



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 de Recherche en Foresterie et Environnement

Parcours : Environnement- Territoire et Développement

Promotion : KINGATSA

Année : 2010-2015

**ETUDE DE LA RESILIENCE DES FORETS SECHES DE LA
REGION DU MENABE FACE A LA VARIABILITE DES
PRECIPITATIONS**

Présenté par : **RAMALASON Felana Nantenaina**

Soutenu le : 13 Mai 2015

Devant le jury composé de:

- Président** : RAMAMONJISOA Bruno, *Professeur*
Rapporteur : RAKOTO RATSIMBA Harifidy, *Docteur*
Examinateurs : RAZANAKA Samuel, *Professeur*
RANDRIAMBOAVONJY Jean Chrysostome, *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 de Recherche en Foresterie et Environnement

Parcours : Environnement- Territoire et Développement

Promotion : KINGATSA

Année : 2010-2015



Présenté par : **RAMALASON Felana Nantenaina**

Soutenu le : 13 Mai 2015

Devant le jury composé de:

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



« Aza manahy na inona na
inona ; fa aoka ny fivavahana sy
ny fifonana mbamin'ny fisaorana
no ho entinareo manambara ny
fangatahanareo
amin'Andriamanitra amin'ny
zavatra rehetra »

Filipiana 4 :6

À ma famille

Remerciements

Au terme de ce présent mémoire, je tiens à remercier Dieu tout puissant pour la force, la santé et la persévérance qu'Il m'avait donné durant la réalisation de ce mémoire.

Mes plus profondes gratitude s'adressent également aux personnes suivantes qui ont contribué essentiellement à l'élaboration de ce présent mémoire ainsi qu'à la réussite de la formation d'ingénierat à l'ESSA :

- Pr. RASOARAHONA Jean, Directeur de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques*
- Pr. RAMAMONJISOA Bruno, Chef du département des Eaux et Forêts à l'ESSA, d'avoir accepté de présider la soutenance de ce présent mémoire*
- Aux membres du jury : Pr. RAZANAKA Samuel et Pr. RANDRIAMBOAVONJY Jean Chrysostome d'avoir accepté d'examiner ce travail*
- Dr. RABEMANANJARA Zo Hasina, Chef du parcours Environnement-Territoire et Développement*
- Dr. RAKOTO RATSIMBA Harifidy, encadreur de ce mémoire, de m'avoir permis de traiter ce thème et qui n'a pas hésiter à orienter ce travail durant toute sa réalisation malgré ses diverses occupations*
- Mr. RATOVOSON Arimino Aina Navale, assistant de recherche au sein du Laboratoire SIG, pour les aides et conseils sur les traitements des images*
- La promotion KINGATSA notamment à mes amies Mirana, Malalasoa et Harisolo pour ses précieuses et sincères amitiés*
- La promotion KINGATSA du département des Eaux et Forêts, en particulier à Tantely, Hanitra, Tsiori, Antsa, Amy, Sydonie, Cathucia et à mes collègues du Laboratoire SIG : Ihoby, Herija, Ando, Pierrot, Mahatsangy et Milanto pour leurs aides diverses dans la réalisation de ce présent mémoire*
- Mes parents et mes sœurs, Laingo et Evah, ainsi qu'à toute ma famille surtout à Tonton Rolland et Tantine Sahondra, Nosy et Hery pour l'encouragement et le soutien pendant les cinq années d'étude à l'ESSA*
- Tous les enseignants et personnels administratifs du département des Eaux et Forêts et de l'ESSA*
- Toutes les personnes qui ont contribué de près et de loin à la réalisation de ce mémoire.*

Résumé

La Région Menabe, située dans la partie sud-ouest de Madagascar, constitue l'une des régions contenant une superficie importante de forêts sèches. Ces forêts possèdent des enjeux écologiques, économiques et sociaux dans cette Région. Cependant, cet écosystème forestier, en tant que formations climaciques climatiques dont le facteur déterminant est le climat, est menacé par la tendance de régression de la précipitation depuis les années 1980 dans le Sud de Madagascar. Ce contexte constitue ainsi l'intérêt de l'analyse de la résilience des forêts sèches de cette Région face aux variabilités des précipitations. D'un côté, la résilience des forêts a été évaluée avec les indices de végétations, reflétant leur verdure. Ainsi, une mosaïque de six images *Landsat*, de 30 mètres de résolution, a été utilisée pour ressortir les valeurs des indices de végétations (NDVI, EVI) pour un temps de référence. Trois époques, dont chaque époque est composée de deux saisons (sèche et humide), ont été considérée : 2000/2002, 2007/2008, 2013. De l'autre côté, les précipitations ont été recueillies à partir des images satellites météorologiques à basse résolution (10461m x 11070m). La corrélation entre ces deux types de données de base (indices de végétation – précipitation) est significative à 95% (p-value<0,05). Cette corrélation n'est plus significative au-delà du troisième mois avant l'acquisition de l'image. Par la suite, un modèle théorique des valeurs de chaque indice de végétation, en fonction des précipitations, a été établi. Les valeurs issues de ce modèle ont été comparées avec les valeurs réelles des indices de végétation générées par les images *Landsat* pour déterminer la résilience des forêts. Un changement d'état des forêts suivant les précipitations est constaté au cours des années : la persistance de l'assèchement des forêts en saison sèche et la récupération de la végétation en saison humide. Cette régression des forêts est plus accentuée au niveau des lisières forestières (100 mètres à partir de la limite forestière) par rapport aux noyaux des forêts. Au niveau spatial, les forêts situées au nord de la ville de Morondava sont plus résilientes aux variabilités des précipitations comparées à celles au sud de cette localité. Cette différence de résilience de ces forêts peut être expliquée par la réussite de la restauration forestière dans les forêts au nord de Morondava. En fait, la restauration forestière et l'amélioration de la sécurité alimentaire des populations locales par le développement de l'Agriculture constituent ainsi les mesures d'adaptation aux variabilités climatiques proposées à termes de cette étude. Ces mesures d'adaptation pourraient ainsi conduire à des nouvelles perspectives de recherche et de plan d'action.

Mots clés : Région Menabe, résilience, forêts sèches, précipitation, NDVI, EVI, télédétection, changement climatique

Abstract

The Menabe Region, located in the southwestern part of Madagascar, is one of the Regions with a large dry forest area of the country. This type of forest has ecological, economic and social issues in this Region. However, this forest ecosystem, as climatic climax formations, with climate as determining factor, is threatened by the regression trend of precipitation since the early 80's in southern Madagascar. In this way, this study is focused on the resilience of the dry forests of this Region facing rainfall variability. On one hand, the resilience of forests was evaluated with vegetation indices, reflecting their greenness. Thus, the mosaic of six Landsat images, of 30-meters resolution, has been used to stand out the values of the vegetation indices (NDVI, EVI) for a reference time. Three periods, each period consists on two seasons (dry and wet), have been considered: 2000/2002, 2007/2008, 2013. On the other hand, rainfall values were collected from meteorological satellites to low resolution images (10461m x 11070m). The correlation between these two types of data (indices of vegetation - precipitation) is significant at 95% (p-value< 0.05). This correlation is no longer meaningful beyond the third month before the acquisition of the image. Subsequently, a theoretical model of the values of each vegetation index, based on precipitation, has been established. The values from this model were compared with the actual values of the vegetation indices generated by the Landsat images to determine the forests resilience. A change of state of forests following precipitation is found over the years: the persistence of the drying up of the forests in the dry season and the recovery of vegetation in the wet season. This regression of forests is more pronounced at forest edge level (100m from the tree line) compared to forest core area. At the spatial level, the north parts of Morondava forests are more resilient to the rainfall variability compared with those in the Southern part. This difference in the ability of resilience of these forests can be explained by the success of forest restoration in the northern part of Morondava. In fact, forest restoration and improvement of the food security of local populations through the development of Agriculture are measures to adapt to climate variability proposed under the terms of this study. These adaptation measures could lead to new perspectives for research and action plan.

Key words: Region Menabe, resilience, dry forests, rainfall, NDVI, EVI, remote sensing, climate change

Famintinana

Ny Faritra Menabe, izay hita amin'ny faritra atsimo andrefan'i Madagasikara dia anisan'ireo faritra izay ahitana velarana ala maika anisany lehibe indrindra. Ireo ala amin'ny faritry Menabe ireo dia manana anjara toerana lehibe eo amin'ny lafiny ekolojika sy ara-pihariana ary ara-tsosialy. Indrisy anefa fa io ekôsistema ny ala io, izay miankina be dia be amin'ny toetr'andro dia ahiana ho fongana noho ny fihenan'ny rotsak'orana nanomboka tamin'ny taona 1980 any amin'ny faritra atsimon'i Madagasikara. Izany toe-javatra izany no maneho ny maha-zava-dehibe, ny fikarohana momba ny tohi-belin'ny ala maika manoloana ny fiovaovan'ny rotsak'orana. Amin'ny lafiny iray, ny tohi-belin'ny ala dia azo refesina amin'ny alalan'ny famantarana ny zava-maniry, izay maneho ny fahamaintson'izy ireo. Filaharana sary *Landsat* enina, izay 30 metatra ny fikasany, dia namoka ny sadan'ny famantarana ny zava-maniry (NDVI, EVI) hoan'ny fotoana voatondro iray. Vanim-potoana telo izay misy vanin-taona roa (maina sy mando) no nozahana: 2000/2002, 2007/2008, 2013. Amin'ny lafiny iray kosa anefa dia ny rotsak'orana dia azo avy amin'ny sary avy amin'ny zana-bolana milaza mombamomban'ny toetr'andro, izay ambany ny fikasany (10461m x 11070m). Ny fifandrohizan'ireo antonta roa izay niaingana ireo (famantarana ny zava-maniry - rotsak'orana) dia marina eo amin'ny 95% eo (p-value<0, 05). Io fifandrohizana io dia tsy misy intsony mihoatra ny volana fahatelo alohan'ny nahazoana an'ireo sary azo avy amin'ny zana-bolana ireo. Noho izany dia nanao modely ara-teôria avy amin'ny sandan'ny famantarana ny zava-maniry izay miankina ny rotsak'orana. Io sandan'ny famantarana ny zava-maniry io dia noharina tamin'ny sandan'ny famantarana ny zava-maniry marina avy amin'ny sary *Landsat* mba ahafahana mamantatra ny toetoetry ny ala amin'ny ankapobeny. Hita ary fa misy fiovana ny toetoetry ny ala manaraka ny fiovan'ny rotsak'orana: maharitra ny fahamainan'ny ala amin'ny main-tany ary mihatsara izy amin'ny fahavaratra. Izany fahamainan'ny ala izany dia miha-mitombo eny faritra sisin'ny ala (100 metatra liala ny faritry ny ala farany) mihoatra ny alaanatiny. Eo amin'ny fivelarana dia mahavita miatrika ny fiovaovan'ny rotsak'orana kokoa ny ala any avaratry ny tanàna ny Morondava noho ireo ala any amin'ny faritra atsimon'io tanàna io. Io fahasamiafan'ny toetry ny ala io dia azo hazavaina amin'ny fahatomombanan'ny fanarenana ny ala any amin'io faritra voalaza voalohany io. Eo ampamaranana ity fandinhana ity, ny fanarenana ny ala sy ny fanatsarana ny fahazaoana antoka ara-tsakafo ny olona manodidina ny ala amin'ny alalan'ny fampivoarana ny fambolena sy ny fiompiana dia mety ahafahana miatrika ny fiovaovan'ny toetr'andro. Ireo hevitra fiatrehana naroso ireo noho izany dia manokatra fikarohana sy lamin'asa vaovao.

Teny iditra: Faritra Menabe, tohi-bely, ala maika, rotsak'orana, NDVI, EVI, fijery lavitra, fiovaovan'ny toetr'andro

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract	ii
Famintinana.....	iii
Liste des acronymes et des abréviations	x
Glossaire.....	xi
1. INTRODUCTION.....	1
2. METHODOLOGIE.....	3
2.1. Problématique et hypothèses	3
2.1.1. Problématique.....	3
2.1.2. Hypothèses	5
2.2. Matériels.....	6
2.2.1. Dispositif du milieu d'étude	6
2.2.2. Données de base	11
2.2.3. Cadre théorique de l'étude	13
2.3. Méthodes	16
2.3.1. Etude du régime pluviométrique de la Région dans la période étudiée (2000-2013) ...	16
2.3.2. Prétraitements des images satellites	17
2.3.3. Mosaïque et masque	18
2.3.4. Cartographie des occupations du sol par classification semi-supervisée	18
2.3.5. Validation de la carte forestière.....	19
2.3.6. Cartographie et analyse évolutive des valeurs des indices de végétations	20
2.3.7. Analyse de la corrélation entre les précipitations et les valeurs des indices de végétations.....	20
2.3.8. Elaboration d'un modèle théorique des indices de végétation en fonction des précipitations	21
2.3.9. Validation du modèle théorique	21
2.3.10. Comparaison de valeurs réelles et théoriques	22
2.3.11. Vérification des hypothèses.....	22
2.4. Les limites de l'étude	23

2.5.	Récapitulation de la méthode	24
2.6.	Cadre opératoire	25
3.	RESULTATS	26
3.1.	Régime pluviométrique déterminé à partir des images des précipitations	26
3.1.1.	Répartition spatiale des précipitations dans l'espace	26
3.1.2.	Variabilités des précipitations dans la période étudiée (2000- 2013).....	26
3.2.	Cartographie évolutive de la couverture forestière du Menabe.....	28
3.1.	Validation de la carte forestière.....	30
3.2.	Corrélation entre les précipitations et les valeurs des indices de végétation.....	30
3.3.	Analyse de la résilience spatio-temporelle des forêts sèches du Menabe	31
3.3.1.	Analyse descriptive des valeurs de l'indice de végétation NDVI	31
3.3.2.	Analyse descriptive des valeurs l'indice de végétation EVI	34
3.4.	Etablissement d'un modèle théorique des indices de végétation en forte corrélation avec les précipitations	37
3.4.1.	NDVI.....	37
3.4.2.	EVI	38
3.5.	Analyse de la résilience des forêts sèches	39
3.5.1.	NDVI.....	40
3.5.2.	EVI	41
3.5.3.	Etude de la résilience des forêts sèches de Menabe au niveau spatial	41
3.6.	Effets de la variabilité des précipitations sur les lisières des forêts sèches	43
3.6.1.	NDVI.....	43
3.6.2.	EVI	44
4.	DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS	46
4.1.	Sur la méthodologie	46
4.1.1.	Données météorologiques	46
4.1.2.	Elaboration d'un modèle théorique (indices de végétations- précipitations) et comparaison avec les valeurs réels.....	46
4.2.	Sur les résultats	47
4.2.1.	Evolution de la surface forestière	47
4.2.2.	Corrélation (indices de végétation- précipitation).....	47

4.2.3. Sur la résilience des forêts sèches	48
4.2.4. Etude de la résilience des forêts sèches au niveau spatial	49
4.3. Sur les hypothèses	49
4.3.1. Hypothèse 1 : La verdure des forêts sèches à un mois considéré m n'est plus influencée par les précipitations au-delà des trois précédents mois.....	49
4.3.2. Hypothèse 2 : La résilience des forêts sèches face aux variabilités des précipitations diminue au cours des années.	49
4.3.3. Hypothèse 3 : Les lisières sont plus sensibles aux variabilités des précipitations que les noyaux des forêts.....	50
4.4. Recommandations	50
4.4.1. Renforcer l'adaptation des forêts sèches aux variabilités climatiques	50
4.4.2. Renforcer les capacités d'adaptation des populations locales aux changements d'état des forêts	51
4.4.3. Améliorer le suivi des variabilités climatiques	51
5. CONCLUSION	54
BIBLIOGRAPHIE	55

Liste des annexes

Annexe 1: Carte de localisation de la zone d'étude	I
Annexe 2: Carte hydrographique du Menabe.....	I
Annexe 3: Exemple d'une image satellite météorologique	II
Annexe 4: Détails et caractéristiques des images Landsat utilisées	II
Annexe 5: Répartition spatiale des précipitations	IV
Annexe 6: Carte topographique du Menabe.....	IV
Annexe 7: Détails sur la répartition annuelle des précipitations	V
Annexe 8 : Test de significativité de la tendance des précipitations.....	V
Annexe 9: Carte d'occupation du sol en 2014	VI
Annexe 10: Tableau récapitulatif sur l'évolution des indices de végétations réels et théoriques suivant les variabilités des précipitations.....	VI

Liste des tableaux

Tableau 1: Données climatiques obtenues à partir de la moyenne sur 30 ans (1961-1990).....	6
Tableau 2: Données climatiques obtenues à partir de la moyenne sur 14 ans (2000-2013).....	7
Tableau 3: Evolution de la surface forestière de la Région Menabe (ONE, et al., 2013)	10
Tableau 4: Liste des images <i>Landsat</i> utilisées	13
Tableau 5: Domaine spectrale des images <i>Landsat</i> selon les capteurs	14
Tableau 6: Cadre opératoire de la méthodologie.....	25
Tableau 7: Evolution de la superficie forestière (2000-2007-2014)	28
Tableau 8: Matrice de confusion.....	30
Tableau 9: Matrice de corrélation entre précipitations et indices de végétation	30
Tableau 10: Matrice de corrélation entre précipitations cumulées et indices de végétation	31
Tableau 11: Moyennes et écart-types des valeurs de NDVI de la forêt de Menabe.....	32
Tableau 12: Moyennes et écart-types des valeurs de l'indice EVI de la forêt de Menabe	34
Tableau 13: Comparaison des résultats sur l'évolution de la superficie avec les autres études	47

Liste des figures

Figure 1:Diagramme climatique de la région de Morondava (1961-1990).....	7
Figure 2: Courbe ombrothermique de la région de Morondava (2000-2013)	8
Figure 3: Courbe de réflectance d'une végétation verte photosynthétique et d'une végétation sèche ainsi que d'un sol (CLARK, 2003)	14
Figure 4: Récapitulation de la méthode.....	24
Figure 5:Variation annuelle de la précipitation totale annuelle (2000-2013).....	27
Figure 6: Indices et tendances pluviométriques (2000-2013)	27
Figure 8: Evolution de la valeur moyenne de NDVI de la forêt en saison sèche	32

Figure 7: Evolution de la valeur moyenne de NDVI de la forêt en saison humide	32
Figure 9: Evolution de la valeur moyenne de l'indice EVI de la forêt en saison humide	34
Figure 10: Evolution de la valeur moyenne de l'indice EVI de la forêt en saison sèche	34
Figure 11: Graphique des résidus de NDVI	38
Figure 12: Graphique des résidus de EVI	39
Figure 13: Evolution des indices de végétation observés et estimés suivant les variabilités des précipitations	39
Figure 14: Evolution de la moyenne et la variation de l'écart entre NDVI observé et NDVI théorique en saison humide	40
Figure 15: Evolution de la moyenne et la variation de l'écart entre NDVI observé et NDVI théorique en saison sèche	40
Figure 16: Evolution de la moyenne et la variation de l'écart entre EVI observé et EVI théorique en saison humide	41
Figure 17: Evolution de la moyenne et la variation de l'écart entre EVI observé et EVI théorique en saison sèche	41
Figure 18: Comparaison de la variation des écarts (NDVI réels –NDVI théoriques) de l'époque 1 en saison sèche entre lisière et noyau	43
Figure 19: Comparaison de la variation des écarts (NDVI réels –NDVI théoriques) de l'époque 2 en saison sèche entre lisière et noyau	43
Figure 20: Comparaison de la variation des écarts (NDVI réels –NDVI théoriques) de l'époque 3 en saison sèche entre lisière et noyau	43
Figure 21: Comparaison de la variation des écarts (NDVI réels –NDVI théoriques) de l'époque 1 en saison humide entre lisière et noyau	44
Figure 22: Comparaison de la variation des écarts (NDVI réels –NDVI théoriques) de l'époque 2 en saison humide entre lisière et noyau	44
Figure 23: Comparaison de la variation des écarts (NDVI réels –NDVI théoriques) de l'époque 3 en saison humide entre lisière et noyau	44
Figure 24: Comparaison de la variation des écarts (EVI réels –EVI théoriques) de l'époque 1 en saison sèche entre lisière et noyau	45
Figure 25: Comparaison de la variation des écarts (EVI réels –EVI théoriques) de l'époque 2 en saison sèche entre lisière et noyau	45
Figure 26: Comparaison de la variation des écarts (EVI réels –EVI théoriques) de l'époque 3 en saison sèche entre lisière et noyau	45
Figure 27: Comparaison de la variation des écarts (EVI réels –EVI théoriques) de l'époque 1 en saison humide entre lisière et noyau	45
Figure 28: Comparaison de la variation des écarts (EVI réels –EVI théoriques) de l'époque 2 en saison humide entre lisière et noyau	45

Liste des équations

Équation 1: Formule de l'indice de végétation NDVI	15
Équation 2: Formule de l'indice de végétation EVI	15
Équation 3: Formule de l'indice de Kappa	19
Équation 4: Equation de régression de NDVI en fonction des précipitations	37
Équation 5:Equation de régression de l'indice EVI en fonction des précipitations	38

Liste des cartes

Carte 1 : Carte bioclimatique (CORNET, 1974) et hydrographique de la Région de Menabe	9
Carte 2: Composition des scènes d'images utilisées	12
Carte 3: Carte de répartition des précipitations	26
Carte 4:Carte de l'évolution de la surface forestière du Menabe (2000 -2007 et 2014)	29
Carte 5: Carte évolutive des valeurs de l'indice NDVI.....	33
Carte 6: Carte évolutive des valeurs de l'indice EVI	36
Carte 7: Carte de résilience des forêts du Menabe par analyse de l'indice NDVI	42
Carte 8:Carte de résilience des forêts du Menabe par analyse de l'indice EVI.....	42

Liste des acronymes et des abréviations

AMCOW	: African Mnisters' Council on Water
CCT	: CCT Centre Canadien de Télédetection
CI	: Conservation International
CNFEREF	: Centre National de Formation, d'Etude et de Recherche en Environnement et Foresterie
CO ₂	: Dioxyde de carbone
CREAM	: Centre de Recherches, d'Etudes et d'Appui à l'Analyse Economique à Madagascar
D	: Déficit hydrique
DGEF	: Direction Générale des Eaux et Forêts
DGM	: Direction Générale de la Météorologie
ENVI	: Environmental for Visualizing Image
ETM +	: Enhanced Thematic Mapper
EVI	: Enhanced Vegetation Index
FAO	: Food and Agricultural Organization
FTM	: Foiben-Taotsarintanin'i Madagasikara
GIEC	: Group of Intergovernmental Experts on Climate
ISODATA	: Iterated Self-Organizing Data Analysis Technics
Landsat	: Land Satellite
MAEP	: Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NDVI	: Normalized Difference Vegetation Index
NIR	: NEAR INFRARED/ PIR : PROCHE INFRA-ROUGE
OLI	: Operational Land Imager
OMM	: Organisation Météorologique Mondiale
ONE	: OFFICE NATIONAL POUR L'ENVIRONNEMENT
ORSTOM	: Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
R	: Red
r	: Coefficient de corrélation
r ²	: COEFFICIENT DE DÉTERMINATION
ROI	: Region Of interrest
SIG	: Système d'Information Géographiques
SWIR	: Short-wave Infrared
TAFA	: TAny sy FAmpandrosoana
Tm	: Température minimale
TM	: Themtatic Mapper
USGS	: United States Geological Survey
WWF	: World Wildlife Fund

Glossaire

Forêt sèche : peuplement fermé avec des arbres et arbustes atteignant diverses hauteurs mais généralement de taille moins élevée que pour les forêts humides et que la plupart des arbres des étages supérieurs perdent leurs feuilles une partie de l'année (pendant la saison sèche), le sous-bois étant sempervirent ou décidus. (LETOUZEY, 1982)

Résilience : aptitude d'un système social ou écologique à résister aux effets d'un aléa (climatique), à les absorber, à s'y adapter et à s'en remettre d'une manière rapide et efficace, tout en conservant la même structure de base et le même mode de fonctionnement. Cela traduit la quantité de changement qu'un système peut subir, dans quelle mesure il peut être restructuré et à quel point il peut renforcer ses capacités à apprendre et à s'adapter. (AMCOW, 2013)

Adaptation : processus d'ajustement des systèmes écologique, social, et économique à un risque constaté ou anticipé, à ses effets et impacts. Il désigne un changement de procédures, de pratiques et de structures visant à limiter ou effacer les dommages potentiels ou à tirer bénéfice des opportunités créées par le changement climatique. (GIEC, 2001)

Changement climatique : toute évolution du climat dans le temps, qu'elle soit due à la variabilité naturelle ou aux activités humaines. Cet usage est différent de celui de la Convention-cadre sur le changement climatique pour laquelle le changement climatique désigne un changement climatique attribué directement ou indirectement aux activités humaines qui modifient la composition de l'atmosphère mondiale, et s'ajoutant à la variabilité climatique naturelle observée sur des périodes de temps comparables. (GIEC, 2007)

Variabilité climatique : variations de l'état moyen du climat à toutes les échelles temporelles et spatiales au-delà de celui des événements climatiques particuliers. Des exemples de variabilité climatiques incluent les sécheresses prolongées, les inondations et les conditions qui émanent des événements périodiques El Nino et La Nina. (USAID, 2007)

Télédétection : 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 (*Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale*, 1988). C'est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information. (CCT, 2001)

SIG : outil informatisé capable de créer, transformer, afficher, analyser et stocker de l'information géographique. Il permet d'organiser et de présenter des données alphanumériques spatialement référencées, en vue notamment de produire des plans et cartes. (CHRISTINE, 2013)

Précipitation : ensemble des eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression. (EPFL, 2013)

Pluviométrie : instrument de base de la mesure des liquides ou solides. Il indique la quantité d'eau totale précipitée et recueillie à l'intérieur d'une surface calibrée dans un intervalle de temps séparant deux relevés. (EPFL, 2013)

Climax : association stable d'espèces qui caractérise qualitativement et quantitativement l'ultime phase de développement d'une biocénose dans une succession. (RAMADE, 1984)

Résolution spatiale : taille réelle (en m², ha...) du plus petit élément représenté dans un jeu de données. (UVED, 2013)

Luminance : seule grandeur photométrique perçue par l'œil humain. Elle correspond à la sensation visuelle de luminosité causée par la surface des objets présents dans le champ visuel (objets éclairés). (PAULE, 2003)

Réflectance : également nommée « facteur de réflexion », est la proportion de lumière réfléchie par la surface d'un matériau. Elle est donc un rapport entre le flux lumineux réfléchi et le flux lumineux incident. (NICODEMUS *et al.*, 1977)

Introduction

1. INTRODUCTION

Le couvert forestier mondial est un indicateur clé de l'état de santé de notre planète (LARSEN, 2003). En effet, la plupart des forêts actuelles ne sont plus dans leur état originel, ayant subies des modifications fondamentales de composition et de qualité (FAO, 2005). Parmi ces modifications, le changement climatique est une réalité incontournable accentuée par les activités anthropiques engendrant ainsi le changement de paysage et en grande partie la disparition de la couverture forestière. A l'échelle mondiale, dans les années 2000-2010, la perte nette de la superficie forestière s'élève à 5,2 millions d'hectares par an (EMILY, 2012). En 2010, la couverture forestière mondiale est de 4.033 millions d'hectares, constituant environ un tiers de la superficie terrestre du globe à part l'Antarctique et le Groeland (FAO, 2001). Une forêt naturelle, non dégradée ou intacte, rend de nombreux services comme le recyclage des nutriments, la régulation du climat, la stabilisation des sols, le recyclage des déchets, la création d'habitats naturels et même une pléiade de loisirs en plein air, constituant ainsi 10% du produit mondial brut (LARSEN, 2003). Les forêts fournissent aussi des biens, entre autres, les nourritures, les médicaments, les bois d'œuvres, les bois de chauffe et les bois de constructions,... Les forêts primaires couvrent 36,4% de la totalité de la surface forestière dans le monde et 52,7 % constituent des forêts naturelles modifiées (FAO, 2005). Les forêts primaires ou intactes sont principalement composée d'espèces indigènes, sans trace visible d'activité humaine tandis que les forêts naturelles modifiées, des espèces indigènes, avec des traces d'activités humaines et une régénération naturelle.

