



UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES
MENTION FORESTERIE ET ENVIRONNEMENT
Parcours Ecosystème et Biodiversité

**Mémoire en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Sciences Agronomiques au grade
Master II en Foresterie et Environnement**

Promotion Jiharo Mahaatrika
2015-2020

**Analyse de la dynamique spatiotemporelle de la couverture
forestière dans le Territoire du Lemak'i Onilahy entre 1989 et
2019 – Région Atsimo Andrefana**

Présenté par : RAMBININTSOA Miora Mikoja

Soutenu le 31 Mars 2021

Devant le jury composé de :

Président : RANJATSON Patrick, Docteur
Rapporteurs : RATSIRARSON Joelisoa, Professeur titulaire
RAMANAKOTO Miora Falimiarana, Docteur
Examineurs : RANAIVONASY Jeannin, Docteur
RAKOTONDROSOA Olivia, Docteur



UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES
MENTION FORESTERIE ET ENVIRONNEMENT
Parcours Ecosystème et Biodiversité

**Mémoire en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Sciences Agronomiques au grade
Master II en Foresterie et Environnement**

Promotion Jiharo Mahaatrika
2015-2020

**Analyse de la dynamique spatiotemporelle de la couverture
forestière dans le Territoire du Lemak'i Onilahy entre 1989 et
2019 – Région Atsimo Andrefana**

Présenté par : RAMBININTSOA Miora Mikoja

Soutenu le 31 Mars 2021

Devant le jury composé de :

Président : RANJATSON Patrick, Docteur
Rapporteurs : RATSIRARSON Joelisoa, Professeur titulaire
RAMANAKOTO Miora Falimiarana, Docteur
Examineurs : RANAIVONASY Jeannin, Docteur
RAKOTONDRA SOA Olivia, Docteur

Remerciements

Le présent travail n'a pas pu être effectué sans l'appui de nombreuses personnes qui ont grandement contribué à enrichir cette étude par leur aide précieuse, leur temps et leur considération. Ces quelques lignes sont ainsi l'occasion pour moi d'exprimer sincèrement mes vifs remerciements et reconnaissances à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de cette recherche.

Je tiens d'abord à remercier Monsieur Ramamonjisoa Bruno, Directeur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, qui nous a permis d'accomplir jusqu'à la fin cette recherche. J'exprime par la suite mes remerciements à l'adresse de Monsieur Ranjatson Patrick, qui fait l'honneur de présider la soutenance de ce mémoire.

Mes plus sincères remerciements également à mes deux encadrants, Monsieur Ratsirarson Joelisoa et Madame Ramanakoto Miora Falimiarana, avec qui j'ai eu grand plaisir de travailler et qui m'ont beaucoup appris, depuis le début de cette recherche jusqu'à ce jour, pour l'accomplissement en bonne et due forme de ce travail. Leur engagement et leur soutien tout au long de cette recherche méritent mes profondes reconnaissances.

Je tiens ensuite à exprimer ma gratitude aux deux examinateurs, dont Monsieur Ranaivonasy Jeannin et Madame Rakotondrasoa Olivia, qui ont accepté d'apporter leur expertise pour examiner le présent travail, malgré leurs nombreuses occupations.

Mes sincères reconnaissances pour l'équipe du Labo-SIG, ESSA-Forêt, plus particulièrement à Monsieur Andriamanantsoavina Lova Toky Fandresena, qui m'ont guidé tout au long de l'élaboration et l'analyse des cartes d'occupation des sols.

En guise de gratitude, j'adresse également mes remerciements à tous mes enseignant(e)s, qui n'ont pas ménagé leurs efforts pour transmettre plus que des connaissances à travers ce louable métier. Plus particulièrement à Monsieur Randriamalala Josoa, pour ses conseils, son temps et ses encouragements, qui ont grandement contribué à cadrer la présente étude.

Je tiens par la suite à remercier toute l'équipe de l'UFR-Ecobio de l'ESSA-Forêts, plus particulièrement à Madame Mia Razafimahefa et Monsieur Rija Andriamialy, pour leur accueil et l'ambiance dans laquelle j'ai eu le plaisir de travailler. Je remercie également toute l'équipe de l'ESSA Bezà Mahafaly sur terrain à Betioky et à Bezà Mahafaly, qui m'ont guidé et qui ont facilité l'approche avec les habitants, entre autres Monsieur Andriamahafaly Rindra Tsiky Fanilo, Monsieur Edouard Ramahatratra et Monsieur Miarena. Mes remerciements également vont à l'adresse de toutes les personnes qui nous ont accueillis lors de notre passage sur terrain. Je suis aussi reconnaissante à l'appui financier de l'ESSA-ABC à travers la Fondation Liz Clairbone et Art Ortenberg Foundation (LCAOF) pour cette étude.

Pour finir, je tiens à remercier sincèrement mes parents, mes frères et toute ma famille pour leur soutien et leur appui sous toutes les formes. Je remercie également mes amis, surtout mes camarades de classes, d'avoir été toujours présents. Mes remerciements à la promotion Jiharo, particulièrement les Jiharo-forêts, pour tous ces moments et ces partages, essentiels à l'accomplissement de ce travail.

SOMMAIRE

Remerciements.....	i
SOMMAIRE	ii
Liste des illustrations.....	iv
Acronymes	vi
Glossaire.....	vii
Cadre du projet.....	viii
Résumé.....	ix
Abstract	x
Famintinana.....	xi
INTRODUCTION.....	1
ÉTAT DE L'ART	2
I. Dynamique de la couverture forestière à Madagascar	2
II. Présentation de la zone d'étude	3
II.1. Situation géographique et cadre administratif.....	3
III.2. Milieu physique.....	4
METHODOLOGIE.....	12
I. Objectifs, problématiques et hypothèses.....	12
I.1. Objectifs de l'étude.....	12
I.2. Problématique	12
I.3. Hypothèses.....	13
II. Matériels et méthodes.....	14
II.1. Domaine d'étude : la géomatique.....	14
II.2. Traitement des images satellites pour avoir les cartes d'occupation des sols.....	15
II.3. Analyse de la dynamique de la couverture forestière dans le TLO	26
III. Limites de l'étude.....	27
IV. Cadre opératoire.....	29
RÉSULTATS ET INTERPRETATIONS	30
I. Caractérisation de la classification.....	30
I.1. Description des différentes classes d'occupation des sols retenues.....	30
I.1.1. La classe « zone humide » (ZH)	30
I.1.2. La classe « forêt galerie » (FG).....	30
I.1.3. La classe « forêt sèche » (FS)	31
I.1.4. La classe « fourré » (F)	31
I.1.5. Les classes « forêt sèche dégradée » (FSD) et « fourré dégradé » (FD).....	32
I.1.6. La classe « savane arborée » (SA)	32
I.1.7. La classe « zone de culture » (ZC).....	33

I.1.8. La classe « savane herbeuse » (SH).....	33
I.2. Différenciation entre les classes selon l'indice de séparabilité.....	33
I.3. Validation de la classification.....	34
I.3.1. Matrice de confusion.....	34
I.3.2. Indice de Kappa	35
II. Dynamique de la couverture forestière dans le TLO par période de références	36
II.1. Période 1989-1995.....	37
II.2. Période 1995-2001.....	38
II.3. Période 2001-2007.....	39
II.4. Période 2007-2013.....	41
II.5. Période 2013-2019.....	42
II.6. Période 1989-2019.....	44
III. Taux de déforestation dans le TLO de 1989 à 2019.....	46
III.1. Taux de déforestation dans le TLO entre la zone Est et Ouest	46
III.2. Déforestation à l'intérieur et en dehors des Aires Protégées dans le TLO.....	46
III.2.1. Pertes en couverture forestière à l'intérieur et en dehors des Aires Protégées.....	46
III.2.2. Taux de déforestation	47
DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS	48
I. Discussions	48
I.1. Discussions sur la méthodologie.....	48
I.2. Discussions sur les résultats.....	49
I.3. Discussions sur les hypothèses	54
II. Recommandations	55
II.1. Recommandations sur la méthodologie.....	55
II.2. Recommandation par rapport aux résultats	56
II.3. Recommandations sur l'application des résultats de la dynamique forestière sur la conservation de la biodiversité.....	57
CONCLUSION	61
Références bibliographiques	62
Annexe	I

Liste des illustrations

Liste des cartes

Carte 1 : Localisation de la zone d'étude : Territoire Lemak'i Onilahy	4
Carte 2 : Aires Protégées, VOI et APC dans le TLO	10
Carte 3 : Les scènes de recouvrement de la zone d'étude	16
Carte 4 : Localisation des points de vérification pour évaluer la précision de la classification	23
Carte 5 : Changements d'occupation des sols entre 1989 et 1995	37
Carte 6 : Changements d'occupation des sols entre 1995 et 2001	39
Carte 7 : Changements d'occupation des sols entre 2001 et 2007	40
Carte 8 : Changements d'occupation des sols entre 2007-2013	41
Carte 9 : Changements d'occupation des sols entre 2013 et 2019	43
Carte 10 : Changements d'occupation des sols entre 1989 et 2019	44

Liste des figures

Figure 1 : Perte en couverture forestière de Madagascar de 1953 à 2017	3
Figure 2 : Courbe ombrothermique dans le territoire du Lemak'i Onilahy	5
Figure 3 : Exemple de changement de la forêt sèche en fourré xérophile sur une faible distance dans la Forêt de Mikea (sud-ouest de Madagascar) (Razanaka, 1995)	7
Figure 4 : Combinaison des deux scènes et extraction de la zone d'étude	18
Figure 5 : Cartes obtenues après la classification non supervisée et la reclassification	19
Figure 6 : Etapes d'élaboration d'une carte d'occupation des sols	21
Figure 7 : Répartition des gains et des pertes en surface des classes (km ²) par période	45
Figure 8 : Mécanisme de déforestation dans le Territoire du Lemak'i Onilahy	54

Liste des photos

Photo 1 : Les types de forêts existant dans le TLO	8
Photo 2 : Exemples d'espèces faunistiques endémiques dans le TLO	8
Photo 3 : Entretien auprès de la population locale	23
Photo 4 : Aperçu des 3 premières classes par un satellite	31
Photo 5 : Aperçu de 4 classes par un satellite	32
Photo 6 : Aperçu des 2 dernières classes par un satellite	33
Photo 7 : Etape de vérification des points, exemple d'une zone de culture à Ankilimivony	34

Liste des tableaux

Tableau 1 : Prétraitement des images satellites.....	18
Tableau 2 : Logiciels utilisés dans l'étude.....	21
Tableau 3 : Explication de la matrice de confusion	24
Tableau 4 : Signification des valeurs de l'indice de Kappa	25
Tableau 5 : Exemple de matrice de transition (%).....	26
Tableau 6 : Cadre opératoire de l'étude	29
Tableau 7 : Matrice d'indice de séparabilité des neuf classes.....	34
Tableau 8 : Matrice de confusion de la carte d'occupation du sol dans le TLO.....	35
Tableau 9 : Situations de l'occupation des sols dans le Territoire du Lemak'i Onilahy pendant les 6 années de références.....	36
Tableau 10 : Matrice de transition entre 1989 et 1995 (en %).....	38
Tableau 11 : Matrice de transition entre 1995 et 2001 (%).....	39
Tableau 12 : Matrice de transition entre 2001 et 2007 (%).....	40
Tableau 13 : Matrice de transition entre 2007 et 2013 (%).....	42
Tableau 14 : Matrice de transition entre 2013 et 2019 (%).....	43
Tableau 15 : Matrice de transition entre 1989 et 2019 (%).....	45
Tableau 16 : Taux annuel de déforestation (%) dans le TLO entre 1989 et 2019.....	46
Tableau 17 : Perte en forêts entre 1989 et 2019 (km ²).....	47
Tableau 18 : Taux de déforestation à l'intérieur et à l'extérieur des Aires Protégées.....	47
Tableau 19 : Précision de la classification des études antérieures par rapport à la présente étude	49
Tableau 20 : Plan d'action par rapport à l'étude	58

Liste des annexes

Annexe 1 : Types de sols dans le TLO.....	I
Annexe 2 : Caractéristiques des VOI et APC dans le TLO.....	II
Annexe 3 : Les huit satellites Landsat.....	III
Annexe 4 : Les images utilisées et leurs caractéristiques.....	IV
Annexe 5 : Protocole de travail des agents sur terrain pour l'analyse de la dynamique spatio-temporelle des changements d'occupation du sol dans le TLO entre 1973 et 2019.....	V
Annexe 6 : Situation de l'occupation des sols dans le TLO	VI
Annexe 7 : Cartes de la couverture forestière de 1989 à 2019.....	IX
Annexe 8 : Zone d'étude d'Hosnah (2013).....	XII
Annexe 9 : Les entreprises minières dans le TLO.....	XIII

Acronymes

- **AP** : Aire Protégée
- **APC** : Aire Protégée Communautaire
- **COBA** : Communauté de Base
- **F** : Fourré
- **FD** : Fourré dégradé
- **FG** : Forêt galerie
- **FS** : Forêt sèche
- **FSD** : Forêt sèche dégradée
- **MNP** : Madagascar National Parks
- **NAP** : Nouvelle Aire Protégée
- **PPN** : Produits de Première Nécessité
- **RS** : Réserve Spéciale
- **RSBM** : Réserve Spéciale Bezà Mahafaly
- **SA** : Savane arborée
- **SH** : Savane herbeuse
- **SIG** : Système d'Information Géographique
- **TGRN** : Transfert de Gestion des Ressources Naturelles
- **TLO** : Territoire du Lemak'i Onilahy
- **VOI** : Vondron'Olonahy
- **ZC** : Zone de culture
- **ZH** : Zone humide

Glossaire

- **Classe spectrale** : un groupe dans lequel est classé un pixel selon sa signature spectrale, par rapport au nombre de classes à différencier selon le manipulateur.
- **Cluster** : groupement de plusieurs pixels appartenant à une classe spectrale.
- **Distance de Bhattacharyya** : Principe de mesure de la distance théorique entre deux distributions normales de classes spectrales. Plus précisément, elle mesure la similitude de deux distributions de probabilité.
- **Méthode bayésienne** : méthode d'inférence statistique fondée sur une évaluation des probabilités des hypothèses, préalablement à l'observation d'un événement aléatoire. Elle est basée sur le calcul des probabilités de diverses causes hypothétiques à partir de l'observation d'événements connus.
- **Pixel** : Unité de mesure de la définition d'une image numérique matricielle.
- **Signature spectrale** : La variation de la réflectance émises par des cibles soumises à une source d'énergie, en fonction de la longueur d'onde. Autrement dit, c'est l'ensemble des caractéristiques du rayonnement électromagnétique réémis, conditionnées par les propriétés de la matière irradiées, nécessaires et suffisantes pour l'identifier.
- **Signification thématique d'un pixel** : La définition ou la nature d'un pixel relative à sa signature spectrale.
- **Zone d'entraînement** (ou *Region of interest*, ROI) : région identifiée d'une image avec laquelle est basée la comparaison avec la classification automatique des éléments composant cette image.

Cadre du projet

La présente étude a été réalisée dans le cadre du projet TLO ou Territoire du Lemak'i Onilahy financé par l'ESSA-ABC à travers LCAOF (Liz Claiborne Art Ortenberg Foundation). La Fondation LCAOF a été créée par les feux Liz Claiborne et Art Ortenberg en 1987, et œuvre dans la conservation de la faune sauvage et le bien être des communautés humaines avec lesquelles elles sont inextricablement liées. Depuis sa création, la Fondation a pris de nombreuses initiatives pour protéger divers paysages importants dans le monde en partant de la recherche aux projets innovants sur le terrain, en partenariat avec les communautés de base. La Fondation soutient la conservation de certains paysages fauniques d'importance mondiale en Amérique du Nord et du Sud, en Afrique et en Asie. Elle se concentre sur les paysages terrestres, lacustres et côtiers présentant une très riche biodiversité et recherche des solutions de conservation qui répondent aux besoins de la nature et des communautés locales. Comme Madagascar abrite une gamme incroyable de biodiversité, la fondation a travaillé avec des partenaires de Madagascar depuis 1991. Les zones cibles étant la partie Nord-Est et la partie Sud dont la Réserve Spéciale Beza Mahafaly. Cette dernière regroupe de nombreuses espèces faunistiques et floristiques unique du Sud-Ouest de Madagascar et un Centre de recherche, de formation et d'éducation a été mis en place avec ESSA en collaboration avec les communautés locales afin de conserver la biodiversité de cette partie de l'île.

Résumé

Les forêts sèches de l'écorégion Sud-Ouest de Madagascar subissent des pressions considérables depuis plusieurs années. Le présent travail vise à analyser la dynamique de la couverture forestière dans cette partie, plus précisément dans le Territoire du Lemak'i Onilahy (TLO), entre 1989 et 2019. Trois hypothèses ont été émises : (i) la conversion de la couverture forestière en autres classes d'occupation des sols, témoins des activités anthropiques ; (ii) la déforestation entre les forêts de la partie Est (Forêt sèche) plus importante que celle des forêts de la partie Ouest du TLO (Fourré) ; et (iii) l'importance du rôle que tiennent les Aires Protégées dans la réduction de la déforestation. Pour vérifier ces hypothèses, la méthodologie suivante a été suivie : neuf classes ont été définies et six cartes d'occupation des sols correspondantes aux six années de référence entre 1989 et 2019 ont été élaborées et comparées grâce à l'application d'outils dans des logiciels de télédétection et de SIG. La précision de la classification obtenue a été évaluée grâce à une descente sur terrain puis au calcul de l'indice de Kappa. Les données issues de la comparaison des cartes ont par la suite été analysées à travers les matrices de transition par période, et les taux de déforestation ont été calculés. Les résultats obtenus ont montré une excellente classification d'après l'indice de Kappa de 0,81. Comme résultats, les 30 années de l'étude ont été marquées par la transformation de 22,65 % (901 km²) du TLO, de forêts sèches en forêts sèches dégradées, en savanes et en zones de culture ; 25,29 % du TLO (1 007 km²) de fourrés en fourrés dégradés, en savanes et en zones de culture ; et 2,23 % du TLO (89 km²) de forêts dégradées en zones de culture et savanes. Cette diminution se traduit par des taux de déforestation de 1,05%.an⁻¹ pour les FS et de 0,82%.an⁻¹ pour les F, marquée par une augmentation de la perte importante en couverture forestière à partir de 2001, surtout entre la période 2007-2013. L'analyse des taux de déforestation par période à l'intérieur et à l'extérieur des Aires Protégées (AP) a permis de déduire l'efficacité ou l'inefficacité de la présence des AP sur la conservation des forêts. Elle dépend étroitement des catégories de ces AP, de leurs modes de gestion, mais aussi du contexte dans lequel vivent les habitants locaux. Les résultats de la présente étude contribuent à la compréhension du mécanisme des changements de déforestation dans la partie Sud-Ouest de Madagascar, un point fondamental pour les acteurs dans la conservation de la nature et de la biodiversité.

Mots clés : forêt sèche, fourré xérophile, déforestation, télédétection, Territoire du Lemak'i Onilahy, Madagascar

Abstract

Dry forests of the Southwest ecoregion of Madagascar are under constant pressure for several years. The present work aims to analyze the forest cover dynamic in this part, in the Territory of Lemak'i Onilahy (TLO), between 1989 and 2019. Three hypotheses have been made suggested (i) the trend of cover forestry in other land use classes caused by anthropogenic activities; (ii) deforestation between the eastern forests (dry forest), which is more important than the western forests (thicket) of the TLO ; and (iii) the role of protected areas in reducing deforestation. To test these hypotheses, the following methodology has been followed: nine classes were defined and six land use maps corresponding to six referencing years between 1989 and 2019, were produced and compared through the application of tools in remote sensing and GIS software. The accuracy of the classification obtained was assessed through a field visit and Kappa index. The data from the comparison of maps were analyzed through the transition matrices by period and the deforestation rates. The results showed an excellent classification according to the Kappa index, which is 0.81. As results, the 30 years of the study were marked by the transformation of 22.65% (901 km²) of the TLO from dry forest to degraded dry forest, savannah and crop; 25.29% of the TLO (1 007 km²) from thicket to degraded thicket, savannah and crop; and 2.23% of the TLO (89 km²) from degraded forests to crop and savannah. This decrease translates into deforestation rates of 1.05% per year for FS and 0.82% per year for F, marked by an increase in the significant loss in forest cover from 2001, especially during the period 2007-2013. The analysis of deforestation rates by period inside and outside protected areas (PA) indicates the effectiveness or ineffectiveness of the presence of PAs on forest conservation. It depends closely on the category of the PA, their mode of management but also the context in which the inhabitants live. The results of this study contribute to the understanding of the mechanism of deforestation in the southwestern part of Madagascar, a fundamental point for stakeholders in the conservation of nature and biodiversity.

Key words: dry forest, xerophilic thicket, deforestation, remote sensing, Lemak'i Onilahy Territory, Madagascar

Famintinana

Efa an-taonany maro no niharan'ny fanimbàna sy ny fahapotehana ny ala maina any amin'ny faritra andrefan'i Madagasikara. Ny tanjon'ity asa fikarohana ity dia ny handalinana ny fivoaran'ny velaran'ala ao amin'ny faritra Lemak'i Onilahy (TLO), ny taona 1989 hatramin'ny 2019. Petra-kevitra telo no napetraka, izay momban'ny (i) fironan'ny rakotr'ala ho amin'ny singa mandrakotra ny tany hafa vokatry ny ataon'ny olombelona ; (ii) ny faharitràn'ny alan'ny atsinanana (ala maina), mihoatra ny alan'ny andrefana (ala ringitra) any amin'ny TLO ; (iii) ny anjara asan'ny faritra arovana amin'ny fampihenana ny fahasimban'ny ala. Hanamarinana ireo petrakevitra ireo dia izao avy ny dingana natao : nozaraina ho sivy ny singa mandrakotra ny tany ary sarintany enina, izay mifanaraka amin'ny enin-taona nosafidiana anelanelan'ny 1989 sy 2019, no namboarina sy nampitahaina tamin'ny fampiasana ny teknolojia mifototra amin'ny fitarafana ny tany avy eny amin'ny zana-bolana. Ny fahamarinam-pototry ny fitsinjaràna azo dia nohamarinana tamin'ny alàlan'ny fidinana ifotony arahin'ny fikajiana ny “indice de Kappa”. Ny “matrice de transition” no nandalinana ireo valiny azo tamin'ny fampitahàna ireo sarintany. Ny valin'ny voka-pikarohana dia milaza fa tena tsara ny fitsinjaràna natao raha jerena ny “indice de Kappa” izay 0,81. Hita tamin'izany fa tanatin'ny 30 taona no niovan'ny 22,65 isan-jaton'ny TLO (901 km²) tamin'ny ala maina ho ala maina simba, hivoka ary tany fambolena ; 25,29 isan-jaton'ny TLO (1 007 km²) tamin'ny ala ringitra ho ala ringitra simba, hivoka ary tany fambolena ; 2,23 isan-jaton'ny TLO (89 km²) tamin'ny ala simba nivadika ho tany fambolena sy hivoka. Izany fihenana ny ala izany dia marihin'ny taham-paharinganan'ny ala 1,05% isan-taona ho an'ny FS ary 0,82% ho an'ny F. Tsikaritra fa nihanitombo ny fahasimban'ny ala nanomboka ny taona 2001, indrindra anelanelan'ny taona 2007 sy 2013. Ny tahan'ny faharinganan'ny ala anaty sy ivelan'ny faritra arovana no nahitana ny anton'ny ilàna azy ireo eo amin'ny fiarovana ny ala. Hita fa miankina amin'ny fomba fitantana ny faritra arovana sy ny toe-java-misy hiainan'ny mponina ny fiatraikan'ny fisian'ny faritra arovana amin'ny fampihenana ny fahasimban'ny ala. Ity voka-pikarohana ity dia manampy betsaka amin'ny fahazoana ny fomba fahasimban'ny ala any amin'ny faritra andrefan'ny Madagasikara, izay zava-dehibe tokoa ho an'ireo mpandray anjara rehetra amin'ny fiarovana ny zava-boahary.

Teny fanalahidy : ala maina, ala ringitra, tetikala, fitarafana ny tany avy eny amin'ny zana-bolana, Lemak'I Onilahy, Madagasikara

INTRODUCTION

Depuis 1990 en 2020, le monde a perdu 420 millions d'ha de forêt, soit 12,35% de la superficie des forêts en 1990 (FAO, 1995 ; FAO & PNUE, 2020), entraînant des pertes importantes en biodiversité (Ceballos, *et al.*, 2015), des impacts sur le changement du climat (Van der Weerf *et al.*, 2009) et sur les conditions de vie de la population mondiale. Comme presque le quart de la population mondiale dépend directement des ressources forestières (AIAC, 2016), la compréhension de l'évolution des couvertures forestières tient une place importante du fait des différents services fournis par les écosystèmes forestiers. Avec les progrès scientifiques en matière de recherche et de technologie, des études sur la dynamique des couvertures forestières incluses dans l'occupation des sols, continuent de renseigner plus efficacement sur les tendances actuelles dans les processus de déforestation, de dégradation, de désertification et de perte de la biodiversité (Lambin *et al.*, 2001).

À Madagascar, les dernières évaluations indiquent que seule 16 % de la superficie de Madagascar est encore couverte de forêt naturelle, et que ces forêts restantes sont fortement fragmentées (Ravonjimalala, 2019). Les études effectuées pour comprendre les changements d'occupation des sols font intervenir diverses méthodes comme les recherches bibliographiques, l'utilisation des outils cartographiques et logiciels disponibles actuellement dans le domaine de la recherche et du développement, les descentes sur terrain et les enquêtes. Plusieurs études cartographiques sur les changements de l'occupation des sols ont été effectuées surtout dans la partie orientale de Madagascar (Locatelli, 2000 ; Ranaivonasy *et al.*, 2003 ; Ratovoson, 2011 ; Randriamalala, 2015 ; Soloniaina, 2016). Cet intérêt s'explique par la formation végétale rencontrée dans cette partie de l'île, constituée généralement par des forêts denses sempervirentes (Humbert, 1955), ombrophiles peu ou pas modifiées, ainsi que des forêts dégradées, incitant la majorité des études sur les dynamiques spatiales des forêts à se faire en zone humide aussi bien au niveau mondial qu'à Madagascar (Randriamalala *et al.*, 2015).

Le processus de déforestation dans les forêts sèches de la partie Sud, Sud-Ouest de Madagascar reste mal-connu (Hervé *et al.*, 2015a) malgré les quelques études cartographiques déjà faites dans cette zone (Rakotomavo, 2010 ; Hosnah, 2013 ; Houdanov, 2014 ; Rasoanaivo, 2017, Ravonjimalala, 2019). Elles s'intéressent généralement aux sites d'étude localisés comme la mangrove du delta Mangoky, les fourrés xérophiles de Betioky-Sud et Soalara-Sud, la commune Analamisampy ; et la région de Menabe.

C'est dans ce contexte que s'insère la présente étude sur l'analyse de la dynamique spatio-temporelle de la couverture forestière de 1989 à 2019 dans le paysage du Lemak'i Onilahy se trouvant dans la région Sud-Ouest de Madagascar, qui abrite de nombreuses espèces floristiques et faunistiques typiques des forêts sèches. La présence des Aires Protégées à savoir la Réserve Spéciale de Bezà Mahafaly, la Nouvelle Aire Protégée Amoron'i Onilahy et les parcs nationaux de Tsimanampetsotsa, de Zombitse-Vohibasia et de Mikea montre l'importance de la conservation du paysage dans cette partie de l'île (MNP, 2019). D'où l'intérêt des études sur la dynamique de la couverture forestière menées dans

cette partie de Madagascar. Les données découlant de la présente étude vont permettre d'enrichir les connaissances sur l'évolution des couvertures forestières et sur le processus de déforestation dans cette partie de l'île durant 30 années.

Pour le présent travail, le plan suivant a été adopté : d'abord le contexte de l'étude a été présenté, ensuite la zone concernée par l'étude a été décrite ; puis dans la partie Méthodologie ont été développées les diverses étapes suivies pour atteindre les objectifs de l'étude ; ensuite les méthodes et les résultats ont été discutés, enfin des recommandations ont été avancées avant la conclusion.

ÉTAT DE L'ART

I. Dynamique de la couverture forestière à Madagascar

Sur une superficie de 590 000 km², Madagascar possède 8,9 Mha de forêt naturelle, soit 15 % du territoire national en 2014. Les types d'écosystèmes forestiers se répartissent dans quatre écorégions climatiques : forêts humides de l'Est (4,4 Mha, soit 50 %), forêts sèches de l'Ouest (2,6 Mha, soit 29 %), forêts épineuses du Sud (1,7 Mha, soit 19 %), et les mangroves (177 000 ha, soit 2 %) (Vieilledent *et. al.* 2018).

Les études sur la dynamique spatio-temporelle de la couverture forestière à Madagascar concernent plusieurs régions de l'île. Ratovoson (2011) et Ranaivonasy (2012) ont focalisé leur étude dans la partie Est, la région Analanjirifo, respectivement entre 1993 et 2010 (17 ans) et entre 1993 et 2008 (15 ans), pour étudier les impacts des pressions anthropiques sur la déforestation s'exerçant dans la région. Soloniaina (2016) a travaillé dans la partie Nord-Est de Madagascar, sur une période entre 1992 et 2014 (22 ans), dans le but d'inclure les effets de la variabilité climatique pendant cette période dans l'explication de la dynamique de la couverture forestière. Randriamalala *et al.* (2015) ont travaillé dans la partie Sud-Ouest de Madagascar sur la dynamique des fourrés xérophiles de Betioky-Sud et Soalara-Sud, Rakotomavo (2010) sur la mangrove du delta de Mangoky, et Ravonjimalala (2019) sur la forêt dense sèche de la commune Analamisampy. En général, les objectifs de ces études tournent autour de la compréhension de la tendance de dégradation des écosystèmes considérés et l'analyse de la contribution des différents facteurs face aux changements.

Concernant la dynamique de la couverture forestière Malagasy, l'étude de Vieilledent *et al.* (2018) a permis d'évaluer une perte de 44 % de la couverture pendant 6 décennies de 1953 en 2017, (Figure 1), avec un taux de déforestation de 99 000 ha par an, soit 1,1 % par an, due principalement à la conversion des forêts en terres agricoles.

Les changements du couvert forestier de 1973 à 2017 sont indiqués dans la figure principale, et le couvert forestier initial en 1953 est indiqué en bas à droite. Deux zooms dans les écorégions Ouest sèche (partie gauche) et Est humide (partie droite) présentent des vues plus détaillées. Pour chaque zoom, de

haut en bas sont observés le couvert forestier en 1953, le changement du couvert forestier de 1973 à 2014, la fragmentation forestière en 2017 et la distance à lisière de la forêt en 2017.

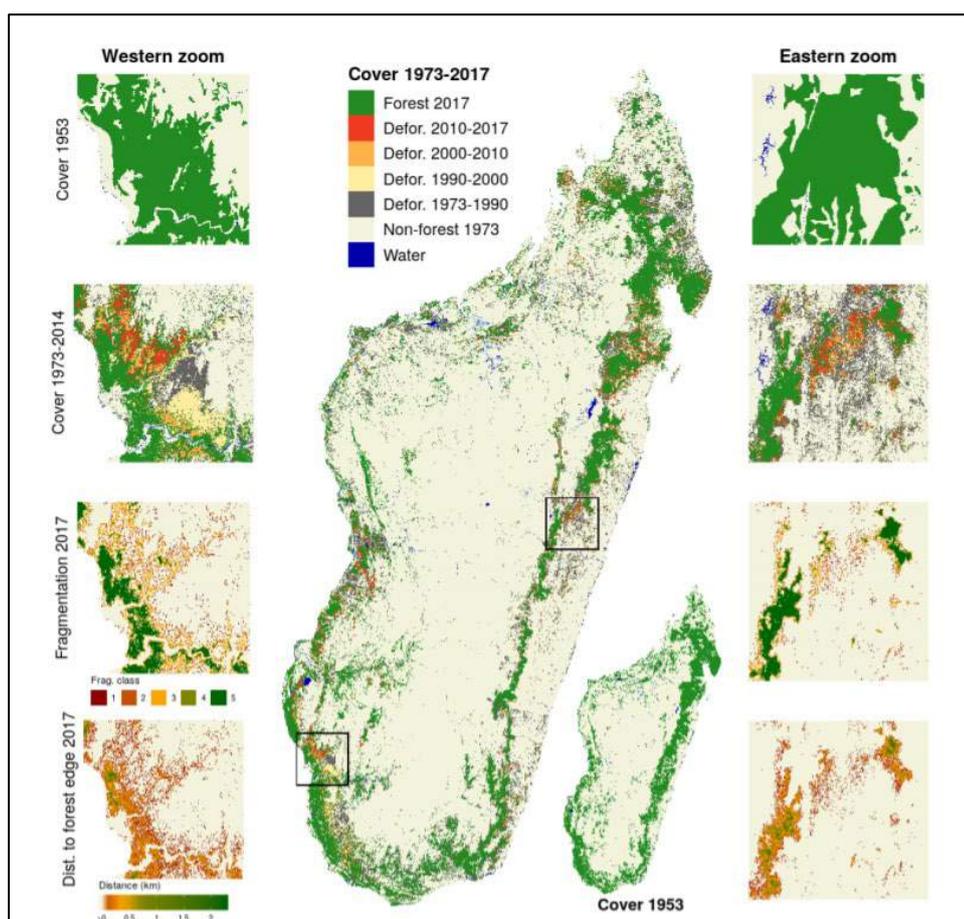


Figure 1 : Perte en couverture forestière de Madagascar de 1953 à 2017

Source : Vieilledent et al., 2018

II. Présentation de la zone d'étude

La présente étude s'insère dans le projet TLO ou Territoire Lemak'i Onilahy qui a commencé en 2019 dans le but de créer des réseaux entre les communautés locales de base gérant les forêts locales et les acteurs œuvrant dans la conservation de la biodiversité et la gestion des ressources naturelles dans cette partie de Madagascar afin de :

- Favoriser les partages d'expérience ;
- Consolider les relations entre les forces œuvrant dans la conservation de la biodiversité ;
- Étendre la vision par rapport à la conservation de la biodiversité ;
- Contrôler les infractions et les trafics illicites de la biodiversité sur une plus grande échelle.

