1989 et 2009

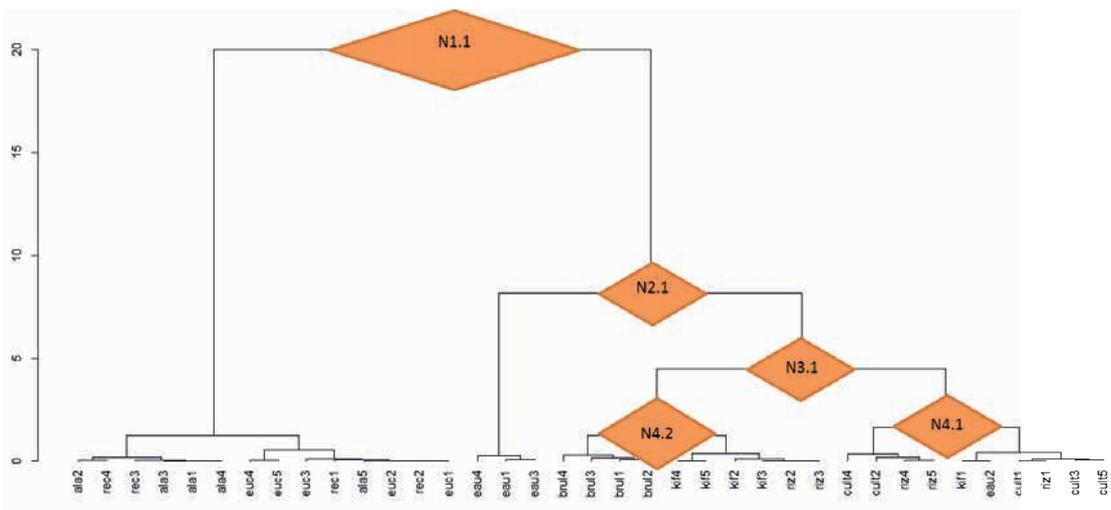


Figure C1 : Dendrogramme issu de CAH à partir d'indices radiométriques - Androy 1989

