

# Etude descriptive de l'évolution de la végétation du Parc National du Marojejy entre 1995 et 2022

**Jacquis A. Tahinarivony**

Association Famelona, BP 5147, Antananarivo 101,  
Madagascar

E-mail : jacquis.tahinarivony@famelona.mg,  
andonahary@yahoo.fr

## Résumé

Les changements de structure de la couverture végétale ont été étudiés dans le Parc National du Marojejy grâce à l'utilisation d'une série temporelle de données de NDVI (« Normalized Difference Vegetation Index ») MODIS (« Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer ») et des images multitudes (de 1995 à 2022) Landsat. L'approche considère les différentes classes de végétation comme type d'habitat et le parc comme étant le paysage. La description de l'état actuel du parc se résume par sa structure quasi isolée et ceinturée par des champs de culture et de la végétation modifiée. Au total, 11 % de sa superficie totale est couverte de végétation modifiée et la végétation naturelle est dominée par la forêt dense humide sempervirente de moyenne altitude (58 %). La variation altitudinale des caractéristiques de la végétation est vérifiée par les données de l'indice de végétation NDVI, calculées par tranches altitudinales (< 800 m, 800 à 1200 m, 1200 à 1600 m, > 1600 m). La valeur de l'indice diminue lorsqu'on monte en l'altitude, en parallèle avec certains descripteurs de la végétation. Les données temporelles de l'indice de végétation mettent en évidence la variation de la productivité végétale, influencée par des facteurs comme le climat et les activités anthropiques. Ces informations sont complétées par les résultats de l'analyse des données multitudes Landsat pour l'étude descriptive des changements perçus pour chaque classe de végétation. La végétation du parc est en perpétuel changement, marqué par le recul de la forêt dense humide sempervirente de basse altitude et au profit de la végétation modifiée. C'est la classe la plus affectée par les activités anthropiques ; elle accuse une perte de 4,3 % de sa superficie entre 1995 et 2004 et de 4,6 % entre 2014 et 2022. Ces atteintes atteignent les moyennes altitudes, en particulier dans les zones où la limite du parc est située vers 750 m. Au-dessus de 1200 m d'altitude, le facteur majeur

de dégradation est climatique avec un fort impact cyclonique, en particulier sur les fourrés éricoïdes. Les analyses des changements par bassin versant révèlent que la dégradation est plus importante dans les parties Nord et Nord-est du Marojejy (Andalangy, Antongodria, Betsomanga et Andranomazava), qui sont assez reculées et faiblement concernées par les activités de recherche, de conservation et écotouristiques. Ainsi, l'initiative de sortir le parc de la liste des patrimoines en péril reste un défi majeur aussi bien pour le gestionnaire que ses parties prenantes.

**Mots clés** : végétation, NDVI, analyse des changements, bassin versant, Parc National de Marojejy

## Extended abstract

The changes in structure and vegetation cover in the Parc National de Marojejy across the period from 1995 to 2022 are analysed herein using data from a Moderate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Normalized Difference Vegetation Index time series (NDVI) and Landsat multi-date imagery. This approach uses different classes of vegetation as habitat type and the park as the landscape. The description of the current state of the park is defined based on by its largely isolated geographic structure, being a sort of island of native forest surrounded by agricultural areas and other types of modified vegetation. In total, 11% of the park's surface area is covered by modified vegetation and the natural vegetation is mostly of medium altitude moist evergreen forest (58%). Elevational differences in vegetation characteristics were based on data of the NDVI vegetation index overlaid on different altitude intervals (less than 800 m, 800-1200 m, 1200-1600 m, and greater than 1600 m). The index value decreases with increasing altitude and in parallel to some vegetation variables, such as tree height and levels of canopy cover. Annual differences in the NDVI values highlight the impact of different drivers on the quality of plant productivity. A gradual increase in values indicates the maintenance of the habitat's quality, while transformation associated with disturbance are reflected in the decrease or irregular change in these values.

These data, based on multiple years of Landsat images, provide insight into recent changes in the vegetation of the Marojejy Massif, which is regularly changing and marked by the reduction of lowland moist evergreen forest well before 1995 and in subsequent years. This vegetation type is the most impacted by human activities, having lost 4.3% of its surface area between 1995 and 2004 and an additional 4.6% between 2014 and 2022. These anthropogenic threats occur in areas where the park's limit is found close to 750 m. The major factor for the degradation of vegetation formations above 1200 m is of climatic origin and associated with the impacts of cyclones on the loss of natural vegetation.

Analyses by watershed coming from the massif indicate that human disturbance is most pronounced in remote or hard-to-reach areas, particularly the northern and northeastern parts and in the Andalangy, Antongodria, Betsomanga, and Andranomazava watersheds. The Manantenina watershed, which is in part along the tourist trail leading to the summit, is among the most stable with respect to vegetation change, a situation that can be best explained by the presence of regular tourism and the associated infrastructure, and the level of local community's involvement.

**Keywords:** vegetation, NDVI, landscape analysis, watershed, Parc National de Marojejy

## Introduction

Plusieurs facteurs sont susceptibles d'apporter des changements sur la structure et le fonctionnement d'un écosystème. Pour le Parc National de Marojejy, les plus observés sont les activités anthropiques, à savoir la pratique de l'agriculture itinérante et l'exploitation des bois (MNP, 2018) ainsi que les aléas climatiques. Plusieurs méthodes permettent de décrire ces changements, mais les plus pertinentes sont les inventaires de la faune et de la flore et l'approche spatiale et cartographique. La première se base sur les recherches menées en 1996 et 2022 par une équipe multidisciplinaire, permettant aussi bien d'étudier la variation et la diversité biologique le long du gradient altitudinal que d'évaluer leur évolution pendant ces 25 dernières années (Goodman *et al.*, 2023, ici).

La présente étude se focalise sur l'évaluation de la structure spatiale et fonctionnelle de la couverture végétale du Parc National de Marojejy et son évolution au cours du temps. Elle cherche à décrire de manière qualitative et quantitative les changements qui se sont

produits au niveau de chaque classe de végétation et l'ensemble du paysage entre les dates contiguës. Pour y parvenir, une série temporelle de mesures de terrain et d'images satellites sont analysées et des indices sont calculés pour décrire les changements d'une part et identifier les zones sensibles d'autre part. Les résultats issus de ces analyses ont pour objectif de mettre à jour l'état actuel de la couverture végétale du Marojejy et d'apporter des informations permettant de renforcer les mesures de conservation des écosystèmes et de la biodiversité.

## Site d'étude

Le Parc National de Marojejy, d'une superficie totale de 55 885 ha, abrite différents types de formations végétales, réparties entre 200 et 2130 m d'altitude (Goodman *et al.*, 2018). Cet espace peut être divisé en huit bassins versants (Figure 1). Les principaux types de végétation mis en évidence au Marojejy (Messmer *et al.*, 2000 ; Gautier, 2018) sont : la forêt dense humide sempervirente de basse altitude, la forêt dense humide sempervirente de moyenne altitude, le fourré éricoïde de montagne, les prairies de montagne et la végétation modifiée. Cette dernière regroupe les jachères, les friches et toutes les formations secondaires ou dégradées (typologie selon Gautier *et al.*, 2018).

Dans le paysage du Nord-est de Madagascar, le Marojejy est ceinturé par des formations secondaires et des parcelles de culture et seul un couloir forestier d'une largeur de 2 à 5 km, assure sa connectivité avec le Paysage Harmonieux Protégé du COMATSA-Sud (Corridor Marojejy Tsaratanàna). Le développement de l'agroforesterie, la filière de la vanille et le contexte démographique ont favorisé l'installation des hameaux et des villages aux alentours de l'aire protégée.