Ainsi, la majorité des forêts du monde subissent d'une part des modifications d'origine anthropique et d'autre part des changements du climat. Selon le rapport du GIEC durant le sommet de Copenhague, en 2009, le changement climatique se manifeste très probablement par l'augmentation en fréquence et en intensité des évènements climatiques hors normes, qui semble commencer à se faire sentir : cyclones, sécheresses, fortes précipitations, vagues de chaleurs, crues. Les divers écosystèmes du monde sont alors exposés à ces évènements climatiques et peuvent subir encore plus de modifications. Les écosystèmes des régions semi-arides sont très sensibles aux variations de précipitations et peuvent affecter la productivité de la végétation et la survie des plantes. (HULME, 2005)

A Madagascar, les forêts épineuses et les forêts sèches restent les plus menacées par rapport aux forêts humides (ONE, et al., 2013). Ces types de forêts sont rencontrés notamment dans la partie Sud-Ouest de l'île. Dans cette région, plus particulièrement dans la Région de Menabe, la population riveraine des forêts sèches dépende beaucoup des produits forestiers. Les ressources naturelles sont une importance vitale car 80% de l'alimentation des riverains proviennent du milieu naturel (RANDRIANASOLO, 2012). Ces forêts abritent aussi un grand nombre de biodiversité qui possèdent des enjeux écologiques et économiques essentielles. En fait, les forêts sèches sont des formations climaciques climatiques dont le facteur déterminant est le climat (BLASER & RAKOTOMANANA, 1990). Or, la tendance de la précipitation depuis les années 1980 dans le Sud de Madagascar est à la baisse (WWF, 2010). C'est dans ce cadre que cette étude développera ainsi une analyse de la

résilience des forêts sèches face aux variabilités des précipitations dans la Région du Menabe. En fait, cette étude part de la question de recherche suivante : Comment les forêts sèches réagissent-elles vis-à-vis des variabilités des précipitations ?

Pour bien mener cette recherche, trois hypothèses ont été posées. La première évoque d'abord la relation entre les précipitations et la verdure des forêts sèches : La verdure des forêts sèches à un mois considéré n'est plus influencée par les précipitations au-delà des trois précédents mois. La deuxième hypothèse affirme que la résilience des forêts sèches face aux variabilités des précipitations diminue au cours des années. Et enfin la troisième hypothèse stipule que les lisières sont plus sensibles aux variabilités des précipitations que les noyaux des forêts. Une analyse des corrélations entre les précipitations mensuelles et les précipitations cumulées à partir du mois d'acquisition de l'image considérée, une comparaison des valeurs des indices de végétations théoriques en fonction des précipitations et celles des indices de végétations réels des forêts sèches au cours des années et puis, en particulier les lisières et les noyaux des forêts ont permis ainsi de vérifier les hypothèses avancées précédemment.

Par conséquent, ce présent travail a été subdivisé en trois grandes parties : en premier la méthodologie comportant la problématique et les hypothèses de recherche suivie des matériels et méthodes utilisés, en second lieu les résultats et ensuite, les discussions et recommandations permettant de valoriser les résultats de la recherche. En dernier lieu, une conclusion sera avancée.

Méthodologie

2. METHODOLOGIE

2.1. Problématique et hypothèses

2.1.1. Problématique

La variabilité des pluies est un paramètre bioclimatique très important qui ne peut être sous-estimé dans les zones arides. La végétation naturelle est affectée par la variabilité pluviométrique dans sa composition et dans sa structure, dans l'adaptation morphologique et écophysiologique des espèces qui la composent. La production primaire de la végétation naturelle pourrait aussi être affectée par cette variabilité. (HOUEROU, 1992)

Les changements climatiques peuvent aussi avoir de nombreuses répercussions, plus ou moins complexes, sur les forêts des différentes régions bioclimatiques. L'augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂, l'augmentation des températures, les modifications des précipitations, les inondations, les sécheresses fréquentes et de plus longues durées auront des effets significatifs sur la croissance des arbres et des forêts. Outre, ces changements climatiques auront aussi des conséquences associées aux perturbations biotiques (la fréquence et les conséquences de l'apparition de maladies et des insectes nuisibles) et abiotiques (occurrence des feux, fréquence et intensité du vent) avec des fortes implications pour les écosystèmes forestiers. (LINDNER *et al.*, 2010)

Les principaux facteurs déterminants du climat d'une région donnée sont les précipitations et la température. En effet, l'irrégularité des pluies notamment dans les zones arides influence la production végétale puisque l'eau est l'un des principaux intrants de la photosynthèse. Avec la raréfaction des précipitations annuelles, le couvert végétal devient progressivement plus mince et plus clairsemé. De par cela, les plantes et les animaux des zones arides répondent par différentes adaptations physiologiques, anatomiques et comportementales face aux contraintes d'humidité et de température. Ainsi, il existe une étroite corrélation entre les précipitations et la biomasse. (OMM, 2005)

Le suivi de la phénologie des espèces végétales permet de savoir sur l'état de santé des végétations dans un écosystème donné. En fait, la phénologie végétale est l'étude scientifique des variations saisonnières, de la croissance et du développement des plantes, d'après Fritz Schnelle en 1955, fondateur du grand réseau d'observation phénologique du service météorologique allemand. (VOGEL, 2005)

La Réserve Spéciale de Bezà Mahafaly, constituée de forêt-galerie et xérophytique se situant dans le Sud-Ouest de Madagascar avec un climat semi-aride, a déjà fait objet d'étude sur l'influence de la variabilité des précipitations sur la phénologie des plantes. Cette étude s'est basée sur les suivis phénologiques effectués entre 2005 et 2011. Les résultats stipulent ainsi que les espèces présentant une grande variabilité interannuelle durant la feuillaison sont les plus vulnérables à la variabilité des précipitations. En effet, en une année, les espèces à feuilles décidues suivent un rythme saisonnier,

feuilles abondantes en saisons humide et absentes en saison sèche. Les arbres feuillés sont plus nombreux durant les précipitations abondantes. (RASAMIMANANANA *et al.*, 2012)

Pour des zones ayant fait objet de suivi phénologique comme celles de la Réserve Spéciale de Bezà Mahafaly, l'étude du comportement des végétations est plus facile. Cependant, les régions n'ayant pas de données phénologiques antérieures sont sujettes à cette étude du comportement végétal grâce aux indices de végétation associés à l'intensité de vert issus de la télédétection spatiale (CHUVIECO, 1998). L'indice de végétation normalisé est un outil standard de description du comportement spectral de la couverture végétale (ROUSE *et al.*, 1974). Cet indice, le plus souvent appelé « NDVI » selon son abréviation anglaise, est calculé à partir de deux bandes spectrales, le rouge et l'infrarouge. En effet, le couvert végétal absorbe préférentiellement l'énergie lumineuse dans les longueurs d'onde du rouge pour la photosynthèse et réfléchit par contre fortement cette énergie dans le proche infrarouge, en fonction de la structure intercellulaire du matériel végétal photosynthétisant (GAUSMAN, 1985). L'indice de végétation est une mesure du bilan entre l'énergie reçue et l'énergie émise par les objets sur la Terre. Lorsqu'il est appliqué à des communautés végétales, cet indice établit une valeur mesurant l'intensité de vert d'une zone donnée, c'est-à-dire indiquant la masse de végétation présente dans celle-ci, ainsi que son état de santé ou sa vigueur de croissance. Les indices de végétations utilisées (NDVI et EVI) dans cette présente étude sont des indices dimensions, aussi leurs valeurs sont-elles comprises entre -1 et +1. Dans la pratique, les valeurs situées en dessous de 0,1 correspondent aux étendues d'eaux et aux sols nus, tandis que les valeurs plus élevées indiquent une forte activité de photosynthèse, propre aux terres arbustives, aux forêts tempérées, aux forêts humides et terres agricoles. (MENESES-TOVAR, 2011)

Une autre étude sur les forêts de la région Anosy, avec un climat chaude et aride, sur le comportement des différents types de forêts face aux variabilités des précipitations affirme la corrélation entre les indices de végétations analysées et les précipitations. La pluviométrie joue un rôle primordial dans la physiologie des forêts surtout des forêts sèches et des forêts de transitions. L'état des forêts sèches et des forêts de transition varient non seulement à l'échelle annuelle mais aussi à l'échelle saisonnière impliquant un niveau d'adaptation élevé de ces forêts. Cependant, après l'élaboration d'un modèle théorique, les résultats affirment un signe de diminution du niveau d'adaptation de la forêt. Dans cette étude, les données climatiques utilisées étaient issus de diverses stations météorologiques de la partie Sud-Est de Madagascar. (RAKOTO, 2011)

La présente étude vise à analyser la résilience des forêts sèches dans la partie Sud-Ouest dans la région de Menabe en utilisant les valeurs de deux indices de végétations (NDVI et EVI) à partir des traitements d'images satellites du type *Landsat* et des cartes évolutives des précipitations en 2001/2002, 2007/2008 et 2014. En fait, cette région comporte l'une des plus grandes superficies de forêt sèche à Madagascar. Cependant, les forêts sèches font parties des écosystèmes les plus menacés par rapport aux forêts humides. De plus, en termes de déforestation, c'est l'une des régions les plus

touchées en ayant perdu d'importante couverture forestière en seulement cinq ans (26 000ha entre 2005 et 2010) (ONE *et al.*, 2013). Ainsi, cette étude se focalisera afin de parvenir à une réponse à la question suivante : Comment les forêts sèches réagissent-elles vis-à-vis des variabilités des précipitations ?

2.1.2.Hypothèses

Pour mener cette étude, les hypothèses ci-après sont émises :

- **Hypothèse 1 : La verdure des forêts sèches à un mois considéré m n'est plus influencée par les précipitations au-delà des trois précédents mois.** La verdure des forêts sèches a été déterminée à partir des indices de végétation (NDVI et EVI). En fait, les indices de végétation fournissent des valeurs estimées de « l'intensité de vert » des forêts, résultant de l'analyse de données satellitaires (MENESES-TOVAR, 2011). Or, plus une végétation est verte, plus elle contient des chlorophylles¹. Or, ces chlorophylles permettent aux végétations d'effectuer la photosynthèse qui est leurs principales sources de vie. Ainsi, si les indices de végétations sont proches de 1, les activités chlorophylliennes sont meilleures et la végétation est plus verte. Tandis que si les indices de végétation s'approchent de 0, la plante connaît une perte de verdure ou une perte en eau et les activités chlorophylliennes sont faibles (COMIC, 2008). Les forêts sèches connaissent ainsi une dégradation interne de la plante. Une étude de corrélation entre ces indices de végétation et les précipitations du mois m , $m-1$, $m-2$, $m-3$, $m-4$, $m-5$, $m-6, m-7$, $m-8$, $m-9$ et $m-10$ permet de vérifier si cette hypothèse est acceptable ou non. En fait, cette hypothèse permet de définir les précipitations pouvant être utilisées pour vérifier les hypothèses 2 et 3 avec l'établissement d'un modèle théorique.
- **Hypothèse 2 : La résilience des forêts sèches vis-à-vis des variabilités des précipitations diminue au cours des années.** Cette résilience des forêts a été déterminée en utilisant la « méthode de résidus ». Cette méthode consiste à comparer les valeurs des indices de végétations théoriques issues des précipitations et celles observées obtenues des images *Landsat* (HERRMANN *et al.*, 2005). Si les valeurs théoriques sont supérieures aux valeurs observées, les forêts perdent leurs verdure et leurs résiliences face aux variabilités des précipitations diminuent. Dans le cas contraire, les forêts gagnent de la verdure et elles sont plus résistantes à ces variabilités. Si, ces deux valeurs sont égales, la résilience des forêts est stable. Ce dernier cas présente une très faible probabilité de se produire.
- **Hypothèse 3 : Les lisières sont plus sensibles aux variabilités des précipitations que les noyaux des forêts.** La lisière se définit comme une zone de transition de deux milieux différents, dont l'un est souvent une forêt. Ainsi, les activités photosynthétiques en lisière et en pleine forêt peuvent être très différentes et déterminent leur résilience vis-à-vis des variabilités climatiques notamment des précipitations. La comparaison des résidus (indices réels- indices théoriques) des lisières et des noyaux forestiers permettent de vérifier cette hypothèse.

¹ pigment responsable végétal responsable de la coloration verte des plantes.

2.2. Matériaux

2.2.1. Dispositif du milieu d'étude

2.2.1.1. Cadre physique

a) Localisation géographique et administrative

L'écosystème forestier de la Région du Menabe constitue la zone d'étude dans ce présent travail.

Localisée dans la partie Sud-ouest de Madagascar, elle s'étend sur 46 121 km².

Géographiquement, Menabe se situe entre les coordonnées géographiques suivantes :

- au Nord-ouest à 19° 10' 30,428" de latitude Sud et à 44° 17' 3,458" de longitude Est
- au Nord-est : 18° 19' 43.046" de latitude Sud et à 45° 36' 2.951" de longitude Est
- au Sud-est : 20° 54' 43.502" de latitude Sud et à 45° 44' 49.38" de longitude Est
- au Sud-ouest : 21° 26' 23.136" de latitude Sud et à 43° 26' 17.858" de longitude Est

Administrativement, la Région est délimitée (Annexe 1) :

- au Nord par la région de Melaky ;
- à l'Est par les régions de Bongolava, Vakinankaratra et Amoron'i Mania ;
- au Sud par la Région Atsimo Andrefana ;
- et à l'Ouest par le Canal De Mozambique.

b) Climat

La Région se caractérise par un climat tropical semi-aride à courte saison de pluies (CREAM, 2013).

Généralement, la détermination du climat d'une région se fait à partir d'une série de données climatiques de 30 ans. Cependant, les données climatiques des trente dernières années ne sont pas disponibles. Ainsi, le climat de la Région a été déterminé à partir des données climatiques sur 30 ans (1961-1990) d'une part et sur 13 ans (2000-2013) d'autre part.

❖ Climat déterminé à partir des données climatiques sur 30 ans (1961-1990)

La précipitation annuelle est assez faible, de 784,6 mm, répartie irrégulièrement durant toute l'année.

Le mois de Janvier est le mois le plus pluvieux tandis que le mois d'Août est le plus sec. (Tableau 1)

En termes de température, la Région fait partie des régions chaudes avec une température moyenne annuelle de 25,07 °C. Le mois le plus chaud est le mois de Janvier et le plus froid, le mois de Juillet. (Tableau 1)

Tableau 1: Données climatiques obtenues à partir de la moyenne sur 30 ans (1961-1990)

Mois	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	
Tmoy en °C	21,5	22,2	23,7	25,4	26,6	27,4	27,6	27,5	27,4	26,2	23,7	21,7	25,07
Pmoy en mm	2,3	2,2	2,6	11,9	20,6	183,3	241,6	200	89,5	16,8	11,4	2,4	784,6

Source : Service météorologique Ampandrianomby

Ainsi, le climat de cette Région est du type tropical chaud et subaride (KOECHLIN , et al., 1974).

A partir de ces données climatiques de la Station de Morondava, le diagramme climatique d'après les techniques de Walter et Lieth a été établi. D'après WALTER & LIETH, 1967,

- un mois est écologiquement sec si la précipitation (P), en millimètres, est inférieure au double de la température (T), en degré Celsius : $P < 2T$;
- un mois est humide quand la précipitation est supérieure ou égale au double de la température $P \geq 2T$

Le diagramme climatique de la région de Morondava, établie à partir des données climatiques sur 30 ans (1961-1990) indique la présence de 2 saisons climatiques bien distinctes :

- une saison chaude et pluvieuse ou saison humide, vers la fin du mois de Novembre à Mars (4 mois)
- une saison moins chaude et très sèche ou saison sèche, d'Avril jusqu'en fin Novembre (8 mois)

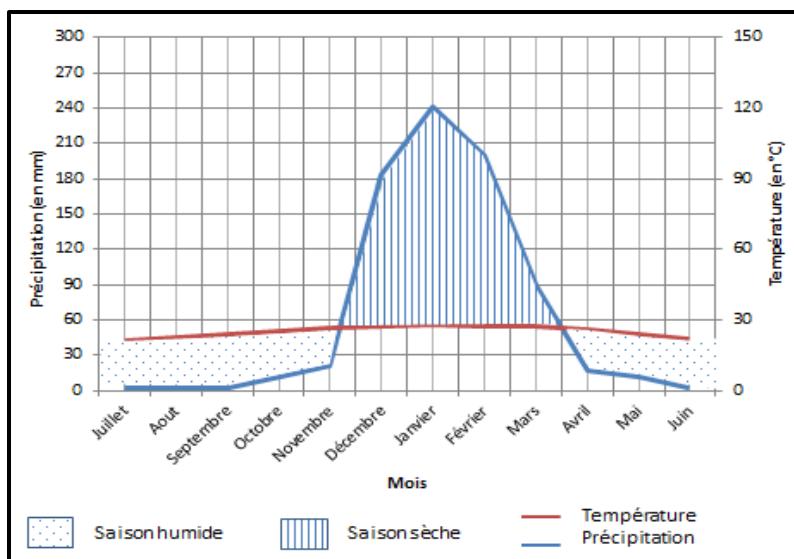


Figure 1:Diagramme climatique de la région de Morondava (1961-1990)

Source : Service météorologique Ampandrianomby

❖ *Changement du climat observé durant les dernières décennies (2000-2013)*

Cependant, le climat connaît un certain changement ces dernières décennies. En effet, la précipitation moyenne annuelle calculée sur ces 13 années est de 908,8 mm et la température est de 25,2°C:

Tableau 2: Données climatiques obtenues à partir de la moyenne sur 14 ans (2000-2013)

Mois	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	
Tmoy en °C	22.2	22.6	24.0	25.8	26.8	26.9	26.8	27.0	27.0	26.0	24.5	22.9	25.2
Pmoy en mm	0.6	0.6	0.9	24.9	57.0	84.6	172.5	234.1	188.2	111.0	24.4	10.0	908.8

Source : Service de la Météorologie, 2014

Ces données climatiques ont été recueillies à partir des images satellites des précipitations et des températures qui ont été ensuite calibrées par rapport aux données de la direction générale de la météorologie à Madagascar. En effet, elles constituent la base de cette présente étude.

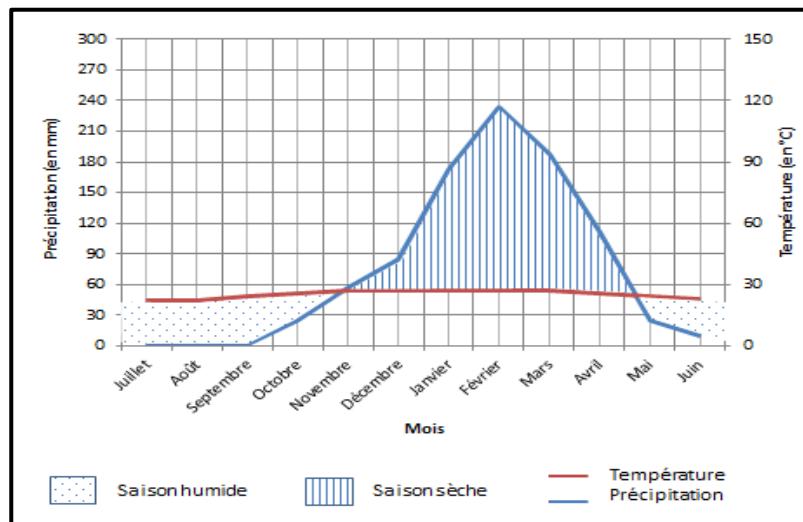


Figure 2: Courbe ombrothermique de la région de Morondava (2000-2013)

Source : *Service de la Météorologie, 2014*

A partir de la courbe ombrothermique calculée sur les années d'études (2000-2013), le climat de la région Menabe évoque deux saisons :

- une saison chaude et pluvieuse ou saison humide, vers mi-Novembre à début du mois de Mai (5 mois)
- une saison moins chaude et très sèche ou saison sèche, de Mai jusqu'à mi-Novembre (7 mois)

Ainsi, quelques changements sont observables en comparant la courbe ombrothermique sur 30 ans (1961-1990) et celle sur 13 ans (2000-2013). La précipitation moyenne annuelle sur 13 ans est plus élevée que celle sur 30 ans, avec une différence de 124,2 mm. Outre, la saison chaude et pluvieuse est plus prolongée. Le mois le plus pluvieux était auparavant le mois de Janvier. Cependant, sur la moyenne entre 2000 et 2013, le mois de Février devient le plus pluvieux.

En termes de température, la température moyenne annuelle connaît une élévation de 0,13°C. Le mois le plus chaud était le Janvier tandis que sur la moyenne de 13 ans, le mois de Février et Mars deviennent les plus chauds.