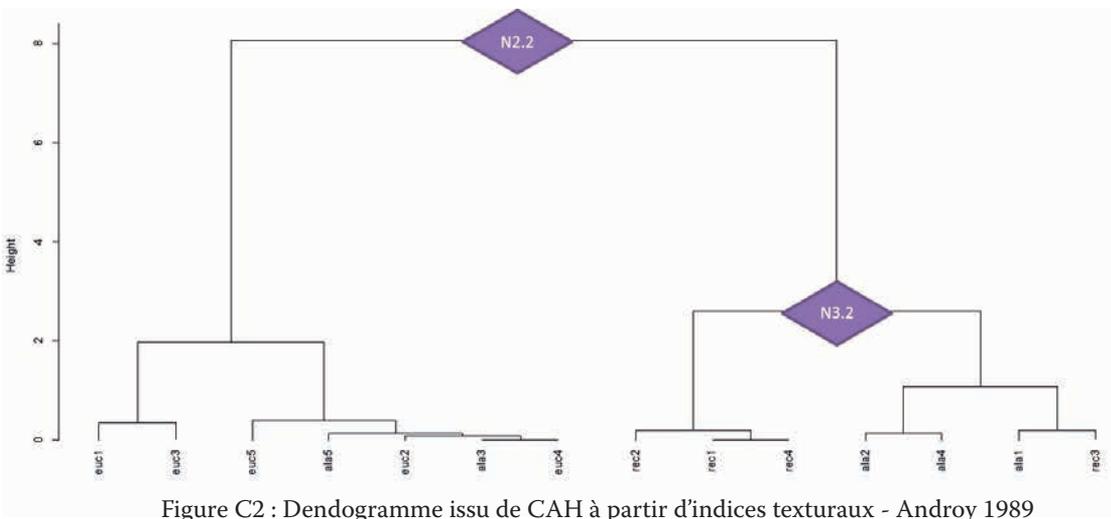


Figure C2 : Dendrogramme issu de CAH à partir d'indices texturaux - Androy 1989

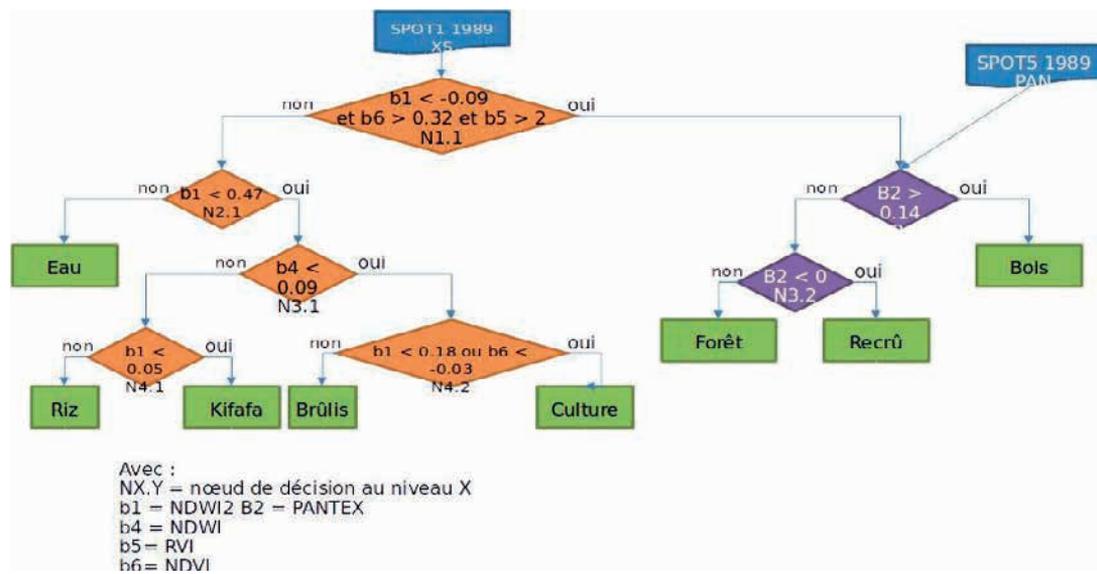


Figure C3 : Arbre de décision pour la classification Androy 1989



# Transitions agraires

## au sud de Madagascar



# Résilience et viabilité

## deux facettes de la conservation

Editeurs scientifiques

**Dominique Hervé, Samuel Razanaka, Solofo Rakotondraompiana,  
Fontaine Rafamantanantsoa, Stéphanie Carrière**



Institut de recherche  
pour le développement



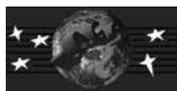
# Transitions agraires au sud de Madagascar. Résilience et viabilité, deux facettes de la conservation

Editeurs scientifiques

**Dominique Hervé, Samuel Razanaka, Solofo Rakotondraompiana,  
Fontaine Rafamantanantsoa, Stéphanie Carrière**

**Actes du séminaire de synthèse du projet FPPSM :  
«Forêts, Parcs, Pauvreté au Sud de Madagascar»  
Antananarivo, 10-11 juin 2013**

**Antananarivo 2015**



## **Mise au point des manuscrits et mise aux normes de la collection PARRUR**

Noly Razanajaonarijery

## **Traduction des titres, résumés et mots clés en anglais**

Domoina Rakotomalala

## **Conception de la couverture**

François Adoré Razafilahy, MYE

## **Auteurs des photos de couverture**

En recto de couverture, photo de Stéphanie Carrière

En dos de couverture, photo de Dominique Hervé

## **Référence de l'ouvrage pour citation**

Hervé D., Razanaka S., Rakotondraompiana S., Rafamantanantsoa F., Carrière S. (eds.), 2015. Transitions agraires au sud de Madagascar. Résilience et viabilité, deux facettes de la conservation. Actes du séminaire de synthèse du projet FPPSM «Forêts, Parcs, Pauvreté au sud de Madagascar», 10-11/06/2013, Antananarivo, IRD-SCAC/PARRUR, Ed. MYE, 366 p.