## Matériels et méthodes

### Description et sources des données utilisées

Des images satellites de dates successives ont été traitées et analysées pour étudier et décrire l'évolution spatiale et temporelle de la couverture végétale du Marojejy (Tableau 1). Ce sont des images Landsat (path 158 / row 070) d'une résolution de 30 m. Elles ont été sélectionnées pour présenter un taux de couverture nuageuse inférieur à 10 % et dans la mesure de possible un intervalle fixe entre les dates contiguës. Au total, quatre dates ont été choisies : 1995, 2004, 2014 et 2022, et représentent les données d'une même saison climatique

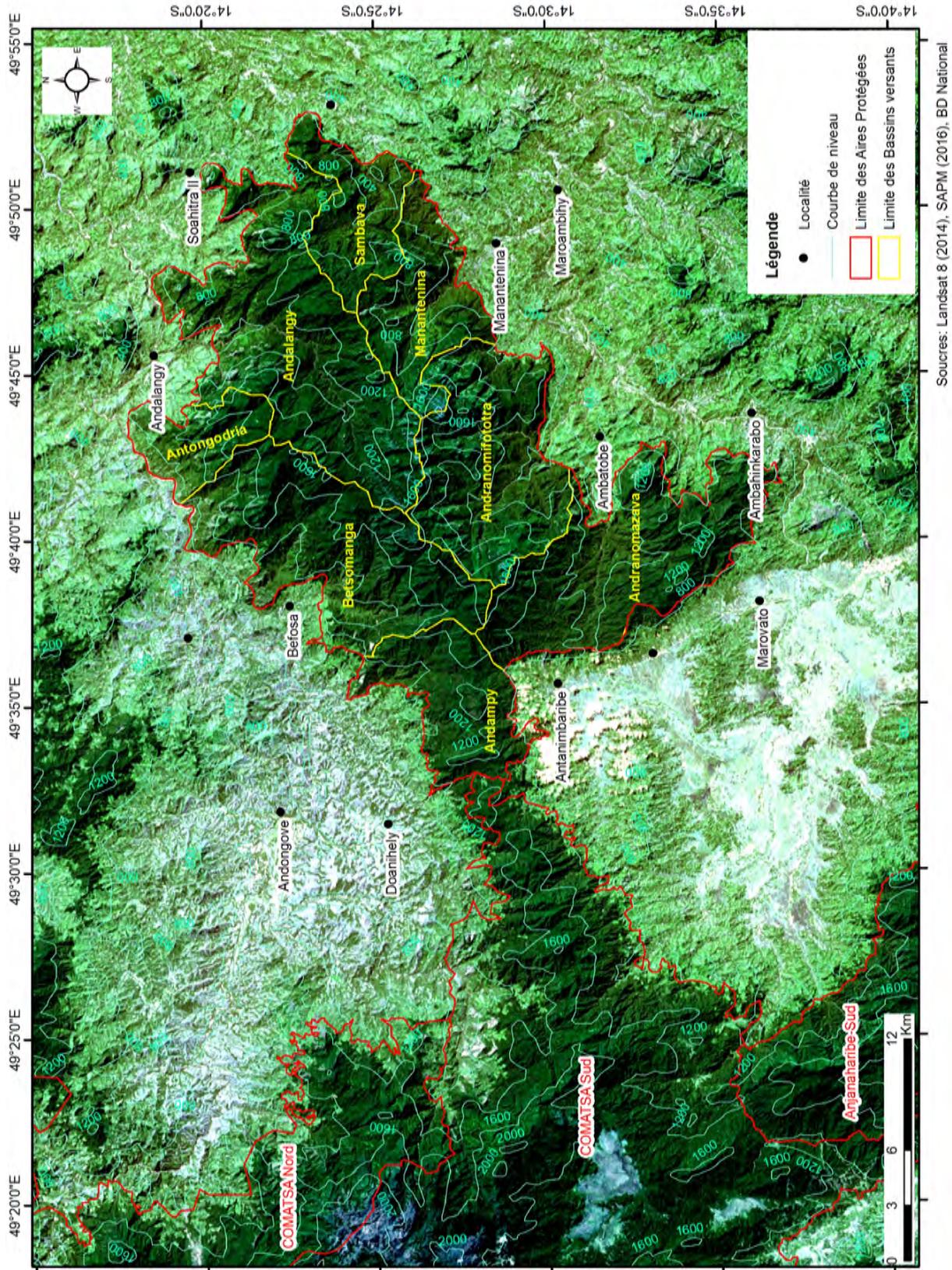


Figure 1. Localisation de la zone d'étude.

**Tableau 1.** Description des images Landsat utilisées.

| Période | Identifiant de l'image | Capteur  | Date d'acquisition |
|---------|------------------------|----------|--------------------|
| 1995    | LT51580701995088AAA01  | TM       | 1995-03-29         |
| 2004    | LE71580702004137ASN01  | ETM+     | 2004-05-16         |
| 2014    | LC81580702014236LGN01  | OLI/TIRS | 2014-08-24         |
| 2022    | LC81580702022146LGN00  | OLI/TIRS | 2022-05-26         |

afin d'optimiser les comparaisons. Elles ont été téléchargées gratuitement à partir de l'archive de l'United States Geological Service (<http://glovis.usgs.gov>).

L'analyse descriptive des changements a été appuyée par le suivi de l'évolution annuelle de l'indice de végétation NDVI (« Normalized Difference Vegetation Index »), pour mettre en évidence la variation annuelle de la productivité végétale des différentes classes de végétation naturelle. Pour ces raisons, une série temporelle de données de type NDVI MODIS (« Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer ») a été téléchargée (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/>) et analysée. Les produits MODIS utilisés ici sont de type MOD13Q1, composés des données capturées tous les 16 jours par le capteur Terra (<https://ioccg.org/sensor/modis-terra/>) avec une résolution de 250 m. Mis en fonction depuis l'année 2000, le capteur a enregistré un total de 546 données jusqu'au 31 décembre 2022, date limite choisie pour la présente étude. Toutes ces données ont été analysées et traitées pour l'étude qualitative des changements de la couverture végétale.

D'autres sources ont été mises à contribution (Tableau 2) pour appuyer la cartographie de la couverture végétale :

- La hauteur de la canopée des formations végétales de l'année 2019 (Potapov *et al.*, 2021) a été téléchargée depuis le site de GLAD ou « Global Land Analysis and Discovery » (<https://glad.umd.edu/dataset/gedi/>).
- Les données sur l'occurrence des hameaux et des villages dans la zone sont tirées de GRID<sup>3</sup> (« Géo-Referenced Infrastructure and Demographic Data for Development ») de CIESIN *et al.* (2021).
- L'hydrographie et les noms de cours d'eau ont été extraits des cartes topographiques (FTM, 1966, 1974).
- Les bassins versants ont été circonscrits avec Arc Map 10.8, en combinant l'hydrographie avec le modèle numérique du terrain fourni par SRTM (« Shuttle Radar Topography Mission »).

### Prétraitement

Le système de projection utilisée dans tous les cas est le WGS 84-UTM zones 38 Sud. Des corrections géométriques ont été apportées pour s'assurer de la superposition optimale des données multidates Landsat. En se référant à l'image avec la meilleure qualité (celle de 2014, avec 0 % de couverture nuageuse), une égalisation d'histogramme a été

**Tableau 2.** Description de toutes les données spatiales utilisées.

| Données                                 | Utilisations   |
|---|--|
| GRID <sup>3</sup>                       | - Localisation des villages, cases et zones habitées.<br>- Comprendre le mode de colonisation des milieux.   |
| Hauteur de la canopée,                  | - Appuyer l'algorithme de classification.<br>- Appuyer les données multispectrales de 2022.<br>- Apporter des informations supplémentaires dans la classification, validation et correction de la carte de la couverture végétale de 2022. |
| Images Landsat (4, 5, 7 et 8)           | - Production de la carte de couverture végétale pour chaque date (1995, 2004, 2014 et 2022).   |
| NDVI MODIS                              | - Etudier la variation de la moyenne annuelle de la productivité végétale entre les années 2000 et 2022.<br>- Décrire l'évolution de la qualité des habitats.  |
| Modèle numérique du terrain             | - Identifier et délimiter les bassins versants.<br>- Délimiter les différents niveaux altitudinaux<br>- Définir la limite théorique des classes de végétation.   |
| Carte topographique de FTM (1 :100 000) | - Identifier les principaux cours d'eau.<br>- Identifier les noms des localités.   |

effectuée sur les autres images afin de corriger les décalages radiométriques.

### Classification

La connaissance du terrain a été mise à profit pour assurer la qualité des analyses cartographiques. La méthode de classification supervisée a été choisie en intégrant les relevés de végétation effectués lors des missions de 2016 (Raherilalao *et al.*, 2016) et de 2021 (Tahinarivony, 2023, ici) dans les zones d'entraînement et de validation. L'algorithme du maximum de vraisemblance a été utilisé et l'image de 2022 a été traitée en premier pour obtenir une pré-carte, qui est par la suite confrontée aux données de hauteur de la forêt en 2019 (Potapov *et al.*, 2021), et les données biologiques mesurées en 2021 pour corriger les erreurs d'interprétation des données multispectrales. Après la validation de la carte de 2022, celles de 2014, de 2004 et de 1995 ont été successivement élaborées, par référence à la carte de l'année ultérieure. Les données d'altitude, issue du modèle numérique des terrains de SRTM (<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>) ont été prises en compte pour définir avec précision la limite théorique entre les différentes classes de végétation naturelle, qui correspondent à celles décrites par Gautier (2018), à savoir :

- Forêt dense humide sempervirente de basse altitude (jusqu'à 800 m).
- Forêt dense humide sempervirente de moyenne altitude (800 à 1600 m).
- Fourré et prairie de montagne (au-dessus de 1600 m).

La classe de végétation modifiée, qui regroupe les friches, les jachères, les plantations et les formations dégradées, a une distribution irrégulière dans le parc mais ne dépasse pas un certain niveau altitudinal. Elle a été identifiée grâce à ses attributs en NDVI, ses caractéristiques multispectrales et notamment leur hauteur, fournie par les données de Potapov *et al.* (2019).