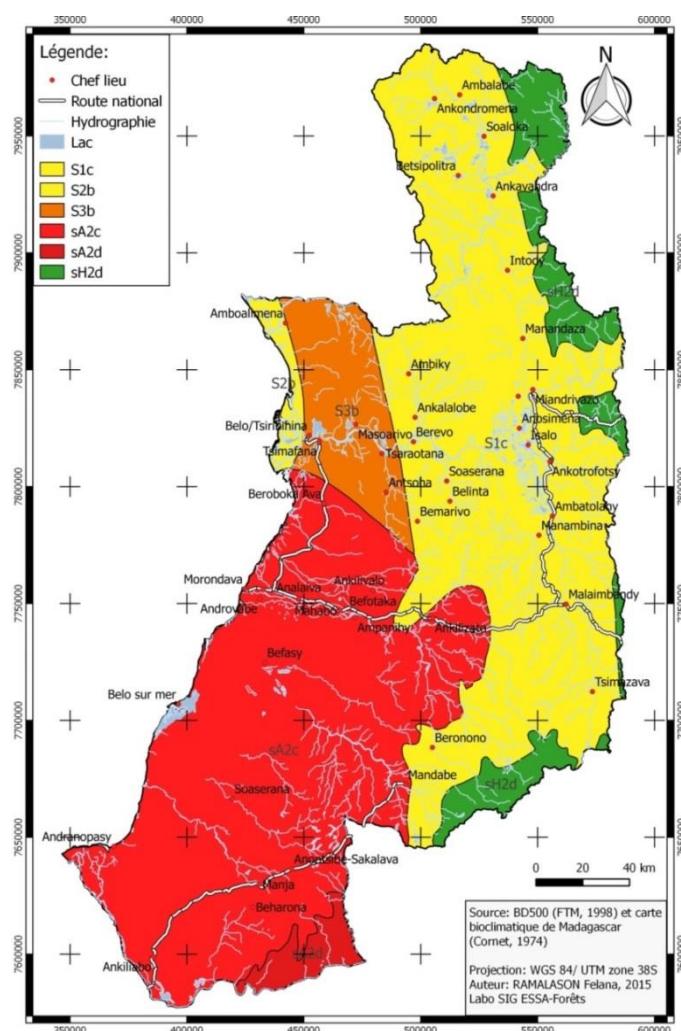
En effet, l'étude du climat de la Région permet de connaître la limite de la saison sèche et de la saison humide afin d'ajuster les mois d'acquisition des images *Landsat* pour chaque saison.

c) Région bioclimatique

Un essai de cartographie bioclimatique évoque une classification climatique en relation avec la formation végétale en faisant appel au déficit hydrique cumulé sur la saison sèche à Madagascar. Ainsi, les critères de classification sont le déficit hydrique cumulé et la température moyenne du mois le plus froid. (Cornet, 1974)

Le Menabe comprend une diversité de bioclimat divisé en étage selon le déficit hydrique et en sous-étage suivant la température minimale (Carte 2). Par conséquent, il est constitué de trois principaux étages bien distincts :

- étage subhumide : sH2d : $10^{\circ}\text{C} < \text{Tm} < 13^{\circ}\text{C}$ / sous étage à saison sèche non atténuée
 - étage sec :
 - S1c : $13^{\circ}\text{C} < \text{Tm} < 16^{\circ}\text{C}$ / $300 < \text{D} < 400\text{mm}$
 - S2b : $16^{\circ}\text{C} < \text{Tm} < 18^{\circ}\text{C}$ / $400 < \text{D} < 700\text{mm}$
 - S3b : $16^{\circ}\text{C} < \text{Tm} < 18^{\circ}\text{C}$ / $\text{D} < 700\text{mm}$
 - étage subaride :
 - sA2c : $13^{\circ}\text{C} < \text{Tm} < 16^{\circ}\text{C}$ / $400 < \text{D} < 700\text{mm}$
 - sA2d : $10^{\circ}\text{C} < \text{Tm} < 13^{\circ}\text{C}$ / $400 < \text{D} < 700\text{mm}$



Carte 1 : Carte bioclimatique (CORNÉT, 1974) et hydrographique de la Région de Menabe

La carte 1 a été recueillie sous forme de fichier d'échange (.e00 ArcInfo) dans le site web suivant : www.mobot.org/ (SCHATZ & LESCOT, 2003).

d) Hydrographie

La Région est caractérisée par une faible ressource hydrologique superficielle et en rivières pérennes (SALOMON, 1987). Cependant, elle dispose d'une énorme potentialité hydraulique en eaux de surfaces et de profondeur. C'est la particularité des cours d'eau de cette zone. Deux types de cours d'eau peuvent être ainsi rencontrés (Annexe 2):

- les cours d'eau permanents ou grandes fleuves : Tsiribihina, Mangoky, Maharivo, Mandraotra et Kabatomena.
- les cours d'eau temporaire ou saisonniers appelés aussi oueds qui ne coulent que durant les saisons pluvieuses : Sakay, Tomitsy, Andrangory, une partie de l'Andranomena, Kirindy.

2.2.1.2. Cadre biologique : Ecosystèmes et biodiversité

a) Forêt sèche

La région du Menabe dispose d'une végétation forestière originelle, une forêt dense sèche caducifoliée ou forêt tropophile de l'Ouest (DGEF, 1996). En effet, c'est un peuplement fermé pluristratifié dont la strature est moins élevée par rapport à celles des forêts dense humide. La majorité des arbres de strate supérieures perdent leurs feuilles tandis que le sous-bois est sempervirent, soit décidu. La forêt dense sèche constitue le climax de tout le domaine phytogéographique de l'Ouest. (KOECHLIN & GUILLAUMET, 1971). Ainsi, en 1974, ces forêts sont désignées comme étant une « flore sous le vent ». (KOECHLIN *et al.*, 1974)

Cette formation forestière de l'Ouest est très particulière avec peu d'espèces communes à celle des forêts du versant oriental. Elle est caractérisée principalement de *Dalbergia spp.*, *Commiphora spp.*, *Cedrelopsis grevei* et *Hidegardia spp.*

La superficie forestière du Menabe ne cesse de diminuer au cours des années avec la déforestation. Le tableau 3 illustre l'évolution de la surface des forêts naturelles, n'incluant pas les forêts dégradées, dans la Région :

Tableau 3: Evolution de la surface forestière de la Région Menabe (ONE, et al., 2013)

Année	1990	2000	2005	2010
Superficie forestière (en ha)	941 852	888 059	861 059	835 229

Source : (ONE et al., 2013)

Parmi la surface forestière totale de la Région, 10% constituent des aires protégées (CREAM, 2013).

b) Faune

Les forêts sèches de l'Ouest abritent un grand nombre d'espèces faunistiques rares et dont l'aire de distribution est régionale, telles que :

- des espèces de mammifères : *Cryptoprocta ferox* qui est le plus grand carnivore de Madagascar, *Mungotictis decemlineata* à l'allure d'un écureuil, des espèces de lémuriens nocturnes et diurnes comme *Eulemur rufus*, *Propithecus verreauxi*, *Microcebus berthae*, *Microcebus murinus*,... des rongeurs, plus particulièrement *Hypogeomys antimena*.
- des espèces de reptiles : *Leioheterodon madagascariensis* (serpent), *Furcifer oustaleti* (caméléon),...
- des espèces d'oiseaux : *Coua cristata*, *Dicrurus forficatus*, *Coua gigas*,...

2.2.2. Données de base

2.2.2.1. Données climatiques :

Les données climatiques utilisées dans cette étude sont issues des images satellites météorologiques, Meteosat-7, qui ont été calibrées avec les données météorologiques de la Direction Générale de la Météorologie de Madagascar (DGM) par le service de la météorologie. Les images satellites météorologiques (Annexe 3) sont à basse résolution (10461,4m x 11070,49m). Les paramètres climatiques recueillis ont été les précipitations et les températures. Dans ce cas, les données disponibles sont des données mensuelles des 14 dernières années, plus particulièrement, de Janvier 2000 jusqu'en Juin 2014.

Les données sur les précipitations ont servi de données de base pour cette étude afin de définir la relation entre la précipitation et les indices de végétations. Tandis que les données sur les températures avec les précipitations ont permis d'établir la courbe ombrothermique moyennant entre 2000 et 2013.

2.2.2.2. Données géographiques : images LANDSAT

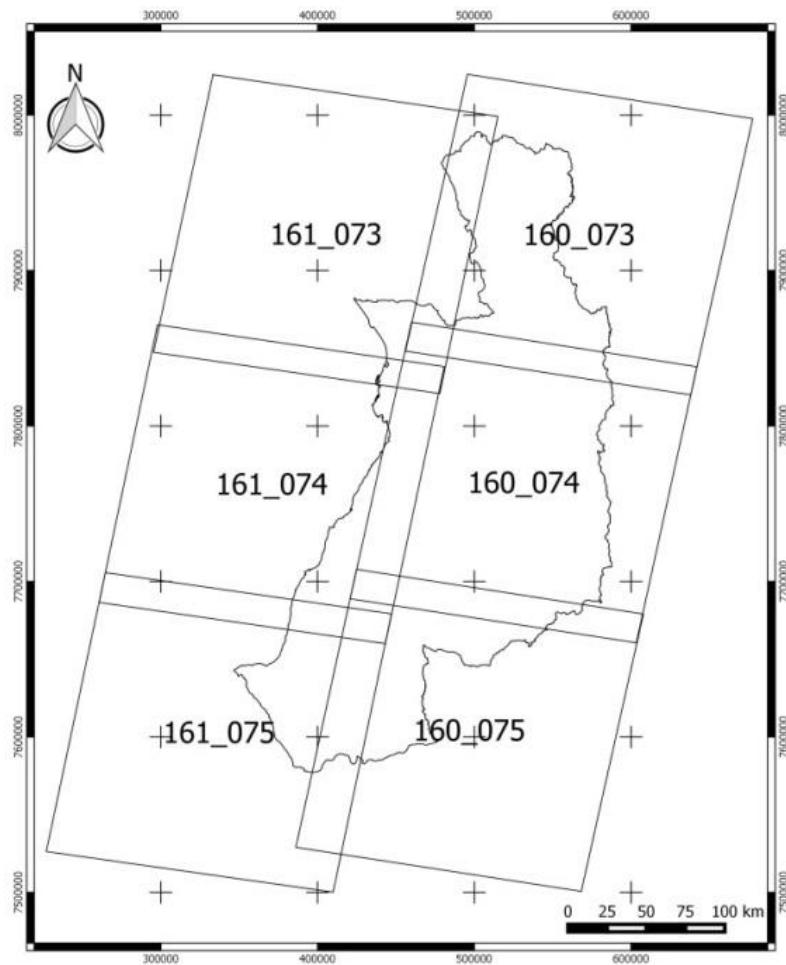
a) Importance de l'utilisation des images Landsat

Comme c'est une étude à l'échelle régionale, l'utilisation des images *Landsat* est la plus appropriée pour bien mener ce travail. En fait, les images *Landsat*, avec 30 m de résolution, permettent de discerner le changement phénologique du couvert végétal à cette échelle à partir du calcul des indices de végétations.

b) Choix des images satellites

Recouvrement de la zone d'étude

Etant donné qu'une image *Landsat* recouvre une superficie de 185km x 185km, la Région de Menabe résulte de l'assemblage de six séries de scènes d'images ayant les référentiels suivantes : 160-073, 161-073, 160-074, 161-074, 160-075 et 161-075. (Carte 4)



Carte 2: Composition des scènes d'images utilisées

Référence temporelle

Cette étude fait référence à trois années de base à savoir les années 2000, 2007 et 2014, dont chaque année comporte deux saisons (sèche et humide). Dans le cas où les images de ces référentiels temporels ne sont pas disponibles, les images des années suivantes ou précédentes ont été sélectionnées à leur place. Le choix de ces années d'étude s'est opéré surtout suivant l'existence à la fois des données de précipitations et des images *Landsat* d'un même mois d'acquisition durant une saison pour les trois époques. En fait, les données pluviométriques satellites ne sont disponibles qu'à partir de l'année 2000. L'intervalle de 7ans entre ces référentiels temporels a été choisi afin de bien distinguer la résilience des forêts de la Région durant la période analysée (2000-2014).

Densité des nuages

Etant donné que les images *Landsat* sont prises par des instruments optiques, ne pouvant pas éviter le captage des nuages, la densité des nuages sur les séries d'images utilisées constitue aussi un critère de sélection des images. En effet, le captage des images satellites d'une même localité se fait tous les 16 jours (NASA, 2015) et il serait très probable d'obtenir une image comportant de nuages très denses notamment en saison pluvieuse.

c) Les images Landsat utilisées

En somme, 36 scènes d'image *Landsat* ont été utilisées dans cette étude (6 scènes x 3 époques x 2 saisons). Ainsi, de par les critères de sélection des images *Landsat*, les informations principales sur les images utilisées sont présentées dans le tableau 4 mais les détails et les caractéristiques de ces images sont étalés dans l'annexe 4.

Tableau 4: Liste des images *Landsat* utilisées

N°	Capteur <i>Landsat</i>	Référence des images	Date d'acquisition	Résolution spectrale	Saison
1	TM	LT5160_073-074-075	18.10.2000	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	sèche
	TM	LT5161_073-074-075	25.10.2000	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	
2	ETM+	LE7160_073-074-075	06.03.2002	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	humide
	ETM+	LE7161_073-074-075	29.03.2002	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	
3	TM	LT5160_073-074	03.08.2007	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	sèche
	TM	LT5160_075	19.08.2007	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	
	TM	LT5161_073-074	28.08.2008	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	
	TM	LT5161_075	27.09.2007	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	
4	TM	LT5160_073	28.03.2007	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	humide
	TM	LT5160_074-075	08.02.2007	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	
	TM	LT5161_073-074-075	05.03.2008	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	
5	ETM+	LE7160_073-74-75	27.08.2013	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	sèche
	ETM+	LC8161_073-074-075	02.08.2013	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	
6	ETM+	LE7160_073-074-075	04.03.2013	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	humide
	ETM+	LE7161_073-074-075	27.03.2013	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	

2.2.2.3. Base de données du FTM (BD 500)

Cette base de données du FTM (*Foiben-Taosarintanin'i Masagasikara*), à l'échelle 1 : 500 000, a permis de délimiter la zone étudiée, la Région Menabe. De plus, elle est aussi utilisée pour avoir les informations sur les données hydrographiques, topographiques ainsi que les localisations géographiques.

2.2.3. Cadre théorique de l'étude

2.2.3.1. Images Landsat

Les images *Landsat* sont téléchargées sur le site web [Earth Explorer](#). Les capteurs d'images sont du type optique pouvant détecter à la fois le rayonnement visible et le rayonnement infrarouge. Ce dernier est très sensible au stress et aux états des végétations.

La résolution spectrale des images dépend des capteurs d'image. (Tableau 5)

Tableau 5: Domaine spectrale des images *Landsat* selon les capteurs

Domaine spectrale (μm)					
bande	TM	bande	ETM+	bande	OLI
1	0.45 - 0.52 (bleu)	1	0.45 - 0.52 (bleu)	1	0.43 – 0.45 (aérosol cotière)
2	0.52 - 0.60 (vert)	2	0.52 - 0.60 (vert)	2	0.45 – 0.51 (bleu)
3	0.63 - 0.69 (rouge)	3	0.63 - 0.69 (rouge)	3	0.53 - 0.59 (vert)
4	0.76 - 0.90 (PIR : proche infrarouge)	4	0.77 - 0.90 (PIR : proche infrarouge)	4	0.64 – 0.67 (rouge)
5	1.55 - 1.75 (SWIR : moyen infrarouge)	5	1.55 - 1.75 (SWIR : moyen infrarouge)	5	0.85 – 0.88 (PIR : proche infrarouge)
6	10.40 - 12.50 (TIR : infrarouge thermique)	6	10.40 - 12.50 (TIR : infrarouge thermique)	6	1.57 – 1.65 (SWIR : moyen infrarouge)
7	2.08 - 2.35 (SWIR : infrarouge ondes courtes)	7	2.08 - 2.35 (SWIR : moyen infrarouge)	7	2.11 - 2.29 (SWIR : infrarouge ondes courtes)
		8	0.52 - 0.90 (panchromatique)	8	0.50 – 0.68 (panchromatique)
				9	1.36 – 1.38 (cirrus)

Source : (USGS, 2014)

2.2.3.2. Indices de végétation

En télédétection, les divers indices sont des méthodes de traitement appelées, « transformations spectrales ». En effet, cela consiste à convertir les luminances mesurées au niveau du capteur satellitaire en grandeurs significative dans le domaine de l'environnement. (UVED, 2008)

Pour le cas de l'indice de végétation, les pigments chlorophylliens absorbent la majeure partie du rayonnement visible (bande rouge) qui leur parvient. La réflectance est donc généralement faible. Dans le proche infrarouge, la chlorophylle absorbe moins les longueurs d'ondes. La réflectance est alors dans ce cas plus élevée. Sa valeur dépend de la structure des tissus et de la structure générale de la canopée. Dans ce domaine spectral, la végétation chlorophyllienne a toujours des valeurs de réflectance plus fortes que d'autres objets (sols, minéraux,...). (UVED, 2008)

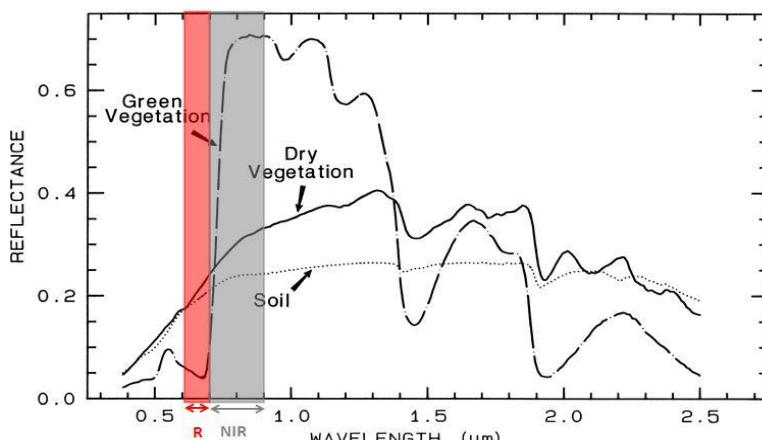


Figure 3: Courbe de réflectance d'une végétation verte photosynthétique et d'une végétation sèche ainsi que d'un sol (CLARK, 2003)

Par conséquent, la majorité des indices de végétation sont basés sur la différence de la réflectance dans le visible et dans le proche infrarouge.

Deux indices de végétation sont ainsi considérés dans cette présente étude afin d'analyser la résilience des forêts sèches dans la Région de Menabe : NDVI et EVI.

2.2.3.3. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

L'indice de végétation par différence normalisé, appelé aussi NDVI est construit à partir des canaux rouges (R) et proches infra rouge (PIR). L'indice de végétation normalisé met en valeur la différence entre la bande visible du rouge et celle du proche infrarouge. Ainsi, la formule permet de calculer cet indice :

Équation 1: Formule de l'indice de végétation NDVI

$$NDVI = \frac{(PIR - R)}{(PIR + R)}$$

Cet indice est sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation. Les valeurs du NDVI sont comprises entre -1 et +1 et sont généralement classées comme suit:

- les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge.
- pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0.
- les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7. Les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses.

2.2.3.4. EVI (Enhanced Vegetation Index)

Cet indice de végétation fait intervenir trois bandes spectrales. En fait, il a été développé pour optimiser la réponse des végétations face aux distorsions de la lumière réfléchie provoquée des particules dans l'air et du fond du sol. En effet dans le cas d'une canopée dense où l'indice de la surface foliaire est élevé, l'indice normalisé, NDVI, a été amélioré en tirant des informations dans la longueur d'onde du bleu. Cette portion de bande spectrale peut corriger les signaux du fond du sol et les influences atmosphériques. (Huete *et al.*, 1997)

La formule de l'indice EVI se traduit par :

Équation 2: Formule de l'indice de végétation EVI

$$EVI = G \frac{NIR - Red}{L + NIR + C1Red - C2Blue}$$

G : gain de facteurs pour limiter la valeur de l'indice de +1 à -1

L : facteur d'ajustement du sol

C1, C2 : coefficients utilisés pour corriger la dispersion aérosol dans la bande rouge à partir de la bande bleue.

D'une manière générale, G=2,5 ; L=1 ; C1= 6 et C2= 7,5 (HUETE *et al.*, 1997)

Ainsi, la formule devient :

$$EVI = 2,5 \frac{NIR - Red}{1 + NIR + 6Red - 7.5Blue}$$

Avec le facteur d'ajustement « L », les effets de la topographie sont plus sensibles dans l'indice EVI par rapport à l'indice normalisé, NDVI. (MATSUSHITA *et al.*, 2007)

Les valeurs de cet indice varient entre -1 et 1 dont une végétation est comprise entre 0,20 et 0,80.

2.3. Méthodes

2.3.1. Etude du régime pluviométrique de la Région dans la période étudiée (2000-2013)

2.3.1.1. Répartition spatiale des précipitations

Pour y parvenir, la somme annuelle des valeurs des précipitations par pixel et par la suite la moyenne de ces valeurs durant les 13 années d'étude ont été calculées en utilisant « *band Math* » du logiciel *ENVI 5.0*. Puis, ces valeurs moyennes par pixel ont été reclassifiées comme suit pour ressortir la carte de répartition des précipitations. En fait, il s'agit de cartographier la répartition des précipitations suivant les classes de précipitations suivantes : P < 600 mm, 600 < P < 1000 mm, 1000 < P < 1500 mm et 1500 < P < 2000 mm comme celles établis par CREAM en 2013. (Annexe 5)

2.3.1.2. Variabilités temporelles des précipitations

Les précipitations totales annuelles sont obtenues par le calcul des valeurs moyennes des pixels des images satellites météorologiques contenus dans la zone d'étude. En effet, les valeurs de chaque pixel ont été extraites de ces images en utilisant la fonction « *extract value to table* » du logiciel *ArcGIS 10.0*.

Afin de parvenir à étudier la variabilité des précipitations du Menabe dans la période étudiée, la méthode de Bertrand DOUKPOLO a été utilisée. Ainsi, les données pluviométriques annuelles ont été traitées en utilisant l'indice pluviométrique afin de tirer sa tendance. Cet indice a été calculé à partir de

la formule : $Ii = \frac{Xi - \bar{X}}{\partial(X)}$

Ii : indice pluviométrique de l'année i

Xi : total pluviométrique pondéré de l'année i ,

\bar{X} : pluviométrie moyenne durant la période étudie

$\partial(X)$: écart type de la série pluviométrique sur la période d'étude.

Dans le cas où l'indice pluviométrique est négatif, il y existe un déficit pluviométrique et dans le cas contraire, il y a un excédent pluviométrique. (DOUKPOLO, 2013)

2.3.2. Prétraitements des images satellites

Les prétraitements consistent à éliminer les nuages, les ombres projetées par les nuages, les ombres créées par la topographie et les valeurs de saturation dans les nombres dues à la géométrie de l'observation du satellite ou à la présence d'eau sur les feuilles des arbres. Ainsi, plusieurs corrections ont été appliquées en utilisant le logiciel ENVI 5.0 à savoir les corrections radiométriques, les corrections géométriques et les corrections atmosphériques.

- *Correction radiométrique* : Elle consiste à pallier les anomalies propres aux capteurs en se basant sur les métadonnées (type de capteur, date d'acquisition des images, l'angle d'élévation du soleil) et les paramètres du CPF (*Calibration Parameter Files*) spécifique à chaque image. Sous ENVI 5.0, cette correction a été effectuée à partir de la fonction *radiometric calibration* suivant les valeurs de réflectance.
- *Correction atmosphérique* : Ce type de correction permet d'obtenir une information fiable sur les différents paramètres lors de la prise des images en éliminant les effets des différentes molécules présentes dans l'atmosphère. Elle est basée sur une correction empirique d'image à image (Jensen, 1996). Ainsi, la fonction *Dark Subtraction* dans ENVI 5.0 a permis de réaliser ces corrections atmosphériques.
- *Correction géométrique* : Les images *Landsat* fournies par USGS sont projetées originellement suivant le système de projection WGS 1984 (Greenwich et les points géodésiques mondiaux). Malgré cela, certaines images sont projetées dans la zone Nord et d'autres dans la zone Sud. Ainsi, la principale projection utilisée dans cette présente étude est la projection WGS 1984 / UTM zone 38 Sud.

De plus, les images acquises par les systèmes d'observation de la terre ne peuvent pas être directement superposées à cause des déformations géométriques. Ces déformations sont dues à des erreurs de positionnement du satellite sur son orbite car la terre tourne sur son axe durant l'enregistrement de l'image, aux effets du relief terrestre,.... Cette correction a été réalisée à partir des points de contrôle ou GCP (*Ground Control Points*). La transformation mathématique permettant d'effectuer cette correction est du type polynomial. Puis, l'image est ensuite modifiée par un rééchantillonage des points GCP par l'intermédiaire des plus proches voisins (*Nearest neighbor*), avec un RMS (*Root Mean Square*) inférieur à un pixel.

2.3.3.Mosaïque et masque

Après les prétraitements des images, les six scènes d’images de même référentiel temporel et de même saison sont assemblées sous le logiciel ENVI avec la fonction *Georeferenced Mosaicking*. Ensuite, en utilisant la base de données 1 :500 000 (BD 500) du FTM, le fichier vecteur de la limite de la Région Menabe a été exporté en tant que région d’intérêt ou *ROI (Region Of Interest)* afin de masquer les zones non-incluses dans la zone d’étude sur les images rassemblées. *Subset Data to ROIs* dans ENVI a permis de réaliser ce masque.

2.3.4. Cartographie des occupations du sol par classification semi-supervisée

Cette cartographie permet de délimiter les différentes classes suivant l’occupation du sol au cours des années de référence. Cette délimitation vise notamment à obtenir la limite de la couverture forestière dans la Région durant les trois années de référence. La limite forestière est supposée constante en saison sèche et en saison humide pour un même référentiel temporel. Du fait qu’en saison humide, les nuages sont très denses et il est difficile de déterminer l’occupation du sol. Dans cette étude, la superficie minimale des blocs forestiers considérés est de 2 hectares.

Afin de parvenir à la délimitation évolutive de la couverture forestière du Menabe, la classification semi-supervisée a été adoptée. En fait, il s’agit de combiner la classification non supervisée avec la classification supervisée.

- *Classification non supervisée*

Elle consiste à regrouper les différents pixels d’une image en classe spectrale sans savoir leur signification thématique sous le logiciel ENVI avec l’algorithme ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technics*). Ce module travaille de façon itérative en regroupant dans la même classe les pixels de même caractéristique spectrale. Seule l’image la plus récente en saison sèche a fait objet de ce type de classification car il est plus facile d’identifier les différentes classes en se référant à l’image de Google Earth.