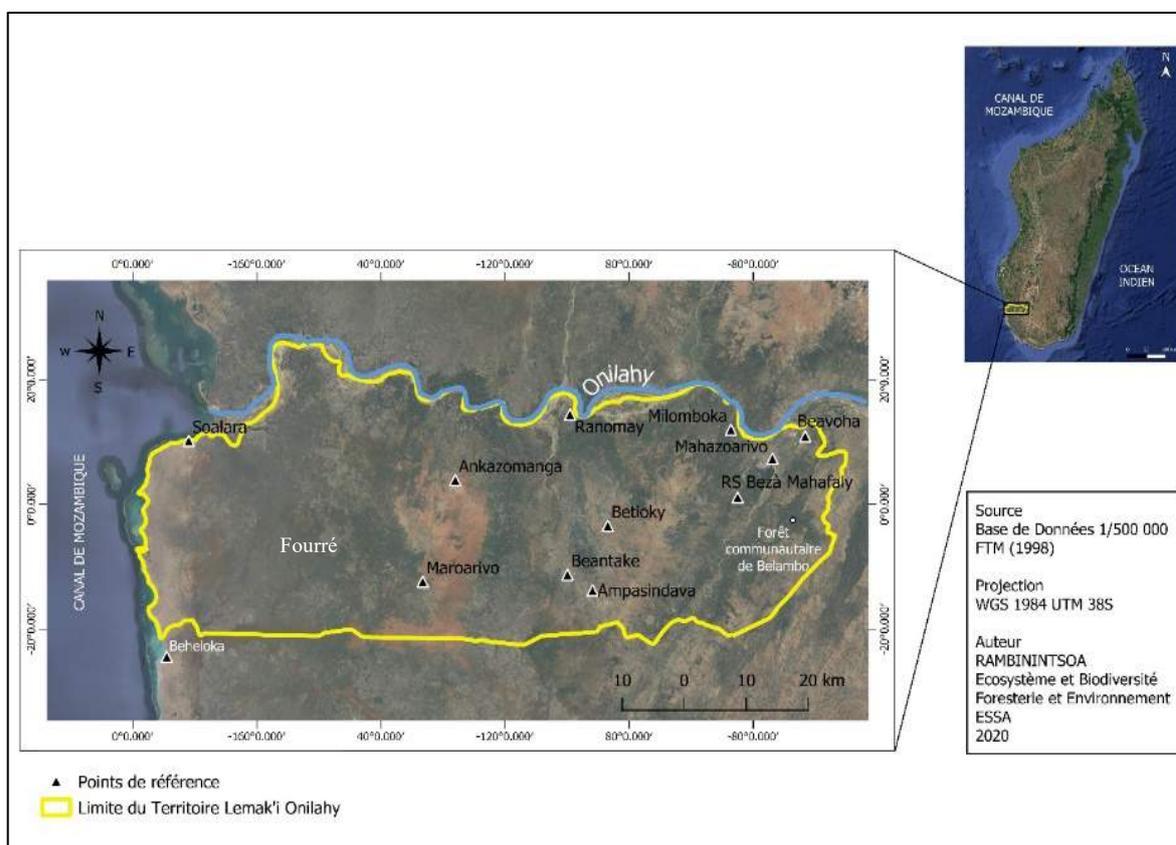
II.1. Situation géographique et cadre administratif

Le territoire du Lemak'i Onilahy se situe dans la Région Atsimo-Andrefana de Madagascar. Il couvre une surface de 3 980 km² au total, et est limité au Nord par le fleuve Onilahy, au Sud par la route

Introduction

vers Beheloka, à l'Est par la forêt communautaire de Belambo et à l'Ouest par le canal de Mozambique (Carte 1).

Du point de vue administratif, le TLO regroupe 14 communes réparties dans les Districts de Betioky-sud et de Toliara II à savoir : la commune d'Ankazomanga Ouest, de Maroarivo Ankazomanga, de Beantake, de Betioky, d'Antohabato, d'Ambatry Mitsinjo, d'Ankazombalala, de Sakamasay, d'Antanimena, de Manorofify, d'Ambolofotsy, de Soalara-Sud et d'Anakao.



Carte 1 : Localisation de la zone d'étude : Territoire Lemak'i Onilahy

III.2. Milieu physique

III.2.1. Le climat

Le climat dans le TLO est de type semi-aride, caractérisé par l'irrégularité et la rareté des précipitations (ANGAP, 1998). La semi-aridité dans cette zone est due principalement aux effets conjoints de la température élevée, de la présence du courant marin froid dans le canal de Mozambique et du vent parallèle à la côte ou le *Tiokatimo* (Damson, 2005).

Avec en moyenne une précipitation annuelle de 572.55 mm et une température annuelle de 24.55 °C (Service Météorologique, 2020), la zone d'étude présente un gradient pluviométrique allant du plus humide au plus sec, d'Est en Ouest, avec une courbe ombrothermique (Figure 2) qui montre la présence de deux saisons distinctes, dont la saison humide de Décembre au mois de Mars, et la saison sèche d'Avril au mois de Novembre.

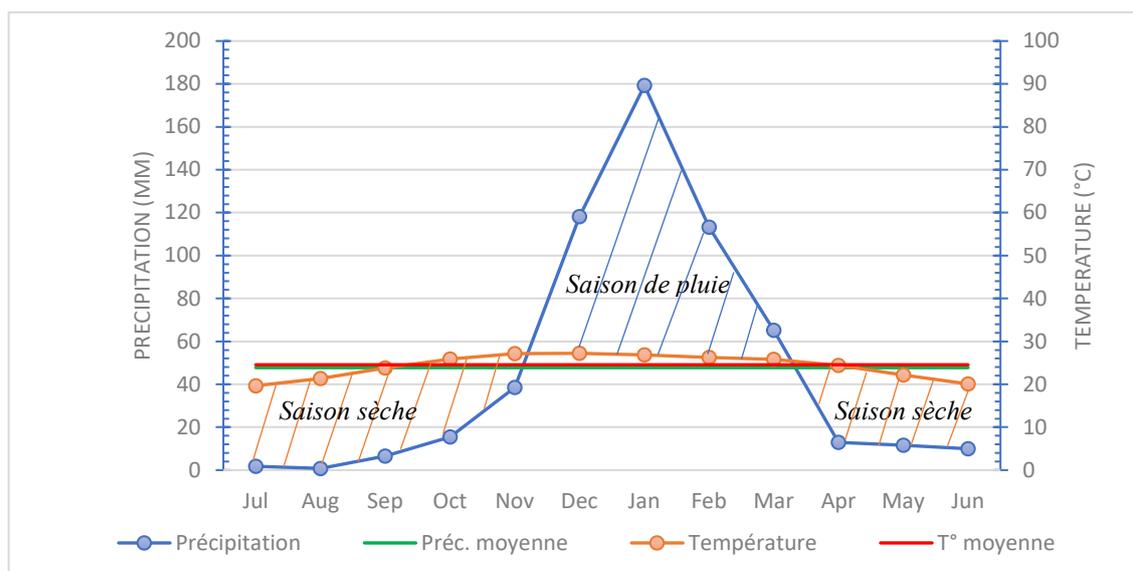


Figure 2 : Courbe ombrothermique dans le territoire du Lemak'i Onilahy

De façon générale, les saisons présentées par la courbe ombrothermique du TLO (Figure 2) sont identifiées à partir de l'interaction entre les courbes de la température et de la précipitation. Cependant, selon la perception des habitants, (Damson, 2005) la saison sèche se divise en deux. Ainsi, trois saisons se succèdent dans le TLO :

- **La saison de pluie appelée localement « Asara »**, entre le mois de Décembre et le mois de Mars. Elle débute avec des orages en Décembre, atteint son pic en Janvier et Février et commence à se dissiper en mois de Mars-Avril. Cette saison se caractérise par une température mensuelle de 27.6 °C en moyenne, dont la maximale est localisée en mois de Janvier (37,3°C) ; et une forte précipitation aux environs de 102.86 mm par mois ;
- **La saison sèche et fraîche ou « Asotry »**, d'Avril en Août, pendant laquelle une baisse de la température et des faibles précipitations sont observées. La température moyenne est de 22.27°C et la précipitation mensuelle moyenne aux alentours de 9.02 mm ;
- **La saison sèche et chaude ou « Afaosa »**, qui commence en Septembre et se termine en Novembre. Elle est caractérisée par la dominance du vent *Tiokatimo* avec une absence de pluie et une augmentation de la température qui vaut en moyenne 24.25 °C et peut atteindre 36,6°C. Pour les habitants du TLO, la saison sèche et chaude est la plus dure saison en termes de conditions climatiques pendant laquelle les tourbillons sont fréquents.

Comme la majorité des terrains cultivés dépendent de l'arrivée des pluies, la saison de pluie correspond à la saison de culture des habitants. Les activités liées à l'agriculture sont plus marquées pendant cette saison. Tandis qu'en saison sèche, les habitants s'orientent vers d'autres activités sources de revenus qui ne dépendent pas de la pluie comme l'exploitation de sels gemmes, les activités artisanales, les menuiseries entre autres. La pluie étant un facteur limitant pendant cette saison.

III.2.2. Hydrographie

Le réseau hydrographique du TLO est caractérisé au Nord par la présence du fleuve Onilahy, à l'Est, la rivière Sakamena qui longe la Réserve Spéciale de Bezà Mahafaly, la rivière de Ranomay et du lac Ranobe qui est étroitement lié au débordement occasionnel de l'Onilahy au moment des crues (FAO, 1990). Le niveau d'eau de ces rivières et lacs est en relation directe avec la saison de pluie. De plus, la géologie karstique de la zone d'étude favorise une infiltration rapide et en profondeur de l'eau de pluie (Guyot, 2002), ce qui oblige la population locale à creuser des points d'eau surtout pour la survie de leurs animaux d'élevage. Plus particulièrement, la partie Ouest du TLO est dominé par le plateau calcaire, rendant cette partie, bordée par la mer, plus vulnérable au manque d'eau surtout pendant la période sèche.

III.2.3. Le relief et type de sol

Le territoire du Lemak'i Onilahy est constitué principalement par des reliefs à basse altitude qui se trouvent le long du littoral, et des reliefs à moyenne altitude en allant de l'Ouest vers l'Est (CPGU, 2012). Appartenant à la zone écofloristique occidentale de basse altitude (Faramalala & Rajeriarison, 1999), il est dominé par des terrains à faible pente avec quelques zones montagneuses et collines observées.

Faisant partie du plateau calcaire de Mahafaly Sud de l'Onilahy, la zone d'étude peut être catégorisée en quatre selon la formation géologique et les types de sol existant dans cette partie (Besairie, 1972) à savoir :

- La zone côtière formée par des sols de nature dunaire et sableux peu évolués regroupant les sables roux et les sables beiges ;
- La zone de Karoo qui est constituée par des formations secondaires de l'Isalo et de Sakoa ;
- Le plateau calcaire qui est recouvert par une carapace calcaire plus ou moins altérée ;
- Le plateau de Betioky-Sud où se rencontre des sols ferrugineux issus de l'altération des grès ferrugineux indurés.

Outre ces types de sols, des sols alluvionnaires sont rencontrés au bord des rivières (Ratsirarson, 2003), et sont également appelés *baiboho*. Selon les bases de données du FTM ou *Foibe Taosaritanin'i Madagasikara*, de façon générale, les sols dans le TLO sont de type ferrugineux, fersiallitiques, sols minéraux bruts lithiques, sols peu évolués d'apport et sols peu évolués d'érosion, lithosols (Annexe 1). Les sols du TLO sont caractérisés de façon générale, par une faible teneur en matière organique, une sensibilité à l'érosion éolienne et hydrique et une faible rétention en eau.

III.2.4. Milieu biologique

III.2.4.1. Faune et flore

La partie Ouest de Madagascar, faisant partie de la région de la flore sous le vent d'après la classification proposée en 1921 par Perrier, subit l'influence des effets secs des alizés. En effet, la végétation dans la partie Sud-Ouest de Madagascar suit principalement le gradient de pluviométrie (Hervé *et al.*, 2015b) expliquant ses types de formations végétales : telles que la forêt galerie et la végétation xérophile de type fourré (Rejo Fienena, 1995, Raharinirina, 2009). Le principal type de végétation naturelle dans cette partie est la forêt décidue (Lowry *et al.*, 1998).

La basse vallée de l'Onilahy se distingue par ses multitudes de biotopes offrant des paysages exceptionnels. Cette dernière est caractérisée par des fourrés bas sur sables beiges à l'Ouest, au pied de la falaise Mahafaly, et à l'Est par des fourrés hauts sur dalle calcaire ou sur sables ferrugineux (Figure 3, Hervé *et al.*, 2015b) offrant une évolution remarquable du paysage depuis la côte jusqu'à l'intérieur des terres.

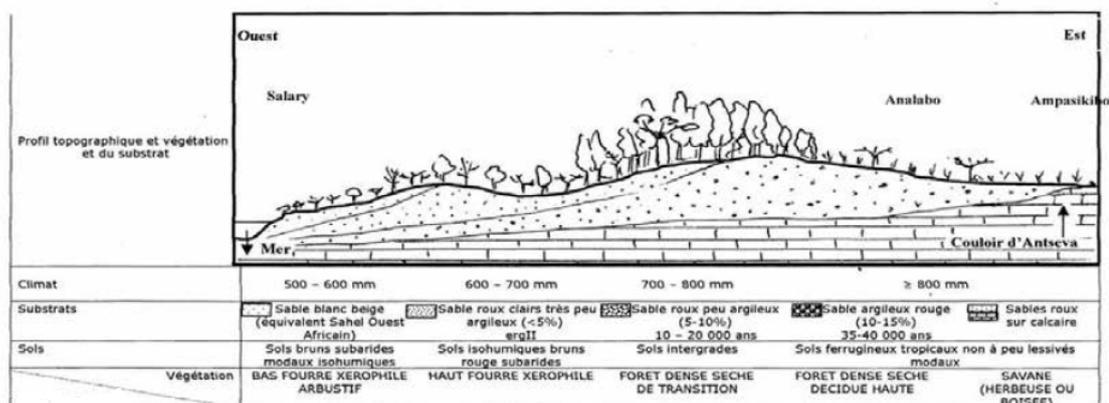


Figure 3 : Exemple de changement de la forêt sèche en fourré xérophile sur une faible distance dans la Forêt de Mikea (sud-ouest de Madagascar) (Razanaka, 1995)

La Région du Sud-Ouest possède des écosystèmes riches en biodiversité avec un taux d'endémicité élevé tant au niveau de la flore que de la faune (Koechlin *et al.*, 1974 ; Moat & Smith, 2007). Composé par des forêts sèches, des fourrés et des forêts galeries, le TLO abrite des familles endémiques d'arbres forestiers dont les Physenaceae et les Sphaerosepalaceae.

Les forêts denses sèches (Photo 1a) abritent un peuplement fermé pluristrate, de stature moins élevée que la forêt dense humide. La plupart des arbres des étages supérieurs perdent leur feuille et le sous-bois arbustif est soit sempervirent, soit décidu avec un tapis graminéen généralement discontinu (Trochain, 1957). Tandis que les fourrés xérophiles (Photo 1b) regroupent les formations végétales très dense, formée d'espèces arbustive de diverses tailles, imbriquées les unes dans les autres (Hervé *et al.*, 2015b). La forêt galerie (Photo 1c) regroupe les formations végétales qui longent les bords des cours d'eau (Perrier de la Bathie, 1921).

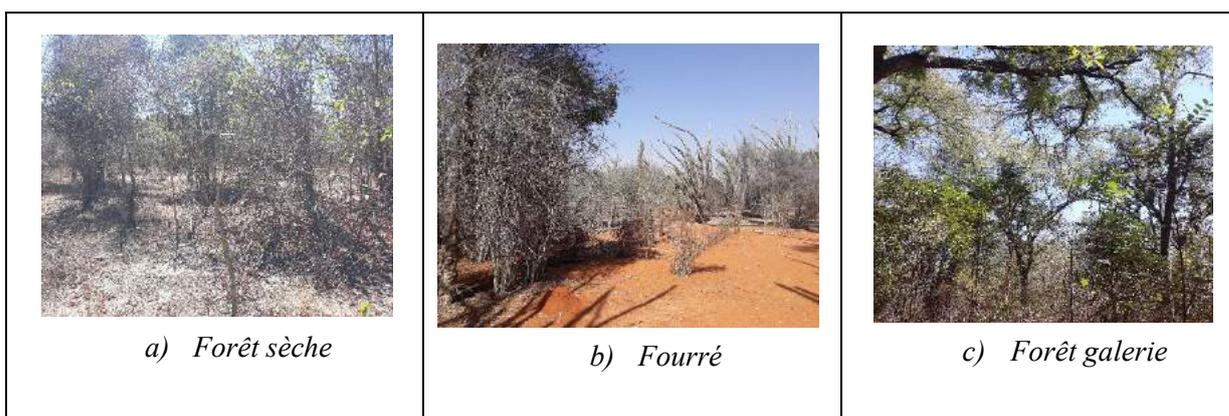


Photo 1 : Les types de forêts existant dans le TLO

Au niveau faunistique, l'intérêt écologique du TLO se justifie par sa richesse en diversité écosystémique et spécifique. En effet le TLO constitue l'habitat de plusieurs espèces endémiques (Sussman & Ratsirarson, 2007 ; Razafindraledy, 2018) entre autres :

- Les lémuriens comme *Propithecus verreauxi* (localement appelé « Sifaka ») (Photo 2a), *Lemur catta* (ou « Maki »), *Lepilemur leucopus*, *Microcebus griseorufus*, et *Cheirogaleus medius* ;
- Les reptiles et amphibiens comme *Oplurus cyclurus* (Photo 2b), *Leioheterodon geayi*, *Geochelone radiata*
- Les oiseaux comme *Aviceda madagascariensis* (Photo 2c) et *Coua gigas* ;

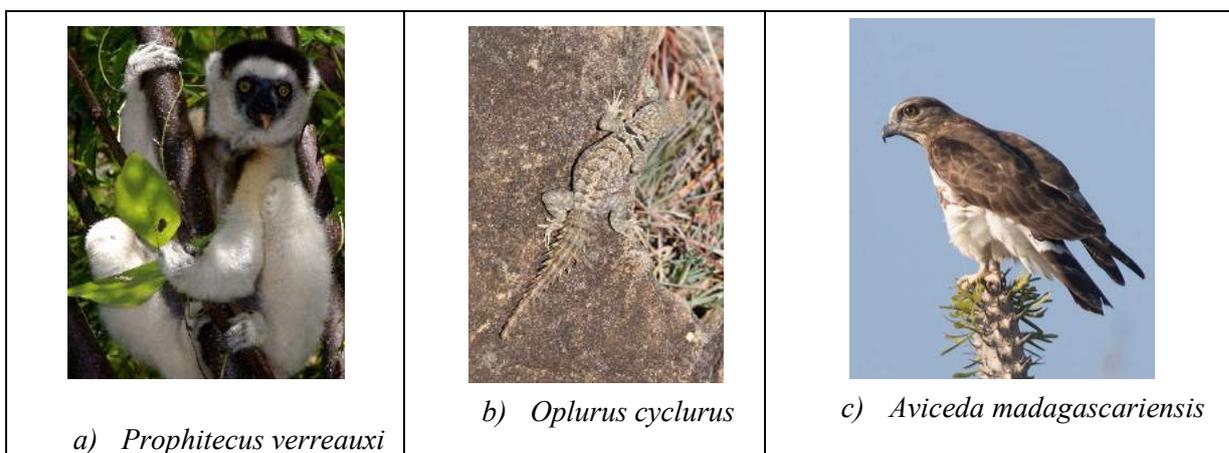


Photo 2 : Exemples d'espèces faunistiques endémiques dans le TLO

La richesse en espèces faunistiques et floristiques dans le TLO montre l'importance de la préservation et de la conservation des habitats et de la biodiversité dans le TLO.

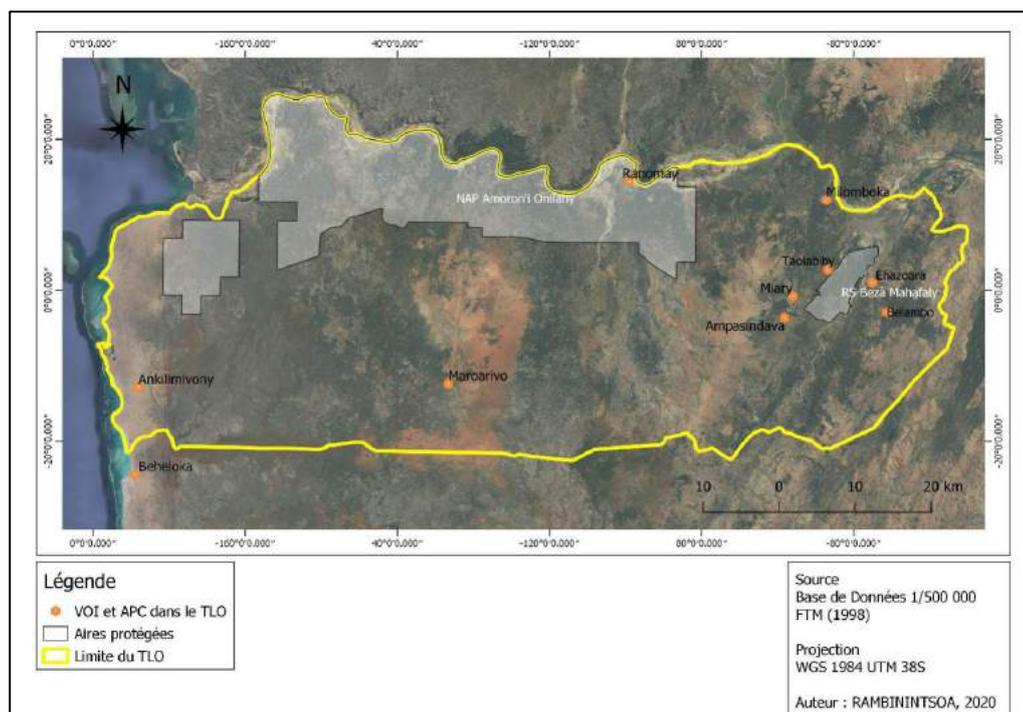
III.2.4.2. Gestion des ressources naturelles

La présence d'Aires Protégées (Réserve Spéciale de Bezà Mahafaly et la NAP Amoron'i Onilahy) et des forêts communautaires gérées par des VOI ou *Vondron'Olona Ifotony* ou COBA (communauté de base) dans le TLO (Carte 2) témoigne l'importance de la conservation de l'écosystème et des espèces y habitant.

La Réserve spéciale de Bezà Mahafaly a été créée et fondée par l'ESSA-Forêt depuis 1978, après l'accord avec le conseil populaire de la commune rurale d'Ankazombalala (actuellement, Beavoha) sur la gestion de deux parcelles de Bezà Mahafaly. Les deux parcelles en question ont formé et porté le titre de Réserve Spéciale en 1986 par le décret n°86-168. Par la suite, un programme de partenariat entre ESSA-Forêts, l'Université de Yale et la population riveraine de la Réserve a débuté depuis 1994, appuyé par la fondation Liz Claiborne/Art Ortenberg (Ratsirarson, 2003). La Réserve Spéciale de Bezà Mahafaly est actuellement gérée par MNP ou Madagascar National Parks. Le volet Education et Recherche est assuré par ESSA-Forêt (Rasamimanana, 2011). Elle est composée par une forêt galerie longeant la berge de la rivière Sakamena et une forêt xérophytique dominée par des espèces à forte adaptation à la saison sèche (Sussman & Ratsirarson, 2007). Avec l'appui des partenaires et l'accord avec la population locale, elle a récemment connu une extension en 2016, élevant sa superficie de 600 ha à 4 200 ha en totale.

La création de la NAP Amoron'i Onilahy a été initiée en 2005, suite à l'application du concept SAPM ou Système des Aires Protégées de Madagascar, bien que la zone ait été déjà classée parmi les aires prioritaires de conservation par WWF en 1998 et que des initiatives de transfert de gestion communautaire des ressources naturelles ont débutées depuis 1999. Après le dépôt de la demande de création de la NAP en 2006 (Razafindraledy, 2018), trois arrêtés interministériels se sont succédés en 2007, 2010 et 2013, relativement à une mise en protection temporaire, une mise en protection temporaire global et une amélioration du précédent. Actuellement, la NAP Amoron'i Onilahy couvre officiellement une superficie de 100 482 ha (Babarezoto, 2010), dont 74 248 ha dans le TLO. Elle est sous la gestion de l'association OPCI (Organisme Publique de Coopération Intercommunale) ou OHEMIHA (Onilahy Henany Mitambatse Handroso). La NAP Amoron'i Onilahy constitue l'une des écorégions les plus riches en diversité biologique de cette partie de Madagascar. En effet, divers écosystèmes terrestres comme la forêt dense sèche caducifoliée, la forêt galerie et les fourrés xérophytes (Velomila, 2001) sont rencontrés dans cette NAP.

L'extension de la conservation de la biodiversité à travers ces Aires Protégées a conduit également à la création de VOI régis par un accord entre leurs membres et les villageois afin de gérer et d'exploiter durablement les ressources forestières de chaque village dans le TLO. Les VOI et les associations qui gèrent les APC (Aires Protégées Communautaires) membres du TLO sont actuellement dix (10) dont APC Milomboka, APC Miary, VOI Ranomay, VOI Ampasindava, VOI Taolabiby, VOI Ehazoara, VOI Belambo, VOI Maroarivo, VOI Beheloka et VOI Ankilimivony. Ils ont été créés entre 2000 et 2017 (Annexe 2).



Carte 2 : Aires Protégées, VOI et APC dans le TLO

III.2.5. Milieu humain

Le résultat du dernier recensement (RGPH 3, 2019) a montré que le TLO compte environ 177300 habitants répartis inégalement dans 14 communes.

III.2.5.1. Historique des groupes ethniques

Historiquement, les premiers occupants du Sud de Madagascar seraient apparus vers le IX^{ème} siècle (Heurtebise, 1981). Les habitants du TLO proviennent de trois dynasties (Damson, 2005) dont le *Mahafaly*, le *Fiherenana* et l'*Ibara* qui dérivent respectivement des *Maroseranana*, des *Andranovelona* et des *Zafimanely*. Avec l'arrivée des migrants, les principales ethnies qui forment le TLO sont actuellement les *Mahafaly*, les *Tandroy*, les *Tanosy*, les *Tesaka*, les *Tambolo*, les *Vezo* et les *Tagnalana* (Behariva De Moussa, 2005 ; Laizy, 2012 ; Antsonantenainarivony, 2017). Ces deux dernières ethnies se localisent surtout dans la partie Ouest bordant la mer.

Avec l'arrivée des *Maroseranana* vers le XVI^{ème} siècle (Randriamamonjy, 2006), plusieurs clans se sont formés, agrandis avec le temps et colonisés progressivement de nouveaux domaines en ne vivant que par l'élevage des bovins, la cueillette et la chasse. Leurs principales activités sont conditionnées par l'eau et le sol, leur obligeant à adopter un mode de vie de semi-nomades. Par la suite, les migrants venant du sud ont commencé à peupler cette zone donnant place à une agriculture de subsistance à courte période culturale et dominance de l'élevage durant la moitié du XIX^{ème} siècle (Rakotomalala, 2008). Au temps de la colonisation, le système agraire s'est orienté vers la commercialisation à cause de l'instauration de l'impôt et l'essor démographique.

C'est à partir de l'indépendance que débute la polyculture en culture manuelle et attelée avec élevage associé. Or, Madagascar a connu d'énormes changements économiques, sociaux et politiques

marqués depuis 1975 (Casse *et al.*, 2004). Certains observateurs appellent la période 1975 à 1993 « un véritable borbier socio-économique et politique » (Gow, 1997). Dans la partie Sud-Ouest de Madagascar, cette situation se traduit par une migration accrue, du Sud vers le Nord, à partir du début des années 80, augmentant les besoins des habitants dans cette zone. Cette migration a été également accentuée par la sécheresse incitant les groupes ethniques de l'extrême Sud à se déplacer vers la direction Nord-Ouest (Casse *et al.*, 2004). En effet, du point de vue climatique, une étude a montré que la sécheresse dans la région Sud-Ouest de Madagascar a été cyclique avant 1980, mais depuis lors, elle est devenue presque chronique, les pires crises se situant en 1980-1985 et 1991–1992 (Rasamimanana, 2011). Cette situation est appuyée par une étude qui a montré que dans l'écosystème forestier du Sud-Ouest, la vitesse de la déforestation a quadruplé depuis la fin des années 1980 (Razanaka *et al.*, 2001).

III.2.5.2. Principaux moyens de subsistance de la population locale

Les principales activités des habitants du TLO restent, comme la majorité de la population de Madagascar, l'agriculture et l'élevage (Bernard, 1978). Les habitants bordant la mer, c'est-à-dire les *Vezo* se penchent vers la pêche, tandis que les habitants sur le plateau ont pour principales activités l'agriculture, l'élevage et les activités liées à l'utilisation des ressources forestières (Noromiarilanto, 2016).

Les pratiques d'élevage et d'agriculture diffèrent d'Est en Ouest : les habitants de l'Ouest se concentrent plus sur l'élevage surtout des petits ruminants, à cause de la rareté de la pluie par rapport à l'Est. Tandis que les habitants de l'Est se focalisent vers les activités agro-pastorales (Hosnah, 2013).

Les principales cultures rencontrées dans le TLO sont la culture de manioc (*Manihot esculenta*), une des cultures vivrières les plus cultivées, la culture de patate douce (*Ipomoea batatas*), la culture de maïs (*Zea mays*) et la riziculture (*Oriza sativa*). Généralement en association avec les tubercules, des légumineuses sont également plantées par les habitants, notamment les haricots, les niébés, les arachides entre autres.

Concernant l'élevage, il est actuellement de type semi-extensif avec une prédominance de l'élevage caprin. En effet, le nombre du cheptel bovin a considérablement diminué ces dernières années principalement à cause de l'insécurité (Randriamiary, 2015). L'élevage constitue l'épargne, la sécurité sociale et la source d'alimentation quotidienne des habitants (Kobbe *et al.*, 2015). Il permet à chaque ménage d'accomplir ses obligations sociales en cas de rituel dans la société tout en assurant leur survie en période de soudure.

D'autres activités sources de revenus sont rencontrées dans le TLO comme les petits commerces et les travaux journaliers comme le transport essentiellement par des charrettes. Ces dernières années, les activités commerciales qui consistent à collecter et à revendre les produits issus de l'agriculture, de l'élevage, de la forêt et même des PPN (sucre, café, huile, etc) ont connus un énorme essor dû à l'augmentation des besoins dans les grandes villes comme Toliara et Betioky. Par ailleurs, la fabrication de charbon de bois constitue pour les habitants une activité génératrice d'argent rapide.

METHODOLOGIE

I. Objectifs, problématiques et hypothèses

I.1. Objectifs de l'étude

Le principal objectif de la présente étude est d'analyser la dynamique spatiale des couvertures forestières dans le TLO entre 1989 et 2019.

Les objectifs spécifiques y correspondant sont : (i) analyser l'évolution dans le temps et dans l'espace des changements en composition et en configuration des différents types de couvertures forestières dans le TLO ; (ii) comparer la déforestation entre la partie Est et la partie Ouest du territoire Lemak'i Onilahy ayant des caractéristiques forestières différentes ; (iii) comparer la déforestation dans les Aires Protégées et les Aires non Protégées ; (iv) formuler des recommandations suite aux résultats de l'étude.

I.2. Problématique

Madagascar, un pays considéré comme « sanctuaire de la nature », montre une grande richesse en biodiversité avec un degré d'endémisme élevé (Primack & Ratsirarson 2005 ; Ratsirarson, 2011 ; Beech *et al.*, 2020). Réparties inégalement sur la surface de l'île, les différentes espèces floristiques et faunistiques varient selon les conditions climatiques et géographiques existantes. Au fil des années, cette richesse en biodiversité fait face à des menaces considérables au détriment des écosystèmes existants et de leurs éléments. D'après Chapin III *et al.*, (2000) et Mack *et al.*, (2000), la première cause de l'érosion de la biodiversité est la destruction des habitats due principalement à des changements globaux provoqués par les activités humaines.

Une perte importante de la surface des forêts sèches de Madagascar a été observée ces 50 dernières années (Beech *et al.*, 2020). Régulièrement soumises à des pressions liées à l'utilisation de la forêt par la population locale traduite par la conversion en terres agricoles, l'exploitation minière et l'extension des zones urbaines, les forêts sèches font partie de la liste rouge des écosystèmes en danger (IUCN, 2019). D'autant plus que, le dernier recensement dans la région Atsimo Andrefana a montré une hausse considérable de sa population par rapport aux autres régions (RGPH 3, 2019). Cette augmentation du nombre de la population, surtout ces dernières décennies, liée également au problème migratoire dans le Sud, constitue une menace pour la couverture forestière de cette partie de l'île.

Pour remédier à cette menace, la mise en place des Aires Protégées est pour Madagascar, un pilier de la politique de conservation (Desbureaux & Damania, 2018). Les rôles que tiennent ces Aires Protégées dans l'atténuation de la perte en forêt semblent être remis en question (Rasolofson *et al.*, 2015). La considération de la présence des différents acteurs dans la conservation, comme la NAP Amoron'i Onilahy, la RS Bezà Mahafaly et les VOI/APC, dans l'étude de la dynamique de la couverture forestière est importante afin d'évaluer leur rôle dans la réduction de la déforestation.

Les recherches dans la partie Sud-Ouest de Madagascar effectuées ces dernières décennies ont permis d'enrichir les connaissances sur la dynamique de la couverture végétale dans cette région. Il en est sorti plusieurs résultats dont : un taux de déforestation de 0,7% et de 1,9% respectivement entre les périodes 1989-2001 et 2001-2010 dans la commune de Betioky-Sud, affectant principalement les forêts sèches (Randriamalala *et al.*, 2015). Une déforestation plus marquée en 2001-2006 qu'en 2006-2010 et une diminution des surfaces en fourrés au profit des surfaces en savane, dans les communes de Betioky-Sud et de Soalara-Sud (Rakotovao *et al.*, 2015). Hervé *et al.*, (2015a) ont proposé trois modèles de transitions post-forestières de 1990 à 2010 pour les formations sèches avec des domaines de validité largement étendue, c'est-à-dire, valables pour la majorité de la partie Sud-Ouest de Madagascar, sur la base d'une observation de trois sites d'étude (le premier au Nord de Toliara, la forêt de Mikea ; et les deux autres au Sud de Toliara, dont les communes de Betioky-Sud et de Soalara-Sud). D'après leurs études, les principaux facteurs identifiés qui expliquent ces transformations sont l'agriculture sur brûlis (ou « *hatsake* ») et la production de charbon de bois.

Les études sur la dynamique de la couverture forestière dans le Sud-Ouest de Madagascar, effectuées depuis se limitent à des sites d'étude définis et sur une période jusque-là ne dépassant pas l'année 2015. Or, des pressions surtout sur les fourrés xérophiles ont augmenté ces dernières années et leurs causes que ce soit d'origine naturelle ou d'origine anthropique ne cessent de croître. Tels sont les cas par exemple de la demande de la ville de Toliara en charbon de bois qui augmente avec sa population (Gardner *et al.*, 2015) menaçant les fourrés des alentours dans un rayon de 40 km (Masezamana *et al.*, 2013) ; et de la demande accrue en bois des habitants de cette région (Razafindraledy, 2018).

A l'issue de ces problèmes, la question suivante se pose : « **Comment se manifeste la dynamique de la couverture forestière dans le Territoire du Lemak'i Onilahy pendant la période 1989-2019 (30 ans) ?** ».

I.3. Hypothèses

Pour répondre à la question de recherche ci-dessus, les hypothèses suivantes seront à vérifier :

- **Hypothèse 1** : *Les couvertures forestières tendent à disparaître dans le TLO au bénéfice des zones exploitées par les habitants.*

Vérifier cette hypothèse permettra de confirmer si ce sont uniquement ou partiellement les activités anthropiques qui engendrent la diminution des couvertures forestières. Une étude en 30 ans sur cette relation entre les activités effectuées par les habitants et la dégradation ou perte en couverture forestière permettra d'apporter des détails sur les raisons de la déforestation dans cette zone d'étude, et la part que prennent les Hommes sur ces processus de dégradation.

- **Hypothèse 2** : *La partie Est (constituée de forêts sèches) du TLO est plus touchée par la déforestation que la partie Ouest (constituée de fourrés).*

Compte tenu de la différence entre les types de forêts qui existent dans les différentes zones du Territoire du Lemak'i Onilahy, une comparaison de la déforestation entre ces différentes zones serait nécessaire. Les formes d'exploitations des forêts sèches (zone Est) pourraient être différents de celles des fourrés (dans la zone Ouest) suivant les espèces rencontrées dans ces types de forêts et leurs conditions environnementales.

- **Hypothèse 3** : *La présence des Aires Protégées réduit la perte en couvertures forestières dans le TLO.*

L'un des principaux objectifs de la mise en place des Aires Protégées consiste à réduire la dégradation des écosystèmes forestiers et la conservation de la biodiversité dans une zone. La présence des deux Aires Protégées dans le Territoire du Lemak'i Onilahy pourrait contribuer à réduire la déforestation dans les zones sous protection par rapport aux zones qui ne sont pas incluses dans les Aires Protégées.

