

Chapitre 5. Cartographie de la couverture forestière du massif de Beanka, Région Melaky, Ouest de Madagascar

Cyrille Chatelain¹, Mitia R. Hanitrarivo², Brice F. L. Rakotozafy², Ralph Bolliger¹, Iacopo Luino¹, Patrick Ranirison² & Laurent Gautier¹

¹Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève et Laboratoire de systématique et biodiversité de l'Université de Genève, Case Postale 60, 1292 Chambésy, Suisse

E-mail : cyrille.chatelain@ville-ge.ch, ralph.bolliger@ville-ge.ch, iacopo.luino@ville-ge.ch, laurent.gautier@ville-ge.ch

²Association Famelona et Département de Biologie et Ecologie Végétales, Université d'Antananarivo, BP 906, Antananarivo 101, Madagascar

E-mail : tiavoahary@gmail.com, bricefunklee@yahoo.fr, ranirisonp@yahoo.fr

Résumé

Une étude de la couverture forestière du massif forestier de Beanka a été réalisée à partir d'images satellitaires LANDSAT. Elle se base sur l'analyse des compositions colorées et l'étude de la quantité de végétation par l'analyse de l'indice de végétation (NDVI). Celui-ci a été calculé sur une image du mois d'octobre, partant du principe qu'en fin de saison sèche il est possible de séparer les forêts non seulement sur la base de la quantité de végétation, mais également de la caducité du feuillage. La nature de la roche-mère influence en premier lieu le type de végétation. Les régions gréseuses et basaltiques sont majoritairement peuplées de prairies secondaires, les étendues de sable blanc par un fourré bas ceinturé de forêts, alors que les calcaires abritent de la forêt. Celles-ci sont facilement mises en évidence et occupent une superficie avoisinant les 17 000 ha qui n'a apparemment pas varié au cours des 12 dernières années. Une analyse de la réponse de l'indice de végétation au sein des forêts a permis la distinction de trois classes au sein de cette forêt : les forêts aux indices les plus forts sont assimilées aux forêts dense semi-décidues, les indices moyens aux forêts denses caducifoliées et les indices les plus faibles aux fourrés à émergents clairsemés. Une cartographie du couvert forestier de la forêt de Beanka est proposée et la distribution des types forestiers est discutée.

Mots clés : Madagascar, Beanka, couverture forestière, NDVI

Extended abstract

Forest cover in the region of Beanka was studied using the analysis of six Landsat satellite images with a spatial resolution of 30 m and compared with field observations. Methods for image processing used herein included color composition analysis (channels 3, 5, and 7) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). On the basis of 23 control points, the different images, using the NDVI values, were employed to derive the maximum contrast to delineate vegetation types; the image chosen was October 2010, which is at the end of the dry season, the period when deciduous trees remain leafless. NDVI values of this image were used to perform an automatic clustering classification of forest growing on limestone. Mapping of forests outside the limestone area was conducted by visual interpretation.

The distribution of forest appears to be strongly influenced by underlying geology:

- 1) Secondary grasslands resting on soils derived from sandstone and basaltic bedrock, and traversed by gallery forest.
- 2) White sands harbor a very loose thicket and often bordered by a dry deciduous forest ring occurring in the transition to lateritic soils derived from sandstones.
- 3) The main forest block is located on limestone, along a north-south band of ca. 3-5 km broad and 50 km long.

The main focus of the analysis included herein concerns the main forest block of the reserve (17 000 ha) resting on limestone. Two periods were examined for detection of forest surface changes between 2000 and 2010 but no measurable change was found. Three main forest types of decreasing NDVI values were segregated by the classification procedure of forest cover. These have been interpreted as dense semi-deciduous forest, dense deciduous forest, and thicket with scattered emerging trees. We were not able to demonstrate a direct correspondence between our classification and those based on field sampling

discussed in another chapter of this monograph. This was primarily associated with problems related to the respective scale of the two studies. We nevertheless concur that forest type is directly related with soil type, which ranges from bare limestone, more or less deeply fissured, to deep organic soils that have accumulated in depressions.

The giant grikes that are very common in Beanka deserve special attention associated with their configuration and associated ecology. They are typically 10-50 m broad, up to 20 m deep, and several kilometers long, and oriented in a limited number of compass directions. These grikes are clearly visible on the color compositions, as well as on the NDVI image or the final cartography. The associate grike forests generally harbor denser vegetation, often with more humid-dependant tall trees and notably different from the prevailing drier types of deciduous forest, which are dominated by a thicket of dry deciduous species with few emerging trees. However, there are some exceptions, which include the southern portion of the Beanka Forest, which include sandstone areas that separate limestone patches. Here, the apparent continuation of these giant grikes appears either as forest intrusions in grasslands or as grassland intrusions in forest. In the latter case, it is important to note that the grikes form continuous ridges above the neighboring limestone and are composed of sandstone. In this case, our preliminary interpretation is that the sand-filled grike, consolidated in the sandstone, has eroded more slowly than the adjacent limestone.

The final map of the area encompasses nine classes: seven forest types, one of bare limestone, and one of open water. Among the forest types, the three main classes occurring on limestone are semi-deciduous dense forest, dry deciduous dense forest, and thicket with scattered emerging trees. Outside the limestone area, four other classes encompass mainly semi-deciduous forests (often gallery forests or forest margins) and forest, as well as thickets on white sands.

Some geographical differences were found across the Beanka region. The northern zone displays a landscape where forest is discontinuous and bare limestone areas are present. The northern-central zone consists mostly (60%) of dry deciduous forest and dry thicket, but there are numerous grikes with semi-deciduous forest. On the western side, there is an extended area of white sands with scattered forest patches. The southern-central zone consists largely (80%) of dry deciduous forest. The dry thicket

is here less represented than in the northern-central zone. An extensive area of semi-deciduous forest is found in the southern-central zone, specifically north of the Kimanambolo River. This area is located on the slopes eroded by the river and benefits from the resurgence of rainfall accumulated on the upper part of the limestone massif. Grikes are less represented in this zone. The forests of the southern zone are severely fragmented due to secondary grasslands on sandstone derived soils, with forest limited to these limestone outcrops and forms the discontinuous habitat bridges to the Bemaraha Massif to the south.

Key words: Madagascar, Beanka, forest cover, NDVI

Introduction

Le massif forestier de Beanka s'étend sur un prolongement septentrional du Tsingy du Bemaraha, dans la Région Melaky, à l'Ouest de Madagascar. Le climat y est de type tropical contrasté avec huit mois de saison sèche (Cornet, 1974). La roche-mère est dominée par des calcaires érodés en karst, formant une bande de 3 à 5 km de large sur une longueur d'une cinquantaine de km, orientée nord-sud. A l'Est, les grès dominant massivement. A l'Ouest les sols dérivent de roches éruptives, avec par endroits d'importantes étendues de sable blanc. La végétation sur calcaire est largement dominée par des forêts denses sèches caducifoliées, alors que sur les grès et les basaltes, ce sont des prairies secondaires entrecoupées d'un réseau de forêts-galeries. Ces prairies sont soumises à un pâturage extensif, et des feux destinés à régénérer l'herbage y sont régulièrement allumés en saison sèche. L'intérêt de la zone réside dans les massifs forestiers (en majorité sur *tsingy*, mais également sur sables blancs) qui ont fait l'objet d'une importante campagne de recherches dont les résultats sont exposés dans ce volume. Dans cette contribution, nous nous proposons de fournir une cartographie simple du couvert forestier de la zone, basée sur l'interprétation d'images satellites croisées à nos observations de terrain.

Méthodes

La cartographie du couvert végétal de la forêt de Beanka et de ses environs immédiats a été basée sur l'analyse de six images LANDSAT avec une résolution spatiale de 30 m (Tableau 5-1). La zone étudiée a été délimitée entre les latitudes 17°35'45"S et 18°09'15"S, et entre les longitudes 44°22'45"E et 44°39'45"E et mesure environ 65 x 30 km.