- *Classification supervisée*

Cette classification supervisée est plus analytique et consiste à attribuer la nomenclature des différentes classes. Dans cette étude, le nombre de classes voulu pour cette classification est au nombre de 7 (forêts, savanes, sols nus, mangrove, eau, marécages et nuages). Pour cela, le résultat de la classification non supervisée de l’image en 2014 a été utilisé pour définir la zone d’entraînement (*ROI : Region Of Interest*) pour chaque classe identifiée. En effet, le principe est d’éliminer pour chaque classe les extrêmes en terme de superficie afin d’obtenir un échantillon de chaque classe identifiée en usant du logiciel ArcGIS, qui va être par la suite utilisée comme ROI pour la classification supervisée dans ENVI. La méthode de classification optée est le Maximum de vraisemblance (*Maximum likelihood*). Ainsi, l’occupation du sol de l’époque la plus récente a été ressortie.

Afin de parvenir aux occupations du sol des autres années de référence, la classification par le Maximum de vraisemblance a été choisie en utilisant les mêmes zones d'entrainements précédentes et en les vérifiant suivant le référentiel temporel.

Malgré la combinaison de ces deux méthodes de classification, quelques classes sont difficiles à distinguer comme la forêt et les marécages. Dans ce cas, des corrections manuelles avec le logiciel ENVI ont été réalisées en faisant comme référence l'image de *Google Earth*.

2.3.5. Validation de la carte forestière

Afin d'évaluer la fiabilité de la carte forestière, la validation s'est basée sur le dernier référentiel temporel car, l'image de *Google Earth* est plus récente et les changements du paysage sont ainsi moindres. En effet, cette étude n'a pas fait objet de descente sur terrain, de ce fait, la validation s'est faite à partir de l'image *Google Earth*. A partir de la matrice de confusion et l'indice de KAPPA, une appréciation statistique de la précision de la classification sera avancée.

La matrice de confusion est un tableau à double entrée dont les réalités sur terrain (image sur *Google Earth*) et le résultat de la classification sont confrontés. Des échantillons de points, au nombre de 200 réparties sur la Région Menabe, appelées « points de contrôle », ont fait objet de vérification. Cette matrice permet de calculer la précision globale, les erreurs d'omissions et de commissions ainsi que l'indice de Kappa.

La précision globale est la proportion d'échantillons correctement classifiés par rapport aux échantillons totaux vérifiés. L'erreur d'omission est la proportion d'échantillons correctement assignés à une classe et du nombre total d'échantillons appartenant à cette classe. L'erreur de commission, c'est la proportion de points attribués faussement à une classe alors qu'ils appartiennent à une autre.

L'indice de Kappa permet d'évaluer la précision globale d'une classification (TRAORÉ *et al.*, 2013). Cet indice est donné par la formule suivante :

Équation 3: Formule de l'indice de Kappa

$$K = \frac{Po - Pe}{1 - Pe}$$

dont : $Po = \frac{\sum X_{ii}}{N}$, rapport entre la somme de la diagonale de la matrice de confusion et le nombre total d'échantillons de points vérifiés et $Pe = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{+1} \times X_{1+})}{N^2}$, rapport entre la somme $\sum_{i=1}^n (X_{+1} \times X_{1+})$ et le carré de la totalité des échantillons avec X_{+1} est la somme des chiffre de la ligne correspondant à une classe dans la matrice de confusion et X_{1+} , est la somme des chiffres de la colonne de la matrice de confusion d'une classe. Plus l'indice de Kappa est proche de 1, plus la classification sera acceptée.

2.3.6. Cartographie et analyse évolutive des valeurs des indices de végétations

Les images en mosaïque puis masquées suivant la zone d'étude sont ensuite transformées afin d'obtenir les cartes évolutives des indices de végétation, en utilisation, le module *band math* de ENVI.

En effet, les formules de chaque indice de végétation ont été insérées puis les bandes spectrales correspondants au proche infrarouge et au rouge sont sélectionnées afin de ressortir la carte des valeurs NDVI pour chaque date et chaque saison. Pour le cas de l'indice EVI, les bandes spectrales du proche infrarouge, du rouge et du bleu ont été sélectionnées.

Avec les cartes forestières établies précédemment, les cartes de valeurs des indices de végétation ont été coupées suivant la limite forestière de chaque année de référence.

Des échantillons de points géographiques au nombre de 400 000 environs ont été pris sur ces cartes d'indices de végétations. Ensuite, les valeurs des pixels correspondants ont été extraites et analysées avec *XLSTAT* : analyse descriptive des valeurs des indices de végétation pour chaque époque et chaque saison. Ces valeurs sont ensuite comparées par année et par saison avec le test de comparaison de Friedman dans *XLSTAT*. En fait, tous les échantillons ne suivent pas la loi normale, ce qui justifie l'utilisation de ce test non paramétrique.

2.3.7. Analyse de la corrélation entre les précipitations et les valeurs des indices de végétations

En fait, les valeurs des indices de végétations (NDVI et EVI) ont été corrélées avec les précipitations suivantes, en utilisant *XLSTAT* 2015, avec la corrélation de Pearson :

- P_0 : Précipitation du mois m correspondant au mois l'acquisition de l'image
- P_{-i} : Précipitation du mois $m-i$, i mois avant d'acquisition de l'image
- P_{ci} : Précipitation cumulées des $(i+1)$ premiers mois ($P_{c_{i-1}} + P_{-i}$)

avec $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$

Comme par exemple :

P_{-2} est la précipitation du mois $m-2$, deux mois avant d'acquisition de l'image et P_{c2} est la précipitation cumulée des trois premiers mois ($P_{c1} + P_{-2}$)

Cette large gamme de précipitation a été corrélée avec les indices de végétation afin de pouvoir vérifier la première hypothèse d'une part et de déterminer les précipitations en forte corrélation avec ces indices d'autre part.

Cette étude de corrélation permet de voir la significativité et le niveau de corrélation (coefficient de corrélation) des variables (Précipitations et indices de végétations). Cette analyse statistique a été réalisée pour connaître la dépendance des forêts aux précipitations notamment sur l'accumulation des précipitations.

Comme les cartes de valeurs des indices de végétations et les cartes de précipitations ne sont pas de même résolution, la corrélation s'est basée sur l'image à basse résolution (image des précipitations). En effet, chaque pixel de cette image correspond à une valeur de précipitation, assimilé en un point géographique. Ce sont les valeurs des indices de végétations correspondants à ces divers points dans la zone forestière qui ont été analysées avec celles des types de précipitations citées ci-dessus. L'extraction de ces valeurs ont été procédée avec la fonction « *point resampling tool* » du logiciel *QGIS Brighton 2.6.0*.

2.3.8. Elaboration d'un modèle théorique des indices de végétation en fonction des précipitations

Ce modèle théorique est nécessaire dans cette étude pour calculer la valeur des indices de végétation, en forte corrélation avec les précipitations qui va servir de référence pour les forêts sèches afin de déterminer leurs états normaux au cours des années. A partir des résultats de corrélation, le modèle théorique des indices de végétations a été établi en fonction des précipitations ayant des corrélations significatives avec les valeurs des indices de végétations. Les précipitations à corrélations significatives avec les valeurs des indices ont été toutes incluses dans l'équation de régression. Le modèle est donc du type non-linéaire, appréciée par la valeur d'un coefficient de détermination. En effet, le choix du modèle théorique dépend en grande partie de la valeur de ce coefficient de détermination. Plus cette valeur est proche de 1, plus l'indice de végétation théorique sera meilleur, en tant que valeur de référence.

L'expression du modèle théorique a été ensuite insérée dans le logiciel *ENVI 5.0*, en utilisant « *band math* », afin de parvenir aux cartes des valeurs des indices de végétations théoriques, de même résolution que les images des précipitations. Puis, ces cartes ont subis des changements de résolution afin de comparer leurs valeurs à celles des valeurs réelles des indices. Par la suite, des cartes de changements, reflétant la résilience des forêts du Menabe, pourraient être avancées suivant les saisons et les indices de végétations considérés.

2.3.9. Validation du modèle théorique

Avec l'analyse des résidus entre les valeurs des indices de végétation théorique, issus du modèle, et celles réellement observées, le modèle de régression établi a été évalué. En fait, de nouveaux points géographiques (9 points par pixel de l'image à basse résolution), repartis sur la surface forestière et différents des points utilisés dans l'élaboration du modèle ont permis d'effectuer cette validation. A partir de ces points, les valeurs des indices de végétation et des précipitations correspondantes ont été recueillies. Les résidus, écarts entre les valeurs observées et les valeurs théoriques, ont été calculés tant pour les variables expliquées par le modèle que pour les variables non-expliquées par celui-ci. Ces deux variables ont été ensuite représentées en nuage de points afin de voir la tendance de l'un par rapport à l'autre. En effet, le graphique des résidus permet de déterminer la qualité du modèle de régression (RAKOTOMALALA, 2011)

En fait, plus les points s'éloignent de la droite (indice th = indice obs), moins le modèle sera fiable. Avec la comparaison des moyennes (test t et z dans *XLSTAT*) des deux variables (expliquées et non-expliquées par le modèle), le modèle pourrait être valide ou non. Si les deux moyennes ne présentent pas une différence significative alors le modèle est valide. Dans le cas contraire, le modèle ne sera pas accepté.

2.3.10. Comparaison de valeurs réelles et théoriques

Pour déterminer la résilience des forêts sèches, l'indice de végétation réel et l'indice de végétation théorique sont comparés.

Trois cas peuvent ainsi surgir :

- l'indice réel est supérieur à l'indice théorique/ écart (indice réel – indice théorique) > 0 : il y a récupération de végétation, donc les forêts sont stables vis-à-vis des variabilités des précipitations. Dans ce cas, la forêt est plus résiliente face aux variabilités des précipitations
- l'indice réel est inférieur à l'indice théorique/ écart (indice réel – indice théorique) < 0 : il y a une perte de verdure, les activités chlorophylliennes des forêts diminuent et la végétation est moins résilients face aux variabilités des précipitations
- l'indice réel et égal à l'indice théorique/ écart (indice réel – indice théorique) $= 0$: il n'y a ni gain ni perte de verdure. Ce dernier cas pourrait ne pas se présenter du fait que les indices de végétations ainsi que les précipitations sont des valeurs décimales à plusieurs millièmes près.

Avec la fonction « *point resampling tool* » du logiciel *QGIS Brighton 2.6.0*, près de 400 000 points géographiques dans la zone forestières ont été pris comme échantillon pour effectuer l'analyse des résultats. Ce dernier consiste à calculer à partir de ces échantillons la moyenne des écarts (indice réel – indice théorique) et leurs écart-types. En effet, l'écart-type mesure la dispersion des valeurs autour de leur moyenne arithmétique (Grenier, 2007). Les écart-types permettent de déterminer la variation générale des valeurs en additionnant et en faisant la différence de la moyenne des écarts (indice réel – indice théorique) et de leurs écart-types respectives.

2.3.11. Vérification des hypothèses

L'hypothèse 1, La verdure des forêts sèches à un mois considéré m n'est plus influencée par les précipitations au-delà des trois précédents mois, est vérifiée si les corrélations entre les précipitations des mois $m-4$, $m-5$, $m-6$, $m-7$ et les indices de végétation, NDVI et EVI, ne sont pas significatives. Contrairement à cela, si ces corrélations sont significatives, l'hypothèse est alors rejetée.

L'Hypothèse 2 qui stipule que la résilience des forêts sèches face aux variabilités des précipitations diminue au cours des années, est donc vérifiée si la somme des écarts moyens (indice réel – indice théorique) des années de référence est négative et que la somme des écart-types annuels est importante. Dans le cas contraire, l'hypothèse est rejetée car la forêt est plus stable aux variabilités des précipitations si cette somme est positive et que son écart-type est faible.

L'hypothèse 3, affirmant que les lisières sont plus sensibles aux variabilités des précipitations que les noyaux des forêts, sera vérifiée en comparant les écarts moyens (indice réel – indice théorique) et leurs écart-types entre lisière et noyau. En effet, la lisière de 100 mètres de largeur, équivalent à environ 3 pixels, a été bornée en appliquant la fonction « *buffer* » du logiciel *ArcGIS 10.0* sur la limite successive des forêts sèches du Menabe. Et le noyau a été circonscrit avec la fonction « *buffer* » du logiciel *QGIS Brighton 2.6.0*. Si les écarts moyens annuels des lisières est inférieure à celle du noyau et que les écart-types annuels des lisières est plus importante que ceux du noyau, dans ce cas l'hypothèse 2 est vérifiée. Cette hypothèse est rejetée dans le cas contraire où les écarts moyens (indice réel – indice théorique) ne présentent aucune différence significative pour les deux parties des forêts ou la valeur moyenne de ces écarts en lisière est supérieure à celle dans le noyau forestier.

2.4. Les limites de l'étude

L'étude est limitée par la disponibilité des données météorologiques satellitaires des années antérieures. En effet, elles ne sont pas accessibles qu'à partir de l'année 2000. Pour l'année 2014, les informations des six derniers mois ne sont pas encore disponibles. La période maximum pour cette présente étude est donc de 13 ans et 6 mois.

Certaines images *Landsat* des années de référence correspondant aux saisons voulues ne sont pas aussi disponibles ou présentent des déformations géométriques difficiles à corriger. Pour cela, ces images ont été remplacées par des images leurs rapprochant, de même saison ou des années rapprochées du référentiel temporel. Comme par exemple, les images *Landsat* de l'année 2000 ont été remplacées par des images en 2002 pour la saison humide.

Comme les images *Landsat* sont prises par des instruments optiques, les nuages sont visibles et dissimulent d'importantes informations (limite forestière, réflectance de la forêt en dessous des nuages). En saison humide, elles sont très denses notamment en Janvier et en Février, c'est pourquoi le mois d'acquisition de la plupart des images satellites pour cette saison est pris en Mars. Malgré cela, il existe encore quelques zones nuageuses dans la zone étudiée pour ce mois. Ainsi, ces zones nuageuses ne sont pas considérées dans cette étude (classées comme non-identifié) et la limite des forêts est supposée constante pour dans une même année.

Les images *Landsat* du capteur OLI montre une différence de longueur d'onde entre les bandes notamment au niveau du proche infrarouge. Ainsi, les images utilisées pour la dernière époque sont du capteur ETM+ afin de rendre plus rationnelle la comparaison des valeurs des indices de végétation. Cependant, les images de ce capteur présentent des rayures inévitables provenant du capteur.

Les images satellites météorologique et les images *Landsat* sont de résolutions spatiales différentes. Par conséquent, l'étude de corrélation entre les indices de végétations et les précipitations s'est basée sur l'image à basse résolution (image météorologique). A chaque pixel de cette image de base correspond à une valeur de précipitation. La valeur des indices de végétation considérée est alors celle qui coïncide avec le point.

2.5. Récapitulation de la méthode

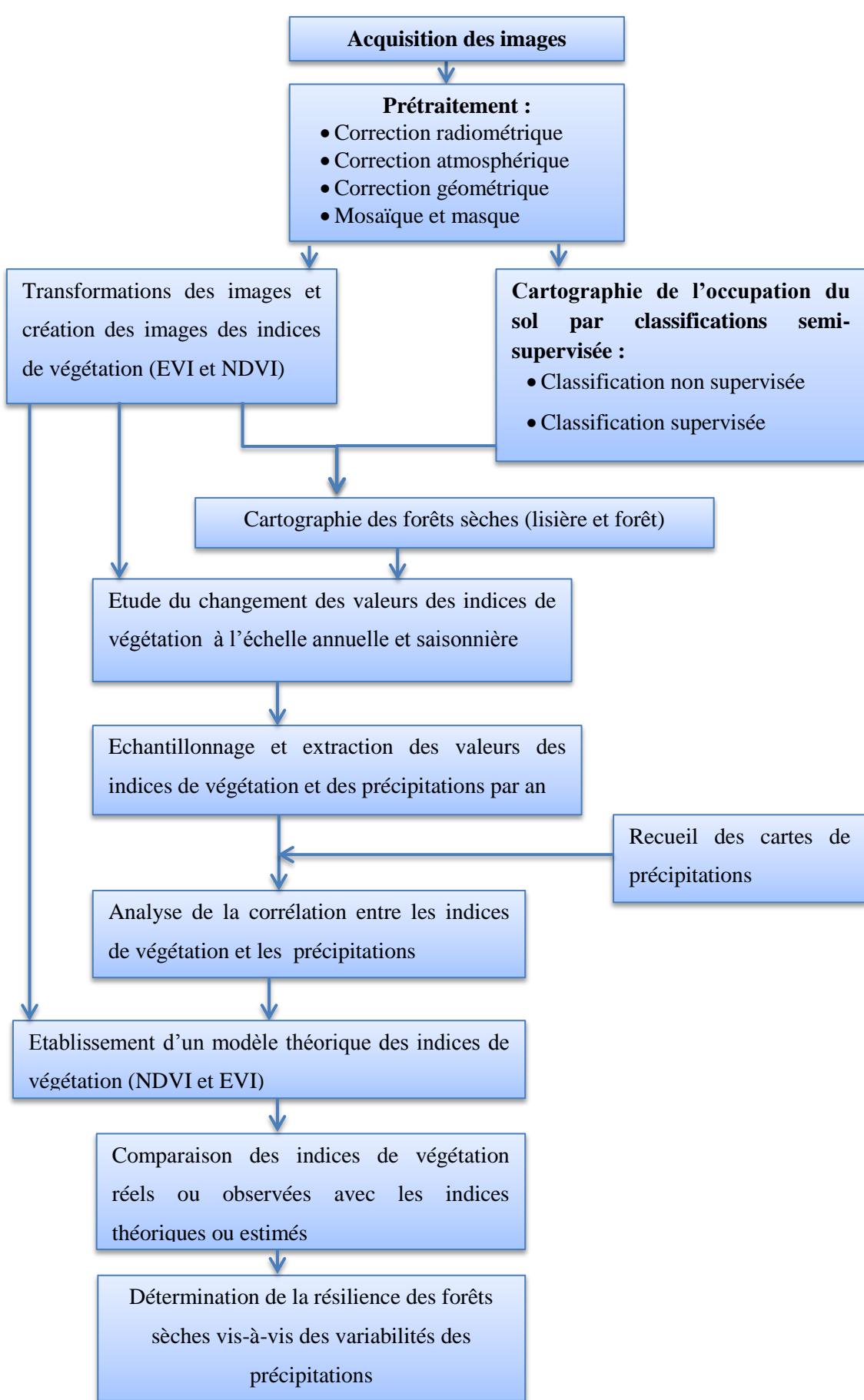


Figure 4: Récapitulation de la méthode

2.6. Cadre opératoire

Question de recherche : Comment les forêts sèches réagissent-elles vis-à-vis des variabilités des précipitations ?

Tableau 6: Cadre opératoire de la méthodologie

Hypothèses	Indicateurs	Méthodes	Résultats
H1 : La verdure des forêts sèches à un mois considéré m n'est plus influencée par les précipitations au-delà des trois précédents mois.	coefficients de corrélation et coefficients de détermination entre valeurs des indices de végétations et les précipitations mensuelles et cumulée à partir du mois d'acquisition de l'image m jusqu'à $m-10$	Création d'une matrice de corrélation entre les valeurs des indices de végétation réels et les précipitations considérées	Significativité des corrélations entre les précipitations et les indices de végétations
H2 : La résilience des forêts sèches face aux variabilités des précipitations diminue au cours des années.	Valeurs des indices de végétation réels (NDVI et EVI) issus des images <i>Landsat</i>	Traitement des images <i>Landsat</i> via télédétection	Carte de valeurs NDVI et EVI en saison sèche et en saison humide
	Valeurs des indices de végétations théoriques	Elaboration d'un modèle théorique des indices de végétation à partir d'une équation de régression en fonction des précipitations	Etat de référence des forêts suivant les variabilités des précipitations
	Différence entre indices de végétation réels et théoriques	Comparaison des valeurs des indices de végétation réels et théoriques	Résilience des forêts vis-à-vis des précipitations
H3: Les lisières sont plus sensibles aux variabilités des précipitations que les noyaux des forêts	Différence entre indices de végétation réels et théorique des lisières et des noyaux	Comparaison des écarts (indices réels – indices théoriques) entre les lisières et les noyaux forestiers	Résilience de chaque partie des forêts sèches (lisière et noyau)

Résultats

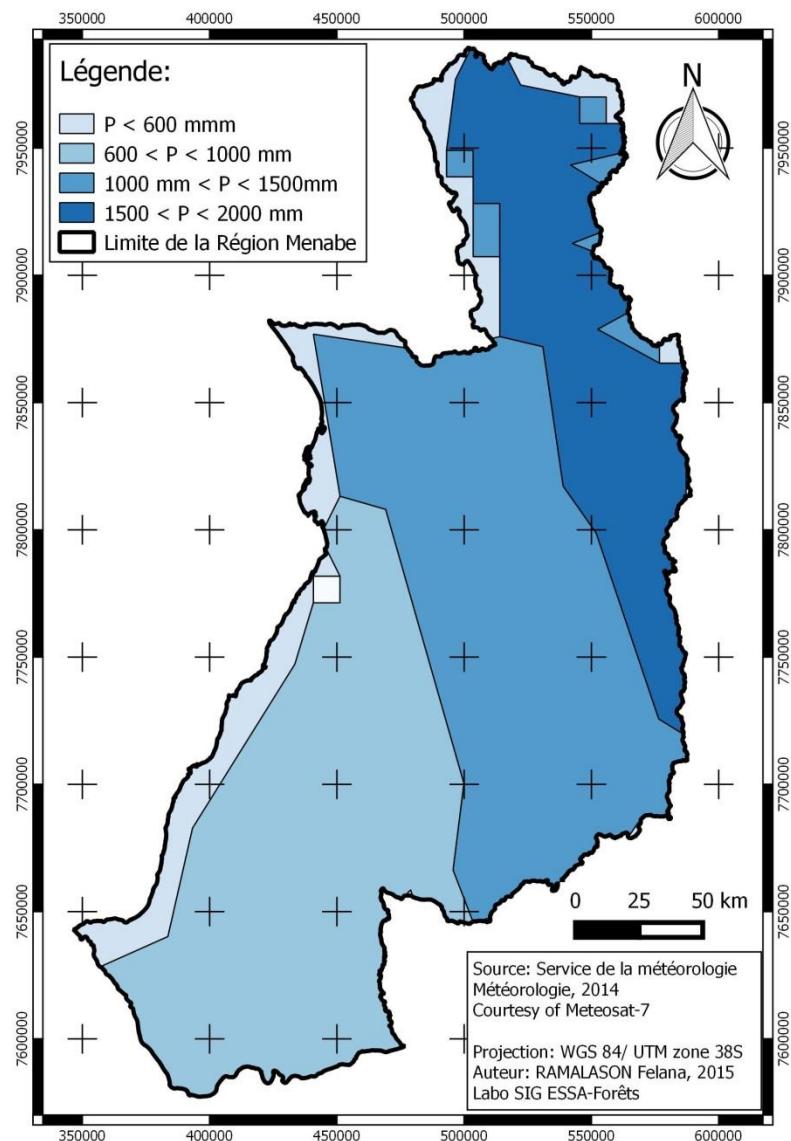
3. RESULTATS

3.1. Régime pluviométrique déterminé à partir des images des précipitations

3.1.1. Répartition spatiale des précipitations dans l'espace

Le Menabe se caractérise ainsi par un climat tropical semi-aride à courte saison de pluie. Les précipitations sont réparties inégalement sur la région.

D'une manière générale, les précipitations diminuent du nord vers le sud et de l'ouest vers l'est à cause de l'altitude. (Annexe 6 : carte topographique)



Carte 3: Carte de répartition des précipitations

3.1.2. Variabilités des précipitations dans la période étudiée (2000- 2013)

Avec les données pluviométriques issues des images satellites qui sont les données de base de cette étude, les variabilités des précipitations sur la Région Menabe durant les années d'étude (2000- 2013) peuvent être analysées dans les paragraphes suivants.

Les précipitations annuelles de la Région d'étude oscillent généralement entre 600 mm et 1400mm. En effet, la précipitation moyenne annuelle est la plus élevée en 2012 avec une hauteur de pluie de 1359,7mm et le plus faible en 2009 (625,6mm) et 2010 (625,9mm) (Figure 5). Concernant les trois époques de référence de ce présent étude (2000/2002 ; 2007/2008 ; 2013), la première époque présente la hauteur de pluie la plus élevée et l'année correspondant à une hauteur de pluie faible est l'année 2013. Le tableau qui a permis d'établir la figure suivante est présenté dans l'Annexe 7.