II. Matériels et méthodes

Les méthodes utilisées par les études antérieures sur l'analyse de la dynamique de la couverture forestière (Rasoanaivo, 2017, Soloniaina, 2016 ; Ranaivonasy, 2012, Ratovoson, 2011 ; Hosnah, 2013) se résument par :

- Le traitement d'images satellites à différentes dates (trois en général), pendant lequel une descente préalable sur terrain a été effectuée afin de définir les échantillons d'apprentissage ;
- L'analyse de l'évolution des différentes classes d'occupation du sol en fonction de plusieurs paramètres explicatifs (facteurs climatiques, facteurs démographiques entre autres), vérification des informations sur terrain (recueil des informations auprès de la population locale ou des personnes ressources, relevés floristiques), vérification de la précision des cartes obtenues sur terrain, afin d'appuyer et d'expliquer les résultats issus de l'analyse de la dynamique de la couverture forestière.

Pour la présente étude, les étapes poursuivies consistent successivement à : (i) collecter d'abord les images satellites couvrant la zone d'étude pendant les six années de références (1989, 1995, 2001, 2007, 2013, 2019) ; (ii) traiter ces images satellites pour avoir les cartes d'occupation des sols ; et (iii) à analyser le changement en termes de couvertures forestières et déterminer le taux de déforestation dans la zone d'étude de 1989 à 2019.

II.1. Domaine d'étude : la géomatique

La géomatique, combinaison des mots géographie (« géo ») et informatique (« matique »), permet la représentation virtuelle, l'étude des interactions et la connaissance des phénomènes localisables afin d'anticiper leurs évolutions, de programmer les actions, et d'évaluer leur efficacité (Vanara *et al.*, 2014). Dans cette discipline, le principal outil utilisé est le SIG ou Système d'Information

Géographique. Il assure le traitement des informations contenues dans les bases de données, et notamment leur localisation automatisée et leur restitution multimodale, cartographique et statistique.

Dans le cadre de cette étude, l'utilisation de la télédétection et du SIG offre une possibilité de travailler sur des données multidimensionnelles (échelles, dates, couches/thématiques) spatialisées. En effet, la télédétection est une technique qui permet d'obtenir de l'information sur la Terre sans contact direct avec celui-ci. Elle regroupe tous les processus qui consistent à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique (lumière) émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information pour ensuite la mettre en application. Cette méthode permet de traduire la complexité qualitatifs et quantitatifs utiles à l'analyse de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation des sols dans le TLO.

II.2. Traitement des images satellites pour avoir les cartes d'occupation des sols

II.2.1. Collecte des images satellites Landsat par année de référence

II.2.1.1. Choix du référentiel temporel

Le référentiel temporel 1989-2019 a été choisi suivant la considération des facteurs socio-économiques et des facteurs climatiques. En effet, compte tenu des mouvements migratoires et de la sécheresse expliqués précédemment dans l'état de l'art (III.2.5.1), il a été jugé judicieux de commencer l'analyse de la dynamique spatiotemporelle de la couverture forestière dans le TLO en 1989, pour comprendre l'évolution du paysage après la migration, pendant les crises de sécheresse et surtout ces deux dernières décennies.

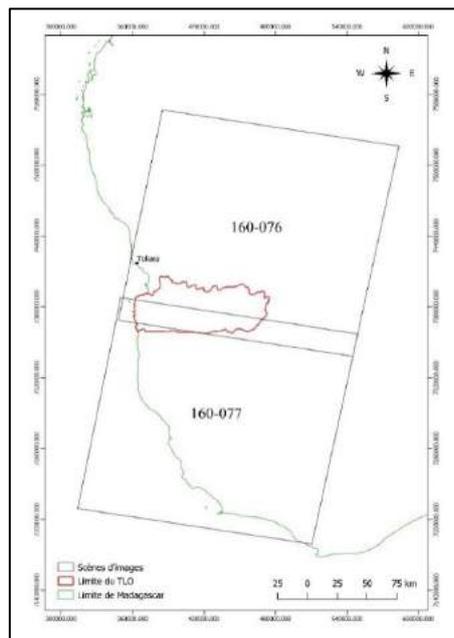
II.2.1.2. Les satellites Landsat

Avec les progrès connus par le programme Landsat depuis le lancement du premier satellite dans l'orbite vers les années 1972, les images Landsat ont été choisies pour l'analyse à effectuer dans le cadre de cette étude, grâce à leur accessibilité dans le site *Earth Explorer*¹. De 1972 en 2013, 7 satellites se sont succédés (Landsat 1 à 7). Le programme américain NASA dispose actuellement d'un Landsat 8 encore en orbite. Les dates auxquelles les images sont disponibles dépendent en conséquence des satellites de capture qui se sont succédés (Annexe 3).

II.2.1.3. Recouvrement de la zone d'étude

La zone d'étude se situe entre l'intersection de deux scènes d'images Landsat dont la scène 160-076 et la scène 160-077 (Carte 3). L'assemblage de ces deux scènes forment le *couple d'image* sur lequel ont été poursuivies les étapes pour l'élaboration des cartes d'occupation des sols. Afin de maximiser la précision des cartes obtenues, les deux scènes d'images par année de référence recouvrant la zone d'étude ont été prises autant que possible le même jour, selon la disponibilité des images dans le site.

¹ *Earth explorer*: site de l'USGS (United States Geological Survey) ouvert à tout public souhaitant obtenir des images de la Terre sur les types de données géospatiales disponibles, captées par des satellites.



Carte 3 : Les scènes de recouvrement de la zone d'étude

II.2.1.4. Les images satellites utilisées

Le référentiel temps étant entre 1989 et 2019. L'analyse a été effectuée en divisant ce référentiel temps en 6 années de références, à savoir 1989, 1995, 2001, 2007, 2013 et 2019. Ces années ont été choisies pour mieux situer les changements entre 1989 et 2019, et en raison de la disponibilité des images sur le site de *Earth explorer*, soumise aux deux conditions suivantes :

- Images ayant une densité de nuage inférieure à 10 % ;
- Disponibilité des images satellites de la saison humide et de la saison sèche de la même année pour détecter toutes les zones de culture pendant cette année. En effet, c'est pendant la saison sèche que les habitants ont tendance à coloniser d'autres surfaces pour élargir leur zone de culture. Pour identifier toutes les zones de culture pendant une année, les images pendant la saison sèche ont été considérées.

Depuis le mois de juin 2003, le Landsat 7 a connu une anomalie de fonctionnement due à une erreur au niveau du SLC ou *Scan Line Corrector*. Cette anomalie a conduit à un manque de données pour les images après le mois de juin 2003 (USGS, 2021). Les satellites utilisés pour le téléchargement des images ont été donc le Landsat 5 pour les images des années 1989, 1995, 2001 et 2007, et le Landsat 8 pour les années 2013 et 2019.

La résolution des images utilisées dans l'analyse est de 30 m x 30 m. Parmi les différentes qualités des résolutions existantes, cette résolution est la plus appropriée à une télédétection spatiale (Ratovoson, 2011) compte tenu des limites opérationnelles des images à très haute résolution (2,5 m x 2,5 m) et de la généralisation des réflexions des éléments de surface pour les images à très faible résolution (1 km x 1 km).

Pour la présente étude, 24 images ont été utilisées vue la nécessité de 2 scènes pour recouvrir la zone d'étude et la considération des saisons humides et sèche (Annexe 4). Les 24 images se répartissent en 2 dont 12 images pour la saison humide, de préférence entre Janvier et Mars selon la disponibilité des images dans le site et la densité des nuages ; et 12 images pour la saison sèche entre Août et Octobre.

II.2.2. Traitements des images satellites

Comme la présente étude vise à analyser la dynamique de la couverture forestière dans le TLO entre 1989 et 2019, il est nécessaire d'avoir les cartes d'occupation des sols par année de références considérée, avant d'analyser les changements par période et d'en tirer des conclusions sur les taux de déforestation dans la zone d'étude.

Pour obtenir les cartes d'occupation des sols, les principaux logiciels utilisés ont été des logiciels de traitements d'images satellites (Tableau 3) dont QGIS 3.10 *A coruna*, qui est la version la plus stable (le plus performant et présentant le moins de bugs) d'après les concepteurs ; ArcMap 10.5, une version récente et plus améliorée ; Google Earth Pro ; ENVI 5.3, une des dernières versions également.

Après le téléchargement des images satellites, plusieurs traitements ont été effectués avant d'obtenir les cartes d'occupation des sols à superposer pour analyser les changements. Par ailleurs, la précision des cartes doit également être calculée pour mesurer leur fiabilité par rapport à la réalité sur terrain. Les différentes étapes d'élaboration des cartes consistent d'abord à des traitements des images satellites ; un calcul de l'indice de séparabilité des classes et à une évaluation de la précision de la classification obtenue.

Le but des traitements des images satellites est de tirer des informations exploitables et mesurables pour faciliter l'analyse de l'évolution de la couverture forestière.

II.2.1.1. Prétraitement des images

Les images Landsat obtenues doivent passer par des corrections et des ajustements au niveau de la couleur détectée avant de passer par l'étape suivante. En effet, les premières images présentent des anomalies dues au système de prise d'images lié à la géométrie de la surface du globe, à la topographie, à l'atmosphère et à la modélisation du capteur. Cette dernière constitue un paramètre important à corriger pour augmenter la précision de l'image à traiter. Le prétraitement des **images vise ainsi à corriger les distorsions géométriques, radiométriques des plates-formes et des capteurs spécifiques et les déformations atmosphériques** (Bonn & Rochon, 1992). Il se résume par la calibration radiométrique, la correction atmosphérique et la mosaïque (Tableau 1 et 2), et s'est déroulé dans le logiciel ENVI 5.3.

- **Calibration radiométrique**

Le premier prétraitement sert à ajuster les anomalies liées au dérayage des capteurs utilisés par les satellites (Bannari *et al.*, 2007). Le but étant d'augmenter la fiabilité des informations données par les images. Cette étape vise à éliminer les radiances dues à l'atmosphère pour avoir la valeur de la radiation effective. Le modèle *radiometric calibration* dans ENVI a été utilisé pour cette première étape.

- **Correction atmosphérique**

Cette étape sert également à éliminer les effets de la modification des signaux causée par l'absorption par des gaz et la diffusion des aérosols et molécules présentes dans l'atmosphère. La fonction *Dark subtraction* a été employée pour la correction atmosphérique des images utilisées dans cette étude, de par sa simplicité d'utilisation. En effet, elle permet de soustraire la valeur minimum de chaque pixel, pour chaque bande afin d'augmenter la visibilité des autres couleurs de l'image.

Tableau 1 : Prétraitement des images satellites

Image de départ	Image après la calibration radiométrique	Image après la correction atmosphérique
		

- **Mosaïque et masque**

Comme la zone d'étude nécessite l'assemblage de deux scènes d'images, la fonction *seamless mosaic* dans ENVI a été utilisée pour mosaïquer les images géoréférencées en une seule image. Il permet d'appliquer un équilibrage des couleurs et un contour progressif pour créer une mosaïque de haute qualité. Suite à cet assemblage, le masque qui est la zone d'étude a été utilisée pour couper l'image obtenue et n'enregistrer que la région d'intérêt pour la suite du traitement des images.

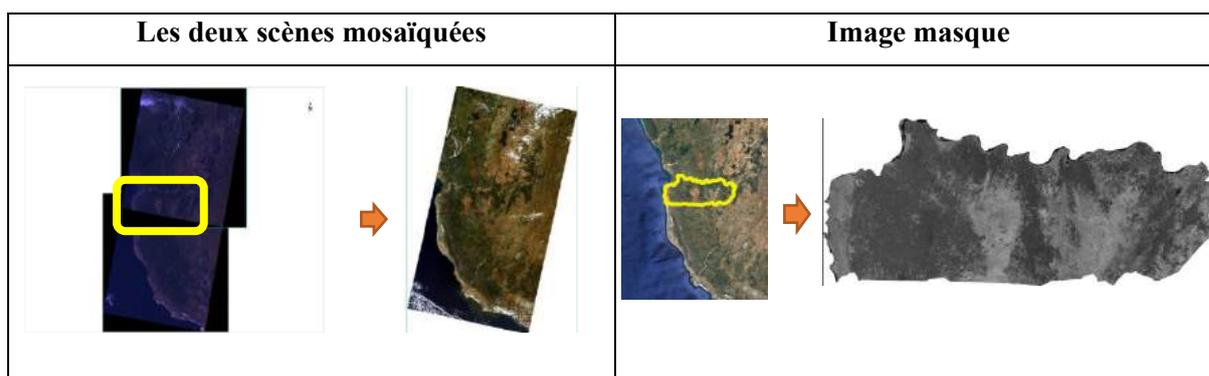


Figure 4 : Combinaison des deux scènes et extraction de la zone d'étude

II.2.1.2. Méthode de classification

Une fois les images prétraitées, elles peuvent entrer dans le cœur du traitement qui est la classification des images satellites. Elle consiste à associer les pixels d'une image en se basant sur leur signification thématique (Soloniaina, 2016). Il existe trois types de classification selon l'objectif d'étude envisagée, à savoir la classification non supervisée, la classification supervisée et la classification semi-supervisée.

- **La classification non-supervisée**

La classification non-supervisée est une classification qui rassemble les pixels d'une image en classes spectrales sans tenir compte de leur signification thématique (Richard & Jia, 2005 *in* Ratovoson, 2011). Ce type de classification se repose sur une attribution automatique de chaque pixel à une classe en se référant à sa signature spectrale. Pour générer la classification non-supervisée, ENVI dispose d'un algorithme ISODATA ou *Iterative Self-Organizing Data Analysis Technics*, une version améliorée de l'algorithme *k-means*. L'algorithme prend en compte différents critères pour attribuer une valeur à chaque pixel, à savoir le nombre minimal de classes spectrales souhaités (n_{min}) et le nombre d'itération qui varie en fonction de la qualité de la classification attendue. Pour le présent travail, le nombre minimal de classe a été de 25 pour séparer clairement les clusters (Figure 4a). La classification a nécessité 10 itérations pour favoriser la précision de la classification obtenue. La carte obtenue après cette classification est formée par des clusters qui sont des groupements de pixels ayant des similarités, répartis dans la zone d'étude. Une fois les classes définies par interprétation visuelle à l'aide de Google Earth, les clusters appartenant à la même classe ont été regroupés en 9 classes manuellement à l'aide de l'outil *reclassify* dans ArcMap (Figure 4b).

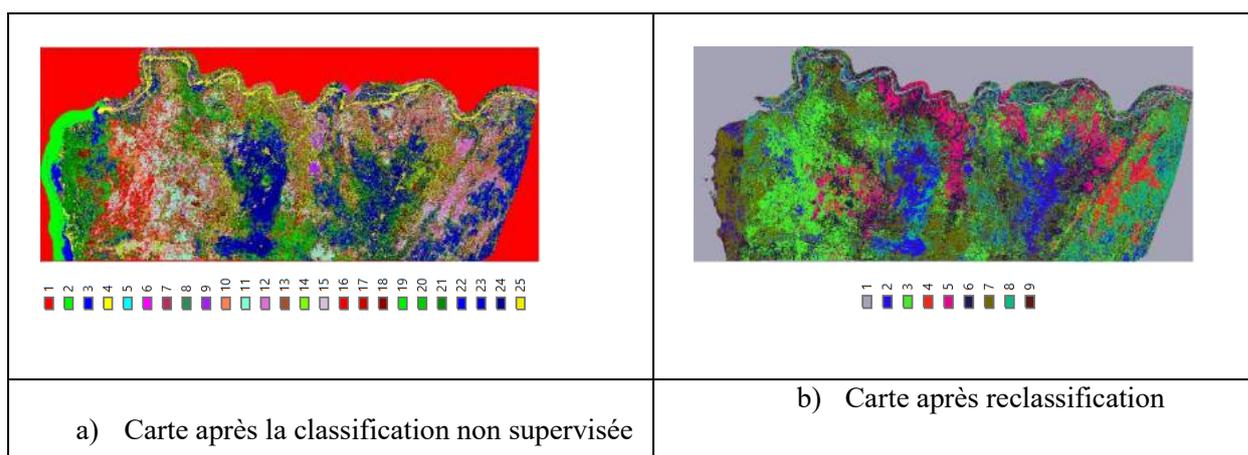


Figure 5 : Cartes obtenues après la classification non supervisée et la reclassification

- **La classification supervisée**

La classification supervisée vise à faire la correspondance entre les classes spectrales et les classes d'information. Également appelée classification dirigée, la classification supervisée est basée sur une connaissance préalable de la zone à cartographier (Rabenilala, 2011). Elle nécessite l'utilisation des échantillons d'apprentissage (appelés aussi zone d'entraînement) pour servir de guide à la classification.

Les zones d'entraînement marquées sur la carte après la classification non-supervisée ont été obtenues en utilisant l'outil *Point sampling tools* sur une grille de points distants de 1 km recouvrant la zone d'étude. La plausibilité d'appartenance de chaque point dans une classe qui lui a été attribuée automatiquement a été vérifié par appréciation visuelle en utilisant Google Earth Pro.

Après la vérification des points, l'outil *dzetsaka* dans le logiciel QGIS a été utilisé pour lancer la classification supervisée en utilisant les zones d'entraînement et l'image prétraitée au début du traitement. Parmi les méthodes proposées par cet outil, la méthode *Random forest* a été adoptée parce qu'elle montre de meilleurs résultats que les autres classifieurs (PAG, 2016). A la fin de cette phase, une carte d'occupation des sols est obtenue.

Pour la présente étude la classification semi-supervisée a été utilisée. Elle consiste à combiner la classification non-supervisée et la classification supervisée pour obtenir des résultats plus fiables et plus complets.

II.2.1.3. Traitement post-classification

Suite aux procédures de classification, certains pixels sont isolés, mal-classés voire non-classés donnant un aspect « pointilliste », source de gêne visuel, à l'image. D'où la nécessité des traitements post-classification qui consistent à généraliser l'agencement des pixels en se basant sur les classes d'appartenance des pixels voisins. Les outils utilisés dans les traitements post-classification sont des outils du logiciel ArcMap et sont résumés par les étapes suivantes :

- **Filtre majoritaire** : qui consiste à affecter un pixel isolé à la classe dominante au sein de laquelle il se situe. L'image analysée tient compte d'une fenêtre mobile de 4×4 ou 8×8 pixels pour déterminer la classe la plus représentée autour du pixel se trouvant au centre. Pour la présente étude la fenêtre de 8×8 pixels a été utilisée pour favoriser la précision de la carte ;
- **Lissage des bords** : qui est principalement utilisé pour nettoyer les bords irréguliers entre les zones. Il utilise une méthode d'expansion et de réduction qui nettoie les limites à une échelle relativement grande. Les zones de priorité plus élevée envahissent leurs zones voisines de priorité inférieure. La plus petite zone considérée étant formée par 3 pixels alignés ;
- **Élimination des zones minimales** : qui se résume par l'utilisation de l'outil (i) *Region group*, pour attribuer à l'ensemble des cellules avec des particularités similaires, appelé région une valeur unique ; (ii) *Set null*, qui donne une valeur 0 à toutes les régions ayant une valeur inférieure à un nombre prédéfini par l'analyste.
- **La finalisation** : qui consiste à remplacer les cellules d'un raster correspondant à un masque par les valeurs des voisins les plus proches. Cette dernière étape utilise l'outil *Nibble* dans le logiciel ArcMap.

Suite à cette phase, les cartes d'occupation des sols des six années de référence ont été obtenues et disposées à être analysées.

II.2.1.4. Résumé des méthodes

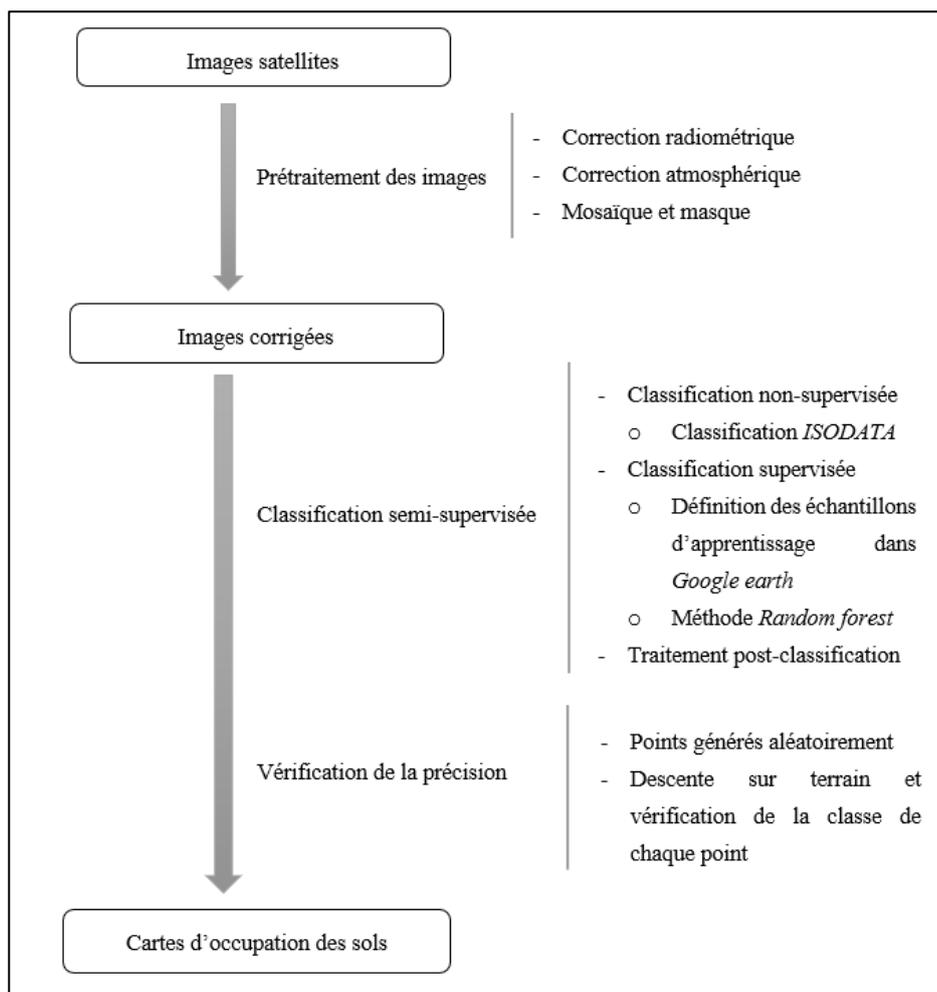


Figure 6 : Etapes d'élaboration d'une carte d'occupation des sols

Tableau 2 : Logiciels utilisés dans l'étude

Logiciels	Principales utilisations dans l'étude
ENVI 5.3	<ul style="list-style-type: none"> • Prétraitement des images satellites • Lancement de la classification non supervisée
ArcMap 10.5	<ul style="list-style-type: none"> • Reclassification des classes identifiées après la classification non supervisée • Découpage des images • Mise en forme des cartes
QGIS 3.10 <i>A coruna</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Création des points de vérification pour la classification supervisée • Lancement de la classification supervisée
Google Earth Pro	<ul style="list-style-type: none"> • Définition des points de références pour la classification supervisée • Vérification des points de validation de la classification obtenue

II.2.1.5. Indice de séparabilité

L'indice de séparabilité est un indice spectrale calculé pour mesurer la différenciation entre les classes (Soumana, 1999). Le logiciel ENVI utilise deux modules pour calculer l'indice, à savoir *Jeffries-Matusita* et *Transformed Divergence*. Le principe de calcul de l'indice repose sur la mesure de la distance de Bhattacharya reliée directement à la probabilité d'erreur de classification dans la méthode bayésienne (Pratt, 1991). Sa valeur varie de 0 à 2, dont une valeur supérieure à 1,90 montre une bonne séparation entre deux (2) classes.

II.2.3. Evaluation de la précision de la carte d'occupation des sols

Les cartes d'occupation des sols obtenues doivent être soumises à des vérifications pour apprécier leur rapprochement à la réalité. Pour ce faire une observation directe à partir d'une descente sur terrain a été réalisée.

II.2.3.1. Descente sur terrain

Les objectifs de la descente sur terrain consistent à évaluer la précision de la classification obtenue par rapport à la réalité sur terrain, et à rassembler le maximum d'informations pouvant expliquer la dynamique de la couverture forestière auprès des personnes ressources dans les villages, qui composent le TLO. Afin d'optimiser le temps, 6 villages dont Ankilimivony, Maroarivo, Ranomay, Milomboka, Miary et ceux aux alentours de la Réserve de Bezà Mahafaly ont été concernés par l'évaluation et en parallèle par la collecte d'informations.

a. Evaluation de la précision de la classification obtenue

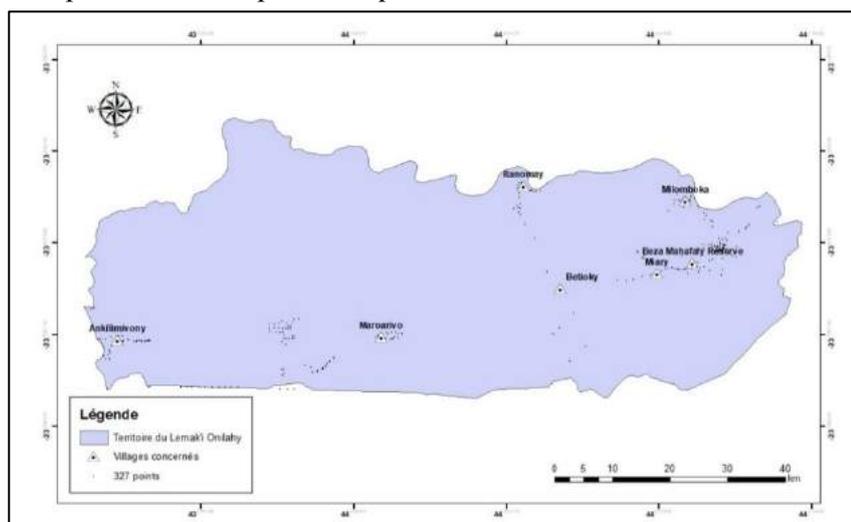
Pour évaluer la précision de la classification obtenue, la carte d'occupation des sols en 2019 a été utilisée comme référence pour être comparée avec la réalité sur terrain puisque c'est la carte la plus récente. Au total, 327 points ont pu être vérifiés (Carte 4) pour l'évaluation de la précision de la classification obtenue. Une équipe sur terrain a également contribué à cette vérification, guidée par un protocole préalablement établi (Annexe 5), afin d'améliorer l'évaluation de la précision de la classification obtenue.

b. Collecte d'informations auprès de la population locale

Pour collecter les informations auprès de la population locale, une enquête a été réalisée. Elle a été menée sous forme d'entretien semi-dirigé et de focus groupe (Photo 3). Le premier consiste à aborder une personne de manière à la fois ouverte mais guidée par des questions précises pour laisser la personne parler ouvertement (Quivy & Van Campenhoudt, 1995). Le focus groupe suit le même principe que l'entretien individuel semi-directif (Baribeau & Germain, 2010) sauf qu'il inclut plusieurs personnes autour d'un débat ou d'un sujet précis guidé par des questions préalablement préparées. A travers ces

Matériels et méthodes

types d'approches, les informations obtenues lors de l'enquête ont été plus facile à trier au niveau de la fiabilité des réponses données par les enquêtés.



Carte 4 : Localisation des points de vérification pour évaluer la précision de la classification



Photo 3 : Entretien auprès de la population locale

II.2.3.2. Méthode d'évaluation de la précision

La matrice de confusion et l'indice de Kappa ont été utilisés pour l'évaluation, en prenant comme référence les 327 points générés aléatoirement et vérifiés sur terrain.

a. Matrice de confusion

La matrice de confusion est utilisée pour apprécier statistiquement la précision des cartes obtenues après la classification. Il s'agit d'un tableau à double entrée, avec **les lignes représentant la carte obtenue suite à la classification**, et **les colonnes la réalité sur terrain**. Les résultats de ce tableau donnent une matrice dans laquelle est montrée la précision globale. La précision globale permet d'évaluer la proportion de pixels de l'échantillon correctement classifiés par rapport à la totalité de l'échantillon utilisé dans la validation (Hagen, 2002 *in* Ratovoson, 2011). Elle tient compte des erreurs d'omission et de commission.

L'erreur d'omission est le rapport entre le nombre de pixels correctement classifiés et le nombre total de pixels de cette classe selon les données de référence. Autrement dit, elle indique la probabilité d'un pixel des données à être bien classé (Jensen, 1996 *in* Ratovoson, 2011). Tandis que l'erreur de

Matériels et méthodes

commission est générée lorsqu'un pixel est incorrectement attribué à une classe, c'est-à-dire, il appartient en réalité à une autre classe.

Un exemple de matrice de confusion est montré ci-dessous afin de faciliter la lecture et la compréhension de l'interprétation des résultats (Tableau 4) avec :

- x_{11} : Nombre de points correctement classifiés dans la classe 1.
- x_{21} : Nombre de points classés dans la classe 2 alors qu'en réalité (sur terrain), ils appartiennent à la classe 1.
- T : Nombre total de points.
- C_i (%) : erreur de commission pour chaque classe
- O_i (%) l'erreur d'omission pour chaque classe

La précision globale de la classification est donnée par la formule ci-après (1).

$$\bullet \text{ Précision globale (\%)} = \frac{(x_{11} + x_{22} + x_{33})}{T} \times 100 \quad (1)$$

Plus la valeur de la précision globale est élevée, plus la classification se rapproche de la réalité.

Tableau 3 : Explication de la matrice de confusion

Classification	Points de contrôle			Total	Erreur de commission (%)	Précision
	Classe 1	Classe 2	Classe 3			
Classe 1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	$t_1 = \sum x_{1n}$	$C_1 (\%) = 100 - P_1$	$P_1 = \left(\frac{x_{11}}{t_1}\right) \times 100$
Classe 2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	$t_2 = \sum x_{2n}$	$C_2 (\%) = 100 - P_2$	$P_2 = \left(\frac{x_{22}}{t_2}\right) \times 100$
Classe 3	x_{31}	x_{32}	x_{33}	$t_3 = \sum x_{3n}$	$C_3 (\%) = 100 - P_3$	$P_3 = \left(\frac{x_{33}}{t_3}\right) \times 100$
Total	$s_1 = \sum x_{n1}$	$s_2 = \sum x_{n2}$	$s_3 = \sum x_{n3}$	$T = \sum t_i$ $= \sum s_i$	-	-
Erreur d'omission (%)	$O_1 (\%) = 100 - \left(\frac{x_{11}}{s_1}\right) \times 100$	$O_2 (\%) = 100 - \left(\frac{x_{22}}{s_2}\right) \times 100$	$O_3 (\%) = 100 - \left(\frac{x_{33}}{s_3}\right) \times 100$	-	-	

Par ailleurs, afin de vérifier rigoureusement l'exactitude de la classification, c'est-à-dire, la précision globale, un seuil doit être défini. Il permet de déterminer à partir de quelle valeur la précision est acceptable. Pour ce faire, l'indice de Kappa a été utilisé.

b. Indice de Kappa

L'indice de Kappa offre une évaluation globale de la précision de la classification. La validation des cartes d'occupation des sols par l'indice de Kappa correspond au rapport entre les pixels bien classés et le total des pixels sondés. Autrement dit, il tient compte des erreurs en lignes et des erreurs en colonnes données par la matrice de confusion. L'indice de Kappa exprime la réduction proportionnelle de l'erreur obtenue par une classification, comparée à l'erreur obtenue par une classification au hasard (2). Pratiquement, une valeur d'un indice de Kappa 0,7 signifie que 70% des classes correctement classées ne sont pas dus au hasard.

$$K = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c} \quad (2)$$

Avec P_o : proportion de pixels de bonne classification observée, elle est égale à la somme des proportions diagonales (correctement classé) : c'est la précision globale.

P_c : proportion de pixels de bonne classification dus au hasard, elle correspond à la somme des proportions marginales de lignes et des colonnes.

La classification de l'occupation des sols est valable et donc utilisable lorsque l'évaluation de l'indice de Kappa a donné une valeur comprise entre 50 et 75% (Pontius, 2000). Tandis que Landis et Koch (1977) a établi des intervalles qui évaluent le niveau de précision (Tableau 5). Les valeurs sont divisées en cinq, dont les valeurs supérieures ou égales à 0,81 montrent un excellent degré de précision et les valeurs inférieures à 0,2 un degré de précision très médiocre.

Tableau 4 : Signification des valeurs de l'indice de Kappa

Valeur de l'indice de Kappa	Degré de précision
Supérieur ou égal à 0,81	Excellent
Entre 0,61 et 0,80	Bon
Entre 0,21 et 0,6	Modéré
Entre 0 et 0,2	Mauvais
Inférieur à 0	Très mauvais

Source : Landis & Koch, 1977

II.3. Analyse de la dynamique de la couverture forestière dans le TLO

II.3.1. Détection des changements pour l'analyse de la dynamique de la couverture forestière

La détection des changements d'occupation des sols consiste à mesurer et à localiser les modifications apportées par les gains et les pertes en surface de chaque classe dans la zone étudiée pendant une période considérée. Le logiciel utilisé pour cette étape a été le logiciel Idrisi *Selva* en utilisant des outils et des modules d'analyse spatio-temporelle des changements d'occupation des sols pour l'analyse de la dynamique de la couverture forestière.

Pour détecter les changements, la matrice de transition qui mesure la conversion d'une classe à une autre entre deux dates a été utilisée. La matrice de transition constitue un moyen d'appréciation simple et rapide de la dynamique d'occupation des sols. En effet, elle se traduit par un tableau à double entré (Tableau 6) qui condense les changements d'états des pixels d'une classe à une autre entre deux dates. Pour générer la matrice de transition, le module *Crosstab* du logiciel Idrisi a été utilisé.

Tableau 5 : Exemple de matrice de transition (%)

		Année 1				
		Classe 1	Classe 2	...	Classe i	Total
Année 2	Classe 1	$x_{11} (Cl1 \rightarrow Cl1)$	$x_{21} (Cl2 \rightarrow Cl1)$		$x_{i1} (Cli \rightarrow Cl1)$	$\sum x_{n1}$
	Classe 2	$x_{12} (Cl1 \rightarrow Cl2)$	$x_{22} (Cl2 \rightarrow Cl2)$		$x_{i2} (Cli \rightarrow Cl2)$	$\sum x_{n2}$
					
	Classe i	$x_{1i} (Cl1 \rightarrow Cli)$	$x_{2i} (Cl2 \rightarrow Cli)$		$x_{ii} (Cli \rightarrow Cli)$	$\sum x_{ni}$
	Total	$\sum x_{1n}$	$\sum x_{2n}$		$\sum x_{in}$	$\sum x_{nn}$ = 100

Cl : Classe

Comme la matrice montre les changements observés par classe pendant une période, les pixels se trouvant sur les diagonales du tableau sont restés dans les mêmes classes de l'année n à l'année n+1. Les autres cellules montrent ainsi les changements observés dans les classes.

II.3.2. Analyse des changements d'occupations des sols

II.3.2.1. Analyse de la relation entre la déforestation et l'augmentation en surface des surfaces exploitées par les habitants

Afin d'apprécier le degré de relation entre la disparition des forêts dans le territoire Lemak'i Onilahy et l'augmentation de la surface exploitées par les habitants, qui se manifeste par l'augmentation des zones de culture, des savanes arborées, des classes de forêts dégradées, la matrice de transition permet de situer les pertes et les gains de chaque classe.

II.3.2.2. Analyse du taux de déforestation annuel entre l'Est et l'Ouest

A partir des données recueillies sur la détection des changements d'occupation des sols, des analyses sur le taux de déforestation par période ont été effectuées pour comparer la déforestation des couvertures forestières dans le TLO entre l'Est et l'Ouest. Le taux de déforestation annuel (3) étant le rapport entre la surface défrichée sur une période, divisée par la surface forestière initiale, et par le nombre d'années de la période (Narendra Prasad *et al.*, 1998).

$$\text{Taux de déforestation (\%)} = \left(\frac{s_{a_n} - s_{a_{n+1}}}{s_{a_n}} \times \frac{1}{(s_{a_{n+1}} - s_{a_n}) + 1} \right) \times 100 \quad (3)$$

Avec

- s_{a_n} : la surface de forêt pendant l'année n
- $s_{a_{n+1}}$: la surface de forêt pendant l'année suivante de l'étude $n + 1$

Pour mesurer la différence entre le taux de déforestation de l'Est par rapport à celui de l'Ouest, les taux de déforestation par période des forêts sèches, représentant les forêts de l'Est, et des fourrés, représentant l'Ouest, ont été comparés.

