



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

DEPARTEMENT DES EAUX ET FORETS



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur en Sciences Agronomiques et Environnementales au grade de Master en Foresterie et Environnement

Parcours : **Environnement Territoire et Développement**

Promotion : KINGATSA 2010 – 2015

Analyse de la dynamique spatio-temporelle du Lac Alaotra et de l'occupation du sol dans le bassin versant du Maningory

Présenté par

RANDRIAMALALA Ihoby Henintsoa

Soutenu le 04 Mai 2015

Devant le jury composé de :

- Président :** Monsieur RAMAMONJISOA Bruno Salomon, *Professeur*
Rapporteur : Monsieur RAKOTO RATSIMBA Harifidy, *Docteur*
Examineurs : Monsieur RANDRIAMBOAVONJY Jean Chrysostome, *Professeur*
Monsieur RAZANAKA Samuel, *Professeur*



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES
DEPARTEMENT DES EAUX ET FORETS



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur en Sciences Agronomiques et Environnementales au grade de Master en Foresterie et Environnement

Parcours : **Environnement Territoire et Développement**

Promotion : KINGATSA 2010 – 2015



Présenté par

RANDRIAMALALA Ihoby Henintsoa

Soutenu le 04 Mai 2015

Devant le jury composé de :

Président : Monsieur RAMAMONJISOA Bruno Salomon, *Professeur*
Rapporteur : Monsieur RAKOTO RATSIMBA Harifidy, *Docteur*
Examineurs : Monsieur RANDRIAMBOAVONJY Jean Chrysostome, *Professeur*
Monsieur RAZANAKA Samuel, *Professeur*

“Le Seigneur m’a dit : Je vais t’enseigner et te montrer la route à suivre. Je vais te donner un conseil en gardant les yeux fixés sur toi.”

Psaumes 32 : 8

“ Le Seigneur Dieu est ma force. Il me rend aussi rapide que les biches, Il me fait marcher sur les hauteurs.”

Habacuc 3 : 19



A ma famille,

A mes grands-parents,

REMERCIEMENTS

Mes vives reconnaissances s'adressent en premier lieu à Dieu Tout Puissant pour la force, le courage et surtout la miséricorde qu'il m'a procurés tout au long de mon parcours, et sans Lui le présent mémoire n'a pas pu être mené à termes.

J'exprime également mes gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de cette excellente formation universitaire ainsi qu'à la réalisation de ce mémoire.

Monsieur RASOARAHONA Jean, Directeur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques et Monsieur RAMAMONISOA Bruno Salomon, Chef du Département des Eaux et Forêts et président du jury, pour leur appui et l'intérêt qu'ils ont apporté à cette recherche :

Monsieur RAKOTO RATSIMBA Harifidy, Docteur-Ingénieur et Coordinateur du Laboratoire de Recherches Appliquées (LRA) au sein de l'ESSA-Forêts, un encadreur qui a su me lancer dans un domaine passionnant. Ses orientations et appuis m'ont gratifié énormément de connaissances pour faciliter mes investigations. Il n'a jamais ménagé son temps ni ses efforts pour m'accompagner malgré ses innombrables responsabilités :

Monsieur RABANAKA Samuel, Professeur et chercheur au Centre National de Recherche pour l'Environnement (CNRE), et Monsieur RANDRIAMBOAVONJY Jean Chrysostome, Professeur au sein du Département des Eaux et Forêts, pour avoir accepté de siéger parmi les membres du jury afin d'examiner mon travail et d'y apporter des propositions d'enrichissement :

Monsieur RATOUOSON Arimino Aina Navale, Doctorant et Assistant Chercheur au niveau du LRA, qui n'a pas hésité à nous partager son expérience en télédétection avec ses précieux conseils. Il a eu aussi la générosité de prendre en charge l'acquisition des images satellitaires :

Monsieur PATRICK Olivier Waeber, Docteur de l'ETH Zürich et Coordinateur du projet AlaReLa, qui nous a intégrés dans le cadre de ce projet à travers nos thèmes de mémoire :

Les membres du comité de lecture pour les améliorations et leur approbation à ce travail :

Mes collègues du LRA : Ando, Felana, Herija, Mahatsangy, Milanto, Pierrrot, Tsiony, ainsi que nos adorables aînés Avo, Percy et Tovo. Merci pour les encouragements et les échanges enrichissantes le long de nos stages mémoires :

Toute la promotion KINGATSA surtout les KINGATSA-Forêts, avec qui j'ai passé de bons moments pleins d'aventures et de découvertes fructueuses :

Tous les membres du Personnel Administratif et Technique au sein de l'ESSA qui ont largement concouru à la réussite de ces cinq années d'étude, spécialement le PAT du Département des Eaux et Forêts :

A mes proches et particulièrement à ma famille, qui ont toujours manifestés leur infailible soutien et encouragement. Merci infiniment !

Présentation des partenaires

Ce travail est appuyé d'une manière ou d'une autre par les partenaires suivants :

AlaReLa : Alaotra Resilience Landscape, Madagascar

Le projet AlaRela de la région Alaotra-Mangoro a pour objectif d'aider les usagers des ressources naturelles et les décideurs à réconcilier conservation et développement. Il s'agit de promouvoir la capacité d'adaptation du Socio-écosystème de l'Alaotra face aux changements et aux chocs qui se profilent sur le moyen et long terme.



Pour cela, le projet propose de construire avec les parties prenantes des scénarios de développement possibles. Ces scénarios établis à l'échelle du paysage, mettront en évidence les options qui s'offrent aux populations locales et aux décideurs, et pourront les aider à se projeter sur le moyen et long terme.

Le projet est financé par la coopération suisse, et fait intervenir ESSA-Forêt, l'Université d'Antananarivo, le Missouri Botanical Garden, la Fondation Durrel, et leurs partenaires suisse l'ETH de Zurich, et français, le CIRAD. La durée du projet est prévue de 2013 à 2017.

SEAS – OI : Surveillance de l'Environnement Assistée par Satellite pour l'Océan Indien

C'est un programme financé par la Région Réunion, l'Etat français, l'IRD, l'Université de La Réunion, et soutenu pour l'Europe. Opérationnelle depuis juillet 2012, la station SEAS-OI est à la fois une station de réception d'imagerie satellite et un pôle d'excellence en télédétection, développant une expertise



dans les domaines de la biodiversité, les milieux agroforestiers, l'environnement marin et côtier, l'urbanisme, la santé et les risques naturels. Dans un rayon de 2500 km autour de La Réunion, SEAS-OI reçoit des images satellites optiques (SPOT 5) et RADAR (RADARSAT-2) haute résolution.

Au sein de SEAS-OI, l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), l'Université de La Réunion, et la Région réunion mettent en œuvre des projets de coopération scientifique et opérationnelle dans le domaine de la télédétection.

Dans cet optique, les données acquises par SEAS-OI sont disponibles gratuitement pour les institutions publiques et les laboratoires de recherche du sud-ouest de l'océan indien.

RESUME

Le bassin versant du Maningory, localisé en chevauchement entre les régions Alaotra Mangoro et Analanjirofo, abrite le plus grand lac de Madagascar qui est le lac Alaotra. Cette zone manifeste une forte potentialité économique (production rizicole et piscicole d'eau douce) et écologique (site RAMSAR) en tant que zone humide vouée surtout à la protection de l'espèce endémique *Hapalemur alaotrensis*. Cependant le problème d'érosion qui s'accroît actuellement dans le bassin versant entraîne des effets néfastes sur les périmètres irrigués, les zones marécageuses et finalement le lac. L'étude propose de mettre en évidence la dynamique des occupations du sol et celle du lac dans le bassin versant du Maningory sur base cartographique. Pour cela, des images satellitaires Landsat TM, ETM+ et OLI datant de 1990/1993/1994, 2001 et 2014 ont été traitées sous les logiciels ENVI 4.3, ArcMap 10.1 et Idrisi Selva. Les plans d'eau renfermant le lac Alaotra sur ces images sont isolés à l'aide de l'indice NDWI (*Normalized Difference Water Index*) de McFeeters. La comparaison des superficies du lac sur trois dates montre que le lac diminue progressivement selon les saisons. Sous l'effet de la saison sèche étudiée, la superficie du lac est réduite de 9,4% entre 1994 et 2014, tandis que l'effet de la saison humide induit une diminution de 10,7% entre 1993 et 2014. Par ailleurs, la classification semi-supervisée de type *Maximum Likelihood* est appliquée aux images afin de déterminer les catégories d'occupation du sol délimitée par le bassin versant. L'indice Kappa obtenu (0,83) a permis de poursuivre l'élaboration des cartes multi temporelles utilisées pour l'analyse de la dynamique des entités paysagères. L'occupation du sol est dominée par la savane herbeuse et la forêt dégradée en dépit des plans d'eau qui ne couvrent que faiblement la zone. La dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant se manifeste essentiellement par la conversion de la forêt dense en forêt dégradée (7,19% du paysage) et d'une partie de la forêt dégradée en savane herbeuse (6,47% du paysage) pendant la période 1990 à 2014. Une forte anthropisation est donc intervenue sur le paysage rendant la diminution de la formation naturelle. De ce fait, la plus importante régression s'affiche au niveau de la forêt dense humide (3,23%) en faveur de l'accroissement de la savane herbeuse et de la zone de culture (1,68% et 1,03% respectivement). L'origine des phénomènes d'érosion qui affecte le paysage est ainsi confirmée face à cette réduction de la couverture forestière. La relation entre la dynamique du paysage et le processus de comblement du lac par ensablement est démontrée mais indirectement car la localisation d'une grande partie des forêts se trouve en aval du lac. Néanmoins, l'assèchement graduel du lac est visible suite à la conversion de ses rives en zone marécageuse et la transformation d'une partie de celle-ci en zone de culture. La perception de ces réalités a incité la mobilisation de mesures adéquates et efficaces afin d'atténuer les risques de disparition de la ressource en eau fournie par le lac Alaotra.

Mots clés : Lac Alaotra, dynamique, occupation du sol, télédétection, indice *NDWI*, bassin versant, Maningory

ABSTRACT

Maningory watershed, which includes Alaotra, the greatest lake of Madagascar, is located between Alaotra Mangoro and Analanjirofo Region. This area has high economic (rice and fishes production) and ecological potentialities (RAMSAR site for *Hapalemur alaotrensis* habitat protection). However, the erosion becomes more and more important in the watershed and affects the irrigated perimeters, the swampy zones and finally the lake. The study is investigating to expose the dynamic of land cover and the dynamic of lake in the Maningory watershed with a spatial approach. For it, satellite imageries from Landsat TM, ETM+ and OLI collected in 1990/1993/1994, 2001 and 2014 are processed with the software ENVI 4.3, ArcMap 10.1 and Idrisi Selva. The open water which contains the Alaotra Lake in these imageries is isolated with the McFeeters NDWI (*Normalized Difference Water Index*). The comparison of lake areas in the three dates shows that the lake area decreases progressively between the seasons. During the dry season, the lake area decreases 9.4% between 1994 and 2014, and during the wet season the diminution is 10.7% between 1993 and 2014. Otherwise, the semi-supervised classification as *Maximum likelihood* is applied in the imageries to determine the categories of land cover included in the watershed delimitation. The value of Kappa index (0.83) is used to validate the multi temporal maps which are used for analyzing the landscape dynamic. The land cover is dominated by grassland and degraded forest. The open water covers only few areas. The land cover dynamic in the watershed is essentially linked with the conversion of dense forest to degraded forest (7.19% of the landscape) and partially degraded forest to grassland (6.47% of the landscape) during the period of 1990 to 2014. Therefore, a strong anthropogenic activity affects the landscape with a continuous decrease of the natural formation. The most important diminution is dense humid forest (3.23%) while the grassland and the crop field are increasing (respectively 1.68% and 1.03%). So, the origin of the erosion's phenomena which affect the landscape is confirmed with the observation of this forest cover reduction. The relationship between the landscape dynamic and the process of lake's diminution is indirectly demonstrated because the majority of the forest are downstream. Nevertheless, the gradual loss of the lake is visible following the conversion of its strands in swampy zone and the transition of a part of this class into agricultural area. The perception of these realities highlights the need of suitable and efficient measures in order to attenuate the risks from water resource loss of the Alaotra Lake.

Keywords : Alaotra Lake, dynamic, land cover, remote sensing, NDWI index, watershed, Maningory

FAMINTINANA

Ny sahan-driakan'i Maningory, mampifandray ny faritra Alaotra Mangoro amin'Analanjirofo, dia misy ny farihin'Alaotra izay lehibe indrindra eto Madagasikara. Mampivavaka azy ny fananany lanja ara-toekarena (vokatra vary sy hazan-dranomamy) sy ara-ekolojika (faritra RAMSAR) satria izy dia faritra mando mitahiry ilay karazam-biby *Hapalemur alaotrensis* izay tsy fahita raha tsy eo aminy ihany. Mihamafy hatrany ny fiotsahan'ny tany eo amin'io sahan-driaka io amin'izao fotoana ka miteraka olana goavana izay miantraika eny amin'ny tanimbary sy ny heniheny ary miafara eo amin'ny farihy. Izaosa fikarohana izao dia enti-maneho ny fivoaran'ireo singa mandrakotra ny tany eo amin'ny sahan-driakan'i Maningory sy ilay farihy ka jerena amin'ny alalan'ny taosarintany izany. Sary azo avy amin'ny zana-bolana Landsat TM, ETM+ ary OLI tamin'ny taona 1990/1993/1994, 2001 ary 2014 no nokirakiraina tamin'ny alalan'ny fitaovana manokana ao amin'ny solosaina dia ny ENVI 4.3, ArcMap 10.1 sy Idrisi Selva. Nampiasaina ny « indice *NDWI* de McFeeters » mba anavahana ny rano eo amin'ny sary izay mirakitra ny farihin'Alaotra rahateo. Rehefa nampitahaina ny haben'ilay farihy nandritra ny fotoana telo samihafa dia miharihary ny fihenàny arakaraky ny fizaran-taona. Nihena 9,4% izany tamin'ny vanim-potoana main-tany ny taona 1994 hatramin'ny 2014 ary tonga 10,7% kosa izany fihenàny izany tamin'ny vanim-potoanan'ny orana ny taona 1993 hatramin'ny 2014. Ankoatr'izay dia nisy fomba fikirakiràna sary hafa koa antsoina hoe *Maximum likelihood* nampiasaina mba ahafantarana ireo singa mandrakotra ny tany eo anivon'ny sahan-driaka. Anisan'ny marika ahafantarana ny hatsaran'ny fikirakiràna ny sary ny « indice Kappa » izay avo tokoa tamin'ity voka-pikarohana ity satria nahatratra 0,83 izany ka nahafahana nanohy ny fizotran'ny asa. Araka izany no nahitàna fa ny bozaka sy ny savoka no betsaka eo an-toerana ary ny rano no kely indrindra. Ny fivoaran'ireo singa mandrakotra ny tany eo amin'ny sahan-driaka dia maneho indrindra fa niova ho savoka ny sasany tamin'ny ala mikitroka (7,19% n'ny faritra) ary ny sasany tamin'ny savoka kosa nisy nivadika ho bozaka (6,47%) nandritra ny taona 1990 hatramin'ny 2014. Izany fahapotehan'ny zava-boahary izany no vokatry ny fandalovan'ny asan'ny olombelona teo amin'io faritra io. Ny fihenàna tena misongadina noho izany dia hita eo amin'ny ala mikitroka (3,23%) izay manome vahana ny fitombon'ny bozaka sy ny toeram-pambolena kosa (1,68% sy 1,03% isanisany). Ireo rehetra ireo no manazava ny fototry ny fiotsahan'ny tany ary hita eto fa misy hifandraisany ny fivoaran'ireo singa mandrakotra ny tany sy ny fahatotoran'ny farihy amin'ny fasika. Tsikaritra ihany ny fihenàn'ny farihy satria miha-mivelatra ny heniheny sy ny toeram-pambolena manodidina azy. Ny fahafantarana izany no nampitsiry ny hevitra hamolavolàna paikady mifanaraka sy mahomby mba hanalefahana ny olana ateraky ny faharitràn'ny rano eo amin'io farihin'Alaotra io.

Teny manan-danja : Farihin'Alaotra, fiovàna, singa mandrakotra ny tany, fitarafana ny tany avy eny amin'ny zana-bolana, indice *NDWI*, sahan-driaka, Maningory

TABLE DES MATIERES

RESUME.....	i
ABSTRACT.....	ii
FAMINTINANA.....	iii
INTRODUCTION.....	1
PARTIE 1 : MATRIELS ET METHODES.....	3
1.1 Problématique	3
1.2 Hypothèses	6
1.3 Milieu d'étude	7
1.3.1 Localisation géographique	7
1.3.2 Description du bassin versant du Maningory	8
1.3.3 Aspect climatique de la zone.....	9
1.4 Données spatiales utilisées.....	10
1.4.1 Images satellitaires	10
1.4.2 Base de données sur le bassin versant.....	13
1.5 Prétraitement des images.....	13
1.5.1 Calibration radiométrique	13
1.5.2 Correction atmosphérique	14
1.5.3 Mosaïque des images	14
1.5.4 Délimitation de la zone d'étude.....	15
1.6 Cartographie du lac et de l'occupation du sol	15
1.6.1 Classification indiciaire par NDWI.....	15
1.6.2 Classification semi-supervisée des images.....	16
1.7 Evaluation de la classification.....	16
1.7.1 Séparabilité des classes	16
1.7.2 Matrice de confusion.....	17

1.7.3	Indice Kappa	17
1.8	Analyse de la dynamique de l'occupation du sol	18
1.8.1	Matrice de transition.....	18
1.8.2	Traitement statistique	19
1.8.3	Corrélation entre la dynamique des classes d'occupation du sol et du lac.....	19
1.9	Limites de l'étude.....	20
1.10	Cadre opératoire de recherche.....	22
PARTIE 2 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS		23
2.1	Evolution observée a l'échelle du lac Alaotra.....	23
2.1.1	Comportement du lac vis-à-vis des précipitations.....	23
2.1.2	Changement intra-saisonnier de la superficie du lac Alaotra	24
2.1.3	Changement inter-saisonnier au niveau du lac Alaotra	25
2.2	Validation de la classification	27
2.2.1	Différents types de classes	27
2.2.2	Indice de séparabilité.....	28
2.2.3	Matrice de confusion	29
2.2.4	Indice Kappa	30
2.3	Etats de l'occupation du sol	30
2.3.1	Occupation du sol en 1990.....	31
2.3.2	Occupation du sol en 2001	31
2.3.3	Occupation du sol en 2014.....	31
2.4	Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol.....	35
2.4.1	Corrélation entre les classes d'occupation du sol et le lac	36
2.4.2	Dynamique de l'occupation du sol entre 1990 et 2001	37
2.4.3	Dynamique de l'occupation du sol entre 2001 et 2014	39
2.4.4	Dynamique de l'occupation du sol entre 1990 et 2014.....	41
2.5	Impact de la dynamique forestière sur l'évolution du lac	43
PARTIE 3 : DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS		46

3.1	Discussion sur les résultats.....	46
3.1.1	Superficie du lac Alaotra au cours du temps	46
3.1.2	Corrélation entre la dynamique du lac et celle de l'occupation du sol.....	47
3.1.3	Occupations du sol et leur évolution d'après la littérature	47
3.1.4	Dynamique forestière en relation avec le recul du lac	48
3.2	Discussion sur les hypothèses	48
3.3	Recommandations	50
3.3.1	Recommandations techniques	50
3.3.2	Opérationnalisation de la recherche	51
	CONCLUSION	56
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	58
	ANNEXES	I
	Annexe 1. Caractéristiques de la zone d'étude	I
	Annexe 2. Cartographie des sous-bassins versants	IV
	Annexe 3. Variation mensuelle de la pluviométrie de la station météorologique d'Ambohitsilaozana Ambatondrazaka (mm) de 1990 à 2002	V
	Annexe 4. Séparabilité par paire entre les classes	V
	Annexe 5. Zone d'observation de la dynamique de l'occupation du sol.....	VI
	Annexe 6. Matrice de transition entre 1990 et 2001 (en ha)	VII
	Annexe 7. Matrice de transition entre 2001 et 2014 (en ha)	VII
	Annexe 8. Matrice de transition entre 1990 et 2014 (en ha)	VII

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Pluviométrie moyenne enregistrée à Ambatondrazaka au cours de la période 1962-2005 ...	9
Tableau 2. Températures moyennes mensuelles pour la période 1962-2005.....	9
Tableau 3. Caractéristiques des images satellitaires utilisées	11
Tableau 4. Technique d'élaboration d'une matrice de confusion	17
Tableau 5. Aperçu d'une matrice de transition	19
Tableau 6. Changements de la superficie lacustre entre les saisons sèches (1994 à 2014).....	24
Tableau 7. Changements de la superficie lacustre entre les saisons humides (1993 à 2014).....	25
Tableau 8. Changements inter saisonniers de la superficie lacustre	26
Tableau 9. Matrice de confusion du résultat de classification de l'image 2014.....	29
Tableau 10. Indices Cramer's V pour les variables explicatives.....	36
Tableau 11. Matrice de transition entre 1990 et 2001	37
Tableau 12. Matrice de transition entre 2001 et 2014.....	39
Tableau 13. Matrice de transition entre 1990 et 2014.....	42
Tableau 14. Comparaison entre les pertes en superficie du lac Alaotra.....	46
Tableau 15. Cadre logique	54

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Diagramme ombrothermique pour la période 1962-2005, Station Ambatondrazaka	10
Figure 2. Comparaison entre précipitations moyennes et débits moyens sortant du lac Alaotra	23
Figure 3. Evolution de la superficie du lac Alaotra sous l'effet de la saison sèche	25
Figure 4. Evolution de la superficie du lac Alaotra sous l'effet de la saison humide	25
Figure 5. Evolution de la superficie du lac Alaotra sur trois dates (1993/1994, 2001 et 2014)	26
Figure 6. Comparaison entre les précipitations en 1993, 1994, 2001 et les précipitations normales....	27
Figure 7. Distribution des classes d'occupation du sol sur trois dates (1990, 2001 et 2014).....	35
Figure 8. Evolution des classes d'occupation du sol entre 1990, 2001 et 2014	35

Figure 9. Changement net des classes d'occupation du sol entre 1990 et 2001	37
Figure 10. Changement net des classes d'occupation du sol entre 2001 et 2014.....	39
Figure 11. Changement net des classes d'occupation du sol entre 1990 et 2014.....	41
Figure 12. Evolution des forêts et de la superficie du lac entre 1990, 2001 et 2014.....	44

LISTE DES CARTES

Carte 1. Cartographie de la zone d'étude	8
Carte 2. Références des images LANDSAT utilisées	12
Carte 3. Occupation du sol dans le bassin versant du Maningory en 1990	32
Carte 4. Occupation du sol dans le bassin versant du Maningory en 2001	33
Carte 5. Occupation du sol dans le bassin versant du Maningory en 2014.....	34
Carte 6. Dynamique des forêts et du lac Alaotra entre 1990, 2001 et 2014.....	45

LISTE DES EQUATIONS

Equation 1. Valeur de la radiance effective	14
Equation 2. Indice NDWI de McFeeters (McFeeters, 1996)	15
Equation 3. Indice Kappa (Congalton , 1991).....	18
Equation 4. Indice Kappa simplifié (Cohen, 1960).....	18
Equation 5. Taux de changement net d'une classe entre deux dates.....	19

LISTE DES ACRONYMES ET DES SIGLES

BRL	: Bureau d'étude : Société d'Aménagement du Bas-Rhône et du Languedoc
CREAM	: Centre de Recherches, d'Etudes et d'Appui à l'Analyse Economique à Madagascar
EAU	: Plans d'eau
ENVI	: <i>Environment for Visualizing Images</i>
ETM+	: <i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i>
FDG	: Forêt dégradée
FDS	: Forêt dense humide
FTM	: Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara
IOV	: Indicateur Objectivement Vérifiable
ISODATA	: <i>Iterated Self-Organizing Data Analysis Technics</i>
LCM	: <i>Land Change Modeler</i>
MAEP	: Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche
MAR	: Zone marécageuse
NDWI	: <i>Normalized Difference Water Index</i>
OLI	: <i>Operational Land Imager</i>
ROI	: <i>Region Of Interest</i>
SAV	: Savane herbeuse
SCV	: système Sous-Couvert Végétal
SIG	: Système d'Information Géographique
SOMALAC	: Société Malgache d'Aménagement du Lac Alaotra
SPOT	: Système Pour l'Observation de la Terre
TM	: <i>Thematic Mapper</i>
USGS	: <i>United States Geological Survey</i>
ZDC	: Zone de culture

GLOSSAIRE

Dark Subtract : une des fonctions de prétraitement des images satellitaires dans le logiciel ENVI pour dissoudre les perturbations atmosphériques.

Lacs : étendues d'eau qui, en toute saison, ont une profondeur supérieure à 1,50 m. ils possèdent toujours une surface d'eau libre et dont la végétation émergée ou immergée ne se rencontre que sur les berges ou dans les zones temporairement inondées (Ranarijaona, 1999).

Lavaka : nom malgache qui désigne une grande excavation en forme de cirque, creusée dans le flanc d'une colline provenant d'une exagération du processus d'érosion en ravins ou *gully erosion* des Américains (Riquier, 1954).

Marais ou marécages : milieux dépourvus d'eau de surface libre, toujours en eau même pendant la saison sèche. A Madagascar, ils sont envahis d'hélophytes comme *Eleocharis*, *Cyperus* et *Phragmites* (Davies et Gasse, 1987).

Region of Interest (ROI) : ou zone d'entraînement correspondant à la partie de l'image qui sert de référence en termes de valeur spectrale pour le traitement des images à travers la classification supervisée.

Savoka : formation forestière secondaire qui repousse après le *tavy* ou culture sur brûlis (Humbert, 1965).

Shapefile : couche de vecteurs contenant des données pouvant être analysées par un logiciel SIG

Système de semis direct avec couverture végétale (SCV) : techniques basées sur le non travail du sol, le semis direct et l'incorporation de plantes de services dans la rotation (Penot *et al.*, 2010).

Tavy : terme malgache employé sur les versants orientaux pour désigner la culture sur brûlis dans les forêts humides de l'Est de l'île.

Téledétection : ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le lac Alaotra qui est le plus grand lac rencontré à Madagascar, s'étend sur une superficie de l'ordre de 20.000 ha. Il assure l'approvisionnement en eau du grenier à riz de l'île et contribue également à une énorme production en poissons d'eau douce (CREAM, 2013). Il est cependant affecté par divers phénomènes comme l'ensablement issu des sédiments charriés depuis les collines du bassin versant. De ce fait, la superficie et la profondeur du lac ont changé (Bakoariniaina *et al.*, 2006) et la production rizicole a diminué presque de moitié (Ranarijaona, 2007). Alors que la survie de nombreux paysans voire de toute la population rurale de la périphérie du lac et des zones d'exportation des produits, est concernée, une priorisation de la pérennisation du lac doit être envisagée. Pour cette pérennisation la mise en place d'une gestion durable des ressources naturelles peut être considérée. Des études portant sur les facteurs de dégradation du lac ont déjà été réalisées (Kull, 2000 ; Bakoariniaina *et al.*, 2006 ; Ranarijaona, 2007 ; Andrianirina *et al.*, 2012 ; Randrianasolo, 2013) mais elles n'apportent pas d'éclaircissements sur la tendance de changement qui s'installe suite à cette dégradation. Afin de mieux gérer la ressource, il faut procéder à une prospective pour identifier les changements à venir. En effet, cela permet d'appréhender des pistes d'orientation sur les décisions à prendre dès maintenant pour prévenir les risques à venir. C'est pourquoi des recherches complémentaires comme celle qui fait l'objet du présent mémoire sont nécessaires. Cette étude contribue à l'apport de connaissance à dimension physique sur les problèmes réels en visualisant les changements passés du milieu et la tendance de la dynamique du lac. Les paysages du bassin versant ont considérablement évolué avec de profonds changements dans l'occupation du sol. L'analyse de la dynamique du lac et de sa périphérie dans le temps et dans l'espace associée à l'étude de ce changement d'occupation du sol constitue le vif du sujet. Le niveau du lac varie en fonction des apports externes en eau, surtout de la pluie sur le bassin versant du lac (Ferry *et al.*, 2009). Ainsi, la recherche tient à caractériser le mouvement de l'eau du lac en intégrant dans sa première hypothèse l'existence de changement intra et inter saisonnier de la taille du lac. L'occupation du sol dans le bassin versant du Maningory est généralement dominée par une prairie à graminée installée suite à la disparition de la forêt (Chaperon *et al.*, 1993 ; Lowry *et al.*, 1995). Le changement d'occupation de sol que cette recherche tient à élucider concerne la transition d'une classe à une autre qui aurait un impact sur le recul du lac. Cette démarche a permis de formuler la deuxième hypothèse qui met le point sur la proportionnalité entre la dynamique du lac et le changement d'occupation du sol. La couverture forestière de la zone a été analysée individuellement malgré sa faible proportion. En effet, le rôle primordial de la forêt en participant à la fonction de protection des versants est ici testé. L'absence de couverture forestière entraîne l'érosion sur les pentes des collines qui provoque l'ensablement des rizières et du lac (Ferry *et al.*, 2009). Ainsi, l'étude cherche à identifier l'importance de la déforestation dans le bassin versant et son rapport avec le retrait du lac.