Pour chaque carte de couverture végétale produite, une matrice de confusion a été produite et le coefficient de Kappa a été calculé (Pontius, 2000). La classification est validée si le coefficient est supérieur à 80 %. En dessous de cette valeur, les causes des éventuelles confusions entre les classes ont été revues et la classification a été relancée jusqu'à obtenir des meilleurs résultats.

### Evolution annuelle de l'indice de végétation

Les valeurs bimensuelles de l'indice de végétation NDVI depuis l'année 2000 ont été regroupées par année civile pour obtenir la moyenne annuelle en chaque pixel du milieu. Une extraction des données par niveau altitudinal a été effectuée pour décrire la variation des données en fonction des conditions du milieu. Les classes d'altitude adoptées correspondent à la limite théorique des classes de végétation du Marojejy, décrite par Gautier (2018), à savoir : inférieur à 800 m, 800 à 1200 m, 1200 à 1600 m et au-dessus de 1600 m.

Les cyclones ayant touché la région pendant la période couverte par la série de données de NDVI ont été identifiés et tirés de la base de données « Historical Hurricane Tracks » (<https://coast.noaa.gov/hurricanes>), pour comprendre les causes de la variation de la productivité végétale de chaque type de formation. Les informations descriptives de ces différentes catégories de cyclones sont présentées dans le Tableau 3. Les plus intenses sont de catégorie H4, à savoir Hudah (2000), Gafilo (2004) et Enawo (2017).

**Tableau 3.** Description des cyclones ayant impacté le Parc National de Marojejy depuis l'année 2000.

| Nom     | Intensité            | Période         |
|---------|----------------------|-----------------|
| Gloria  | Tempête tropicale    | 1 mars 2000     |
| Hudah   | Catégorie H4         | 22 mars 2000    |
| Gafilo  | Catégorie H4         | 7 mars 2004     |
| Indlala | Catégorie H3         | 15 mars 2007    |
| Jaya    | Catégorie H1         | 3 avril 2007    |
| Irina   | Dépression tropicale | 26 février 2012 |
| Enawo   | Catégorie H4         | 7 mars 2017     |

### Evaluation des changements entre les dates

L'historique des changements a été étudié pour chaque classe de végétation. Le changement est perçu comme un gain ou une augmentation lorsque la différence de surface calculée entre les dates contiguës est positive. Pour le cas contraire, il s'agit d'une perte, et les causes de la dégradation ont été identifiées en se focalisant sur les données cycloniques et les menaces et pressions anthropiques. Le taux annuel de changement entre les dates contiguës a été calculé en appliquant la formule standardisée de Puyravaud (2002).

L'étude descriptive a été effectuée sur deux échelles différentes. La première analyse est une approche plus générale et considère le parc en sa

totalité comme unité d'étude ; et a pour but de fournir toutes les données et informations générales sur le processus de changement. Ensuite, les mêmes indicateurs ainsi que les mêmes méthodes de calcul ont été appliqués à une échelle beaucoup plus grande, notamment les bassins versants, pour des données plus détaillées et spécifiques. Les huit bassins versants du Marojejy (Andalagy, Andampy, Andranomazava, Andranomifotra, Antongodria, Betsomanga, Manantenina et Sambava) sont traités et les données ont été confrontées entre eux pour décrire le niveau et la différenciation du processus de changement en fonction des caractéristiques du milieu.

## Résultats

### Description de la couverture végétale du Parc National de Marojejy

Le Parc National de Marojejy est actuellement un vaste bloc forestier isolé, quoique faiblement connecté vers l'ouest avec l'aire protégée COMATSA-Sud (Figure 1). La végétation naturelle ne se rencontre que dans le parc, alors qu'en 1995 elle s'étendait encore de quelques kilomètres au-delà de sa limite, par exemple au sud-ouest, dans le secteur d'Ambalamanasy II, comme en témoignent les données Forêt/Non-forêt des dates contiguës (Figure 2). La comparaison des états observés entre 1995 et 2004 met en évidence l'augmentation de

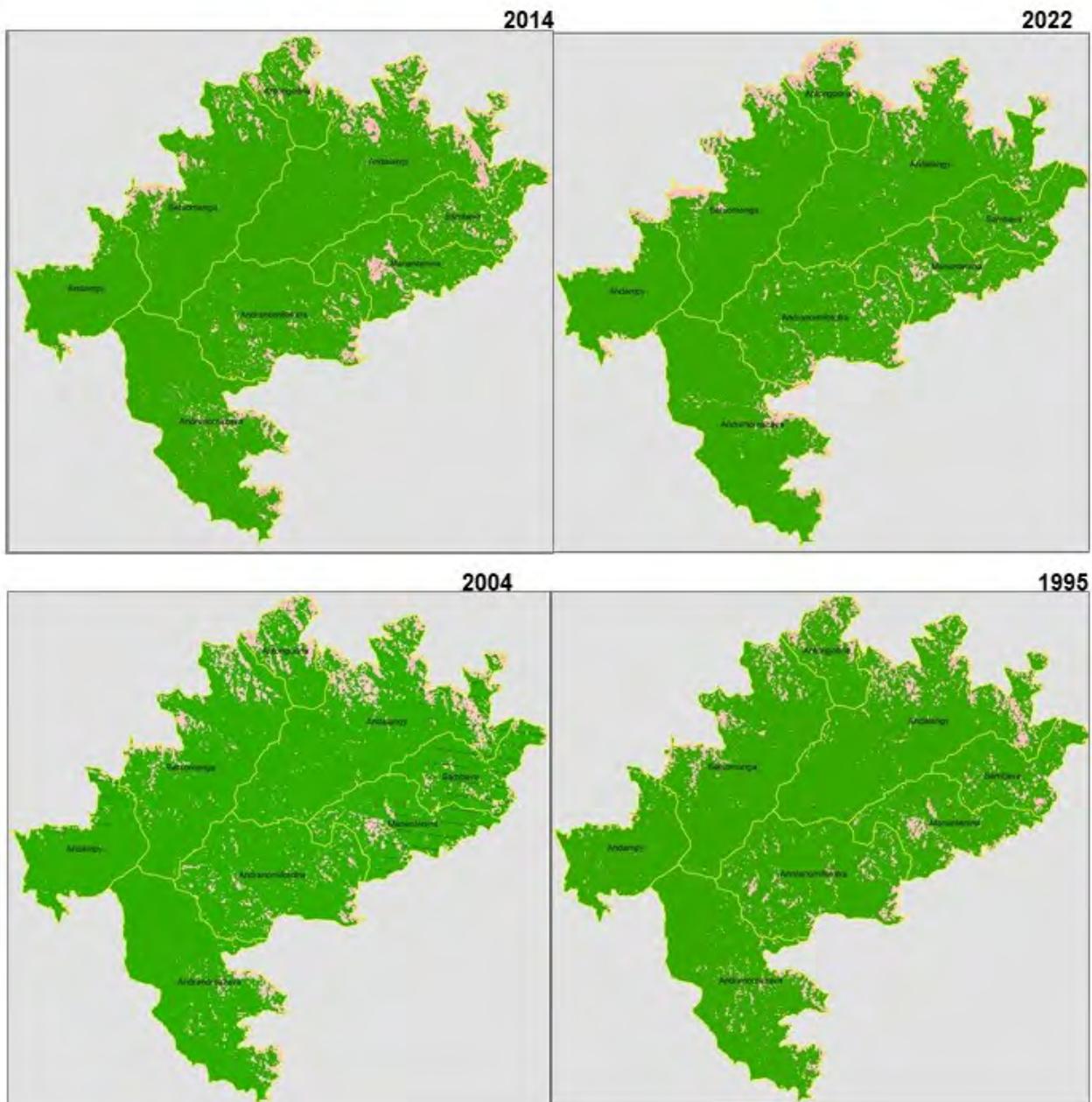
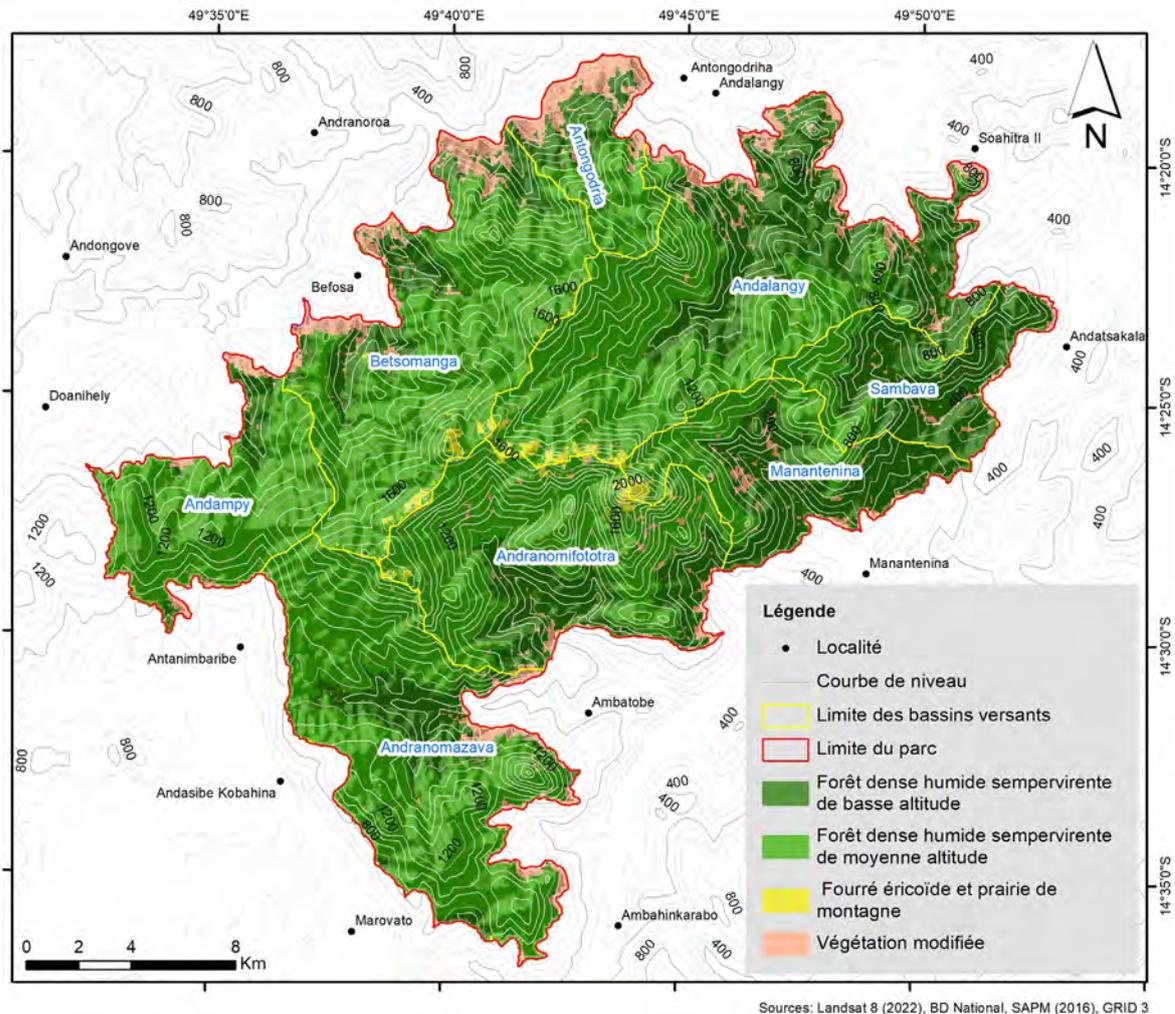