Plusieurs méthodes ont été mises en œuvre pour l'analyse des images : l'interprétation visuelle des compositions colorées sur les canaux 3, 5 et 7, la classification automatique, le change vector analysis magnitude qui exprime la variation de la valeur d'un pixel de deux images par la longueur d'un vecteur et de sa direction (Lambin & Strahler, 1994 ; Son *et al.*, 2003), l'indice de végétation NDVI (Rouse *et al.*, 1974 ; Jensen, 2000), et la différence de NDVI entre deux images. Les méthodes finalement retenues pour les résultats présentés ici sont la composition colorée sur les canaux 3, 5 et 7 et le calcul du NDVI qui, étant basé sur le rapport entre les valeurs de deux canaux, permet de diminuer l'effet du relief. Il a été calculé pour chacune des 6 images. Vingt-trois zones de contrôle de 10 x 10 pixels ont été choisies sur toute l'image, réparties dans les différents types de végétation, afin d'évaluer les différences de valeurs entre les images, et en particulier la variation inter-saisonnière du NDVI (Figure 5-1). On peut observer des valeurs très élevées sur les images acquises en janvier 2002, mai 2001 et mai 2010, avec des variations relativement faibles sur l'ensemble des zones de contrôle. A l'inverse, l'ensemble des valeurs sont très basses sur les images W1 et W2 (à l'exception des zones de contrôle 22 et 23). C'est sur l'image d'octobre 2000 (W3), en fin de saison sèche que les variations sont les plus importantes. A cette époque de l'année, les arbres décidus sont encore défeuillés, permettant ainsi la distinction entre différents types de forêts en fonction de la proportion d'espèces décidus.

Tableau 5-1. Références et caractéristiques des images employées dans ce travail. L'origine des images est l'USGS Global VisualizationViewer : USGS <http://glovis.usgs.gov/>

| Référence | Satellite | Date de prise de vue |
|---------------------|-----------|----------------------|
| LE71610722002008SGS | Landsat 7 | 8 janvier 2002 |
| LE71610722003091ASN | Landsat 7 | 1 avril 2003 |
| LE71610722001101SGS | Landsat 7 | 11 mai 2001 |
| LT51610722010134JSA | Landsat 5 | 14 mai 2010 |
| LE71610722000179 | Landsat 7 | 27 juin 2000 |
| LE71610722000275 | Landsat 7 | 1 octobre 2000 |

Une classification de la végétation a ensuite été réalisée sur l'image NDVI d'octobre 2000, en quatre classes, par la méthode automatique « clustering » avec le logiciel IDRISI (version Kilimandjaro). Le nombre de pixels de l'image classifiée en raster a été multiplié par deux puis l'image obtenue a été filtrée par un filtre « mode », afin de diminuer l'effet de lignes en « escaliers » qui dérive de la vectorisation

des cartes, puis exportée sous Quantum GIS où les surfaces hors massif ont été supprimées, et où quelques classes ont été ajoutées par interprétation visuelle, particulièrement les forêts sur sable blanc. Les objets supprimés correspondent à des forêts galeries, ou à de petites surfaces très humides. Les lignes de fractures ont été dessinées séparément à partir des compositions colorées en s'appuyant au besoin sur des informations cartographiques.

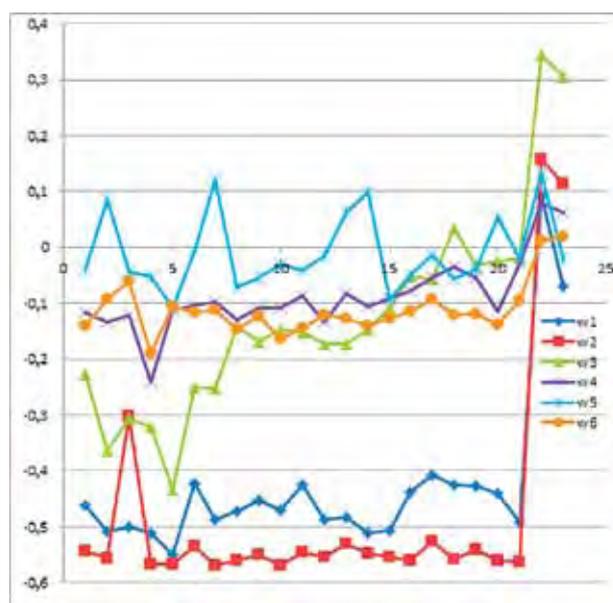


Figure 5-1. Valeurs moyennes du NDVI des 23 zones de contrôle pour les différentes images.

Résultats

Compositions colorées

Sur les compositions colorées des images LANDSAT (Figures 5-2 & 5-3), on remarque en premier lieu que la forêt se distingue aisément sur toutes les images. D'un seul tenant dans la partie centrale, elle va en s'amenuisant vers le nord. Dans la partie sud, on constate que la forêt est plus fragmentée. A une échelle assez fine, on peut considérer que la forêt de Beanka n'est pas reliée de manière continue à celle du Bemaraha. Plusieurs passages à travers des zones non forestières sont à franchir pour rejoindre les deux massifs dont le plus grand se situe tout au sud de l'image générale, à 18°07'58"S 44°34'28"E et mesure 120 m.

D'importantes zones de forte réflectance apparaissent de manière très visible en blanc sur les compositions colorées, à l'ouest de la forêt. On constate également une très grande différence entre les régions situées à l'ouest de la forêt qui

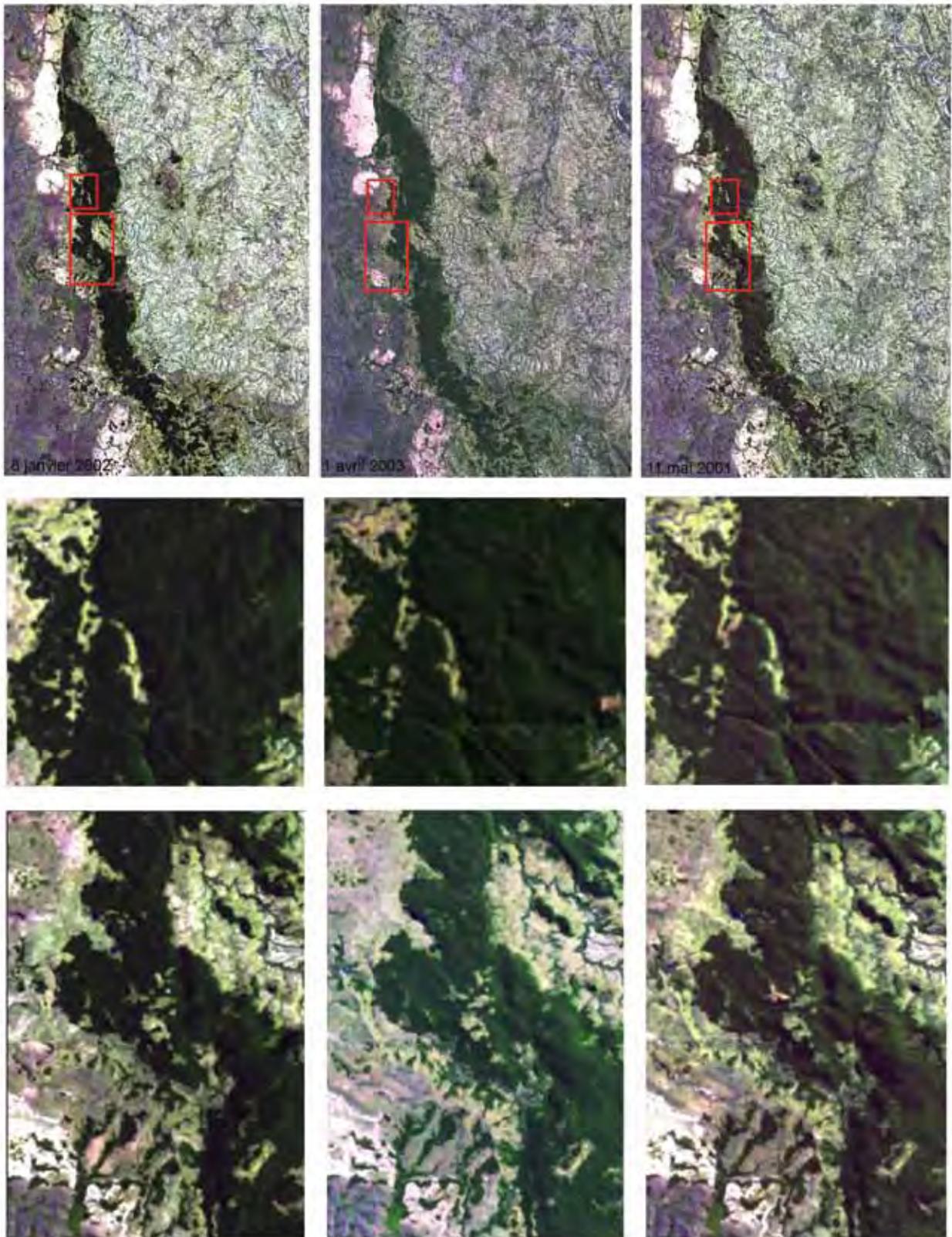


Figure 5-2. Compositions colorées (canaux 3, 5, 7) des images LANDSAT (de gauche à droite) du 8 janvier 2002, du 1 avril 2003 et du 11 mai 2001 de la forêt de Beanka : vues générales couvrant 65 x 30 km (haut) et détails (centre et bas).