Delà découle la troisième hypothèse qui stipule la relation entre la dynamique du paysage forestier et celle du lac. Dans la présente étude, l'analyse de la dynamique du lac et de l'occupation du sol est effectuée à l'aide de traitement d'images satellitaires qui montrent l'aspect du lac et ses environs à une date donnée. Les images utilisées sont celles des années 1990, 2001, 2014 correspondant à la zone d'étude. Le traitement de ces images est assuré par les outils de SIG et de télédétection qui sont destinés à cette fin. Ainsi, les principaux résultats que la recherche tient à montrer concernent d'abord la mise en évidence de la dynamique du lac entre les dates données, ensuite l'évolution de la superficie lacustre vis-à-vis du changement d'occupation du sol, enfin l'évolution de la superficie du lac en fonction de la dynamique de la couverture forestière dans le bassin versant. Pour mieux cerner l'étude en l'ajustant à la démarche hypothético-déductive, le plan du document sera dressé comme suit : la première partie contient la problématique de la recherche avec les hypothèses d'analyse ; la seconde partie explique les matériels et méthodes utilisés le long des investigations ; la troisième partie comprend les résultats de la recherche effectuée ; la quatrième partie avance les discussions et recommandations qui reflètent l'opérationnalité de l'étude ; et enfin, le document est récapitulé par une conclusion.

MATERIELS et METHODES

PARTIE 1 : MATÉRIELS ET MÉTHODES

1.1 PROBLÉMATIQUE

La majorité des écosystèmes naturels d'importance internationale sont situés dans les pays en voie de développement (Stattersfield *et al.*, 1998). A l'instar de Madagascar qui fait partie des « *hots spots* » de la biodiversité mondiale (Myers, 1988 et 1990 ; Ganzhorn *et al.*, 2001), elle constitue un réservoir de biosphère de dignité mondiale. Caractérisée par une forte richesse spécifique et une endémicité élevée, Madagascar abrite par exemple près de 1.503 espèces et sous-espèces endémiques de plantes vasculaires, plus de 134 espèces et sous-espèces de mammifères endémiques et plus de 352 espèces et sous-espèces endémiques de reptiles (Waeber *et al.*, 2014).

Un des écosystèmes d'importance mondiale de Madagascar est le lac Alaotra qui a été inscrit comme un site RAMSAR depuis 2003. Le lac Alaotra est une zone humide exceptionnelle car elle protège un lémurien endémique unique (*Hapalemur alaotrensis*) dont l'habitat est l'immense marais limitrophe du lac (Ranarijaona, 2007). Il sert également de refuge permanent ou saisonnier pour 72 espèces d'oiseaux (Pidgeon, 1996). Par ailleurs, le lac fournit des opportunités d'ordre économique à la population locale et pour le pays. La région du lac Alaotra est appelée « grenier à riz » de Madagascar car elle assure une production rizicole excédentaire de 250.000 tonnes par an (Rakotonierana, 2004) grâce à la présence du lac qui assure l'irrigation des rizières sur les plaines (Wright et Rakotoarisoa, 2003). Elle est reconnue aussi pour sa production piscicole élevée en termes de poisson d'eau douce (Moreau, 1980). C'est pourquoi, la source de revenu de la population locale dépend étroitement de cet écosystème lacustre.

Les bouleversements qui affectent le paysage naturel s'expliquent soit par des facteurs environnementaux (Lamb, 2001) ou des pressions anthropiques (Osborne *et al.*, 2001). Pour le cas du lac Alaotra, le paysage est modifié à cause du changement climatique et des déforestations spectaculaires (Dufils, 2003). Des collines dépourvues de forêt couvre la majeure partie du paysage dans le bassin versant. En plus, le seul vestige de forêt qui existe à l'horizon du lac Alaotra, la forêt de Zahamena sur le côté Est, est en perpétuel état de dégradation aussi. Cette forêt de Zahamena est bordée d'espaces où l'agriculture et les pâturages sont importants (Andriamalala *et al.*, 2009). La dégradation forestière à travers le défrichement, la culture sur brûlis, les exploitations illicites ont conduit à la disparition progressive de la forêt. D'ailleurs, la déforestation est déjà une menace réelle pour l'ensemble du paysage de l'île (Ramohavelo *et al.*, 2014). Dans les zones tropicales, la pauvreté manifestée par la pratique des cultures sur-brûlis et la croissance démographique expliquent la déforestation (Jarosz, 1996).

Après la déforestation et le feu, l'érosion est une autre menace importante pour l'environnement à Madagascar. L'île est surnommée « championne de l'érosion » par la Banque Mondiale (Christian, 2000). Dans le contexte du lac Alaotra, le défrichement intense du couvert forestier des collines en amont du lac entraîne des processus d'érosion à l'origine des dégradations catastrophiques des collines par des ravinelements appelés *lavakas* (Bakoariniaina *et al.*, 2006). L'érosion emporte d'énormes quantités de sol en aval et provoque l'ensablement des bas-fonds, plus particulièrement des périmètres irrigués (Andrianirina *et al.*, 2012). Cela induit une baisse frappante de la production rizicole et piscicole. A l'échelle des temps géologiques, le lac Alaotra est déjà sur le point de disparaître et son évolution s'est accélérée de façon perceptible à l'échelle humaine depuis le début du XX^e siècle (Moreau, 1977).

Par ailleurs, les facteurs anthropiques sont aussi à l'origine de la dégradation des ressources naturelles. Quand les bas-fonds ne suffisent plus à la population rurale pour la culture, elle se tourne vers les collines aux alentours du lac. Pourtant, ces paysans adoptent des pratiques culturales et pastorales particulièrement érosives sur ces sols fragiles (Domas *et al.*, 2008). Ces pratiques se manifestent essentiellement par les cultures sur brûlis d'une part et les mouvements de déplacement des troupeaux entre les *tanety* et les rizières d'autre part. En fait, les animaux pâturent neuf mois dans les rizières et trois mois sur les *tanety* (Demeringo, 2005). Par la suite, l'écosystème lacustre court un grand risque à cause de la croissance démographique. Le nombre de population de la cuvette a doublé entre 1987 et 2005 pour atteindre 670.000 habitants en 2005 (Andrianirina *et al.*, 2012).

Compte tenu de l'importance manifeste de l'ensemble de la zone humide du lac Alaotra, et devant le degré de menaces qui pèsent sur l'écosystème, il est primordial de déployer des mesures de gestion durable du milieu et de ses ressources en eau.

Le suivi de l'environnement est un prérequis pour la protection de l'état des ressources et la mise en place de cette gestion durable. Des méthodes plus effectives et plus efficaces sont en cours de recherche pour mieux conduire le suivi des écosystèmes aquatiques et terrestres. Les méthodes traditionnelles consistant à compiler des données complètes et à jour portant sur les ressources étaient laborieuses, incomplètes et quasiment impossibles à une grande échelle. Avec l'avènement du Système d'Information Géographique (SIG) et de la télédétection, il est dorénavant possible de cartographier dans un délai concis le paysage et les composants qui lui sont associés (Edwards *et al.*, 1996). Ces deux outils s'avèrent fiables pour parvenir au suivi régulier des ressources à partir des cartes d'occupation du sol multi-dates obtenues. La télédétection et le SIG permettent aux écologistes et gestionnaires des ressources naturelles d'acquies rapidement les données et d'observer les changements périodiques (Bedru, 2006).

Des études antérieures concernant les lacs dans le monde vues sous l'angle de la télédétection ont déjà été réalisées. Elles portaient généralement sur des problèmes de pollution des lacs (Schimmer, 2008) ou de leur assèchement (Gao *et al.*, 2005) notamment dans les milieux arides et semi-arides, à l'exemple de l'étude menée sur le lac Chad en Afrique (Leblanc *et al.*, 2007).

La présente étude concerne une zone à climat tropical humide où les ressources en eau sont encore suffisantes de façon modérée. L'importance de l'étude de cette zone est 'préventive' afin de comprendre la tendance de dégradation qui pèse sur l'écosystème pour anticiper les mesures à prendre. Si aucune mesure n'était entreprise, le lac risquerait en effet de se tarir avec une désertification du paysage. Malgré la tendance irréversible de ces phénomènes cataclysmiques, il vaut mieux agir pour ralentir leur cours, trouver une issue pour renverser la tendance en renforçant la capacité d'adaptation et de résistance du milieu face aux pressions.

Pour ce faire, il est nécessaire de disposer d'une évaluation quantitative des changements spatio-temporels de la superficie du lac et de l'occupation du sol. Ces évaluations informent le suivi de l'évolution du système qui est la base des décisions de gestion à appliquer sur le lieu.

C'est dans ce contexte que la question de recherche suivante se pose : ***La dynamique du lac est-elle liée au changement de l'occupation du sol et de la couverture forestière rencontrée dans le bassin versant ?***

A partir de cette interrogation émergent les sous-questions suivantes :

Sous quelle forme de dynamisme se présente le changement de superficie du lac ?

Comment se manifeste le changement de l'occupation du sol ?

Quel type de relation existe-t-il entre le changement de l'occupation du sol et la dynamique du lac ?

Comment la dynamique du paysage forestier se manifeste-t-elle en particulier ?

En quoi consiste la relation entre l'évolution du paysage forestier et celle du lac ?

1.2 HYPOTHESES

Pour répondre à la problématique, trois hypothèses sont avancées et vérifiées.

Hypothèse 1 : La dynamique spatio-temporelle du lac Alaotra montre des changements intra- et inter saisonniers en superficie

La première hypothèse d'analyse consiste à mettre en évidence l'existence de changements sur la superficie du lac, d'une part pour une même saison entre les trois années d'étude (1994, 2001 et 2014), et d'autre part entre la saison sèche et la saison humide. Comme la quantité de pluie varie largement en fonction des saisons, l'analyse des changements au niveau du lac y dépendra nécessairement. Il faut donc tenir compte de ces variations pluviométriques afin de connaître le comportement du lac à chaque date choisie. Dans un premier temps, l'étude va essayer d'analyser l'évolution de la superficie du lac pour chaque saison. De ce fait, la connaissance des mois qui délimitent les saisons s'avère importante. La comparaison se fait alors entre la superficie du lac sur les images correspondant à une saison bien déterminée. Puis dans un second temps, l'évolution de la superficie du lac entre deux saisons dans une même année sera étudiée. Il s'agit de comparer la superficie du lac d'une image prise en saison sèche avec celle d'une image en saison humide en analysant la différence rencontrée.

Hypothèse 2 : Le processus de comblement du lac est proportionnel à l'évolution de l'occupation du sol

La deuxième hypothèse d'analyse porte sur la détection de la dynamique de l'occupation du sol. L'évolution de l'occupation du sol se manifeste par la transition d'une classe à une autre pendant la période d'étude pouvant induire le recul du lac. En d'autre terme, il s'agit d'évaluer l'importance de changement de l'eau en d'autre type d'occupation du sol. Des cartes d'occupation du sol seront élaborées pour ressortir les différentes classes. Ensuite, ces cartes vont servir pour déterminer la proportion de pixels affectés à chaque classe. La matrice de transition est la plus aisée pour mettre en évidence la logique de changement interclasse. Ainsi, à partir de la matrice de transition créée, l'affectation de chaque catégorie d'occupation du sol sera connue. Il en est de même pour le taux de pixels affecté par le changement d'une classe à une autre. L'analyse va être menée par pallier de dix ans en moyenne, c'est-à-dire entre la première et la deuxième date, puis entre la deuxième et la troisième date. Après, les trois dates seront prises globalement. En effet, à chacune de ces étapes, une matrice de transition est élaborée pour mettre en évidence la proportion de changements. En général, cette partie de l'étude consiste donc à analyser le processus d'évolution du paysage dans le bassin versant et à apprécier la relation de celui-ci avec l'évolution du lac.

Hypothèse 3 : La dynamique du paysage forestier influe sur la diminution de la superficie lacustre

La troisième hypothèse d'analyse stipule l'étude du comportement de la couverture forestière suivi de l'analyse de son influence sur la diminution de la superficie lacustre. La dynamique du paysage forestier ici est la tendance vers la dégradation des forêts du bassin versant. Dans cette partie, la classe forêt est analysée séparément des autres classes. La couverture forestière est essentiellement rencontrée sur le côté Est du bassin versant. En fait, l'hypothèse à vérifier considère l'impact de la présence et de l'absence de couverture forestière sur le lac. La recherche suppose que la disparition de la forêt du bassin versant constitue un des facteurs expliquant le comblement du lac. En effet, le rôle principal des forêts sur la rétention des sols sur versant est assez connu. La présence de la forêt est très importante pour la protection des sols contre l'érosion surtout que les reliefs du versant oriental de l'île sont considérablement pentus. La dégradation de ces forêts accentue la vulnérabilité des sols à l'érosion qui entraîne des avalanches vers l'aval et par la suite l'ensablement du lac.

1.3 MILIEU D'ETUDE

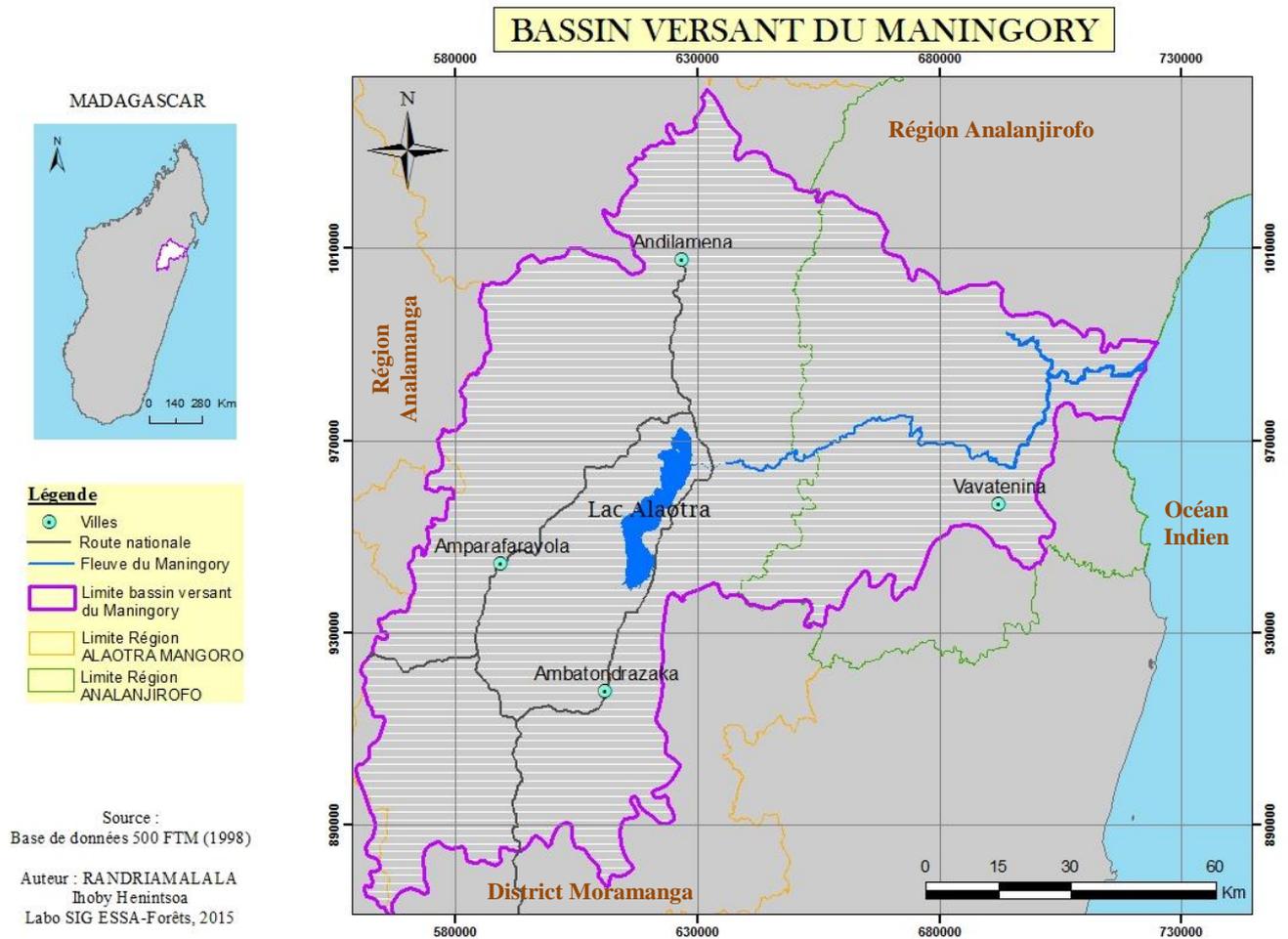
1.3.1 Localisation géographique

L'étude a été conduite au niveau du bassin versant du Maningory situé au Nord-Est de l'île (Carte 1). Il possède neuf affluents principaux provenant de ses sous-bassins versants et ayant comme tributaire le plus grand fleuve de la zone qui est le fleuve de Maningory (Chaperon *et al.*, 1993). Le bassin versant englobe une grande partie de la Région Alaotra Mangoro et une partie de la Région Analanjirofo où se trouve l'embouchure du Maningory.

Le bassin est délimité au Nord par la Région Analanjirofo, au Sud par le District Moramanga, à l'Est par l'océan Indien et à l'Ouest par la Région Analamanga. Il est localisé entre les points dont les coordonnées géographiques sont les suivantes :

- 1- Nord-Ouest : S 17° 02.000' - E 48° 14.000'
- 2- Nord-Est : S 17° 05.000' - E 48° 40.000'
- 3- Sud-Est : S 17° 58.000' - E 48° 33.000'
- 4- Sud-Ouest : S 18° 10.000' - E 48° 00.000'

Le Lac Alaotra qui est le plus grand réservoir et régulateur hydrique de Madagascar, se trouve dans ce bassin versant. Il fait partie des zones humides de la région et son centre est repéré approximativement au point S 17° 28.210' - E 48° 31.400'. C'est un lac tectonique formé dans des failles avec une superficie de l'ordre de 20.000 ha (CREAM, 2013).



Carte 1. Cartographie de la zone d'étude

1.3.2 Description du bassin versant du Maningory

Le bassin versant tire son nom du fleuve Maningory qui est le plus grand fleuve de la zone et l'exutoire du lac Alaotra. Le bassin abrite des zones humides et des sous-bassins versants dont les principaux sont : Sahabe au Sud, Anony – Sahamaloto – lac au Nord-Ouest, Sandratsio au Nord, Maningory 01 au centre, Maningory 02, Maningory 03 et Manambato au Nord-Est (Annexe 2).

Au-delà de ces subdivisions géographiques, la cuvette du lac Alaotra constitue un sous-bassin particulier et spécifique, désigné généralement comme le bassin de l'Alaotra. Il inclue l'ensemble de la zone humide et toutes les rivières et canaux avec leurs bassins qui alimentent le lac Alaotra et ses marécages. Le bassin de l'Alaotra est constitué par trois cuvettes : Andilamena au Nord, Alaotra au Centre et Didy au Sud.

1.3.3 Aspect climatique de la zone

Le climat de la région est influencé par l'alizé qui dirige les variations des précipitations et des températures surtout dans la partie Est du bassin versant. La hauteur moyenne des précipitations annuelles est de 1046 mm (Tableau 1) dont la plupart se concentrent de novembre à mars. Le pic maxima s'observe en janvier (249 mm) et le pic minima en juin et août (4 mm).

Tableau 1. Pluviométrie moyenne enregistrée à Ambatondrazaka au cours de la période 1962-2005

Station Ambatondrazaka période : 1962 – 2005													
	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Annuelle
Pluviométrie moyenne (mm)	5	4	9	30	89	224	249	218	157	44	15	4	1046

(Source : Données BRL in Demeringo, 2005)

La température moyenne annuelle est évaluée à 20,87°C (Tableau 2). Le mois le plus chaud est février (23,9°C) et le plus frais est juillet (17°C).

Tableau 2. Températures moyennes mensuelles pour la période 1962-2005

Station Ambatondrazaka période : 1962 – 2005													
	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Annuelle
Température moyenne (°C)	17,0	17,3	18,5	20,8	22,9	23,6	23,6	23,9	23,3	22,1	19,8	17,6	20,87

(Source : Données MAEP in Demeringo, 2005)

Le diagramme ombrothermique ainsi obtenu met en évidence la subdivision saisonnière de l'année. La région est marquée par deux saisons distinctes : la saison chaude et pluvieuse de novembre à mars, et la saison sèche qui est marquée d'avril à octobre (Figure 1).

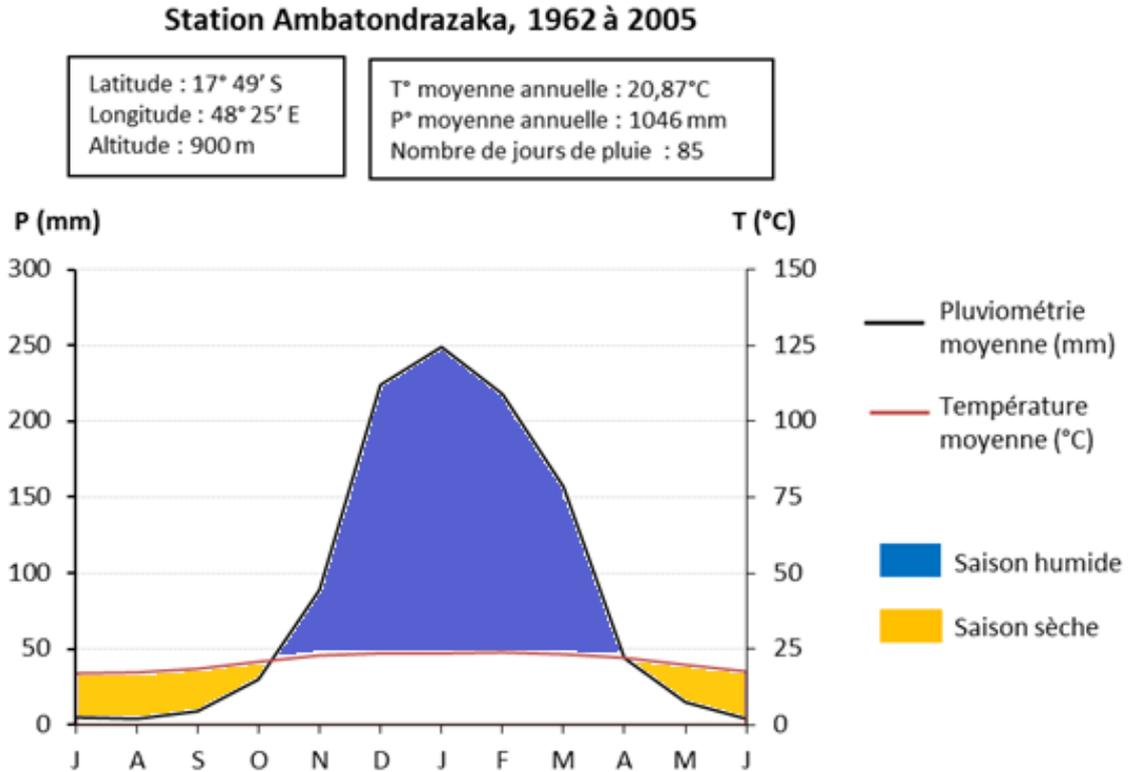


Figure 1. Diagramme ombrothermique pour la période 1962-2005, Station Ambatondrazaka

(D'après Demeringo, 2005)

1.4 DONNEES SPATIALES UTILISEES

La dynamique du lac peut être observée par l'analyse de sa profondeur en fonction de laquelle il y a retraitement ou avancement du lac. Mais dans la présente étude, l'investigation est faite par l'interprétation des variations spatio-temporelles de sa surface détectées sur des images satellitaires. De ce fait, des images satellitaires ainsi que des données sur le bassin versant ont été employées.

1.4.1 Images satellitaires

L'approche développée dans cette étude repose sur l'utilisation des images satellitaires des capteurs TM (*Thematic Mapper*), ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) et OLI (*Operational Land Imager*) du satellite LANDSAT. Ces images ont une résolution spatiale de 30 m et une scène couvre une superficie de 185 km x 185 km. Elles ont permis la réalisation des cartes d'occupation du sol à partir desquelles ont été extraites les classes d'information nécessaires à l'analyse de la dynamique. Les images utilisées ont été au nombre de treize scènes au total dont les dates d'acquisition sont détaillées dans le Tableau 3.