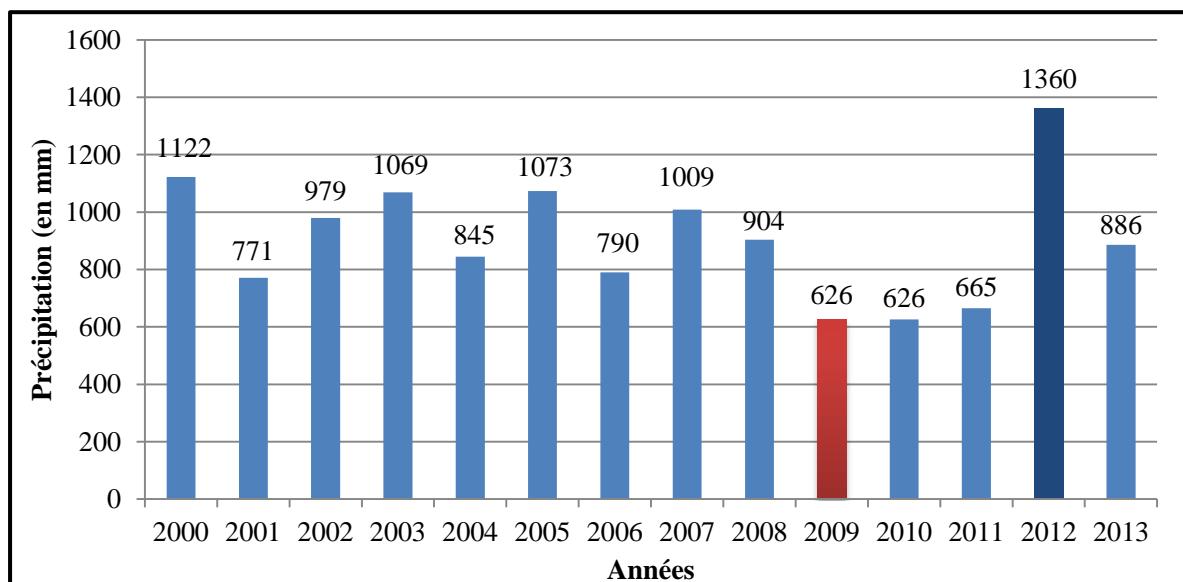


Figure 5: Variation annuelle de la précipitation totale annuelle (2000-2013)

Source : *Service de la Météorologie, 2014*

L'étude des indices pluviométriques des années d'étude a ressortie une tendance régressive des précipitations dans la Région du Menabe. (Figure 6)

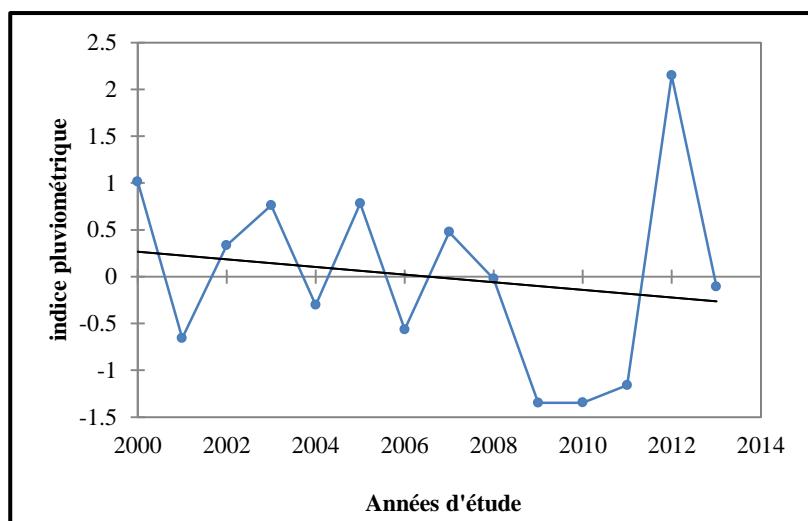


Figure 6: Indices et tendances pluviométriques (2000-2013)

Source : *Service de la Météorologie, 2014*

La pluviométrie annuelle indique une tendance régressive. D'après le test de significativité de tendance de Mann-Kendall, cette tendance est significative à 61,2% avec un niveau de significativité de 99%. (Annexe 8)

3.2. Cartographie évolutive de la couverture forestière du Menabe

L'évolution de la limite forestière de la Région s'avère très importante pour cette étude du fait qu'elle permet de bien cerner l'étude sur la forêt. De plus, la déforestation dans cette zone est très élevée et par la suite la limite forestière évolue suivant les années notamment sur la délimitation de la lisière et de la zone forestière fermée appelée encore « noyau » de la forêt.

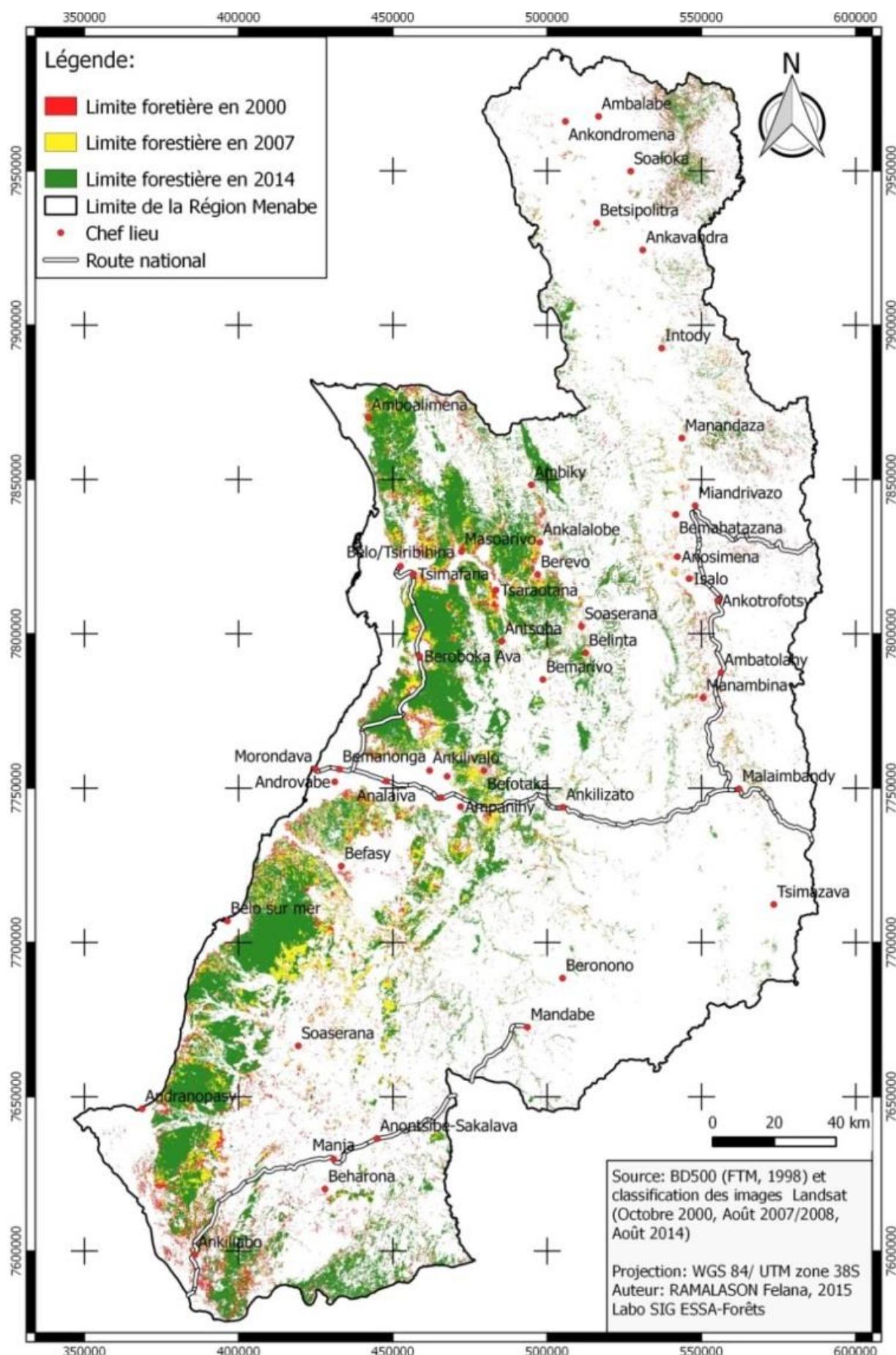
La carte 4 montre l'évolution de la couverture forestière pour les trois référentiels temporels principaux (année : 2000- 2007 et 2014).

A partir de la classification semi-supervisée des images *Landsat* de différentes dates étudiées, l'évolution de la surface forestière, incluant les forêts dégradées se fait comme suit :

Tableau 7: Evolution de la superficie forestière (2000-2007-2014)

Année	2000	2007	2014
Superficie forestière (en ha)	947 627	849 349	766 238

Il est à noter que la conception de cette carte d'évolution s'est basée sur la carte d'occupation de 2014 présentée dans l'Annexe 9.



Carte 4: Carte de l'évolution de la surface forestière du Menabe (2000 -2007 et 2014)

3.1. Validation de la carte forestière

Parmi les 200 points de contrôle, 192 sont dans leurs classes exactes (Tableau 8). La précision globale pour la classe des forêts est de 89,47 % alors que pour la classe des non-forêts, la précision s'élève jusqu'à 96,69 %. La précision globale de la classification est donc de 96 % avec un coefficient de Kappa de 0,78. De par ces valeurs, le résultat de la classification est qualifié « bonne » d'après les appréciations de LANDIS et KOCH en 1977². La fiabilité de cette classification est donc statistiquement acceptable et pouvant être utilisée dans des études ultérieures.

Tableau 8: Matrice de confusion

		Points de contrôle		Total	Erreur de commission (%)	Précision (%)
		Forêt	Non-forêt			
Classification	Forêt	17	2	19	10,53	89,47
	Non-Forêt	6	175	181	3,31	96,69
Total		23	177	200	-	100
Erreur d'omission (%)		26,09	1,13	192	200	0,96
Précision globale de la classification				96		
Indice de Kappa				0,78		

3.2. Corrélation entre les précipitations et les valeurs des indices de végétation

L'étude de la corrélation entre ces deux paramètres permet d'expliquer les valeurs des indices de végétation par rapport aux variabilités des pluviométries dans la Région Menabe. Elle s'est basée sur l'image météorologique de basse résolution en comparant deux à deux chaque pixel correspondant à des points géographiques systématiques.

Les annotations suivantes sont à préciser pour les précipitations mensuelles et cumulées considérées :

- P_{-i} : Précipitation du mois $m-i$, m mois avant l'acquisition de l'image
- P_{ci} : Précipitation cumulée des $(i+1)$ premiers mois ($P_{ci-1} + P_{-i}$)

avec $i = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$

Tableau 9: Matrice de corrélation entre précipitations et indices de végétation

Variables	P0	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	P-9	P-10
NDVI	r	0,480	0,593	0,685	0,627	0,116	-0,398	-0,550	-0,517	-0,598	-0,506
	r^2	0,231	0,352	0,469	0,393	0,100	0,158	0,303	0,267	0,358	0,256
EVI	r	0,564	0,585	0,684	0,641	0,231	-0,467	-0,576	-0,515	-0,558	-0,539
	r^2	0,318	0,343	0,467	0,411	0,054	0,218	0,332	0,265	0,312	0,291

Les valeurs en gras du tableau 9, plus précisément, les précipitations P0, P-1, P-2 et P-3 présentent une corrélation significative avec les indices de végétation que ce soit pour NDVI que pour EVI. La corrélation de l'indice de végétation NDVI est plus importante avec la précipitation P-2, du mois $m-2$ avec un taux de significativité de 46% que ce soit avec NDVI qu'avec l'indice EVI. Malgré cela, la

² Kappa < 0.20 faible ; 0.21-0.40 passable ; 0.41-0.60 assez bon ; 0.61-0.80 bon ; 0.81-1.00 très bon

corrélation de ces indices avec la précipitation P-3, du mois $m-3$ est aussi significative à environ 40% avec un coefficient de corrélation de 0,627 pour NDVI et 0,641 pour EVI.

Au-delà du mois $m-3$, la corrélation entre les indices de végétations et les précipitations mensuelles ne sont plus significatives.

Tableau 10: Matrice de corrélation entre précipitations cumulées et indices de végétation

Variables	Pc1	Pc2	Pc3	Pc4	Pc5	Pc6	Pc7	Pc8	Pc9	Pc10	
NDVI	r	0,574	0,646	0,687	0,687	0,668	0,573	0,301	0,081	-0,004	0,000
	r^2	0,329	0,417	0,472	0,471	0,446	0,328	0,091	0,007	0,000	0,000
EVI	r	0,592	0,658	0,701	0,695	0,669	0,565	0,294	0,088	-0,002	0,002
	r^2	0,351	0,433	0,492	0,483	0,448	0,319	0,086	0,008	0,000	0,000

Le tableau 10 montre une corrélation significative avec les précipitations cumulées jusqu'au mois $m-10$. La corrélation entre les précipitations cumulées et les indices de végétations n'est plus significative au-delà de la précipitation cumulée $Pc7$. En fait, la corrélation entre les indices de végétations (NDVI, EVI) et les précipitations cumulées est plus forte avec la précipitation cumulée $Pc3$. L'indice NDVI est aussi fortement corrélé avec la précipitation cumulée $Pc4$ à un taux de significativité de 47%.

Les activités chlorophylliennes des forêts sèches, illustrées par les indices de végétation, sont donc plus dépendantes de l'accumulation des précipitations.

3.3. Analyse de la résilience spatio-temporelle des forêts sèches du Menabe

En faisant un échantillonnage systématique des pixels correspondants aux forêts de la Région de Menabe, les résultats suivants ont pu être avancés.

3.3.1. Analyse descriptive des valeurs de l'indice de végétation NDVI

L'évolution des valeurs de NDVI suivant les saisons sont cartographiées dans la carte 6. Cette carte évolutive présente la répartition des classes de valeurs de NDVI pour chaque année de référence et par saisons. En saison humide, la verdure des forêts persiste au cours des années étudiées du fait que les images sources sont prises aux mêmes mois (Mars). Cependant, en saison sèche, une diversification des couleurs est constatée; la forêt semble gagner de verdure à cause de la différence des mois d'acquisition des images de chaque année. Malgré cela, une partie de la forêt, au nord-est de la ville de Morondava garde encore une certaine verdure. Un changement spatio-temporel de verdure des forêts sèches est donc constaté.

Pour bien distinguer ce changement, une analyse descriptive des valeurs de NDVI a été réalisée. Pour se faire, 400 000 points géographiques environ, réparties de façon systématique sur les zones forestières de la Région, ont été pris comme échantillons pour chaque année de référence et par saison. De par cela, les moyennes des valeurs de NDVI par référentiels temporels ainsi que leurs écart-types sont présentées dans le tableau 11.

Tableau 11: Moyennes et écart-types des valeurs de NDVI de la forêt de Menabe

Statistique	NDVI saison sèche			NDVI saison humide		
	Époque 1	Époque 2	Époque 3	Époque 1	Époque 2	Époque 3
Moyenne	0,368	0,425	0,465	0,729	0,730	0,741
Ecart-type	0,083	0,093	0,080	0,076	0,050	0,079

La valeur moyenne de l'indice de végétation varie de 0,368 en saison sèche à 0,729 en saison humide pour l'époque 1 (année 2000). C'est l'époque qui présente la plus grande variation intra-annuelle ou inter-saisonnier. Tandis que la variation intra-annuelle de l'indice de végétation de l'époque 3 (année 2014) est la plus faible fluctuant, en moyenne entre 0,465 et 0,741.

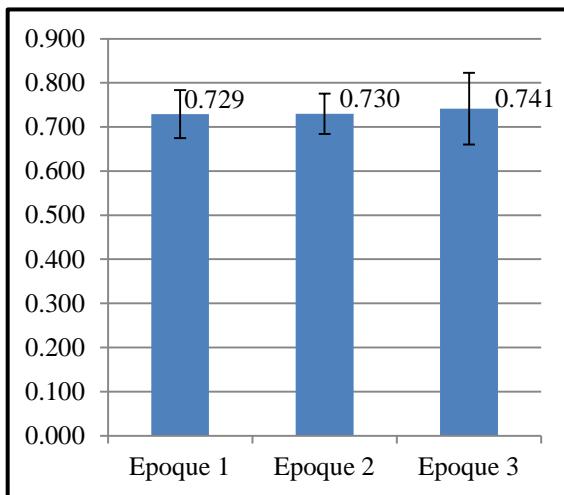


Figure 8: Evolution de la valeur moyenne de NDVI de la forêt en saison humide

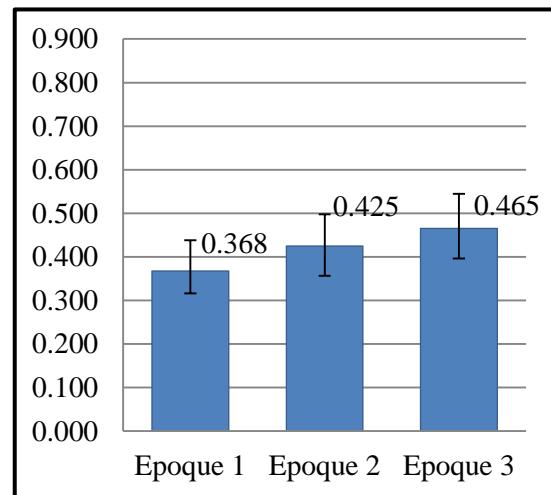
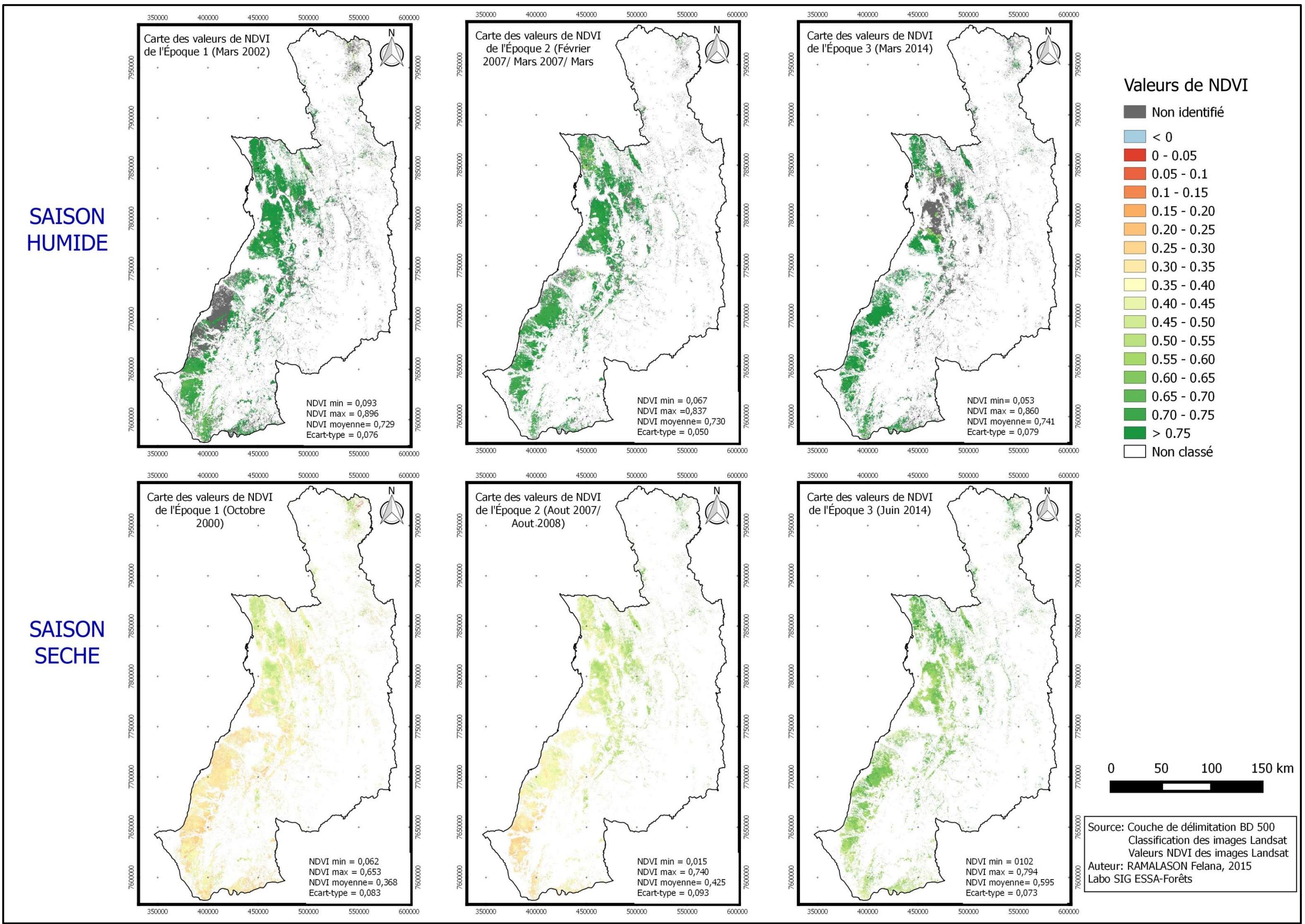


Figure 7: Evolution de la valeur moyenne de NDVI de la forêt en saison sèche

En fait, d'après le test de comparaison des valeurs des indices de végétation, les valeurs de NDVI, tant en saison humide qu'en saison sèche, sont significativement différentes avec un niveau de significativité de 0,05. Les valeurs de NDVI varient ainsi au cours des années.

La variation interannuelle de NDVI est très remarquée en saison sèche par rapport à la saison humide. En faisant référence aux trois époques étudiées avec un intervalle d'environ 7 ans, la valeur de NDVI la plus faible en saison sèche est de 0,368 (Époque 1) contre 0,465 (Époque 3) (Figure 8). La verdure des forêts de la région semble s'améliorer au cours ces trois époques de référence. En fait, l'image de la première époque a été prise en Octobre alors que celle des deux dernières époques en Aout.

Pour la saison humide, les images sont prises en Mars et les indices sont moins variés au cours des années. Les deux premières époques de référence présentent une faible variation de l'indice au niveau spatial contrairement à l'époque 3 (Figure 7). Ceci pourrait s'expliquer par l'inégalité de répartition des précipitations en 2013.



Carte 5: Carte évolutive des valeurs de l'indice NDVI

3.3.2. Analyse descriptive des valeurs l'indice de végétation EVI

Les résultats des cartes de valeurs de l'indice de végétation EVI évoquent une perte de verdure en saison humide et un assèchement des forêts durant les saisons sèches (Carte 6). Même si les images *Landsat* en saison sèche sont prises à des mois différents, les activités chlorophylliennes sont plus ou moins stables et moindres car les valeurs de EVI faible. Les forêts au nord de la ville de Morondava sont généralement plus résistantes (plus vertes) que celles situées au sud de cette ville. Ainsi, les valeurs de l'indice EVI évoluent dans le temps suivant les saisons et les années et dans l'espace.

Les points géographiques utilisés comme échantillon avec NDVI ont permis de réaliser l'analyse descriptive des valeurs de l'indice EVI dans le temps.

Les valeurs moyennes de l'indice de végétation EVI pour chaque époque avec leurs écart-types respectives sont présentées dans le tableau 12.

Tableau 12: Moyennes et écart-types des valeurs de l'indice EVI de la forêt de Menabe

Statistique	EVI saison sèche			EVI saison humide		
	Époque 1	Époque 2	Époque 3	Époque 1	Époque 2	Époque 3
Moyenne	0,281	0,299	0,275	0,659	0,622	0,552
Ecart-type	0,080	0,080	0,054	0,102	0,071	0,093

En saison sèche, la valeur de l'indice de végétation la plus élevée correspond à l'époque 2 (2007 et 2008) avec 0,299. Tandis qu'en saison humide, l'époque 1 correspond à la valeur de EVI la plus élevée (0,659). Ainsi, l'époque 1 présente une importante variation inter-saisonnier de la valeur de EVI alors que l'époque 3 ne fluctue en moyenne qu'entre 0,275 en saison sèche et 0,552 en saison humide. Dans ce sens, les résultats d'analyse de l'indice NDVI coïncident avec ceux de l'indice EVI.