II.3.3. Analyse du rôle des Aires Protégées dans la réduction de la déforestation

Afin d'atteindre le troisième objectif spécifique, les 9 classes ont été regroupées en deux classes en utilisant l'outil *reclassify* dans ArcMap, pour ne garder que les surfaces des forêts et celles des non forêts. Les données sur la superficie des forêts dans les Aires Protégées du TLO ont été également nécessaires. La délimitation des AP en question, dont la NAP Amoron'i Onilahy et la RS Bezà Mahafaly vient de la base de données BD 500. L'outil *Extract by Mask* dans ArcGIS a été par la suite utilisé pour diviser le TLO en deux : (i) les surfaces protégées (AP) ; (ii) les surfaces hors protection.

Pour finir, les taux de déforestation dans les AP et hors des AP ont été comparés pour mesurer l'efficacité de la politique de conservation dans les Aires Protégées. Comme les deux Aires Protégées ont été créées à différentes dates, la superficie des forêts protégées est différente selon deux périodes définies par l'étude. La première entre 1989 et 2007, période pendant laquelle seulement la Réserve Spéciale Bezà Mahafaly a été considérée comme Aire Protégée ; et la deuxième entre 2007 et 2019, après la création officielle de la NAP Amoron'i Onilahy en 2006, pendant cette période, la Réserve et la NAP ont été considérées comme Aires Protégées.

III. Limites de l'étude

La réalisation de cette étude a connu certaines limites au niveau de la collecte des données. Sur les données climatiques, des demandes auprès des institutions locales comme le IFVM ou Centre de

Matériels et méthodes

lutte antiacridienne de Madagascar à Betioky-Atsimo et le service de la météorologie Ampandrianomby ont été déposées. Cependant, seules les données du service de la météorologie ont été obtenues et utilisées pour l'étude. Les données climatiques utilisées dans le présent travail sont issues de la station de Toliara, qui est la station représentative de la partie Sud-Ouest de Madagascar.

Pendant la descente sur terrain, l'inaccessibilité de certaines parties dans le TLO a rendu difficile la vérification des points de contrôle pour évaluer la précision de la classification. Cette situation a été réglée en effectuant des appréciations au loin et des prises de photos sur les points en question.

IV. Cadre opératoire

Tableau 6 : Cadre opératoire de l'étude

Problématique	Hypothèses	Indicateurs	Méthodes
Comment se manifeste la dynamique de la couverture forestière dans le Territoire du Lemak'i Onilahy pendant la période 1989-2019 (30 ans) ?	H1 : Les couvertures forestières tendent à disparaître dans le TLO au bénéfice des zones exploitées par les habitants.	- Superficie des couvertures forestières par année de référence	Cartographie de l'occupation des sols
		- Superficie des autres classes par année de référence	Détection des changements de l'occupation des sols
			Etablissement de la matrice de transition
	H2 : La partie Est (constituée de forêts sèches) du TLO est plus touchée par la déforestation que la partie Ouest (constituée de fourrés).	- Superficie des forêts sèches et des fourrés par année de référence	Cartographie de l'occupation des sols
		- Taux de déforestation	Détection des changements de l'occupation des sols
			Calcul des taux de déforestation des forêts sèches et des fourrés
	H3 : La présence des Aires Protégées réduit la perte en couvertures forestières dans le TLO.	- Superficie des couvertures forestières à l'intérieur et à l'extérieur des AP par année de référence	Extraction des données sur la surface des forêts dans les Aires Protégées par année d'étude
		- Taux de déforestation	Comparaison des taux de déforestation dans les Aires Protégées et les aires hors protection

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

I. Caractérisation de la classification

I.1. Description des différentes classes d'occupation des sols retenues

Compte tenu des types de végétation rencontrés et de l'objectif de l'analyse, neuf (9) classes ont été retenues pour la suite de l'étude, à savoir : zone humide (ZH), forêt galerie (FG), forêt sèche (FS), fourré (F), forêt sèche dégradée (FSD), fourré dégradé (FD), savane arborée (SA), zone de culture (ZC), savane herbeuse (SH). Le choix des classes et leur appellation ont été dictés par la classification établie par le FAO (2018), basée sur les types de végétation existant à Madagascar. L'identification des classes par les satellites s'est référée à partir de leur signature spectrale, définie selon le type d'occupation du sol rencontré sur chaque surface (UVED, 2021).

I.1.1. La classe « zone humide » (ZH)

La classe « zone humide » regroupe toutes les surfaces d'eau naturelle, de surface, mouvante, permanente ou saisonnière comme le fleuve, les rivières, les lacs, la mer. Cette classe concerne le fleuve Onilahy qui est la limite Nord du TLO, la rivière Sakamena à l'Est, la rivière de Ranomay, le lac Ranobe et les bordures de la mer à l'Ouest. Des mangroves sont localisées sur la côte Ouest, mais leur surface est négligeable. Elles ont été alors incluses dans la classe « zone humide ».

L'eau a une réflectance très faible dans toutes les longueurs d'onde. Sa signature spectrale dépend de plusieurs paramètres comme les molécules qui la constituent et les éléments dissous ou en suspension dans la colonne d'eau. Généralement, la classe « zone humide » est caractérisée par une faible réflectance (une réflectance inférieure à 20% et une longueur d'onde inférieure à 0,7 μm) dans le domaine du visible, permettant de la différencier aux autres classes d'occupation du sol ayant une réflectance plus élevée.

I.1.2. La classe « forêt galerie » (FG)

La « forêt galerie » se définit comme étant la formation végétale qui longe les bords des cours d'eau. Elle est caractérisée par l'aspect sempervirent et pluristratifié, marquée par la hauteur des arbres. La couverture de la forêt galerie est comprise entre 30 et 80 %. La classe « forêt galerie » concerne essentiellement la forêt qui longe la rivière Sakamena, une forêt faisant partie de la Réserve Spéciale de Bezà Mahafaly ; et la forêt qui longe le fleuve Onilahy dans la NAP Amoron'i Onilahy.

Comme la forêt galerie est constituée par un peuplement d'arbres sempervirents, leurs feuilles sont caractérisées par une forte teneur en pigments, maximisant les activités chlorophylliennes. Cette forte teneur en pigments est responsable de la forte absorption du rayonnement visible avec un maximum de relatif de réflectance autour du vert (550 nm) pour le cas des forêts galeries.

I.1.3. La classe « forêt sèche » (FS)

La « forêt sèche » est définie comme étant un peuplement fermé pluristrate, de stature moins élevée que la forêt dense humide. Le caractère caducifolié lui confère son nom de « forêt dense sèche caducifoliée » ou « forêt dense sèche décidue ». Au Sud-Ouest de Madagascar, elle se trouve dans les zones ayant une précipitation entre 400 mm et 700 mm, avec une couverture dépassant 70 %. La « forêt sèche » de la zone d'étude se localise principalement dans la partie Est compte tenu du gradient pluviométrique du TLO qui décrit une décroissance de la précipitation allant d'Est en Ouest.

La signature spectrale des forêts sèches est caractérisée par une faible activité photosynthétique, traduisant une disparition des pigments chlorophylliens pendant la saison sèche. Cette caractéristique permet de différencier la forêt sèche de la forêt galerie. En effet, la forêt sèche a un caractère caducifolié qui augmente sensiblement la réflectance dans les grandes longueurs d'onde du visible (jaune et rouge) et parallèlement, une diminution de la réflectance dans le proche infrarouge pendant la saison sèche. Toutefois, pendant la saison de pluie, les forêts sèches ont une forte activité chlorophyllienne, absorbant la majeure partie du rayonnement visible qui leur parvient, modifiant les informations reçues par les satellites qui, combinées avec les informations reçues pendant la saison sèche, identifient clairement les forêts sèches.

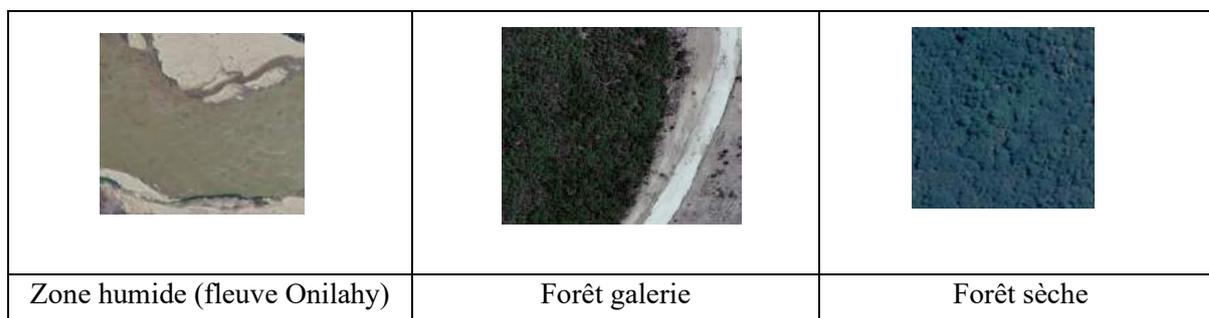


Photo 4 : Aperçu des 3 premières classes par un satellite

Source : Google Earth Pro, 2020

I.1.4. La classe « fourré » (F)

Les fourrés sont composés par les espèces ayant des caractères physiologiques liés à des conditions écologiques, climatiques ou édaphiques, suffisamment défavorables pour empêcher le développement de la forêt. Ils ne proviennent pas de la dégradation d'une forêt dense xérophile et se distingue de cette dernière, par les caractéristiques environnementales (précipitation et type de sol) ; par la hauteur et les espèces présentes dans ce type de formation végétale. Cette formation forestière se trouve dans la partie Ouest de la zone d'étude.

Comme les fourrés regroupent des formations forestières composées par des espèces ayant des caractéristiques adaptées à des conditions climatiques avec une faible précipitation, la végétation qui les compose présente des caractères spécifiques. En effet, les caractères physiologiques, combinés avec la structure anatomique de chaque plante optimisent le stockage de l'eau dû à la rareté de la précipitation.

Les informations captées par les satellites proviennent ainsi d'une faible activité chlorophyllienne, et d'une absorption du rayonnement visible des pigments de réflectance plus faible que celui du vert (c'est-à-dire une réflectance inférieure à 24%), colorant le peuplement qui les compose.

I.1.5. Les classes « forêt sèche dégradée » (FSD) et « fourré dégradé » (FD)

Les classes « forêt sèche dégradée » et « fourré dégradé » se différencient respectivement des classes « forêt sèche » et « fourré » par leur faible densité. Cette dernière est appréciée à partir de leur signature spectrale qui diffère de celle des « forêt sèche » et des « fourré » qui reflètent une plus forte activité chlorophyllienne. La dégradation résultant d'une perturbation naturelle ou anthropique conduisant à un déséquilibre des fonctions de la forêt ou du fourré, les classes des forêts sèches et des fourrés dégradés sont constituées par des arbres et arbustes avec une couverture entre 30 à 70 %.

De par cette faible densité, les végétations sous-bois ou dans la strate inférieure, voire le sol pour le cas d'une plus forte dégradation, modifient les informations captées par les satellites. Le sous-étage de la forêt sèche étant constitué par une végétation dense, composée par des arbustes souvent persistants (FAO, 1997). Tandis que celui des fourrés est composé par des touffes moins élevées avec absence ou faible tapis graminéen.

I.1.6. La classe « savane arborée » (SA)

La classe « savane » regroupe les formations herbacées ouvertes à dominante graminéenne. La savane arborée et arbustive est une formation végétale avec une couverture de 70% à 90% de formation herbacée, et jusqu'à 20 % de couvert arboré. Le passage des feux récurrents sur les recrûs forestiers et l'abandon des zones de culture donnent également place à l'installation de la savane.

La différenciation entre les forêts dégradées et les savanes arborées réside dans la faible valeur du rapport R_{lh} entre la biomasse ligneuse et la biomasse herbacée pour les savanes arborées (Nasi, 1994). En effet, ces dernières se caractérisent par un couvert arboré discontinu faisant que les informations reçues par les satellites résultent de la réflectance émise par le sol, et/ou les tapis graminéens qui le couvrent, ainsi que les caractéristiques des quelques arbres ou arbustes qui constituent la savane.

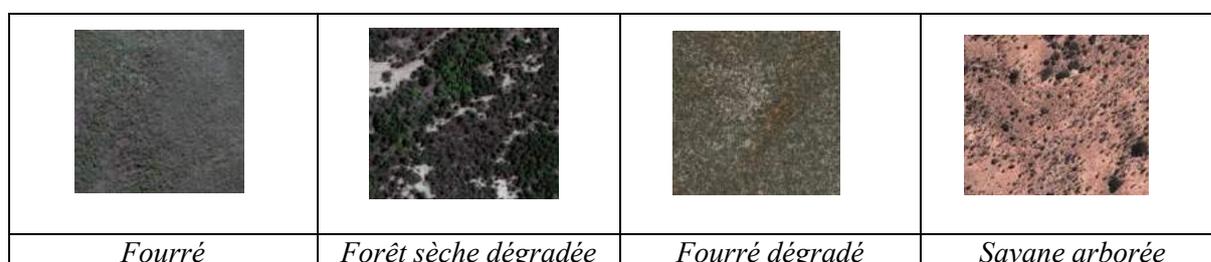


Photo 5 : Aperçu de 4 classes par un satellite

Source : Google Earth Pro, 2020

I.1.7. La classe « zone de culture » (ZC)

La classe « zone de culture » regroupe toutes les zones terrestres cultivées (FAO, 2018). Elle englobe toutes les zones en culture y compris les zones mises en jachère. Les cultures rencontrées dans le TLO sont essentiellement la culture irriguée en général des rizières, la culture pluviale et la culture sur défriche-brûlis ou *hatsake*. Cependant, comme les cultures sur défriche-brûlis ne sont faisables que pendant une durée limitée ne dépassant pas 3 ans, les zones de cultures abandonnées ont été classées parmi les savanes.

Pendant la saison de culture correspondant souvent à la saison des pluies, les activités chlorophylliennes sont plus importantes. Les informations captées par les satellites pendant cette saison sont ainsi issues d'une réflectance des feuilles absorbant surtout les régions bleue et rouge, respectivement de 0,44 μm et de 0,7 μm . Pendant la saison sèche, ces informations sont plus dues au sol, dépourvu de végétation, avec une plus faible réflectance.

I.1.8. La classe « savane herbeuse » (SH)

La savane herbeuse se différencie de la savane arborée par sa proportion en formation herbacée et en couvert arbustif. En effet, elle est formée de 40 à 100 % de formation herbacée et à moins de 10 % de couvert arbustif.

Puisque la savane herbeuse est constituée par une végétation peu couvrante, la réponse spectrale des tapis graminéens est affectée par la réflectance des sols. Dans le Territoire du Lemak'i Onilahy, les sols sont principalement de types ferrugineux, fersiallitique, peu évolué et minéraux bruts lithiques, à faible rétention en eau, qui se traduit par une signature spectrale à plus forte réflectance, jusqu'à une réflectance de 40 % (Girard & Girard, 1989) par rapport aux autres types de sols plus humide/fertile.



Photo 6 : Aperçu des 2 dernières classes par un satellite

Source : Google Earth Pro, 2020

I.2. Différenciation entre les classes selon l'indice de séparabilité

Les indices de séparabilité permettent de mesurer la différence entre les 9 classes en se référant à leur signature spectrale, et sont représentés dans la matrice suivante (Tableau 8).

Tableau 7 : Matrice d'indice de séparabilité des neuf classes

	ZH	FG	FS	F	FSD	FD	SA	ZC
FG	1,99**							
FS	1,99**	1,35						
F	2,00**	1,99**	1,77					
FSD	1,99**	1,63	0,63*	1,53				
FD	1,99**	1,96**	1,69	1,04	1,25			
SA	1,93**	1,94**	1,73	1,88	1,32	1,41		
ZC	1,73	1,94**	1,87	1,97**	1,69	1,81	0,74*	
SH	1,87	1,99**	1,97**	2,00**	1,91**	1,95**	1,22	1,19

ZH : zone humide ; FG : forêt galerie ; FS : forêt sèche ; F : fourré ; FSD : forêt sèche dégradée ; FD : fourré dégradé ; SA : savane arborée ; ZC : zone de culture ; SH : savane herbeuse

* Faible séparabilité

** Bonne séparabilité

En général, les classes montrent une bonne séparabilité avec $IS \geq 1,9$ pour 44,4% des indices ; $1 \leq IS < 1,9$ pour la 50% des indices et seulement 2 indices de séparabilité sont faibles, avec des valeurs de 0,63 et 0,74 représentant respectivement la séparabilité des classes forêt sèche/forêt sèche dégradée et savane/zone de culture. Les classes qui montrent une excellente séparabilité (indice de séparabilité = 2) sont les classes zone humide/fourré et les classes savane herbeuse/fourré.

Les valeurs de l'indice qui montrent une faible séparabilité entre les forêts sèches et les forêts sèches dégradées ; et entre les zones de cultures et les savanes indiquent une faible différenciation spectrale entre ces classes. Toutefois, les observations sur terrain ont montré la nécessité de la séparation de ces classes pour améliorer la précision de l'analyse des changements observés. La matrice de confusion (Tableau 9) permettra, dans cette optique, de montrer la précision de la classification obtenue.

I.3. Validation de la classification

I.3.1. Matrice de confusion

La précision de la classification obtenue est appréciée grâce à la vérification sur terrain des points générés de façon aléatoire dans le TLO. Afin d'appuyer les changements observés, une discussion auprès de certains villageois dans ces villages a été engagée pour donner une idée sur leur perception des facteurs pouvant expliquer la perte en forêt.

Le principe de vérification consiste à comparer la nature de la classe du point obtenue par la classification avec celle de la réalité sur terrain (Photo 7).

		
Liste des points à vérifiés insérés dans le GPS	Arrivée à destination d'un point	Appréciation visuelle et prise de photo d'une zone de culture

Photo 7 : Etape de vérification des points, exemple d'une zone de culture à Ankilimivony

Résultats

Après l'élaboration des cartes d'occupation des sols, la classification établie a montré une précision globale de 83,79% (Tableau 9). Cette précision a pu être calculée en confrontant la classification obtenue avec la réalité sur terrain grâce à 327 points générés aléatoirement. L'objectif étant de vérifier le maximum de points par classe, dont le minimum de nombre de points à vérifier est fixé à 20 par classe. La matrice montre sur les diagonales les points ayant été classés correctement par rapport à la réalité sur terrain, et sur le reste des cases, les points qui ne correspondent pas à la classification observée pendant la descente.

Tableau 8 : Matrice de confusion de la carte d'occupation du sol dans le TLO

		Points de contrôle								Total	Erreur de commission (%)	Précision (%)	
		ZH	FG	FS	F	FSD	FD	SA	ZC				SH
Classification	ZH	21	4								25	16.00	84.00
	FG		22	1		3					26	15.38	84.62
	FS			20							20	0.00	100.00
	F				35			2			37	5.41	94.59
	FSD			3		64	1	2			70	8.57	91.43
	FD						13	5	3		21	38.10	61.90
	SA					8		35	2	1	46	23.91	76.09
	ZC		1			5		5	43	5	59	27.12	72.88
	SH							2		21	23	8.70	91.30
Total		21	27	24	35	80	14	51	48	27	327		
Erreur d'omission (%)		0.00	18.52	16.67	0	20.0	7.14	31.37	10.42	22.22			

ZH : zone humide ; FG : forêt galerie ; FS : forêt sèche ; F : fourré ; FSD : forêt sèche dégradée ;
FD : fourré dégradé ; SA : savane arborée ; ZC : zone de culture ; SH : savane herbeuse

La classe ayant la meilleure précision est la classe « forêt sèche » avec une précision maximale de 100%. Tandis que c'est la classe « fourré dégradé » qui présente la plus faible précision de 61,9 %. L'erreur de commission maximale est de 38,10 %, et correspond à la classe des « fourré dégradé ». Ceci signifie que 38,10% des points des fourrés dégradés ont été confondus à d'autres classes qui sont les classes « savane arborée » et « zone de culture ». L'erreur d'omission maximale est de 31,37%, correspondant à la classe des savanes arborées et signifie que 31,37% des points devant être des savanes arborées sont incorrectement classés. Cette erreur implique cinq classes dont « fourré », « forêt sèche dégradée », « fourré dégradé », « zone de culture » et « savane herbeuse » (Tableau 9). Cette confusion s'explique par la similarité entre leur signature spectrale caractérisée par la faible densité de la végétation.

I.3.2. Indice de Kappa

La valeur de l'indice de Kappa, après calcul, est égale à 0,812. Autrement dit, 81,2% des résultats de la classification correspondent à la réalité sur terrain. La valeur de l'indice de Kappa,

combinée avec la précision globale de la classification permet de conclure que la classification obtenue est fiable pour la suite de l'étude. En effet, l'indice de Kappa montre une excellente précision selon l'échelle précédemment expliquée.

II. Dynamique de la couverture forestière dans le TLO par période de références

Avant d'entrer dans la description de la dynamique de la couverture forestière dans le Territoire du Lemak'i Onilahy, le tableau 10 permet d'avoir un premier aperçu des changements en termes de surface qui se sont effectués entre 1989 et 2019.

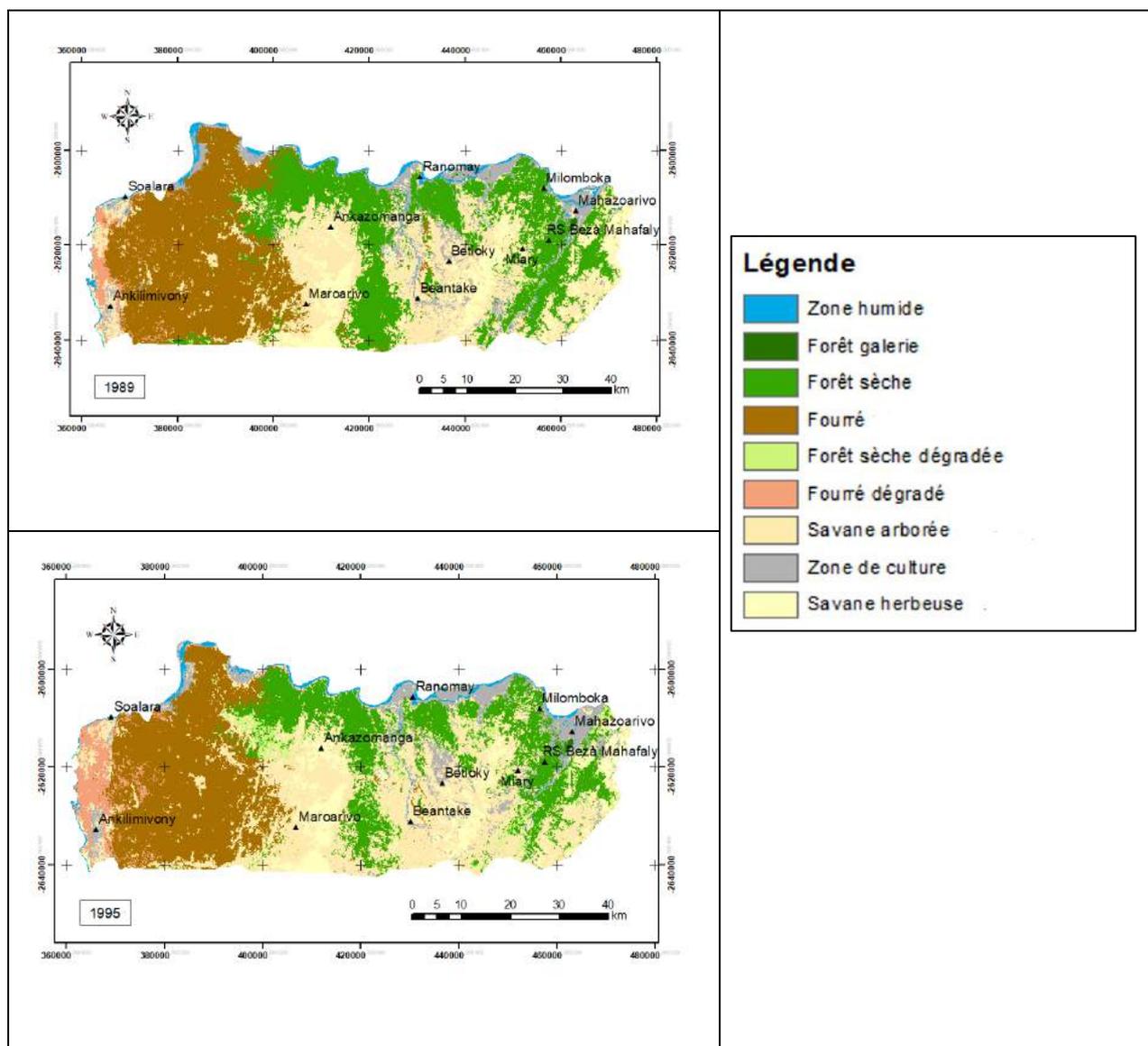
Tableau 9 : Situations de l'occupation des sols dans le Territoire du Lemak'i Onilahy pendant les 6 années de références

		1989	1995	2001	2007	2013	2019
Zone humide	En km ²	75.3	64.4	71.3	64.9	63.2	49.7
	En %	1.9	1.6	1.8	1.6	1.6	1.2
Forêt galerie	En km ²	4.8	4.4	6.2	5.8	4.0	4.5
	En %	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
Forêt sèche	En km ²	999.0	745.7	611.8	451.6	195.3	55.3
	En %	25.1	18.7	15.4	11.3	4.9	1.4
Fourré	En km ²	1083.2	962.7	796.5	658.2	234.1	32.9
	En %	27.2	24.2	20.0	16.5	5.9	0.8
Forêt sèche dégradée	En km ²	57.3	179.3	319.2	420.1	555.2	655.6
	En %	1.4	4.5	8	10.6	13.9	16.5
Fourré dégradé	En km ²	74.3	146.1	166.1	212.6	701.8	829.5
	En %	1.9	3.7	4.2	5.3	17.6	20.8
Savane arborée	En km ²	1074.7	1250.1	1364.9	1494.9	1479.5	1486.2
	En %	27.0	31.4	34.3	37.6	37.2	37.3
Zone de culture	En km ²	306.8	319.7	284.4	322.9	518.6	638.7
	En %	7.7	8	7.1	8.1	13	16
Savane herbeuse	En km ²	304.4	307.5	359.4	348.8	228.0	227.3
	En %	7.6	7.7	9.0	8.8	5.7	5.7

En superposant les cartes d'occupation des sols de chaque année de références générées (Annexe 6), l'analyse de la relation entre les couvertures forestières et les zones exploitées par les habitants a été effectuée grâce à l'interprétation de la matrice de transition. Elle montre le pourcentage des surfaces qui s'est échangé entre chaque classe. Les couvertures forestières regroupent les forêts galeries, les forêts sèches et les fourrés. Tandis que les zones exploitées par les habitants se manifestent par les forêts dégradées, les zones converties en terres agricoles et les savanes.

II.1. Période 1989-1995

La matrice de transition de la période 1989-1995 montre une perte considérable en surface des forêts au profit successivement des forêts dégradées des savanes et des zones de culture (Tableau 11). En effet, 2,32% et 1,53% de la surface du TLO ont passé de forêts sèches et de fourrés en forêts sèches dégradées et en fourrés dégradés. 3,88% de la surface du TLO se sont transformés de forêts sèches en savane arborée, 2,05% de fourrés en savane arborée et 0,76% de forêts dégradées en savane arborée. Aussi, 0,02% du TLO ont été convertis, de forêt galerie en zone de culture.



Carte 5 : Changements d'occupation des sols entre 1989 et 1995

En somme, la période 1989-1995 a été marquée par une conversion de 7,08% de la surface du TLO, soit 282 km², de forêt sèche en forêt sèche dégradée, en zone de culture et en savane. 3,68% (147 km²) ont passé de fourré, en fourré dégradée, en zone de culture et en savane. Pour les formes dégradées, 0,9 % (36 km²) de la surface du TLO ont été converties en terres agricoles ou défrichés.

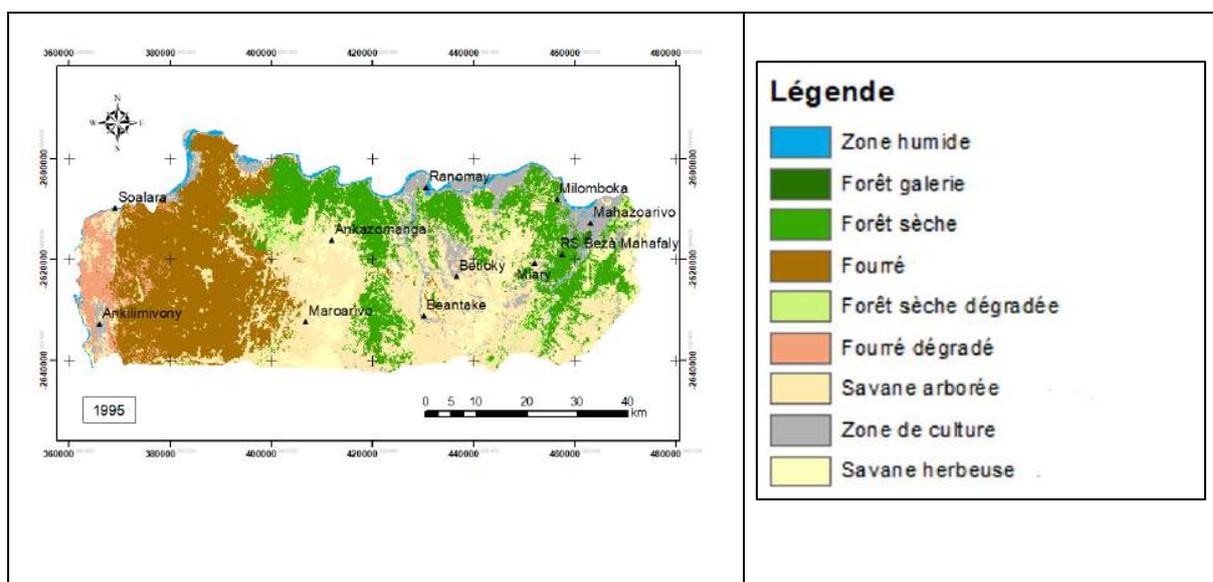
Tableau 10 : Matrice de transition entre 1989 et 1995 (en %)

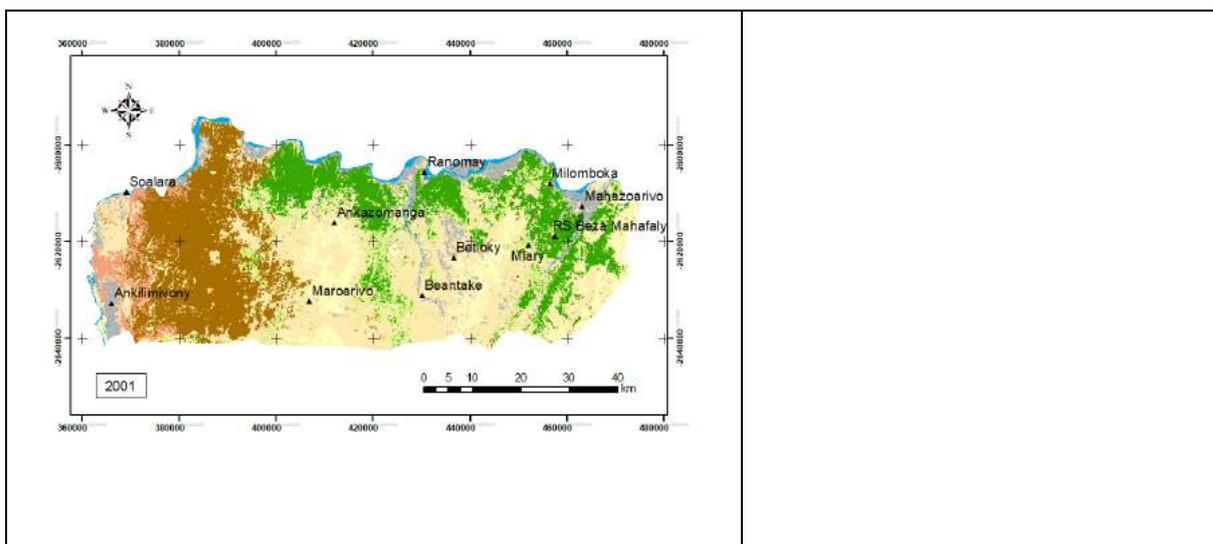
		1989									Total
		ZH	FG	FS	F	FSD	FD	SA	ZC	SH	
1995	ZH	1.33	0	0	0	0	0	0.01	0.26	0.01	1.62
	FG	0	0.09	0.01	0	0	0	0	0.01	0	0.11
	FS	0	0.01	17.29	0.45	0.24	0	0.48	0.26	0.02	18.74
	F	0	0	0.72	22.86	0.04	0.16	0.35	0.06	0	24.19
	FSD	0	0	2.32	0.23	0.44	0.00	1.23	0.21	0.08	4.50
	FD	0.04	0	0.01	1.53	0	1.53	0.41	0.11	0.03	3.67
	SA	0.07	0	3.88	2.05	0.63	0.13	20.64	2.02	1.99	31.41
	ZC	0.40	0.02	0.86	0.09	0.09	0.02	1.72	4.66	0.17	8.03
	SH	0.04	0	0.02	0	0	0.02	2.17	0.11	5.35	7.73
Total	1.89	0.12	25.10	27.22	1.44	1.87	27.00	7.71	7.65	100	

ZH : zone humide ; FG : forêt galerie ; FS : forêt sèche ; F : fourré ; FSD : forêt sèche dégradée ; FD : fourré dégradé ; SA : savane arborée ; ZC : zone de culture ; SH : savane herbeuse

II.2. Période 1995-2001

La matrice de transition entre 1995 et 2001 (Tableau 12) montre que 2,88 % de la surface du TLO sont passés de forêt sèche en forêt sèche dégradée ; 2,02 % de fourré en fourré dégradé ; 2,21 % des forêts sèches défrichées transformées en savane ; 2,18% des fourrés défrichés ; et 2,82 de forêts dégradées en savane. La conversion des forêts en zone de culture touche 0,8% soit 32 km² du Territoire du Lemak'i Onilahy. Pour les forêts galeries, elles ont subi moins de pression pendant cette période.