Tableau 3. Caractéristiques des images satellitaires utilisées

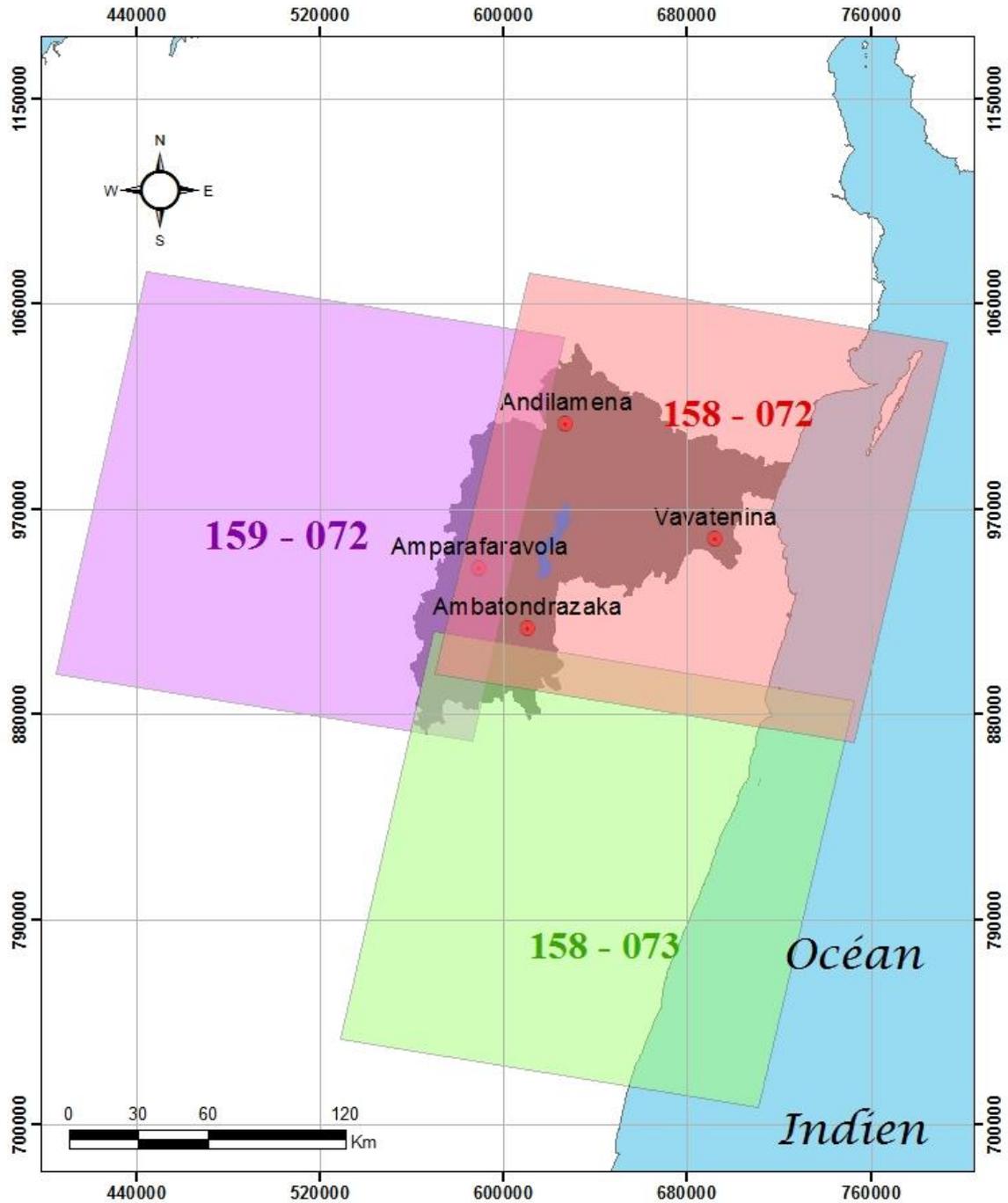
<i>Satellite</i>	<i>Type de capteur</i>	<i>Path_Row</i>	<i>Date de prise de vue</i>
Landsat 5	TM	158_072	19 Juin 1990
		158_072	08 Avril 1993
		158_072	21 Novembre 1994
		158_073	19 Juin 1990
		159_072	30 Septembre 1990
Landsat 7	ETM+	158_072	22 Avril 2001
		158_072	16 Novembre 2001
		158_073	14 Juillet 2002
		159_072	16 Avril 2002
Landsat 8	OLI	158_072	24 Août 2014
		158_072	17 Mars 2014
		158_073	24 Août 2014
		159_073	16 Septembre 2014

Path-Row désigne le numéro de la grille correspondant à la colonne et la ligne de localisation de chaque scène Landsat utilisée.

L'analyse de la dynamique du lac et de l'occupation du sol est effectuée sur trois dates espacées de 10 ans en moyenne pour une durée de 24 ans. La date sur les cartes d'occupation du sol a été adaptée à l'année de la scène 158_072 qui couvre la plus grande surface du bassin versant (87,41%) (Carte 2).

Techniquement, la qualité des images brutes obtenues dépend du type de capteur et de la saison d'acquisition des images. Généralement, les images sont perturbées par la couverture nuageuse pendant la saison pluvieuse empêchant l'identification des objets sous-jacents. Pour y remédier, les techniques généralement appliquées consistent à masquer les parties non-identifiées avec d'autres images assez proches de la date initiale et dépourvues de nuage.

Lors de l'analyse de la dynamique d'occupation du sol, l'espace d'observation a été réduit à la zone non couverte par les nuages et les ombres pendant les trois dates (Annexe 5). Afin de déterminer cet espace, les zones non classées sur les trois images ont été rassemblées puis supprimées à chacune des images, faute d'insuffisance d'images intactes des effets nuageux. De cette manière, les erreurs provoquées par les objets non-identifiés ont pu être évitées même s'ils diffèrent d'une date à une autre. Seuls les objets visibles entrent dans les calculs et les traitements et la superficie de la zone étudiée est réduite par la suite.



Légende :

Grilles de localisation des images

- 158_072
- 158_073
- 159_072

- Villes
- Lac Alaotra
- Bassin versant du Maningory

Source :
 Villes et Hydrographie BD 1/500 000 FTM(1998),
 Limite Bassins versants de Madagascar et
 Grilles de localisation des images Landsat
 Courtesy of the U.S. Geological Survey

Projection Laborde
 Hotine_Oblique_Mercator_Azimuth_Center

Auteur : RANDRIAMAL ALA Ihoby Henintsoa
 Labo SIG ESSA-Forêts, 2015

Carte 2. Références des images LANDSAT utilisées

1.4.2 Base de données sur le bassin versant

Hormis les images satellitaires, des données sur le bassin versant ont été utilisées pour délimiter la zone d'étude. Il s'agit d'un matériel en SIG formé par une couche de vecteur ou couches de données (*shapefile*) associées à un tableau. Ces bases de données contiennent l'ensemble des bassins versants principaux et sous-bassins versants de Madagascar, ainsi que les interfluves, qui ont été triées afin d'isoler le bassin du Maningory.

Le matériel est issu des investigations menées par l'équipe de Wilmé (2006) pour l'étude portant sur les centres d'endémisme à Madagascar. Ces chercheurs ont proposé de considérer que les grands bassins versants avec des sources à haute altitude pouvaient être des bassins de retraite-dispersion pour la biodiversité, alors que les petits bassins avec des sources à moyenne et basse altitude entre ces grands bassins constituaient des centres d'endémisme. Ils ont utilisé la carte topographique de FTM pour déterminer les pentes et le sens d'écoulement des rivières. Les limites d'un système de rivières données sont définies par les aspects topographiques des lignes de crêtes qui les contournent et l'espace correspondant est enregistré dans la base de données (Wilmé *et al.*, 2006).

1.5 PRETRAITEMENT DES IMAGES

L'image fournie par le capteur des satellites n'est pas directement utilisable à cause des anomalies dues à la sensibilité des capteurs, la géométrie d'observation et la présence de l'atmosphère autour de la terre (Benhadj, 2008). Les images brutes ont donc subi un prétraitement à travers les corrections radiométrique et atmosphérique afin d'améliorer leur qualité avant interprétation. Après ces corrections, les images ont dû parcourir d'autres prétraitements pour faciliter la manipulation dans les opérations de traitement ultérieures. L'ensemble s'est soldé par une mosaïque d'images et la délimitation de la zone d'étude.

1.5.1 Calibration radiométrique

Cette technique rectifie les erreurs de dérayage découlant du capteur des images. Les paramètres de chaque bande ont été ajustés à l'aide de métadonnées livrées avec l'image. Le module *Landsat calibration* du logiciel ENVI 4.3 facilite l'application de la calibration radiométrique sur chaque image. Les biais du capteur sont ainsi corrigés suivant les valeurs des coefficients de calibrage du capteur L_{max} et L_{min} qui indiquent respectivement les niveaux maximum et minimum de radiance mesurables par le capteur (Ratovoson, 2011). La valeur de la radiance effective, en l'absence des anomalies du capteur, est obtenue par un calcul basé sur l'emploi de ces radiances minimale et maximale (Equation 1).

Equation 1. Valeur de la radiance effective

$$L = L_{min} + \left(\frac{L_{max} - L_{min}}{DN_{max}} \right) DN$$

Avec L : Radiance effective

DN : Valeur numérique discrète (*Digital Number*)

1.5.2 Correction atmosphérique

L'énergie reçue par un capteur est altérée par l'atmosphère lors de son double trajet, incident (soleil-cible) et réfléchi (cible-capteur). En effet, il y a principalement deux effets atmosphériques :

- Absorption atmosphérique : Plusieurs gaz dans l'atmosphère absorbent ou "piègent" l'énergie dans certaines longueurs d'ondes appelées bandes d'absorption. En particulier, l'ozone diminue sensiblement l'énergie dans le rouge et la vapeur d'eau de façon plus conséquente dans le proche infrarouge.
- Diffusion atmosphérique : La diffusion est la réflexion de l'énergie par des particules de l'atmosphère. Il y a deux types de diffusion selon la taille des particules : la diffusion de Rayleigh (molécules atmosphériques) et la diffusion de Mie (poussière ou aérosols). Ces diffusions affectent l'ensemble du domaine visible du spectre électromagnétique.

Pour corriger ces effets et obtenir une réflectance de surface, des modèles mathématiques sont utilisés (Vermote *et al.*, 2002). Ces modèles décrivent les interactions principales du signal avec l'atmosphère (Benhadj, 2008). Le principe des corrections atmosphériques consiste donc à convertir les valeurs numériques de l'image en radiance ou réflectance dépourvue de l'effet de l'atmosphère. Pour cela, le modèle *Dark Subtract* dans le logiciel ENVI 4.3 a été appliqué. C'est un modèle approximatif qui consiste à soustraire, pour chaque bande, la valeur minimum rencontrée dans telle bande de la valeur de chaque pixel (Benvenuti, 1996 *in* Ratovoson, 2011).

1.5.3 Mosaïque des images

Dans l'acquisition des images LANDSAT sur le site de l'USGS, chaque scène est caractérisée par des numéros de ligne et de colonne spécifique. Pour le cas de la zone étudiée, les numéros associés correspondent respectivement à 158 et 072. Pourtant à cause de la taille du bassin versant, une seule scène ne peut couvrir la totalité de l'espace à observer. Ainsi, une acquisition des images voisines telles que les scènes 158_073 et 159_072 a été effectuée. L'assemblage de ces trois images a fait donc intervenir la fonction *Mosaicking* du logiciel ENVI 4.3. Cela a permis d'observer simultanément les trois images vue qu'elles se trouvent sur une même couche après la mosaïque.

1.5.4 Délimitation de la zone d'étude

Suite aux opérations de prétraitement des images, la zone d'étude a été délimitée afin de réduire la taille des informations à analyser. La limite du bassin versant du Maningory est obtenue à partir des données *shapefile* présentées plus haut. Ces données ont été traitées à l'aide du logiciel ArcMap 10.1 en faisant la requête sur le toponyme Maningory. Un polygone unique a été obtenu engendrant la limite du bassin versant recherchée. Cette limite a servi à la découpe des images utilisées pour l'étude.

1.6 CARTOGRAPHIE DU LAC ET DE L'OCCUPATION DU SOL

Le traitement des images proprement dit concerne l'approche par classification qui leur est appliquée. La classification a pour objectif de produire des images thématiques, c'est à dire des images dont le contenu ne représente plus une mesure mais une interprétation et une catégorisation de la nature des objets associés aux pixels (Richards, 1999). Les résultats de la classification sont généralement des cartes d'occupation du sol (Prenzel, 2004 ; Rogan et Chen, 2004 ; Lu et Weng, 2007) qui sont à la base de nombreuses applications socio-économiques et environnementales (Aspinal et Justice, 2003 ; Lepers *et al.*, 2005).

1.6.1 Classification indiciaire par NDWI

Comme l'étude concerne la dynamique du lac, le traitement individuel de celui-ci est important pour mieux suivre son évolution. En effet, il est possible d'extraire le plan d'eau sur l'image grâce à l'indice de l'eau appelé *NDWI* (*Normalized Difference Water Index*). C'est un indice de teneur hydrique qui effectue des calculs d'addition et de soustraction entre les bandes de l'image pour mettre en exergue l'eau.

L'indice *NDWI* de McFeeters a été choisi pour réaliser le traitement des images car il est corrélé aux surfaces d'eau libre. Celui-ci est calculé à partir des canaux vert et infrarouge moyen dont la formule est donnée par l'équation 2. L'implémentation de cet indice dans le traitement des images a facilité l'isolement de la classe eau.

Equation 2. Indice NDWI de McFeeters (McFeeters, 1996)

$$NDWI (McFeeters) = \frac{(b_{Vert} - b_{NIR})}{(b_{Vert} + b_{NIR})}$$

Avec b_{Vert} et b_{NIR} : réflectances respectives des bandes vert et proche infrarouge

La valeur de *NDWI* est comprise entre -1 et 1 avec comme seuil la valeur 0. Le type de couverture est l'eau si l'indice est supérieur à 0 et les occupations du sol en dehors des plans d'eau correspondent à l'indice inférieur ou égal à ce seuil (McFeeters, 1996).

1.6.2 Classification semi-supervisée des images

Le type de classification utilisée pour le traitement des images est la classification semi-supervisée. Il s'agit de la combinaison de deux types de classification empirique que sont la classification supervisée et celle non-supervisée.

Dans un premier temps, une classification non-supervisée *ISODATA* a été appliquée sur les images prétraitées. Ce type de classification détermine automatiquement les classes à partir du regroupement des pixels sur base de signatures spectrales similaires. Les résultats obtenus permettent de définir les échantillons d'apprentissage correspondant aux polygones correctement classifiés. Ces échantillons servent comme zone d'entraînement pour la deuxième étape de la classification. En termes de télédétection, une zone d'entraînement est un ensemble de pixels présentant une certaine homogénéité spectrale (visible sur la composition colorée de l'image satellite), qui peut être reliée à une certaine classe thématique (Catherine, 2012). En général, les échantillons d'apprentissage sont sélectionnés à partir d'observations faites sur le terrain en repérant des parcelles représentatives des différents éléments devant être classés (Benhadj, 2008).

Ensuite, la méthode supervisée selon le module *Maximum likelihood* a été utilisée pour affiner les résultats de la classification précédente. Dans cette étape, le calcul est basé sur la comparaison entre les pixels voisins et l'assemblage des pixels les plus analogues sous une même étiquette. Les échantillons d'apprentissages ci-dessus ont servi comme zone d'entraînement (ou *ROI*) sous forme de référence pour la classification supervisée.

1.7 EVALUATION DE LA CLASSIFICATION

Afin d'assurer la précision de la classification, les résultats obtenus ont été évalués à l'aide du test de séparabilité des classes, de la matrice de confusion et de l'indice Kappa.

1.7.1 Séparabilité des classes

Pendant le choix des *ROI* s'effectue la première évaluation qui consiste à appliquer le test de séparabilité de Jeffries-Matusita sur les classes représentées par les zones d'entraînement. Ce test permet de vérifier la séparabilité par paire des classes choisies comme échantillons (zones d'entraînement) (Richards, 1999). La séparabilité concerne le degré de discrimination des classes basé sur les signatures spectrales de l'image. Les valeurs des indices sont comprises entre 0 et 2. Une valeur supérieure à 1,9 de l'indice indique une bonne séparabilité entre les classes tandis qu'une valeur inférieure à 1,0 montre une faible séparabilité (recouvrement plus ou moins accentuée des signatures des classes considérées) (Wang *et al.*, 2004 in Ratovoson, 2012). Une meilleure séparabilité signifie l'absence d'interférence entre les deux classes testées par paire.

1.7.2 Matrice de confusion

Parmi les indicateurs statistiques de la performance d'une classification, la matrice de confusion est la plus utilisée (Congalton et Mead, 1983 ; Stehman, 1997 ; Foody, 2002). Elle met en évidence la confrontation entre les résultats de la classification et la vérité terrain. En raison de l'absence d'investigation sur terrain, des images à résolution plus élevée ont été utilisées comme base des zones de contrôle. Il s'agit des scènes de SPOT 5 (résolution spatiale : 2,5m*2,5m) de l'année 2014 et des images *Google Earth* sur lesquelles des points de vérification ont été placés.

Dans la matrice de confusion, les lignes contiennent l'information sur les classes thématiques issues de la procédure de classification ; les colonnes correspondent aux classes thématiques associées aux points de contrôle. Les cellules de la matrice contiennent un nombre de pixels ou d'unités géographiques élémentaires (Tableau 4).

Tableau 4. Technique d'élaboration d'une matrice de confusion

		Points de contrôle				Total	Erreur de commission
		Classe 1	Classe 2	...	Classe i		
Classification	Classe 1	$x_{11}(Cl_1 \rightarrow Cl_1)$	$x_{12}(Cl_1 \rightarrow Cl_2)$		$x_{1i}(Cl_1 \rightarrow Cl_i)$	$\sum x_{1+}$	
	Classe 2	$x_{21}(Cl_2 \rightarrow Cl_1)$	$x_{22}(Cl_2 \rightarrow Cl_2)$		$x_{2i}(Cl_2 \rightarrow Cl_i)$	$\sum x_{2+}$	
	...						
	Classe i	$x_{i1}(Cl_i \rightarrow Cl_1)$	$x_{i2}(Cl_i \rightarrow Cl_2)$	...	$x_{ii}(Cl_i \rightarrow Cl_i)$	$\sum x_{i+}$	
Total		$\sum x_{+1}$	$\sum x_{+2}$	...	$\sum x_{+i}$	$\sum x_{ii}$	
Erreur d'omission							

La somme des éléments de la diagonale représente le nombre total de pixels correctement classés. Le rapport de ce nombre et du nombre total de pixels de la matrice donne la « précision globale » de la classification (Benhadj, 2008). Les erreurs de classification sont de deux types : omission et commission. Les erreurs d'omission surviennent chaque fois qu'un pixel qui aurait dû être affecté à une classe n'a pas été reconnu. Les erreurs de commission apparaissent quand les pixels associés à une classe sont incorrectement identifiés.

1.7.3 Indice Kappa

A part la matrice de confusion, l'indice Kappa a été utilisé pour apprécier la précision de la classification réalisée. L'indice de Kappa (K) sert pour valider et estimer la précision dans le schéma de la classification de la végétation (Pontius, 2000). Cet indice est obtenu à partir des valeurs fournies par la matrice de confusion et calculé par la formule de l'Equation 3.

Equation 3. Indice Kappa (Congalton , 1991)

$$\hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}$$

Avec r : Nombre de lignes dans la matrice de confusion

x_{ii} : Nombre d'observations sur la ligne i et la colonne i

x_{i+} et x_{+i} : Totaux marginaux de la ligne i et de la colonne i respectivement

N : Nombre d'observations total

L'écriture de cet indice peut être simplifiée de la manière suivante (Equation 4).

Equation 4. Indice Kappa simplifié (Cohen, 1960)

$$K = \frac{P_o - P_c}{P_p - P_c} \quad \text{ou} \quad K = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c}$$

Avec P_o : Pourcentage réel obtenu de classification des éléments de l'occupation du sol

P_c : Estimation de la probabilité d'obtenir une classification correcte

P_p : Pourcentage obtenu lorsque la classification est parfaite, ie bonne à 100%

Les techniques mises en concordance ici concernent d'une part la classification des images et d'autre part les points de contrôle sur les images de référence. Les variables sont définies par les catégories d'occupation du sol observées. D'après Pontius (2000), les résultats sont bons et exploitables pour une analyse d'image dont la valeur de Kappa est supérieure à 0,50.

1.8 ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL

La dynamique du paysage peut être décrite par des changements dans le temps de sa composition et de sa structure spatiale (Bamba *et al.*, 2008). Pour analyser la dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant du Maningory, des outils statistiques comme la matrice de transition ont été utilisés. A cela s'ajoutent les graphes illustrant les changements nets intervenus pendant la période d'observation.

1.8.1 Matrice de transition

La matrice de transition est une méthode permettant de décrire de manière condensée, sous forme de matrice carrée, les changements d'état des éléments d'un système pendant une période donnée (Schlaepfer, 2002 *in* Bamba, 2010). Elle montre les fréquences des classes qui restent les mêmes (valeur sur la diagonale) ou celles qui ont changées (valeur en dehors de la diagonale).

La matrice de transition a été élaborée à l'aide du module *CrossTab* du logiciel Idrisi Selva dans lequel deux images en format numérique raster de dates différentes sont mises en confrontation pour détecter la transition de chaque pixel sur les images. Cela permet d'évaluer le nombre de pixels ayant été transférés entre les catégories d'occupation du sol existantes durant les deux dates. Sur les lignes se trouvent les changements de l'année la plus ancienne et sur les colonnes ceux de l'année la plus récente (Tableau 5).

Tableau 5. Aperçu d'une matrice de transition

		Temps T ₁				Total
		Classe 1	Classe 2	...	Classe i	
Temps T ₀	Classe 1	$x_{11}(Cl_1 \rightarrow Cl_1)$	$x_{12}(Cl_1 \rightarrow Cl_2)$		$x_{1i}(Cl_1 \rightarrow Cl_i)$	$\sum x_{1+}$
	Classe 2	$x_{21}(Cl_2 \rightarrow Cl_1)$	$x_{22}(Cl_2 \rightarrow Cl_2)$		$x_{2i}(Cl_2 \rightarrow Cl_i)$	$\sum x_{2+}$
	...					
	Classe i	$x_{i1}(Cl_i \rightarrow Cl_1)$	$x_{i2}(Cl_i \rightarrow Cl_2)$	...	$x_{ii}(Cl_i \rightarrow Cl_i)$	$\sum x_{i+}$
Total		$\sum x_{+1}$	$\sum x_{+2}$	...	$\sum x_{+i}$	$\sum x_{ii}$

1.8.2 Traitement statistique

A part l'élaboration des matrices de transition, une autre analyse statistique simplifiée a été réalisée. Elle consiste à calculer le taux de changement net observé sur l'ensemble du paysage en appliquant la différence entre les superficies des classes sur deux dates (Equation 5). La formule utilisée vient de l'adaptation de celle proposée par FAO en 1996 (Taibou et Dieynaba, 2012).

Equation 5. Taux de changement net d'une classe entre deux dates

$$T = T_{S2} - T_{S1}$$

Avec, T : Taux de changement net
 T_{S2} : Proportion de la superficie d'une classe à l'année 2
 T_{S1} : Proportion de la superficie d'une classe à l'année 1

Les valeurs positives représentent une augmentation de la superficie de la classe durant la période analysée et les valeurs négatives indiquent une diminution de superficie entre les deux dates. Les valeurs proches de zéro signifient que la classe reste relativement stable entre les deux dates.

1.8.3 Corrélation entre la dynamique des classes d'occupation du sol et du lac

L'influence de la dynamique des classes d'occupation du sol sur celle du lac a été analysée à l'aide de l'appréciation de la corrélation entre elles.

Il s'agit donc d'évaluer la force de l'association entre la dynamique du lac (variable dépendante) et la dynamique des classes d'occupation du sol (variables explicatives). En analyse spatiale, il est possible de déterminer cette corrélation par traitement des images de format raster dans le logiciel Idrisi Selva. L'opération consiste à transformer les valeurs nominales des variables qualitatives, que sont les classes d'occupation du sol, en valeurs numériques. La méthode adéquate à cela est la transformation des variables par l'outil *Evidence likelihood* intégré sous Idrisi Selva. Dans la présente étude, les dynamiques de toutes les classes d'occupation du sol ont été choisies comme variable pouvant expliquer la dynamique du lac.

Ensuite, chaque variable explicative a été analysée sous le test basé par l'indice *Cramer's V* en utilisant la variable dépendante qui est l'image booléenne de la dynamique du lac entre 1990 et 2001 d'une part, et entre 2001 et 2014 d'autre part. *Cramer's V* est un indicateur statistique qui évalue l'agrément complet entre deux variables nominales dans un tableau de contingence (Ratovoson, 2012). Cela permet de connaître en même temps la puissance d'explication du changement par la variable explicative testée. Les variables ayant une valeur *Cramer's V* supérieure ou égale à 0,15 ont une association modérée avec la variable dépendante, et celles avec une valeur *Cramer's V* supérieure ou égale à 0,4 ont une forte association avec la variable dépendante (Eastman, 2012). La significativité des résultats obtenus est donnée par *p value* qui affiche un bon indicateur lorsqu'elle est faible, c'est-à-dire inférieur au seuil alpha égal à 0,05. Des résultats significatifs montrent la contribution de la dynamique des classes d'occupation du sol dans la dynamique du lac.

1.9 LIMITES DE L'ETUDE

Les méthodes appliquées dans cette recherche n'ont pas manqué de difficultés constituant ses principales limites.

A propos des scènes choisies, seules les images prises en saison sèche pour les trois dates de l'étude ont été utilisées dans l'interprétation de l'occupation du sol. Celles de la saison humide ont été abandonnées à cause de l'importante couverture nuageuse sur la zone à cette période d'observation. Les corrections ont été vaines car une grande partie de la zone d'étude est restée embrouillée par les nuages, empêchant l'identification des éléments cachés en dessous. Pour faire face à cette difficulté, les nuages sur toutes les images ont été isolés et par conséquent, l'espace d'observation est réduit.

Cependant pour l'observation du lac, des scènes de saison sèche et humide ont été étudiées afin de mieux apprécier sa dynamique. Cela est possible car la taille du lac est assez faible par rapport au bassin versant en entier. Ainsi, le choix des scènes sans nuages au-dessus du lac n'a pas vraiment présenté d'obstacle.

La classification indiciaire par *NDWI* a été à l'origine une source de confusion entre l'eau et la classe zone marécageuse surtout autour du lac. Afin de remédier à ce problème, une reclassification du lac a été réalisée sur chacune des images. De ce fait, la classe « plan d'eau » résultant de la classification indiciaire par *NDWI* a été isolée sur l'image brute. Ici, la partie détachée contient en même temps l'eau libre et les marécages saturés.

Ensuite une classification non-supervisée *ISODATA* est appliquée sur cette portion d'image. Cela permet de différencier l'eau libre des marécages pour pouvoir extraire le lac par la suite. Ces opérations ont été appliquées à toutes les images afin d'assurer la fiabilité des résultats qui sont assurés par l'application d'une même méthode de traitement.

Après les opérations de classification, l'analyse des pixels montre que certaines classes ne correspondent pas exactement aux unités du paysage qui leur sont assignées. Cela s'explique par les interférences entre les pixels lors du choix des zones d'entraînement (*ROI*) et par conséquent dans les résultats de la classification même. Pour y remédier, des corrections manuelles ont été réalisées en identifiant minutieusement les polygones mal-placés puis en rectifiant les codes (*gridcode*). Cette partie du traitement a engagé la majeure partie du temps durant toute l'étude. De ce fait, une attention importante doit être apportée au choix des zones d'entraînement (*ROI*) afin d'obtenir une bonne classification et par la suite moins de correction manuelle.

Concernant l'évaluation des classifications, l'absence d'investigation sur terrain limite le processus de vérification des classes. Néanmoins, l'image fournie par *Google Earth* permet d'y remédier largement à cause de sa qualité élevée en termes de visibilité. Un des points positifs de l'investigation dans le laboratoire comme celle-ci est l'obtention d'informations rapides et à moindre coût.

1.10 CADRE OPERATOIRE DE RECHERCHE

<i>PROBLEMATIQUE</i>	<i>HYPOTHESES</i>	<i>INDICATEURS</i>	<i>METHODES</i>
La dynamique du lac est-elle liée au changement d'occupation du sol et de la couverture forestière rencontrée dans le bassin versant ?	H1 : La dynamique spatio-temporelle du lac Alaotra montre des changements intra- et inter saisonniers en superficie	Ratio précipitations moyennes/débits moyens du lac	Synthèse bibliographique ; Interprétation des données climatiques
		Superficies intra saisonnières du lac Alaotra	Classification indiciaire par <i>NDWI</i> ; Calcul des superficies du lac à partir du traitement des images dans ArcMap 10.1 ; Comparaison des superficies du lac pour les images de la même saison (années différentes) ;
		Superficies inter saisonnières du lac Alaotra	Comparaison des superficies du lac pour les images de saison différente (même année)
	H2 : Le processus de comblement du lac est proportionnel à l'évolution de l'occupation du sol dans le bassin versant	Superficies des classes d'occupation du sol	Classification semi-supervisée des images satellitaires ; Traitement des images satellitaires dans ArcMap 10.1 ; Calcul des superficies de chaque catégorie d'occupation du sol ; Cartographie multi temporelle de l'occupation du sol pour les années 1990, 2001 et 2014
		Matrice de transition 1990-2001	Application du module <i>CrossTab</i> dans Idrisi Selva ; Traitement des résultats dans Excell ; Interprétation des matrices de transition obtenues
		Matrice de transition 2001-2014	
	H3 : La dégradation du paysage forestier accentue la diminution de la superficie lacustre	Superficies forestières sur les trois dates (1990, 2001 et 2014)	Classification semi-supervisée des images satellitaires ; Manipulation des outils ArcMap 10.1 ; Calcul des superficies forestières sur trois dates (1990, 2001 et 2014)
		Corrélation entre la dynamique des forêts et la dynamique du lac	Calcul des indices <i>Cramer's V</i> des dynamiques de chaque classe d'occupation du sol ; Cartographie de la dynamique de la couverture forestière et de celle du lac (1990, 2001 et 2014)

RESULTATS *et* INTERPRETATIONS

PARTIE 2 : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

2.1 EVOLUTION OBSERVEE A L'ECHELLE DU LAC ALAOTRA

2.1.1 Comportement du lac vis-à-vis des précipitations

La pluviométrie ne reflète pas le flux des eaux dans le lac car le lac se charge d'eau avant de jeter l'excédentaire. La hauteur de l'eau du lac ne dépend donc pas directement des pluies. Cela est montré par l'analyse des débits entrants et sortants du lac qui met en exergue l'effet régulateur du lac (Chaperon *et al.*, 1993).