Figure 2. Masques Forêt / Non-forêt pour les quatre dates choisies.



**Figure 3.** Couverture végétale du Parc National de Marojejy pour l'année 2022.

l'emprise de la végétation modifiée vers l'intérieur de l'aire protégée. De sa répartition et de sa dynamique, on peut facilement déduire la nature des causes de cette extension, qui sont le *tavy* et le feu non contrôlé.

Dans plusieurs zones où la limite du Marojejy se trouve aux alentours de 700 à 800 m d'altitude (Figure 3 : Marovato, Andasibe-Kobahina, Antanimbaribe et Doanihely dans le sud-ouest et Antongodria dans le nord-est), la mosaïque des végétations transformées a remplacé la forêt dense humide sempervirente de basse altitude et est devenue adjacente à la forêt dense humide sempervirente de moyenne altitude. L'évaluation de la couverture végétale de l'année 2022 (Figure 3) montre que la forêt dense humide sempervirente de moyenne altitude domine le parc avec 32 255 ha, soit 58 % de la superficie totale du Marojejy. La forêt dense humide sempervirente de basse altitude est la plus touchée par les changements, et n'est plus représentée que par une superficie totale de 15 497 ha en 2022. Les fourrés éricoïdes et les prairies de montagne sont à l'abri des activités anthropiques, mais demeurent la plus petite

classe de végétation naturelle du Marojejy, avec une superficie totale de 1686 ha. La végétation modifiée est assez importante, et s'est accrue de manière continue, au dépend de la végétation naturelle. Elle représente une superficie de 6123 ha dont plus de 80 % se rencontrent en dessous de 800 m d'altitude.

Une répartition spatiale irrégulière des différentes classes est observée entre les bassins versants (Tableau 4). La forêt dense humide sempervirente de basse altitude domine les bassins versants de Sambava (66,8 %) et de Manantenina (49 %), alors qu'elle ne représente que 9,0 % de la superficie totale d'Andranomazava. Pour le cas des grands bassins versants, à superficie supérieure à 8000 ha (Andranomifotra, Andampy, Betsomanga et Andalangy), la végétation dominante est de type forêt dense humide sempervirente de moyenne altitude. Les fourrés éricoïdes et prairies de montagne y sont faiblement représentés, car leur présence dépend de conditions climatiques liées à une topographie élevée. Leur taux d'occupation ne dépasse pas 1 %, comme mesuré dans les bassins versants

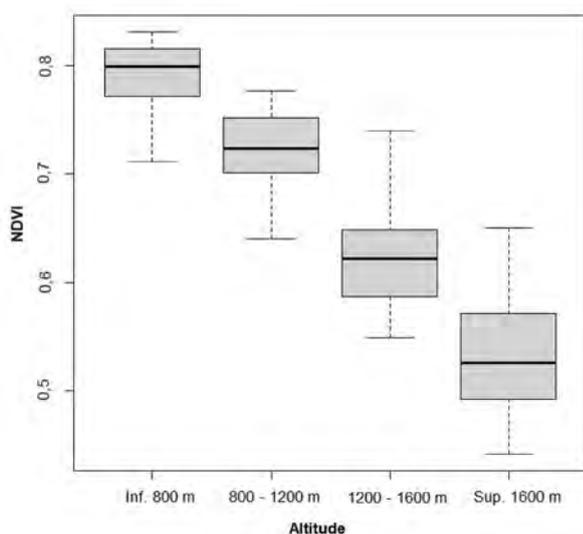
**Tableau 4.** Taux d'occupation des classes par bassin-versant en 2022.

|  |  | Sambava | Manan-tenina | Antongodria | Andampy | Andranomazava | Betsomanga | Andranomifototra | Andalangy |
|--|--|---------|--------------|-------------|---------|---------------|------------|------------------|-----------|
| Superficie totale (ha)                         |  | 3656    | 4568         | 2587        | 9426    | 4650          | 9876       | 8126             | 12412     |
| Taux d'occupation (%) par classe de végétation | Forêt dense humide sempervirente de basse altitude   | 66,83   | 49,01        | 28,54       | 15,76   | 9,02          | 15,31      | 23,72            | 34,37     |
|  | Forêt dense humide sempervirente de moyenne altitude | 24,20   | 37,11        | 44,70       | 76,57   | 85,71         | 72,01      | 62,87            | 52,34     |
|  | Fourré et prairie                                    | 0,09    | 2,28         | 0,42        | 0,66    | 0,21          | 3,52       | 4,40             | 2,96      |
|  | Végétation modifiée                                  | 8,87    | 11,60        | 26,35       | 7,00    | 5,05          | 9,16       | 9,02             | 10,32     |

de Sambava (0,1 %), d'Andranomazava (0,2 %), d'Antongodria (0,4 %) et d'Andampy (0,7 %). Quant à la végétation modifiée, elle représente 5,1 à 26,4 % de la superficie des bassins versants.

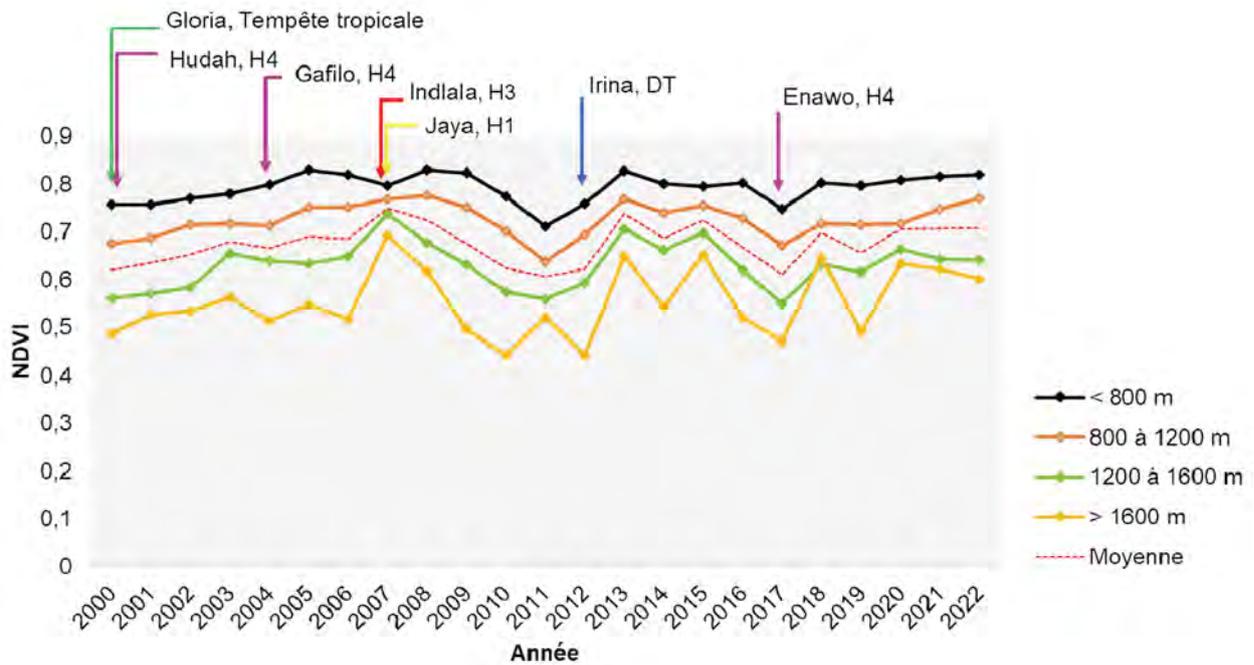
#### Variation des valeurs de l'indice de végétation NDVI entre les dates et les types d'habitat