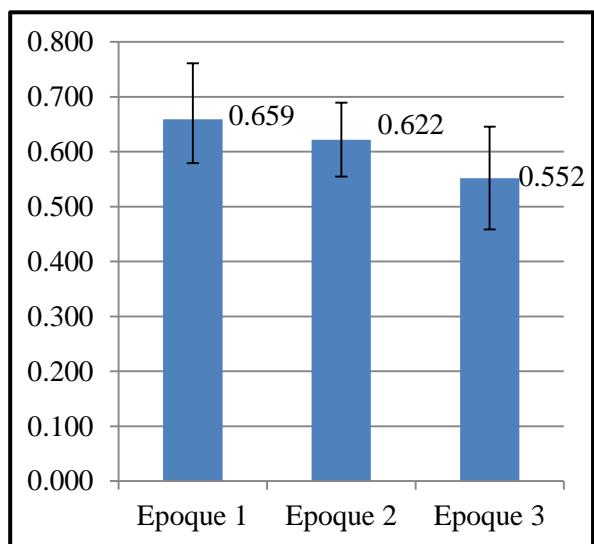


Figure 9: Evolution de la valeur moyenne de l'indice EVI de la forêt en saison sèche

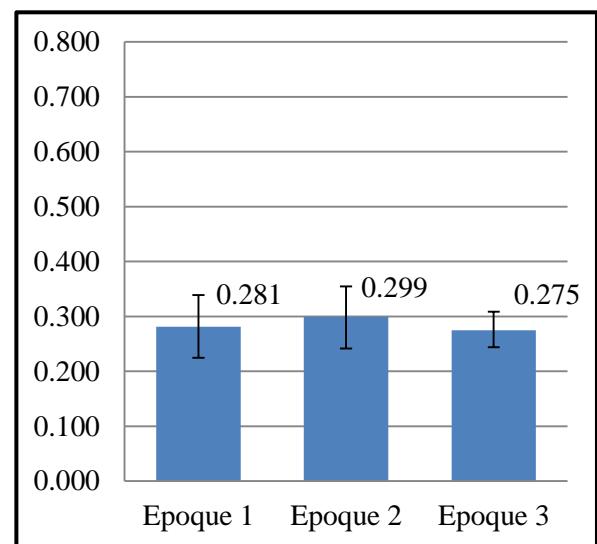


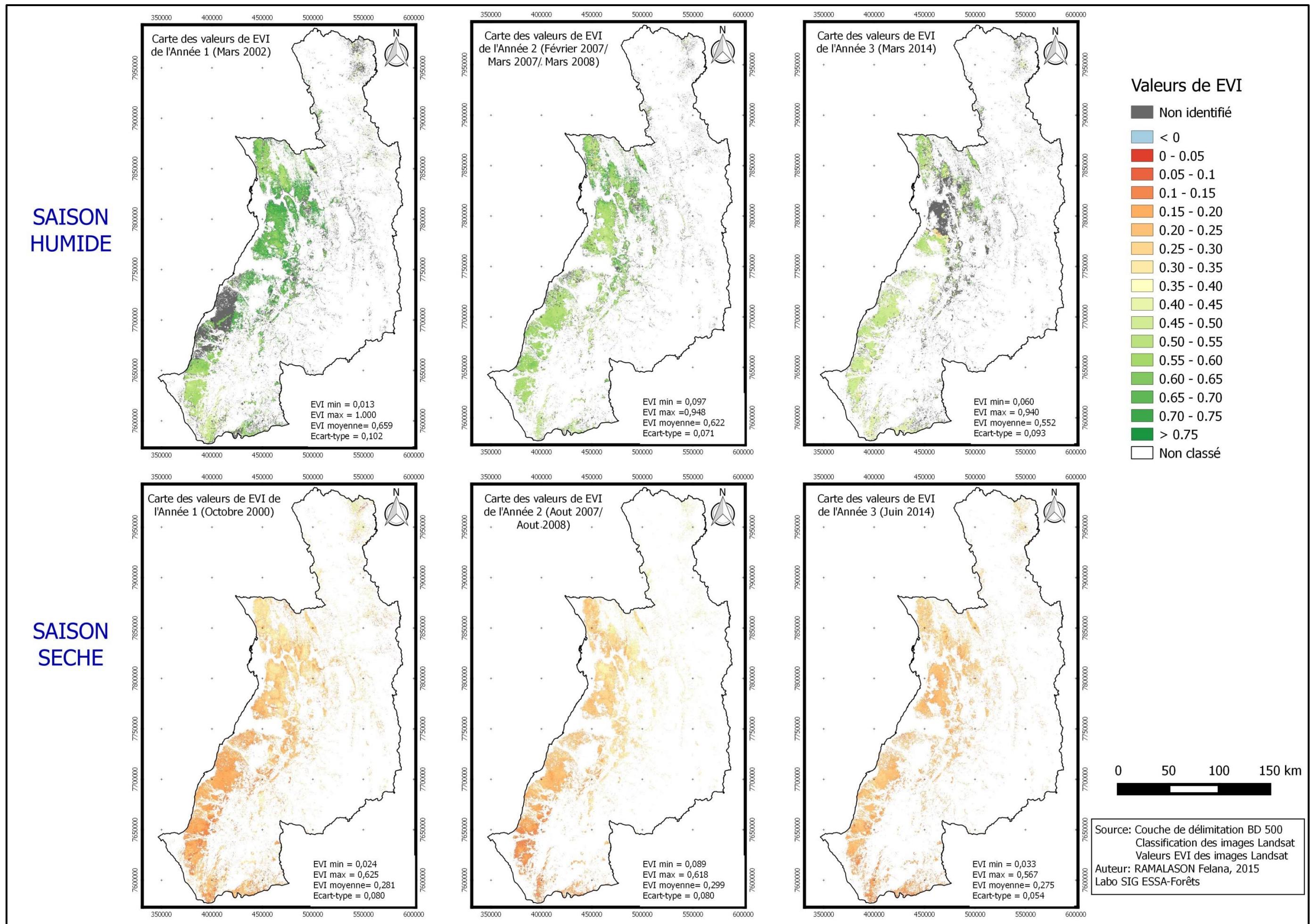
Figure 10: Evolution de la valeur moyenne de l'indice EVI de la forêt en saison humide

D'après le test de comparaison des valeurs des indices de végétation, les valeurs de EVI, tant saison humide qu'en saison sèche, sont significativement différentes avec un niveau de significativité de 0,05. Une variation des valeurs de EVI est donc constatée durant la période étudiée.

D'après les figures 9 et 10, la valeur de l'indice EVI varie moins au cours des trois référentiels temporels en saison sèche. Elle se trouve généralement entre 0,275 et 0,299. Ceci peut s'expliquer par le faible ressource en eau en cette saison et par la suite l'état de santé de la végétation se dégrade. En saison humide, la valeur de EVI connaît une regression au cours des trois époques de référence.

Le résultat d'analyse de EVI est différent de celle de NDVI, du fait que l'indice EVI intègre le facteur d'ajustement du sol et améliore la réponse de la végétation face aux distorsions de la lumière refléchie dues aux particules dans l'air et au fond du sol. Ce qui constitue une justification de la différence entre les résultats de EVI et de NDVI.

Cependant, cette analyse descriptive de l'évolution des indices de végétations au cours des années de référence ne permet pas de percevoir la résilience des forêts par rapport aux précipitations. Par conséquent, pour effectuer l'analyse de la résilience des forêts de la Région suivant les variabilités des précipitations, un modèle théorique des indices de végétation en fonction des précipitations a été établi afin de ressortir les valeurs des indices théoriques. En fait, ces valeurs servent de référence et permettent de déterminer la résilience des forêts face aux variabilités des précipitations en les comparant avec les indices de végétation réellement observés.



Carte 6: Carte évolutive des valeurs de l'indice EVI

3.4. Etablissement d'un modèle théorique des indices de végétation en forte corrélation avec les précipitations

Afin de déterminer la résilience de la forêt, les valeurs des indices de végétations observées et celles estimées à partir des précipitations ont été comparées. D'après les matrices de corrélations précédentes, les précipitations : P_0 , P_{-1} , P_{-2} , P_{-3} , P_{c1} , P_{c2} , P_{c3} , P_{c4} , P_{c5} , P_{c6} et P_{c7} présentent des corrélations significatives tant avec l'indice de végétation NDVI qu'avec EVI (Tableau 9 et 10). Pour éliminer l'effet des précipitations sur les valeurs des indices de végétation, ces types de précipitations citées ci-dessus sont intégrés dans le modèle théorique. De ce fait, l'équation de régression est non linéaire, plus précisément du type polynomiale du second degré pour les deux indices.

3.4.1. NDVI

3.4.1.1. Modèle théorique

L'équation de NDVI théorique est donnée par l'expression :

Équation 4: Equation de régression de NDVI en fonction des précipitations

$$NDVI_{th} = 0,21 - 8,20 \times 10^{-3} \times (P_0) + 1,51 \times 10^{-3} \times (P_{-1}) + 1,70 \times 10^{-3} \times (P_{-2}) + 2,67 \times 10^{-3} \times (P_{-3}) - 2,07 \times 10^{-3} \times (P_{c4}) + 4,51 \times 10^{-4} \times (P_{c5}) + 8,55 \times 10^{-4} \times (P_{c6}) - 2,69 \times 10^{-5} \times (P_{c7}) - 5,22 \times 10^{-7} \times (P_0)^2 - 7,85 \times 10^{-8} \times (P_{-1})^2 - 2,63 \times 10^{-7} \times (P_{-2})^2 - 9,48 \times 10^{-7} \times (P_{-3})^2 - 1,35 \times 10^{-7} \times (P_{c1})^2 + 4,64 \times 10^{-7} \times (P_{c2})^2 - 1,21 \times 10^{-6} \times (P_{c3})^2 + 1,87 \times 10^{-6} \times (P_{c4})^2 - 6,10 \times 10^{-7} \times (P_{c5})^2 - 8,57 \times 10^{-7} \times (P_{c6})^2 + 1,06 \times 10^{-7} \times (P_{c7})^2$$

Le coefficient de détermination de ce modèle est de 0,786. Cet indice théorique est donc en forte corrélation avec les précipitations.

3.4.1.2. Validation du modèle

La figure 11 montre les résidus des indices de végétation afin de déterminer la qualité du modèle théorique. D'une manière générale, les deux points de chaque variable se rapprochent de la droite ($NDVI_{th} = NDVI_{obs}$). Néanmoins, certains points des variables non expliquées s'éloignent de celles-ci comparées aux variables expliquées. D'après la comparaison des moyennes, p-value calculée (0,349) est supérieure au niveau de signification au seuil de 0,05, donc il n'y a pas de différence significative entre les deux variables. Par conséquent, le modèle est acceptable.

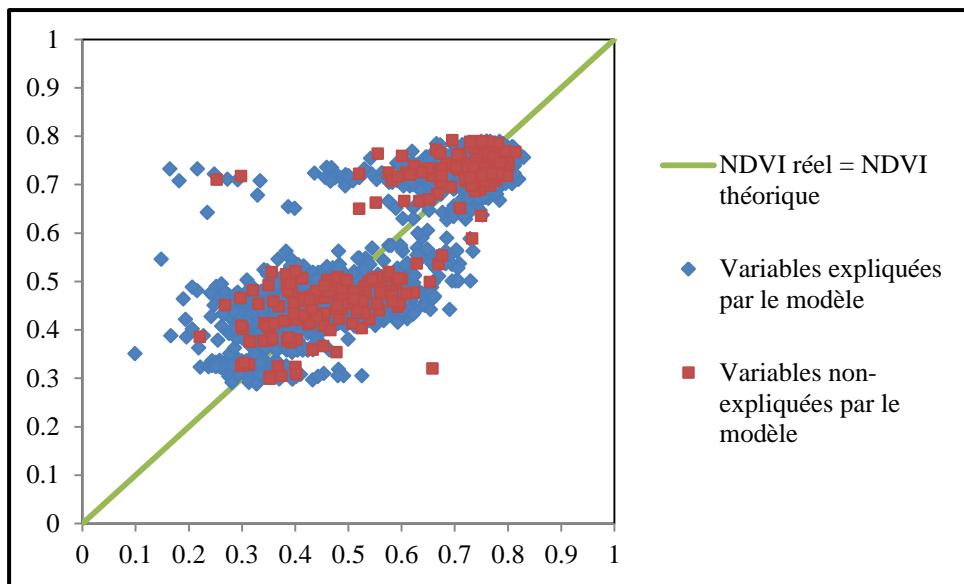


Figure 11: Graphique des résidus de NDVI

3.4.2.EVI

3.4.2.1. Modèle théorique

L'équation de l'indice théorique EVI est ainsi donnée par l'expression :

Équation 5:Equation de régression de l'indice EVI en fonction des précipitations

$$EVI_{th} = 0,15 + 2,83 \times 10^{-3} \times (P_0) + 1,72 \times 10^{-3} \times (P_{-1}) + 1,14 \times 10^{-3} \times (P_{-2}) + 3,40 \times 10^{-3} \times (P_{-3}) - 1,81 \times 10^{-3} \times (P_{c4}) + 3,98 \times 10^{-4} \times (P_{c5}) + 5,95 \times 10^{-4} \times (P_{c6}) - 1,60 \times 10^{-4} \times (P_{c7}) - 3,57 \times 10^{-6} \times (P_0)^2 - 1,01 \times 10^{-6} \times (P_{-1})^2 + 3,59 \times 10^{-7} \times (P_{-2})^2 + 5,24 \times 10^{-8} \times (P_{-3})^2 + 4,51 \times 10^{-7} \times (P_{c1})^2 + 9,24 \times 10^{-7} \times (P_{c2})^2 - 1,83 \times 10^{-6} \times (P_{c3})^2 + 2,54 \times 10^{-6} \times (P_{c4})^2 - 1,33 \times 10^{-6} \times (P_{c5})^2 - 6,71 \times 10^{-7} \times 10^{-7} \times (P_{c6})^2 + 2,08 \times 10^{-7} \times (P_{c7})^2$$

Le coefficient de détermination de ce modèle est de 0,801. L'indice théorique EVI_{th} est donc en forte corrélation avec les précipitations.

3.4.2.2. Validation du modèle

D'après la figure suivante, les points de chaque variables se rapprochent de la droite ($EVI_{th} = EVI_{obs}$). Néanmoins, certains points des variables non expliquées s'éloignent de celle-ci comparée aux variables expliquées.

D'après la comparaison des moyennes, p-value calculée (0,286) est supérieure au niveau de signification au seuil de 0,05, donc il n'y a pas de différence significative entre les deux variables. Par conséquent, le modèle est validé.

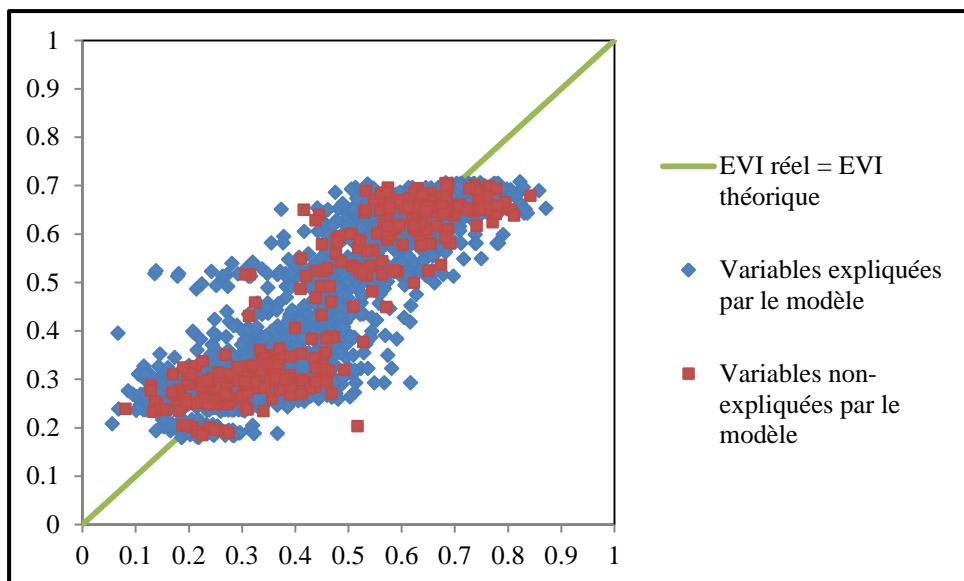


Figure 12: Graphique des résidus de EVI

3.5. Analyse de la résilience des forêts sèches

Les valeurs théoriques des indices de végétation vont servir ainsi de référence pour évaluer si la forêt perd ou gagne de verdure au cours des années. Dans le cas où, l'indice de végétation réel ou observé est supérieur à l'indice théorique, la forêt connaît un gain de verdure (progression). Dans le cas contraire, elle est vulnérable vis-à-vis des variabilités des précipitations et tend à se dégrader (régression). Si l'indice de végétation observé est égal à l'indice estimé, l'état de la forêt n'est ni en progression, ni en régression (stabilité).

La figure 13 indique l'évolution des indices de végétation observés et estimés suivant les variabilités des précipitations. Le tableau qui a permis d'élaborer cette figure est présenté dans l'Annexe 10.

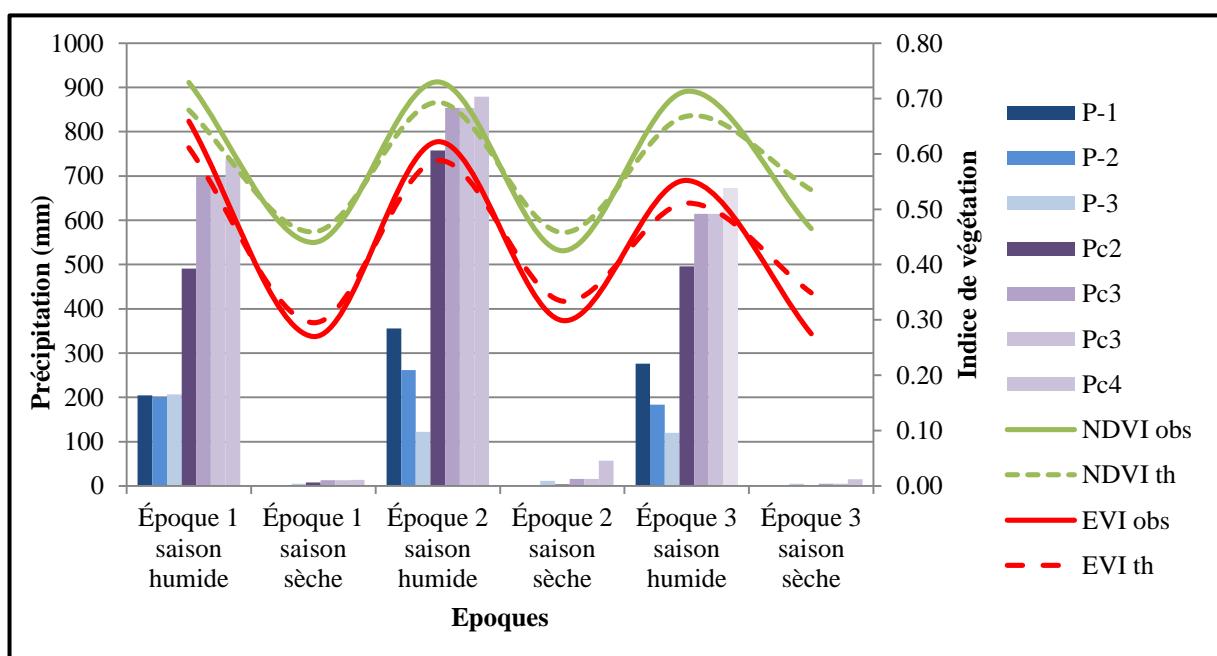


Figure 13: Evolution des indices de végétation observés et estimés suivant les variabilités des précipitations

En effet, en saison sèche, la valeur des indices de végétation observés est généralement inférieure à la valeur théorique. Par contre, en saison humide, lors des précipitations importantes, les valeurs observées sont toutes supérieures aux valeurs théoriques.

Par conséquent, la résilience vis-à-vis des variabilités des précipitations est en diminution au cours des années suivant les saisons. La saison sèche se distingue généralement par une perte de verdure alors que la saison humide, un gain de verdure est constaté. De plus, la figure 13 indique aussi la variabilité des précipitations des 3 époques étudiées notamment de l'époque 2 et l'époque 3.

Afin de bien discerner cette résilience des forêts sèches du Menabe, les valeurs observées et estimées des indices de végétations ont été soustraits. D'après le test de comparaison des moyennes, les écarts entre les valeurs des indices réels et les indices théoriques des trois référentiels temporels sont significativement différent. En fait, les valeurs de p-value ($<0,0001$) sont toutes inférieures au niveau de significativité (0,05).

3.5.1.NDVI

Les écarts moyens entre NDVI observée et NDVI théorique avec leur variation en générale pour chaque saison sont présentés dans les figures 14 et 15.

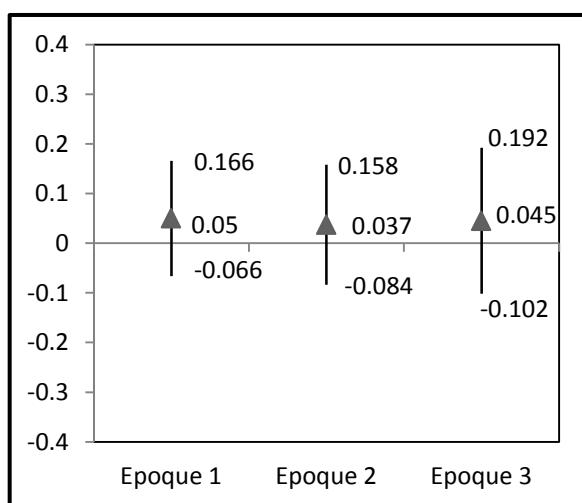


Figure 14: Evolution de la moyenne et la variation de l'écart entre NDVI observé et NDVI théorique en saison humide

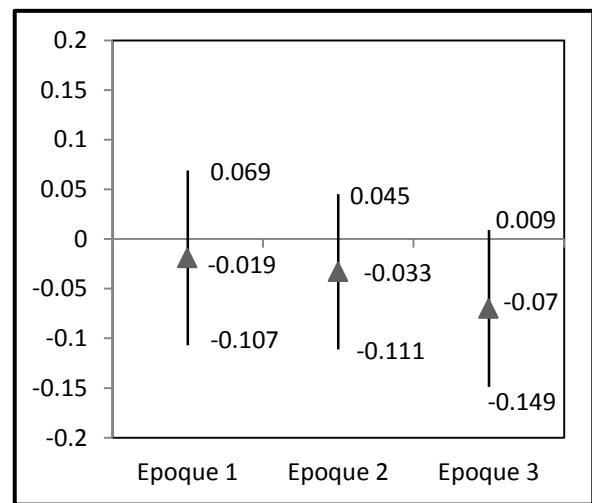


Figure 15: Evolution de la moyenne et la variation de l'écart entre NDVI observé et NDVI théorique en saison sèche

En saison sèche, la forêt connaît une régression pour les trois référentiels temporels. L'époque 3 présente l'écart la plus importante du fait que cette époque fait partie des années à faibles précipitations. De plus cette tendance descendante de l'écart entre NDVI observé et théorique confirme la dégradation des forêts sèches d'où la diminution de sa résilience.

La forêt sèche gagne de verdure en saison humide pour les trois référentiels temporels. L'époque 1 correspond à l'écart la plus élevée avec l'importance des précipitations durant cette période. L'époque 2 possède le plus faible écart. Cela peut s'expliquer par la composition de l'image de base pour cette époque combinant l'année 2007 et 2008. Lors de l'époque 3, l'écart connaît une progression avec une forte variation de -0,102 à 0,192.

3.5.2.EVI

Comme l'indice de végétation NDVI, les figures 16 et 17 indiquent les écarts moyens entre EVI réel et EVI théorique pour les deux saisons.