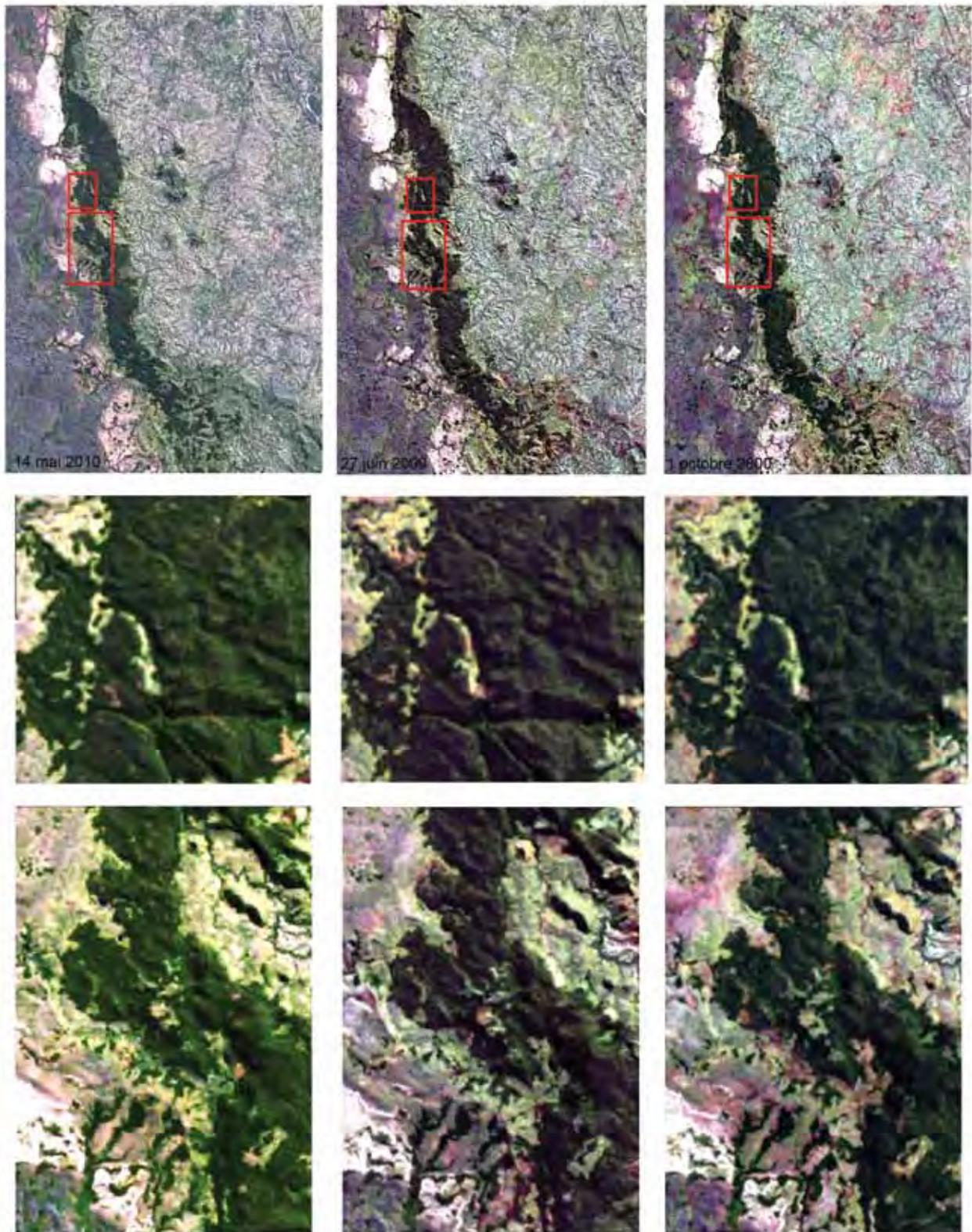


Figure 5-3. Compositions colorées (canaux 3, 5, 7) des images LANDSAT (de gauche à droite) du 14 mai 2010, du 27 juin 2000 et du 1 octobre 2000 de la forêt de Beanka : vues générales couvrant 65 x 30 km (haut) et détails (centre et bas).

montrent des couleurs violet sombre et les régions situées à l'est, bien plus claires, avec un réseau hydrographique très important.

Deux zones sont présentées à plus fine échelle. En comparant les images, on constate en premier lieu qu'il n'y a pas de différence notable quant à la superficie forestière entre les images de 2000 et de 2010. Concernant l'intensité du contraste au sein de la zone forestière on s'aperçoit qu'il est très faible sur l'image de janvier 2002 (pleine saison des pluies), modéré sur celles de mai 2001, mai 2010 et avril 2003 (fin de saison des pluies), et nettement plus

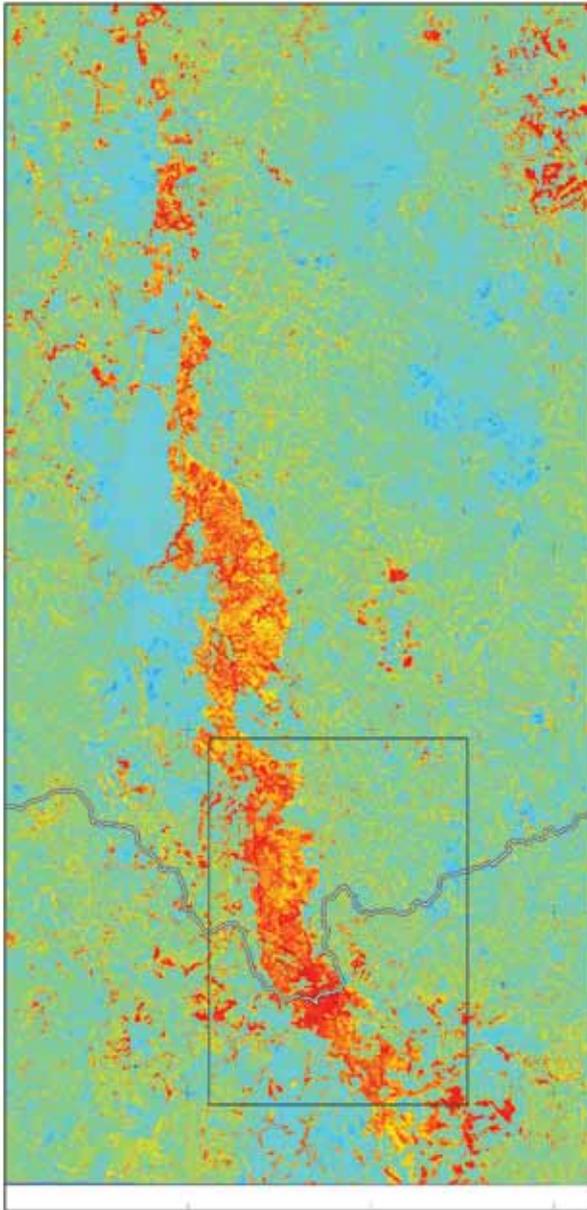


Figure 5-4. Cartographie des valeurs de l'indice NDVI de l'image LANDSAT d'octobre 2000 sur la forêt de Beanka. Vue générale : zone de 65 x 30 km. Le rectangle représente la vue agrandie en Figure 5-5. Les ellipses mettent en évidence les zones de prairies secondaires incluses situées dans le prolongement des fractures.

fort sur les images de juin et d'octobre 2000 (début et fin de saison sèche). D'une manière générale, on soupçonne que ces variations reflètent non seulement une variation dans la nature de la couverture forestière, mais également un effet d'ombrage dû aux pentes. En effet, l'heure du passage du satellite, approximativement identique pour les six images est de 6:55 GMT, ce qui correspond à une heure solaire proche de 10:00 est donc un angle d'incidence du soleil non nulle.