Chaque pixel du milieu est attribué à une moyenne annuelle de NDVI. La variation de ces valeurs entre les années 2000 et 2022 et pour chaque classe de végétation est synthétisée dans la Figure 4, montrant que l'indice diminue lorsqu'on monte en altitude ; et ne dépasse pas 0,46 pour les formations aux alentours du sommet (2130 m d'altitude). De plus, aucune superposition des médianes pour chaque classe n'est observée, amenant à un test de comparaison des moyennes. Le test de Kurskal-Wallis conclut une différence significative des moyennes, avec une valeur de probabilité égale à 0,39 qui est supérieure au niveau de significativité alpha (0,05).

**Figure 4.** Distribution des valeurs de NDVI pour chaque gradient altitudinal.

La différence de superficie occupée par chaque classe d'altitude affecte leur nombre de pixels respectifs, et contraint l'étude à choisir la moyenne pondérée pour suivre la tendance évolutive de l'indice de végétation entre les dates. La variation des valeurs pendant la période d'étude et pour les quatre classes est présentée dans la Figure 5. La série temporelle des données de NDVI (Figure 5) montre une variation interannuelle irrégulière de la productivité végétale. Une tendance évolutive assez similaire est observée entre les quatre classes. Les classes en dessous de 800 et entre 800-1200 m d'altitude ont des valeurs au-dessus de la moyenne générale contrairement aux autres classes. La classe en dessous de 800 m d'altitude est la plus riche en matière de productivité végétale pendant que la plus faible est celle en dessus de 1600 m d'altitude. L'indice est très sensible pour la classe supérieure à 1600 m d'altitude, marqué par l'écart des valeurs enregistrées entre deux années, qui, parfois peut dépasser 0,1 (2017 et 2018). Le niveau de résilience de la végétation est fonction de l'intensité du cyclone. Entre 2000 et 2022, sept cyclones ont traversé le Nord-est et ont laissé des impacts considérables. En 2000, deux cyclones sont enregistrés et une reprise de la reproductivité végétale des quatre classes d'habitat est observée après leur passage. Ce rétablissement des écosystèmes est perturbé par le passage de Gafilo en 2004, surtout pour les classes situées en dessus de 800 m d'altitude. En effet, la classe la plus touchée est celle qui se trouve en dessus de 1600 m d'altitude, avec une valeur passée de 0,6 à 0,5 entre les années 2003 et 2004.

La productivité végétale a atteint sa valeur maximale en 2007 pour la classe de 1200-1600 m et celle supérieure à 1600 m d'altitude et malgré le passage des cyclones Indlala et Jaya la même année. Ces derniers n'ont affecté que la classe en dessous de 800 m d'altitude, occupée par la forêt dense humide sempervirente de basse altitude. Entre



**Figure 5.** Variation de la moyenne annuelle de l'indice de végétation NDVI entre les années 2000 et 2022 et données périodiques des cyclones ayant impacté le Parc National de Marojejy (couleur des flèches correspondre au code couleur de l'intensité du cyclone, selon la classification de Saffir-Simpson).

2007 et 2011 s'observe une dégradation de la valeur de NDVI pour toutes les classes alors qu'aucun cyclone n'a été enregistré pendant cette période ; justifiant ainsi que le cyclone n'est pas le seul facteur de changements des écosystèmes du Marojejy. Après 2011, une reprise de la productivité végétale ou une augmentation en NDVI est enregistrée pour toutes les classes de végétation. Cette tendance a résisté au passage de la dépression tropicale Irina en 2012, sauf pour la végétation en dessus de 1600 m d'altitude, marquée une faible baisse de l'ordre de 0,1. Après 2015, les trois classes en dessus de 800 m d'altitude ont connu une baisse de productivité, accentuée par le passage d'Enawo en 2017. En effet, à cause de Enawo, la classe de 1200 à 1600 m d'altitude a atteint sa plus faible valeur (0,5) pendant ces 22 dernières années. Entre 2018 et 2022, aucun cyclone n'a traversé la zone et toutes les classes sont définies par un accroissement ou la stabilité de ses valeurs de NDVI.

### Evolution de la superficie occupée par chaque classe entre 1995 et 2022

#### Evaluation à l'échelle du parc

Les données calculées entre les dates (Tableau 5) révèlent que pendant l'ensemble de la durée couverte par l'étude, le parc a connu plus de perte d'habitats naturels que de gain. Entre les classes de végétation naturelle, le changement le plus conséquent s'est

passé entre 2014 et 2022 et concerne la forêt dense humide sempervirente de basse altitude. Pendant cette période, la perte a affecté 4,6 % de la superficie totale de la classe et le taux annuel de déforestation est de 0,6 %, et correspond au double de ce qu'on a évalué entre 2004 et 2014.

**Tableau 5.** Taux de changement de la surface des classes de végétation entre 1995 et 2022 dans le Parc National de Marojejy.

| Classe   | Années      | Taux en % |
|--|-------------|-----------|
| Forêt dense humide sempervirente de basse altitude   | 1995 - 2004 | - 4,29    |
|  | 2004 - 2014 | - 2,94    |
|  | 2014 - 2022 | - 4,55    |
| Forêt dense humide sempervirente de moyenne altitude | 1995 - 2004 | - 0,79    |
|  | 2004 - 2014 | - 0,72    |
|  | 2014 - 2022 | - 1,08    |
| Fourré éricoïde et prairie de montagne               | 1995 - 2004 | - 2,04    |
|  | 2004 - 2014 | +0,20     |
|  | 2014 - 2022 | - 0,28    |
| Végétation modifiée                                  | 1995 - 2004 | +21,02    |
|  | 2004 - 2014 | +11,29    |
|  | 2014 - 2022 | +16,49    |

(- : valeur négative, attribuée à un taux de perte ; + : valeur positive, attribuée à un taux de gain)

La forêt dense humide sempervirente de moyenne altitude n'est pas à l'écart d'une évolution régressive de sa superficie pendant la période d'étude. Son taux de changement est en dessous de 1 % jusqu'en 2014, et un taux annuel de déforestation de 0,1 % entre 1995 et 2004 et entre 2004 et 2014.

Cependant, une augmentation de la déforestation est constatée ces dernières années, avec un taux annuel de 0,1 % entre 2014 et 2022. La superficie occupée par les fourrés éricoïdes et prairies de montagne ont faiblement changé pendant la période d'étude. Les pertes sont plus importantes comparées aux données de gain mais avec un taux annuel inférieur à 0,2 %. Au détriment de la végétation naturelle, la végétation modifiée a continué de s'agrandir pendant la période d'étude. En effet, une augmentation de 21,0 % a été mesurée entre 1995 et 2004 si elle était de 11,3 % entre 2004 et 2014. Pendant ces huit dernières années, la classe est devenue de plus en plus importante avec une augmentation de 16,5 % de sa superficie.

### **Evaluation par bassin versant**

Les données des bassins versants décrivent le processus et le rythme des changements à une échelle beaucoup plus grande (Tableau 6). Pendant la période d'étude, la forêt dense humide de basse altitude a accusé une perte dans tous les bassins versants du Marojejy. La plus importante est observée dans le bassin versant d'Andampy entre 2014 et 2022, avec un taux maximal de 10,6 %. Ce même processus de changement caractérise également la forêt dense humide sempervirente de moyenne altitude, conduisant à la réduction de sa superficie dans les bassins versants. Le taux le plus élevé est mesuré entre 2014 et 2022 dans le bassin versant d'Antongodria, et égal à 3,6 %. Contrairement aux classes précédentes, le type de changement pour les fourrés éricoïdes et prairies de montagne est fonction des caractéristiques du bassin versant :

- Sa superficie n'a pas changé depuis 1995 dans les bassins versants d'Andranomazava, d'Antongodria et de Sambava.