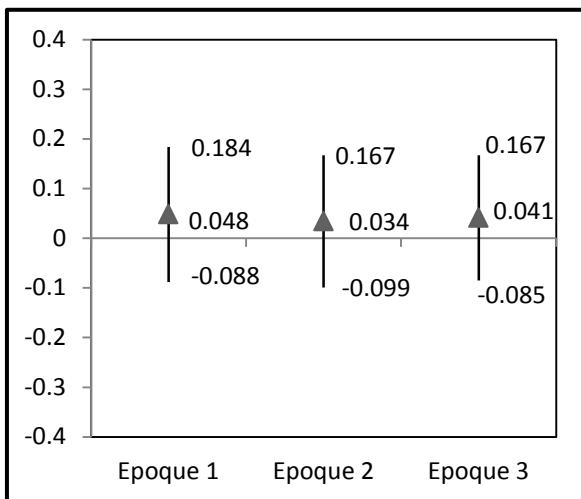


Figure 16: Evolution de la moyenne et la variation de l'écart entre EVI observé et EVI théorique en saison humide

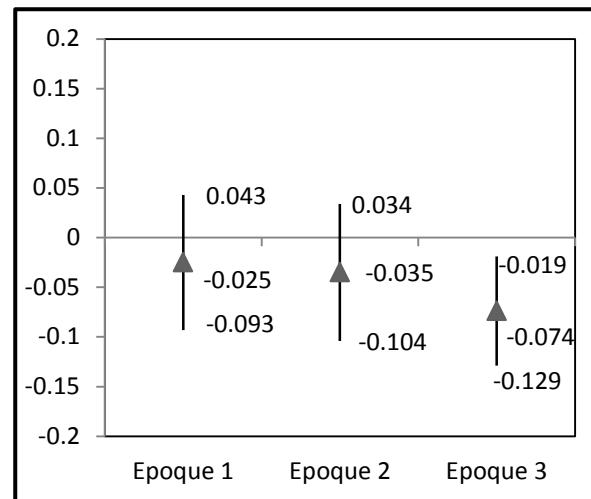


Figure 17: Evolution de la moyenne et la variation de l'écart entre EVI observé et EVI théorique en saison sèche

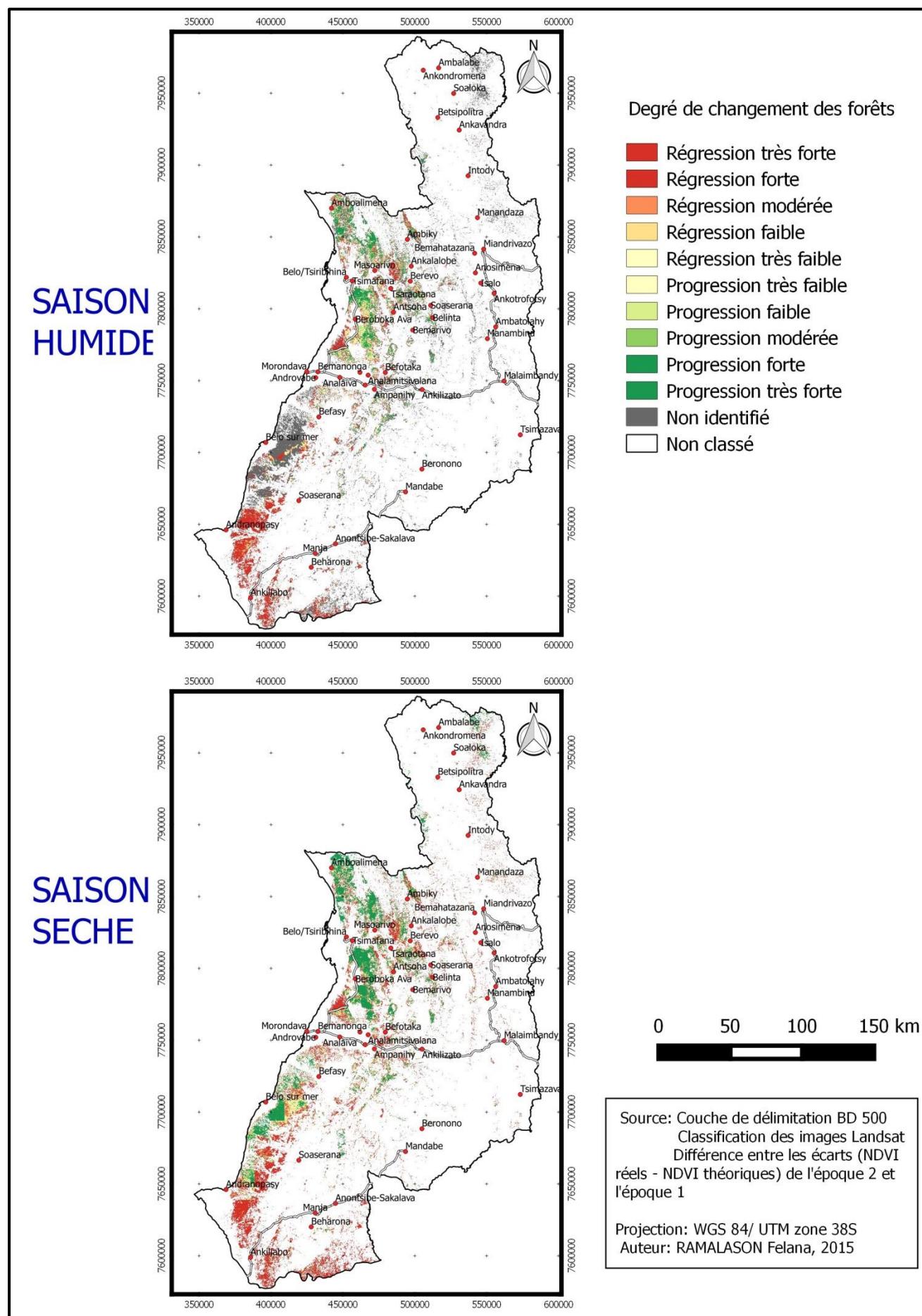
Tant en saison sèche que humide, les écarts entre les valeurs des indices de végétation observées et théoriques sont en diminution.

Pour la saison sèche, les écarts entre les deux valeurs de l'indice de végétation EVI sont négatifs. De par cela, une régression de la verdure des forêts sèches persistent au cours des trois époques de référence. Les forêts sèches connaissent donc une diminution de résilience vis-à-vis des variabilités des précipitations.

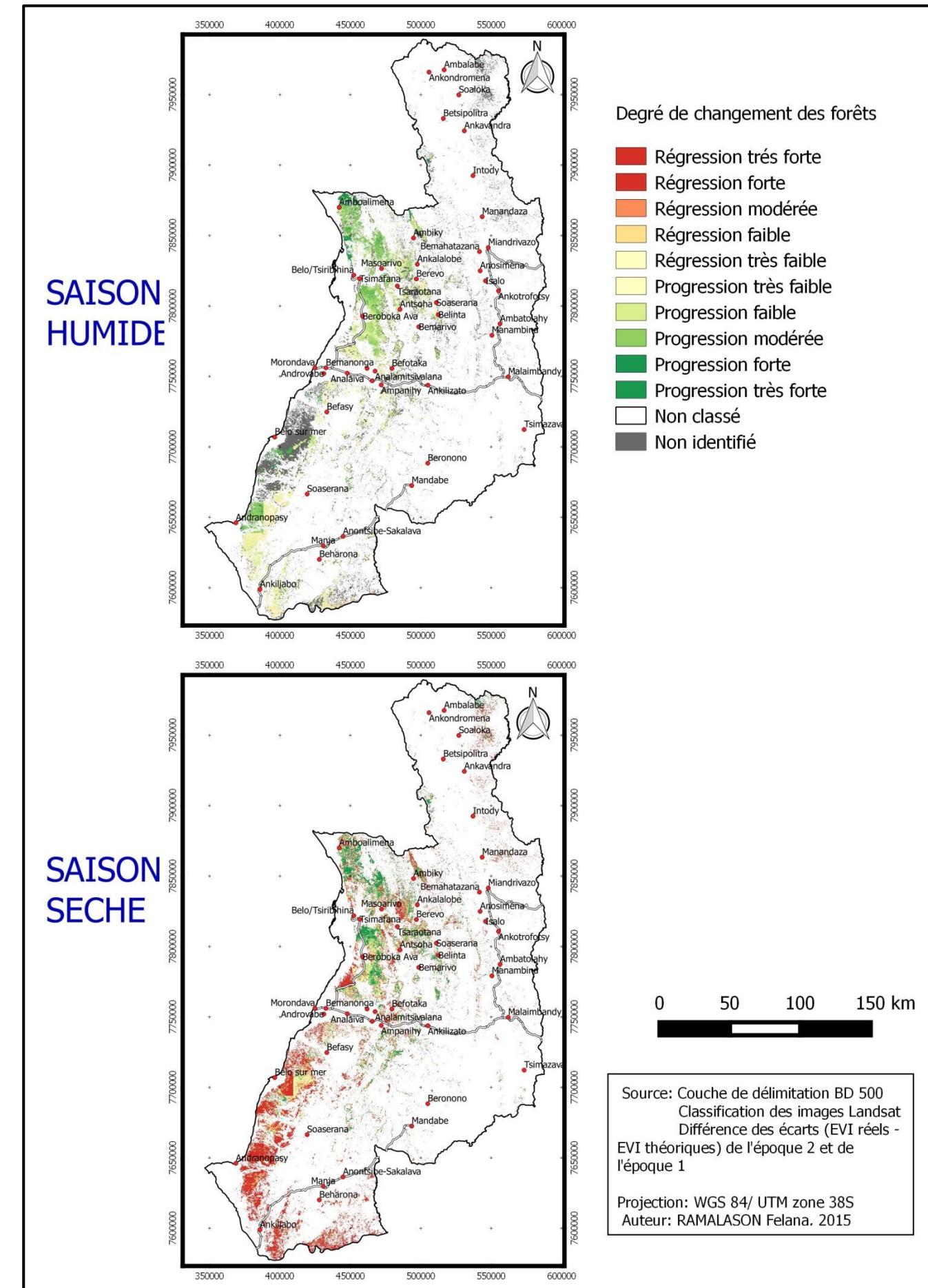
En saison humide, les écarts sont tous positifs, dans ce cas, les forêts sèches de la Région s'améliorent avec une faible progression pour l'époque 2 (0,034) et une progression élevée pour le premier et le troisième référentiel temporel (0,041 et 0,048). En cette saison, les forêts connaissent une faible diminution de résilience.

3.5.3.Etude de la résilience des forêts sèches de Menabe au niveau spatial

En cartographiant la différence entre les écarts (indices réels et théoriques) des deux premières époques, la résilience face aux variabilités des précipitations de chaque bloc de forêt dans la Région de Menabe pourrait être déterminée en cette période (2000-2007). Si la différence est positive, il y a donc progression (plus résilient aux variabilités des précipitations) et si elle est négative, la résilience de la forêt est en régression. La forêt devient moins résiliente aux variabilités des précipitations. Globalement, selon les cartes 7 et 8, la résilience des forêts sèches du Menabe peut être identifiée que ce soit avec l'indice NDVI ou l'indice EVI. Les forêts situées au nord de la ville de Morondava sont ainsi plus résilientes aux variabilités des précipitations par rapport à celles situées au sud de cette ville.



Carte 7: Carte de résilience des forêts du Menabe par analyse de l'indice NDVI



Carte 8: Carte de résilience des forêts du Menabe par analyse de l'indice EVI

3.6. Effets de la variabilité des précipitations sur les lisières des forêts sèches

Le second objectif de cette étude est de comparer les effets de la variation des précipitations sur les lisières et les noyaux des forêts sèches. La lisière, comme étant la zone de transition entre le milieu forestier et non forestier, est délimitée à 100 mètres de largeur à partir de la limite de la forêt pour ce présent travail. En effet, avec l'étude de la variation des valeurs (indices réels – indices théoriques) au cours des années, la résilience des forêts pourrait être déterminée. Plus la variation de cette valeur est importante, plus la forêt est vulnérable aux variabilités de précipitations. Autrement dit, plus cette variation est faible, plus la forêt est plus résiliente aux variabilités de précipitations.

Le test de comparaison entre les moyennes des écarts des indices réels et théoriques affirme une différence significative entre les lisières et les noyaux car les valeurs de p-value calculée ($<0,0001$) sont toutes inférieures au niveau de significativité (0,05). Ces différences sont ainsi analysées dans les paragraphes ci-après.

3.6.1. NDVI

3.6.1.1. Saison sèche

Les figures 18, 19 et 20 indiquent les variations des écarts entre NDVI réels et estimés pour les trois référentiels temporels durant la saison sèche.

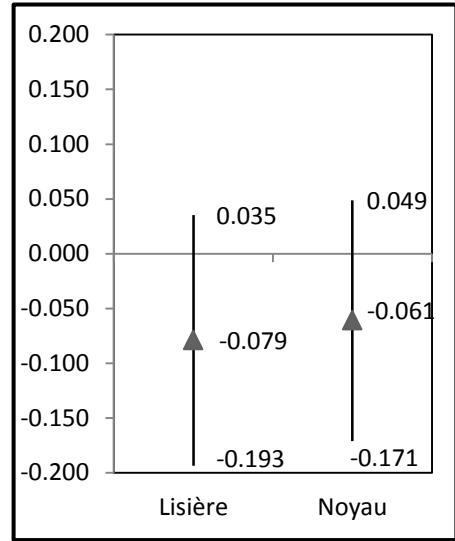
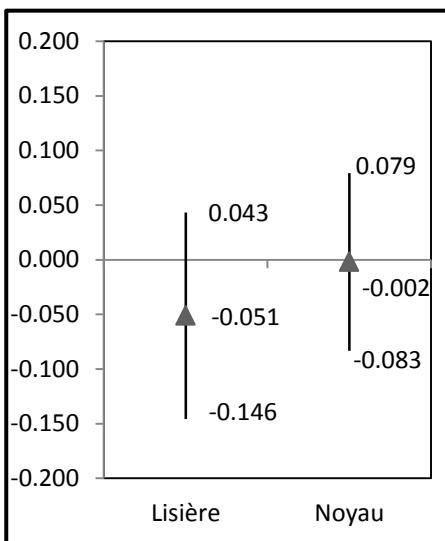
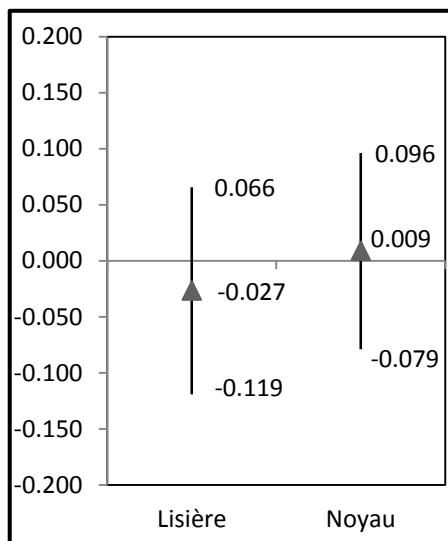


Figure 18: Comparaison de la variation des écarts (NDVI réels –NDVI théoriques) de l'époque 1 en saison sèche entre lisière et noyau

Figure 19: Comparaison de la variation des écarts (NDVI réels –NDVI théoriques) de l'époque 2 en saison sèche entre lisière et noyau

Figure 20: Comparaison de la variation des écarts (NDVI réels –NDVI théoriques) de l'époque 3 en saison sèche entre lisière et noyau

En termes de moyenne, les écarts entre NDVI réels et théoriques des lisières sont tous inférieurs à ceux des noyaux des forêts. Autrement dit, la perte de verdure est plus importante en lisière que dans le noyau forestier. En termes de variation élaborée à partir des écart-types, ces écarts varient moins en noyau qu'en lisière pour les trois référentiels. Une différence significative est donc constatée entre

lisières et noyaux forestiers. Par conséquent, les noyaux des forêts sont plus résilients à la variation de la précipitation par rapport aux lisières.

3.6.1.2. Saison humide

De même pour la saison humide, les écarts NDVI réels et estimés des trois époques de référence sont donnés par les figures 21, 22 et 23.

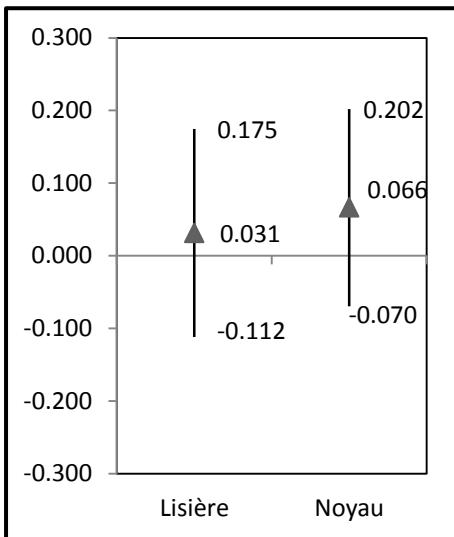


Figure 21: Comparaison de la variation des écarts (NDVI réels – NDVI théoriques) de l'époque 1 en saison humide entre lisière et noyau

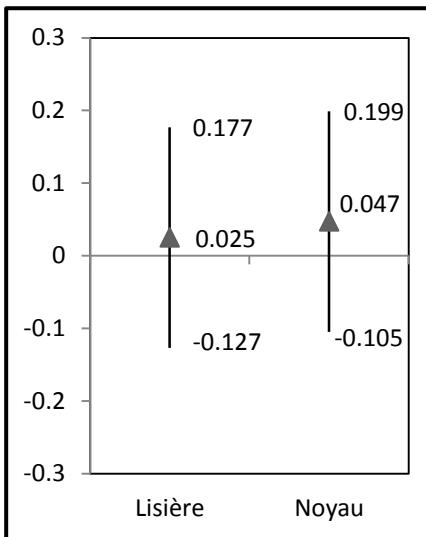


Figure 22: Comparaison de la variation des écarts (NDVI réels – NDVI théoriques) de l'époque 2 en saison humide entre lisière et noyau

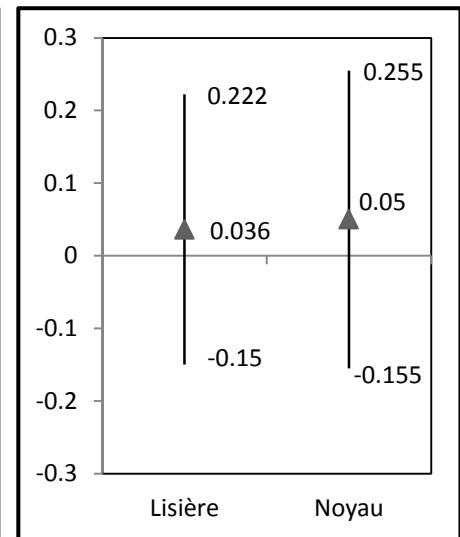


Figure 23: Comparaison de la variation des écarts (NDVI réels – NDVI théoriques) de l'époque 3 en saison humide entre lisière et noyau

Pour les trois époques, les écarts moyens entre NDVI réels et théoriques des lisières sont tous inférieurs à ceux des noyaux des forêts. Les noyaux gagnent donc plus de verdure que les lisières. De plus, la lisière de la deuxième époque connaît une faible régression. Ce qui confirme la diminution de la verdure dans cette partie de la forêt. Pour les deux premières époques, la variation au niveau du noyau est faible par rapport à la variation de la lisière. Ce qui n'est pas le cas pour l'époque 3.

3.6.2. EVI

3.6.2.1. Saison sèche

Comme les résultats précédents avec NDVI, en se référant aux moyennes, les valeurs des écarts (EVI réels – EVI estimés) des lisières sont inférieures aux noyaux. En particulier, pour l'époque 1, le noyau forestier connaît une faible progression (0,015). Les noyaux sont donc plus résistants aux variabilités de précipitation comparés aux lisières. En termes de variations, les valeurs des écarts (EVI réels – EVI estimés) pour les lisières fluctuent généralement entre -0,235 et 0,074 alors qu'elles varient de -0,221 à 0,093 pour les noyaux (Figures 24, 25 et 26). Les lisières sont ainsi plus vulnérables aux variabilités des précipitations par rapport aux noyaux. Autrement dit, la résilience des lisières face aux variabilités des précipitations est faible comparée à celle des noyaux.

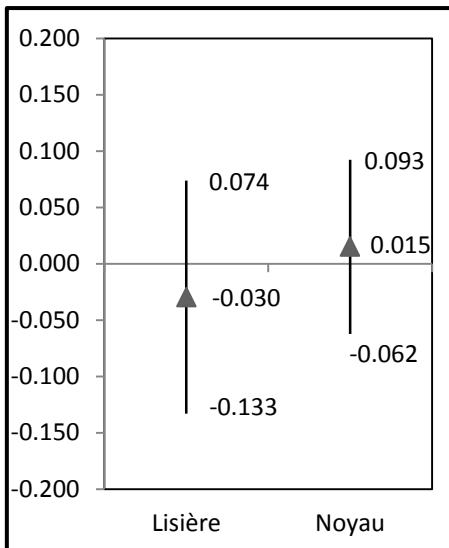


Figure 24: Comparaison de la variation des écarts (EVI réels -EVI théoriques) de l'époque 1 en saison sèche entre lisière et noyau

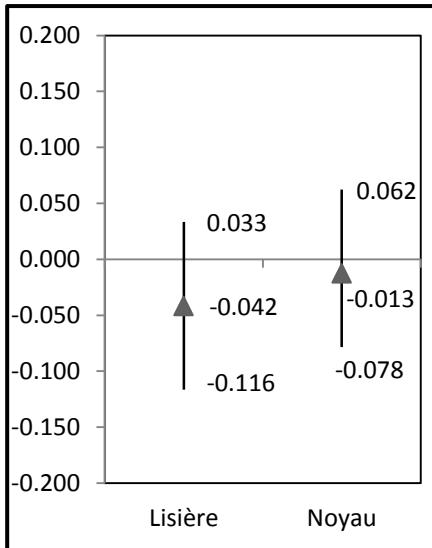


Figure 25: Comparaison de la variation des écarts (EVI réels -EVI théoriques) de l'époque 2 en saison sèche entre lisière et noyau

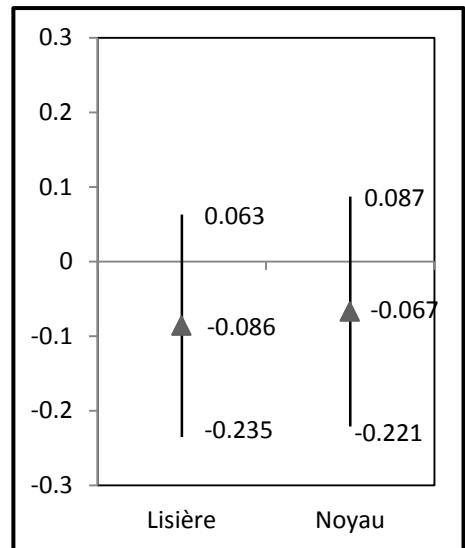


Figure 26: Comparaison de la variation des écarts (EVI réels -EVI théoriques) de l'époque 3 en saison sèche entre lisière et noyau

3.6.2.1. Saison humide

En analysant les variations de l'écart (EVI réels - EVI théoriques) des trois époques de référence en saison humide d'une part des lisières et d'autre part des noyaux, les figures 27, 28 et 29 ont pu être présentées afin de discerner les effets de la variation des précipitations sur ces parties des forêts sèches.

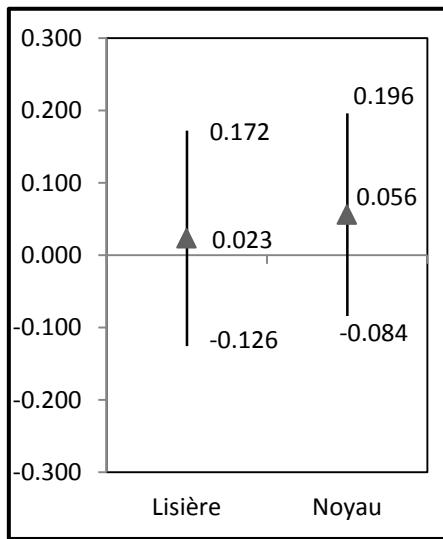


Figure 27: Comparaison de la variation des écarts (EVI réels -EVI théoriques) de l'époque 1 en saison humide entre lisière et noyau

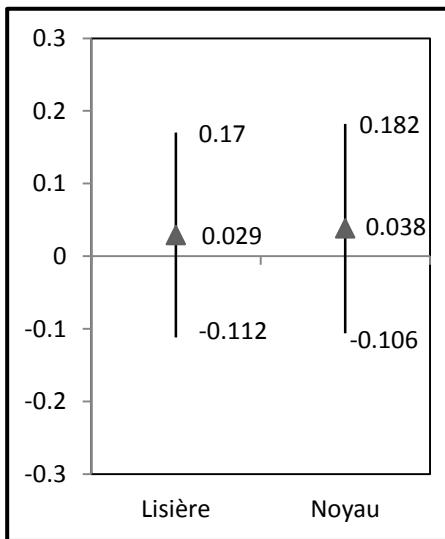


Figure 28: Comparaison de la variation des écarts (EVI réels -EVI théoriques) de l'époque 2 en saison humide entre lisière et noyau

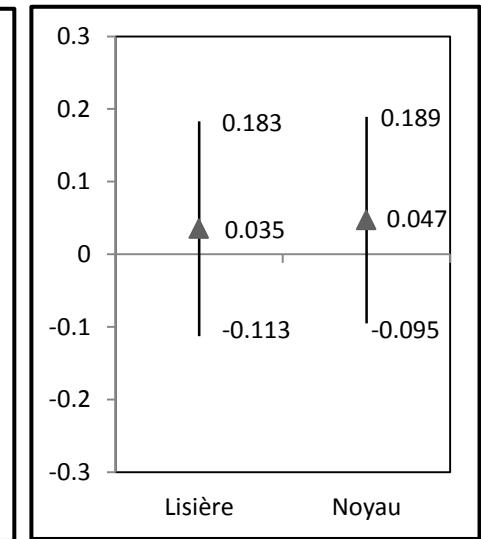


Figure 29: Comparaison de la variation des écarts (EVI réels -EVI théoriques) de l'époque 3 en saison humide entre lisière et noyau

En saison humide, les écarts (EVI observé – EVI théorique) des noyaux sont tous supérieurs à ceux des lisières en termes de moyenne. En faisant référence aux variations, ces valeurs pour les noyaux fluctuent moins comparées aux lisières. Alors, les lisières sont plus vulnérables aux variabilités des précipitations que les noyaux des forêts sèches de la Région Menabe.

*Discussions et
recommandations*

4. DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

4.1. Sur la méthodologie

4.1.1. Données météorologiques

En comparant la courbe ombrothermique de la Région Menabe sur 30 ans (1961-1990), issue de la station météorologique de Morondava avec celle établie à partir des images satellites météorologiques sur 13 ans, la durée des deux saisons étudiée pour chacun des deux cas est différente. La durée de saison de pluie est plus large avec les données sur 13 ans qu'avec ceux sur 30 ans. En effet, les images satellites météorologiques fournissent des données réparties sur la partie de la région toute entière alors que les données sur 30 ans n'appartiennent qu'à une seule station, celle de Morondava. Ce qui explique ainsi la variabilité au niveau spatiale du climat dans la Région du Menabe.

Les données issues des stations météorologiques donnent plus de précision sur les précipitations réellement tombées sur la région par rapport aux données fournies par des images satellites avec une résolution spatiale faible. Cependant, dans la Région Menabe, il n'existe qu'une seule station météorologique (Morondava) et parfois cette station n'est pas fonctionnelle due aux usures des matériels. Ainsi, pour rapprocher plus de la réalité, les données météorologiques fournies par les images satellites sont calibrées à celles des stations existantes. Grâce à ces données météorologiques, cette présente étude a pu être réalisée.

Cette étude serait plus optimiser en utilisant des données de précipitations de même résolution que les images *Landsat* (30 x 30m) en mesurant la hauteur des pluies pour chaque surface. Toutefois, l'obtention de ces données demeure encore difficile dans sa réalisation.