NDVI

La cartographie du NDVI sur l'image d'octobre 2010 est présentée dans les Figures 5-4 (vue générale) et 5-5 (détail de la partie sud). Les teintes bleues correspondent aux valeurs les plus faibles ; les valeurs rouges correspondent aux valeurs les plus fortes. Les forêts apparaissent une fois encore très clairement dans des teintes allant du jaune au rouge. A l'extérieur du massif forestier, les fortes valeurs apparaissant en réticules rouges soulignent le réseau hydrographique et sont interprétées comme des forêts galeries, auxquelles s'ajoutent quelques massifs isolés, en particulier à la périphérie des étendues sableuses qui apparaissent en bleu au

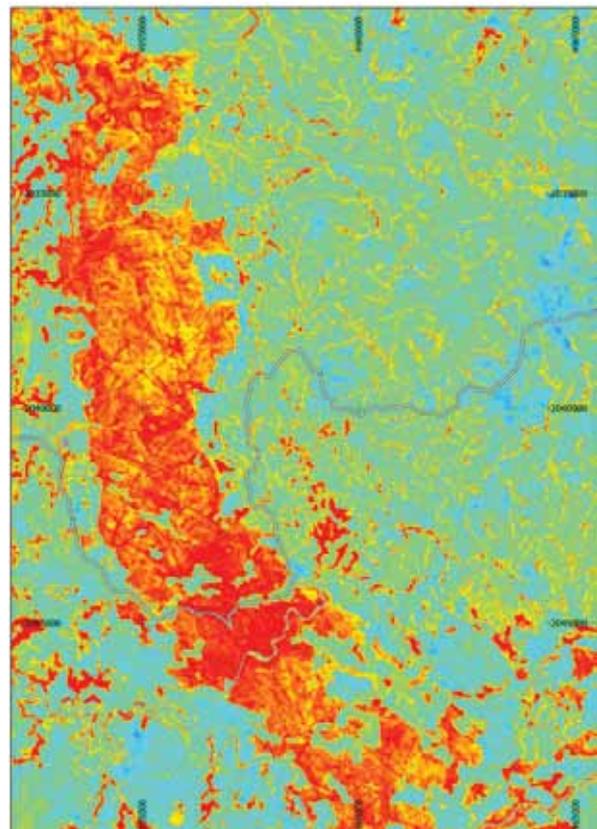


Figure 5-5. Cartographie des valeurs de l'indice NDVI de l'image LANDSAT d'octobre 2000 sur la forêt de Beanka. Détail de la partie sud : zone de 20 x 12 km.

sud-ouest de la zone, ainsi que dans deux zones de collines en haut à droite de l'image ainsi qu'à mi-hauteur, vers la droite. Au sein du massif forestier, des différences d'indice de végétation ressortent également de manière très nette. A l'inverse des compositions colorées, elles ne sont plus en rapport avec l'exposition des pentes et l'on peut considérer que l'influence de l'incidence solaire a été maîtrisée. Sur la carte générale (Figure 5-4) on constate du nord au sud : un premier massif avec un fort NDVI ; un paysage moucheté de rouge et de jaune dans le tiers nord ; une zone centrale à dominance jaune, avec une zone plus rouge en son centre ; une zone très rouge centrée sur l'endroit où la route traverse le massif ; une zone discontinue plus claire dans l'extrême Sud, avec à l'est des massifs à nouveau très rouges. La vue de détail de la partie sud (Figure 5-5) met également très bien en évidence la zone à fort indice de végétation située vers la route et la rivière Kimanambolo. On remarque également un réseau de lignes de forte végétation qui ressort particulièrement bien dans le haut de l'image, où il contraste avec des indices de végétations moins élevés révélés par des teintes jaunes. Il est paradoxal de constater qu'en certains endroits, une zone non-forestière est orientée de la même façon

que les lignes de forte végétation. Dans l'extrême Sud, là où la forêt est fragmentée, le déterminisme forestier semble également être tributaire de ce réseau de lignes. Une classification basée sur la valeur du NDVI au sein de la zone forestière en trois catégories répartit les 16 949 ha de la forêt en 2 044 ha de hautes valeurs, 7 920 ha de valeurs moyennes et 6 985 ha de valeurs faibles.

Discussion

A l'échelle de l'étude, les grands types de réponse sont étroitement liés à la géologie sous-jacente (Andriamanga, 2012) par le biais des types de sols. Les substrats géologiques situés à l'est de la ligne de calcaires de Beanka sont des grès ; à l'Ouest ce sont tout d'abord une bande de quelques kilomètres de grès similaires à ceux de l'Est avec par endroits des étendues de sable blancs puis, au-delà, le paysage est fondamentalement dominé par des roches d'origine éruptive. Les sols qui dérivent des formations gréseuses et basaltiques se sont vraisemblablement développés en parallèle avec une forêt sèche largement disparue, et ce probablement depuis plusieurs siècles. Cette forêt a été remplacée par des étendues à dominance herbacée (Figure 5-6)



Figure 5-6. Prairies secondaires sur substrat gréseux. (Cliché par Laurent Gautier.)

pauvres en espèces, parfois improprement appelées savanes, que nous préférons qualifier de prairies secondaires. Le pastoralisme y entretient des feux de saison sèche propices à la repousse des herbacées, mais qui empêche le recrû ligneux, si ce n'est pour quelques arbustes résistants aux feux. La biomasse y est très faible comme en témoignent les basses valeurs de l'indice de végétation. Sur la composition colorée, la grande différence de teinte entre les zones déforestées de l'Est et de l'Ouest peut sans doute être attribuée à la nature du substrat : le violet de l'Ouest correspond parfaitement aux zones de basaltes et les teintes plus claires aux zones de grès. Dans ces deux formations, les rares régions bénéficiant d'un couvert forestier sont les abords des cours d'eaux, où l'humidité édaphique permet la persistance de forêts galeries. Les étendues de sable blanc ont également une très faible valeur de NDVI. Elles ne sont en revanche pas assez recouvertes d'herbacées pour permettre le passage régulier du feu et abritent un fourré clairsemé relativement diversifié (Figure 5-7). A leur périphérie on trouve parfois une véritable forêt avec une canopée atteignant une dizaine de mètres qu'on peut apercevoir dans certains endroits sur les images.

La forêt de Beanka est pratiquement intégralement en place sur les substrats calcaires qui s'étendent selon un axe nord-sud, dans le prolongement nord du Bemaraha. La transition entre grès et calcaires correspond en général exactement entre le passage des prairies secondaires à la forêt (Figure 5-8). Le substrat rocheux calcaire, en favorisant les ligneux implantés dans les interstices et profondément enracinés, rend difficile l'implantation des herbacées et la propagation du feu et augmente considérablement la résilience de la forêt.

La nature des sols sur calcaires est variée, allant de roches nues, plus ou moins lapiézées et présentant plus ou moins de fractures, à des régions où un sol riche et profond est en place, en passant par différents types d'éboulis, d'avens et de sols plus ou moins profonds. Ces sols conditionnent de manière déterminante le type de végétation qu'ils supportent. La typologie des forêts de cette zone calcaire fait l'objet d'un autre chapitre de ce volume (Rakotozafy *et al.*, 2013) ; il y apparaît en particulier que la structure et la composition floristique est largement conditionnée par le type de sol. La variation des valeurs que prend l'indice NDVI au sein de cette forêt est interprétée comme une différence de quantité de



Figure 5-7. Fourré sur sable blanc. (Cliché par Laurent Gautier.)