Carte 6 : Changements d'occupation des sols entre 1995 et 2001

Tableau 11 : Matrice de transition entre 1995 et 2001 (%)

		1995									Total
		ZH	FG	FS	F	FSD	FD	SA	ZC	SH	
2001	ZH	1.40	0	0	0	0	0.02	0.03	0.31	0.03	1.79
	FG	0	0.10	0.02	0	0	0	0	0.04	0	0.16
	FS	0	0.01	12.82	0.33	0.85	0	0.62	0.73	0.01	15.37
	F	0	0	0.36	18.84	0.15	0.25	0.40	0.02	0	20.01
	FSD	0	0	2.88	0.68	1.68	0.01	2.44	0.30	0.03	8.02
	FD	0	0	0.05	2.02	0.03	1.73	0.29	0.04	0.01	4.17
	SA	0.01	0	2.21	2.18	1.60	1.22	23.18	1.90	1.99	34.30
	ZC	0.18	0	0.34	0.06	0.09	0.31	1.55	4.41	0.20	7.14
	SH	0.02	0	0.06	0.05	0.12	0.13	2.90	0.28	5.46	9.03
Total	1.62	0.11	18.74	24.19	4.50	3.67	31.41	8.03	7.73	100	

ZH : zone humide ; FG : forêt galerie ; FS : forêt sèche ; F : fourré ; FSD : forêt sèche dégradée ; FD : fourré dégradé ; SA : savane arborée ; ZC : zone de culture ; SH : savane herbeuse

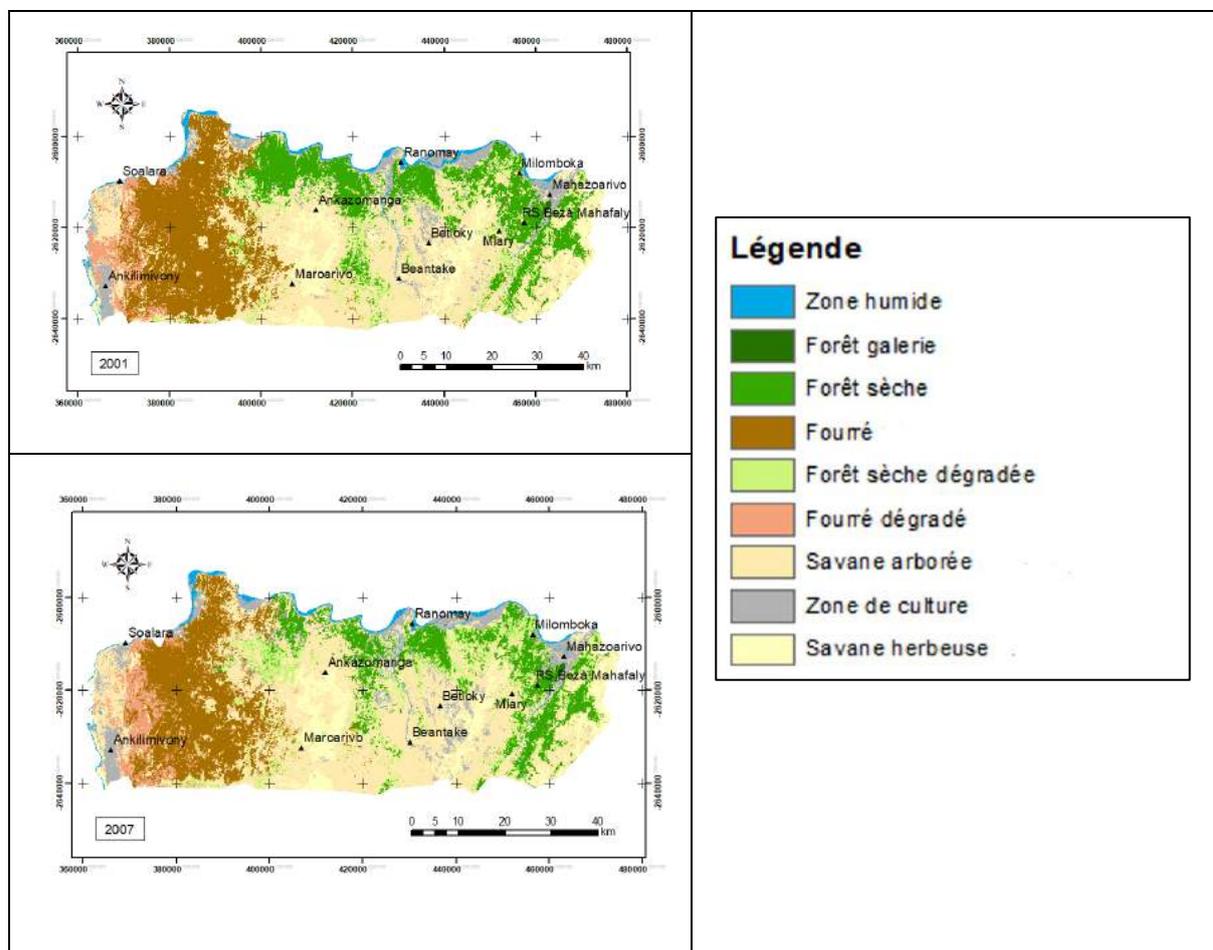
En bref, 5,49 % soit 219 km² du TLO ont été convertis de forêt sèche en forêt sèche dégradée, zone de culture et savane, pendant cette période. 4,33 % (172 km²) du TLO ont passé de fourré en fourré dégradé, zone de culture et savane. Par ailleurs, 3,47% (138 km²) du TLO ont été transformés de forêts dégradées en zone de culture et savane.

II.3. Période 2001-2007

La troisième période de la présente étude montre également une perte en surface des forêts (Tableau 13). Plus précisément, 2,61%, 2,17% et 0,58% de la surface du TLO ont passé respectivement de forêt sèche en forêt sèche dégradée, en savane et en zone de culture. Tandis que 1,96% du TLO se sont transformés de fourré en fourré dégradé, 2,06 % en savane et 0,16% en zone de culture. La conversion des forêts dégradées a continué, surtout pour les forêts sèches dégradées. En effet, 2,41 %

Résultats

du TLO ont été victime d'une conversion des forêts sèches dégradées en savane arborée, et 0,13 % en zone de culture. Tandis que 1,16% du TLO ont passé de fourré dégradé en savane arborée entre 2001 et 2007 et 0,14 % de fourré dégradé en zone de culture. La principale pression exercée sur la forêt galerie pendant cette troisième période de l'étude reste la conversion en zone de culture.



Carte 7 : Changements d'occupation des sols entre 2001 et 2007

Tableau 12 : Matrice de transition entre 2001 et 2007 (%)

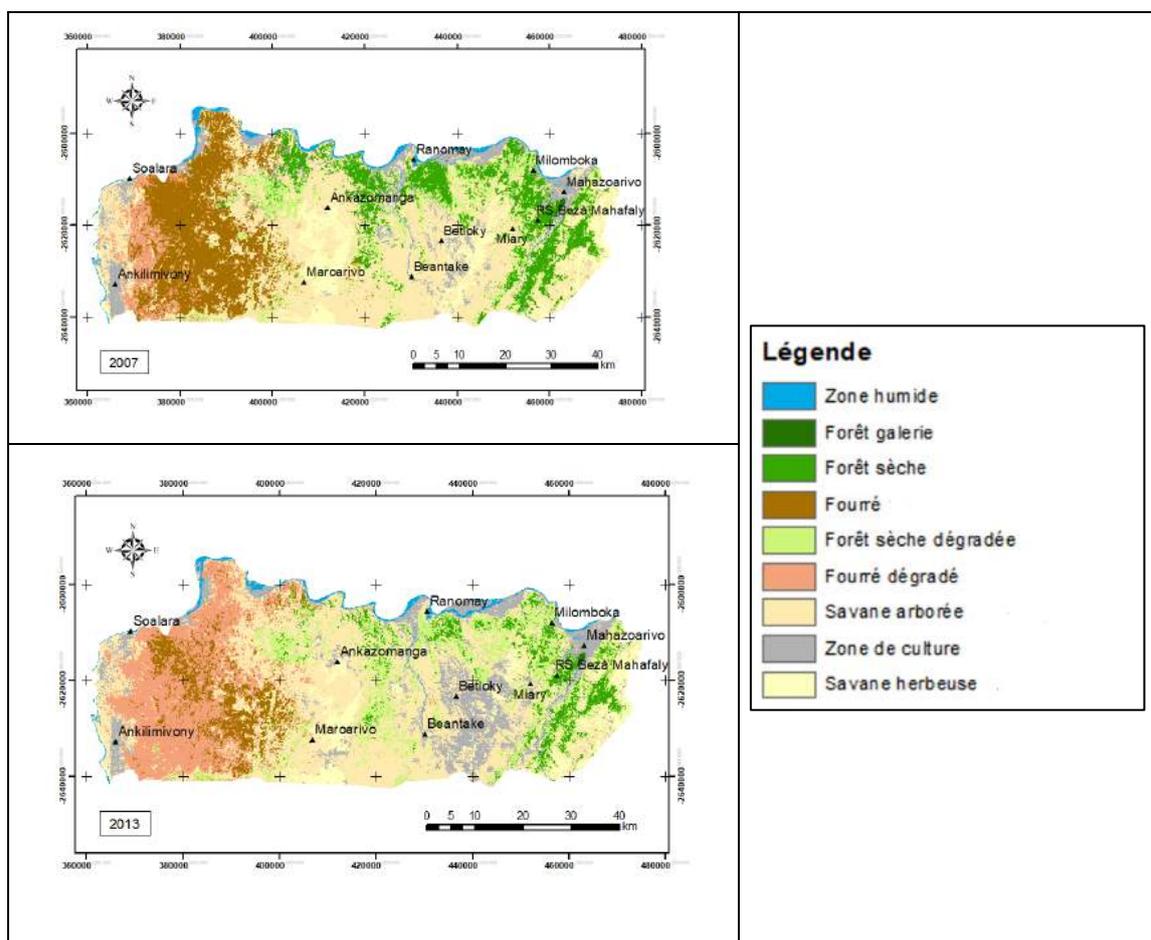
		2001									Total
		ZH	FG	FS	F	FSD	FD	SA	ZC	SH	
2007	ZH	1.38	0	0	0	0	0.01	0.03	0.19	0.02	1.63
	FG	0	0.11	0.02	0	0	0	0	0.01	0	0.15
	FS	0	0.03	9.46	0.13	1.22	0.01	0.33	0.14	0.03	11.35
	F	0	0	0.33	15.01	0.33	0.39	0.46	0.02	0.01	16.54
	FSD	0	0	2.61	0.63	3.75	0.13	3.17	0.20	0.05	10.56
	FD	0	0	0.10	1.96	0.15	2.29	0.81	0.03	0.01	5.34
	SA	0.02	0	2.17	2.06	2.41	1.16	26.22	1.96	1.55	37.56
	ZC	0.34	0.01	0.58	0.16	0.13	0.14	1.61	4.46	0.67	8.11
	SH	0.05	0.00	0.09	0.05	0.02	0.05	1.67	0.14	6.69	8.76
	Total	1.79	0.16	15.37	20.01	8.02	4.17	34.30	7.14	9.03	100

ZH : zone humide ; FG : forêt galerie ; FS : forêt sèche ; F : fourré ; FSD : forêt sèche dégradée ; FD : fourré dégradé ; SA : savane arborée ; ZC : zone de culture ; SH : savane herbeuse

Pendant cette période, 5,46% (217 km²) de la surface du TLO ont passé de forêt sèche en forêt sèche dégradée, en zone de culture et en savane. Tandis que 4,24 % (169 km²) ont subi une transformation des fourrés en fourré dégradé, en zone de culture et en savane. Pour les forêts dégradées, 3,92 % (156 km²) du TLO ont été convertis en zone de culture et savane. Concernant la forêt galerie, 0,01 % soit 0,48 km² du TLO ont passé de forêt galerie en zone de culture et savane pendant la période 2001/2007.

II.4. Période 2007-2013

Entre 2007 et 2013, la matrice de transition (Tableau 14) montre une baisse considérable de la surface des forêts galeries. En effet, 0,02 % de la surface du TLO ont passé de forêt galerie en zone de culture pendant cette période. 5,07 % de la surface du TLO ont été convertis de forêt sèche en forêt sèche dégradée ; 1,38 % de forêt sèche en savane arborée et 0,22 % de forêt sèche en zone de culture. Quant aux fourrés, 9,9 % de la surface du TLO ont passé de fourré en fourré dégradé, 1,09% en savane et 0,06 % en zone de culture. Pour les forêts dégradées, 3,33 % du TLO ont été transformés de forêt sèche dégradée en savane et 0,17 % de forêt sèche dégradée en zone de culture. Tandis que les fourrés dégradés ont été moins touchés par les changements : seulement 0,59% de la surface du TLO ont passé de fourré dégradé en savane et 0,06 % de fourré dégradé en zone de culture.



Carte 8 : Changements d'occupation des sols entre 2007-2013

Tableau 13 : Matrice de transition entre 2007 et 2013 (%)

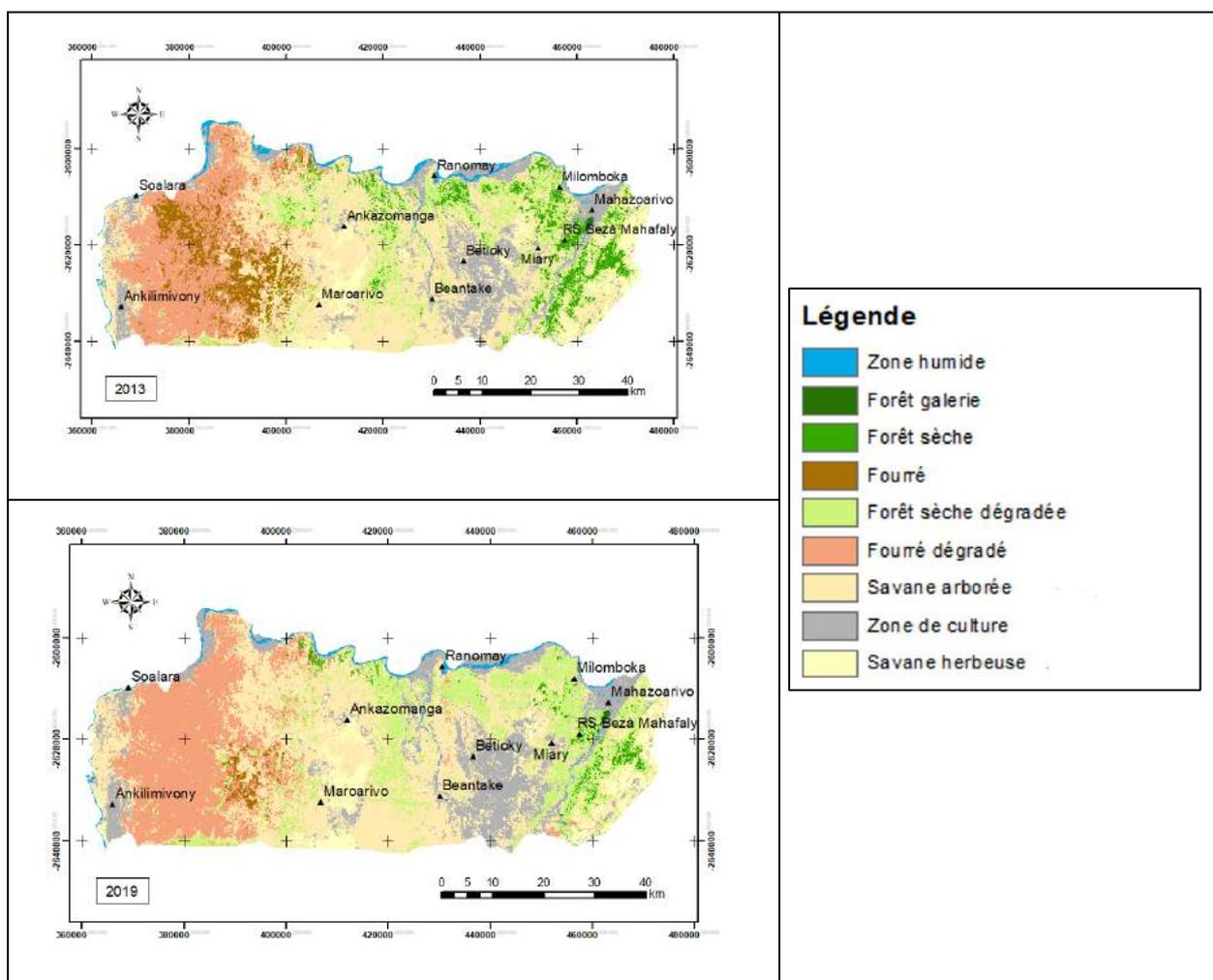
		2007								Total	
		ZH	FG	FS	F	FSD	FD	SA	ZC		SH
2013	ZH	1.31	0	0	0	0	0	0.01	0.24	0.02	1.59
	FG	0	0.09	0.01	0	0	0	0	0	0	0.10
	FS	0	0.02	4.34	0.04	0.38	0	0.09	0.03	0.01	4.91
	F	0	0	0.11	5.26	0.15	0.18	0.14	0.04	0	5.88
	FSD	0	0.01	5.07	0.18	5.87	0.17	2.40	0.20	0.03	13.95
	FD	0	0	0.22	9.90	0.62	4.33	2.36	0.17	0.03	17.63
	SA	0.02	0	1.38	1.09	3.33	0.59	26.56	1.60	2.58	37.18
	ZC	0.28	0.02	0.22	0.06	0.17	0.06	4.84	5.72	1.66	13.03
	SH	0.01	0	0.01	0	0.02	0	1.16	0.10	4.42	5.73
Total	1.63	0.15	11.35	16.54	10.56	5.34	37.56	8.11	8.76	100	

ZH : zone humide ; FG : forêt galerie ; FS : forêt sèche ; F : fourré ; FSD : forêt sèche dégradée ; FD : fourré dégradé ; SA : savane arborée ; ZC : zone de culture ; SH : savane herbeuse

Ainsi, 6,68 % (266 km²) de la surface du TLO ont passé de forêt sèche en forêt sèche dégradée, en zone de culture et en savane ; 11,06 % (440 km²) de fourré en fourré dégradé, zone de culture et savane ; et 4,18 % (167 km²) de forêt dégradée en savane et zone de culture. Cette période a été le plus marquée par les changements en termes de surface surtout pour le cas des fourrés.

II.5. Période 2013-2019

La dernière période de la présente étude est la période pendant laquelle 3,32 % du Territoire du Lemak'i Onilahy ont été victime d'une transformation de forêt sèche en forêt sèche dégradée ; 0,24 % de forêt sèche en savane et 0,08 % de forêt sèche en zone de culture. 4,47 % de la surface du TLO ont passé de fourré en fourré dégradé ; 0,41 % de fourré en savane et 0,02 % de fourré en zone de culture (Tableau 15). Tandis que 3,41 % du TLO ont été marqué par le changement des forêts sèches dégradés en savane et 0,09 % en zone de culture. Pour les fourrés dégradés, 2,03 % de la surface du TLO ont passé de fourré dégradé en savane et 0,09 % de fourré dégradé en zone de culture. Quant aux forêts galerie, elles occupent 0,09 % de la surface du TLO en 2019.



Carte 9 : Changements d'occupation des sols entre 2013 et 2019

Tableau 14 : Matrice de transition entre 2013 et 2019 (%)

		2013									Total
		ZH	FG	FS	F	FSD	FD	SA	ZC	SH	
2019	ZH	1.06	0	0	0	0	0	0.01	0.16	0.01	1.25
	FG	0	0.09	0.01	0	0.01	0	0	0.01	0	0.11
	FS	0	0	1.10	0.04	0.19	0.02	0.02	0.02	0	1.39
	F	0	0	0.01	0.77	0.01	0.03	0.00	0	0	0.83
	FSD	0	0	3.32	0.18	9.44	0.63	2.61	0.27	0.03	16.47
	FD	0	0	0.15	4.47	0.62	14.83	0.74	0.04	0	20.84
	SA	0	0	0.24	0.41	3.41	2.03	28.22	1.94	1.09	37.34
	ZC	0.52	0	0.08	0.02	0.26	0.09	4.09	10.41	0.57	16.05
	SH	0	0	0	0	0.02	0	1.47	0.19	4.02	5.71
Total	1.59	0.10	4.91	5.88	13.95	17.63	37.18	13.03	5.73	100	

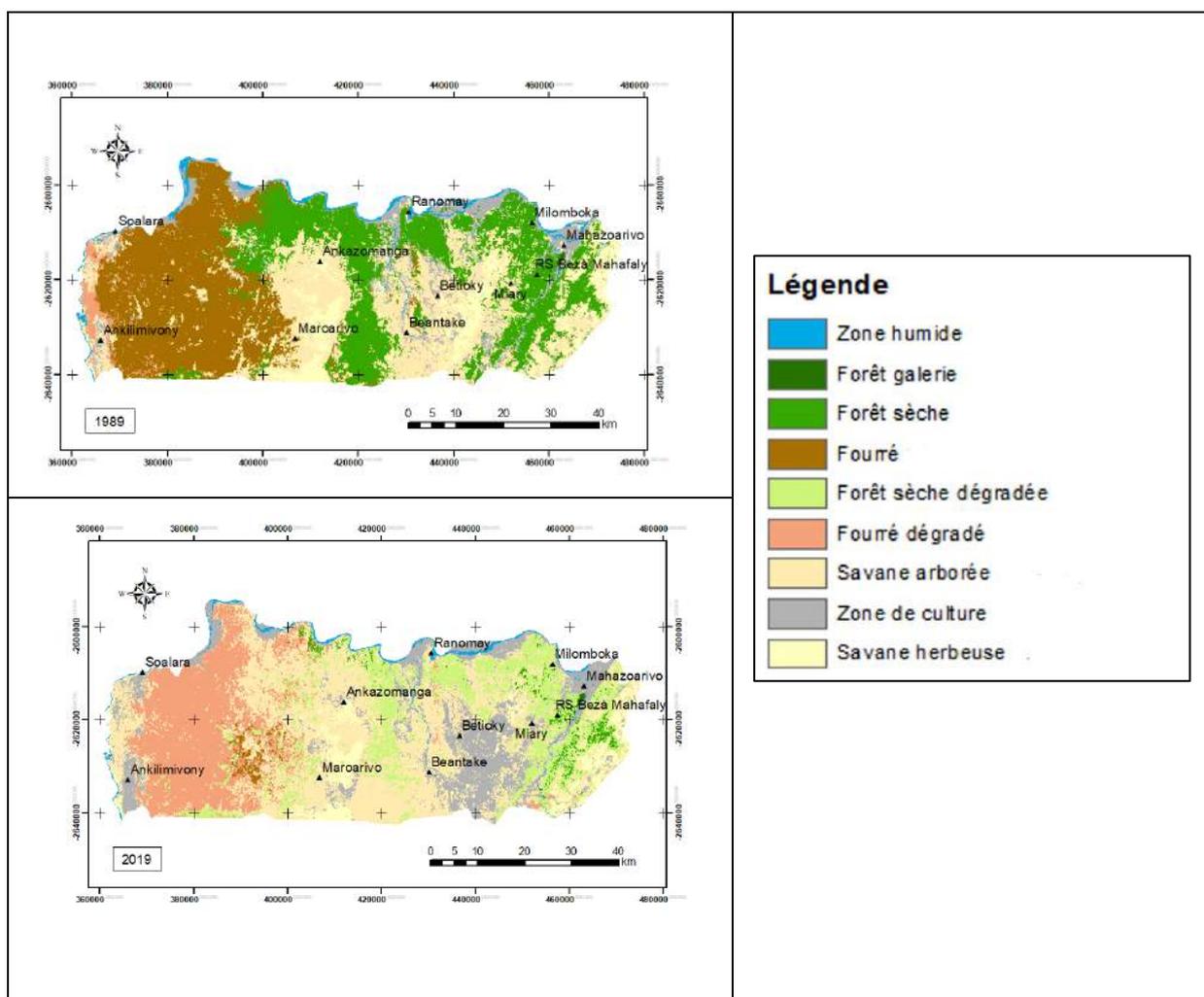
ZH : zone humide ; FG : forêt galerie ; FS : forêt sèche ; F : fourré ; FSD : forêt sèche dégradée ;
 FD : fourré dégradé ; SA : savane arborée ; ZC : zone de culture ; SH : savane herbeuse

Résultats

En résumé, 3,64 % (145 km²) de la surface du TLO ont été marqués par la transformation des forêts sèches en forêts sèches dégradées, en savanes et en zone de culture ; 4,9 % (195 km²) du TLO ont passé de fourré en fourré dégradé, en savane et en zone de culture et 5,81 % (231 km²) du TLO ont été transformés de forêts dégradées en savane et zone de culture. La dernière période a été marquée principalement par une perte moins importante par rapport à la période précédente (2007/2013).

II.6. Période 1989-2019

D'un point de vue général, le territoire Lemak'i Onilahy a subi d'énorme changement en 30 ans entre 1989 et 2019, surtout pour les couvertures forestières (Tableau 16). En effet, la forêt galerie occupe 0,09 % de la surface du TLO en 2019, alors qu'en 1989, elle en occupe 0,12 %. Par ailleurs, 12,22 % du TLO ont été marqués par la dégradation des forêts sèches, 9,44 % par leur défrichement en savane et 0,98 % par la conversion en terre agricole encore active. Pour le cas des fourrés, 18,66 % de la surface du TLO ont subi une dégradation de ces fourrés, 6,34 % une savanisation et 0,28 % une conversion en terres agricoles encore active. Aussi, 0,74 % du TLO ont passé de forêt sèche dégradée en savane, et 1,24 % de fourré dégradé en savane.



Carte 10 : Changements d'occupation des sols entre 1989 et 2019

Tableau 15 : Matrice de transition entre 1989 et 2019 (%)

		1989									Total
		ZH	FG	FS	F	FSD	FD	SA	ZC	SH	
2019	ZH	0.98	0	0	0	0	0	0	0.25	0.01	1.25
	FG	0	0.09	0.01	0	0	0	0	0.01	0	0.11
	FS	0	0	1.36	0.02	0	0	0	0.01	0	1.39
	F	0	0	0.07	0.76	0	0	0	0	0	0.83
	FSD	0	0	12.22	1.15	0.56	0.01	2.00	0.50	0.04	16.47
	FD	0	0	1.01	18.66	0.05	0.46	0.56	0.09	0	20.84
	SA	0.04	0	9.44	6.34	0.74	1.14	16.29	1.77	1.57	37.34
	ZC	0.84	0.02	0.98	0.28	0.09	0.24	6.46	4.98	2.15	16.05
	SH	0.02	0	0.01	0	0	0.03	1.68	0.09	3.87	5.71
Total	1.89	0.12	25.10	27.22	1.44	1.87	27.00	7.71	7.65	100	

ZH : zone humide ; FG : forêt galerie ; FS : forêt sèche ; F : fourré ; FSD : forêt sèche dégradée ; FD : fourré dégradé ; SA : savane arborée ; ZC : zone de culture ; SH : savane herbeuse

L'analyse des relations entre les pertes en surface des couvertures forestières et les gains en surface des zones exploitées par les habitants montre clairement un échange entre ces deux types de classes. Cet échange est plus marqué pendant la période 2007/2013 (Figure 6).

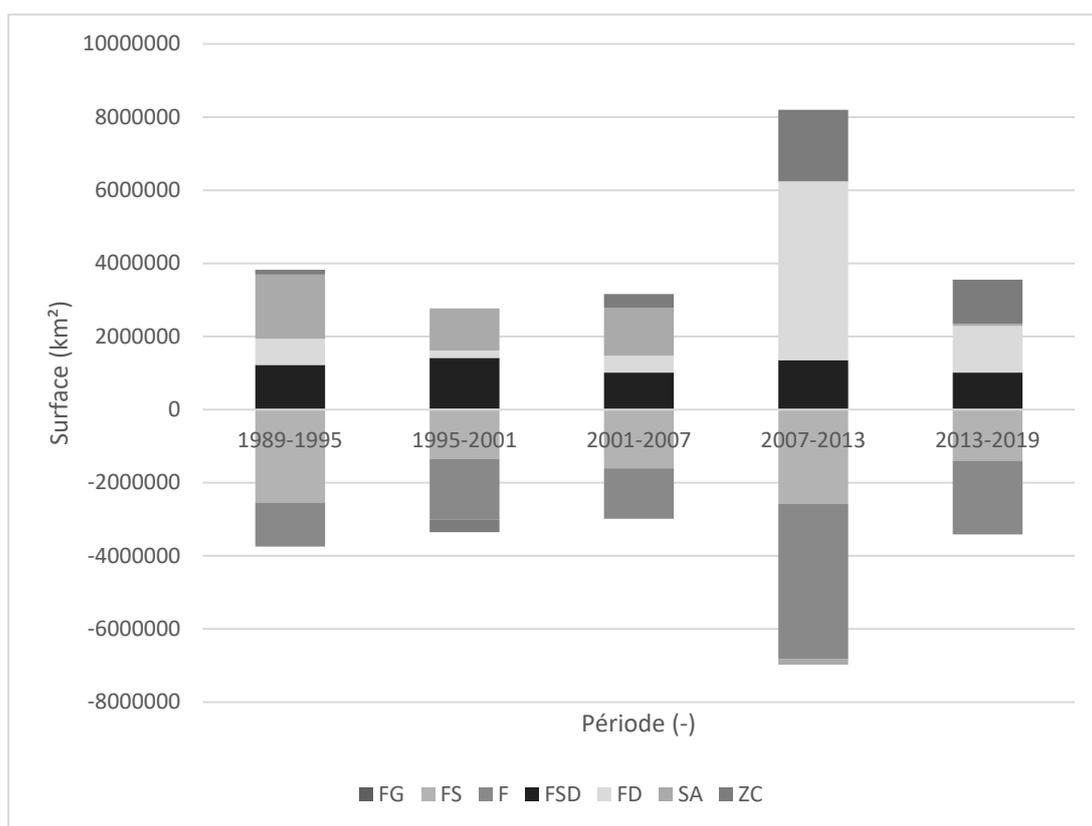


Figure 7 : Répartition des gains et des pertes en surface des classes (km²) par période

FG : forêt galerie ; FS : forêt sèche ; F : fourré ; FSD : forêt sèche dégradée ; FD : fourré dégradé ; SA : savane arborée ; ZC : zone de culture

III. Taux de déforestation dans le TLO de 1989 à 2019

III.1. Taux de déforestation dans le TLO entre la zone Est et Ouest

En appliquant la formule de calcul du taux de déforestation, les valeurs du taux de déforestation (Tableau 17) montrent que la période pendant laquelle le défrichement de la forêt est maximale est la période 1989-1995 avec un taux de déforestation annuelle de 1,16%.

Tableau 16 : Taux annuel de déforestation (%) dans le TLO entre 1989 et 2019

	1989-1995	1995-2001	2001-2007	2007-2013	2013-2019	1989-2019
Forêt sèche	1,78	-	0,91	1,98	0,75	1,05
Fourré	0,6	1,88	1,36	-	1,12	0,82
Total	1,16	0,97	1,14	0,47	0,95	0,93

De manière plus détaillée, c'est entre 2007 et 2013 que la déforestation des forêts sèches est maximale (taux = 1,98%), tandis que pour le cas des fourrés, la période de déforestation maximale se trouve entre 1995 et 2001 (taux = 1,88%). Cette observation montre une exploitation massive des forêts sèches de l'Est, laissant les fourrés de l'Ouest moins défrichés. Ceci peut s'expliquer par la nature du sol du plateau Mahafaly sur lequel s'installent les fourrés. En effet, limitée par la précipitation et le type de sol, une grande partie des terres dans la partie Ouest ne sont pas cultivables. Cependant, après 2013, le défrichement des fourrés reprend avec un taux de dégradation annuel de 1,12%.

En comparant les taux de déforestation annuels des forêts sèches et des fourrés, de façon générale, ce sont les forêts sèches qui ont subi plus de défrichement annuel par rapport aux fourrés entre 1989 et 2019. La valeur du taux de déforestation général étant égale à 0,93%.an⁻¹.

III.2. Déforestation à l'intérieur et en dehors des Aires Protégées dans le TLO

III.2.1. Pertes en couverture forestière à l'intérieur et en dehors des Aires Protégées

Après une reclassification des 9 classes initiales, les cartes ne montrant que 2 classes (forêts et non forêts) pendant les six années de références sont obtenues (Annexe 7), reclassant toutes les classes de couverture forestière (« forêt galerie », « forêt sèche », « forêt sèche dégradée » et « fourré dégradé ») en une seule classe : « Forêt » ; et le reste en « non forêt ». Les résultats issus de la comparaison des cartes montrent une perte importante de la couverture forestière. Entre 1989 et 2007, 13,1% de la couverture forestière en 1989 ont disparu dans l'Aire Protégée (Réserve Spéciale Bezà Mahafaly). Tandis qu'en 2007 et 2019, une augmentation de cette perte a été observée dans les Aires Protégées (RS Bezà Mahafaly et la NAP Amoron'i Onilahy). Par contre, dans les aires non protégées, la perte en forêt semble diminuée entre les deux périodes : 21,33% entre 1989 et 2007, contre 8,12% entre 2007-2019 (Tableau 18).

Tableau 17 : Perte en forêts entre 1989 et 2019 (km²)

	Forêt protégée		Forêt non protégée	
	Perte en km ²	Perte %	Perte en km ²	Perte %
1989-2007	4,87	13,1	465,21	21,33
2007-2019	66,51	14,25	104,02	8,12

Ainsi, avant 2007, la proportion de forêts perdues dans la Réserve Spéciale de Bezà Mahafaly est inférieure à celle des forêts hors protection. Cependant, après 2007, une intensification de la déforestation est observée surtout dans les Aires Protégées.

III.2.2. Taux de déforestation

En appliquant la formule du taux de déforestation, ses valeurs montrent qu'il y a moins de déforestation dans les Aires Protégées entre 1989 et 2007 que dans les aires non protégées (Tableau 19). Toutefois, le taux de déforestation augmente après cette année, soit de 1,1% de 2007 à 2019.

En subdivisant les périodes considérées, le taux maximal de déforestation annuel est observé entre 2007 et 2013, pour les forêts dans les Aires Protégées. Pour le cas des forêts non protégées, il est localisé entre la période 1989/1995.

Tableau 18 : Taux de déforestation à l'intérieur et à l'extérieur des Aires Protégées

	1989-1995	1995-2001	2001-2007	2007-2013	2013-2019	1989-2007	2007-2019
Forêt protégée	1.25	0.63	1.26	1.47	0.63	0.69	1.10
Forêt hors protection	1.16	1.00	1.14	0.11	1.06	0.89	0.62

En regardant de plus près les taux de déforestation dans chacune des Aires Protégées étudiées, une différence importante entre les taux de déforestation a été observée. En effet, le taux de déforestation dans la NAP Amoroni Onilahy de 2007 à 2019 est supérieur à celui de la Réserve Spéciale de Bezà Mahafaly, avec respectivement 1,21 %.an⁻¹ contre 0,39 %.an⁻¹.

DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

I. Discussions

I.1. Discussions sur la méthodologie

L'utilisation de la télédétection pour étudier les dynamiques de la couverture forestière dans la région semi-aride de Madagascar permet d'enrichir les données sur la déforestation dans cette zone et les mécanismes de changements d'occupation des sols, plus particulièrement de la végétation. Cette méthode étant moins utilisée en zone semi-aride (Gasparri & Grau, 2009 ; Hosnah, 2013 ; Bianchi & Haig, 2013 ; Janssen *et al.*, 2018), l'apport de cette étude peut servir de référence pour les études à venir.

I.1.1. Discussions sur l'élaboration des cartes d'occupation des sols

Malgré que la télédétection soit un outil adapté à la détection et à la cartographie des changements forestiers importants sur de vastes territoires (Durrieu & Deshayes, 1994), cette méthode présente des limites au niveau de la précision de la classification de l'occupation des sols. La précision d'une classification augmente avec la résolution des images traitées (Servadio, 2011), ce qui limite la présente étude sur les classes étudiées. En effet, les infrastructures routières et les zones bâties n'ont pas pu être insérées dans l'analyse faute de disponibilité des images à haute résolution avant 2013 dans cette partie de Madagascar. La résolution requise étant la résolution spatiale au sol plus fine (10 ou 20 m) (Desjardins & Cavayas, 1991), qui autorise une meilleure définition des éléments composant le tissu urbain/rural. La résolution de la présente étude étant de 30 m.

L'utilisation de la classification semi-supervisée permet de prendre en compte de façon rigoureuse l'information apportée par les données étiquetées et non étiquetées (Vandewalle, 2009). Par rapport aux classifications supervisées et non supervisées, elle fournit une classification plus proche de la réalité sur terrain, utilisée par la majorité des études cartographiques (Ramarosonarivo, 2013 ; Radonarison, 2015 ; Randriamalala, 2015). Cette méthode a été appuyée par l'utilisation de la méthode de classification Random Forest du plugin QGIS *dzetsaka*, qui montre des résultats bien supérieurs aux autres classifieurs (PAG, 2016).

Par ailleurs, la précision de la classification (83,79%) calculée à travers la matrice de confusion montre une bonne précision par rapport aux autres études (Tableau 20). Cette précision reflète une précision élevée compte tenu de la valeur de l'indice de Kappa qui est de 0,81, une excellente précision d'après l'échelle établie par Landis et Koch en 1977.