Pour tenir compte de ce mécanisme, une comparaison entre la courbe des précipitations et celle des débits sortants a été réalisée. Les précipitations moyennes utilisées sont celles du diagramme ombrothermique avec des valeurs prélevées sur 43 ans (1962 à 2005). Les débits sortants proviennent des valeurs moyennes mensuelles et annuelles de 34 ans (1945 à 1974) du fleuve Maningory. Ces dernières sont prélevées au niveau de l'exutoire du lac qui est localisé à la station Andromba pendant l'investigation de Chaperon *et al.* (1993) dans leur étude concernant les fleuves et rivières de Madagascar.

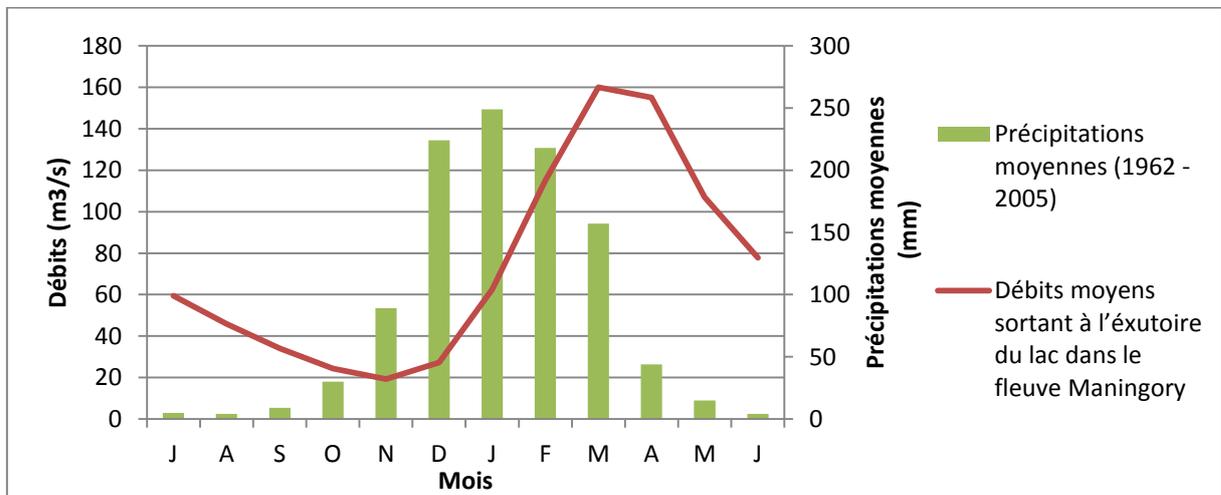


Figure 2. Comparaison entre précipitations moyennes et débits moyens sortant du lac Alaotra

(Sources : Courbe des précipitations : d'après Demeringo, 2005 ; Débits à l'exutoire du lac : Chaperon *et al.*, 1993)

Les apports effectifs du lac ne dépendent pas uniquement de la pluie mais de l'ensemble des eaux amenées par le réseau hydrologique du bassin versant. Cependant, en isolant les précipitations, un décalage d'environ deux mois est noté entre le pic de la courbe des précipitations et celui des débits de fleuve.

Le maximum des précipitations s’observe en Janvier tandis que celui du Maningory en Mars (Figure 2). D’après Ferry *et al.* (2009), le rythme hydrologique et climatique dans la région du lac Alaotra sont liés avec un temps de réponse prononcé de deux à trois mois. Ce décalage entre les apports en précipitation et l’écoulement à l’exutoire montre l’importante capacité de stockage du système lac et marécages de l’Alaotra. Les dates d’observation du niveau de l’eau auxquelles dépend la superficie du lac ont été ajustées à cet effet. En d’autres termes, les saisons considérées initialement subissent un décalage de deux mois chacune, avec comme résultat les « effets des saisons ». Ainsi, l’effet de la saison humide devient entre Janvier et Mai, une période pendant laquelle le lac atteint un niveau plus élevé. Tandis que l’effet de la saison sèche de Juin à Décembre, suite au décalage des précipitations.

La connaissance de ce fonctionnement est très importante car elle permet de recalibrer les saisons d’observation des images du lac. Le choix des dates va en dépendre pour les images satellitaires à interpréter.

2.1.2 Changement intra-saisonnier de la superficie du lac Alaotra

La superficie du lac Alaotra présente des changements qui sont observés sur les images prises à la même saison. Le terme utilisé pour l’analyse de la dynamique du lac s’agit de « l’effet saison » car selon le paragraphe 2.1.1, c’est l’impact de la saison précédente qui caractérise le niveau de l’eau dans le lac ainsi que sa superficie. L’interprétation des images prises sur trois années différentes de même saison met en évidence la diminution progressive de la superficie du lac que ce soit sous l’effet de la saison sèche ou sous l’effet de la saison humide.

Pour l’effet de la saison sèche, les dates retenues comme période d’observation se trouvent en Novembre 1994, Novembre 2001 et Août 2014. Pendant ces périodes, la superficie du lac correspondent respectivement à 18.595 ha ; 17.591 ha et 16.852 ha. Une tendance à la réduction de la superficie du lac est observée (Figure 3). De Novembre 1994 à Novembre 2001, la superficie du lac diminue de 5,4% et elle atteint un taux de réduction de 4,2% de Novembre 2001 à l’Août 2014. Par ailleurs, cette diminution est de 9,4% en vingt ans entre les effets saison sèche des années 1994 et 2014 (Tableau 6).

Tableau 6. Changements de la superficie lacustre entre les saisons sèches (1994 à 2014)

<i>Dates</i>	<i>Superficie (ha)</i>	<i>Changements</i>		
		<i>Période</i>	<i>(ha)</i>	<i>(%)</i>
Novembre 1994	18.594,99	-	-	-
Novembre 2001	17.591,49	1994-2001	1003,5	- 5,4
Août 2014	16.852,23	2001-2014	739,26	- 4,2
-	-	1994-2014	1742,76	- 9,4

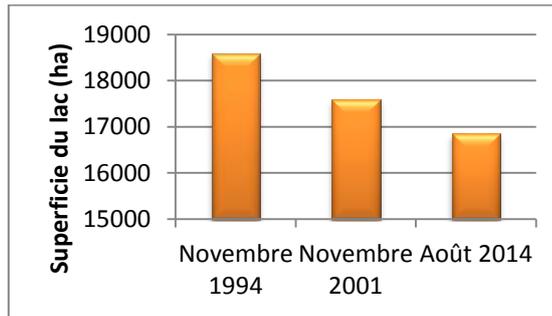


Figure 3. Evolution de la superficie du lac Alaotra sous l'effet de la saison sèche

Pour l'effet de la saison humide, les images analysées sont celles d'Avril 1993, Avril 2001 et Mars 2014. La superficie du lac varie aussi entre ces trois dates et est évaluée respectivement à 18.767 ha, 18.094 ha et 16.764 ha (Figure 4). De ce fait, le lac est réduit de 3,6% entre Avril 1993 et Avril 2001 et de 7,3% entre Avril 2001 et Mars 2014. Cette diminution atteint 10,7% en vingt-et-un ans observés entre les effets saison humide des années 1993 et 2014 (Tableau 7).

Tableau 7. Changements de la superficie lacustre entre les saisons humides (1993 à 2014)

Dates	Superficie (ha)	Changements		
		Période	(ha)	(%)
Avril 1993	18.766,89	-	-	-
Avril 2001	18.094,23	1993-2001	672,66	- 3,6
Mars 2014	16.764,57	2001-2014	1329,66	- 7,3
-	-	1993-2014	2002,32	- 10,7

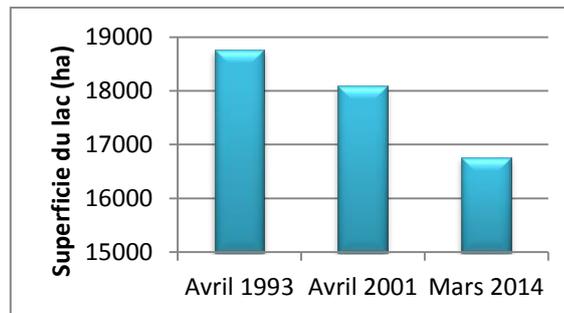


Figure 4. Evolution de la superficie du lac Alaotra sous l'effet de la saison humide

2.1.3 Changement inter-saisonnier au niveau du lac Alaotra

L'étendue du lac varie d'une saison à une autre et ces changements s'observent sur toutes les trois dates étudiées (Figure 5). Les résultats de l'analyse du changement inter saisonnier du lac Alaotra sont montrés par le Tableau 8. Pour l'année 1993/1994, la superficie du lac en saison humide (Avril) est supérieure à celle en saison sèche (Novembre) avec une différence de 0,9%. Les effets saisonniers affectent directement la superficie du lac à cette époque.

Pour l'année 2001, la superficie du lac en saison humide (Avril) est aussi supérieure à celle en saison sèche (Novembre) avec une différence de 2,8%. Ainsi, les effets saison agissent proportionnellement sur le volume d'eau du lac. La superficie du lac en Avril est l'effet de la précipitation moyenne du mois de Février précédent. Il faut noter que le pic de la précipitation moyenne de 2001 se trouve en Janvier avec une valeur assez remarquable (Figure 6). Ce qui induit l'augmentation brusque de la superficie du lac en ce mois d'Avril 2001.

Pour l'année 2014, la superficie du lac en saison humide (Mars) est légèrement inférieure à celle en saison sèche (Août) avec une différence de -0,5%. Dans ce cas, l'explication basée sur les effets saison est insuffisante. Un autre facteur comme le changement climatique entre en jeu car il entraîne un décalage des saisons, une modification de la durée des jours de pluie et de sa quantité moyenne.

Tableau 8. Changements inter saisonniers de la superficie lacustre

Période	Changements (ha)	Changements (%)
Avr. 1993 – Nov. 1994	171,9	0,9
Avr. 2001 – Nov. 2001	502,74	2,8
Mars 2014 – Août 2014	- 87,66	- 0,5

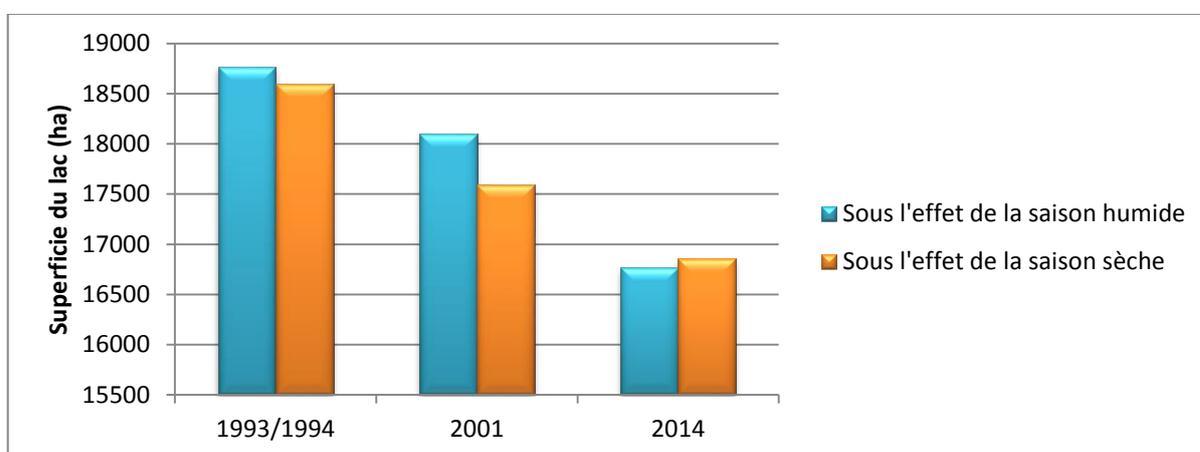


Figure 5. Evolution de la superficie du lac Alaotra sur trois dates (1993/1994, 2001 et 2014)

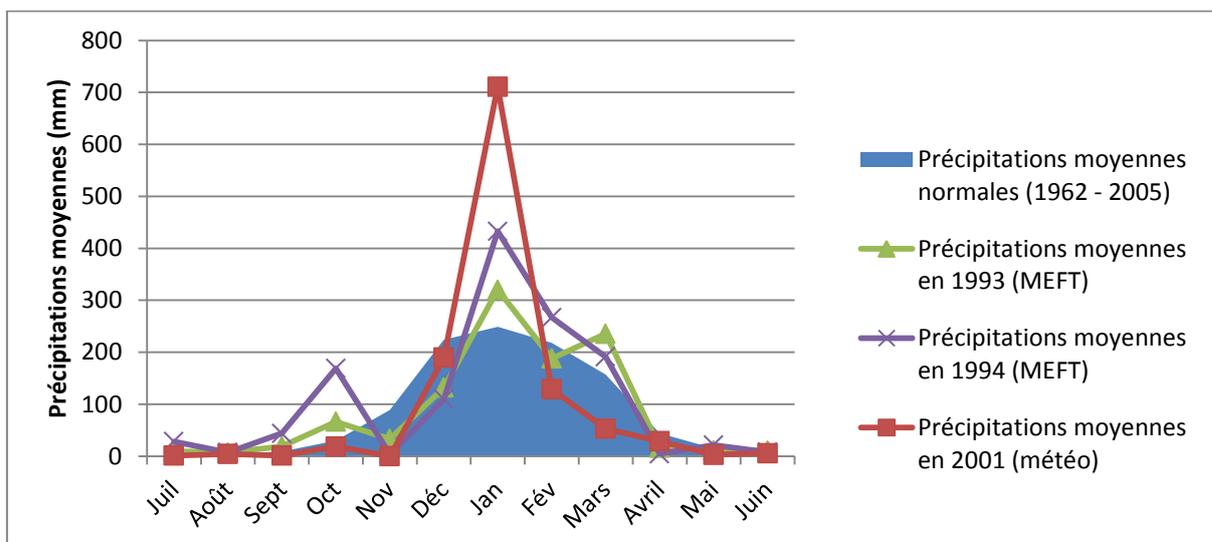


Figure 6. Comparaison entre les précipitations en 1993, 1994, 2001 et les précipitations normales

(Sources : Précipitations normales : d'après Demeringo, 2005 ; Précipitations en 2001 : Service météorologique, Station Analamazaotra_Ambatondrazaka)

2.2 VALIDATION DE LA CLASSIFICATION

2.2.1 Différents types de classes

A l'issue de la classification des images LANDSAT, six catégories d'information ont été retenues en termes d'occupation du sol. Il s'agit des classes forêt dense humide (FDS), forêt dégradée (FDG), savane herbeuse (SAV), zone marécageuse (MAR), zone de culture (ZDC) et plan d'eau (EAU).

La distinction entre les différentes classes s'appuie sur la détermination des classes d'information nécessaires dans l'étude à partir des caractères spectraux fournis par les images.

❖ Forêt dense humide (FDS)

La classe FDS correspond à l'information spectrale de couleur rouge foncée dans la bande infra-rouge traduisant une végétation avec un taux de recouvrement élevé. Les forêts naturelles comprenant les aires protégées et le corridor forestier de l'Est constituent globalement cette classe.

❖ Forêt dégradée (FDG)

La classe FDG se distingue de la classe FDS par sa couleur rouge plus claire observée dans la bande infra-rouge. Cela concerne les formations végétales à faible recouvrement expliqué par une anthropisation de la zone. Elle comprend les forêts en stade de dégradation comme les lisières ou en phase de reconstitution comme les *savoka*.

Les vestiges de forêt naturelle sous forme de forêts galeries localisées dans les vallées sont également intégrés dans cette catégorie. Les forêts ripicoles, les forêts littorales à l'Est et les plantations forestières sont regroupées aussi dans la classe FDG à cause du rapprochement de leur réflectance à celle de cette classe.

❖ **Savane herbeuse (SAV)**

La classe SAV correspond aux espaces qui diffusent une réflectance autre que le rouge, localisés essentiellement sur les reliefs accidentés du bassin. L'absence de couverture forestière est remplacée par une dominance de la formation graminéenne. Les trousés dans les forêts naturelles sont parfois associés à cette classe à cause de la difficulté de les discerner par rapport à la taille des pixels. Cette classe regroupe par conséquent les prairies herbeuses, les jachères anciennes.

❖ **Zone marécageuse (MAR)**

La classe MAR constitue les éléments entourant le lac qui émettent une couleur assombrie à peu près la réflectance de l'eau. C'est pourquoi la classe MAR et EAU sont parfois difficiles à distinguer. La zone marécageuse est pourtant couverte en majeure partie par les Cypéracées reflétant une couleur dérivée du rouge à travers la bande infra-rouge des images LANDSAT.

❖ **Zone de culture (ZDC)**

La classe ZDC comprend les zones dépourvues de végétation permanente, c'est-à-dire sans recouvrement total de la famille du rouge dans l'espace et dans le temps. Il s'agit essentiellement des rizières puisque c'est une zone à forte potentialité rizicole. Pendant les époques d'observation qui sont généralement en saison sèche correspondant à la moisson, la majorité des rizières se présentent sous forme d'espace ouvert débarrassé d'entité à chlorophylle qui vire au rouge sous la bande infra-rouge. Les sols nus sont aussi regroupés dans cette classe du fait de leur réflectance plus proche à la zone de culture post-moisson.

❖ **Plan d'eau (EAU)**

La classe EAU est identifiée facilement à partir de la classification indiciaire *NDWI* de McFeeters détectant les surfaces d'eau libre. Cette classe comprend tous les plans d'eau continentale rencontrés sur l'image tels que les lacs, les fleuves et les différents affluents de cours d'eau.

2.2.2 Indice de séparabilité

Afin d'apprécier la différenciation spectrale entre les classes listées dans le paragraphe précédent et assurer la fiabilité des zones d'entraînement (ou *ROI*) avant la classification, l'indice de séparabilité de Jeffries-Matusita est calculé.

Le résultat de ce test montre en général une séparabilité acceptable entre toutes les classes car de nombreuses paires ont un indice proche de la valeur de référence 1,9 (Annexe 4).

Sur l'image de la première année (Juin 1990), les classes ZDC et EAU présentent l'indice de séparabilité maximum et les classes SAV et ZDC possèdent la valeur d'indice minimale. Il y a donc une nette distinction entre les classes ZDC et EAU tandis que les classes SAV et ZDC sont les moins différenciées.

Pour l'image de la deuxième date (Avril 2001), les classes EAU et ZDC affichent le meilleur indice de séparabilité reflétant une excellente différence entre elles. Les classes FDG et ZDC montrent l'indice minimum.

Pour la troisième date (Août 2014), les classes EAU et ZDC sont bien différenciées avec le meilleur indice de séparabilité tandis que les classes ZDC et SAV sont les moins distinctes entre elles.

2.2.3 Matrice de confusion

Afin d'évaluer la fiabilité de la classification, la matrice de confusion de l'image en 2014 (Tableau 6) a été élaborée suivant les normes prescrites par la méthodologie dans le paragraphe plus haut.

Tableau 9. Matrice de confusion du résultat de classification de l'image 2014

	FDS	FDG	SAV	MAR	ZDC	EAU	Total	Erreur de commission (%)	Précision (%)
FDS	32	10	2				44	27,27	72,73
FDG	1	61	5		1		68	10,29	89,71
SAV		12	60	1	1		74	18,92	81,08
MAR				30	2		32	6,25	93,75
ZDC			2		35		37	5,41	94,59
EAU						26	26	-	99,99
Total	33	83	69	31	39	26	244	13,17	
Erreur d'omission (%)	3,03	26,51	13,04	3,23	10,26	-	13,17		
Précision globale de la classification					86,83%				

La matrice de confusion révèle que parmi les 281 points de contrôle utilisés, 244 points ont été correctement classés. Ce qui donne une précision globale de 86,83% pour l'ensemble de la classification. Cette valeur est assez élevée et avec la présence de nombreux zéros dans la matrice de confusion, la classification des images s'avère être exceptionnellement bonne (Congalton, 1991).

Elle est influencée seulement par les classes SAV et FDS qui ont surtout des précisions inférieures, respectivement de 81,08% et 72,73%. Les classes EAU, ZDC et MAR présentent d'excellentes précisions avec respectivement 99,99%, 94,59% et 93,75%.

Les erreurs d'omission et de commission sont de l'ordre de 13,17% indiquant le pourcentage de points mal classés. La majorité de l'erreur d'omission est rencontrée au niveau de la classe FDG dont 26,51% des points identifiés ont été répartis dans les autres classes. Cette classe est surtout confondue avec la classe SAV et la classe FDS. La première confusion s'explique par la similarité des réponses spectrales pendant l'acquisition des images. En effet, la saison sèche correspond à la période où il y a beaucoup de feu et la plupart des forêts dégradées en sont victimes rendant leur aspect plus proche de la savane. La deuxième confusion provient de la repousse de la forêt dégradée qui tend à atteindre l'état stable des forêts denses humides. La plus faible erreur d'omission est associée à la classe FDS avec 3,03% seulement qui est influencée par la classe FDG. D'autre part, la plus grande erreur de commission se rattache à la classe FDS avec 27,27% des points. Ce chiffre signifie que 27,27% de la classe FDS déterminée doivent appartenir à d'autres classes dont la classe FDG surtout. Après la classe FDS, la classe SAV possède aussi une erreur de commission élevée qui est estimée à 18,92% des points testés. En effet, la majorité de cette classe a été attribuée à la classe FDG. La classe EAU se présente comme étant la mieux classée car elle n'affiche aucune erreur d'omission ni d'erreur de commission. Cela n'a pas empêché l'interférence entre une partie de cette classe avec la zone marécageuse suite à une analyse minutieuse de la limite du lac Alaotra.

2.2.4 Indice Kappa

L'indice Kappa associé à la classification des images provient des calculs des chiffres contenus dans la matrice de confusion (Tableau 9). Cet indice est estimé à 0,83 signifiant que 83% des pixels de l'image sont attribués exactement à leur classe réelle sans effet de la chance ni du hasard. La valeur de cet indice Kappa dépasse largement le seuil de référence (0,50). Ainsi, la fiabilité de la classification est assez élevée pour lui octroyer la validité. La carte d'occupation du sol testée peut être utilisée ultérieurement et la méthode de classification, appliquée sur d'autres images.

2.3 ETATS DE L'OCCUPATION DU SOL

La superficie de la zone d'étude occupe au total 12.744 km². Cependant, une proportion de cette surface est non identifiée pendant le traitement des images car elle est cachée par les nuages et leurs ombres. Cela affecte les calculs réalisés sur l'espace étudié car la proportion de pixels non-classifiés (NC) varie selon les images. Cette partie de l'étude présente un aperçu des états de l'occupation du sol en général avec leur pourcentage respectif pendant les trois dates.

Les classes d'occupation du sol se répartissent différemment dans le temps selon qu'elles augmentent ou diminuent entre les trois dates étudiées 1990, 2001 et 2014.

2.3.1 Occupation du sol en 1990

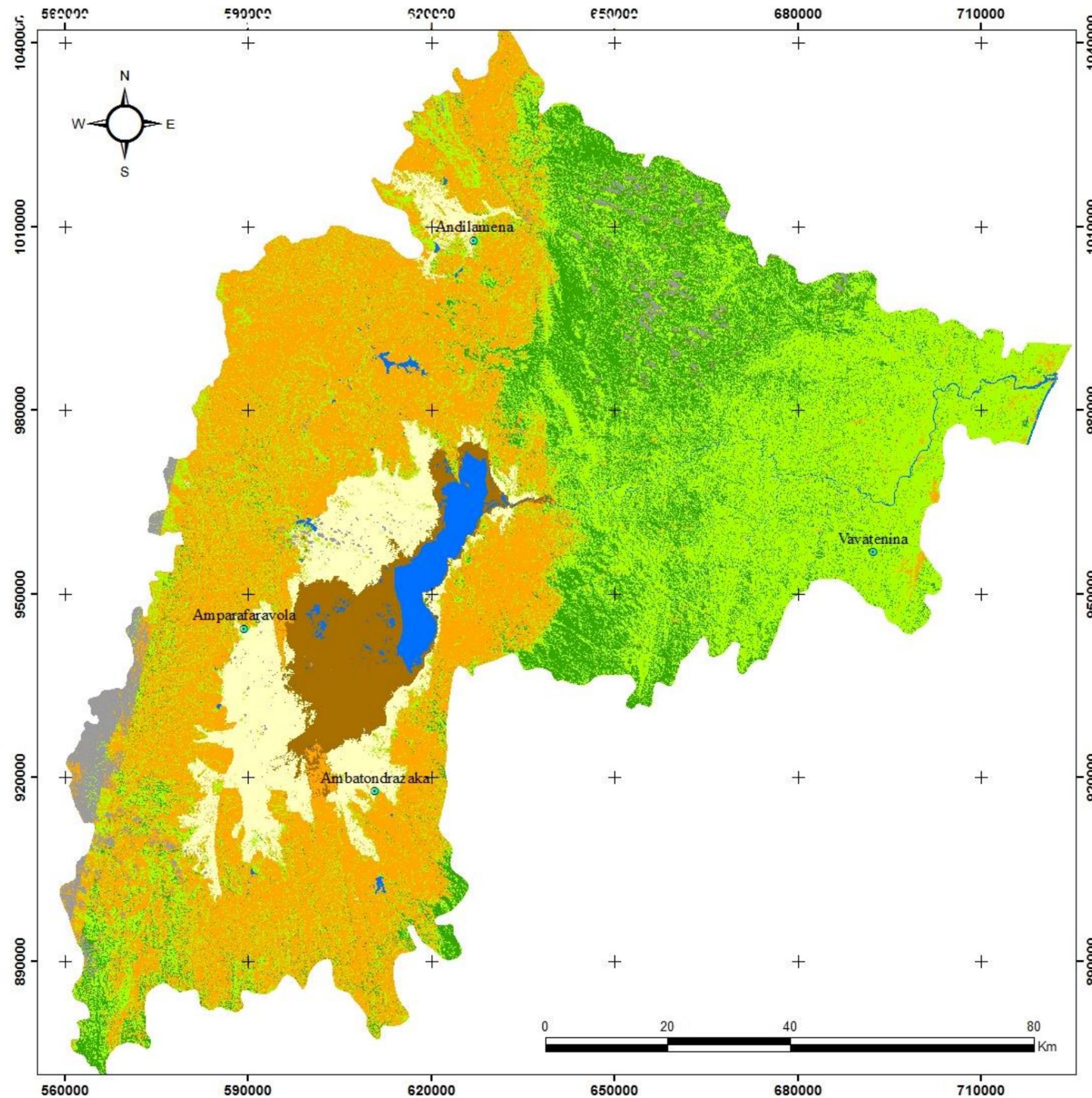
La répartition spatiale des différentes classes d'occupation du sol observée en 1990 est donnée par la Carte n°3. Cette carte d'occupation du sol générée à partir des images LANDSAT TM de 1990 montre une prédominance de la classe SAV et FDG. Afin de mieux apprécier la composition de l'occupation du sol à cette période, les pixels non-classifiés qui font 2,49% de la zone d'étude ont été retirés. Sur les 97,51% d'espace restant, les classes SAV et FDG occupent respectivement 34,09% et 32,78%. La forêt naturelle de la zone présentée par la classe FDS couvre 16,20% de l'espace. Le plan d'eau ne comprend qu'une proportion minimale avec 2,03% seulement, dans laquelle se trouve le lac Alaotra.