- La période de 1995 à 2004 est marquée par une perte pour tous les bassins versants. De plus, le taux calculé pour Manantenina (5,6 %) est deux fois plus élevé que celui du parc pendant cette même période.
- En général, le changement qui s'est produit entre 2004 et 2014 a contribué à l'augmentation de la superficie de la classe et le taux le plus élevé caractérise le bassin versant d'Andalangy (0,7 %).

Pendant toute la période d'étude choisie, la végétation modifiée ou transformée s'agrandit de manière continue. Son taux d'augmentation peut varier de 1,9 à 35,2 % et en fonction des bassins versants. Les plus grandes valeurs caractérisent la période de 1995 à 2004 pendant laquelle, le taux mesuré dans les bassins versants d'Andampy (35,2 %), d'Andalangy (22,6 %), d'Andranomazava (25,4 %) et de Betsomanga (25,2 %), sont supérieurs à celui du parc national (21,0%). Les plus faibles taux mesurés entre les dates appartiennent au bassin versant de Manantenina. En effet, son taux de changement a continué de diminuer et est passé de 12,5 à 1,9 % entre 1995 et 2022.

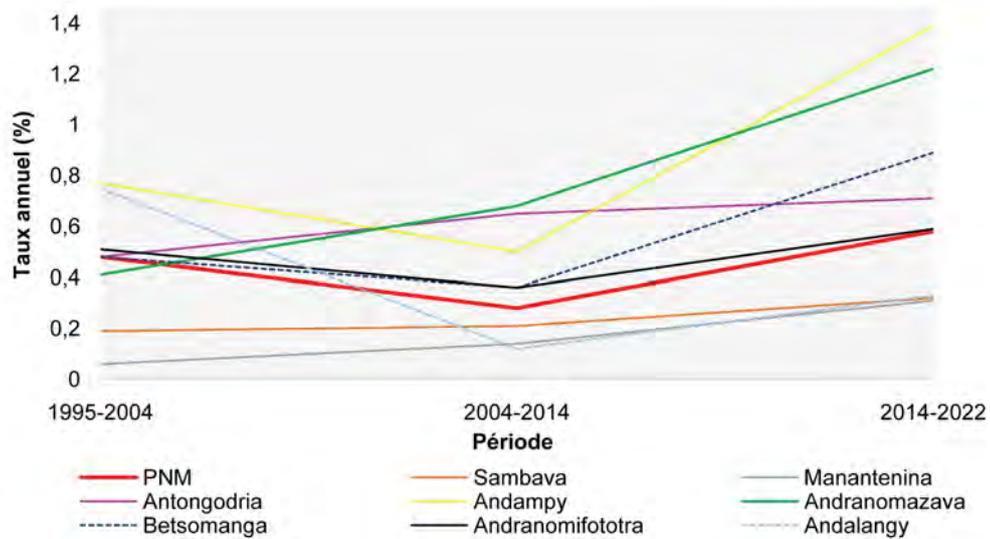
### **Taux annuel des changements**

Le taux annuel de gain ou de perte est un indicateur majeur pour illustrer les processus de changement d'une classe pendant une période définie. Différentes tendances d'évolution sont obtenues en fonction de l'échelle d'étude adoptée, comme illustrent les Figures 6, 7, 8 et 9.

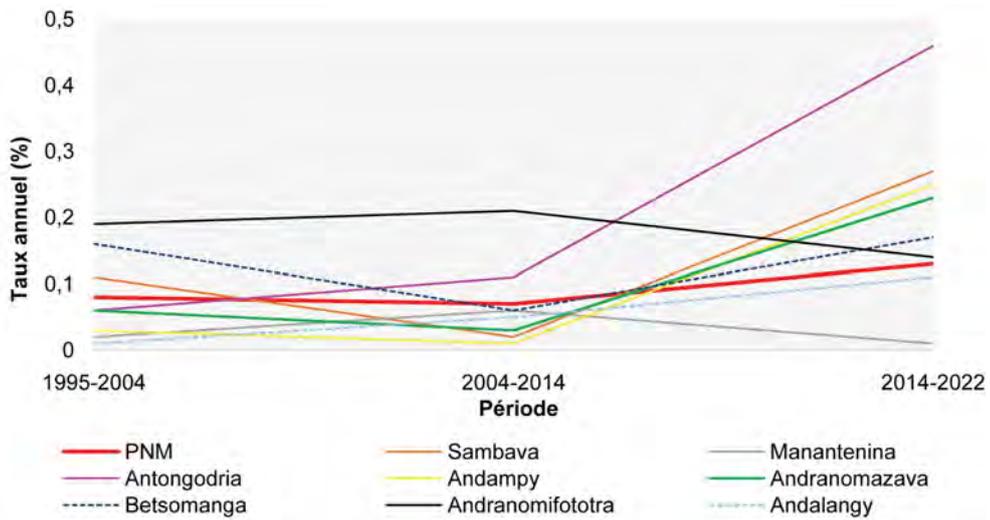
Pour la forêt de basse altitude (Figure 6), les données descriptives du Parc National, montrent que le taux de déforestation le plus élevé est mesuré entre 2014 et 2022. En effet, la tendance est caractérisée par un taux annuel de 0,48 % entre

**Tableau 6.** Taux de perte (valeurs négatives) ou de gain (valeurs positives) calculé entre les dates pour chaque classe et par bassin versant dans le Parc National de Marojejy.

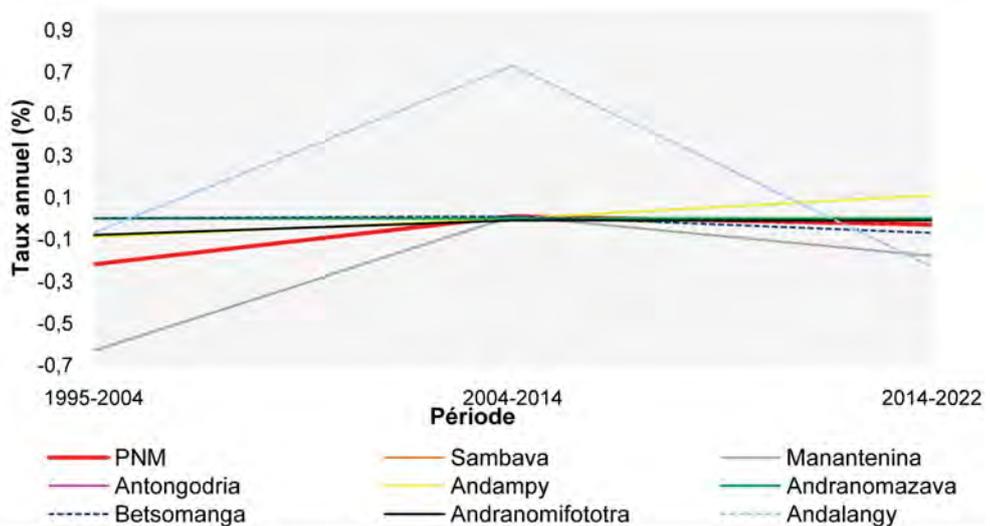
|  | Années    | Bassins versants |             |             |         |               |            |                |           |
|--|-----------|------------------|-------------|-------------|---------|---------------|------------|----------------|-----------|
|  |           | Sambava          | Manantenina | Antongodria | Andampy | Andranomazava | Betsomanga | Andranomifotra | Andalangy |
| Forêt dense humide sempervirente de basse altitude   | 1995-2004 | -1,70            | -0,58       | -4,29       | -6,76   | -3,68         | -4,25      | -4,45          | -6,55     |
|  | 2004-2014 | -2,09            | -1,48       | -6,30       | -4,90   | -6,66         | -3,54      | -3,61          | -1,24     |
|  | 2014-2022 | -2,55            | -2,42       | -5,51       | -10,55  | -9,35         | -6,95      | -4,67          | -2,62     |
| Forêt dense humide sempervirente de moyenne altitude | 1995-2004 | -1,00            | -0,80       | -0,55       | -0,34   | -0,53         | -1,47      | -1,78          | 0,10      |
|  | 2004-2014 | -1,77            | -0,02       | -1,10       | -0,12   | -0,31         | -0,66      | -2,16          | -0,54     |
|  | 2014-2022 | -2,17            | 0,54        | -3,62       | -2,04   | -0,19         | -1,37      | -1,17          | 0,04      |
| Fourré éricoïde et prairie de montagne               | 1995-2004 | 0,00             | -5,57       | 0,00        | -0,89   | 0,00          | -0,06      | -0,80          | -0,67     |
|  | 2004-2014 | 0,00             | 0,16        | 0,00        | 0,00    | 0,00          | 0,11       | -0,13          | 0,74      |
|  | 2014-2022 | 0,00             | -1,44       | 0,00        | 0,87    | 0,00          | -0,57      | -0,08          | -0,01     |
| Végétation modifiée                                  | 1995-2004 | 13,19            | 12,51       | 11,75       | 35,22   | 25,43         | 25,18      | 18,10          | 22,59     |
|  | 2004-2014 | 18,75            | 6,79        | 11,93       | 16,60   | 28,91         | 11,09      | 29,53          | 6,33      |
|  | 2014-2022 | 15,52            | 1,88        | 16,69       | 21,71   | 23,54         | 28,61      | 30,18          | 6,55      |