Tableau 19 : Précision de la classification des études antérieures par rapport à la présente étude

	Rambintntsoa, 2021	Soloniaina, 2016		Rakoto, 2014	Ratovoson, 2011
Zone d'étude	Territoire Lemak'i Onilahy (Sud-Ouest)	Arivonimamo (Centre)	Ambatovaky (Nord-Est)	Kolo Ala Manompana (Est)	Analanjirofo (Est)
Nombre de classes	9	4	4	6	5
Nombre de points de vérification	327	264	253	113	159
Précision (%)	83,79	82,58	84,59	76,99	78,52

I.1.2. Discussions sur les méthodes d'analyses des changements d'occupation des sols utilisées

L'analyse des changements de l'occupation des sols s'est effectuée en superposant les cartes d'occupation des sols des six années. Ce choix de comparaison des six cartes augmente la détection des changements de l'occupation des sols surtout des couvertures forestières. La majorité des études effectuées auparavant se font sur trois années, la durée d'une période étant de 10 ans, et les analyses se limitent aux changements observés en comparant trois cartes d'occupation des sols. La division de la période d'étude en six contribue par conséquent à l'augmentation de précision sur la situation de la dynamique des classes d'occupation des sols dans le Territoire Lemak'i Onilahy.

I.2. Discussions sur les résultats

I.2.1. Les taux de déforestation dans le Sud-Ouest

Les taux généraux de déforestation observés augmentent et diminuent successivement pendant les cinq périodes de références étudiées. Le taux de déforestation annuel pendant la période 1989-2013 de la présente étude montre une valeur plus faible (0,95% par an) par rapport au taux de déforestation trouvé par Hosnah (2013) pendant la période 1989-2010 (1,19%.an⁻¹).

Pour les fourrés, la présente étude montre un taux de déforestation annuel plus faible (1,29%) entre 1989 et 2001, que celui de Masezama *et al.* (2013) dans le district de Toliara II entre 1990 et 2000 (1,8%). Après 2001, La perte en forêts sèches a continué d'augmenter, ce qui est également rapporté par Hervé *et al.* (2015a) pour le cas de la forêt des Mikea localisée au Nord du TLO pendant la période 1999-2010.

Une étude plus générale (ONE, DGF, MNP, WCS & Etc Terra, 2015) a évalué le taux de déforestation de l'écorégion de la forêt sèche à 1,8% entre 2005 et 2010, puis à 2,29% entre 2010 et 2013, montrant une augmentation considérable de la pression contre la forêt sèche en l'espace de 4 années. La présente étude montre également un taux de déforestation maximal des forêts sèches, soit de 1,98%.an⁻¹ entre 2007 et 2013.

Par rapport aux autres taux de déforestation calculés par les études antérieures, les taux de déforestation annuels trouvés par cette étude sont plus faibles. Cette différence peut être expliquée par la différence des méthodes utilisées, la durée des périodes considérées par chaque étude et la superficie totale de chaque zone étudiée.

En effet, la présente étude a utilisé des outils plus récents dans l'élaboration des cartes d'occupation du sol permettant d'améliorer la précision de la classification obtenue. L'outil *dzetsaka* avec la méthode *Random forest*, expliqué précédemment permet d'obtenir des résultats plus précis quant à l'identification des forêts. L'évaluation des taux de déforestation dépend étroitement de la qualité des cartes d'occupation sur lesquelles se base l'étude. Il est ainsi possible que les taux de déforestation trouvés par les études antérieures soient surestimés.

La durée des périodes considérées pour la comparaison des taux de déforestation diffère également selon les études. Un décalage d'une, deux ou plusieurs année(s) dans la comparaison (par exemple 1989 au lieu de 1990 ; ou 2013 au lieu de 2010) modifie la valeur des taux de déforestation calculés. Autrement dit, les défrichements des forêts pendant une année n'est pas la même pour l'année suivante, ils dépendent de la situation socioéconomique à laquelle les habitants font face pendant cette année, reliée également aux conditions climatiques de cette année.

I.2.2. Comparaison des taux de déforestation de l'Est et de l'Ouest du Territoire Lemak'i Onilahy

Représentées respectivement par les forêts sèches et les fourrés, les couvertures forestières de l'Est et de l'Ouest dans le territoire du Lemak'i Onilahy subissent des pressions se présentant sous différentes formes. La plus récente étude de la dynamique de la couverture forestière réalisée dans ce territoire remonte en 2013.

Pour comparer les résultats, le taux de déforestation des forêts sèches entre 1989 et 2013 a été évalué, et il est à $1,05\%.an^{-1}$ pour la présente étude contre $1,5\%.an^{-1}$ pour l'étude d'Hosnah. A l'opposé des résultats sur les forêts sèches, le taux de déforestation annuel des fourrés de la présente étude est plus élevé (0,84%) que le taux trouvé par Hosnah (0,51%). La différence entre ces valeurs s'explique par l'étendue de la zone d'étude de la présente étude qui est plus grande par rapport à la surface de la zone d'étude d'Hosnah (2013). Cette dernière a été effectuée seulement dans les communes de Betioky et Soalara Sud (Annexe 8), et n'a inclus ni les forêts sèches au nord du TLO, entre le fleuve Onilahy et le village d'Ankazomanga ; ni la forêt de Belambo.

Pour conclure, l'analyse a permis encore de démontrer que les forêts sèches sont les plus touchés par la déforestation que les fourrés. Ceci peut s'expliquer par les conditions environnementales dans les forêts sèches qui sont plus favorables à la culture que dans les fourrés.

I.2.3. Rôle des Aires Protégées dans la réduction de la déforestation

Comme le rôle des Aires Protégées dans la réduction de la déforestation semble être remise en question, les résultats de cette étude contribue à éclairer certaines hypothèses émises sur ce sujet. Pour le cas du Territoire du Lemak'i Onilahy, les facteurs de déforestation identifiés sont essentiellement liés aux activités anthropiques, regroupant la pratique de l'agriculture sur brûlis ou « hatsake » conduisant à une savanisation, la fabrication de charbon et le pâturage caprin (Hosnah, 2013 ; Masezamana et al., 2013 ; Hervé et al., 2015a). Pour les facteurs environnementaux, la sécheresse a été identifiée comme un facteur de déforestation, l'aggravant à plus de 17% dans les zones arides et semi-arides (Desbureaux & Damania, 2018) par rapport à une période considérée neutre du point de vue climatique.

En outre, l'agriculture itinérante sur brûlis ou *hatsake* combinée avec l'exploitation minière constituent une menace non négligeable (Tovondrazane *et al.*, 2020) pour les couvertures forestières de cette partie Sud-Ouest de l'île. Les zones impactées par l'exploitation minière dans le TLO (Annexe 9) sont principalement les communes d'Ambolofoty, Soalara Sud, Beantake et Betioky Atsimo (EY, 2019). La mise en culture par abattis-brûlis conduit à une savanisation (Hervé *et al.*, 2015) et à une diminution de la résilience de ces formations forestières. Depuis 1987, le boom de maïs accentué par l'inflation qui a augmenté de 620% de 1985 à 1998 ; l'invasion des criquets pendant cette année (1998) (Razanaka *et al.*, 2001 ; Casse *et al.*, 2004) ; le phénomène migratoire (Moizo, 2000) ont contribué fortement à la modification des modes de vie des habitants qui réagissent en colonisant les surfaces surtout forestières. En effet, le boom de maïs a apporté d'important changement dans l'occupation des sols dans les forêts sèches de l'Ouest et du Sud-Ouest. Les principales demandes en maïs venant des îles voisines dont l'île Maurice et La Réunion (Casse *et al.*, 2004), pour l'alimentation de leurs bétails. L'arrivée des migrants a accentué la fabrication de charbon (Casse *et al.*, 2004), une menace considérable pour la forêt sèche.

Pendant la période 2007-2019, la crises politique en 2009 a favorisé considérablement l'insécurité au Sud de Madagascar par l'intensification des *malaso*, des groupes de pilliers de zébus (Feldt, 2015 ; Randriamiary, 2015 ; Götter, 2016). Cette crise a causé le retrait des nombreux partenaires financiers, responsable de plus de 40 % des dépenses du gouvernement (Hänke *et al.*, 2017), conduisant à un manque de financement et d'organisation des projets de l'Etat depuis. D'après les entretiens auprès des villageois du TLO, leur niveau de vie a considérablement baissé après cette crise.

Toutes ces situations poussent les habitants à apporter des modifications dans son entourage en exploitant les ressources forestières (Soloniaina, 2016), en colonisant des parcelles pour la culture (Hervé *et al.*, 2015a) et en aménageant pour le pâturage de leurs animaux d'élevage qui assure l'alimentation des habitants (Hänke, 2016) pendant les périodes de soudure : la période de sécheresse ou faible voire inexistence des productions agricoles. L'intervention des différents projets axés dans cette zone vulnérable qu'est la partie Sud-Ouest, semble ne pas vraiment tenir compte des problématiques socioéconomiques ayant des impacts sur la communauté locale de cette zone (Ferraro, 2002 ; Kaufmann, 2008), mais contribue ponctuellement à l'amélioration du niveau de vie des communautés concernées par les projets. Sans oublier que de leur côté, les villageois contribuent

également à l'échec de l'impact des aides apportées par les différents projets qui se sont succédés. L'attachement plus ou moins des habitants aux valeurs traditionnelles, combiné avec l'aspiration et/ou les contraintes de la « modernisation » est considéré comme un facteur de blocage (Urfer, 2012) pour le développement.

Du point de vue climatique, les études effectuées dans cette partie de Madagascar montrent une succession aléatoire de période humide et de période sèche. En effet, le facteur *précipitation* fait partie des facteurs limitants dans la région semi-aride limitant les activités agricoles des villageois. Rasamimanana *et al.* (2016) a identifié des périodes extrêmes de sécheresse en 1991-1992, pouvant être à l'origine du taux de déforestation élevé entre la période 1989 et 1995 de l'étude. Tandis que Raminintsoa *et al.* (2021) a identifié, en utilisant l'indice SPEI ou *Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index*, des périodes de sécheresse extrême en 1992 et 2014 et une période de sécheresse récurrente (en termes de durée) entre 2001 et 2007. Ces études contribuent à expliquer les pertes importantes et la dégradation de la couverture forestière à partir de 2001. En effet, la sécheresse a des impacts, d'abord naturels sur les écosystèmes aussi bien terrestre qu'aquatique en modifiant la durée et l'intensité de la saison sèche ; puis des impacts indirects sur les habitants qui modifient leur mode de vie suite aux changements causés par cette sécheresse.

Le phénomène migratoire dans cette partie tient également une place importante dans l'explication de la déforestation. Cette migration concerne principalement la population venant du Sud, notamment de l'éthnie *Antandroy*, en raison de la sécheresse et de la recherche de terrain plus propice à leur survie (OIM, 2018). En effet, des vagues migratoires significatives dans le Sud se sont succédées depuis la première guerre mondiale (1928, 1931, 1943, 1990-1994, 1998-2000), affectant négativement les différentes régions de destination des migrants. Les raisons des migrations diffèrent selon les périodes, à savoir le déficit de la précipitation (1990-1994) ou l'économie minière artisanale (1998-2002). Malgré que la relation entre la sécheresse et la migration dans le Sud de Madagascar a été étudiée et montrée (Thibaud, 2010 ; Canavesio, 2010 ; Fauroux, 2001 ; Koto, 1995), la sécheresse joue seulement le rôle de « détonateur » (Canavesio, 2015). En effet, des facteurs socio-économiques indépendants de la sécheresse poussent les habitants du Sud à migrer, ce qui explique les migrations au cours de périodes considérées « neutres » du point de vue climatique. Accentuée par la sécheresse, la migration devient de plus en plus importante.

Selon la période étudiée, entre 1989 et 2007, période pendant laquelle seulement la Réserve Spéciale Beza Mahafaly est considérée comme Aire Protégée, le taux de déforestation annuel dans l'Aire Protégée est inférieur à celui des aires non protégées. Cependant après 2007, avec la NAP Amoron'i Onilahy comme Aire Protégée, le taux de déforestation dans les forêts protégées est supérieur à celui dans les aires non protégées. Or, la déforestation tient compte de plusieurs paramètres selon le contexte socio-économique et culturelle de la zone d'étude. La différence entre les valeurs des taux de déforestation dans les deux Aires Protégées peut également être expliquée par la différence entre leur mode de gouvernance et de gestion ; et la différence de superficie à gérer peut également influencer le

taux de déforestation. La superficie de la RS Bezà Mahafaly n'occupe qu'environ 5,7% de la superficie de la NAP Amoron'i Onilahy incluse dans le TLO.

Les résultats de la présente étude coïncident avec les résultats trouvés par Desbureaux et Damania (2018) qui affirment l'efficacité partielle de la mise en place des Aires Protégées pour diminuer la déforestation à Madagascar, appuyés également par les résultats de Desbureaux en 2016. Ils ont montré que la gestion des Nouvelles Aires Protégées semble ne pas être efficace contre la neutralisation de toutes les pressions sur la forêt (Desbureaux & Damania, 2018).

En parlant de cette gestion, la NAP est une Aire Protégée de catégorie V ou paysage harmonieux protégé (Razafindraledy, 2018), alors que la Réserve Spéciale compte parmi les Aires Protégées de catégorie IV (Ranaivoarisoa, 2008). La différence entre le mode de gestion et l'objectif de ces Aires Protégées réside dans l'échelle de conservation. En effet, les Aires Protégées de la catégorie V visent à protéger des paysages, tandis que les Aires Protégées de la catégorie IV, visent à protéger des espèces ou des habitats particuliers (Woodley, 2018).

Les principales causes de déforestation dans la NAP Amoron'i Onilahy sont la fabrication de charbon, activités d'appoint des habitants vivant au bord du fleuve ; et la collecte de bois de chauffage (TANTSAN, 2009), des bois morts et secs utilisés pour cuire les repas. Quant à la RS Bezà Mahafaly, les principales pressions concernent la divagation des bétails et les coupes sélectives se traduisant par l'ouverture de trouée et de voie d'accès (Ranaivonasy, *et al.*, 2016) pour le transport de ces bois coupés illicitement.

La mise en place des Aires Protégées contribue ainsi à réduire la perte en couverture forestière à condition que l'approche utilisée soit d'abord spécifique, local, particulier, plutôt que l'approche paysage ; et que cette approche soit par la suite suivie d'une gestion active de la zone à conserver, même si le contexte dans lequel vivent les habitants contribue également à l'aggravation de l'exploitation de la forêt.

I.2.4. Les mécanismes conduisant à la déforestation dans le Territoire du Lemak'i Onilahy

Les résultats de l'analyse de la dynamique des couvertures forestières dans le Territoire du Lemak'i Onilahy permettent de déduire un processus expliquant la conversion des forêts en autres surfaces résultant des activités humaines (Figure 8).

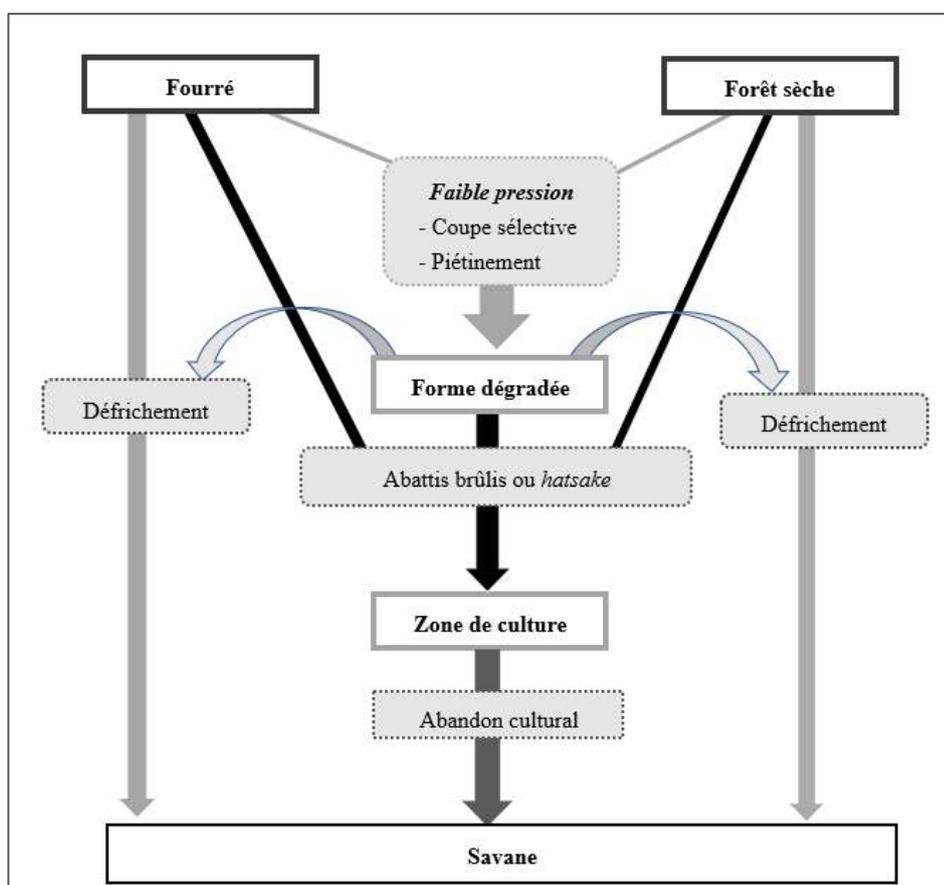


Figure 8 : Mécanisme de déforestation dans le Territoire du Lemak'i Onilahy

Pour le cas des forêts sèches en général, outre les facteurs expliqués précédemment, les facteurs causant sa disparition sont liés à la production de charbon pour la ville de Toliara (Randriamalala *et al.*, 2017) ; et à l'intensification agricole.

I.3. Discussions sur les hypothèses

I.3.1. Première hypothèse

« Les couvertures forestières tendent à disparaître dans le TLO au bénéfice des zones de exploitées par les habitants », stipule la première hypothèse. L'analyse de l'évolution des couvertures forestières montre en effet une perte en surface observée de 1989 en 2019 et continuellement entre chaque date. Presque le quart du TLO (901 km²) ont subi une transformation des forêts sèches en forêt dégradée, savane et zone de culture. Tandis que plus du quart du TLO (1 007 km²) ont été victime de la transformation des fourrés en fourrés dégradés, zone de culture et savane. En d'autres termes, la moitié, voire presque la totalité des surfaces perdues des couvertures forestières sont dégradées (perte de 48,67%

des FS et 68,57% des F), défrichées (perte de 37,64% des FS et 23,32% des F) ou converties en zones cultivées (perte de 1,05% des FS et 12,66% des F). La première hypothèse est par conséquent vérifiée.

I.3.2. Deuxième hypothèse

« La partie Est du TLO est plus touchée par la déforestation que la partie Ouest. » avance la deuxième hypothèse. Sa vérification a été effectuée en se référant aux taux de déforestation des forêts sèches et des fourrés. Même si pendant les 3 sur 5 périodes, les valeurs des taux de déforestation annuel des fourrés sont supérieures à celles des forêts sèches, le taux de déforestation global de 1989 à 2019 des forêts sèches est supérieur à celui des fourrés, soit 1,05 $\% \cdot \text{an}^{-1}$ contre 0,82 $\% \cdot \text{an}^{-1}$. La deuxième hypothèse est donc également vérifiée.

I.3.3. Troisième hypothèse

« La présence des Aires Protégées réduit la perte en couvertures forestières dans le TLO. », stipule la troisième hypothèse. D'après les résultats de la présente étude, le taux de déforestation annuel dans les Aires Protégées et les aires non protégées diffèrent selon la période considérée. Pour la première période (1989 et 2007), il y a moins de déforestation dans l'Aire Protégée (Réserve Spéciale Bezà Mahafaly) qu'en dehors. Tandis que pendant la deuxième période (2007-2019), il y a plus de déforestation dans les Aires Protégées (Réserve Spéciale Bezà Mahafaly et NAP Amoron'i Onilahy) qu'en dehors. Par ailleurs, une comparaison entre le taux de déforestation entre la Réserve et la NAP montre que le taux de déforestation dans la Réserve est supérieur au taux de déforestation dans la NAP, pendant la période 2007 et 2019, aboutissant à une conclusion disant que l'approche spécifique, accompagnée d'une gestion active est plus efficace pour réduire la déforestation, que l'approche paysage. La troisième hypothèse est par conséquent partiellement vérifiée.

II. Recommandations

II.1. Recommandations sur la méthodologie

L'utilisation de la télédétection pour décrire des changements d'occupation du sol sur 30 années fait intervenir différents paramètres. La différence des satellites sources des images utilisées dans cette étude (Landsat 5 et le Landsat 8) influence les caractéristiques des images captées. En effet, les instruments de capture des images sont différents, à savoir le MSS et TM pour le Landsat 5 ; et OLI et TIRS pour le Landsat 8. De même pour le nombre de bandes spectrales qui est de 6 pour le Landsat 5 et 8 pour le Landsat 8. Cette différence résulte de l'amélioration de la performance des satellites par les concepteurs dans le but d'obtenir des images plus précises, plus facile à traiter/analyser et le plus proche possible de la réalité. Pour minimiser les erreurs dans l'acquisition des images, il est préférable d'utiliser des images ayant les mêmes caractéristiques atmosphériques et bioclimatiques dans la mesure du

possible. Sinon, utiliser des images prises dans la même saison/période avec le minimum d'écart pour favoriser la précision de la classification à établir.

Par ailleurs, les traitements des images depuis leur acquisition jusqu'à l'obtention des cartes d'occupation des sols doivent être homogène. Avec la progression des logiciels de traitement des images satellites, il faut se mettre à jour sur les plugins et les méthodes développées récemment pour choisir lesquels sont adaptés à une étude donnée. Si le temps le permet, essayer ces différentes méthodes permet d'identifier laquelle est la meilleure, en comparant la précision donnée par chaque méthode.

Pour les vérifications sur terrain, les limites de cette étude concernent surtout la difficulté d'accès à certaines zones. La solution à ce problème consisterait à utiliser des appareils pouvant capter des images aériennes, commandés à distance, comme les drones, capable de survoler les zones inaccessibles d'accès.

II.2. Recommandation par rapport aux résultats

La disparition de la couverture forestière au profit des zones exploitées par les habitants (surtout des zones de culture) permet de comprendre l'utilité de la forêt pour les habitants. La considération des facteurs à l'origine de cette dynamique contribue à compléter ces résultats et apporter plus d'explications sur le mécanisme de la déforestation. L'objectif étant de déterminer quels sont les facteurs déterminants dans la modification de l'agencement des couvertures forestières. Dans cette optique, les facteurs qui participent à la modification du paysage peuvent être regroupés en six catégories (Baudot et al., 1997), dont les facteurs culturels, le contexte économique-administratif, les facteurs démographiques, les données physiques (climatiques, topographiques, etc), les potentialités agronomiques et la situation géographique. Une implication de la perception de la population locale servira également d'appui à cette étude future à travers une descente sur terrain pour collecter les informations nécessaires.

La comparaison de la déforestation entre la forêt de l'Est (forêt sèche) et la forêt de l'Ouest (fourré) permet d'initier des analyses plus approfondies sur les autres paramètres pouvant être considérées pour la comparaison. Tels sont le cas par exemple de (i) l'accessibilité qui contribue probablement à la déforestation plus accentuée des forêts sur les bordures des pistes ou à proximité des villages ; (ii) la présence d'espèces particulières pouvant influencer la déforestation dans des zones définies ; (iii) la définition de points de localités clés pour la conservation afin d'expliquer la déforestation et d'intervenir en fonction.

Selon les résultats obtenus sur l'analyse du rôle des Aires Protégées dans la déforestation, il est recommandé de renforcer les capacités des gestionnaires locales des Aires Protégées ou des forêts gérées localement, tout en consolidant les relations entre ces responsables afin d'étendre un réseau plus efficace pour la conservation des écosystèmes restants.

II.3. Recommandations sur l'application des résultats de la dynamique forestière sur la conservation de la biodiversité

Une étude basée sur l'écologie du paysage regroupe plusieurs disciplines complémentaires qui contribuent à la compréhension de la modification de la structure et de la composition dans une zone étudiée. En parallèle, comprendre le fonctionnement des écosystèmes, les relations entre chaque espèce floristique et faunistique ainsi que leur rôle dans la stabilisation de l'environnement apporte à cette connaissance des informations nécessaires à l'application d'une conservation efficace et durable. Or, il est connu que l'impact de la dégradation des paysages et du milieu entraîne le dysfonctionnement des écosystèmes les rendant par la suite de plus en plus vulnérable aux facteurs non seulement anthropiques mais également naturels comme la variabilité climatique.

Il est par conséquent indispensable de concilier cette étude à l'échelle paysage avec les données connues à l'échelle spécifique. Pour ce faire, les résultats issus de cette étude permettent de :

- Faciliter les suivis des habitats naturels surtout des espèces menacées ;
- Informer sur la situation actuelle de l'occupation des sols dans le territoire du Lemak'i Onilahy ;
- Conscientiser les décideurs et la population locale sur l'état actuel de la forêt et de leur dégradation.

Les activités permettant d'atteindre ces objectifs se résument par (i) le renforcement des liens entre les acteurs (associations et groupements villageois) dans la conservation de la biodiversité, une des principales raisons de la mise en place du TLO ; (ii) la vulgarisation de la carte d'occupation des sols la plus récente (2019) ; (iii) l'organisation de séance de sensibilisation de la population locale sous forme d'affichage, par radio FM ou par un atelier auprès de la communauté et des responsables de tous les niveaux ; (iv) la proposition d'alternative à l'exploitation de la forêt (apiculture, activité artisanale, etc) pour les habitants.

A l'issue de la présente étude, est sortie une perspective qui vise à améliorer la conservation de la biodiversité dans le territoire du Lemak'i Onilahy. Des objectifs spécifiques avec leurs activités respectives (Tableau 21) contribuent à l'atteinte de cet objectif :

OS 1 : Réduire la vulnérabilité des espèces par rapport à la structure du paysage sur terrain.

OS 2 : Renforcer les liens entre les acteurs dans la conservation de la biodiversité.

OS 3 : Contribuer à l'amélioration du niveau de vie des habitants.

L'échéance est soit à court terme, moins de 3 ans ; à moyen terme, entre 3-8 ans ; et à long terme, plus de 8 ans. Les sites concernés sont :

- Réserve Spéciale Bezà Mahafaly
- Forêt communautaire de Belambo
- NAP Amoron'i Onilahy
- Les 10 VOI ou APC membres du TLO
- Les blocs forestiers/couvertures végétales abritant des espèces vulnérables

Tableau 20 : Plan d'action par rapport à l'étude

Objectif principal : Améliorer la conservation de la biodiversité dans le Territoire du Lemak'i Onilaly					
Objectif spécifique 1 : Réduire la vulnérabilité des espèces par rapport à la structure du paysage sur terrain.					
Activités	Sous activités	Echéance	Responsables	IOV	Source de vérification
Inventaire des espèces vulnérables/menacées dans chaque bloc (forestier ou autre couverture végétale)	Mobilisation des responsables par VOI ou des habitants dans le TLO	Court terme	- Représentant étatique dans chaque village - Responsables des VOI - "Olobe" ou autorité villageoise	Nombre de personnes mobilisées, intéressées	Rapport mensuel
	Formation par groupe sur le déroulement d'un inventaire	Court terme	- Responsables du TLO et l'équipe sur place (formateurs) - Les personnes mobilisées (à former)	Niveau et capacité des personnes mobilisées à inventorier des espèces vulnérables (exactitude des données, durée de chaque inventaire et productivité du travail de groupe)	- Rapport hebdomadaire - Fiche de présence à chaque formation
	Appui technique pour l'inventaire	Court terme	- Bailleur de fond et responsable du projet en question - Responsables du TLO et l'équipe sur place	Nombre de matériels pour les inventaires	Fiche d'inventaire des matériels après chaque inventaire
	Suivi des inventaires et traitement des données collectées	Moyen terme	- Responsables du TLO et l'équipe	Densité des espèces inventoriées	Rapport mensuel et trimestriel
Conservation de l'habitat naturel des espèces identifiées vulnérables à la dégradation du paysage	Identification et priorisation des zones vulnérables à la dégradation de la structure du paysage	Moyen terme	- Responsables du TLO et l'équipe - Responsables des VOI/APC sur place	Nombre d'espèces vulnérable par zone/bloc	Rapport mensuel
	Intégration du respect des zones vulnérables dans les traditions, à travers le <i>Dina Be</i>	Moyen terme	- Responsable étatique par village - Responsable du <i>Dina be</i> par village - Responsables du TLO et l'équipe - Membres des VOI/APC	Nature et degré de punition des personnes ne respectant pas les termes établis	- Les textes dans le <i>Dina be</i> - Rapport mensuel/trimestriel
	Elaboration d'un plan d'aménagement participatif et communication des résultats	Moyen terme	- Responsable étatique par village - Responsables du TLO et l'équipe - Membres des VOI/APC - Habitants	- Plan d'aménagement établi - Evolution du nombre de personnes connaissant et utilisant le plan d'aménagement	Rapport trimestriel

Objectif spécifique 2 : Renforcer les liens entre les acteurs dans la conservation de la biodiversité.					
Activités	Sous activités	Echéance	Responsables	IOV	Source de vérification
Responsabilisation des habitants dans la conservation de la biodiversité	Affectation d'un responsable par zone (formée par plusieurs VOI)	Court terme	- Représentant étatique par village - Autorité villageoise ou « <i>Olobe</i> » - Responsables du TLO et l'équipe	- Nombre de VOI/groupes formés - Nombre des membres des VOI, APC ou groupe.	Rapport mensuel
	Renforcement des VOI/APC existants	Moyen terme	- Responsables du TLO et l'équipe - Responsables des VOI/APC sur place	- Fréquence de réunion des VOI ou APC - Evolution et impact de leurs activités mensuelles sur la réduction des pressions (nombre de délits par mois par exemple)	Rapport trimestriel
	Création d'unités de conservation composées uniquement par des femmes et/ou des enfants	Long terme	- Représentant étatique et villageois - Responsables du TLO et l'équipe - Habitants surtout les femmes et les enfants	- Nombre de groupes formés - Evolution des membres de chaque groupe	Rapport trimestriel
	Elaboration d'un plan d'action trimestriel pour chaque groupe	Long terme	- Responsables du TLO et l'équipe - Responsables par groupe	- IOV dans les plans d'action établis - Efficacité du plan : suivi du taux annuel de changement d'occupation des sols depuis 2019	Rapport trimestriel et annuel
Renforcement de la plateforme entre les acteurs dans la conservation	Echange des expériences entre les VOI/APC ou autres organisations comme les Aires Protégées	Moyen terme	- Responsables du TLO et l'équipe - Responsables de chaque organisation de conservation	Evolution de la fréquence des réunions entre les acteurs	Rapport trimestriel
	Echange de visite sur terrain entre les unités de conservation	Moyen terme	- Responsable étatique et villageois par village/zone - Responsables de chaque unité - Habitants	Nombre de visites effectuées par trimestre	Rapport trimestriel
	Elaboration d'un plan général de conservation et de communication, divisé ensuite en plan spécifique pour chaque unité	Long terme	- Responsables du TLO et l'équipe - Responsables de chaque VOI ou APC ou autres unités de conservation	- IOV dans les plans d'action établis - Efficacité du plan : suivi du taux annuel de changement d'occupation des sols depuis 2019	Rapport trimestriel et annuel

Objectif spécifique 3 : Contribuer à l'amélioration du niveau de vie des habitants.					
Activités	Sous activités	Echéance	Responsables	IOV	Source de vérification
Réduction de la vulnérabilité des activités pratiquées par les habitants	Identification des principales activités sources de revenus à renforcer	Court terme	- Services étatiques au niveau communal et villageois - Responsables du TLO et l'équipe - Les autorités villageoises - Habitants	- Nombre de types d'activités pratiquées par les habitants - Leur apport en revenus	- Liste des activités existantes - Rapport mensuel
	Organisation d'échange d'expérience entre les habitants par zone et par secteur	Moyen terme	- Autorités villageoises - Responsables du TLO et l'équipe - Habitants	- Nombre de participants à l'atelier - Evolution de la fréquence de l'atelier	- Fiche de présence - Rapport mensuel et trimestriel
	Création d'association villageoise par zone	Moyen terme	- Autorités villageoises - Responsables du TLO et l'équipe - Habitants	- Nombre d'associations formées	- Rapport trimestriel
	Appui et formation des habitants sur leurs activités	Moyen terme	- Services étatiques - Organismes d'appui - Services techniques - Responsables par secteur selon les activités des habitants	- Evolution des rendements ou productivités de leurs activités - Evolution de la fréquence de formation des habitants - Nombre d'habitants participant à la formation	- Fiche de présence - Rapport mensuel et trimestriel
Régularisation et amélioration des différentes filières dans lesquelles travaillent les habitants	Recherche de débouchés fixes des produits artisanaux et des sels gemmes	Moyen terme	- Services étatiques - Responsable du TLO et leur équipe - Entreprises en ville - Habitants	- Nombre de ménages ayant un débouché fixe	Rapport trimestriel
	Renforcement des services responsables des ristournes	Long terme	- Services étatiques au niveau national, régional, communal et villageois - Autorités villageoises - Habitants	- Valeurs des ristournes par mois	Rapport mensuel, trimestriel et annuel
	Réduction des intermédiaires entre les producteurs et les consommateurs	Long terme	- Services étatiques au niveau national, régional, communal et villageois - Collecteurs des produits locaux - Autorités villageoises - Habitants	- Evolution annuelle du nombre d'intermédiaire	Rapport mensuel, trimestriel et annuel

CONCLUSION

L'étude de la dynamique de la couverture forestière entre 1989 et 2019 dans le Territoire du Lemak'i Onilahy a permis de mesurer, grâce à l'application de la géomatique, les échanges entre les couvertures forestières et les autres classes d'occupation des sols. Malgré les quelques limites de cette approche, les analyses ont donné des résultats suffisamment précis pour l'atteinte des objectifs initialement assignés à l'étude.

En se référant aux végétations caractéristiques de la zone d'étude, neuf classes ont été différenciées, dont la « zone humide », la « forêt galerie », la « forêt sèche », le « fourré », la « forêt sèche dégradée », le « fourré dégradé », la « savane arborée », la « zone de culture » et la « savane herbeuse ». La classification obtenue présente une bonne précision selon l'indice de Kappa calculée, favorisant la fiabilité des résultats obtenus. L'année d'étude 1989-2019 a été divisée en cinq périodes de durée égale, soit de six années. L'analyse diachronique a révélé une perte des couvertures forestières, soit de 95,5% de la surface initiale et le cloisonnement des espaces naturels.

L'étude a montré une dominance de l'occupation des savanes dans le Territoire Lemak'i Onilahy : de 27% en 1989 à 37,34 % en 2019. Avec les changements qui se sont succédés pendant ces 30 années, ce sont les zones de cultures qui dominant en 2019 (16,05%) après les forêts dégradées (37,31%), témoignant la manifestation et l'impact des activités anthropiques dans cette région. Le taux de déforestation total entre 1989 et 2019 est de l'ordre de $0,93\%.an^{-1}$, avec un taux plus élevé pour les forêts sèches par rapport aux fourrés. Le taux de déforestation maximal pour les forêts sèches est observé dans la période 2007/2013, soit $1,98\%.an^{-1}$. Tandis que pour les fourrés, c'est en 1995-2001 que le taux maximal est observé ($1,88\%.an^{-1}$). Toutefois, comme les savanes ne proviennent pas toutes de la déforestation, une étude plus poussée sur les savanes qui ont existé avant 1989 mérite d'être effectuée.

La présente étude a également permis de mettre en exergue l'importance de la présence des Aires Protégées dans la réduction du taux de déforestation. Le taux de déforestation est réduit dans les zones protégées. Cette efficacité, étant étroitement lié à la nature de la gestion des Aires Protégées, montre la nécessité du renforcement et de l'extension des zones protégées existantes ainsi que la mise en place d'une plateforme reliant les acteurs dans la conservation afin de renforcer leur efficacité dans la conservation de la biodiversité.