2.3.2 Occupation du sol en 2001

La Carte n°4 montre la répartition spatiale de chaque classe d'occupation du sol dans le bassin versant du Maningory en 2001. Le paysage du bassin versant du Maningory observable à cette époque n'atteint que 93,09% de sa superficie car 6,91% ne sont pas classés. La couverture nuageuse est devenue très importante car le mois d'Avril correspond au début de la saison sèche sur lequel l'impact de la saison humide précédente est encore aperçu. Les classes FDG et SAV prédominent toujours l'espace avec respectivement 33,27% et 32,71%. Les autres classes comme MAR et EAU sont faiblement représentées avec des valeurs inférieures à la classe NC. Elles ne couvrent plus que 3,10% et 2,31% du paysage respectivement.

2.3.3 Occupation du sol en 2014

La Carte n°5 montre la répartition spatiale des classes d'occupation du sol en 2014. Dans la description de l'état de l'occupation du sol à cette époque, la zone non couverte par l'étude ne constitue plus que 0,38%. Cette image se présente donc comme la meilleure en termes de qualité et de précision car 99,62% de la zone a été identifiée. Le paysage du bassin versant du Maningory est composé essentiellement de SAV et de FDG à cette époque. Elles occupent respectivement 36,58 % et 34,28% pendant la période d'observation. Ensuite, il y a la classe FDS qui couvre seulement 13,46% de la zone. Le plan d'eau montre toujours la plus infime proportion avec 1,78% de l'espace.



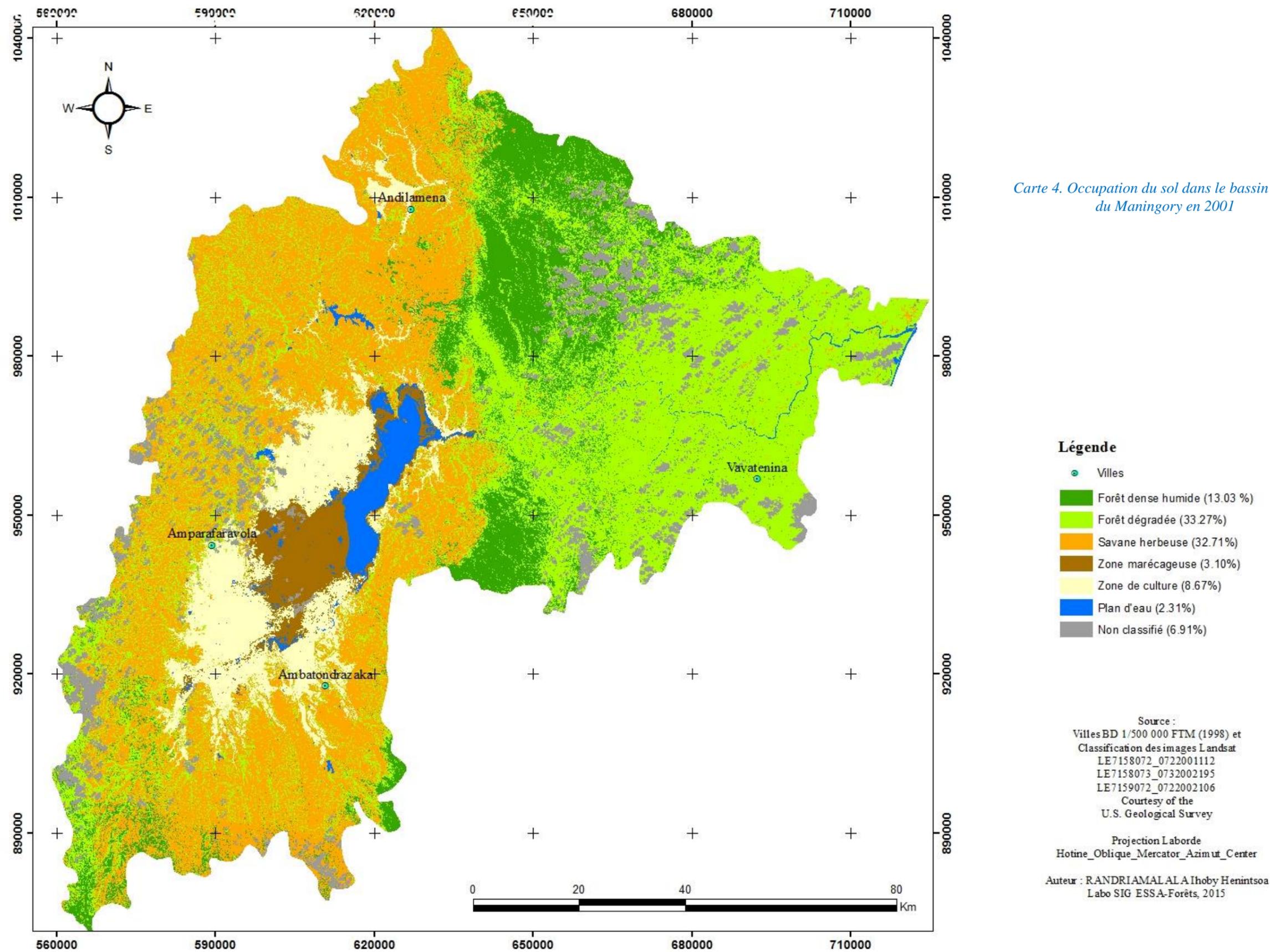
Carte 3. Occupation du sol dans le bassin versant du Maningory en 1990

Légende

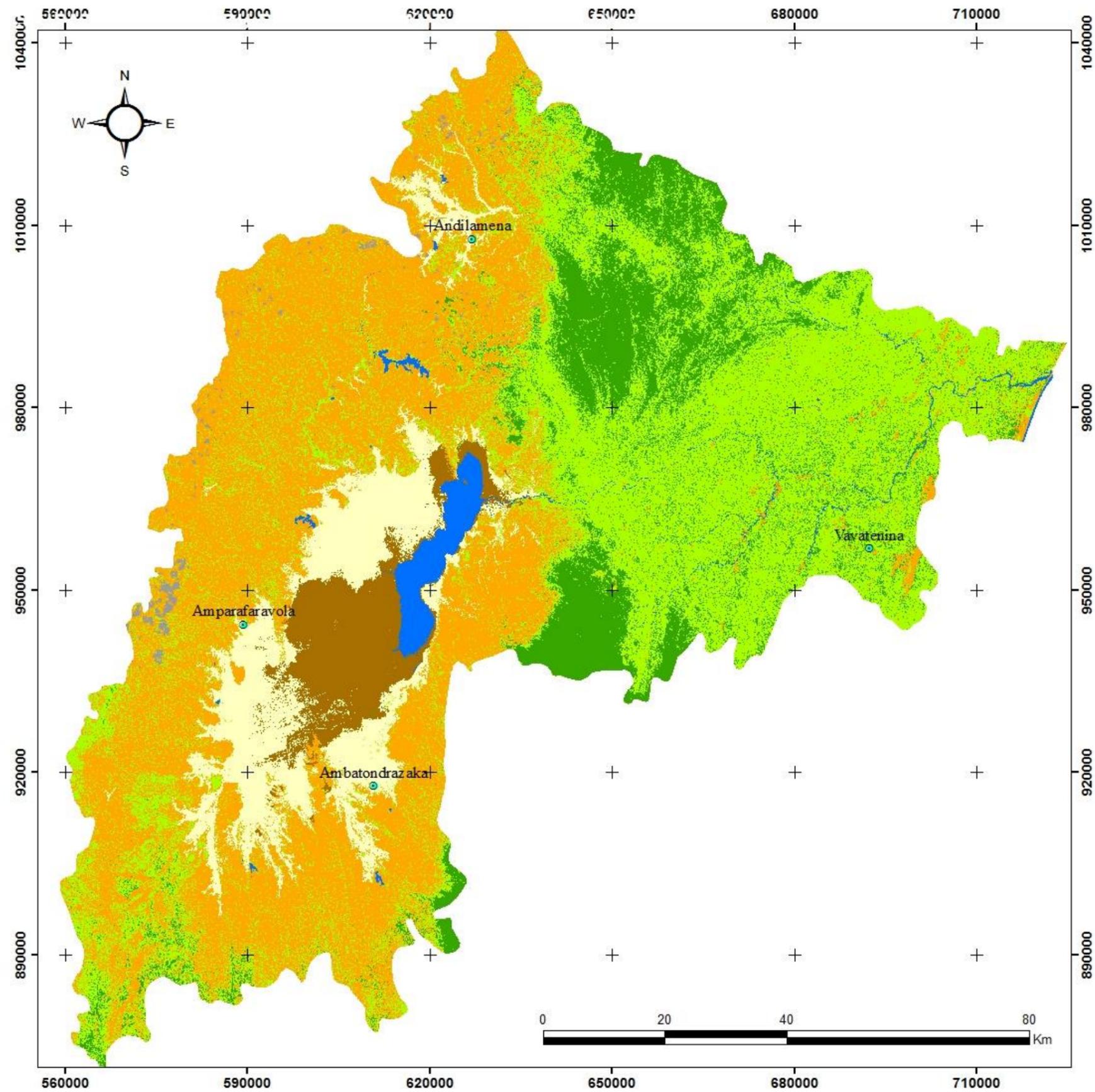
- Villes
- Forêt dense humide (16.20%)
- Forêt dégradée (32.78%)
- Savane herbeuse (34.09%)
- Zone marécageuse (4.12%)
- Zone de culture (8.28%)
- Plan d'eau (2.03%)
- Non classifié (2.49%)

Source :
 Villes BD 1/500 000 FTM (1998) et
 Classification des images Landsat
 LT5158072_0721990170
 LT5158073_0731990170
 LT5159072_0721990273
 Courtesy of the
 U.S. Geological Survey

Projection Laborde
 Hotine_Oblique_Mercator_Azimut_Center
 Auteur : RANDRIAMALALA Ihoby Henintsoa
 Labo SIG ESSA-Forêts, 2015



Carte 4. Occupation du sol dans le bassin versant du Maningory en 2001



Carte 5. Occupation du sol dans le bassin versant du Maningory en 2014

Légende

- Villes
- Forêt dense humide (13.46 %)
- Forêt dégradée (34.28%)
- Savane herbeuse (36.58%)
- Zone marécageuse (4.20%)
- Zone de culture (9.32%)
- Plan d'eau (1.78%)
- Non classifié (0.38%)

Source :
 Villes BD 1/500 000 FTM (1998) et
 Classification des images Landsat
 LC8158072_0722014236
 LC8158073_0732014236
 LC8159072_0722014259
 Courtesy of the
 U.S. Geological Survey

Projection Laborde
 Hotine_Oblique_Mercator_Azimut_Center

Auteur : RANDRIAMALALA Ihoiby Henintsoa
 Labo SIG ESSA-Forêts, 2015

La proportion de chaque classe d'occupation du sol dans le bassin versant du Maningory pour les années 1990, 2001 et 2014 est fournie par la Figure 7. Pour les trois dates, ce sont les classes FDG et SAV qui prédominent le paysage. Le pourcentage de non-classé (NC) est élevé en 2001 à cause de l'importance de la couverture nuageuse et des ombres sur les images utilisées à cette époque.

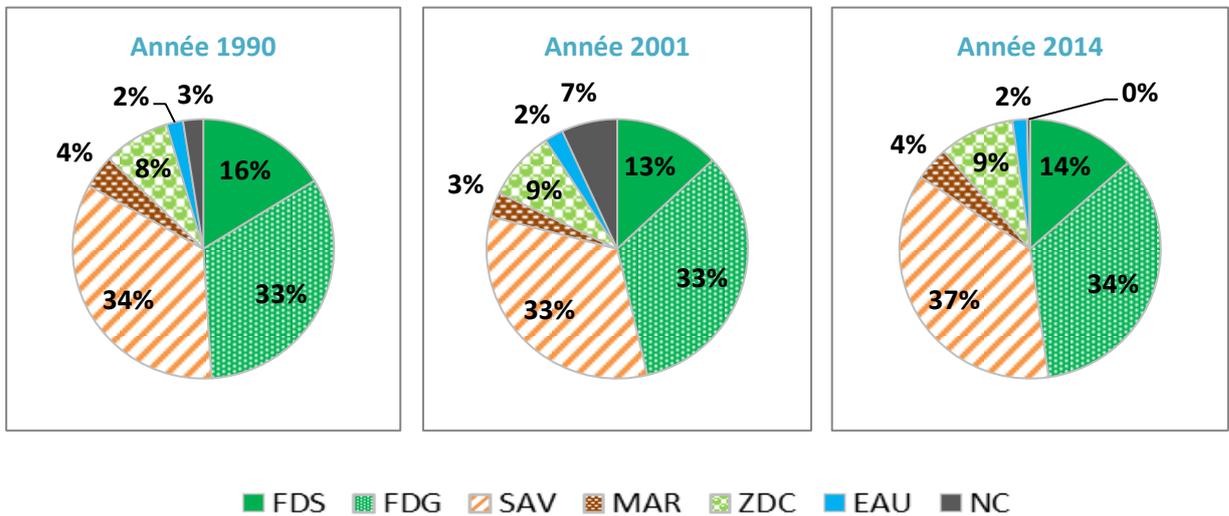


Figure 7. Distribution des classes d'occupation du sol sur trois dates (1990, 2001 et 2014)

2.4 DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE DE L'OCCUPATION DU SOL

Pour l'analyse de la dynamique de l'occupation du sol, il a fallu isoler la partie non-classée dont la totalité sur les trois images représente 9,63% du milieu d'étude. La dynamique de l'occupation du sol n'est donc plus interprétée que sur une superficie de 11.517 km². En comparant les superficies de chaque classe d'occupation du sol sur les trois dates (1990, 2001, 2014), il y a une différence notable sur leur évolution (Figure 8). La classe FDS a connu une régression en dépit de la classe ZDC qui a augmenté. Les autres classes par contre, affichent des changements variés.

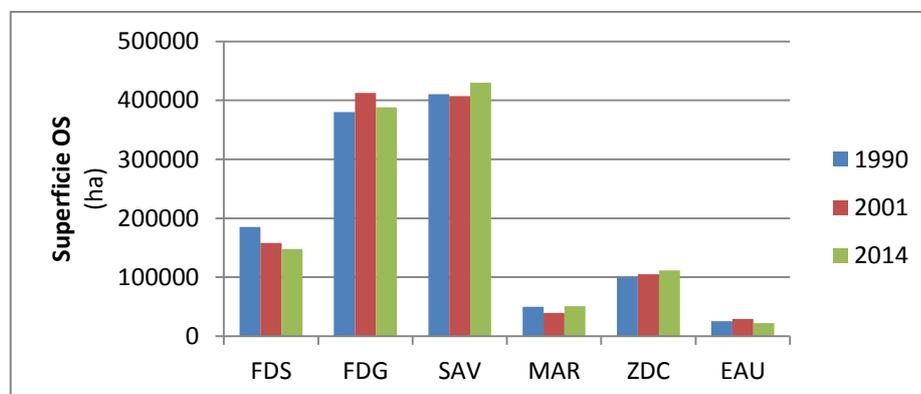


Figure 8. Evolution des classes d'occupation du sol entre 1990, 2001 et 2014

2.4.1 Corrélation entre les classes d'occupation du sol et le lac

Afin de mieux apprécier l'impact de la dynamique de l'occupation du sol sur celle du lac, leur corrélation a été analysée. Toutes les valeurs de *Cramer's V* obtenues sont pourtant éloignées du seuil inférieur 0,15 (Tableau 10). Par conséquent, ces variables explicatives étudiées (dynamique des classes d'occupation du sol) ne sont pas fortement associées à la variable dépendante (dynamique du lac). En d'autres termes, d'après le test *Cramer's V* réalisé, la dynamique du lac n'est pas étroitement liée à celle de l'occupation du sol. La corrélation est faible entre la dynamique du lac et celle de l'occupation du sol. Néanmoins, les valeurs de *Cramer's V* obtenues sont toutes significatives car les *p value* sont inférieurs à 0,05. Cela montre que la dynamique de toutes les classes d'occupation du sol contribue à l'explication du changement de la superficie du lac que ce soit pour la transition de 1990 à 2001 ou celle de 2001 à 2014, mais à effet moindre.

En comparant les résultats de *Cramer's V* obtenus, la classe forêt possède la valeur la plus élevée. La forêt constitue donc le plus grand contributeur dans le mécanisme de changement du lac par rapport aux autres classes. Conséquemment, l'évolution de la superficie du lac dans le temps est en relation avec le rythme de dégradation de la forêt dans le bassin versant. En effet, la forêt dense humide et la forêt dégradée sont traitées ensemble pour former une seule classe qu'est la forêt sur laquelle est basée l'analyse.

Tableau 10. Indices *Cramer's V* pour les variables explicatives

<i>Variables explicatives</i>	<i>Transition 1990-2001</i>	<i>Transition 2001-2014</i>
Dynamique des forêts	0,1240*	0,1211*
Dynamique de la savane herbeuse	0,0940*	0,0904*
Dynamique de la zone de culture	0,0389*	0,0386*
Dynamique de la zone marécageuse	0,0125*	0,0155*
Dynamique des plans d'eau	0,0051*	0,0083*

L'évolution de la savane herbeuse influence également la dynamique du lac mais pas comme elle le fait sur la forêt. La réduction de la superficie du lac dépend aussi modérément des dynamiques de la zone de culture et de la zone marécageuse. Les plans d'eau sont les plus faiblement contributifs dans l'évolution du lac.

Le mécanisme de la dynamique de ces classes d'occupation du sol est obtenu à partir des matrices de transition. Dans la présente étude, ces matrices ont été étudiées en deux pas temporel (1990 – 2001 et 2001 – 2014) puis de manière globale (1990 – 2014).

2.4.2 Dynamique de l'occupation du sol entre 1990 et 2001

Le paysage reste en partie stable car environ 74,77% (861.089 ha sur 1.151.679 ha) ne changent pas entre les deux dates. La dynamique s'observe donc sur 25,23% du paysage dont les changements majeurs concernent la forêt dense humide FDS et la forêt dégradée FDG (Figure 9). La première classe subit une perte de 2,34% (26.990 ha) tandis que la deuxième classe profite d'un gain de 2,80% (32.226 ha).

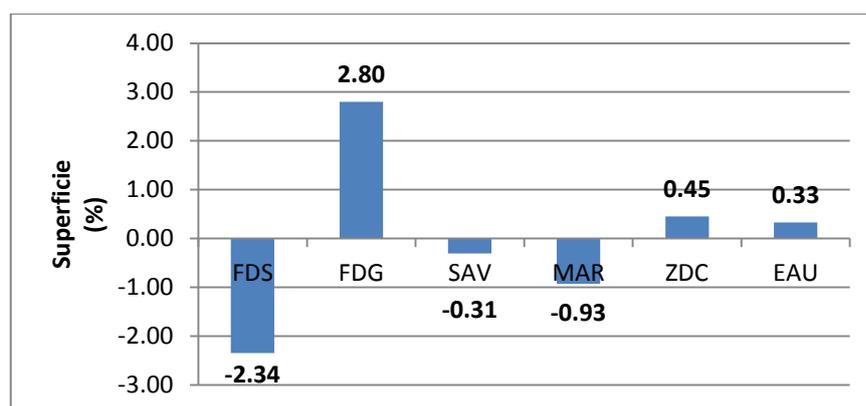


Figure 9. Changement net des classes d'occupation du sol entre 1990 et 2001

La matrice de transition entre 1990 et 2001 révèle la proportion des différents changements intervenus à cette période (Tableau 11). L'observation de cette matrice de transition montre une conversion très importante à la formation de forêt dégradée (5,70% du paysage), expliquant une forte régression de la forêt dense humide pendant cette période.

Tableau 11. Matrice de transition entre 1990 et 2001

Proportion (%)		2001						Total
		FDS	FDG	SAV	MAR	ZDC	EAU	
1990	FDS	9,56	5,70	0,76	0,01	0,04	0,01	16,08
	FDG	3,68	24,66	3,95	0,03	0,63	0,07	33,01
	SAV	0,47	4,94	29,18	0,04	0,95	0,07	35,66
	MAR	0,00	0,03	0,04	2,92	0,99	0,37	4,35
	ZDC	0,00	0,43	1,39	0,26	6,51	0,09	8,68
	EAU	0,03	0,05	0,04	0,16	0,02	1,95	2,23
	Total	13,74	35,81	35,35	3,42	9,13	2,56	100,00

La classe FDS a réellement diminué car elle est passée de 16,08% en 1990 à 13,74% de l'ensemble du paysage en 2001 parmi lesquels 9,56% seulement demeurent inchangé entre les deux dates. La régression de la classe FDS s'explique particulièrement par sa conversion en classe FDG.

Sur les 185.206 ha de forêt dense humide en 1990, l'espace transformé en forêt dégradée à l'année 2001 atteint 65.614 ha (5,7% du paysage). La forêt dense humide a été également réduite en savane herbeuse (SAV) qui affecte 8.764 ha (0,76% du paysage).

En ce qui concerne la classe FDG, elle a connu une extension de son occupation en allant de 33,01% en 1990 à 35,81% en 2001. Initialement cette classe occupait 380.148 ha pour atteindre ensuite 412.377 ha. Cette augmentation résulte notamment de la dégradation de la forêt dense humide précédemment évoquée. Une partie de la classe SAV (4,94% du paysage) contribue aussi à l'élargissement de la classe FDG.

La classe SAV quant à elle, connaît un faible changement sous forme de régression à travers laquelle son occupation est passée de 35,66% en 1990 à 35,35% en 2001. Cette diminution est surtout influencée par le changement de la classe SAV en classe FDG qui résulte de la non-perturbation de la savane herbeuse. Certaines savanes herbeuses aussi ont été converties en zone agricole dont l'importance est évaluée à 0,95% du paysage soit 10.956 ha.

La classe MAR est passée de 4,35% en 1990 à 3,42% en 2001 parmi lesquels 2,92% restent stables. Le recul des zones marécageuses résulte particulièrement de l'extension de la classe ZDC qui affecte 0,99% du paysage. La conversion de la zone marécageuse en zone de culture affecte 74.967 ha traduisant une diminution du niveau de l'eau sur cet espace. Néanmoins, une certaine partie de la classe MAR a changé en classe EAU sur 0,37% du paysage. Les changements détectés au niveau de la zone marécageuse sont donc très variés.

Aussi la zone de culture s'est élargie pendant cette période : 8,68% en 1990 puis 9,13% en 2001. La classe ZDC a acquis principalement les espaces occupés par les classes MAR, SAV et FDG. Cela traduit un développement des activités anthropiques sur ces zones lié à l'accroissement de la population. L'extension de la zone de culture sur la zone marécageuse affecte 0,99% du paysage (11.358 ha), sur la savane herbeuse 0,95% (10.956 ha) et sur la forêt dégradée 0,63% (7.215 ha).

A propos de la dynamique de la classe EAU, elle présente une augmentation de son occupation qui était de 2,23% en 1990 à 2,56% en 2001. Sur les 25.677 ha couverts par le plan d'eau, la majeure partie qui est de 22.401 ha (1,95%) reste stable. L'élargissement des zones occupées par la classe EAU s'explique principalement par la conversion de la zone marécageuse en plan d'eau qui atteint 4.284 ha (0,37% du paysage). Ces changements s'opèrent donc généralement autour du lac, reflétant un léger accroissement de la superficie de celui-ci.

2.4.3 Dynamique de l'occupation du sol entre 2001 et 2014

Pendant cette période, la proportion stable du paysage a été de 72,74% soit 837.785 ha. Les changements sont observés sur 27,26% (313.895 ha) de l'ensemble de la zone d'étude dont la majorité est intervenue au niveau de la forêt dégradée et de la savane (Figure 10). La classe FDG a connu une régression de 2,09% (24.078 ha) en faveur de la classe SAV qui a augmenté de 1,98% (22.859 ha).

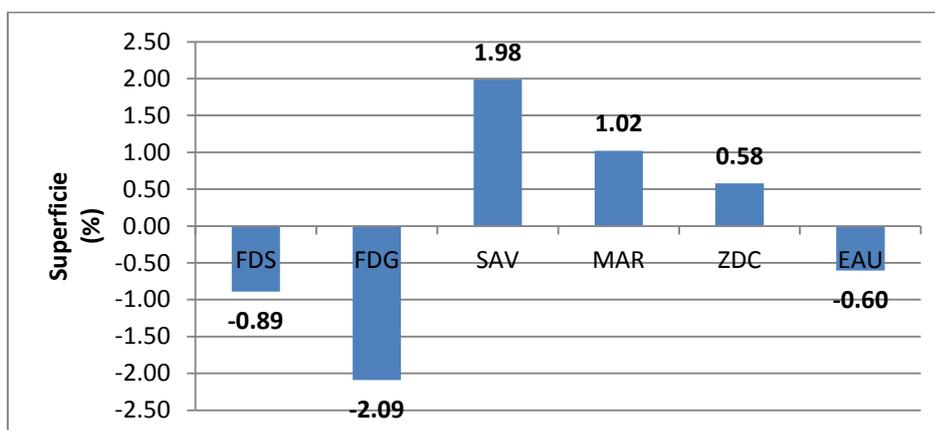


Figure 10. Changement net des classes d'occupation du sol entre 2001 et 2014

Les détails concernant les changements observés entre 2001 et 2014 sont obtenus à partir de la matrice de transition (Tableau 12). Cette matrice montre que la période entre 1990 et 2014 affiche surtout une conversion très importante à la formation savanicole (7,30% du paysage).

Tableau 12. Matrice de transition entre 2001 et 2014

Proportion (%)		2014						Total
		FDS	FDG	SAV	MAR	ZDC	EAU	
2001	FDS	8,74	4,44	0,52	0,00	0,01	0,02	13,74
	FDG	3,87	23,86	7,30	0,01	0,68	0,09	35,81
	SAV	0,23	4,79	28,57	0,03	1,70	0,02	35,35
	MAR	0,00	0,05	0,04	2,96	0,34	0,03	3,42
	ZDC	0,01	0,46	0,83	0,99	6,83	0,01	9,13
	EAU	0,00	0,12	0,06	0,44	0,15	1,78	2,56
	Total	12,85	33,72	37,34	4,44	9,71	1,95	100,00

La période entre 2001 et 2014 est marquée par une disparition de la majeure partie de la végétation naturelle constituée par la forêt dense humide et la forêt dégradée. En effet, la classe FDS est passée de 13,74% (158.216 ha) en 2001 à 12,85% (147.965 ha) en 2014 parmi lesquels 8,74% (100.668 ha) seulement sont restés stables. La régression de la classe FDS s'explique essentiellement par sa conversion en classe FDG et en classe SAV qui affecte respectivement 4,44% (51.172 ha) et 0,52% (6.046 ha). Ces changements montrent l'importance des perturbations générées par les activités anthropiques sur les ressources naturelles pour cette époque.

La classe FDG, quant à elle est passée de 35,81% en 2001 à 33,72% en 2014. La proportion qui n'a pas subi de changement en cette classe est de 23,86% du paysage. Sur 412.375 ha de forêt dégradée en 2001, 274.748 ha ont été stables pendant que le reste est converti principalement en savane herbeuse (84.060 ha) et en forêt dense humide (44.564 ha). La proportion de changement vers la classe SAV (7,30%) est supérieure à celle de la classe FDS (3,87%), c'est-à-dire que l'impact des activités anthropiques sur la forêt dégradée ne couvre pas la progression vers sa stabilité. Toutefois, la classe FDG est transformée en classe ZDC dont le changement affecte 0,68% du paysage soit 7.807 ha de FDG réduite en ZDC.