Figure 5-8. Contact entre prairies sur grès et forêt sur calcaire. La limite du substrat calcaire est visible sur la gauche de la photo. (Cliché par Laurent Gautier.)

végétation au moment de la prise de vue, à la fin de la saison sèche, lorsque les espèces décidues n'ont pas encore mis leur feuillage. Les valeurs les plus fortes correspondent à des formations forestières denses et fermées (Figure 5-9), constituées en partie d'espèces sempervirentes, en particulier dans les strates inférieures et la canopée, les arbres émergents étant pratiquement tous décidus. Nous l'appellerons *Forêt dense humide semi-décidue*. Les valeurs intermédiaires correspondent à la *Forêt dense caducifoliée* (Figure 5-10), les valeurs les plus faibles à des zones de faible végétation, pour la plupart des fourrés bas sur sol rocheux dominés par une canopée discontinue d'espèces décidues (Figure 5-11) que nous appellerons *Fourré à émergents clairsemés*.

Nous avons tenté d'établir une correspondance entre la classification floristique et structurale des forêts présentée dans un autre chapitre (Rakotozafy *et al.*, 2013) et les résultats de l'analyse des images présentée ici, en positionnant les 129 points GPS pris lors de leurs 46 relevés sur notre cartographie. Les résultats sont présentés dans le Tableau 5-2. D'une manière générale, la correspondance entre les deux classifications s'avère imparfaite. Plusieurs

explications concourent vraisemblablement à expliquer ce manque de correspondance.

En premier lieu un problème d'échelle : la résolution des données satellitaires (30 m) rend hasardeux une correspondance avec des relevés linéaires qui s'étendent sur une distance de 100 m. Lors du positionnement des relevés, les chercheurs se sont efforcés de les placer dans des portions de forêts homogènes à leur échelle d'étude. Pour que la correspondance fût meilleure, il eût fallu les placer dans des zones de végétations homogènes à l'échelle de la résolution spatiale du satellite (plusieurs centaines de mètres).

En second lieu, il est hasardeux de tenter une correspondance entre deux classifications dans la mesure où les frontières qui séparent les différentes classes (de l'image comme des relevés) sont des frontières discrètes appliquées à une réalité continue. Dans notre cas, le positionnement des relevés sur la cartographie s'est trouvé être souvent très proche d'une limite entre deux classes.

En tout état de cause, il conviendra d'être extrêmement prudent lors de l'interpolation spatiale de la typologie de la végétation basée sur les relevés de terrain, et de ne tenter celle-ci qu'à partir



Figure 5-9. Forêt dense semi-décidue. (Cliché par Laurent Gautier.)



Figure 5-10. Forêt dense sèche. (Cliché par Laurent Gautier.)



Figure 5-11. Fourré décidu à émergents clairsemés sur calcaire. (Cliché par Laurent Gautier.)

Tableau 5-2. Comparaison entre la classification de la couverture forestière et les résultats de la classification des forêts calcaires de Beanka, basée sur 46 relevés (Rakotozafy *et al.*, 2013). Pourcentages des points GPS de chaque groupe de relevés attribués aux trois classes de couvert forestier. Les pourcentages supérieurs à 50 % sont mis en évidence en gris foncé et ceux compris entre 25 et 49 % en gris clair.

| | Groupe | Faciès | Nombre de points GPS | Classification du couvert forestier | | | |
|--|---|---|----------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------|
| | | | | Forêt dense humide semi-décidue | Forêt dense sèche | Fourré à émergents clairsemés | |
| Groupements végétaux (Rakotozafy <i>et al.</i> , 2013) | Groupe à <i>Cynometra abrahamii</i> et <i>Rinorea arborea</i> | Faciès à canopée fermée et à taux d'émergents élevé. | 8 | 50 % | 50 % | 0 % | |
| | | Faciès à canopée fermée et à faible taux d'émergents. | 10 | 0 % | 70 % | 30 % | |
| | Groupe à <i>Breonia perrieri</i> et <i>Dalbergia purpureascens</i> | Faciès à canopée fermée et à taux d'émergents élevé. | 14 | 7 % | 93 % | 0 % | |
| | | Faciès à canopée fermée et à faible taux d'émergents. | 18 | 22 % | 44 % | 33 % | |
| | Groupe à <i>Pandanus tsingycola</i> | Faciès à canopée fermée et à faible taux d'émergents. | 8 | 0 % | 75 % | 25 % | |
| | | Faciès à canopée ouverte et discontinue. | 5 | 20 % | 60 % | 20 % | |
| | Groupe à <i>Poupartia silvatica</i> et <i>Commiphora pterocarpa</i> | Faciès à canopée fermée et à taux d'émergents élevé. | 11 | 0 % | 100 % | 0 % | |
| | | Faciès à canopée fermée et à faible taux d'émergents. | 12 | 0 % | 67 % | 33 % | |
| | Groupe à <i>Pandanus flagellibracteatus</i> et <i>Omphalea occidentalis</i> | Faciès à canopée fermée et à taux d'émergents élevé. | 17 | 6 % | 59 % | 35 % | |
| | | Faciès à canopée fermée et à faible taux d'émergents. | 17 | 0 % | 41 % | 59 % | |
| | | Faciès à canopée ouverte et discontinue. | 9 | 0 % | 44 % | 56 % | |
| | | Total | | 129 | 10 % | 64 % | 26 % |

d'images satellitaires à plus haute résolution spatiale, et ce en travaillant sur la corrélation entre les paramètres bruts des relevés et les valeurs du NDVI. La cartographie proposée ici n'aura donc pas la prétention de représenter des types floristiques ; elle est uniquement basée sur la quantité de végétation et ne saurait refléter au mieux que de larges types physiologiques en relation avec la caducité du feuillage.

Il est intéressant de s'étendre un peu plus avant sur la question des structures linéaires qui apparaissent sur nos images. Elles correspondent sur le terrain à des fractures dans la roche mère, largement répandues dans les massifs calcaires (Figure 5-12). Ces fractures, d'une largeur comprise entre 10 et 50 m sont d'une profondeur qui varie de quelques mètres à une vingtaine de mètres et peuvent atteindre plusieurs kilomètres de longueur. Elles sont mentionnées ailleurs dans ce volume sous le terme de « giant grikes » (Middleton, 2013) et correspondent à ce que les spécialistes des karsts appellent des bogaz (Field, 2002). Ce sont des structures communes dans les massifs calcaires d'une certaine importance où elles ont tendance à former des ensembles alignés de manière parallèle, selon un nombre très restreint d'orientations (Palmer, 2007), ce qui est manifeste sur la Figure

5-5. En forêt, la matière organique s'y accumule et constitue un sol souvent profond. Une flore d'affinité humide s'y développe avec des espèces d'arbres souvent sempervirents de grande taille qui provoquent la forte valeur de l'indice de végétation. Dans la partie sud, où des prairies secondaires sur grès alternent avec des forêts sur calcaires, il est à remarquer que les fractures provoquent alternativement des prolongements forestiers en prairie, et des prolongements de prairie en forêt. Sur le terrain, il est surprenant de constater que dans ce cas, ces fractures sont très peu profondes, et même qu'à l'inverse ce sont souvent des endroits souvent en légère surélévation par rapport au massif calcaire environnant (Figure 5-13). La roche y est de type gréseux et le sol de nature latéritique. L'interprétation de ce phénomène reste à élucider, mais il est vraisemblable qu'il y ait eu comblement de ces fractures par un matériau sableux lors d'un épisode antérieur, puis consolidation en grès, et que par la suite l'érosion a été plus forte sur le calcaire avoisinant que sur la fracture comblée de grès. Le substrat y est propice au développement des espèces herbacées qui en propageant le feu éliminent les ligneux. Leur rôle dans la nature du contact entre forêt et formations herbacées est donc prépondérant dans cette partie sud de la zone.



Figure 5-12. Fracture en forêt. (Cliché par Laurent Gautier.)



Figure 5-13. Fracture comblée par des grès avec végétation herbacée. (Cliché par Laurent Gautier.)