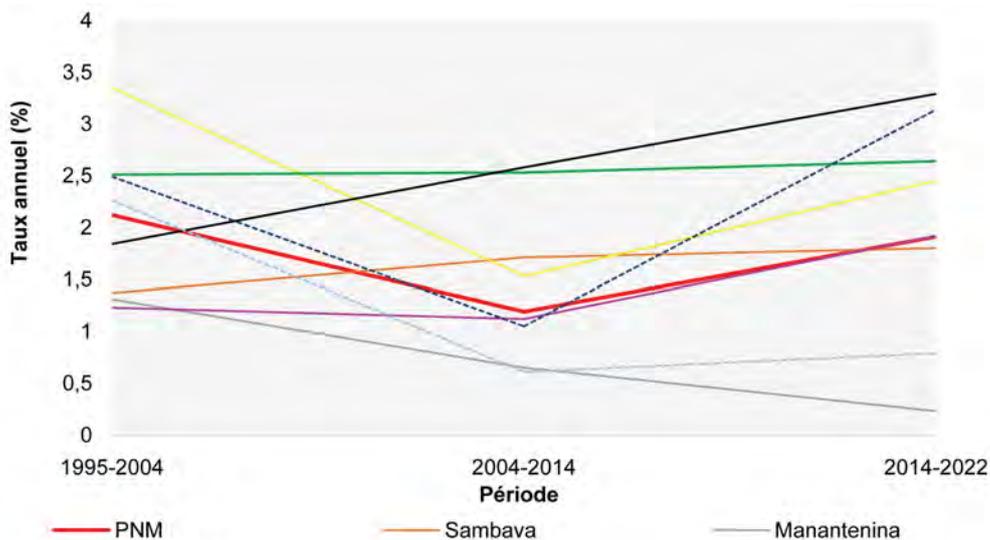
**Figure 6.** Variation du taux annuel de la perte en forêt dense humide de basse altitude dans le Parc National de Marojejy (PNM).



**Figure 7.** Variation du taux annuel de la perte en forêt dense humide de moyenne altitude dans le Parc National de Marojejy (PNM).



**Figure 8.** Variation du taux annuel des changements de la couverture en fourré et prairie de montagne dans le Parc National du Marojejy (PNM).



**Figure 9.** Variation du taux annuel d'accroissement en surface de la végétation modifiée par bassin versant dans le Parc National de Marojejy (PNM).

1995 et 2004, poursuivie par une baisse considérable entre 2004 et 2014 (0,28 %). Le double de ce dernier taux est mesuré entre 2014 et 2022, montrant que la forêt dense humide de basse altitude est de plus en plus menacée dans le Parc National du Marojejy. Cette même tendance est mesurée dans les bassins versants d'Andampy, de Betsomanga et d'Andranomifototra. Pour Andranomazava, l'accroissement du taux annuel de déforestation évolue de manière continue et depuis 1995, avant d'atteindre une valeur de 1,2 % entre 2014 et 2022. Les taux descriptifs pour Manantenina et Sambava n'ont jamais dépassé celui du parc même s'ils ont continué d'augmenter entre les dates. Pour le cas d'Andalangy, une diminution importante du taux annuel de la perte en forêt est constatée entre 1995 et 2014, un rythme qui n'a pas été maintenu jusqu'en 2022.

La perte en forêt dense humide de moyenne altitude se définit par un taux annuel de 0,01 à 0,46 % (Figure 7). A l'échelle du parc, une perte continue de la formation est observée et qui s'est intensifiée durant ces dernières années. Le taux annuel de perte est égal à 0,11 % entre 2014 et 2022. Ce même cas est enregistré pour plusieurs bassins versants, à savoir Andalangy, Andampy, Andranomazava, Betsomanga et Sambava. Seuls deux bassins versants ont connu une diminution du taux annuel de perte durant ces huit dernières années, à savoir : Andranomifototra et Manantenina. Le cas d'Antongodria est à la fois particulier et très alarmant. Son taux de perte en forêt est de 0,06 % entre 1995 et 2004 avant d'atteindre une valeur de 0,11 % entre 2004 et 2014. Ce rythme s'est accentué

après 2014 pour atteindre un taux de 0,46 % en 2022.

Pour le cas des fourrés éricoïdes et prairies de montagne (Figure 8), le taux annuel de changement est très proche de la valeur nulle. Une faible évolution de l'indicateur est mesurée pour les bassins versants d'Andranomazava, d'Andranomifototra, d'Antongodria et de Sambava. Les pertes enregistrées avant 2004 se sont évoluées avec un taux annuel de 0,22 %, qui est classifié comme faible comparé à celui de Manantenina (0,63 %). Le taux enregistré entre 2004 et 2014 est presque similaire pour la plupart des bassins versants, ce qui a permis au parc d'atteindre un gain de 0,01 % par année pendant cette période. Entre 2014 et 2022, les gains restent faibles et les pertes ne dépassent pas 0,1 % sauf pour Andalangy et Manantenina.

Différents cas d'évolution du taux annuel de la végétation modifiée sont présentés dans la Figure 9. La tendance observée à l'échelle du parc montre une diminution du taux annuel de gain en surface de la formation jusqu'en 2014. Par contre, entre 2014 et 2022, le rythme d'agrandissement a évolué pour atteindre un taux annuel de 1,91 %. Une tendance similaire mais à un taux beaucoup plus élevé est observée dans les bassins versants d'Andampy et de Betsomanga. Pour le cas de Manantenina, la formation modifiée évolue en surface mais avec un rythme moins faible, soit un taux annuel de 1,31 % entre 1995 et 2004 contre 2,23 % entre 2014 et 2022. Le cas contraire est observé à Andranomifototra, marqué par une progression linéaire du taux annuel d'accroissement en surface de la formation, qui est passé de 1,84 % entre 1995 à 2004 à 3,29 %

entre 2014 et 2022. Ces dernières années, la formation s'élargit plus vite à Andranomifototra qu'Andranomazava, où le taux annuel est de 2,64 %.

## Discussion

### NDVI pour le suivi écologique des habitats

Il a été montré dans la corne de l'Afrique que les variations de l'indice de NDVI sont en partie influencées, voire corrélées avec les données climatiques (Ghebregabher *et al.*, 2020). Ce cas est aussi justifié dans le Parc National du Marojejy lorsque les données climatiques mesurées par gradient de 400 m d'altitude (Marline *et al.* (2023, ici) et la variation de NDVI sont combinées. En effet, la productivité végétale traduite par la valeur de l'indice de NDVI est influencée par les facteurs climatiques comme la température et la précipitation. Sa valeur diminue proportionnellement avec la température lorsqu'on monte en altitude.

L'indice de végétation NDVI permet de suivre l'évolution de l'état de santé d'un écosystème. Sa diminution renseigne un phénomène de perturbation qui peut être d'origine anthropique ou naturelle, alors que le cas contraire peut être dû à la régénération naturelle et le maintien de l'intégrité écologique. Pendant une période ou les années sans cyclone notable, la diminution des valeurs de NDVI des forêts denses humides du Marojejy est attribuée à des facteurs anthropiques comme la déforestation ou le feu. Pour le cas des fourrés éricoïdes et les prairies de montagne, à l'abri de l'agriculture itinérante, la cause serait liée à une diminution de la précipitation ou d'autres facteurs climatiques. En effet, cette approche serait beaucoup plus enrichie et renforcée si des données de précipitation pour chaque pixel du milieu ou par tranche altitudinal sont disponibles et couvrent la période d'étude choisie.

### Niveau de conservation entre 1995 et 2022

#### Données générales sur le parc

La quantité de données analysées (546 enregistrements pendant 26 ans) et les informations fournies par MOD13Q1, qualifié comme un satellite de dernière génération, sont bien appropriées pour une étude de changement à l'échelle locale ou régionale (Cui *et al.*, 2020 ; Munawar & Udelhoven, 2020 ; Nyamekey *et al.*, 2020). Cette nouvelle approche des analyses de changements de la couverture végétale, appliquées à Marojejy et ses bassins versants peut être perçue comme une étude des cas et renforce les résultats sur l'étude de la

déforestation à Madagascar (Rakotomalala *et al.*, 2015), ou au sein des aires protégées de Goodman *et al.* (2018).