La superficie de la classe SAV a connu une extension allant de 35,35% en 2001 à 37,34% en 2014 parmi lesquels 28,57% sont restés inchangés. Autrement dit, la couverture en savane herbeuse est de 407.136 ha en 2001 et 329.062 ha n'ont pas changé entre 2001 et 2014. La savane s'est transformée notamment en forêt dégradée (55.212 ha) et en zone de culture (19.588 ha). Ainsi, la proportion de changement vers la classe FDG est 4,79% et celle vers la classe ZDC est 1,70%. La conversion de la savane en forêt dégradée pourrait être expliquée par une avancée d'une végétation arborée naturelle en l'absence de perturbations ou encore par des plantations d'essences allogènes. La conversion en zone de culture par contre, illustre l'avancée des activités agricoles sur les formations savaniques.

En ce qui concerne la classe MAR, elle a augmenté pendant cette période en passant de 3,42% en 2001 à 4,44% en 2014 dont 2,96% est sans changement. De ce fait, la zone marécageuse qui occupait au début 39.392 ha a élargi sa répartition notamment sur la zone de culture telle que les rizières affectant 0,37% du paysage soit une superficie de 3.937 ha. Cette conversion de la zone marécageuse en rizière résulte du drainage et de l'exploitation des marais par les paysans. Cela entraîne par la suite un avancement des rives lacustres et une diminution du niveau de l'eau du lac.

La classe ZDC augmente également durant la période d'étude car elle est passée de 9,13% en 2001 à 9,71% en 2014 dont 6,83% n'ont pas changé. La zone de culture qui était de 105.112 ha au début, a élargi son occupation grâce à la conversion de la zone marécageuse, de la savane et de la forêt dégradée principalement. Les changements de la classe ZDC en ces classes finales affectent respectivement 0,99% (soit 11.398 ha), 0,83% (soit 9.603 ha) et 0,46% (soit 5.261 ha) du paysage. Ces transitions montrent l'importance des activités agricoles qui modifient le paysage entre 2001 et 2014.

A propos de la classe EAU, une diminution de sa proportion est notée, comme les 2,56% de la classe EAU en 2001 qui sont passés à 1,95% en 2014. La superficie des plans d'eau pendant cette période est ainsi passée de 29.449 ha à 22.509 ha dont 20.534 ha n'ont pas subi de changement. La régression de la classe EAU vient du fait qu'elle s'est transformée surtout en classe MAR et en classe ZDC. La conversion de la classe EAU en classe MAR affecte 0,44% du paysage soit 5.089 ha tandis que la conversion de la classe EAU en classe ZDC 0,15% soit 1.705 ha.

Ces changements montrent une diminution du niveau de l'eau, notamment sur le lac car celui-ci se trouve au centre de ces entités du paysage auxquelles la classe EAU est transformée. La diminution du niveau de l'eau associée aux dépôts de sédiments d'érosion sur les bas-fonds accentue l'avancement des rives lacustres qui se manifeste par l'élargissement de la zone marécageuse et de la zone de culture au bord du lac. Par ailleurs, une partie de la classe EAU en 2001 (0,12% du paysage) est changée en classe FDG. Cela provient de la dynamique des forêts ripicoles qui couvrent parfois les cours d'eau en-dessous rendant la confusion de leur estimation.

2.4.4 Dynamique de l'occupation du sol entre 1990 et 2014

Dans les paragraphes précédents, les changements détectés sur le paysage sur les pas de temps (1990-2001 et 2001-2014) ont mis en évidence le déroulement détaillé des différentes transitions rencontrées. La transition globale observée sur le paysage a aussi fait l'objet d'une analyse à part entière en précisant la dynamique généralement acquise entre 1990 et 2014.

Pendant la comparaison des résultats de classification des images satellitaires de 1990 et 2014, la dynamique de l'occupation du sol montre des changements faiblement différents de ce qui ont été observés dans l'analyse par les pas de temps. Les modifications sont remarquées majoritairement au niveau des classes FDS et SAV (Figure 11). En effet, la forêt dense humide a régressé de 3,23% en 24 ans pendant que la savane herbeuse a élevé de 1,68%.

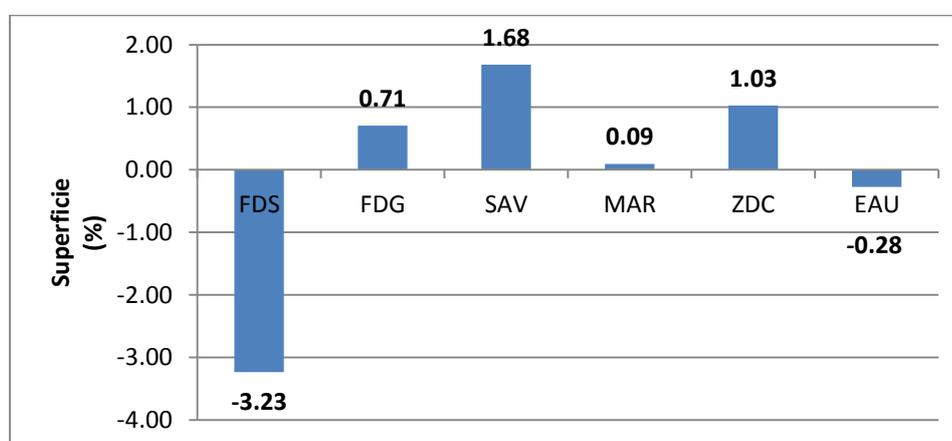


Figure 11. Changement net des classes d'occupation du sol entre 1990 et 2014

L'analyse de la matrice de transition entre 1990 et 2014 révèle les différents changements intervenus à cette période d'étude (Tableau 13). Les plus importantes conversions s'affichent au niveau de la formation de la forêt dégradée et de la formation savanicole (respectivement 7,19% et 6,47% du paysage).

Tableau 13. Matrice de transition entre 1990 et 2014

Proportion (%)		2014						
		FDS	FDG	SAV	MAR	ZDC	EAU	Total
1990	FDS	8,13	7,19	0,70	0,01	0,01	0,03	16,08
	FDG	4,40	21,66	6,47	0,02	0,36	0,09	33,01
	SAV	0,29	4,58	29,32	0,04	1,37	0,05	35,66
	MAR	0,00	0,05	0,07	3,78	0,43	0,02	4,35
	ZDC	0,00	0,13	0,73	0,30	7,49	0,02	8,68
	EAU	0,02	0,10	0,04	0,30	0,04	1,74	2,23
	Total	12,85	33,72	37,34	4,44	9,71	1,95	100,00

La matrice de transition globale montre que sur les 16,08% du paysage occupés initialement par la classe FDS (185.206 ha), seuls 8,13% (93.617 ha) n'ont pas subi de changement tandis que les autres ont été transformés en d'autres catégories. Le changement le plus important de cette classe revient à sa conversion en FDG qui affecte 7,19% du paysage soit 82.839 ha. La majorité de la forêt dense de 1990 a donc été réduite en forêt dégradée. Une proportion de la forêt dense humide évaluée à 0,70% du paysage (8.108 ha), a été convertie en savane herbeuse. Ce changement est dû à une dégradation accrue et rapide de la forêt dense humide liée à l'anthropisation entraînant l'installation de paysage ouvert à formation graminéenne.

Au niveau de la classe FDG, sur l'espace occupé par la forêt dégradée en 1990 (soit 380.148 ha ou 33,01%), la superficie stable a été évaluée à 249.487 ha (21,66%) pendant la période étudiée. Le changement de la classe FDG s'est essentiellement manifesté en sa conversion en SAV qui atteint 6,47% du paysage total soit 74.562 ha. En même temps s'opère une recolonisation de la forêt dégradée en forêt dense humide qui mérite encore une vérification terrain de ces forêts régénérées. Ce changement affecte 50.719 ha, c'est-à-dire 4,4% du paysage occupés par la classe FDG sont transformés en classe FDS. La conversion de la classe FDG en ZDC se manifeste sur 0,36% du paysage, soit 4.161 ha de forêt dégradée transformée en zone de culture. Cela illustre l'impact de l'anthropisation sur la ressource naturelle.

Sur les 35,66% de SAV initial, une proportion évaluée à 29,32% est restée dans cette catégorie. Le repeuplement de SAV à travers sa conversion en FDG est le plus remarquable changement dans cette classe, lequel est évalué à 4,58% de l'ensemble du paysage. En d'autre terme, la superficie du paysage occupée par la savane herbeuse transformée en forêt dégradée est évaluée à 52.781 ha. Une proportion de la classe SAV aussi est convertie en classe ZDC en affectant 1,37% du paysage soit 15.787 ha. La classe SAV peut être également basculée vers la classe FDS sur 0,29% du paysage. Ce changement s'explique par la reconquête de l'état climacique issue de l'évolution de la savane en forêt dense humide mais à observer de plus près sur terrain.

A propos des transitions dans la classe MAR, sur les 50.065 ha (4,35%) estimées en 1990, la partie stable est de 43.482 ha (3,78%). Le changement remarquable intervenu au niveau de cette classe concerne particulièrement sa conversion en classe ZDC qui affecte 0,43% du paysage. L'espace occupé par la zone marécageuse qui s'est transformée en zone de culture est donc évalué à 4.994 ha. Cette transition s'effectue notamment sur les rizières et les périmètres irrigués dans les bas-fonds.

La classe ZDC quant à elle, a élargi son occupation allant de 8,68% (99.927 ha) en 1990 à 9,71% (111.787 ha) en 2014. Cet accroissement est favorisé particulièrement par la conversion de la savane, de la zone marécageuse et de la forêt dégradée en zone de culture. Les proportions respectives de ces changements sont de 0,73% (8.407 ha), 0,30% (3.483 ha) et 0,13% (1.481 ha). L'impact des activités anthropiques sur le milieu écologique est observé à partir de ces transitions.

La classe EAU a diminué pendant la période d'étude car elle est passée de 2,23% en 1990 à 1,95% en 2014. Les plans d'eau dans la zone d'étude occupaient 25.677 ha au début parmi lesquels 20.094 ha restent inchangés. La majorité de cette proportion stable concerne le lac qui est l'étendue d'eau incluse dans ce paysage. La régression de la classe EAU s'explique essentiellement par sa conversion en classe MAR qui affecte 0,30% du paysage. Aussi, 3.402 ha de l'ensemble des plans d'eau sont converties en zone marécageuse pendant la période d'étude. Ce changement affecte les rives lacustres qui sont en contact avec la zone marécageuse et traduit un recul de l'eau du lac, c'est-à-dire une diminution de sa superficie.

2.5 IMPACT DE LA DYNAMIQUE FORESTIERE SUR L'EVOLUTION DU LAC

Comme la forêt possède la valeur la plus importante de l'indice *Cramer's V* et étant donné que son évolution contribue à la dynamique du lac, l'impact de la dynamique de cette classe a été étudiée individuellement.

Observées séparément, les classes FDS et FDG présentent des tendances différentes entre les trois dates. Une tendance décroissante est remarquée pour la classe FDS en dépit de l'évolution variée de la classe FDG. En effet, la forêt dense humide du paysage a diminué progressivement pendant cette période, mais la forêt dégradée a faiblement augmenté en 2001 puis a régressé en 2014. La somme de la superficie de FDS et FDG donne une appréciation spatiale de la couverture forestière du milieu d'étude.

En général, la couverture forestière du bassin versant augmente entre 1990 et 2001, puis elle diminue énormément entre 2001 et 2014 (Figure 12). La forêt est ainsi particulièrement préservée dans un premier temps pour ensuite subir une dégradation intense.

Le premier accroissement de la forêt pourrait être expliqué par la recolonisation et l'épanouissement des régénérations, tandis que la régression ultérieure pourrait être expliquée par la destruction de la forêt suite à l'importance des interventions humaines sur la zone.

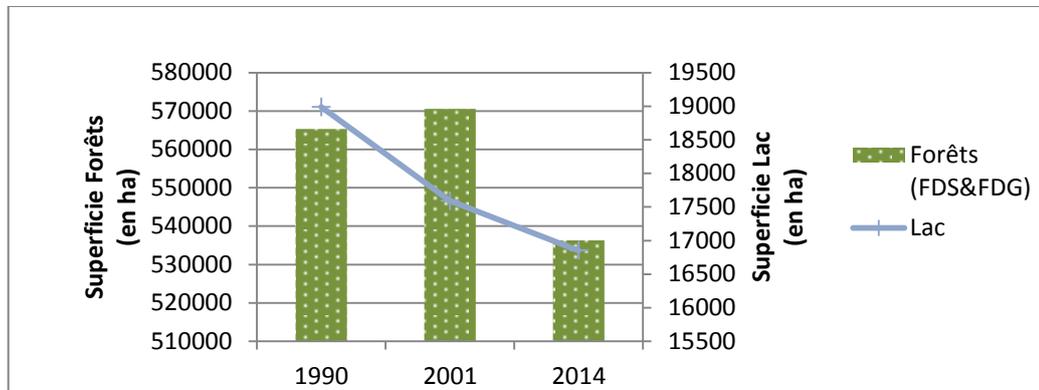
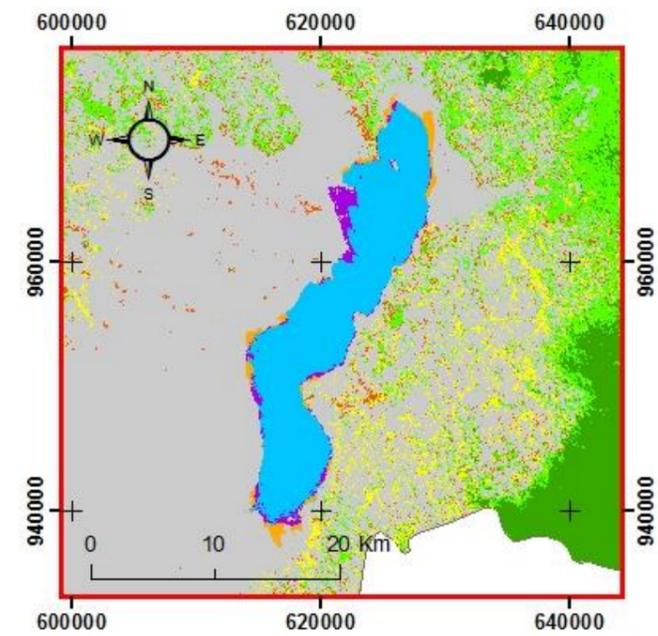
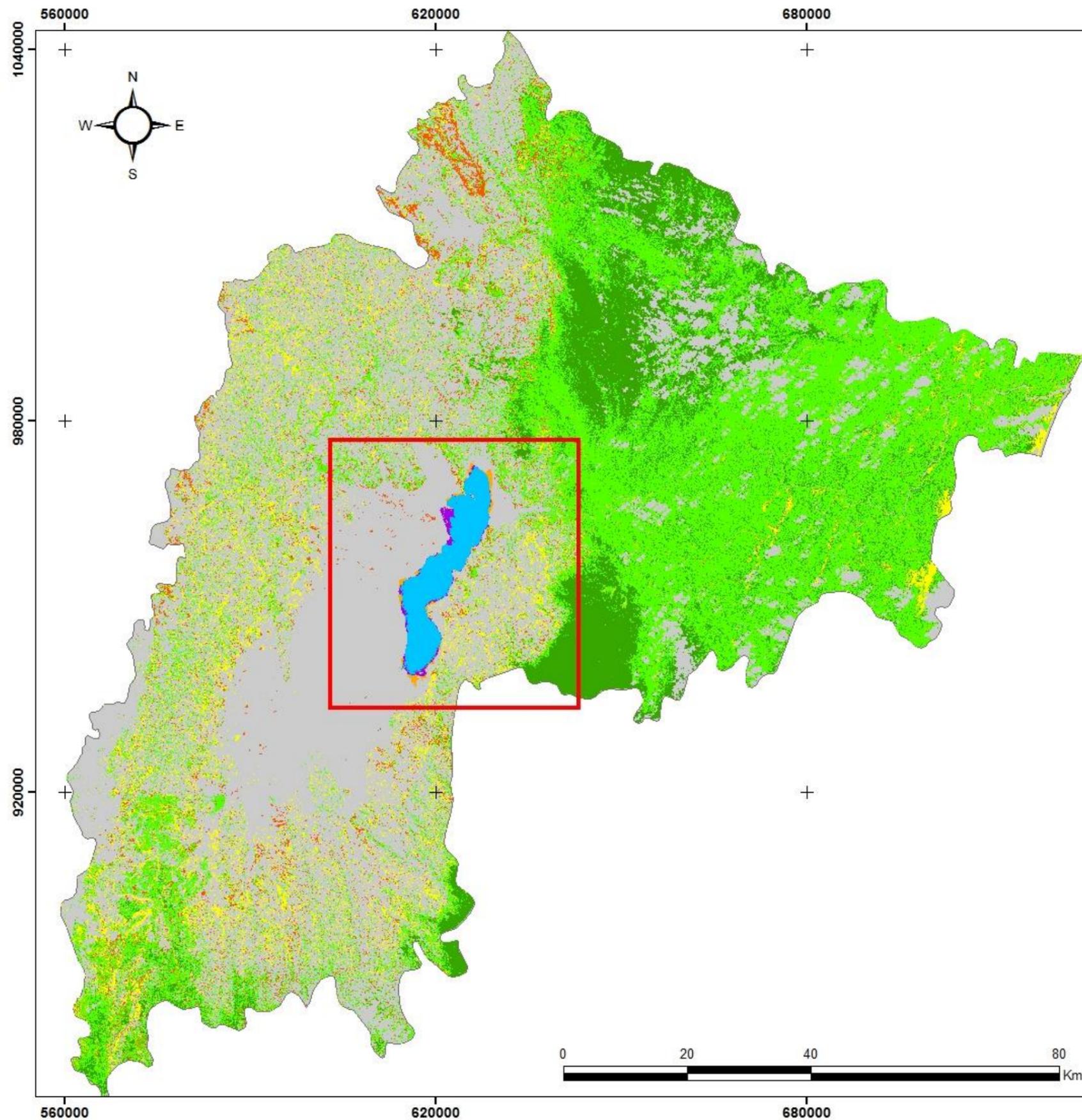


Figure 12. Evolution des forêts et de la superficie du lac entre 1990, 2001 et 2014

La corrélation qui existe entre la forêt et le lac, malgré sa faible valeur, met en évidence la fonction de rétention du sol procurée par la forêt sur les sols en pente. La Carte n°6 présente la répartition spatiale de la dynamique du lac liée à l'évolution de la forêt. Elle montre que la disparition de la couverture forestière induit la diminution de la superficie lacustre suite à l'ensablement de ce dernier. Cet ensablement du lac en aval est dû à l'érosion provenant des parties non protégées par la forêt dans le bassin versant.



Légende

- Forêt dense humide en 2014
- Forêt dégradée en 2014
- Forêt dense humide en 2001
- Forêt dégradée en 2001
- Forêt dense humide en 1990
- Forêt dégradée en 1990
- Lac en 2014
- Lac en 2001
- Lac en 1990
- Autres occupations du sol

Source :
 Classification des images Landsat
 LT5158072_0721990170/LT5158073_0731990170/
 LT5159072_0721990273
 LE7158072_0722001112/LE7158073_0732002195/
 LE7159072_0722002106
 LC8158072_0722014236/LC8158073_0732014236/
 LC8159072_0722014259
 Courtesy of the U.S. Geological Survey

Projection Laborde
 Hotine_Oblique_Mercator_Azimut_Center

Auteur : RANDRIAMALALA Ihoby Henintsoa
 Labo SIG ESSA-Forêts, 2015

Carte 6. Dynamique des forêts et du lac Alaotra entre 1990, 2001 et 2014

DISCUSSION & RECOMMENDATIONS

PARTIE 3 : DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

3.1 DISCUSSION SUR LES RESULTATS

3.1.1 Superficie du lac Alaotra au cours du temps

Les résultats de l'évaluation de la superficie du lac Alaotra obtenus montrent des valeurs qui varient d'une saison à une autre. En effet, la superficie du lac diminue de 9,4% entre les saisons sèches et de 10,7% entre les saisons humides. Ainsi, environ 17,47 km² du lac sont perdues sous l'effet de la saison sèche de 1994-2014. La perte en superficie du lac est de 20 km² pour la période 1993-2014 sous l'effet de la saison humide. Ces valeurs diffèrent largement de celle obtenue par Bakoariniaina *et al.* (2006) qui ont trouvé une disparition d'environ 5 km² au niveau du lac Alaotra entre 1972 et 2000. Ainsi, le recul du lac est faible et lent auparavant, mais il devient très important avec un rythme d'ensablement rapide durant les dernières décennies. Le Tableau 14 montre quelques études menées au niveau du lac Alaotra concernant la dynamique de sa superficie au fil du temps selon les auteurs.

Tableau14. Comparaison entre les pertes en superficie du lac Alaotra

	Auteur, 2015		Bakoariniaina <i>et al.</i> , 2006
Perte (%)	9,4%	10,7%	-
Perte (km ²)	17,47 km ²	20 km ²	5 km ²
Période étudiée	1994-2014 (saisons sèches)	1993-2014 (saisons humides)	1972-2000

De plus, la diminution de la superficie du lac par rapport à l'origine est confirmée par plusieurs littératures. En effet, la superficie initiale du lac Alaotra est estimée à 1000 km² au cours des périodes du Cénozoïque moyen (il y a environ 35 millions d'années) (Bakoariniaina *et al.*, 2006). A cette époque, la forêt dense humide entourait le paysage du lac et les cours d'eau étaient encore en abondance. Le lac est devenu 60% de sa taille initiale dans les années 1960, il atteint 40% dans les années 1980 et n'est plus que 20 à 30% en 2000 (Bakoariniaina *et al.*, 2006). Depuis ces dernières années, les observations du lac montrent que celui-ci a perdu 60% de sa taille originale (Kusky *et al.*, 2010). La superficie actuelle est donc évaluée à 40% de sa valeur d'origine. Cela provient de la déforestation due à l'érosion extrême du paysage en laissant des dépôts vaseux dans le bassin.

3.1.2 Corrélation entre la dynamique du lac et celle de l'occupation du sol

Les résultats de *Cramer's V* obtenus à partir de la comparaison entre la dynamique de l'occupation du sol et la dynamique du lac, sont très éloignés de la valeur de référence inférieure (0,15). Donc, la dynamique du lac et l'évolution de l'occupation du sol sont faiblement corrélées. Etant donné que la proportion des plans d'eau est très minime par rapport à la taille du bassin versant, il est évident que les changements intervenus sur le bassin versant ont peu d'effet sur le lac. La diminution de la superficie du lac peut s'expliquer par les effets cumulés de la dynamique du paysage perçue à une échelle temporelle plus longue antérieurement. D'ailleurs, le changement climatique a eu réellement d'impact sur la réduction de la superficie du lac (Bakoariniaina *et al.*, 2006 ; Kusky *et al.*, 2010).

3.1.3 Occupations du sol et leur évolution d'après la littérature

La dynamique de l'occupation du sol rencontrée par les pas de temps diffère de celle observée globalement. L'analyse globale montre directement l'état final de la classe sans tenir compte de son état intermédiaire. Pourtant la connaissance de l'état intermédiaire des changements permet de connaître avec précision le passé historique du paysage.

Les ressources naturelles notamment les forêts se détériorent de plus en plus face à l'importance des pressions qui pèsent sur le bassin versant. Ces pressions se manifestent par la conversion en forêt dégradée et en savane herbeuse de la majeure partie des forêts pendant les périodes étudiées. Il est à noter que la savane a existé depuis longtemps dans ce paysage et elle est destinée comme des aires de pâturage de montagne pour l'élevage bovin extensif (Domas *et al.*, 2008). Malgré cela, d'autres auteurs confirment la dégradation progressive de l'environnement du lac Alaotra. En sept ans seulement (1993 – 2000), le paysage dans le bassin du lac Alaotra a connu d'énorme changement. La forêt dense humide se dégrade en savane herbeuse et des espaces érodés associés à des *lavakas* couvrent les collines (Bakoariniaina *et al.*, 2006).

Concernant la dynamique de la zone de culture surtout des rizières, les périmètres irrigués au lac Alaotra ont considérablement régressé à cause de l'ensablement, d'après certaines études. Parmi ces périmètres irrigués se trouve la riziculture aménagée sous l'égide de la Somalac qui est passée de 35.000 ha en 1961 à 10.000 ha actuellement (Andrianirina *et al.*, 2012). Pourtant, la présente recherche a évoqué l'élargissement de la superficie occupée par la zone de culture dans le bassin versant du Maningory. En effet, le recul des périmètres irrigués a conduit l'extension des rizières sur les marais. Ces derniers constituent une réserve de terre cultivable que la population transforme en rizière (Rakotoniaina *et al.*, 2013) et en d'autre terre agricole en utilisant le feu (Ranarijaona, 2007). L'accroissement de la zone de culture dans le bas-fond s'explique donc principalement par son avancée vers la zone marécageuse à Cypéracées.

3.1.4 Dynamique forestière en relation avec le recul du lac

La mise en relation entre la dégradation forestière et la diminution de la superficie du lac est très discutable. Au premier point de vue, il est évident que la régression de la forêt engendre le recul du lac suite aux phénomènes d'érosion issus de la déforestation. Cependant, il faut noter que les forêts sont principalement distribuées sur des sous-bassins versants en aval du sous-bassin versant du lac. La majorité des classes FDS et FDG sont situées sur la partie Est du bassin versant. La distinction entre l'amont et l'aval du bassin est globalement identifiée par le sens des affluents autour du lac. Les plus importantes rivières qui alimentent le lac actuellement proviennent du Nord (*Anony*) et du Sud (*Sahabe*) tandis que son exutoire situé à Andromba se dirige vers l'Est, la zone à recouvrement forestier. Donc, l'impact de la dynamique forestière n'est pas immédiatement perceptible au niveau du lac. Cela justifie l'expression de la faible association entre le rythme de réduction du lac et la dynamique de l'occupation du sol dont les forêts, démontrée par les valeurs de *Cramer's V* obtenues.

Remarques :

Il est important de noter que les facteurs de diminution de la superficie du lac soulevés dans cette étude ne constituent pas les seuls paramètres explicatifs. La recherche a seulement essayé de mettre en évidence l'existence et le degré d'influence de ces facteurs étudiés sur la taille du lac Alaotra. Le contexte socio-économique, entre autres, n'a pas été analysé dans la présente étude. Cependant il joue un rôle important pour l'orientation des paysans dans le choix d'occupation et d'utilisation des unités paysagères.

Les résultats obtenus dans cette recherche concernent seulement la période d'étude de 1990 à 2014. En ce sens que des résultats différents peuvent être rencontrés dans d'autres échelles temporelles. Malgré cela, la période de 24 ans choisie a déjà pu montrer clairement la dynamique spatio-temporelle du paysage dans le bassin versant du Maningory.

3.2 DISCUSSION SUR LES HYPOTHÈSES

Hypothèse 1 : « *La dynamique spatio-temporelle du lac Alaotra montre des changements intra- et inter saisonniers en superficie* »

Les résultats de la recherche montrent plus explicitement la possibilité de déterminer l'état de la ressource en eau d'une zone à l'aide des outils de SIG et de Télédétection. L'interprétation des images satellitaires du lac Alaotra fournit les données de sa superficie sur trois dates (1993/1994, 2001, 2014). Entre ces pas de temps, le lac présente une dynamique qui se manifeste par la diminution de sa superficie. Le pourcentage de réduction de la superficie du lac est évalué à 9,4% entre 1994 et 2014 sous l'effet de la saison sèche et 10,7% entre 1993 et 2014 sous l'effet de la saison humide.