La connaissance de la dynamique des couvertures forestières dans une zone exposée aux différents facteurs surtout climatiques qu'est le Territoire du Lemak'i Onilahy, constitue une donnée cruciale dans l'optique d'une conservation durable et inclusive de la biodiversité. En la conciliant avec les enjeux et les défis socioéconomiques auxquels font face les habitants de la région du Sud-Ouest, elle sert d'outil d'aide à la décision efficace et applicable surtout pour les communautés locales habitant le Territoire du Lemak'i Onilahy, en termes d'aménagement territorial. L'objectif étant de limiter les dégradations de l'écosystème pour conserver les espèces qui s'y abritent, tout en assurant que les habitants vivent correctement.

Références bibliographiques

- [1] **AIAC (2016)**. “Près du quart de la population mondiale dépend directement des forêts”, *landportal*, New & Events, Essolomwa, L., 21 Mars 2016, Agence d’Information d’Afrique Centrale. Consulté le 03 Février 2021.
- [2] **Andriatsiaronandroy R.O. (2018)**. *Dynamique récente d’évolution des mangroves de la région de Toliara (Madagascar)*, Géographie, Université d’Angers, Université de Tuléar.
- [3] **ANGAP, DFS, EEDR, (1998)**. *Etude pour l’élaboration d’un plan d’aménagement et de gestion au niveau de la Reserve Naturelle Intégrale de Tsimanampesotse : Diagnostic physico-bio-écologique*. Antananarivo: Ministère de l’Environnement.
- [4] **Antsonantenainarivony, O. (2017)**. *Parcours naturels du Plateau Mahafaly (Sud-Ouest de Madagascar) : groupements végétaux, espèces fourragères et leur valorisation*, Thèse de Doctorat, Université d’Antananarivo.
- [5] **Babarezoto, S.F. (2010)**. *Contribution à l’évaluation des espèces floristiques menacées et l’élaboration d’un plan de sauvegarde de la Forêt de l’Amoron’i Onilahy cas de la forêt de Mahaleotse*, Mémoire de Licence professionnelle, Université de Toliara.
- [6] **Bannari, A., El-Harti, A., Haboudane, D., Bachaoui, M., & El-Ghmari, E. (2007)**. “Intégration des variables spectrales et géomorphométriques dans un SIG pour la cartographie des aires exposées à l’érosion”, *Revue Télédétection*, 7 (1-2-3-4) : 327-342.
- [7] **Baribeau, C., & Germain, M., (2010)**. *L’entretien de groupe : considérations théoriques et méthodologiques*. Recherche qualitatives, 29(1).
- [8] **Baudot, P., Bley, D., Brun, B., Pagezy H., Vernazza-Licht, N. (1997)**. “Impact de l’Homme sur les milieux naturels : perceptions et mesures”. De Bergier, Travaux de la Société d’Ecologie Humaine.
- [9] **Beech, E., Rives, M, Andriambololoner, S., Lantoarisoa, F., Ralimanana, H., Rakotoarisoa, S., Ramarosandratana, A.V., Bartsow, M., Davies, K., Hills, R., Marfleet, K. & Jeannoda, V. (2020)**. *The Red List of Dry forest Trees of Madagascar*, Botanic Gardens Conservation International Descanso House, Richmond, Surrey, UK, BGCI.
- [10] **Behariva De Moussa, A. (2005)**. *Conception de l’espace comme identité chez les Tanosy immigrés du Moye, Onilahy Toliara (Madagascar)*, Projet de thèse, Mémoire de DEA, Université de Toliara.
- [11] **Bernard, (1978)**. *Essai de transition de la société mahafaly vers les rapports marchands*, ORSTOM, Paris.
- [12] **Besairie H., (1972)**. *Géologie de Madagascar, les terrains sédimentaires*. Annales géologiques de Madagascar. Fasc.XXXV. Tananarive.
- [13] **Bianchi, C.A. & Haig, S.M. (2013)**. “Deforestation trends of tropical dry forest in central Brazil”, *Biotropica* 45(3) : 395-400.
- [14] **Bonn, F., & Rochon, G. (1992)**. *Précis de télédétection*, Vol. 1 : Principes et méthodes, AUPELF, France, Presses de l’Université de Québec.
- [15] **Canavesio, R. (2010)**. *Exploitation informelle des pierres précieuses et développement dans les nouveaux pays producteurs. Le cas des fronts pionniers d’Ilakaka à Madagascar*, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux-III.
- [16] **Canavesio, R. (2015)**. “Les migrations dans le sud de Madagascar. Entre sécheresses occasionnelles et crise socio-économique structurelle”, *Autrepart* 2015/2 N° 74-75 : 259-278.

Références bibliographiques

- [17] **Casse, T., Milhoj, A., Ranaivoson, S., Randriamanarivo, J.R. (2004).** “Causes of deforestation in southwestern Madagascar: what do we know?”, *Forest Policy and Economics* **2004** : 33-48.
- [18] **Ceballos, G., Ehrlich, P.R., Barnosky, A.D., García, A., Pringle, R.M., & Palmer, T.M. (2015).** Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Adv*, 1, e1400253.
- [19] **Chapin III, F.S., Sala, O.E., Armesto, J.J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Huber- Sanwald, E., Huenneke, L.F., Jackson, R.B., Kinzig, A., Leemans, R., Lodge, D.M., Mooney, H.A., Oesterheld, M., LeRoy Poff, N., Sykes, M.T., Walker, B.H., Walker, M., Wall, D.H., (2000).** “Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100”, *Science*, **Vol 287** : 1770-1774.
- [20] **CPGU, (2012).** *Atlas de la vulnérabilité sectorielle de la région Atsimo-Andrefana*. Cellule de prévention et gestion des urgences, SOMEAH, Sary Tany.
- [21] **Damson, J., (2005).** *L'élevage bovin aux abords bas-Onilahy*, Mémoire de DEA, Université de Toliara.
- [22] **Desbureau, S. (2016).** *Efficacité des politiques de lutttes contre la déforestation et logiques d'action collective à Madagascar*, Thèse de PhD, Université d'Auvergne.
- [23] **Desbureaux, S., Damania, R. (2018).** “Rain, forests and farmers: Evidence of drought induced deforestation in Madagascar and its consequences for biodiversity conservation”, *Biological Conservation* **221** : 357-364.
- [24] **Desjardins, R. & Cavayas, F. (1991).** “Possibilités et limites des images satellites TM LANDSAT en matière d'occupation du sol : le cas de Montréal (Québec)”, *Cahiers de géographie du Québec* **35** (94): 137–151.
- [25] **Durrieu, S., Deshayes M. (1994).** “Méthode de comparaison d'images satellitaires pour la détection des changements en milieu forestier. Application aux monts de Lacaune (Tarn, France)”. *Annales des sciences forestières, INRA/EDP Sciences*, **51** (2) : 147-161.
- [26] **EY, (2019).** *Rapport de reconciliation 2018, Annexes*, EITI-Madagascar, 2019 EYGM Limited, Ernst & Young Madagascar.
- [27] **FAO & PNUE, (2020).** *La situation des forêts du monde 2020*. Forêts, biodiversité et activité humaine. Rome.
- [28] **FAO, (1990).** “L'importance de la pêche dans les petits plans d'eau du sud de Madagascar, cas des lacs Iotry et Ranomay”, Rakotoarisoa C. in *Cahier d'information des pêches*, FAO, Antananarivo, Direction de la Pêche et de l'Aquaculture.
- [29] **FAO (1997).** *Aménagement des forêts naturelles des zones tropicales sèches*. CahierFAO conservation 32, Italie, Bellefontaine, R., Gaston, A., Petrucci, Y.
- [30] **FAO, (2018).** *Définition d'un Système de classification de l'Utilisation et de l'Occupation des Terres (UOT) et la définition de la Forêt à Madagascar*. Rapport final.
- [31] **FAO, (2020).** *Évaluation des ressources forestières mondiales 2020 - Principaux résultats*. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca8753fr>
- [32] **Faramalala, M.H. & Rajeriarison, C., (1999).** *Nomenclature des formations végétales de Madagascar*, ANGAP, Antananarivo, USAID.
- [33] **Fauroux, E. (2001).** “Dynamiques migratoires, tensions foncières et déforestation dans l'Ouest malgache”, in Razanaka S. *et al.* (dir.), *Sociétés paysannes, transitions agraires et dynamiques écologiques dans le sud-ouest de Madagascar*, actes de l'atelier du Centre national de recherches sur l'environnement (CNRE) et l'Institut de recherche pour le développement (IRD), Antananarivo, 8-10 novembre, p. 91-105.

Références bibliographiques

- [34] **Feldt, T. (2015).** *Interrelatedness of grazing livestock with vegetation parameters and farmers' livelihoods in the Mahafaly region, southwestern Madagascar*, Dissertation, University of Kassel, Witzenhausen, Germany.
- [35] **Ferraro, P. J. (2002).** "The local costs of establishing protected areas in low-income nations: Ranomafana National Park, Madagascar", *Ecological Economics* **43**(2-3) : 261-275.
- [36] **Gardner, C.J., Gabriel, F.U.L., St. John F.A.V. & Davies, Z.G.(2015).** "Changing livelihoods and protected area management: a case study of charcoal production in south-west Madagascar", *Oryx* **50**, 3 : 495–505.
- [37] **Gasparri N.I., Grau H.R. (2009).** "Deforestation and fragmentation of Chaco dry forest in NW Argentina", *Forest Ecology and Management* **258** : 913-921.
- [38] **Girard, M.C., Girard, C.M. (1989).** *Télédétection appliquée, zone tempérée et intertropicales*. Sciences agronomiques, 1989, Masson.
- [39] **Götter, J. (2016).** "The cattle raiders leave us no choice: new transhumance in the Mahafaly Plateau region in Madagascar", *Madagascar Conservation & Development* **11**(1) : 12-22.
- [40] **Gow, B.A., (1997).** "Ratsiraka and Malagasy's socialist revolution", *Journal of Modern African Studies* **35**: 409–439.
- [41] **Guyot, L., (2002).** *Reconnaissance hydrogéologique pour l'alimentation en eau d'une plaine littorale en milieu semi-aride : Sud-Ouest de Madagascar*, Thèse de Doctorat, Université de Nantes.
- [42] **Hänke, H. (2016).** *Livelihoods on the edge: farming household income, food security and resilience in southwestern Madagascar*, Thèse de Doctorat, Université Georg-August de Göttingen.
- [43] **Hänke, H., Barkmann, J., Coral, C. Enfors Kaustky E., Marggraf, R. (2017).** "Social-ecological traps hinder rural development in southwestern Madagascar", *Ecology and Society* **22**(1) : 42.
- [44] **Hervé, D., Ratiarson, V., Randriamalala, J.R., Randriambanona, H.A., Razanaka, S. (2015a).** "Transitions post-forestières en forêt sèche caducifoliée et fourré xérophile (sud-ouest de Madagascar)", Article 13, p179-p192 in Hervé et al., 2015b.
- [45] **Hervé, D., Razanaka S., Rakotondraompiana S., Rafamantanantsoa F., Carrière S. (eds.) (2015b).** *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.
- [46] **Heurtebise, G. (1981).** *Les anciennes cultures de l'Androy central*. Taloha 10 1981.
- [47] **Hosnah, H.B. (2013).** *Dynamique du couvert forestier dans le Sud-Ouest de Madagascar : cas du fourré xérophile de Betioky-Sud et Soalara-Sud*, Mémoire de DEA, Université d'Antananarivo.
- [48] **Houdanov, R.D. (2014).** *Causes et dynamiques spatio-temporelles de la végétation dans la région Menabe au Sud-Ouest de Madagascar*, Mémoire de Master II, Université d'Antananarivo.
- [49] **Humbert, H. (1955).** "Les territoires phytogéographiques de Madagascar". Dans Colloques internationaux du CNRS LIX. *Les divisions écologiques du Monde* pp. 439-448.
- [50] **IDL (2001).** *ENVI User-s Guide*. © Research Systems, Inc.
- [51] **IDL (2009).** *ENVI User-s Guide*. ITT Visual Information solutions.
- [52] **IUCN (2019).** *Dynamiques spatiales des écosystèmes terrestres, côtiers et marins de Madagascar - Une première application des critères de la Liste rouge des écosystèmes de l'UICN*. XXp in press.

- [53] **Janssen, T.A.J., Ametsitsi, G.K.D, Collins, M., Adu-Bredu, S., Oliveras, I. Mitchard, E.T.A., Veenendaal, E.M. (2018).** “Extending the baseline of tropical dry forest loss in Ghana (1984-2015) reveals drivers of major deforestation inside a protected area”. *Biological conservation* **218** : 163-172.
- [54] **Javeau, C. (1985).** *L'enquête par questionnaire: manuel à l'usage du praticien*, Etude de méthodologie, Editions de l'Université de Bruxelles, 3^{ème} Edition-2^{ème} tirage, Bruxelles, Collection de l'Institut de Sociologie.
- [55] **Kaufmann, J. C., editor. (2008).** *Greening the Great Red Island: Madagascar in nature and culture*. Africa Institute of South Africa, Pretoria, South Africa.
- [56] **Kobbe, S., Verjans, E., Nopper, J., Riemann, J.C., Prill, L., Andrianasolo, T., Rakotondranary, J., Fraust, D., Ratsimbarison, R., Kübler, D. (2015).** *Conclusions préliminaires – Recherche participative pour le soutien de la gestion durable des terres du Plateau Mahafaly dans le sud-ouest de Madagascar*, SuLaMa, Université de Hambourg, Andrianasolo T., Kübler, D.
- [57] **Koechlin, J., Guillaumet, J.L., Morat, Ph., (1974).** *Flore et végétation de Madagascar*. Vaduz: J. Cramer.
- [58] **Koto, B. (1995).** *Relations ville-campagne dans le sud-ouest de Madagascar : exemple de Tuléar*, Thèse de Doctorat, Université Bordeaux-III
- [59] **Laizy, M.B. (2012).** *Identification et analyse des activités génératrices de revenu (AGR) - Cas de 5 communes pilotes de la zone d'intervention du projet SLM circonscrites à l'intérieur du plateau Mahafaly et Karimbola*, Mémoire d'Ingénieur, Université d'Antananarivo.
- [60] **Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Xu, J., (2001).** “The causes of land-use land cover change: moving”, *Global Environmental Change* **4**(11) : 169-261.
- [61] **Landis J. & Koch G., (1977).** “The measurement of observer agreement for categorical data”, *Biometrics* **33** : 159-74.
- [62] **Locatelli, B. (2000).** Pression démographique et construction du paysage rural des tropiques humides : l'exemple de Mananara (Madagascar), Thèse de Doctorat, Université de Paris-Saclay.
- [63] **Lowry, P. P., II, Schatz G.E., Phillipson., P.B. (1998).** “Classification de la végétation naturelle et anthropique de Madagascar”, *Bull. Acad. Natl. Madagascar*, n.s., **73** : 219–233.
- [64] **Mack, R. N., Simberloff, C. D., Lonsdale, W. M., Evans, H., Clout, M. et Bazzaz, F., (2000).** “Biotic invasions: Causes, Epidemiology, Global Consequences and Control”, *Issues in Ecology* **5** : 1-20.
- [65] **Masezamana, H.N., Andrianarisoa, J.H., Raoliarivelo, L.I.B. et Randriamalala, R.J. (2013).** *Identification et Analyse d'Activités Alternatives à la Fabrication de Charbon de Bois dans le District de Toliara II*. Q096 Project Final Report, DERAD, Eastern and Southern Africa Partnership Program, Antananarivo.
- [66] **MNP (2019).** « Actualités — Conservation de nos Aires Protégées » [archive], sur <https://www.parcsmadagascar.com> site officiel de Madagascar National Parks. Consulté le 04 Février 2021.
- [67] **Moat, J., Smith, P., (2007).** *Atlas de la végétation de Madagascar*, Kew: Royal Botanic Gardens, Richmond, Surrey, UK, Moat, J., Smith, P.
- [68] **Moizo, B. (2000).** “Déforestation et dynamiques migratoires (Madagascar)”. *Horizon IRD* pp.170-185.
- [69] **Narendra Prasad, S. (1998).** “Conservation planning for the Western Ghats of Kerala. II. Assessment of habitat loss and degradation”. *Curr. Sci*, **75** : 228 - 285.
- [70] **Nasi, R. (1994).** *La végétation du centre régional d'endémisme soudanien au Mali. Etude de la forêt des monts Mandingues et essai de synthèse*, Thèse de doctorat, Université de Paris Sud.

- [71] **Noromiarilanto, F., (2016).** *Déforestation, occupation des terres et évaluation de la sécurité alimentaire en région Mahafaly, Toliara, Madagascar*, Thèse de Doctorat, Université d'Antananarivo.
- [72] **OIM (2018).** *Défis, enjeux et politiques : Migration, environnement et changement climatique à Madagascar*. Organisation Internationale pour les migrations. Consortium Magma. MEED, IRD, CNRE.
- [73] **ONE, DGF, MNP, WCS & Etc Terra (2015).** *Changement de la couverture de forêts naturelles à Madagascar, 2005-2010-2013*. Antananarivo. 21p., 21 pl. A3 & cartographie A0.
- [74] **PAG (2016).** *Cartographie des formations végétales particulières*. Parc amazonien du Guyane – Parc National.
- [75] **Perrier de la Bathie, H., (1921).** *La végétation malgache*, Annales du musée colonial de Marseille, XXIX.
- [76] **Pontius, J. (2000).** “Quantification error versus location in comparison of categorical maps”, *Photogrammetric engineering and remote sensing* **66** (8) : 1011-1016.
- [77] **Pratt, W.K. (1991).** *Digital image processing*, New York, John Wiley & Sons.
- [78] **Primack, R.B. & Ratsirarson, J. (2005).** *Principe de Base de la Conservation de la Biodiversité*, Édité avec le concours de l'E.S.S.A et du C.I.T.E, Antananarivo.
- [79] **Quivy, R., & Van Campenhoudt, L., (1995).** *Manuel de recherche en sciences sociales*. Dunod, Paris.
- [80] **Rabenilala, F. M. (2011).** *Fragmentation et dynamique du paysage de la forêt humide de basse altitude: Cas de Manompana (Nord-Est de Madagascar)*, Thèse de Doctorat, Université d'Antananarivo.
- [81] **Radonarison, A.J (2015).** *Analyse de la dynamique spatio-temporelle du paysage forestier à l'échelle écorégionale de Madagascar*, Mémoire d'Ingénieur, Université d'Antananarivo.
- [82] **Raharinirina T.L.N. (2009).** *Contribution à l'élaboration de modèles de restauration de la formation végétale de l'Aire Protégée communautaire Andatabo- St Augustin*, Mémoire de DEA, Université de Toliara.
- [83] **Rakotomalala, J. (2008).** *Etude des séries évolutives des systèmes agraires en relation avec les changements climatiques*, Mémoire d'Ingénieur, Université d'Antananarivo.
- [84] **Rakotomavo, A. (2010).** *Etat des lieux et dynamique de la mangrove du delta de Mangoky, Sud-Ouest de Madagascar*, Thèse de Doctorat, Université d'Antananarivo.
- [85] **Rakotovoao, V., Rakotondraompiana, S., Ravonjimalala, H.R., Randriamalala, J.R., Razanaka, S., Hervé, D. (2015).** “Evolution du biotope du criquet migrateur dans les communes de Soalara et le district de Betioky Sud, sud-ouest de Madagascar”, Article 11, p157-p168 in Hervé *et al.*, 2015b.
- [86] **Ramarosonarivo, M. (2013).** *Analyse du processus de fragmentation des forêts naturelles de la nouvelle Aire Protégée Mangabe – Ranomena – Sasarotra*, Mémoire d'Ingénieur, Université d'Antananarivo.
- [87] **Rambinintsoa, M.M., Ratsirarson, J., Ramanakoto, M.F., Andriamahafaly, R.T.F. (2021).** “Analyse de la dynamique de l'occupation des sols dans le Territoire du Lemak'i Onilahy face aux enjeux socio-environnementaux du Sud-Ouest de Madagascar”, *Conférence internationale LRI*, Thème 4, Janvier 2021.
- [88] **Ranaivoarisoa, S.B. (2008).** *Etude de la gouvernance locale de la Réserve Spéciale de Bezà Mahafaly en vue du renforcement de sa gestion*, Mémoire d'Ingénieur, Université d'Antananarivo.

- [89] **Ranaivonasy, J. (2012).** *Dynamique de l'occupation du sol et vulnérabilité des communautés rurales, des systèmes agraires et des forêts face aux changements environnementaux et sociaux : Cas de la Région d'Analanjirifo*. Thèse de doctorat, Université d'Antananarivo.
- [90] **Ranaivonasy, J., Ratsirarson, J., Ramamonjisoa, B., Rasolofomampianina, D., Rakotoarisoa J, -A. E., & J.-A, S. (2003).** *Dynamique de la couverture forestière de la région d'Analanjirifo : aspects historiques, écologiques et socio-économiques*, Antananarivo: Centre d'Information et de Documentation Scientifique et Technique.
- [91] **Ranaivonasy, J., Ratsirarson, J., Rasamimanana, N. & Ramahatratra, E. (2016).** “Dynamique de la couverture forestière dans la Réserve Spéciale de Beza Mahafaly et ses environs”, *Malagasy Nature* **10** : 15-24.
- [92] **Randriamalala, I.H. (2015).** *Analyse de la dynamique spatio-temporelle du Lac Alaotra et de l'occupation du sol dans le bassin versant du Maningory*, Mémoire d'Ingénieur, Université d'Antananarivo.
- [93] **Randriamalala, J.R., Hosnah, H.B., Ranaivoarimanana, S., Ravonjimalala, H.R. (2015).** “Dynamique spatiale des fourrés xérophiles de Betioky-Sud et Soalara-Sud (Sud-Ouest, Madagascar) ”, Article 7, p117-p124 in Hervé et al., 2015b,
- [94] **Randriamalala, J.R., Rabeniala, R. & Masezamana, H.N. (2017).** “Effets de la production de charbon de bois sur les fourrés xérophiles, cas du plateau de Belomotse, Madagascar”, *Madagascar Conservation & Development* **12** (1) : 7-12.
- [95] **Randriamamonjy, F. (2006).** *Tantaran'i Madagasikara isam-paritra*, Trano printy fiangonana loterana Malagasy, Antananarivo.
- [96] **Randriamiary, K. T. (2015).** Rapport de diagnostic de conflits, Région Atsimo Andrefana. District de Tuléar I et II – Projet PAPRECOP.
- [97] **Rasamimanana, N. (2011).** *Influence de la variabilité climatique sur la phénologie de la forêt de la Réserve Spéciale de Beza Mahafaly*, Mémoire d'Ingénieur, Université d'Antananarivo.
- [98] **Rasamimanana, N., Ratsirarson, J., Ramahatratra, E., Ranaivonasy, J. & Richard, A. (2016).** “Variabilité et changement du climat à Beza Mahafaly”, *Malagasy Nature* **10** : 5-14.
- [99] **Rasoanaivo, N.R. (2017).** *Application du traitement d'image satellitaire et de la cartographie sur l'étude de l'évolution du littoral de la région du Menabe*, Mémoire de Master II, Université d'Antananarivo.
- [100] **Rasolofson, R.A., Ferraro, P.J., Jenkins, C.N. & Jones, J.P. (2015).** “Effectiveness of community forest management at reducing deforestation in Madagascar”, *Biological Conservation* **184** : 271-277.
- [101] **Ratovoson, A.A.N. (2011).** *Analyse de la dynamique spatiotemporelle des paysages dans la Région d'Analanjirifo*, Mémoire d'ingénieur, Université d'Antananarivo.
- [102] **Ratsirarson, J. (2003).** “The Réserve Spéciale de Beza Mahafaly”, *Natural History of Madagascar*. Eds. S. M. Goodman and J. B. Benstead. Pp: 1520-1525, The University of Chicago Press.
- [103] **Ratsirarson, J. (2011).** *Écologie descriptive et fonctionnelle : Outils essentiels pour la conservation de la Biodiversité. Caractérisation des espèces, suivi de la population et étude des interdépendances au sein de la communauté naturelle à Madagascar*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université d'Antananarivo.
- [104] **Ravokatra, T.M. (2011).** *Etude de la dynamique spatio-temporelle de la couverture corallienne du Sud-ouest de Tuléar*, Mémoire d'Ingénieur, Université d'Antananarivo.

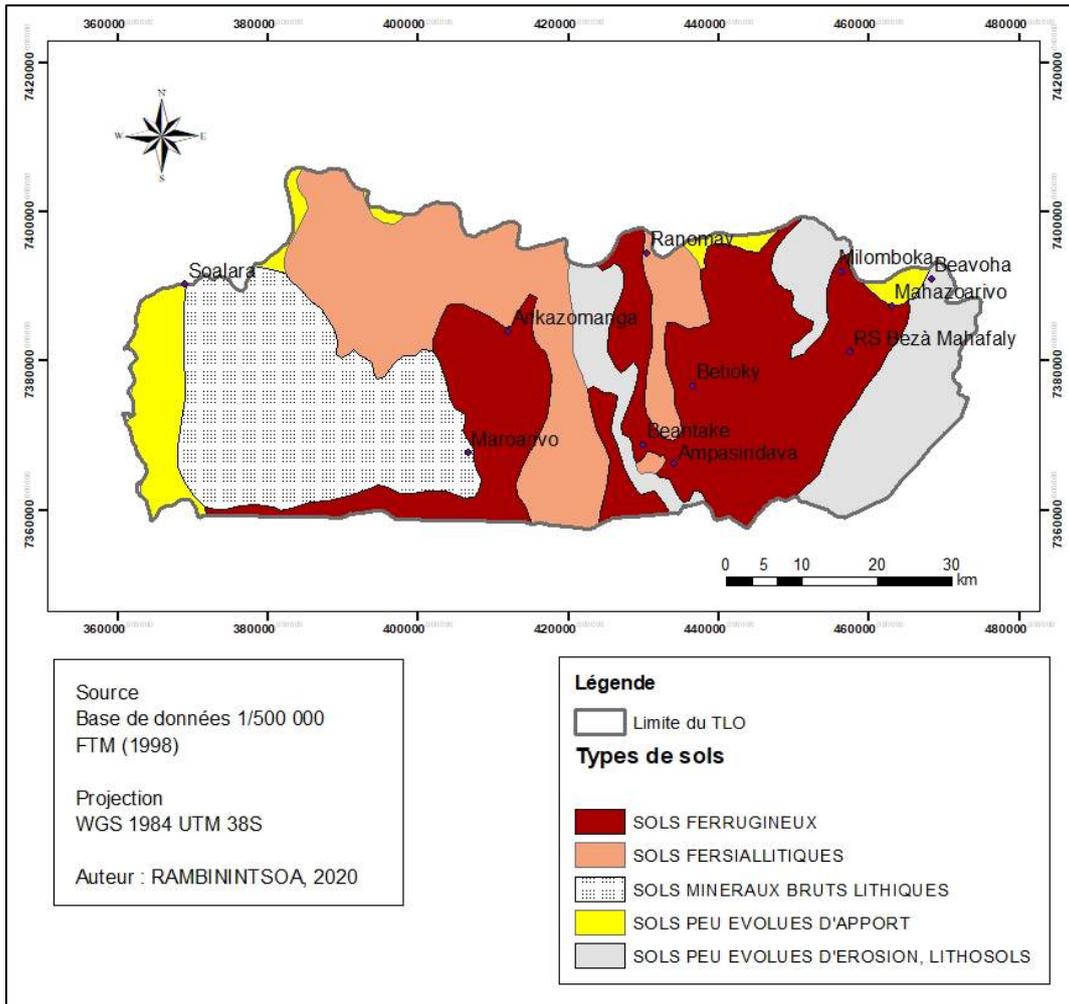
- [105] **Ravonjimalala, H.R. (2019).** *Modélisation spatiale des changements d'occupation du sol et de la fragmentation de la forêt dense sèche du Sud-Ouest de Madagascar : Cas de la commune Analamisampy*, Thèse de Doctorat, Université d'Antananarivo.
- [106] **Razafindraledy, J. (2018).** *Etude des formations végétales habitat des espèces cibles de conservation dans la Nouvelle Aire Protégée Amoron'i Onilahy : cas des forêts d'Antanimena et d'Antafoka, Région Sud-Ouest de Madagascar*, Mémoire de DEA, Université de Toliara.
- [107] **Razanaka S., (1995).** Délimitation des zones de contact des aires semi-aride et sub-aride de la végétation du sud-ouest de Madagascar. Thèse 3ème cycle, Université d'Antananarivo.
- [108] **Razanaka, S. ; Grouzis, M. ; Milleville, P. ; Moizo, B. ; Aubry, C., (2001).** “Société paysannes, transition agraires et dynamique écologiques dans le Sud-ouest de Madagascar”, Actes de l'Atelier CNRE-IRD. 8-10 novembre 1999 Antananarivo.
- [109] **Rejo Fienena, F. (1995).** *Etude phytosociologique de la végétation de la région de la Tuléar, Madagascar et gestion des ressources végétales par les populations locales (cas du PK 32)*, Thèse ethnobotanique, Paris, Muséum National d'Histoire Naturelle.
- [110] **RGPH 3, (2019).** *Troisième recensement général de la population et de l'habitation – Résultats provisoires*. INSTAT.
- [111] **Rowan, L.C. and Mars, J.C. (2003).** “Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data”, *Remote Sensing of Environment* **84** : 350-366.
- [112] **Servadio, Z. (2011).** *Apports de l'imagerie à haute résolution spectrale et spatiale dans les bilans de volume et bilans radiatifs au Piton de La Fournaise*, Université de la Réunion.
- [113] **Service Météorologique, (2020).** Données brutes recueillies auprès du Service de la Météorologie Ampandrianomby, Station Betioky 1989 à 2019.
- [114] **Soloniaina, A.E.F. (2016).** *Étude des impacts du changement climatique et de la vulnérabilité de l'écosystème forestier, de la communauté locale dans la partie centrale (Cas d'Arivonimamo) et la partie Nord-Est (Cas d'Ambatovaky) de Madagascar*, Mémoire d'Ingénieur, Université d'Antananarivo
- [115] **Soumana, H. (1999).** *Apport de la télédétection spatiale et des systèmes d'information géographique à la préparation d'un cadastre polyvalent : cas de la région de Niamey (Niger)*. Mémoire de Maître ès science (M.Sc.), Université de Sherbrooke.
- [116] **Sussman, R.W. & Ratsirarson, J. (2007).** “Beza Mahafaly Special Reserve: A research Site in Southwestern Madagascar” in *Ringtailed Lemur Biology*, DIPR, Springer, Boston, MA, Jolly A., Sussman W., Koyama N., Rasamimanana H.
- [117] **TANTSANAH (2009).** *Elaboration de document de PGESS de la NAP Amoron'i Onilahy*, WWF, Tany Tsara Honenana.
- [118] **Thibaud, B. (2010).** “Tensions foncières et recompositions territoriales dans la basse vallée de l'Onilahy (Sud-Ouest malgache)” *Annales de géographie* **6(676)** : 697-709.
- [119] **Tovondrazane, C. A., Holède, B. I., Andriatsiaronandroy, R. R., Razanakoto, T. & Rabemananjara, Z. H. (2020).** “Effet de l'exploitation minière sur les facteurs productifs comme l'agriculture et la production de charbon de bois et la dynamique de déforestation dans le Sud-ouest de Madagascar”, *Malagasy Nature* **14** : 6-23.
- [120] **Trochain, J.L. (1957).** *Accord interafricain sur la définition des types de végétation de l'Afrique tropicale*, Institut d'études centrafricain, Paris, ORSTOM.
- [121] **Urfer, S., (2012).** *Madagascar, une culture en péril ?* Antananarivo, No comment éditions.

Références bibliographiques

- [122] **USGS (2021)**. “Landsat known issues”, <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-known-issues>. Consulté le 08 février 2021.
- [123] **UVED (2021)**. Cours sur le Suivi de l’environnement par télédétection « Environnement Terrestre », site de l’Université Virtuelle Environnement et Développement durable, consulté en Avril 2021.
- [124] **Van der Werf, G.R., Morton, D.C., DeFries, R. S., Olivier, J.G., Kasibhatla, P.S., Jackson, R.B., & Randerson, J.T.** “CO2 emissions from forest loss”, *Nat Geosci* **2** : 737-738.
- [125] **Vanara, N., Huet, C., Payet, N., Pech, P., Goeldner-Gianelle, L. (2014)**. “Environnement et géomatique : des métiers en mutation”, *Open Edition Journals*.
- [126] **Vandewalle, V. (2009)**. *Estimation et sélection en classification semi-supervisée. Mathématiques*. Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I.
- [127] **Velomila, M., (2001)**. *Contribution à l’étude phytosociologique de la forêt de Mikea cas de la forêt d’Ankatepoky-Tsifota*, Mémoire de DEA – Université de Toliara.
- [128] **Vieilledent G., C. Grinand, F. A. Rakotomalala, R. Ranaivosoa, J.-R. Rakotoarijaona, T. F. Allnut, and F. Achard. (2018)**. “Combining global tree cover loss data with historical national forest-cover maps to look at six decades of deforestation and forest fragmentation in Madagascar”. *Biological Conservation* **222** : 189-197.
- [129] **Woodley, S. (2018)**. “Les catégories de gestion des Aires Protégées de l’UICN”, *World Commission on Protected Areas*, IUCN.
- [130] <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvved/envcal/html/rayonnement/2-rayonnement-matiere/2-7-signatures-spectrales.html>, consulté en avril 2021.
- [131] <https://www.lcaof.org/madagascar>, consulté en mai 2021.
- [132] <https://campuspress.yale.edu/bezamaahafaly/fr/>, consulté en mai 2021.
- [133] <https://www.lcaof.org/>, consulté en mai 2021.