Conclusion

La cartographie du couvert forestier que nous proposons (Figure 5-14) distingue sept classes forestières dans la légende, en plus d'une classe de roches calcaires apparentes et une de mares et de lacs. Les trois principales classes forestières sur calcaires sont la forêt dense semi-décidue, la forêt dense caducifoliée, le fourré à émergents clairsemés. Hors forêt, ce sont les forêts et fourrés sur sables (606 ha), les forêts semi-décidues sur sol non-calcaire correspondant parfois à des forêts galeries ou des lisières, quelques forêts semi-décidues sur fortes pentes que l'on distingue le long de la rivière Manomba et sur une longue fracture, et de rares formations boisées sur falaises qu'il est difficile de caractériser sans aller sur le terrain.

- La partie Nord (Antaotao, Figure 5-15) se caractérise par la présence de surfaces très rocheuses avec une végétation clairsemée (env. 130 ha).
- La partie Centre-nord (Ambakary, Figure 5-16) est couverte par une forêt caducifoliée pour

plus de 60 % et par un fourré sec, traversée par de nombreuses fractures où la forêt est semi-décidue. On notera sur la partie Nord-ouest une vaste zone blanche correspondant aux sols sableux, ponctuée de quelques îlots de forêt.

- La partie Centre-sud (Analomby, Figure 5-17) est dominée à plus de 80 % par la forêt caducifoliée et une surface importante de forêt semi-décidue située au nord de la Kimanambolo. Cette région située sur les pentes creusées par la rivière bénéficie certainement de la résurgence des précipitations tombées dans les parties supérieures du massif. Les fractures sont relativement moins nombreuses.
- La partie Sud (Amboloando, Figure 5-18) est fortement morcelée par la présence de prairies sur les sols gréseux plus largement répandus dans le paysage. Les massifs forestiers, limités au calcaire sont parfois traversés des bandes de prairies sur les fractures comblées par des grès.

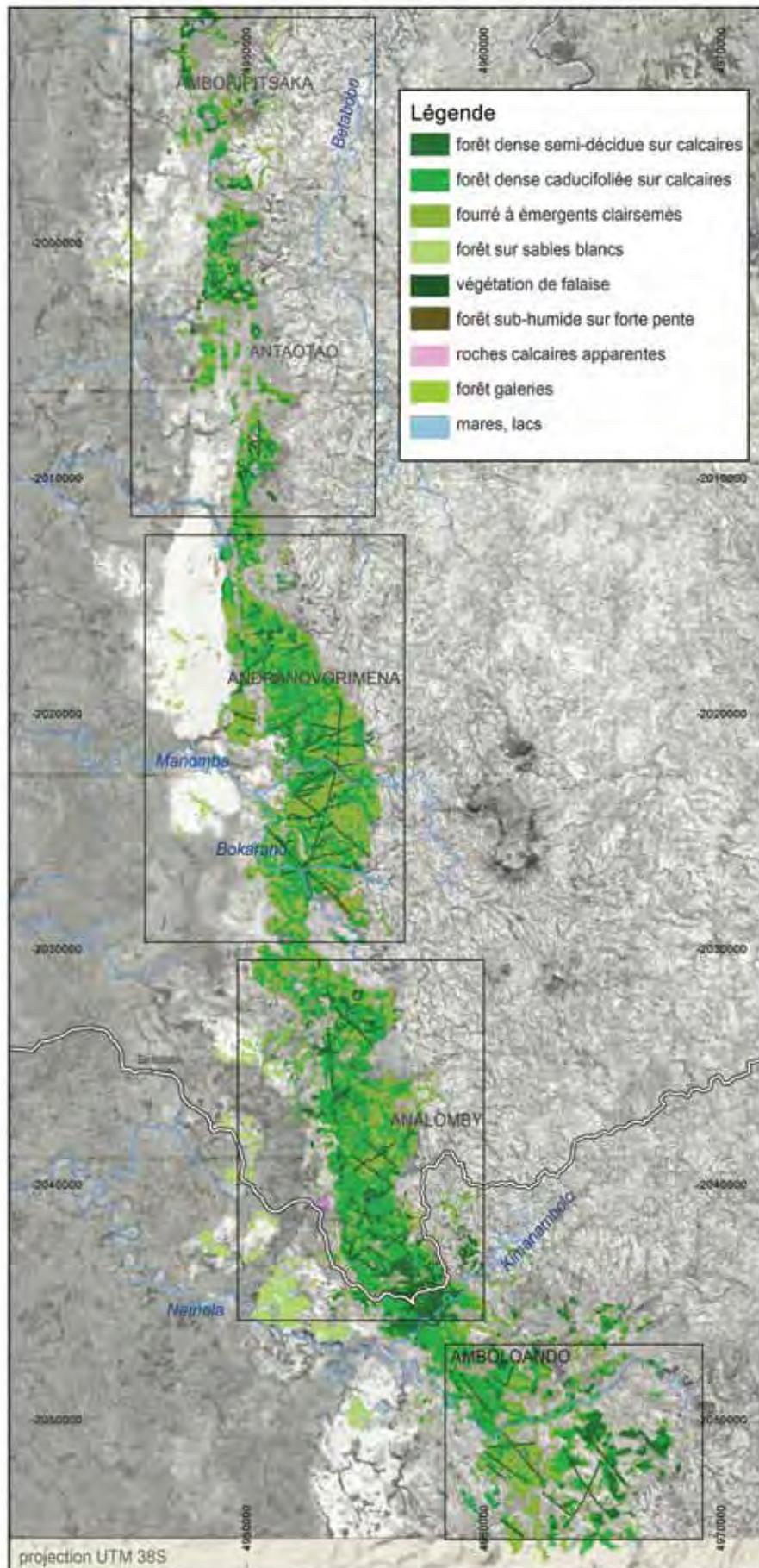


Figure 5-14. Carte du couvert forestier du massif de Beanka réalisée à partir d'une classification des valeurs de l'indice NDVI d'octobre 2000. Fond gris réalisé à partir d'une composition colorée de l'image LANDSAT. Vue générale : zone de 65 x 30 km. Les quatre rectangles représentent les zones agrandies dans les Figures 5-15 à 5-18.