En plus, la superficie du lac varie aussi en fonction des saisons car elle dévoile une réduction de 0,9% entre la saison humide de l'année 1993 et la saison sèche 1994, et de 2,8% entre la saison humide 2001 et la saison sèche 2001. C'est en 2014 seulement qu'une légère augmentation de 0,5% est remarquée entre saison humide et sèche. Néanmoins, la dynamique de la superficie du lac est perceptible à partir de ces résultats. La première hypothèse stipulant les changements de la superficie lacustre surtout les changements intra- et inter-saisonniers du lac Alaotra entre les trois dates étudiées est vérifiée.

Hypothèse 2 : « *Le processus de comblement du lac est proportionnel à l'évolution de l'occupation du sol dans le bassin versant* »

La présente étude a montré l'existence d'une dynamique d'occupation du sol sur le paysage du bassin versant. Cela est observé à travers les changements intervenus à chaque classe d'occupation du sol pendant la période d'étude. Les types de changements varient d'une classe à une autre selon le type de conversion et en fonction du temps.

Les valeurs données par les indices *Cramer's V* sont très faibles pour afficher une association minimale entre la dynamique des classes d'occupation du sol et l'évolution du lac. Pourtant, leur significativité a permis d'utiliser tout au moins les données en tenant compte de la faiblesse de la corrélation. Donc, la contribution des classes d'occupation du sol à expliquer la dynamique du lac, existe mais reste très limitée.

Généralement, la dynamique de l'occupation du sol se manifeste par la conversion de la forêt naturelle en forêt dégradée et en savane herbeuse. La disparition progressive de la végétation surtout sur les pentes des reliefs est mise en exergue à partir de ces dégradations. Par ailleurs, l'évolution de la classe ZDC a montré une certaine croissance en superficie notamment les rizières autour du lac. Cependant, la zone de culture aussi peut être les cultures sur *tanety* qui offensent le sol fragile en place et accentue l'érosion du bassin versant.

Avec la tendance à la disparition progressive de la végétation dans le bassin versant, l'expansion de la zone de culture menace aussi les milieux écologiques rendant le lac en aval plus vulnérable. Car après la disparition de la végétation naturelle qui retient le sol en amont, l'ensablement s'accroît dans les bas-fonds et les sédiments sont emportés finalement dans le lac. D'ailleurs, Moreau affirme depuis 1977 que les sédiments des marais aménagés sont transportés dans le lac en accélérant le processus de son comblement. Ce qui a permis d'affirmer la véracité de la deuxième hypothèse relatant la proportionnalité entre l'évolution de l'occupation du sol et la dynamique du lac.

Hypothèse 3 : « *La dégradation du paysage forestier accentue la diminution de la superficie lacustre* »

Le plus important changement d'occupation du sol concerne la régression de la classe FDS qui est évaluée à 3,23% entre 1990 et 2014. Une perte de 37.240,92 ha de forêt dense humide est donc parvenue pendant cette période. La déforestation se manifeste particulièrement par la conversion de 82.839,42 ha de forêt dense humide en forêt dégradée, et la transformation de 74.562,57 ha de forêt dégradée en savane herbeuse de 1990 à 2014.

En plus, la corrélation entre la dynamique du lac et l'évolution de la couverture forestière dans le bassin versant est la plus importante. Les dynamiques des autres classes d'occupation du sol sont faiblement corrélées à la dynamique du lac. Les valeurs de *Cramer's V* de la variable explicative dynamique des forêts ont montré également une contribution de celle-ci à la diminution de la superficie lacustre.

Cependant en tenant compte de la discussion sur la localisation des forêts, il convient d'affirmer que la déforestation agit indirectement sur la dynamique spatio-temporelle du lac Alaotra sans pour autant la contrôler définitivement. Néanmoins, la zone forestière du bassin versant étudiée se trouve sur un relief fortement accidenté de la région orientale. Cela favorise l'exposition à l'érosion en cas d'absence de couverture du sol facilitant l'apparition des *lavaka* (Randrianasolo, 2013). L'hypothèse qui stipule la relation entre la dégradation forestière et la diminution de la superficie lacustre est vérifiée.

3.3 RECOMMANDATIONS

3.3.1 Recommandations techniques

Avec la résolution spatiale 30m*30m, certains objets qui peuvent intéresser l'étude n'ont pas pu être identifiés. Seuls les éléments du paysage dont la taille est supérieure ou égale à cette valeur ont composé la carte d'occupation du sol dans le résultat. C'est pourquoi, les classes sont limitées à une précision globale des entités facilement détectables. Actuellement, le développement de la technologie permet d'augmenter la précision des cartes aux environs des détails recherchés. Pour la réalisation de la carte d'occupation du sol, des images à haute résolution spatiale comme celles du satellite SPOT peuvent être utilisées. Elles fournissent les informations comprises entre 2,5m*2,5m, c'est-à-dire avec plus de détails et de précision.

Dans le cadre d'une recherche plus approfondie, il est intéressant d'adopter toutes les techniques de classification possibles des images satellitaires. A part la classification par pixel, il y a aussi la classification orienté-objet dont la base consiste à sélectionner les objets (groupes de pixels) sur l'image puis les classer.

Toutes les alternatives de classification peuvent être utilisées puis les résultats seront évalués et comparés afin de trouver la meilleure classification. Ces opérations permettent d'affiner la carte obtenue pour qu'elle représente approximativement la réalité.

Pour l'analyse de la dynamique de l'occupation du sol, les traitements sont devenus rapides grâce à l'application *LCM (Land Change Modeler)* intégré dans IDRISI. Cet outil permet d'avoir dans un premier temps les informations sur l'analyse de changement entre deux cartes de dates différentes à travers la comparaison d'affectation des pixels. Les gains et pertes intervenus pendant ce temps sont ainsi évalués, il en est de même pour le changement net et les contributions de chaque classe dans le changement. En outre, *LCM* facilite aussi l'analyse des transitions et des tendances entre deux données d'occupation du sol différentes. L'algorithme qui traite l'analyse de la tendance des changements peut aller jusqu'au neuvième degré. Les sorties de ces traitements se présentent sous forme de cartes, de tables et de graphes.

3.3.2 Opérationnalisation de la recherche

La dynamique du paysage est essentiellement formée par la dégradation forestière et la savanisation vue les transitions importantes vers les classes FDG et SAV pendant la période étudiée. Ce qui traduit une dégradation progressive du paysage issue de la disparition de la couverture forestière. Aussi, les recommandations avancées sont orientées vers l'atténuation de cette dégradation et vers la restauration de la forêt en vue de la protection du bassin versant et du lac en même temps. Elles ont été organisées sous forme de cadre logique (Tableau 14) dont les principaux objectifs évoqués consistent à :

- Conserver et gérer de manière appropriée la ressource en eau du lac
- Appliquer les techniques de défense et restauration du sol sur le bassin versant
- Promouvoir l'agriculture respectueuse de l'environnement
- Protéger les zones forestières

❖ Conservation et gestion appropriée de la ressource en eau du lac

Le lac Alaotra est un écosystème à potentialités exceptionnelles avec la ressource en eau qu'il procure à la population locale et à la biodiversité qui l'occupe. Aussi, des mesures de conservation et de gestion sont nécessaires afin de pérenniser la ressource en eau du lac. Les rives lacustres sur lesquelles la dynamique du lac est très active, sont sujettes à des protections intenses afin d'atténuer leur avancement. Pour ce faire, des actions de mise en défend des berges du lac sont à développer. En outre, le lac est connecté à des infrastructures agricoles comme les réseaux d'irrigation dont l'entretien par les agriculteurs est problématique (Rakotoarindrazaka et Penot, 2009). Leur détérioration entraîne les inondations et l'ensablement des rizières qui finissent par affecter la pérennité du lac.

Il est donc nécessaire d'apporter des techniques innovantes en complément avec les entretiens réguliers sur ces infrastructures.

❖ **Mise en défens du bassin versant**

La région Alaotra est reconnue aussi par l'importance des goulots d'érosion spectaculaires appelés *lavaka* dont l'existence marque le paysage du bassin versant. Ils résultent de l'absence de végétation notamment la forêt qui maintient le sol en place. Ce phénomène est l'effet à long termes de la dégradation forestière que subit actuellement le bassin versant. La protection à l'amont du bassin versant est primordiale pour assurer en même temps la protection des grands périmètres rizicoles et celle du lac lui-même (Ferry *et al.*, 2009). Ainsi, les actions à mettre en œuvre consistent essentiellement à rétablir la couverture forestière à travers la reforestation. Des efforts de zonage pour l'usage différentiel du bassin versant axés sur l'agroforesterie, les forêts communales et les forêts protégées seraient un choix prometteur pour réduire l'érosion des bassins versants. En plus, les techniques de stabilisation des *lavaka* à travers la végétalisation sont aussi proposées. Les actions de lutte contre le défrichement et la déforestation doivent être menées en parallèle aux activités précédentes.

❖ **Promotion de l'agriculture respectueuse de l'environnement**

La zone d'étude est un milieu à vocation agricole avec ses nombreux périmètres irrigués. Une modération des pratiques culturales est suscitée pour développer à la fois la production et également pérenniser le lac, origine des irrigations. En plus, les résultats de l'étude ont montré l'existence des zones de cultures sur les *tanety*. Des attentions particulières sont apportées à ces entités du paysage car la mise à nu prolongée du sol le rend sensible à l'érosion. Ainsi, la promotion de l'agriculture qui respecte l'environnement se présente comme un issu. Il s'agit d'appliquer les techniques de restauration de la fertilité des sols après les campagnes agricoles et aussi la modération des labours effectués. Le système de paillage qui couvre les cultures et protège le sol, est également une pratique très intéressante. En gros, il s'agit d'appliquer les techniques SCV (Sous-Couverture Végétale) afin de mettre en avant le respect de l'environnement. Ces systèmes font partie des options d'« agriculture de conservation » (Penot *et al.*, 2010).

❖ **Protection des zones forestières**

La partie Est du bassin versant renferme les vestiges de forêts naturelles qui ont résistées aux pressions antérieures. Pourtant, si aucune mesure n'est entreprise ces forêts risquent de disparaître dans un futur assez proche face au rythme de déforestation actuelle. Ainsi, la recommandation avancée consiste à la préservation des zones forestières surtout dans les milieux où la couverture est encore dense pour abriter une richesse en biodiversité.

Les actions sont orientées suivant un système de zonage qui subdivise les zones forestières en trois parties. Normalement, le zonage se fait sur base de critères spécifiques pour chaque massif, en fonction des espèces floristiques et faunistiques qu'il renferme ainsi que le degré de leur vulnérabilité. Suite à l'insuffisance de ces données, seules les cartes d'occupation du sol ont été utilisées en délimitant la couverture forestière du bassin versant afin de donner un aperçu du zonage. La périphérie est destinée comme forêt utilisable par la population, tandis que le noyau sera strictement indemne de toutes activités anthropiques. La mise en place d'un tel mode de gestion des ressources nécessite une collaboration avec la population locale qui est consciente d'une part, de l'appropriation de ces ressources et d'autre part, des problèmes liés à leur dégradation.

Par ailleurs, la mise en œuvre de ces objectifs nécessite le déploiement de moyens qui ont été synthétisés en quatre points principaux :

- Gestion locale et participative des ressources naturelles (eau et forêts) par la responsabilisation des acteurs concernés notamment les paysans locaux.
- Etablissement d'un partenariat entre les représentants des secteurs privés, public (Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage, Ministère des Eaux et Forêts) et communautaire.
- Mise en place d'un système de financement durable pour assurer la continuité des travaux entrepris.
- Renforcement des mesures de répression pour limiter les dégâts subis par les ressources naturelles comme le défrichement des forêts sur les *tanety* et des Cypéracées protégeant les rives lacustres.

Tableau 15. Cadre logique

OBJECTIFS	ACTIVITES	SOUS-ACTIVITES	ECHEANCE	RESPONSABLES	IOV	SOURCES DE VERIFICATION
Conserver la ressource en eau du lac	Protéger les berges du lac et les marais limitrophes	Mettre en place des protections mécaniques	Long terme	Population locale, Commune	Longueur des rives lacustres contrôlées	Rapport communal
		Lutter contre le défrichement des marais	Moyen terme		Nombre de points de défrichement de marais	Lois et textes, carte à partir d'image à haute résolution
	Entretien des canaux d'irrigation	-	Court terme	Population locale, <i>Fokontany</i>	Fréquence des entretiens effectués	Cahier de charge des <i>Fokontany</i>
Mettre en défens le bassin versant	Appliquer la reforestation	Organiser un reboisement communal et régional	Moyen terme	Commune, DREEF	Nombre de plants utilisés	Rapport communal et de la DREEF
	Pratiquer le génie végétal sur les milieux sensibles à l'érosion	Mettre en œuvre la végétalisation des talus	Moyen terme	Commune, DREEF	Fréquence des pratiques	Rapport communal et de la DREEF
		Protéger les <i>lavaka</i> instables	Moyen terme	Commune, DREEF	Nombre de <i>lavaka</i> contrôlés	Rapport communal et de la DREEF
	Lutter contre le défrichement	-	Long terme	Ministère des Eaux et Forêts	Superficie à défrichement évité	Lois et textes, Rapport d'activité, Cartes de suivi des feux

OBJECTIFS	ACTIVITES	SOUS-ACTIVITES	ECHANCE	RESPONSABLES	IOV	SOURCES DE VERIFICATION
<i>Promouvoir l'agriculture respectueuse de l'environnement</i>	Appliquer les techniques culturales efficientes	Vulgariser la restauration de la fertilité du sol et de l'agroforesterie	Moyen terme	Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage, ONG	Nombre de ménages sensibilisés	Rapport d'enquête, Carte d'occupation du sol
		Promouvoir les techniques de labour sans émiettement du sol	Moyen terme	Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage, ONG		Rapport d'enquête et d'inspection sur terrain
		Sensibiliser les paysans sur les systèmes de paillage, SCV	Moyen terme	Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage, ONG		Rapport d'enquête et d'inspection sur terrain
		Diffuser les terrassements des terrains de culture sur les pentes	Long terme	Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage, ONG	Superficie des terrassements réalisés	Carte d'occupation du sol avec image à haute résolution
<i>Protéger les zones forestières dans le bassin versant</i>	Effectuer un zonage forestier	Faire une reconnaissance des massifs forestiers dans le bassin versant	Court terme	DREEF, ONG	Superficie de forêt inventoriée	Rapport d'inventaire forestier et écologique
		Elaborer un plan de zonage forestier	Moyen terme	Population locale, DREEF, ONG	Plan de zonage de chaque massif	Rapport d'activité
		Délimiter et matérialiser les zones d'occupation, d'utilisation et de protection	Moyen terme	DREEF, Ministère des Eaux et Forêts	Superficie de forêt délimitée et subdivisée	Rapport d'activité

CONCLUSION

CONCLUSION

La présente étude a permis de démontrer la dynamique du lac Alaotra et les différentes modifications paysagères intervenues dans son bassin versant suite à une analyse multi temporelle. Les images satellitaires ont été les bases de données utilisées et traitées par les outils de SIG et de télédétection. Ces derniers facilitent l'obtention rapide des informations nécessaires malgré les limites rencontrées durant l'investigation. Ces limites sont compensées par la validation des résultats à travers l'utilisation du test de Jeffrey-Mattusita pour la séparabilité des *ROI*, la matrice de confusion et l'indice Kappa pour la précision des classifications. L'intégration de ces analyses a procuré une appréciation généralement satisfaisante aux traitements que ce soit pour l'indice de séparabilité des classes ou la précision globale de la classification. La valeur de l'indice Kappa qui est conventionnellement acceptable pour préciser une classification d'image satellitaire, a également manifesté un excellent chiffre évalué à 0,83%. Les informations fiables obtenues ont ainsi servi dans l'extraction des données lacustres et dans la réalisation des cartes d'occupation du sol du bassin versant.

Afin d'analyser individuellement l'évolution du lac, celui-ci a été extrait des images multi dates initiales grâce à la classification indiciaire (*NDWI*). L'isolement du lac suivi de la comparaison de sa superficie entre les dates étudiées montre une dynamique intra et inter saisonnière. Le lac Alaotra a tendance à diminuer avec un taux de réduction moindre par rapport à la taille du bassin versant mais visible à l'échelle spatiale. La dynamique de l'occupation du sol a été par la suite analysée pour trouver des éclaircissements à ce recul du lac. Les matrices de transition obtenues mettent en exergue l'existence de différentes conversions des unités du paysage dont la dégradation des forêts en savane est la plus importante. Par ailleurs, un accroissement des zones de culture est aussi remarqué pendant l'analyse de la transition, expliqué par la conversion des zones marécageuses dans les bas-fonds et l'accaparement des *tanety* en amont par la population. La savanisation associée à l'expansion des terres agricoles menacent progressivement l'ensemble du bassin versant dont l'impact est perceptible au niveau du lac en aval par l'ensablement. Ceci dit, ces facteurs expliquant la diminution de la superficie du lac établis dans la présente étude ne sont pas exclusifs.

Ainsi, les hypothèses avancées par la présente recherche sont généralement vérifiées. Le lac manifeste une diminution en sa superficie pendant les dates étudiées malgré qu'une légère augmentation soit observée entre la saison humide et sèche en 2014. La dynamique de l'occupation du sol est traduite par une transition importante vers la savanisation combinée à la dégradation forestière et à l'expansion des zones agricoles dans le bassin versant. Bref, l'étude a pu identifier la relation entre la dynamique du lac et celle de l'occupation du sol à travers le recul du lac Alaotra qui s'expliquent indirectement par la régression de la couverture forestière.

Les images utilisées dans l'étude ont fourni une visualisation plus générale de l'occupation du sol dans le bassin versant. Une analyse plus approfondie peut être apportée en travaillant sur des images à haute résolution afin de percevoir plus de détails intéressants. En outre, l'intégration des données socio-économiques accède à d'autre point de vue qui peut enrichir l'étude. Elles se basent sur des enquêtes permettant de connaître mieux la réalité que vivent la population locale et leur choix d'utilisation du sol. En ce qui concerne la dynamique du lac, elle est observable à travers l'étude multi temporelle de sa profondeur. Les outils de SIG et de télédétection peuvent être orientés dans cette optique en captant des informations bathymétriques à partir d'images satellitaires spécifiques. Cette étude de la bathymétrie des plans d'eau peut être combinée avec la méthodologie utilisée par la présente recherche afin de renforcer les données nécessaires pour le suivi des systèmes lacustres du pays en vue d'améliorer le domaine de l'hydrologie en général.

Actuellement, l'approche paysage surtout à l'échelle du bassin versant, est très employée dans le domaine du développement. Une question se pose : Quelle place la connaissance de la dynamique de ces paysages tient-elle dans la mise en œuvre des différents projets, notamment en milieu rural où la gestion des ressources naturelles reste encore un défi?

BIBLIOGRAPHIE

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1] ANDRIAMALALA, F., RANAIVOARIMANANA, S., RAKOTOMALALA, F. A., EDMOND, R., FARAMALALA, M.H., RAKOTONDRAOMPIANA, S., RAKOTONIAINA, S., et RIERA, B. (2009). *Caractérisation écologique et analyse structurale de la forêt humide de moyenne altitude de Zahamena (Région Alaotra Mangoro)*. Département de Biologie et Ecologie Végétale, Laboratoire de Géophysique de l'Environnement et de Télédétection, Université d'Antananarivo. Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris.
- 2] ANDRIANIRINA, N., BOSCH, P., DAVID-BENZ, H., IMBERNON, J., LE COTTEY, T., LEMOISSON, P., PENOT, E., RANDRIANARISON, L., RASOLOFO, P., RONFORT, C., et SCOPEL, E. (2012). *Le Lac ALAOTRA à Madagascar*. Observatoire des Agricultures du monde (Version provisoire).
- 3] ASPINAL, R., et JUSTICE, C. (2003). *A Land Use and Land Cover Change science strategy*. In Summary of a Workshop Organized by US Climate Change Science Program (CCSP) Land Use Interagency Working Group (LUIWG).
- 4] BAKOARINIAINA, L. N., KUSKY, T., et RAHARIMAHEFA, T. (2006). 'Disappearing Lake Alaotra : Monitoring catastrophic erosion, waterway silting, and land degradation hazards in Madagascar using Landsat imagery'. *Journal of African Earth Sciences*, **44** : 241 - 252.
- 5] BAMBIA, I. (2010). *Anthropisation et dynamique spatio-temporelle de paysages forestiers en République démocratique du Congo*. Faculté des Sciences. Ecole Interfacultaire de BioIngénieurs. Université Libre de Bruxelles.
- 6] BAMBIA, I., MAMA, A., NEUBA, D., KOFFI, K., TRAORE, D., VISSER, M., SINSIN, B., LEJOLY, J., et BOGAERT, J. (2008). 'Influence des actions anthropiques sur la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans la province du Bas-Congo (R.D. Congo)'. *Sciences & Nature*, **5 (1)** : 49 - 60.
- 7] BEDRU, S. M. (2006). *Remote Sensing & GIS for Land Cover/Land Use Change Detection and Analysis in the Semi-Natural Ecosystems and Agriculture Landscapes of the Central Ethiopian Rift Valley*. Dresden: Technische Universität Dresden. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung.
- 8] BENHADJ, I. (2008). *Observation spatiale de l'irrigation d'agrosystème semi-arides et Gestion durable de la ressource en eau en plaine de Marrakech*. Université de Toulouse III - Paul Sabatier.
- 9] BERGERI, I., MICHEL, R., et BOUTIN, J.-P. (2002). 'Pour tout savoir ou presque sur le coefficient Kappa'. *Médecine Tropicale*, **62** : 634 - 636.
- 10] BLANC-PAMARD, C., et RAMIARANTSOA, H. R. (2003). 'Madagascar : Les enjeux environnementaux'. *L'Afrique. Vulnérabilité et défis*, **447** : 354-376.

- 11] CATHERINE, G. (2012). *Base de connaissances ornithologiques et spectrales relative aux écosystèmes fréquentés par les limnicoles dans les Petites Antilles*. Caribsat. Programme interreg Caraïbes.
- 12] CHAPERON, P., DANLOUX, J., et FERRY, L. (1993). *Fleuves et rivières de Madagascar*. Paris: ORSTOM Editions.
- 13] CHRISTIAN, A. K. (2000). 'Deforestation, Erosion and Fire : Degradation Myths in Environmental History of Madagascar'. *Environment and History*, **6 (4)** : 421 - 50.
- 14] COHEN, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological*, **20** : 37 - 46.
- 15] CONGALTON, R. (1991). 'A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data'. *Remote Sens. Environ.*, **37** : 35 - 46.
- 16] CONGALTON, R. G., et MEAD, R. A. (1983). 'A quantitative method to test for consistency and correctness in photo interpretation'. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **49** : 69-74.
- 17] CREAM, C. d. (2013). *Monographie Région Alaotra Mangoro*
- 18] DAVIES, B., et GASSE, F. (1987). 'Glossary'. In Burgis M. J. & Symoens J. J. 'African wetlands and shallow waters'. *Bodus*, 25 - 33.
- 19] DEMERINGO, H. (2005). *Les techniques rizicoles au Lac Alaotra à Madagascar : Analyses et propositions pour une meilleure gestion des systèmes de culture sous couvert végétal hors périmètre irrigué*. DESS. Université Paris XII. CIRAD Madagascar.
- 20] DOMAS, R., PENOT, E., ANDRIAMALALA, H., et CHABBIERSKI, S. (2008). *Quand les tanety rejoignent les rizières au Lac Alaotra : Diversification et innovation sur les zones exondées dans un contexte foncier de plus en plus saturé*. Laos: Regional Workshop on conservation agriculture Investing in sustainable agriculture : The case of Conservation Agriculture and Direct Seeding Mulch-Based Cropping Systems.
- 21] DUFILS, J. M. (2003). 'Forest ecology'. In GOODMAN S.M., et BENSTEAD J.P., 'The Natural History of Madagascar'. *The University of Chicago Press*, 88-111
- 22] EASTMAN, J. (2012). *Idrisi Selva Manual. Manual version 17*. Clark Labs.
- 23] EDWARDS, T., DESHLER, J., FOSTER, D., et MOISEN, G. (1996). 'Adequacy of wildlife habitat relation models for estimating spatial distributions of terrestrial vertebrates'. *Conservation Biology*, **10** : 263-270.
- 24] FERRY, L., MIETTON, M., ROBINSON, L., et ERISMANN, J. (2009). 'Alaotra Lake (Madagascar) : Past, Present and Future'. *Zeitschrift für Geomorphologie*, **53 (3)** : 299-318 (20).
- 25] FOODY, G. M. (2002). 'Status of land cover classification accuracy assessment'. *Remote Sensing of Environment*, **80** : 185-201.

- 26] GANZHORN, J. U., LOWRY, P. P., SCHATZ, G. E., et SOMMER, S. (2001). 'The biodiversity of madagascar : one of the world's hottest hotspots on its way out'. *Oryx* 35, 4 : 346-348.
- 27] GAO, C., WANG, X. Y., YANG, Z. D., LU, Y. C., et HE, H. (2005). 'Cause and countermeasures for Chaohu Lakeshore collapse'. *Chinese Geographical Science. Science press, Beijing China*, 15 (1) : 88-93.
- 28] HUMBERT, H. (1965). Description des types de végétation. In H. HUMBERT, et G. COURS DARNE, *Notice de la carte de Madagascar* (S. 46 - 78). Travaux de la Section Scientifique et Technique de l'Institut Français de Pondichéry Hors série 6.
- 29] JAROSZ, L. (1996). *Defining deforestation in Madagascar*. In RICHARD P., et MICHAEL W., *Liberation Ecologies : Environment, development, social movements* (pp. 148 - 164). London and New York: Routledge.
- 30] KULL, C. (2000). 'Deforestation, Erosion and Fire : Degradation Myths in the Environmental History of Madagascar'. *Environment and History* 6, 4 : 421 - 450.
- 31] KUSKY, T., TORAMAN, E., RAHARIMAHEFA, T., et RASOAZANAMPARANY, C. (2010). 'Active tectonics of the Alaotra-Ankay Graben System, Madagascar : Possible extension of Somalian-African diffusive plate boundary?'. *Gondwana Research*, 18 : 274 - 294.
- 32] LAMB, H. (2001). *Holocene climatic change and vegetation response inferred from the sediments of Ethiopian crater lakes*. The Royal Irish Academy 101.
- 33] LEBLANC, M., FAVREAU, G., TWEED, S., LEDUC, C., RAZACK, M., et MOFOR, L. (2007). 'Remote sensing for groundwater modelling in large semiarid areas : Lake Chad Basin, Africa'. *Hydrological Journal*, 15 : 97-100.
- 34] LEPERS, E., LAMBIN, E. F., JANETOS, A. C., DEFRIES, R., ACHARD, F., RAMANKUTTY, N., et SCHOLE, R. J. (2005). 'A synthesis of information on rapid land-cover change for period 1981-2000'. *BioScience*, 55 : 115-124.
- 35] LOWRY, P., SCHATZ, G., et PHILLIPSON, P. (1995) (In lit.). *Classification de la végétation naturelle et anthropique de Madagascar*. Communication présentée à l'Académie Malgache le 16 novembre 1995.
- 36] LU, D., et WENG, Q. (2007). 'A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance'. *International Journal of Remote Sensing*, 28 : 823-870.
- 37] MCFEETERS, S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of. *Int. J. Remote Sens.*, 17 : 1425 – 1432.
- 38] MOREAU, J. (1977). 'Le lac Alaotra à Madagascar, évolution géographique passée et actuelle'. *Annls Limnol*, 13 (3) : 261-274.
- 39] MOREAU, J. (1980). 'Le Lac Alaotra à Madagascar : cinquante ans d'aménagement des pêches'. *O.R.S.T.O.M., Série Hydrobiologie*, 13 (3-4) : 171-179.