L'irrégularité des données annuelles de NDVI et l'augmentation du taux annuel de la perte en forêt dans toutes les classes de végétation naturelle remettent en cause le système de conservation en place. Sur le terrain, le constat se résume par le recul de la forêt et la prolifération de la pratique destructive dans le parc comme l'exploitation des bois, l'agriculture itinérante, le feu et l'agroforesterie ou la culture de vanille. La reconstitution naturelle de la formation est observée dans les formations au-dessus de 1600 m d'altitude et ne permettrait pas de garantir à elle seule la restauration écologique de l'écosystème. En basse altitude, la dynamique des formations post-culturelles ou post-cycloniques est observée, mais souvent freinée par les bambous et les espèces envahissantes.

#### Données des bassins versant

Dans certaines parties du parc, le statut de conservation est respecté et les activités agricoles ne franchissent pas la limite, ce qui n'est pas le cas pour plusieurs zones dans le versant Nord-est. Une disproportion entre le taux de gain et de perte de la végétation naturelle caractérise la période de 1995 à 2022. Cette tendance peut être dangereuse pour l'écosystème si aucune mesure n'est prise par le gestionnaire. Les causes de ces disproportions du changement entre les bassins versants seraient liées à plusieurs facteurs :

- La régularité du système de conservation et le niveau d'application des règles de gestion (fréquence de suivi et des activités de patrouille, niveau d'implication des communautés locales, moyens personnels et matériels disponibles) : Seuls les sites faciles d'accès sont fréquentés par les agents du parc. Ce contexte est renforcé par les manques des moyens humains et matériels du gestionnaire.
- La concentration de certaines activités (écotouristiques et recherches) dans les bassins versants de Mandena et d'Andranomifototra : Ces secteurs sont les portes d'entrée du Parc National. Les communautés locales dans ces localités ont bénéficié les apports des différents projets et toutes les activités entreprises dans le parc ; et sont conscientes des intérêts de la protection de l'aire protégée.

- Les autres bassins versants n'ont pas bénéficié d'avantage direct à l'application des règles de gestion et ne jouissent pas les intérêts et les avantages apportés par les activités écotouristiques générés par le parc. Par conséquent, les populations locales restent dépendantes à l'utilisation des ressources naturelles et continuent à exploiter la forêt. Ainsi, les zones les plus sensibles aux menaces anthropiques sont celles qui bénéficient moins des retombées directes des activités de l'aire protégée.

## Conclusion

La conservation du Parc National de Marojejy, nécessite encore plus d'intervention et à différents niveaux. La dégradation des écosystèmes n'affecte non seulement les habitats, mais aussi la connectivité du Marojejy avec COMATSA-Sud et les autres aires protégées. Plusieurs améliorations et renforcements devront être apportées surtout si on veut garder l'intégrité des écosystèmes, réduire ou stopper la déforestation et sortir le parc de la liste des patrimoines en péril de l'UNESCO. Parmi les solutions avancées sont : l'application stricte des règles de gestion, la reconnaissance mutuelle des intérêts de la conservation de ce patrimoine mondial par les communautés locales, les entrepreneurs, les miniers, les politiciens et l'Etat Malagasy, et la révision ou le renforcement du Plan de Gestion Environnemental et Social du parc. Aucune mesure ne peut être établie pour éviter les aléas climatiques, mais des interventions sont possibles pour atténuer les dégâts, telles que la mise en défens des parcelles dégradées et l'éradication des plantes envahissantes.

## Remerciements

Mes vifs remerciements reviennent à Steven M. Goodman qui a suggéré cette étude pour appuyer les données des inventaires biologiques du Marojejy. Je tiens également à remercier Laurent Gautier pour ses commentaires et suggestions sur ce manuscrit.

## Références bibliographiques

- Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Columbia University & Novel, T. 2021.** Geo-referenced Infrastructure and Demographic Data for Development (GRID3): Republic of Madagascar Settlement Extents, Version 01.01. Palisades, New York.
- Cui, C., Zhang, W., Hong, Z. & Meng, L. 2020.** Forecasting NDVI in multiple complex areas using neural network techniques combined feature engineering. *International Journal of Digital Earth*, 13 (12): 1733-1749.
- Foiben-Taontsarintanin'i Madagascar (FTM). 1966.** *Carte de Madagascar* au 1:100000. Feuille W-36, Andapa. FTM, Antananarivo.
- Foiben-Taontsarintanin'i Madagascar (FTM). 1974.** *Carte de Madagascar* au 1:100000. Feuille XY-36, Maroambihy. FTM, Antananarivo.
- Gautier, L. 2018.** Site 19, Marojejy : Végétation / Vegetation. Dans *Les aires protégées terrestres de Madagascar : Leur histoire, description et biote / The terrestrial protected areas of Madagascar: Their history, description, and biota*, eds. S. M. Goodman, M. J. Raherilalao & S. Wohlhauser, pp. 706-707. Association Vahatra, Antananarivo.
- Gautier, L., Tahianarivony, J. A., Ranirison, P. & Wohlhauser, S. 2018.** Végétation / vegetation. Dans *Les aires protégées terrestres de Madagascar : Leur histoire, description et biote / The terrestrial protected areas of Madagascar : Their history, description, and biota*, eds. S. M. Goodman, M. J. Raherilalao & S. Wohlhauser, pp. 207-242. Association Vahatra, Antananarivo.
- Ghebregabher, M. G., Yang, T., Yang, X. & Sereke, T. E. 2020.** Assessment of NDVI variations in responses to climate change in the Horn of Africa. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23 (3): 249-261.
- Goodman, S. M., Raherilalao, M. J. & Wohlhauser, S. (eds.). 2018.** *Les aires protégées terrestres de Madagascar : Leur histoire, description et biote / The terrestrial protected areas of Madagascar. Their history; description, and biota*. Association Vahatra, Antananarivo.
- Goodman, S. M., Raselimanana, A. P. & Tahinarivony, J. A. 2023.** Description of the Parc National de Marojejy, Madagascar, and the 2021 biological inventory of the massif. In *A floral and faunal inventory of the Parc National de Marojejy: Altitudinal gradient and temporal variation*, eds. S. M. Goodman & M. J. Raherilalao. *Malagasy Nature*, 17 : 5-31.
- Madagascar National Parks (MNP). 2018.** Site 19, Marojejy : Pressions anthropiques / Anthropogenic pressures. Dans *Les aires protégées terrestres de Madagascar : Leur histoire, description et biote / The terrestrial protected areas of Madagascar: Their history, description, and biota*, eds. S. M. Goodman, M. J. Raherilalao & S. Wohlhauser, pp. 712. Association Vahatra, Antananarivo.
- Marline, L., Randrianarimanana, R. & Patel, E. 2023.** Elevational variation of temperature and relative humidity in the Parc National de Marojejy. In *A floral and faunal inventory of the Parc National de Marojejy: Altitudinal gradient and temporal variation*, eds. S. M. Goodman & M. J. Raherilalao. *Malagasy Nature*, 17: 32-40.
- Messmer, N., Rakotomalaza, P. J. & Gautier, L. 2000.** Structure and floristic composition of the vegetation of the Parc National de Marojejy, Madagascar. In *A floral*

- and faunal inventory of the Parc National de Marojejy, Madagascar: With the reference to elevational variation, ed. S. M. Goodman. *Fieldiana: Zoology*, new series, 97: 41-104.
- Munwar, S. & Udelhoven, T. 2020.** Land change syndromes identification in temperate forests of Hindukush Himalaya Karakorum (HHK) mountain ranges. *International Journal of Remote Sensing*, 41 (20): 7735-7756.
- Pontius Jr., R. G. 2000.** Quantification error versus location in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66 (8): 1011-1016.
- Potapov, P., Li, X., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Hansen, M. C., Kommareddy, A., Pickens, A., Turubanova, S., Tang, H., Silva, C. E., Armston, J., Dubayah, R., Blair, J. B. & Hofton, M. 2021.** Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 253: 112165.
- Puyravaud, J. P. 2002.** Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177: 593-596.
- Rakotomala, F. A., Rabenandrasana, J. C., Andriambahiny, J. E., Rajaonson, R., Andriamalala, F., Burren, C., Rakotoarijaona, J. R., Parany, B. L. E., Vaudry, R., Rakotoniaina, S., Ranaivosoa, R., Rahagalala, P., Randrianary, T. & Grinand, C. 2015.** Estimation de la déforestation des forêts humides à Madagascar utilisant une classification multitempore d'images Landsat entre 2005, 2010 et 2013. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 211-212: 12-23.
- Raherilalao, M. J., Raselimanana, A. P., Soarimalala, V. & Goodman, S. M. 2016.** Evaluation biologique et écologique de la flore et de la faune du Parc National de Marojejy, Madagascar. Rapport non publié. Association Vahatra, Antananarivo.
- Tahinarivony, J. A. 2023.** Typologie des habitats en fonction du gradient altitudinal : Cas du Parc National de Marojejy. In A floral and faunal inventory of the Parc National de Marojejy: Altitudinal gradient and temporal variation, eds. S. M. Goodman & M. J. Raherilalao. *Malagasy Nature*, 17: 102-135.