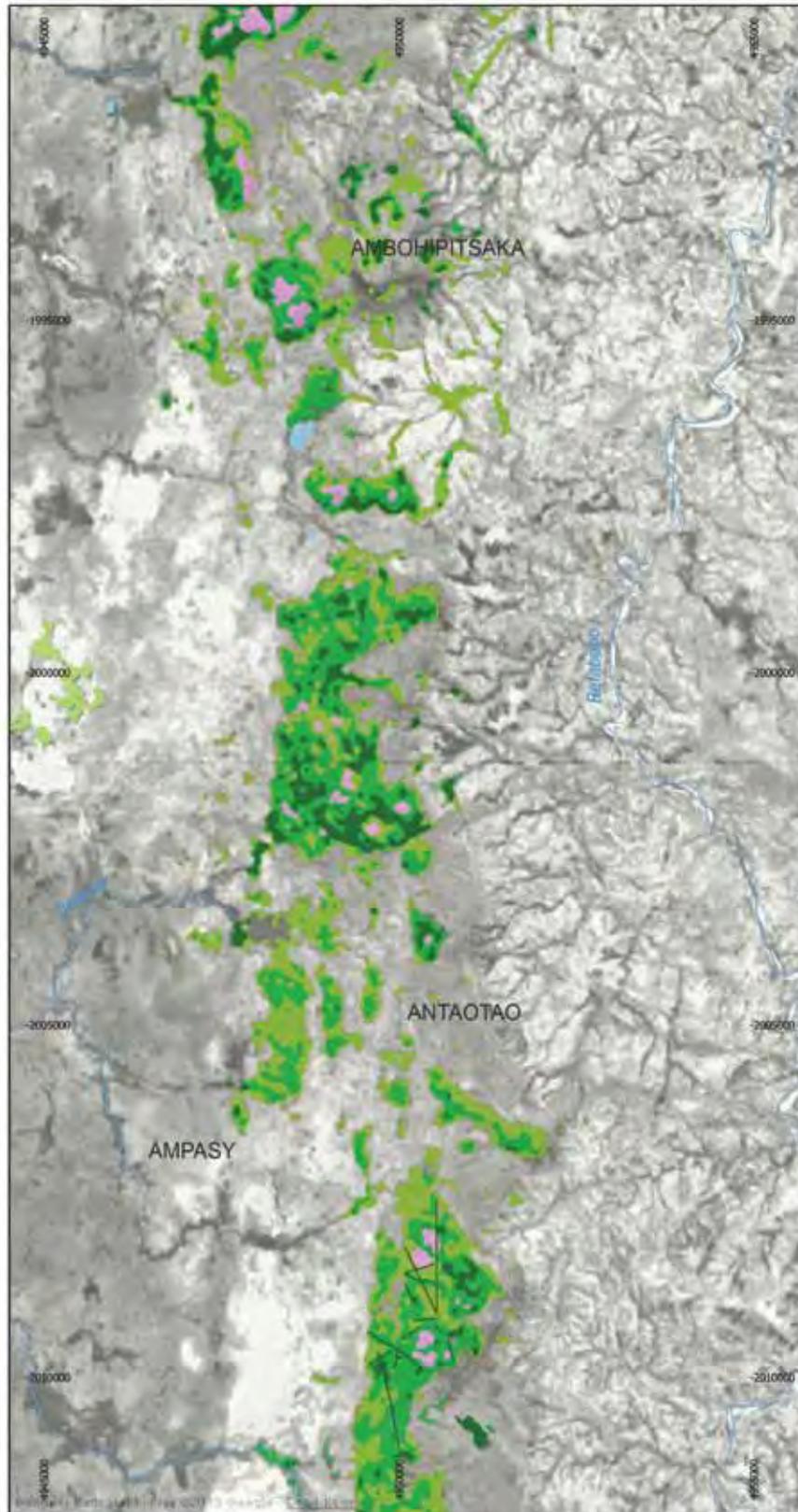


Figure 5-15. Carte du couvert forestier du massif de Beanka, partie Nord (Antaotao).

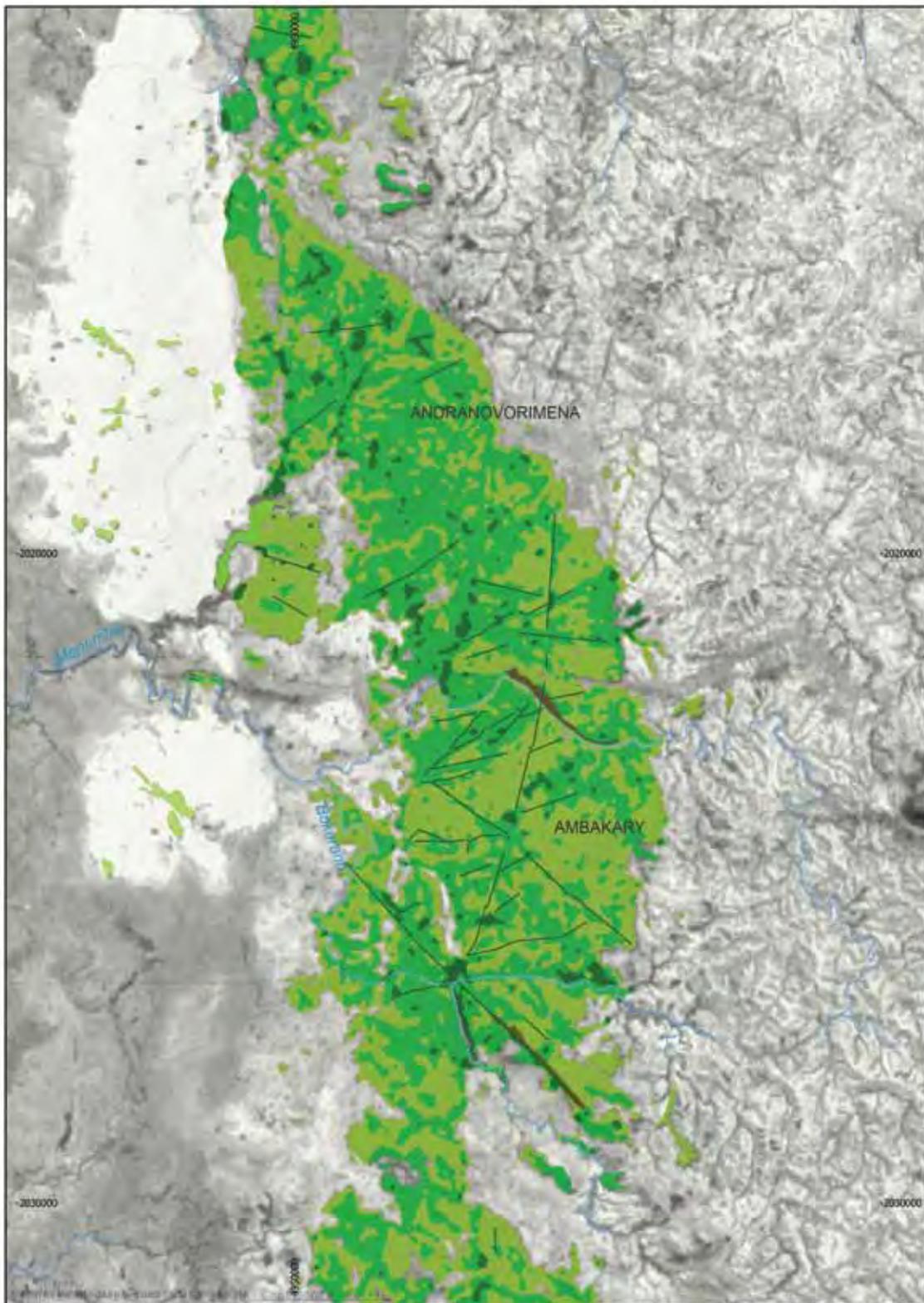


Figure 5-16. Carte du couvert forestier du massif de Beanka, partie Centre-nord (Ambakary).