Annexe

Annexe 1 : Types de sols dans le TLO



Annexe 2 : Caractéristiques des VOI et APC dans le TLO

APC Milomboka	APC Miary	VOI Ranomay	VOI Ampasindava	VOI Ankazomanga	VOI Maroarivo	VOI Beheloka	VOI Ankilimivony
TYPLOGIE DE TRANSFERT DE GESTION							
GCF	GCF	GELOSE	GCF	GELOSE	GELOSE	TGRN	TGRN
PROMOTEURS							
PNUD/Fondation Tany Meva/APAA	PNUD/Fondation Tany Meva/APAA	WWF	WWF	PSDR	CAPRICORNE	WWF	WWF
ANNEE DE MISE EN APPLICATION DU TRANSFERT DE GESTION							
2017	2017	2002	2017	Vers années 2000	2003	2011	2011
LOCALISATION							
District : Betioky Atsimo						District : Toliara II	
Commune : Beavoha		Tameantsoa	Beantaka	Ankazomanga	Maroarivo	Beheloka	Soalara
37 km à l'Est de Betioky	17 km à l'Est de Betioky	23 km au Nord de Betioky	20 km au Sud de Betioky	35 km au Nord- Ouest de Betioky	68 km au Sud-Ouest de Betioky	96 km a Sud- Ouest de Betioky	15 km au Nord de Beheloka, 111 km au Sud-Ouest de Betioky
SUPERFICIE FORESTIERES							
Non défini	1.075 ha	1.935 ha	4.646 ha	Non défini	15.550 ha (avec pâturage))	13 773 ha	35 499 ha
TYPLOGIE DE LA FORMATION FORESTIERE							
Forêt galerie Fourré xérophile	Fourré xérophile	Forêt galerie Fourré Forêt rupicole	Fourré xérophile	Fourré xérophile Forêt galerie Forêt rupicole	Fourré xérophile	Fourré xérophile Forêt dense sèche Forêt littorale	Fourré xérophile Forêt dense sèche Forêt littorale Mangrove

Annexe 3 : Les huit satellites Landsat

Satellite	Date de lancement	Date de retrait
Landsat-1	23 juillet 1972	01 février 1978
Landsat-2	22 janvier 1975	27 juillet 1983
Landsat-3	05 mars 1978	07 septembre 1983
Landsat-4	16 juillet 1982	15 juin 2001
Landsat-5	01 mars 1984	05 juin 2013
Landsat-6	05 octobre 1993	05 octobre 1993
Landsat-7	15 avril 1999	-
Landsat-8	11 février 2013	-

Source : Site de usgs.gov, 2020

Annexe 4 : Les images utilisées et leurs caractéristiques

Période	Capteurs	Identification de l'image	Date d'acquisition
1989	TM	LT05_L1TP_160076_19890411_20170204_01_T1	11/04/1989*
		LT05_L1TP_160077_19890411_20170204_01_T1	
		LT05_L1TP_160076_19890902_20170201_01_T1	02/09/1989**
		LT05_L1TP_160077_19890902_20170201_01_T1	
1995	TM	LT05_L1TP_160076_19950223_20170109_01_T1	23/02/1995*
		LT05_L1TP_160077_19950223_20170109_01_T1	
		LT05_L1TP_160076_19950903_20170106_01_T1	03/09/1995**
		LT05_L1TP_160077_19950903_20170108_01_T1	
2001	TM	LT05_L1TP_160076_20010223_20161212_01_T1	23/02/2001*
		LT05_L1TP_160077_20010223_20161212_01_T1	
		LT05_L1TP_160076_20010818_20161211_01_T1	18/08/2001**
		LT05_L1TP_160077_20010818_20161210_01_T1	
2007	TM	LT05_L1TP_160076_20070208_20161116_01_T1	08/02/2007*
		LT05_L1TP_160077_20070208_20161116_01_T1	
		LT05_L1TP_160076_20070920_20161111_01_T1	20/09/2007**
		LT05_L1TP_160077_20070920_20161112_01_T1	
2013	OLI/TIRS	LC08_L1TP_160076_20130429_20170505_01_T1	29/04/2013*
		LC08_L1TP_160077_20130429_20170505_01_T1	
		LC08_L1TP_160076_20131006_20170429_01_T1	06/10/2013**
		LC08_L1TP_160077_20131006_20170429_01_T1	
2019	OLI/TIRS	LC08_L1TP_160076_20190209_20190221_01_T1	09/02/2019*
		LC08_L1TP_160077_20190209_20190221_01_T1	
		LC08_L1TP_160076_20190905_20190917_01_T1	17/09/2019**
		LC08_L1TP_160077_20190905_20190917_01_T1	

LT05 : Landsat 5

LC08 : Landsat 8

160076 et 160077 : Scènes recouvrant la zone d'étude

19890411 : 11/04/1989 (date d'acquisition de l'image)

**Saison humide*

***Saison sèche*

Annexe 5 : Protocole de travail des agents sur terrain pour l'analyse de la dynamique spatio-temporelle des changements d'occupation du sol dans le TLO entre 1973 et 2019.

1. Objectifs

L'objectif principal de la descente est d'évaluer la précision de la classification obtenue par rapport à la réalité sur terrain.

Les objectifs spécifiques y correspondant sont de :

- Localiser les points de vérifications ;
- Apprécier visuellement la classe d'occupation du sol désignée par le point ;
- Comparer cette appréciation par rapport à la classification obtenue.

2. Matériels et méthodes

La vérification sur terrain consiste à vérifier si les classes définies lors des traitements des images satellitaires correspondent à celles dans la réalité (sur terrain). Pour ce faire, il faut avoir les différentes classes d'occupation du sol dans le TLO et les coordonnées des points GPS sur lesquels seront vérifiées les classes d'occupation du sol. Les matériels ainsi nécessaires sont un moyen de transport (une moto) pour aller sur les points de vérification et un appareil GPS. Pour noter les classes d'occupation du sol réelles sur terrain, un stylo et un carnet seront également nécessaires, en plus de l'appareil photo pour prendre en photo les alentours du point (sur un rayon de 10m).

Activité	Informations attendues	Matériels	Méthodes
Vérification des classes d'occupation du sol sur les points GPS donnés	Les classes d'occupation du sol sur chaque point ;	Appareil GPS Stylo et carnet	Localisation des points GPS Observation de la végétation sur les points GPS Notation de la classe d'occupation du sol
	Des photos montrant les alentours (rayon de 10 m) de chaque point GPS.	Appareil photo	Prise de photo des alentours du point (rayon de 10m)

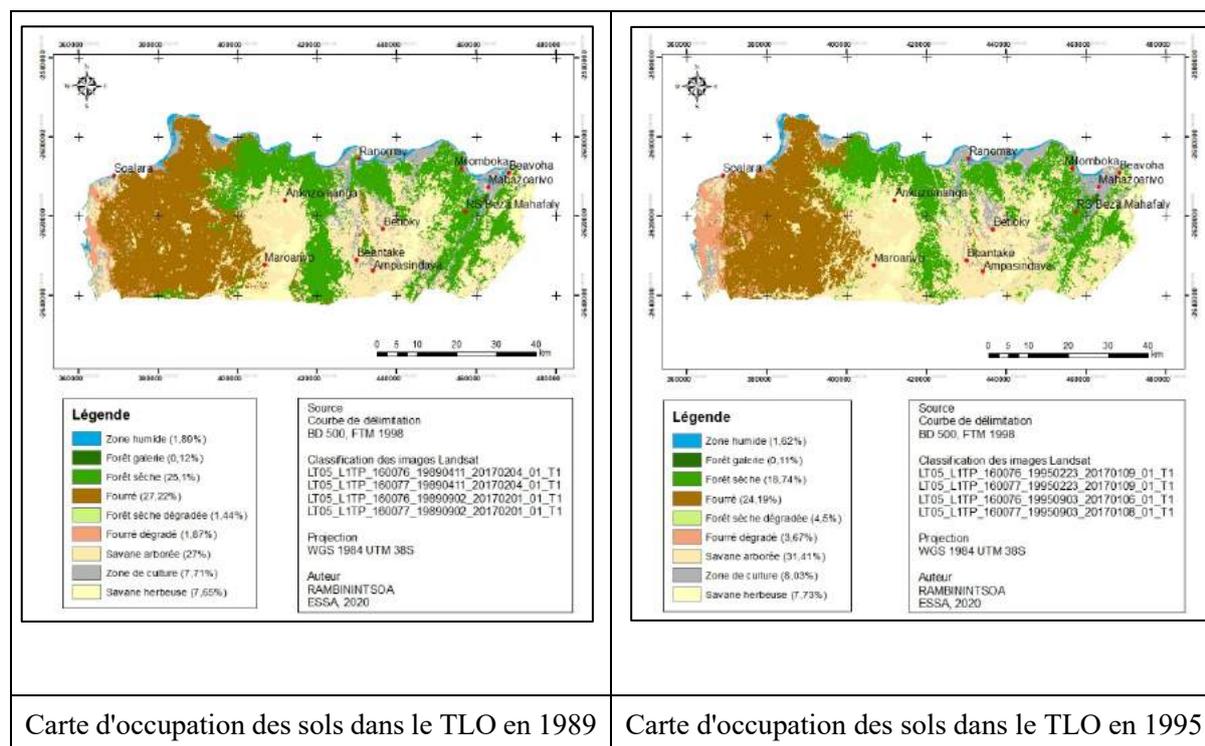
Annexe 6 : Situation de l'occupation des sols dans le TLO

Situation de l'occupation des sols en 1989

En 1989, les classes des forêts intactes qui regroupent la « forêt sèche » et le « fourré » occupent la moitié du TLO soit 52,32 % avec une superficie totale de 2 082,16 km². Tandis que les forêts sèches dégradées et les fourrés dégradés n'occupent respectivement que 1,44% (57,27 km²) et 1,87% (74,34 km²) de la zone d'étude. Les surfaces cultivées en 1989 s'étendent sur 7,71% de la surface du TLO et le reste est occupé par les savanes outre la forêt galerie, les rivières, le fleuve et le lac.

Situation de l'occupation des sols en 1995

La carte d'occupation des sols de l'année 1995 montre que les classes des forêts s'étendent sur une surface de 1 708 km² soit 42,93% et celles des forêts dégradées sur 325,4 km², c'est-à-dire 8,17% de la surface du TLO. Par ailleurs, les zones de cultures occupent 8,03 % de la surface totale et s'étendent surtout au bord des zones humides ayant une proportion de 1,62 % en surface. C'est la classe savane arborée qui est prédominante d'une proportion de 31,41% par rapport à la surface totale, soit 1 250,05 km².

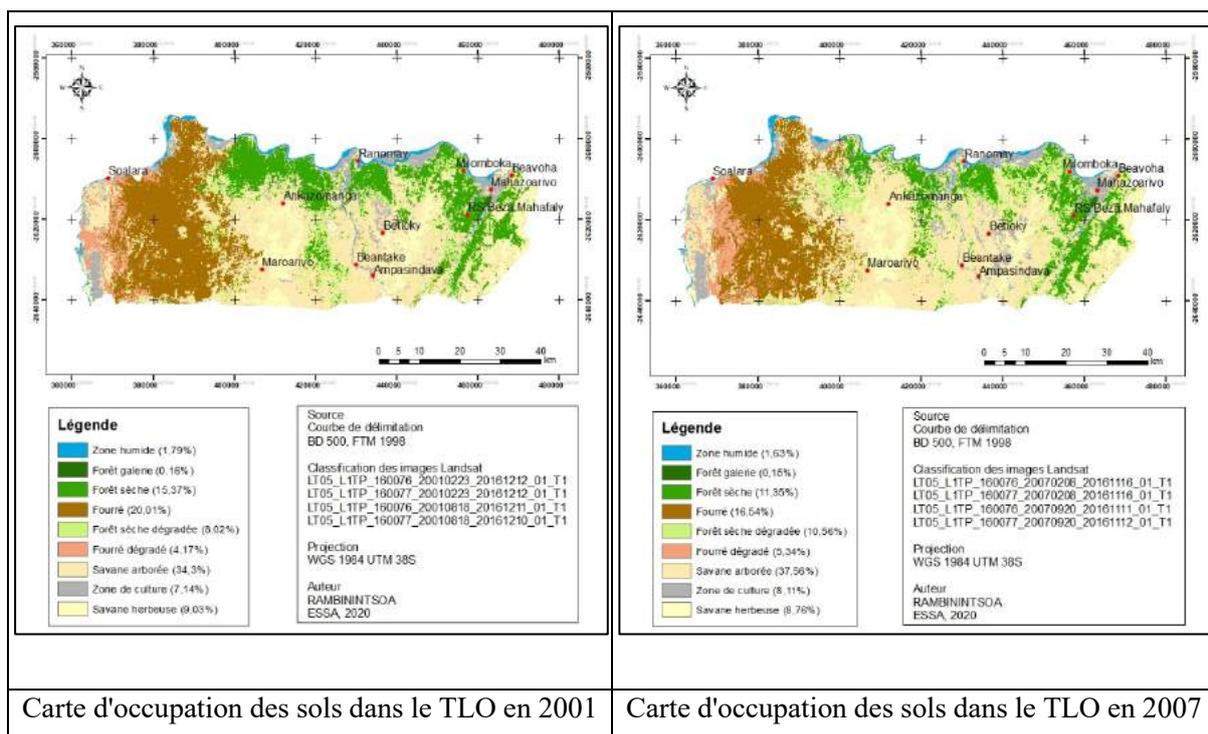


Situation de l'occupation des sols en 2001

En 2001, la surface des forêts qui n'ont pas été dégradées est de 1 408,28 km², soit 35,38 % de la surface totale. Quant aux forêts dégradées, elles occupent 12,19% (485,32 km²) du TLO. Les surfaces cultivées se répartissent sur 284,35 km², soit sur 7,14% de la zone d'étude. La surface des savanes arborées et celle des savanes herbeuses occupent respectivement 34,3% et 9,03% de la surface totale du TLO. Le reste étant la forêt galerie et les zones humides.

Situation de l'occupation des sols en 2007

La situation de l'occupation des sols en 2007 montre que la forêt sèche occupe 11,35% de la surface totale du territoire du Lemak'i Onilahy. Elle est marquée par la dominance de la classe des fourrés après la classe des savanes arborées. En effet, 658,24 km² est occupé par la classe « fourré », soit une proportion de 16,54% par rapport à la surface totale. Les forêts dégradées occupent 15,9 % de la surface totale qui se répartissent sur 632,71 km², tandis 5,34% du TLO est occupé par les fourrés dégradés. Les zones de cultures s'étendent sur 322,85 km² et la forêt galerie 5,81 km².

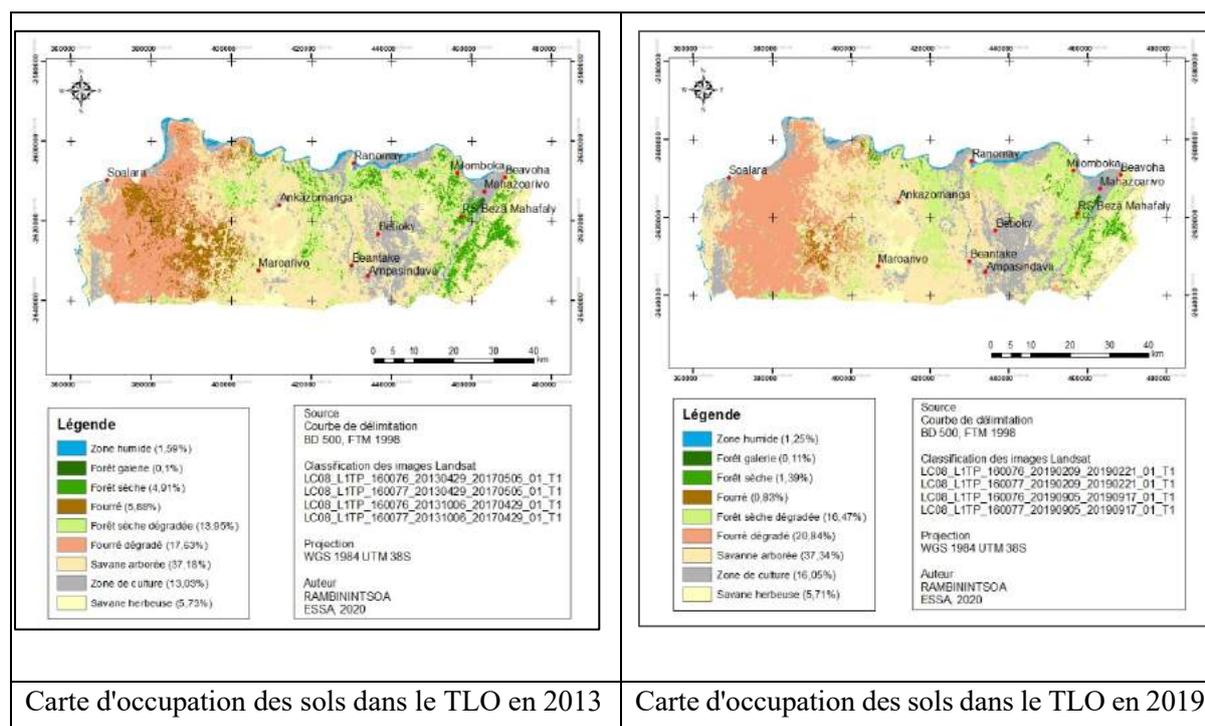


Situation de l'occupation des sols en 2013

En 2013, la surface occupée par les forêts sèches est de 11,35% et les fourrés de 16,54% de la surface totale du TLO. Tandis que les forêts et fourrés dégradés s'étendent respectivement sur 555,17 km² (13,95%) et 701,81 km² (17,63%). Les terrains sur lesquels les habitants du TLO cultivent se répartissent sur 518,59 km², soit 13,03% et la zone humide sur 63,23 km². La surface des forêts galeries est de 3,97 km² et la surface restante concerne les savanes.

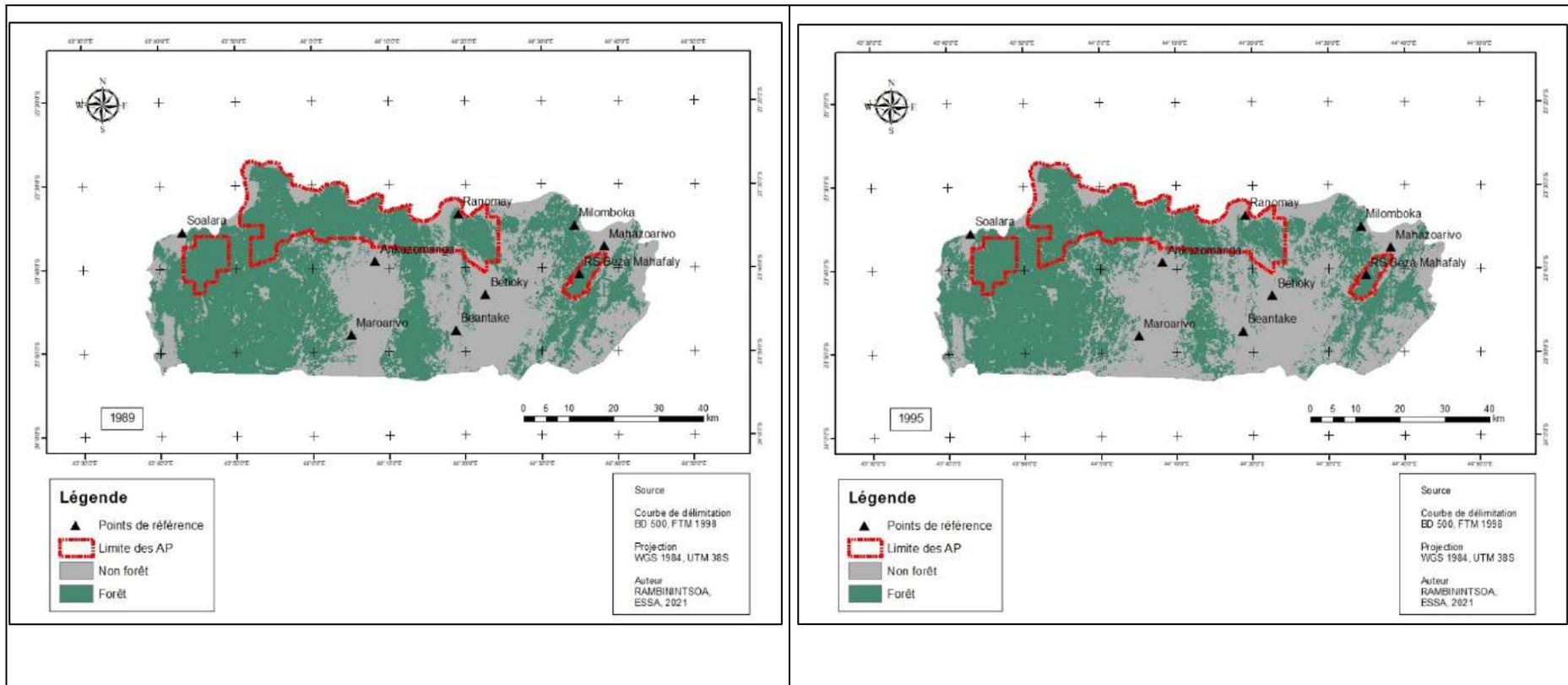
Situation de l'occupation des sols en 2019

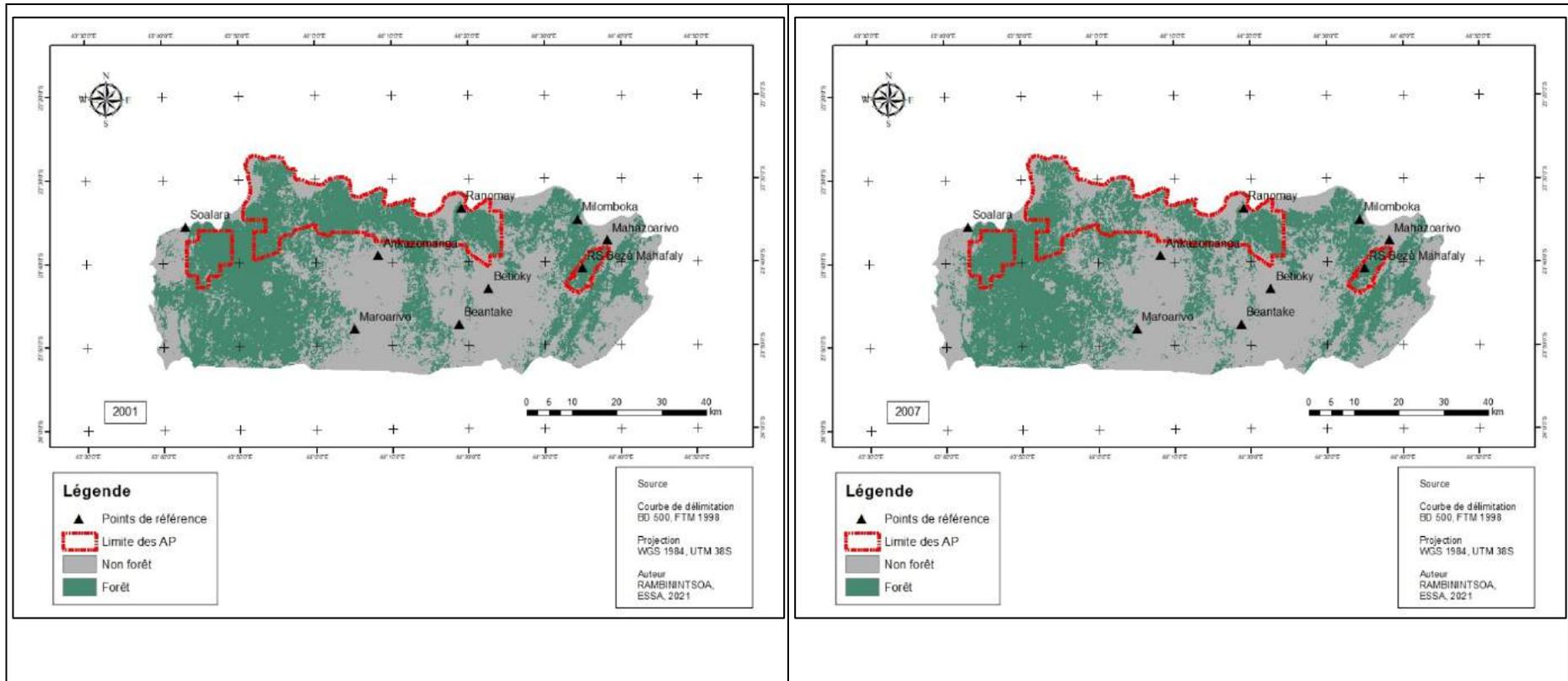
La carte d'occupation des sols dans le TLO en 2019 montre une prédominance considérable des classes des forêts et des fourrés dégradés, après la classe « savane arborée ». Elles occupent principalement 37,31 % de la surface totale, soit 1 485,07 km², contre 88,23 km² (2,22%) en forêts sèches et fourrés qui ne sont pas dégradés. De son côté, la forêt galerie occupe une surface de 4,55 km², soit 0,11% de la surface totale. Les surfaces cultivées s'étendent sur 638,72 km² tandis que la zone humide occupe une surface de 49,74 km² soit 1,25% de la surface totale du TLO.

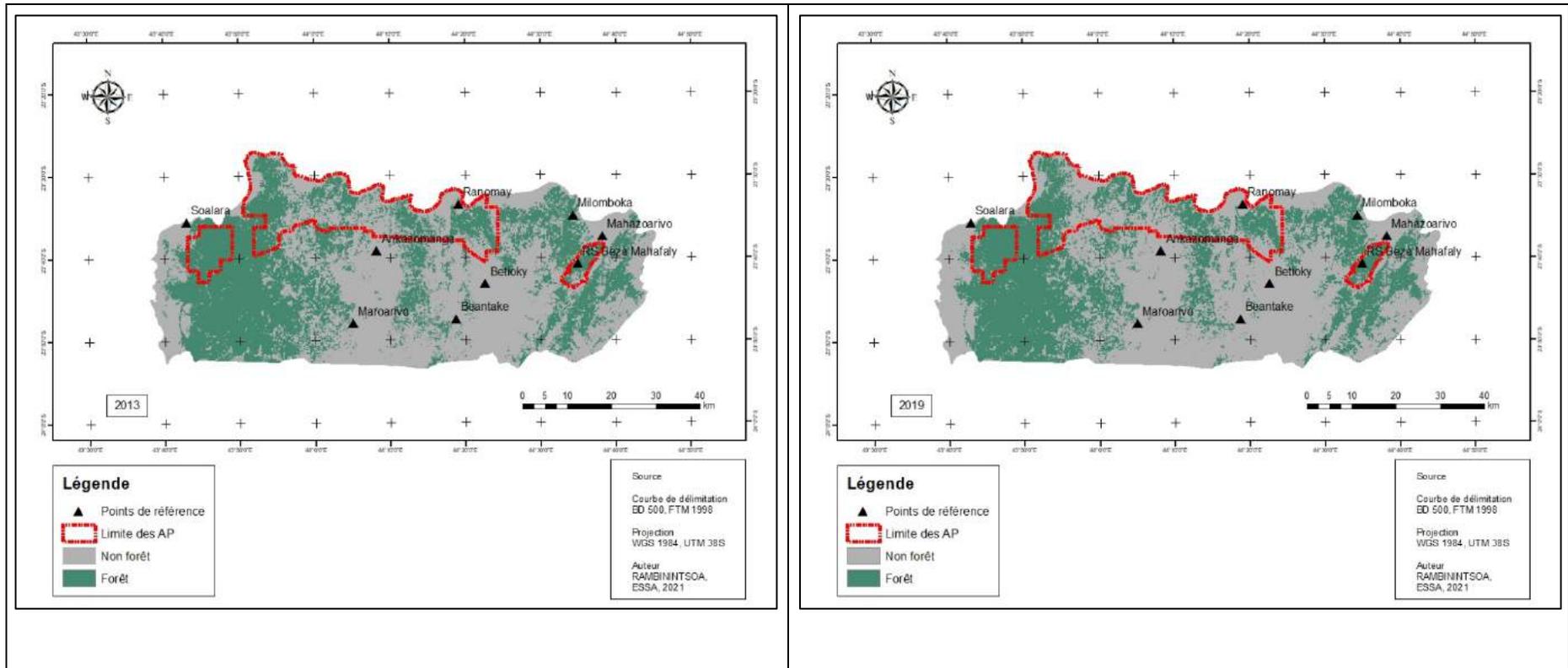


La situation de l'occupation des sols de 1989 à 2019 montre une domination des classes des savanes en 1989, et en 2019. En 1989, ce sont les classes des fourrés et des forêts sèches qui occupent le plus de surface après les savanes. Au fil des années, ce sont les classes des forêts dégradées et des zones de cultures qui dominent en 2019.

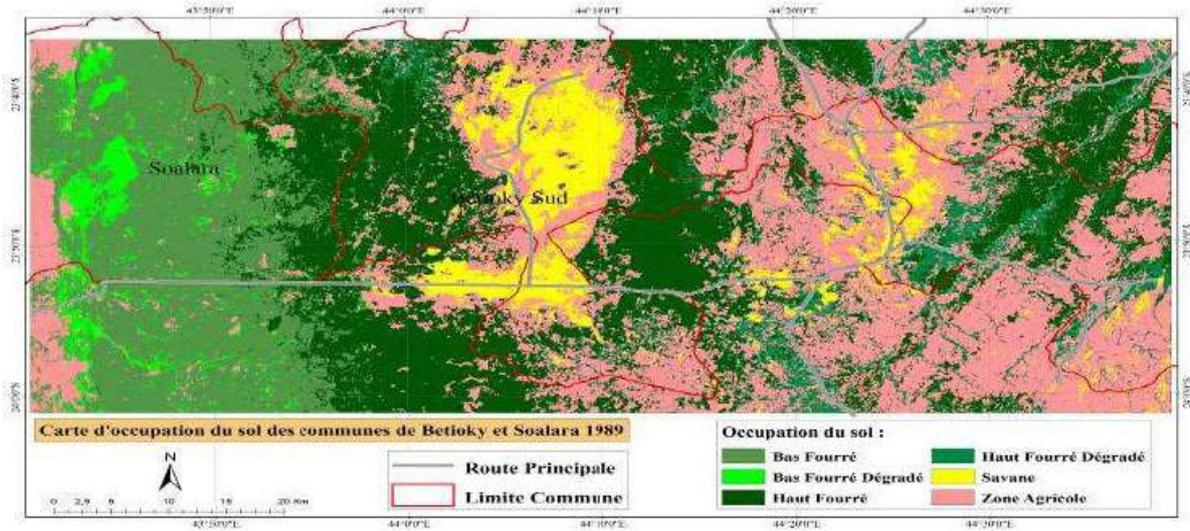
Annexe 7 : Cartes de la couverture forestière de 1989 à 2019







Annexe 8 : Zone d'étude d'Hosnah (2013)



Carte d'occupation des sols en 1989 (Hosnah, 2013)

Les hauts fourrés dans l'étude d'Hosnah correspondent aux forêts sèches de la présente étude. Tandis que les bas fourrés dans l'étude d'Hosnah correspondent aux fourrés de la présente étude.

Annexe 9 : Les entreprises minières dans le TLO

Sociétés 2017-2018	Activités selon le RCS (Registre du Commerce et des Sociétés)	Substances objet du/des permis	Stade	Communes impactées dans le TLO	Destination
DYNATEC MADAGASCAR SA	RCS non disponible – Transféré à Toamasina	Calcaire	Exploitation	Ambolofotsy (en mer), Soalara-Sud	N/A*
HOLCIM SA	Extraction, exploitation et transformation de substance de carrières, la fabrication de ciment et ses dérivés, achat, vente, importation de tous produits sidérurgiques, quincailleries générales industrielles de bâtiments, appareils sanitaires, peintures, construction métalliques et préfabriqués en général, tous matériaux de construction. L'extraction, l'exploitation, la transformation et la vente de substances minières et/ou de carrières.	Cipolin, cipolin dolomitique, argile, pouzolane, tourmaline, béryl, cristal, quartz rose, oxyde de fer, gypse, agate, cornaline, charbon de terre	Recherche Exploitation – Production (Cipolin, Pouzolane, Argile)	Beantake	Fabrication locale de ciment
MADAGASCAR CONSOLIDATED MINING SA	Recherches et explorations minières	Charbon, charbon de Terre, cuivre, nickel, cobalt, argent, or, vanadium, zinc platine	Recherche - Développement (aucune production)	Betioky Atsimo	N/A*

*N/A : non disponible (« *not available* »)

Table des matières

Remerciements.....	i
SOMMAIRE.....	ii
Liste des illustrations.....	iv
Acronymes.....	vi
Glossaire.....	vii
Cadre du projet.....	viii
Résumé.....	ix
Abstract.....	x
Famintinana.....	xi
INTRODUCTION.....	1
ÉTAT DE L'ART.....	2
I. Dynamique de la couverture forestière à Madagascar.....	2
II. Présentation de la zone d'étude.....	3
II.1. Situation géographique et cadre administratif.....	3
III.2. Milieu physique.....	4
III.2.1. Le climat.....	4
III.2.2. Hydrographie.....	6
III.2.3. Le relief et type de sol.....	6
III.2.4. Milieu biologique.....	7
III.2.4.1. Faune et flore.....	7
III.2.4.2. Gestion des ressources naturelles.....	8
III.2.5. Milieu humain.....	10
III.2.5.1. Historique des groupes ethniques.....	10
III.2.5.2. Principaux moyens de subsistance de la population locale.....	11
METHODOLOGIE.....	12
I. Objectifs, problématiques et hypothèses.....	12
I.1. Objectifs de l'étude.....	12
I.2. Problématique.....	12
I.3. Hypothèses.....	13
II. Matériels et méthodes.....	14
II.1. Domaine d'étude : la géomatique.....	14
II.2. Traitement des images satellites pour avoir les cartes d'occupation des sols.....	15
II.2.1. Collecte des images satellites Landsat par année de référence.....	15
II.2.1.1. Choix du référentiel temporel.....	15
II.2.1.2. Les satellites Landsat.....	15
II.2.1.3. Recouvrement de la zone d'étude.....	15
II.2.1.4. Les images satellites utilisées.....	16
II.2.2. Traitements des images satellites.....	17

II.2.1.1. Prétraitement des images.....	17
II.2.1.2. Méthode de classification.....	18
II.2.1.3. Traitement post-classification	20
II.2.1.4. Résumé des méthodes	21
II.2.1.5. Indice de séparabilité.....	22
II.2.3. Evaluation de la précision de la carte d'occupation des sols.....	22
II.2.3.1. Descente sur terrain.....	22
a. Evaluation de la précision de la classification obtenue	22
b. Collecte d'informations auprès de la population locale.....	22
II.2.3.2. Méthode d'évaluation de la précision.....	23
a. Matrice de confusion.....	23
b. Indice de Kappa	25
II.3. Analyse de la dynamique de la couverture forestière dans le TLO.....	26
II.3.1. Détection des changements pour l'analyse de la dynamique de la couverture forestière	26
II.3.2. Analyse des changements d'occupations des sols.....	26
II.3.2.1. Analyse de la relation entre la déforestation et l'augmentation en surface des surfaces exploitées par les habitants	26
II.3.2.2. Analyse du taux de déforestation annuel entre l'Est et l'Ouest.....	27
II.3.3. Analyse du rôle des Aires Protégées dans la réduction de la déforestation.....	27
III. Limites de l'étude	27
IV. Cadre opératoire.....	29
RÉSULTATS ET INTERPRETATIONS.....	30
I. Caractérisation de la classification.....	30
I.1. Description des différentes classes d'occupation des sols retenues.....	30
I.1.1. La classe « zone humide » (ZH).....	30
I.1.2. La classe « forêt galerie » (FG)	30
I.1.3. La classe « forêt sèche » (FS).....	31
I.1.4. La classe « fourré » (F).....	31
I.1.5. Les classes « forêt sèche dégradée » (FSD) et « fourré dégradé » (FD).....	32
I.1.6. La classe « savane arborée » (SA).....	32
I.1.7. La classe « zone de culture » (ZC)	33
I.1.8. La classe « savane herbeuse » (SH).....	33
I.2. Différenciation entre les classes selon l'indice de séparabilité.....	33
I.3. Validation de la classification.....	34
I.3.1. Matrice de confusion	34
I.3.2. Indice de Kappa	35
II. Dynamique de la couverture forestière dans le TLO par période de références	36
II.1. Période 1989-1995	37
II.2. Période 1995-2001	38

II.3. Période 2001-2007	39
II.4. Période 2007-2013	41
II.5. Période 2013-2019	42
II.6. Période 1989-2019	44
III. Taux de déforestation dans le TLO de 1989 à 2019	46
III.1. Taux de déforestation dans le TLO entre la zone Est et Ouest	46
III.2. Déforestation à l'intérieur et en dehors des Aires Protégées dans le TLO	46
III.2.1. Pertes en couverture forestière à l'intérieur et en dehors des Aires Protégées.....	46
III.2.2. Taux de déforestation.....	47
DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS	48
I. Discussions	48
I.1. Discussions sur la méthodologie	48
I.1.1. Discussions sur l'élaboration des cartes d'occupation des sols	48
I.1.2. Discussions sur les méthodes d'analyses des changements d'occupation des sols utilisées	49
I.2. Discussions sur les résultats.....	49
I.2.1. Les taux de déforestation dans le Sud-Ouest.....	49
I.2.2. Comparaison des taux de déforestation de l'Est et de l'Ouest du Territoire Lemak'i Onilahy.....	50
I.2.3. Rôle des Aires Protégées dans la réduction de la déforestation.....	51
I.2.4. Les mécanismes conduisant à la déforestation dans le Territoire du Lemak'i Onilahy ..	54
I.3. Discussions sur les hypothèses	54
I.3.1. Première hypothèse.....	54
I.3.2. Deuxième hypothèse.....	55
I.3.3. Troisième hypothèse.....	55
II. Recommandations	55
II.1. Recommandations sur la méthodologie.....	55
II.2. Recommandation par rapport aux résultats	56
II.3. Recommandations sur l'application des résultats de la dynamique forestière sur la conservation de la biodiversité.....	57
CONCLUSION.....	61
Références bibliographiques	62
Annexe	I