- 40] MYERS, N. (1988). 'Threatened biotas : "hotspots" in tropical forests'. *The Environmentalist*, **8** : 187 - 208.
- 41] MYERS, N. (1990). 'The Biodiversity challenge: expanded hot spot analysis'. *The Environmentalist*, **10** : 243 - 256.
- 42] OSBORNE, P., ALONSO, J., et BRYANT, R. (2001). 'Modelling landscape-scale habitat use using GIS and remote sensing : a case study with great bustards'. *Journal of Applied Ecology*, **38** : 458-471.
- 43] PENOT, E., SCOPEL, E., DOMAS, R., et NAUDIN, K. (2010). *La durabilité est-elle soluble dans le développement ? L'adoption des techniques de conservation de l'agriculture dans un contexte d'incertitudes multiples au Lac Alaotra, Madagascar*. Montpellier: Colloque : "Agir en situation d'incertitude". Quelles constructions individuelles et collectives des régimes de protection et d'adaptation en agriculture ?
- 44] PIDGEON, M. (1996). *An ecological survey of lake Alaotra and selected wetlands of central and eastern Madagascar in analysing the demise of Madagascar pochard Aythya innotata*. Antananarivo: Lucienne Wilmé edition, WWF.
- 45] PONTIUS, R. (2000). 'Quantification error versus location error in comparison of categorical maps'. *Photogrammetric Engineering and remote Sensing*, **66 (8)** : 1011-1016.
- 46] PRENZEL, B. (2004). 'Remote sensing-based quantification of land-cover and land-use change for planning'. *Progress in Planning*, **61** : 281-299.
- 47] RAKOTOARINDRAZAKA , N., et PENOT, E. (2009). *Aménagement et gestion de l'espace : Cas de 3 Zones de Gestion Concertée dans le bassin versant Imamba-Ivakaka dans l'ouest de l'Alaotra, Madagascar. Dynamisme des aménagements et recommandations (Partie 2)*. CIRAD.
- 48] RAKOTONIAINA, S., RAKOTOMANDRINDRA, P., RANAIVOARIMANANA, S., et RAKOTONDRAOMPIANA, S. (2013). *La cartographie et la télédétection comme système de suivi-évaluation des TGRN. Exemple de site d'application : la commune de Didy, région d'Alaotra-Mangoro, Madagascar*. CIRAD Madagascar.
- 49] RAKOTONIERANA, D. (2004). *Rapport Annuel 2003 CIRAGRI*. Circonscription d'Agriculture. Ambatondrazaka, Madagascar.
- 50] RAMOHAVELO, C. D., SORG, J. P., BUTTLER, A., et REINHARD, M. (2014). 'Recommandations pour une agriculture plus écologique respectant les besoins socio-économiques locaux, région du Menabe Central, côte ouest de Madagascar'. *Madagascar Conservation & Development*, **9** : 13-19.
- 51] RANARIJAONA, H. L. (1999). *La flore des milieux lenticques (lacs, marais et étangs) de Madagascar : essais de typologie*. Thèse doctorat 3ème cycle. Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Département de Botanique et Ecologie végétales, Option Ecologie végétale.

- 52] RANARIJAONA, H. L. (2007). 'Concept de Modèle Ecologique pour la Zone Humide Alaotra'. *Madagascar Conservation & Development*, **2** (1) : 35-42.
- 53] RANDRIANASOLO, S. (2013). *Développement d'un système de suivi par télédétection des lavaka : cas du bassin versant de Sahamaloto, région Alaotra Mangoro*. Mémoire de DEA. ESSA-Forêts. Université d'Antananarivo.
- 54] RATOVOSON, A. A. (2011). *Analyse de la dynamique spatiotemporelle des paysages dans la Région d'Analajirofo*. Mémoire d'ingénieur. ESSA-Forêts. Université d'Antananarivo.
- 55] RATOVOSON, A. A. (2012). *Dynamique et modélisation spatiale des mangroves du littoral Sud de Maintirano dans le cadre de la Réduction des Emissions dues à la Déforestation et Dégradation des forêts (REDD+)*. Mémoire de DEA. ESSA- Forêts. Université d'Antananarivo.
- 56] RICHARDS, J. A. (1999). 'Remote Sensing Digital Image Analysis'. In Springer-Verlag (p. 240). Berlin, Germany.
- 57] RIQUIER, J. (1954). 'Etude sur les " lavaka "'. *Mémoires de l'Institut Scientifique de Madagascar. Série D - Tome VI. ORSTOM*, 170-189.
- 58] ROGAN, J., et CHEN, D. M. (2004). 'Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change'. *Progress in Planning*, **61** : 301-325.
- 59] SCHIMMER, R. (2008). *A remote sensing and GIS method for detecting land surface areas covered by copper mill tailings*. Pecora 17 - The Future of Land Imaging. Going Operational (p. 13). Denver, Colorado: University of Connecticut.
- 60] STATTERSFIELD, J., CROSBY, M., LONG, A., et WEGE, D. (1998). *Endemic Bird Areas of the World - Priorities for Biodiversity Conservation*. Cambridge, UK: Birdlife International.
- 61] STEHMAN, S. V. (1997). 'Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy'. *Remote Sensing of Environment*, **62** : 77-89.
- 62] TAIBOU, B., et DIEYNABA, S. (2012). *Dynamique de L'Occupation des sols, cartographie des CLPA, des zones de pêche et mise en place d'un système d'information géographique*. Sénégal: Centre de Suivi Ecologique et USAID/COMFISH Project, University of Rhode Island, Narragansett RI.
- 63] VERMOTE, E. F., EL SALEUOUS, N. Z., et JUSTICE, C. O. (2002). 'Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared : first results'. *Remote Sensing of Environment*, **83** : 97 - 111.
- 64] WAEBER, P., WILME, L., RAMAMONJISOA, B., GARCIA, C., RAKOTOMALALA, D., RABEMANANJARA, Z.H., KULL, C., GANZHORN, J.U., et SORG, J.-P. (2014). 'Dry Forests in Madagascar: neglected and under pressure'. *International Forestry Review*, **16** (7) : 1 - 22.
- 65] WILME, L., GOODMAN, S. M., et GANZHORN, J. U. (2006). 'Biogeographic Evolution of Madagascar's Microendemic Biota'. *Science*, **312** : 1063-1065.
- 66] WRIGHT, H. T., et RAKOTOARISOA, J. A. (2003). *Human ecology*. In GOODMAN S. M., et BENSTEAD J. P., *The Natural History of Madagascar* (pp. 112 - 178). The University of Chicago Press.

ANNEXES

ANNEXES

Annexe 1. Caractéristiques de la zone d'étude

CADRE BIOPHYSIQUE

➤ Hydrologie

Le bassin versant du Maningory est doté d'important réseau hydrographique sous forme de système lacustre et de cours d'eau. Plusieurs lacs sont rencontrés dans la région dont les plus connus sont le lac Alaotra qui est le plus grand lac de Madagascar, et le lac Antsomangana d'Andilamena. La moitié du Lac Alaotra se trouve dans le district d'Amparafaravola entre les communes rurales de Tanambe, d'Ambohitarivo et de Vohimena.

En ce qui concerne les cours d'eau, plusieurs d'entre eux déversent leurs eaux dans le lac Alaotra. Près de ces affluents sont aménagés les périmètres irrigués caractéristiques de la zone.

- la Sahabe qui se déverse et se prolonge dans le Lac Alaotra par un chenal de 3 km, constituant une voie d'eau pour les pirogues des pêcheurs ;
- la Sahamaloto irriguant un périmètre rizicole de plus de 6.000 ha ;
- l'Anony irriguant un périmètre rizicole de 4.476 ha ;
- l'Imamba/Ivavaka irriguant un périmètre rizicole de 2.671 ha ;
- la réserve d'eau du barrage Bevava (Vallée Marianina), irriguant un périmètre rizicole de 3.653 ha.

La Maningory qui est le seul exutoire du lac Alaotra passe sur la limite Nord du district d'Ambatondrazaka et se jette dans l'océan Indien.

Par ailleurs, de nombreuses rivières sillonnent aussi le district d'Andilamena pour arroser sa plaine. Elles alimentent également les lacs dont Antsomangana et quelques barrages de retenue. Par la suite, elles se déversent dans la Bemarivo qui les conduit dans la province de Mahajanga pour se jeter enfin dans le Canal de Mozambique.

➤ Relief

La Région Alaotra Mangoro se présente comme une cuvette bordée de montagnes escarpées formées par la falaise de l'Angavo à l'Ouest et celle de Betsimisaraka à l'Est. De vastes plateaux constitués par une large dépression à fond plat caractérisent la partie Nord de la région avec les cuvettes de l'Alaotra, d'Andilamena et de Didy. L'altitude moyenne y est estimée à 700 m.

La zone la plus basse abrite les marais ou « *zetra* » et les eaux libres comme le lac Alaotra et le lac Antsomangana.

➤ Géomorphologie et pédologie

La cuvette de l'Alaotra est constituée par cinq formations lithologiques : alluvions récentes et anciennes ; migmatites ; gneiss ; migmatites granitoïdes ; et granites migmatitiques.

A propos de la pédologie, la zone d'étude se caractérise par l'existence des sols ferrallitiques à couche superficielle latéritique d'épaisseurs variant de 10 à 50 cm. Ce type de sol est particulièrement favorable à l'érosion et à la formation de *lavaka*. Ces *lavaka* forment en effet un paysage caractéristique des reliefs de la Région Alaotra Mangoro et ne présentent aucun intérêt agricole. Au niveau des plaines fluvio-lacustres, les sols sont de deux types :

- hydromorphes moyennement organiques. Ce sont des sols à texture très argileuse fine, aptes à la riziculture;
- hydromorphes tourbeux ayant une aptitude bonne à moyenne pour la riziculture inondée, moyenne pour l'agriculture de contre-saison sans irrigation.

➤ Formation végétale

Trois groupes de formations végétales caractérisent la cuvette Alaotra et d'Andilamena :

- la prairie qui constitue la plus grande partie des bassins versants de l'Alaotra et de la Zone d'Andilamena. Elle comprend 2 sous-groupes: la prairie à graminées (*bozaka*) ; la prairie à buissons et fougères sur sols siliceux.
- la végétation des sols alluviaux marécageux constituée essentiellement de « *Via* » (*Typhonodorum lindleyanum*) et de « *zozoro* » (*Cyperus madagascariensis*) (papyrus malgache), aux alentours des plans d'eau comme le lac Alaotra et le lac Antsomangana ;
- la forêt ombrophile à sous-bois herbacé, représentée surtout dans la partie Sud-Est du bassin. Sur les hauts plateaux, cette forêt a généralement été détruite par les feux de brousse et a laissé place à la prairie à *bozaka*.

➤ Faune

La zone marécageuse du lac Alaotra est surtout réputée pour ses oiseaux, ses poissons et ses lémurins. Cependant, nombreuses espèces de la faune de cette zone sont menacées ou en voie de disparition.

Oiseaux : Le fuligule de Madagascar (*onjy* : *Aythya innonata*) et la Grève de Delacours (*Tachybaptus rufulvatus*) sont en voie de disparition. D'autres espèces sont menacées dont: la Grèbe Malgache (*Tachybaptus pelzani*) et le héron de Humblot (*Ardea humbloti*).

Poissons : Actuellement, il ne reste que 4 à 5 espèces de poissons dans les marécages du lac Alaotra. Toutes ces espèces sont exotiques, sauf quelques rares individus indigènes. Il est à signaler que certaines espèces de poisson sont dégénérées et en voie de disparition.

Lémuriens : Les espèces végétales des zones marécageuses du lac Alaotra constituent le seul habitat du petit lémurien *Hapalémur griseus alaotrensis* (*bandro*). Cet animal est actuellement en voie de disparition.

Toutefois, le lac Alaotra est inscrit dans la Convention RAMSAR vue cette richesse en biodiversité vouée à la protection. La convention a pour mission « la conservation et l'utilisation rationnelle des zones humides par des actions locales, régionales et nationales et par la coopération internationale, en tant que contribution à la réalisation du développement durable dans le monde entier ».

MILIEU HUMAIN

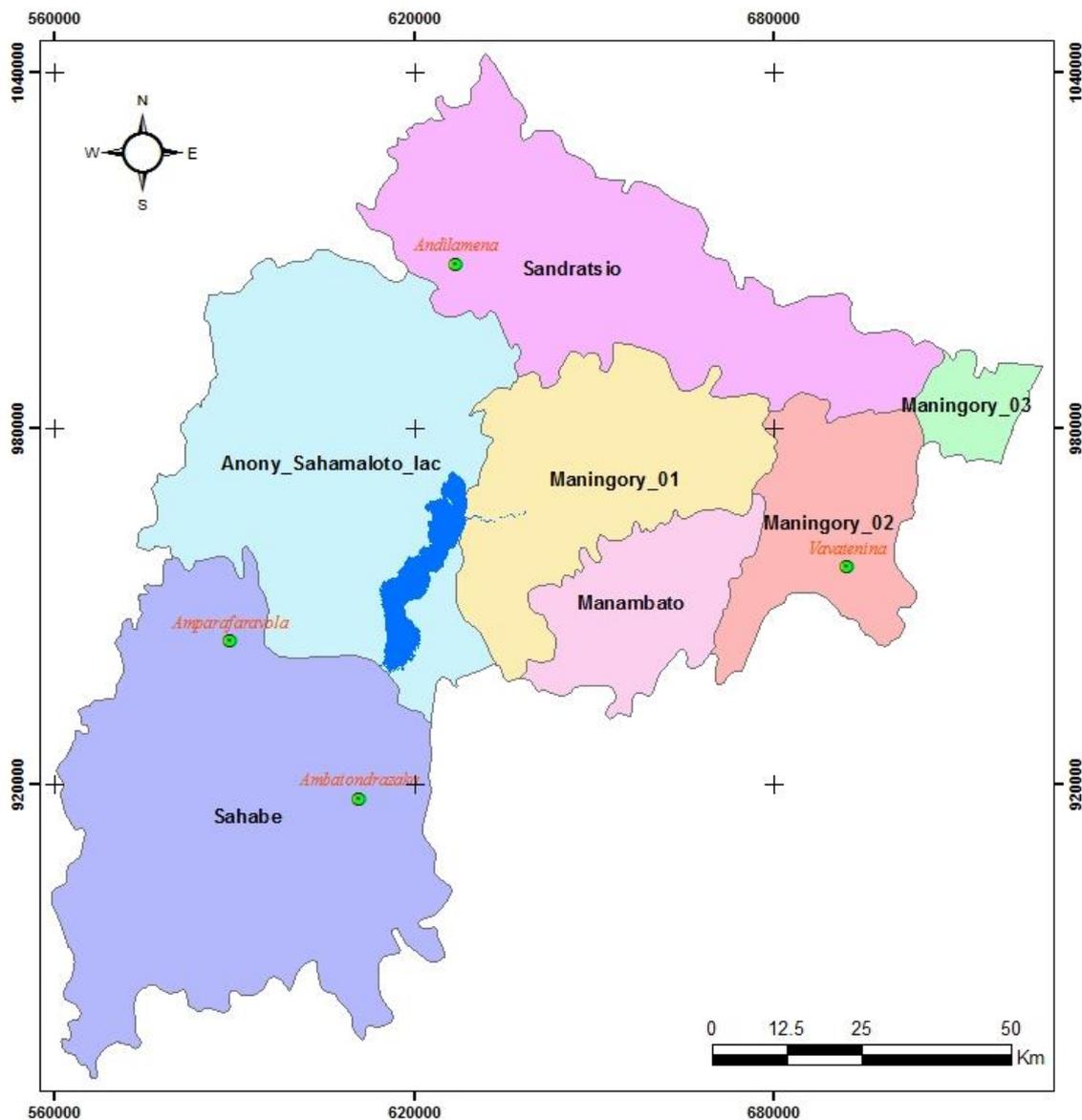
La population totale de la Région Alaotra Mangoro avoisine 1 175 581 habitants en 2009 dont la plupart se trouve à Ambatondrazaka (28,9 %) et à Amparafaravola (26,1 %).

La zone d'étude est peuplée surtout par l'ethnie Sihanaka, suivie de très loin par les Merina. Les Betsimisaraka viennent en troisième position avant les Betsileo et les Antandroy. Le reste est composé de groupes minoritaires venant du reste de l'Ile.

Le mouvement de la population se fait entre les districts voire les communes d'un même district et se justifient par l'existence de pôle de travail. Parfois, l'accentuation de la période de soudure incite la population à se déplacer temporairement. Les autres ethnies migrent vers la région pour effectuer des travaux agricoles essentiellement dans les rizières tels que le labour à la charrue, le repiquage, le désherbage et la moisson du riz entre autres.

Annexe 2. Cartographie des sous-bassins versants

**Principaux sous-bassins versants
inclus dans le bassin du Maningory**



Légende
 ● Villes
 ■ Lac Alaotra

Source :
 Base de données BV de Madagascar et
 BD 500 FTM (1998)

Auteur :
 RANDRIAMALALA Ihoby Henintsoa
 Labo SIG ESSA-Forêts, 2015

Annexe 3. Variation mensuelle de la pluviométrie de la station météorologique d'Ambohitsilaozana Ambatondrazaka (mm) de 1990 à 2002

Année	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
1990	132,0	189,9	79,8	65,0	6,7	6,5	5,9	3,4	1,0	22,3	67,5	174,7
1991	533,0	308,9	187,6	133,0	3,4	15,8	4,3	0,5	0,0	30,6	15,2	162,0
1992	301,0	239,2	126,9	1,9	25,0	8,9	12,4	5,2	0,9	0,6	48,9	29,0
1993	320,5	188,0	235,5	16,0	11,2	10,8	9,8	6,9	19,0	66,3	33,2	131,9
1994	432,8	267,0	191,0	4,5	21,4	7,9	28,1	7,3	44,0	169,0	3,5	110,0
1995	461,2	217,9	78,0	47,9	29,0	9,9	4,1	3,0	0,8	4,1	3,2	510,8
1996	436,8	128,8	226,8	17,5	3,7	2,8	4,7	2,2	0,8	0,2	16,9	408,8
1997	482,2	254,0	18,6	41,5	4,2	1,7	9,2	6,3	16,9	23,6	85,2	148,9
1998	294,2	441,5	18,5	3,1	11,8	5,2	2,9	7,6	36,4	0,0	0,6	207,2
1999	235,8	35,2	103,3	7,1	39,4	9,3	4,8	6,5	2,0	0,8	7,1	99,6
2000	110,0	185,2	188,1	13,3	2,8	10,7	16,1	7,3	3,7	1,1	19,0	196,7
2001	711,1	129,1	52,7	28,8	2,7	5,7	1,1	4,3	1,3	18,7	0,1	189,8
2002	29,9	474,1	33,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,6	0,9	45,8	389,6

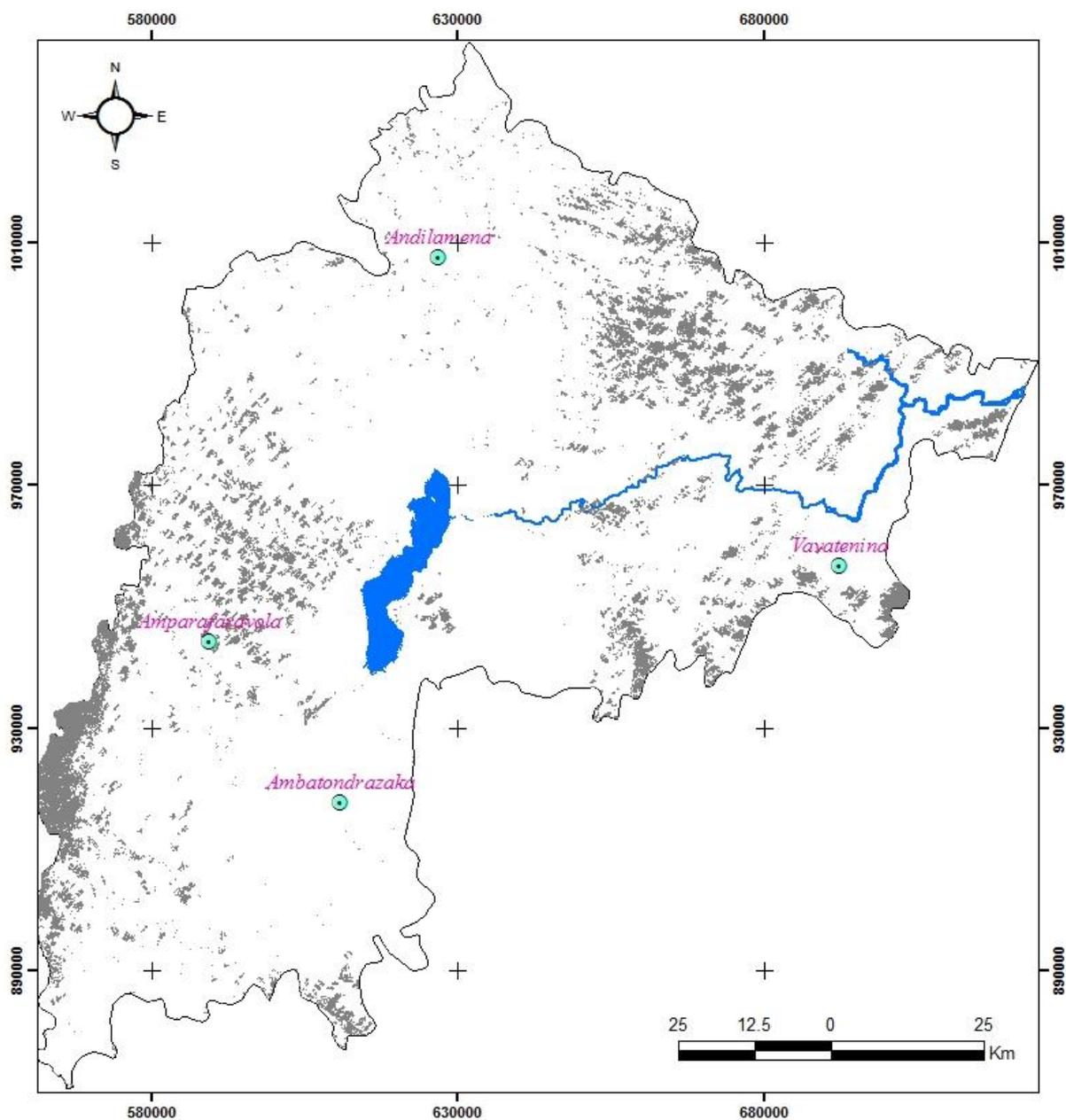
(Source : MEFT in TBER)

Annexe 4. Séparabilité par paire entre les classes

Ordre	Juin 1990	Avril 2001	Août 2014
1	ZDC – EAU : 1.99999998	EAU – ZDC : 2.00000000	EAU – SAV : 2.00000000
2	MAR – EAU : 1.99999987	FDS – EAU : 1.99999997	EAU – ZDC : 1.99999998
3	SAV – EAU : 1.99996350	SAV – EAU : 1.99999971	EAU – FDG : 1.99999975
4	FDG – EAU : 1.99993687	FDG – EAU : 1.99999957	FDS – ZDC : 1.99999559
5	FDS – ZDC : 1.99974859	FDG – MAR : 1.99661807	FDS – EAU : 1.99996183
6	FDS – EAU : 1.99926949	MAR – ZDC : 1.99555144	FDG – ZDC : 1.99980601
7	FDS – MAR : 1.99475581	FDG – SAV : 1.97656778	MAR – ZDC : 1.99934744
8	FDS – SAV : 1.98833313	FDS – SAV : 1.97584151	FDS – SAV : 1.99574193
9	FDG – SAV : 1.98579617	FDS – MAR : 1.97159064	EAU – MAR : 1.99544756
10	FDG – FDS : 1.96825801	FDS – FDG : 1.95040734	FDG – SAV : 1.98809354
11	FDG – ZDC : 1.95503331	EAU – MAR : 1.95023788	MAR – SAV : 1.95739319
12	MAR – ZDC : 1.88923870	FDS – ZDC : 1.94384544	FDS – MAR : 1.93701215
13	FDG – MAR : 1.82432214	SAV – MAR : 1.93800334	FDG – MAR : 1.87943774
14	MAR – SAV : 1.74699151	SAV – ZDC : 1.83202795	FDS – FDG : 1.84921911
15	SAV – ZDC : 1.48571518	FDG – ZDC : 1.76573999	ZDC – SAV : 1.57934606

Annexe 5. Zone d'observation de la dynamique de l'occupation du sol

Zone d'observation de la dynamique d'occupation du sol



Légende

- Zone d'observation de la dynamique (90,37%)
- Zone non étudiée (9,63%)

Auteur : RANDRIAMALALA
 Ihoby Herintsoa
 Labo SIG ESSA-Forêts, 2015

Source :
 Limite Bassin versant et
 Nuages tirés de la Classifications
 des images LANDSAT
 LT5158072_0721990170/LT5158073_0731990170/LT5159072_0721990273/
 LE7158072_0722001112/LE7158073_0732002195/LE7159072_0722002106/
 LC8158072_0722014236/LC8158073_0732014236/LC8159072_0722014259
 Courtesy of the U.S. Geological Survey
 Projection Laborde
 Hotine_Oblique_Mercator_Azimut_Center

Annexe 6. Matrice de transition entre 1990 et 2001 (en ha)

Superficie. (en ha)		2001						
		FDS	FDG	SAV	MAR	ZDC	EAU	Total
1990	FDS	110.137,50	65.614,14	8.764,20	91,89	437,04	161,28	185.206,05
	FDG	42.329,88	283.964,22	45.459,18	371,70	7.215,21	808,11	380.148,30
	SAV	5.421,96	56.949,30	336.017,25	502,74	10.956,42	808,02	410.655,69
	MAR	6,30	337,05	477,36	33.601,95	11.357,91	4.284,27	50.064,84
	ZDC	25,29	4.966,38	15.977,61	3.005,01	74.967,12	986,04	99.927,45
	EAU	294,93	543,60	440,55	1.818,81	177,93	22.401,36	25.677,18
	Total	158.215,86	412.374,69	407.136,15	39.392,10	105.111,63	29.449,08	1.151.679,51

Superficie stable : 861.089,40 ha (74,77%)

Superficie modifiée : 290.590,11 ha (25,23%)

Annexe 7. Matrice de transition entre 2001 et 2014 (en ha)

Superficie (en ha)		2014						
		FDS	FDG	SAV	MAR	ZDC	EAU	Total
2001	FDS	100.667,88	51.171,84	6.045,84	10,44	78,75	241,11	158.215,86
	FDG	44.564,49	274.747,68	84.059,64	141,57	7.806,60	1.054,71	412.374,69
	SAV	2.609,73	55.212,48	329.062,05	385,38	19.588,50	278,01	407.136,15
	MAR	11,43	555,84	493,74	34.101,36	3.937,05	292,68	39.392,10
	ZDC	69,48	5.261,49	9.602,91	11.397,87	78.671,70	108,18	105.111,63
	EAU	42,12	1.347,30	731,43	5.089,14	1.704,87	20.534,22	29.449,08
	Total	147.965,13	388.296,63	429.995,61	51.125,76	111.787,47	22.508,91	1.151.679,51

Superficie stable : 837.784,89 ha (72,74%)

Superficie modifié : 313.894,62 ha (27,26%)

Annexe 8. Matrice de transition entre 1990 et 2014 (en ha)

Superficie (en ha)		2014						
		FDS	FDG	SAV	MAR	ZDC	EAU	Total
1990	FDS	93.616,92	82.839,42	8.107,83	79,38	165,69	396,81	185.206,05
	FDG	50.718,96	249.486,66	74.562,57	212,13	4.161,24	1.006,74	380.148,30
	SAV	3.387,51	52.780,95	337.696,56	468,00	15.786,90	535,77	410.655,69
	MAR	17,28	581,40	792,18	43.481,88	4.993,65	198,45	50.064,84
	ZDC	4,50	1.481,13	8.407,53	3.482,73	86.274,99	276,57	99.927,45
	EAU	219,96	1.127,07	428,94	3.401,64	405,00	20.094,57	25.677,18
	Total	147.965,13	388.296,63	429.995,61	51.125,76	111.787,47	22.508,91	1.151.679,51

Superficie stable : 830.651,58 ha (72,13%)

Superficie modifiée : 321.027,93 ha (27,87%)