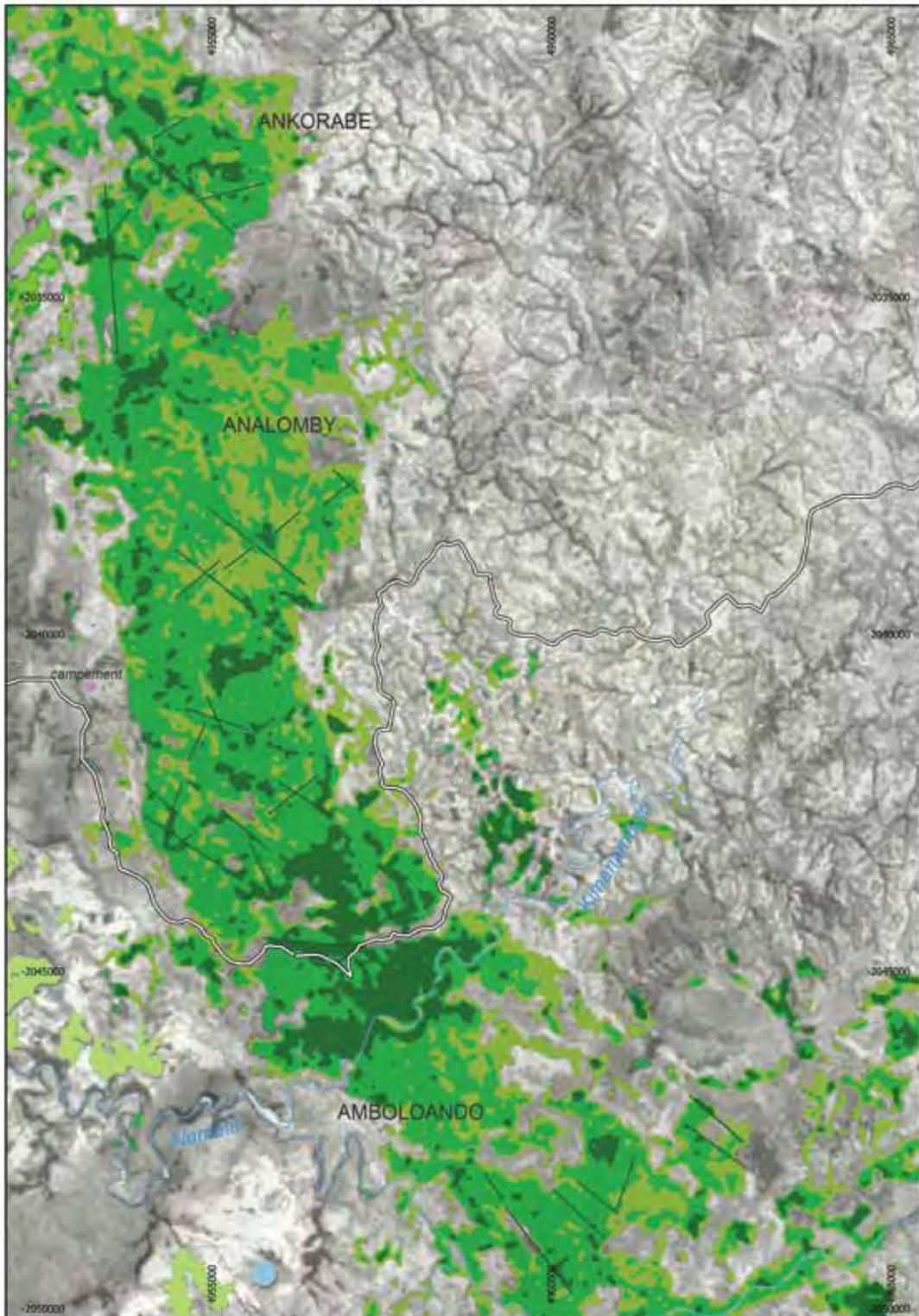


Figure 5-17. Carte du couvert forestier du massif de Beanka, partie Centre-sud (Analomby).

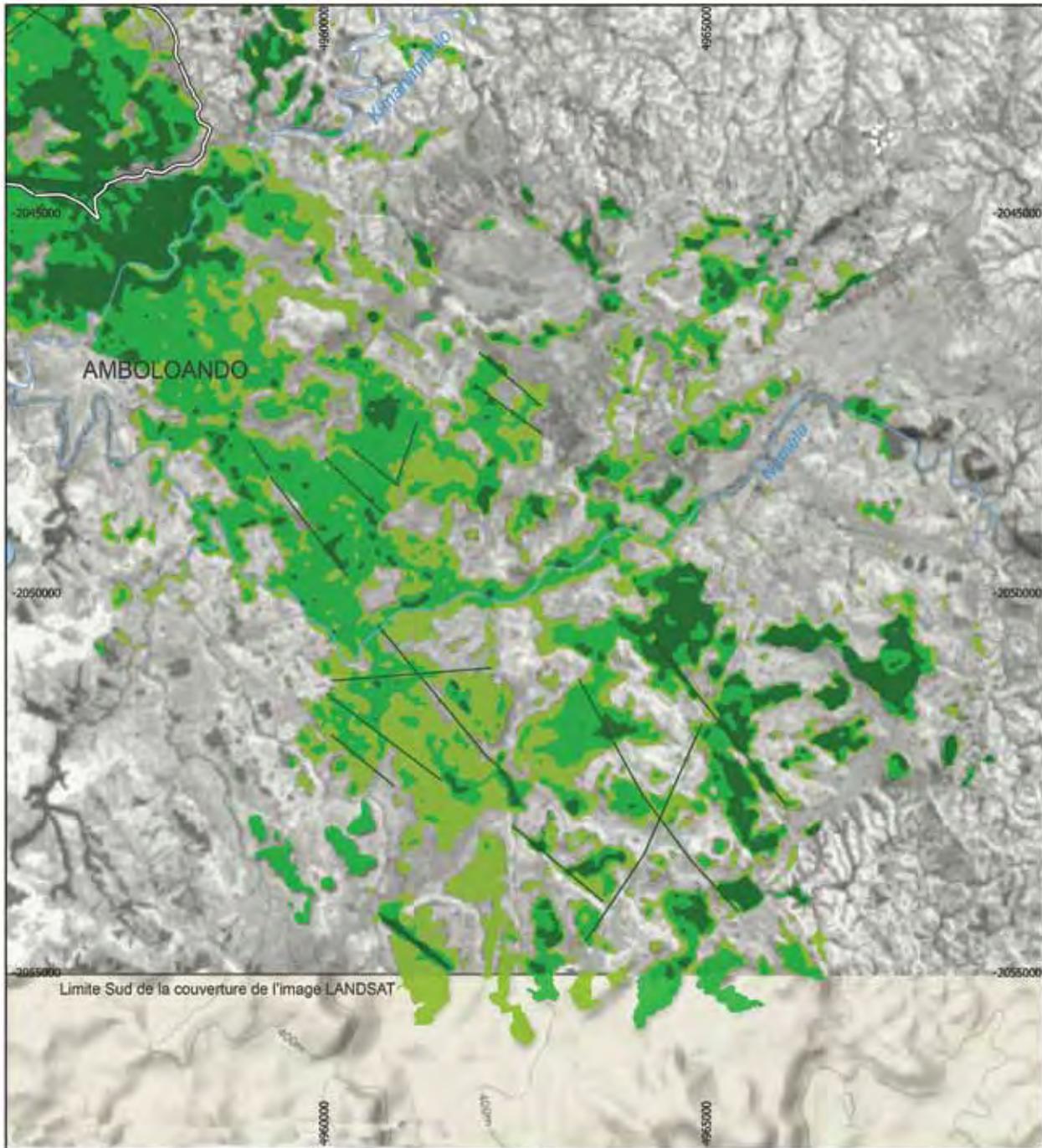


Figure 5-18. Carte du couvert forestier du massif de Beanka, partie Sud (Amboloando).

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier les habitants de villages d'Ambinda et de Belitsaka pour leur accueil et leur soutien pendant les travaux de terrain, ainsi que l'ONG Biodiversity Conservation Madagascar (BCM), les associations Vahatra et Famelona, le Département de Biologie et Ecologie Végétales et les Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève pour leur appui. Ils sont également reconnaissants à Jacques Andonahary Tahinarivony

et Louis Nusbaumer pour leur implication sur le terrain. Ce travail a été financé en grande partie par la Fondation Vontobel à Zürich, avec l'appui du Fonds Augustin Lombard et de la Fondation Schmidheiny. Nous souhaitons également remercier Greg Middleton pour son appui à l'interprétation des fractures dans les karsts, ainsi que deux relecteurs anonymes qui nous ont apporté des conseils pour l'amélioration de cette contribution.

Références bibliographiques

- Andriamanga, T. 2012.** Carte géologique du Tsingy du Bemaraha, Feuille nord. FTM et Madagascar National Parks, Antananarivo.
- Cornet, A. 1974.** *Essai cartographique bioclimatique à Madagascar, carte à 1/2 000 000 et notice explicative N° 55.* Paris, ORSTOM.
- Field, M. S. 2002.** A lexicon of cave and karst terminology with special reference to environmental karst hydrology. National Center for Environmental Assessment–Washington Office. Office of Research and Development. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. (<http://www.karstwaters.org/files/glossary.pdf>).
- Jensen, J. R. 2000.** *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective.* Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Lambin, E. F. & Strahler, A. H. 1994.** Change-vector analysis in multitemporal space: A tool to detect and categorize land-cover change processes using high temporal-resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 48: 231-244.
- Middleton, G. 2013.** Caves of the Beanka karst, Melaky Region, western Madagascar. *Malagasy Nature*, 7: 27-47.
- Palmer, A. N. 2007.** *Cave geology.* Cave Books, Dayton, Ohio.
- Rakotozafy, B. F. L., Hanitrarivo, R. M., Ranirison, P., Tahinarivony, J. A., Roger E. & Gautier, L. 2013.** Structure et composition floristique de la forêt sur faciès karstique de Beanka, Région Melaky, Ouest de Madagascar. *Malagasy Nature*, 7: 105-125.
- Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A. & Deering, D. W. 1974.** Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt.* NASA SP-351, 3010-317.
- Son, T. S., Lan, P. T. & Pham Van, C. U. 2003.** Land cover change analysis using change vector analysis method in DuyTien District, Ha Nam Province in Vietnam. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69: 369-379.