4.1.2. Elaboration d'un modèle théorique (indices de végétations- précipitations) et comparaison avec les valeurs réels

Plusieurs auteurs ont utilisé cette méthode pour déterminer le comportement des végétations face aux variabilités des précipitations. Cette méthode est aussi appelée : « Méthode des résidus ». En fait, les résidus sont l'écart entre la valeur de l'indice de végétation observé et celui estimé (EVANS & GEERKEN, 2004). L'étude de la couverture au Sahel vis à vis de la précipitation, inspirée par les travaux de Evans et Geerken, en 2004, a été réalisée en deux temps, d'une part entre 1982 et 2003 dans la partie ouest du Sahel (HERRMANN *et al.*, 2005) et d'autre part entre 1982 et 2002 à l'échelle régionale et sub-continentale (EMETERIO *et al.*, 2009) en utilisant l'indice de végétation NDVI. Une autre étude réalisée à Madagascar avait aussi utilisé cette méthode de résidu dans l'analyse de la dynamique de la végétation des savanes en lien avec l'usage des feux dans le bassin versant de Marovoay par l'intermédiaire de l'indice de végétation NDVI (JACQUIN, 2010). L'étude du comportement des forêts de la Région Anosy, dans la partie sud-ouest de Madagascar, a aussi utilisé cette méthode de résidus avec l'indice de végétation NDVI durant la période 1984 à 2009. (RAKOTO, 2011)

4.2. Sur les résultats

4.2.1. Evolution de la surface forestière

Comme la superficie forestière de la Région du Menabe diminue progressivement au cours des années, l'étude de son évolution constitue une importance primordiale pour avoir la limite des forêts pour les trois époques de référence. De plus, elle permet de comparer les résultats obtenus par rapport aux résultats des études antérieures.

Tableau 13: Comparaison des résultats sur l'évolution de la superficie avec les autres études

Auteurs	Filtrage	1990	2000	2005	2007	2010	2014
MEFT <i>et al.</i> , 2009	2 ha	958 988	906 345	879 429	-	-	-
ONE <i>et al.</i> , 2013	1 ha	941 852	888 059	861 059	-	835 229	-
Auteur, 2015	2 ha	-	947 627	-	849 349	-	766 238

Source : MEFT *et al.*, 2009 ; ONE *et al.*, 2013 ; Auteur, 2015

La superficie forestière ressortie en 2000 dans ce présent mémoire est relativement élevée par rapport aux études antérieures (Tableau 13). En fait, ces derniers n'ont considérés que les forêts naturelles non dégradées alors que c'est n'est pas le cas pour ce présent travail. Malgré cela, la surface des forêts en 2007 obtenue se situe entre celle en 2005 et en 2010 d'après l'ONE, en 2013. Les résultats sur l'évolution forestière de cette étude sont donc acceptables vis-à-vis des études antérieures.

4.2.2. Corrélation (indices de végétation- précipitation)

Divers auteurs ont travaillés sur la corrélation des indices de végétation des forêts sèches avec les précipitations.

Une étude à l'échelle mondiale sur la relation entre la phénologie des différents types de végétation avec la pluviométrie et la température affirme une corrélation des forêts sèches via l'indice EVI avec la précipitation cumulée (coefficient de corrélation : 0,76). (CLINTON *et al.*, 2014)

L'analyse de la performance des indices de végétation (NDVI, EVI) dans la région Pantanal (en Amérique du Sud) durant la saison sèche et humide, en 2011, a donné les résultats suivants : tant en saison humide que sèche, seule la corrélation de NDVI est significative avec les précipitations cumulées. Le coefficient de corrélation en saison sèche est de 0,25 alors qu'en saison humide il est de 0,21. (VIANA & ALVALA, 2011)

La corrélation entre la phénologie des différents types de forêts en Inde à partir de l'indice NDVI avec les précipitations cumulée durant chaque période de 10 jours a fait objet de recherche en 2006. Elle est significative avec les précipitations de la 4^{ème} période avant l'acquisition de l'image (coefficient de corrélation : 0,672) et avec les précipitations cumulées des trois premières périodes étudiées (coefficient de corrélation : 0,725). (PRASAD *et al.*, 2007)

Une étude comparative de la réponse des diverses indices de végétation des forêts décidues tropicales a été aussi réalisé, en 2011, et a donné le résultat suivant: faible corrélation entre les indices et les précipitations et pas de différence significative entre eux (coefficient de corrélation NDVI : 0,45 et EVI : 0,56). (BONIFAZ-ALFONZO, 2011)

Selon Herrmann, en 2005, les précipitations apparaissent comme le facteur de cause dominant dans l'augmentation de la verdure des végétations. (HERRMANN & HUTCHINSON, 2005)

RAKOTO, en 2011, avait effectué l'analyse des comportements des différents types de forêts (forêts humides, de transition et sèches) dans la région Anosy, à Madagascar, qui est une étude similaire à ce présent travail mais avec des données météorologiques issus de diverses stations. NDVI des forêts sèches corrèle à la fois avec les précipitations du mois d'acquisition P_0 , celles de son précédent P_{-1} et des précipitations cumulées des trois premiers mois P_{c2} . La meilleure corrélation est avec P_{c2} (coefficient de corrélation 0,896). (RAKOTO, 2011)

Les résultats de Prasad *et al.*, en 2007, de Bonifaz-Alfonzo, 2011 et de RAKOTO, 2011 se rapprochent plus avec celles des résultats présentés précédemment : Parmi les précipitations des trois premiers mois considérées à partir du mois d'acquisition de l'image, la corrélation la plus élevée est avec la précipitation cumulée P_{c2} . Les corrélations avec les autres précipitations sont toutes significatives, ce qui n'est pas le cas pour les résultats de RAKOTO. Cette différence pourrait être provoquée par la source des données météorologiques. Cependant, la présente recherche a effectué l'étude de corrélation avec les précipitations au-delà de $m-2$ et a évoqué la plus forte corrélation avec la précipitation P_{c3} pour les deux indices pour l'indice EVI.

4.2.3. Sur la résilience des forêts sèches

Le comportement des forêts sèches de Maya au sud du Mexique et au nord-ouest de Guatemala, mesuré à partir des indices de végétations NDVI et EVI, est fortement affecté par les variations saisonnières des précipitations (sèches et humides) entre 2001 et 2005. (BONIFAZ-ALFONZO, 2011) Pour l'étude de Percy RAKOTO en 2011, les forêts sèches de la région Anosy sont plus ou moins stables vis-à-vis des variabilités des précipitations. En effet, les précipitations cumulées des trois premiers mois à partir du mois d'acquisition de l'image varient de 21,6 mm (Septembre 2001) à 123,1mm (Novembre 1984). (RAKOTO, 2011)

Une variation interannuelle et inter-saisonnière des écarts entre indices réels et théoriques, que ce soit avec NDVI que l'indice EVI, ont été constatées dans cette étude. En effet, en saison sèche, ces écarts sont négatifs et en période humide, ils sont positifs. Si ces variations persistent, la résilience des forêts sèches diminuera. Dans un bloc forestier, ces variations sont plus importantes par rapport aux noyaux ou cœur de la forêt. Cette différence peut s'expliquer par le facteur anthropique car cette zone est la plus accessible aux populations locales et la plus soumise aux collectes des produits forestiers. En outre, les facteurs abiotiques comme l'ensoleillement, la température peuvent aussi affecter les lisières.

Ces diverses pressions pourraient ainsi conduire à la réduction de la densité de cette zone forestière. Leur résilience vis-à-vis des variabilités des précipitations diminue par la suite comparée au cœur de la forêt.

Par conséquent, en comparant les résultats obtenus avec ceux de RAKOTO, 2011, les forêts sèches du Menabe sont plus vulnérables aux variabilités des précipitations par rapport à celles de la Région Anosy. Cette différence de résilience vis-à-vis des précipitations s'explique par les variabilités précipitations dissimilaires entre ces deux régions. Les précipitations de la Région Anosy sont plus stables que celles du Menabe.

4.2.4. Etude de la résilience des forêts sèches au niveau spatial

La majorité des forêts dans au nord de la ville de Morondava est plus résiliente aux variabilités des précipitations comparées à celles situées au Sud de cette ville. Comme les indices de végétations élevées correspondent aux végétations denses, les forêts sèches au nord de Morondava sont donc plus denses par rapport aux forêts dans le sud de cette ville.

Cette différence peut être due aux effets des restaurations effectuées dans cette Région. Plusieurs forêts avaient fait objet de restauration dans l'écorégion de l'ouest (Forêt de Kirindy, Menabe Antimena, Réserve Spéciale Andranomena,...). Cependant, les restaurations dans l'Aire Protégée Menabe Antimena sur 15ha en 2 ans (5 espèces autochtones) et dans la forêt de Kirindy/CNFEREF sur 6,17 ha (7 espèces autochtones) sont les plus réussies. Le taux de réussite pour le premier cas est supérieur à 85% et pour le second cas, 35 à 70% dans les layons et plus de 80% pour les trouées. (CONSERVATION INTERNATIONAL, 2011)

4.3. Sur les hypothèses

4.3.1. Hypothèse 1 : La verdure des forêts sèches à un mois considéré m n'est plus influencée par les précipitations au-delà des trois précédents mois.

Cette hypothèse est acceptée car la corrélation entre les indices de végétations, reflétant la verdure des forêts, et les précipitations des mois $m-4$, $m-5$, $m-6$, $m-7$, $m-8$, $m-9$ et $m-10$ ne sont plus significatives que ce soit avec NDVI qu'EVI. Seules les précipitations des mois m , $m-1$, $m-2$ et $m-3$ présentent une corrélation significative avec les indices de végétation. (Tableau 9)

4.3.2. Hypothèse 2 : La résilience des forêts sèches face aux variabilités des précipitations diminue au cours des années.

La diminution de la résilience des forêts se manifeste par la persistance des écarts (indices de végétation réels – indices de végétation théorique) négatifs au cours des années, notamment par la baisse de ces écarts. D'après les résultats ressortis par cette étude, les forêts sèches du Menabe sont vulnérables aux variations interannuelle et intra-annuelle (inter-saison) des précipitations. C'est principalement durant la saison sèche que l'état de ces forêts est en régression en termes de verdure. Tandis qu'en saison humide, il gagne plus de verdure. Ainsi, en saison sèche, les forêts du Menabe ont plus tendance à être moins résilient. Au niveau spatial, ce sont particulièrement les forêts situées au sud de Morondava qui sont plus sensibles aux variabilités pluviométriques par rapport à celles

localisées au nord de cette localité. De plus, au cours des époques étudiées, la résilience des forêts diminuent car les écarts (indices réels – indices théoriques) est toujours en baisse notamment en saison sèche. Cependant, au niveau spatial, la résilience des forêts dépend des localités. Par conséquent, l'hypothèse 2 est aussi vérifiée.

4.3.3. Hypothèse 3 : Les lisières sont plus sensibles aux variabilités des précipitations que les noyaux des forêts.

Cette troisième hypothèse constitue un cas particulier de la seconde. Les résultats avancés précédemment confirment cette hypothèse car la plupart des écarts (indices de végétation réels – indices de végétations théoriques) est plus élevée au sein des noyaux forestiers comparés aux lisières. En effet, que ce soit en saison sèche ou en saison humide, les valeurs moyennes des indices de végétations (NDVI et EVI) des lisières sont majoritairement inférieures à celles des noyaux des forêts. Les lisières sont donc plus sensibles aux variabilités des précipitations que les noyaux. De plus, les lisières sont plus accessibles par les populations locales et sont plus soumises aux collectes des produits forestiers. Par la suite, les lisières forestières sont moins denses par rapport aux noyaux et sont aussi plus affectées aux autres facteurs abiotiques (température, ensoleillement,...). Cependant, les lisières devraient être plus verte que les noyaux des forêts avec la fréquence des coupes. En effet, plus les coupes sont fréquentes, plus les régénérations se développent et la forêt devrait être ainsi plus verte.

4.4. Recommandations

Cette partie constitue un point essentiel surtout dans l'importance et la valorisation de la recherche. Effectivement, le problème soulevé dans cette étude est la diminution de la résilience des forêts sèches vis-à-vis des variabilités des précipitations. Bien que les populations riveraines des forêts sont très dépendantes des produits forestiers et cette écosystème possède des grands enjeux écologiques et économiques avec l'endémicité de la biodiversité de cette Région. Il est difficile, voire même impossible, de maîtriser les variabilités des précipitations. Par la suite, les recommandations se portent surtout sur l'optimisation du maintien de la couverture forestière et ses caractéristiques. Pour cela, le renforcement des mesures d'adaptation à la dégradation forestière vis-à-vis des variabilités climatiques est le principal objectif à atteindre afin de résoudre en partie le problème posé. Les sous-objectifs sont ainsi suggérés, en se basant sur les résultats de la présente étude.

Les mesures d'adaptation touchent généralement deux entités, d'une part la forêt sèche et d'autre part les populations riveraines dépendantes des produits de la forêt.

4.4.1. Renforcer l'adaptation des forêts sèches aux variabilités climatiques

Comme les forêts sèches sont très riches en biodiversité, majoritairement endémiques du milieu, les activités écotouristiques sont diverses dans la Région et sont menacées par la diminution de la résilience des forêts sèches causées par les variabilités des précipitations. D'après le résultat de cette étude, les végétations plus denses résistent plus aux variabilités des précipitations comparées aux végétations moins denses (lisière par exemple). Par conséquent, le fait de pratiquer la restauration

forestière pourrait améliorer l'adaptation de ces types de forêts car elle permet de créer un micro-climat à la localité avec l'environnement social plus favorable aux espèces floristiques et faunistiques. Plus la végétation est dense et plus elle résiste à la sécheresse. De plus, les restaurations effectuées dans les forêts au nord de Morondava sont plus réussies et ces forêts sont ainsi plus résilientes aux variabilités des précipitations par rapport aux forêts situées au sud. De cette manière, il est aussi très important d'effectuer une recherche sur les facteurs de réussite de la restauration forestière dans cette Région.

4.4.2. Renforcer les capacités d'adaptation des populations locales aux changements d'état des forêts

Avec la dépendance des riverains aux produits forestiers notamment en termes d'alimentation, leurs sécurités alimentaires sont donc menacées par le changement d'état des forêts accentuées par le défrichement accrus dans la Région. Les mesures d'adaptation sont donc axées vers le développement Agricole afin de diminuer les pressions sur la forêt et assurer leur alimentation durant toute l'année.

- *Promouvoir l'Agroécologie*

Dans ce sens, la promotion de l'agroécologie, conciliant la performance économique et environnementale constitue un point essentiel. Elle maximise le rendement tout en préservant l'environnement en utilisant le moins possible de produits chimiques. Il s'agit de promouvoir les systèmes de production agricole améliorés pour augmenter le rendement des terrains agricoles : rotation des cultures, associations culturales, jachère. Les systèmes culturaux permettent de favoriser la complémentarité des cultures : association ou rotation des cultures (plantes fixateurs d'azote et des plantes qui ont besoin d'azote par exemple). De plus, les déchets issus de l'élevage seront valorisés dans l'agriculture et vice versa. Les animaux d'élevage peuvent se nourrir des restes de débris végétaux sur le terrain agricole.

- *Améliorer la productivité du sol*

La productivité du sol dépend de la préparation du sol ainsi que des apports en éléments nutritifs au sol. Comme les engrains chimiques sont très couteux et présentent des risques de compaction du sol, la fabrication de compost est plus appropriée pour enrichir le sol d'éléments nutritifs. Avec des équipements et machines agricoles communes gérés par les institutions publiques ou privées, le temps et énergies dépensées pour la préparation du sol seront réduites.

4.4.3. Améliorer le suivi des variabilités climatiques

Les variabilités climatiques dans la Région Menabe toute entière sont actuellement difficiles à déterminer du fait qu'il n'existe qu'une seule station météorologique dans la Région, celle de Morondava. Alors que cette station est dans la plupart du temps non-fonctionnelle avec l'usure des matériels utilisés. Les recommandations sont donc axées sur le renouvellement de cette station et la création de nouvelle station de collecte de données météorologiques afin de faciliter le suivi des variabilités climatique et améliorer par la suite les résultats des recherches donnant plus de précision sur les réalités.

Objectif 1 : Renforcer l'adaptation des forêts sèches aux variabilités climatiques

Sous-objectif 11 : Appuyer les recherches sur la restauration forestière dans l'écorégion ouest

Résultat attendu : Au moins deux recherches sur la restauration forestière dans l'écorégion ouest sont appuyées un an après la réalisation de cet objectif.

Activités	Echéance	Responsable	IOV	Source de vérification
Analyser les facteurs de réussite de la restauration	Court – moyen et long terme	Prestataire de service (bureau d'étude, ONG,...)	Nombre de facteur de réussite de la restauration forestière Nombre d'espèces pouvant être restaurées Nombre d'espèces étudiées	Rapport recherche

Sous-objectif 12 : Restaurer l'intégrité écologique de la forêt

Résultat attendu : Au moins chaque bloc des forêts ont fait objet de restauration un an après la mise en œuvre de cet objectif.

Activités	Echéance	Responsable	IOV	Source de vérification
Restaurer des espèces autochtones au sein des forêts sèches les plus dégradées	Court – moyen terme	Responsable de la gestion des forêts	Surface des pépinières Surfaces restaurées, taux de réussite	Rapport d'activités, photos, descente sur terrain

Objectif 2 : Renforcer les capacités d'adaptation des populations locales aux changements d'état des forêts

Sous-objectif 21 : Promouvoir l'agroécologie

Résultat attendu : Au moins 75% de la population locale applique l'agroécologie après l'année de lancement du projet.

Activités	Echéance	Responsable	IOV	Source de vérification
Inciter les associations et les rotations culturales	Court terme	Prestataire de service (bureau d'étude, ONG,...)	Nombres de cultures favorables au milieu Intérêts de chaque culture Nombre de calendriers cultureaux Nombre d'individus présent durant l'exposition, Surface agricoles faisant objet d'application	Rapport d'activités Photos, descente sur terrain
Renforcer les activités d'élevage	Court terme	Prestataire de service (bureau d'étude, ONG,...)	Nombre d'animaux proposés Nombre de technique d'alimentation, Nombre d'individus présent durant l'exposition	Rapport d'activités, Photos, descente sur terrain

Sous-objectif 22 : Améliorer la productivité du sol

Résultat attendu : La production agricole augmentera au moins de 40% de la production actuelle après la réalisation de cet objectif recommandé.

Activités	Echéance	Responsables	IOV	Source de vérification
Promotion du compost dans la fertilisation des terrains agricoles	Court terme	Prestataire de service (bureau d'étude, ONG,...)	Nombre de végétales et animales récences pour le compostage Nombre d'individus formés	Rapport d'activités, Enquête et entretien
Acquérir des équipements et machines agricoles communes pour la préparation des terrains	Court terme	Prestataire de service (bureau d'étude, ONG,...)	Nombre des équipements et machines agricoles Coût d'entretien Coût de location	Rapport d'activités

Objectif 3 : Améliorer le suivi des variabilités climatiques

Résultat attendu : Au moins deux stations météorologiques sont fonctionnelles dans la Région Menabe un an après l'année de la réalisation de cette recommandation.

Activités	Echéance	Responsables	IOV	Source de vérification
Créer de nouvelle station météorologique	Court-moyen-long terme	Prestataire de service (bureau d'étude, ONG,...)	Critères de sélection de la mise en place de la station Données météorologiques accessibles	Rapport d'activités, descente sur terrain, photos,
Réhabiliter la station météorologique de Morondava	Court terme	Responsable de la station	Nombres et état de matériels inventoriés Nombre de nouveaux matériels et anciens matériels entretenus	Rapport d'activités, Photos, descente sur terrain

Conclusion

5. CONCLUSION

Les forêts sèches sont des écosystèmes caractéristiques des régions semi-arides. Elles sont principalement localisées dans l'écorégion de l'ouest de Madagascar. La Région Menabe constitue l'une des zones contenant le plus de forêt sèches. Dans cette Région, ces forêts possèdent un grand enjeu écologique, économique et social: écologique car elles abritent une grande diversité d'espèces floristiques et faunistiques à haute endémicité, économique avec les activités touristiques et les activités de recherche avec cette biodiversité exceptionnelle et sociale car elles constituent la source d'alimentation des riverains notamment en période de soudure. Cependant, ces dernières décennies les variabilités climatiques sont de plus en plus importants alors que ces types de forêts ont pour facteur déterminant le climat. D'où, afin de renforcer la résilience de ces forêts sèches, il s'avère important d'étudier la résilience des forêts sèches vis-à-vis de ces variabilités pluviométriques.

Cette étude a utilisé deux indices de végétation (NDVI et EVI) en trois années de référence (2000/2002, 2007/2008 et 2014) avec deux saisons distinctes (sèche et humide) sur une période 13 ans et 6 mois. Les informations sur ces deux types d'indices ont été collectées à partir des images *Landsat*. Tandis que pour les données sur les précipitations, elles ont obtenues par extraction des valeurs de la pluviométrie issue des images satellites météorologiques. L'étude de corrélation entre indices de végétation et précipitation a permis d'affirmer que la verdure des forêts varie avec les précipitations entre les années et suivant les saisons. Cette corrélation n'est plus significative au-delà du troisième mois avant l'acquisition de l'image. La méthode utilisée était la « méthode de résidu », utilisée antérieurement par divers auteurs pour l'analyse de la dégradation ou de la récupération des végétations durant une période bien précise. L'analyse de l'évolution du résidu ou l'écart entre l'indices de végétation observés et ceux calculés à partir d'un modèle théorique a permis de déterminer la résilience des forêts sèches vis-à-vis des précipitations. En effet, les forêts sèches du Menabe connaissent une dégradation en saison sèche et elles gagnent de verdure en saison humide. De plus, les lisières forestières sont plus sensibles aux variabilités des précipitations comparées aux noyaux des forêts sèches. En fait, les lisières sont plus affectées aux pressions anthropiques, car elles sont plus accessibles par rapport aux noyaux, et aux autres facteurs abiotiques tels que les fortes températures, ensoleillement,... De plus, comme les indices de végétation reflètent aussi la densité des végétations, les forêts plus denses sont plus résilientes aux variabilités des précipitations que les forêts moins denses. Ce sont principalement les forêts sèches situées au nord de Morondava qui sont plus résistantes face aux variabilités des précipitations que celles au sud de cette localité. Cette différence de résilience peut être engendrée par la réussite de la restauration dans l'aire protégée Menabe Antimena et dans la forêt Kirindy/CNFEREF. Cependant, les facteurs de réussite de la restauration restent donc à déterminer pour maintenir ou améliorer l'intégrité écologique dans les forêts sèches de cette Région. Ceci constitue ainsi une nouvelle piste de recherche intéressant à développer.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- ❖ AMCOW, 2013. *Sécurité en eau et développement résilient au changement climatique : document d'information technique*. Climate and Development Knowledge Network (CDKN), Global Water Partnership (GWP). p. 149
- ❖ BLASER, J. & RAKOTOMANANA, J.-L. 1990. Défrichement en forêt dense sèche. *Akon'ny Ala*, Bulletin du département des Eaux et Forêts de l'ESSA(5), p. 14.
- ❖ BONIFAZ-ALFONZO, R. 2011. *Assessing seasonal feature of tropical forests using remote sensing*. Geography éd. Lincoln: University of Nebraska.
- ❖ CCT, 2001. *Notions fondamentales de télédétection*, Canada: Natural Ressources Canada.
- ❖ CHRISTINE, C. 2013. *SIG: Définition*. [consulté le 02 Avril 2015]. [En ligne] disponible sur: <http://sig-pour-tous.forumactif.com>
- ❖ CHUVIECO, E. 1998. Le facteur temps dans la télédétection : évolution phénoménologique et l'analyse du changement. *Journal of Remote sensing*, p. 10.
- ❖ CLARK, R. N. 2003. *USGS*. [consulté le 05 Mars 2015]. [En ligne] disponible sur: <http://speclab.cr.usgs.gov/PAPERS/tetracorder/>
- ❖ CLINTON, N. *et al.* 2014. Global-Scale Associations of Vegetation Phenology with Rainfall and Temperature at a High Spatio-Temporal Resolution. *Remote sensing*, 6(ISSN 2072-4292), pp. 7320-7338.
- ❖ COMIC, Gabriel. 2008. *Effet de la contrainte hydrique sur la photosynthèse foliaire : De l'utilisation expérimental des relations A/Ci et ACC*, 36 p.
- ❖ Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale. 1988. Anonyme.
- ❖ CONSERVATION INTERNATIONAL. 2011. *Restauration foresitière à Madagascar: Document de capitalisation des expériences en vue de l'élaboration de Plan d'Action de Restauration*.
- ❖ CORNET, A. 1974. *Essai de cartographie bioclimatique à Madagascar*. OSTROM éd. Tananarive: Laboratoire de botanique.
- ❖ CREAM. 2013. *Monographie de la Région MENABE*, Antananarivo:

-
- ❖ DGEF. 1996. *Inventaire Ecologique Forestier National. Recueil botanique de 200 espèces forestières*. Antananarivo:
 - ❖ DOUKPOLO, B. 2013. *Procédure de traitement des données d'observation, de simulation et de projection du climat*, s.l.: Département Climat et Environnement.
 - ❖ EMETERIO, J. L. S., Lacaze, B. & Mering, C. 2009. *Détection des changement de la couverture végétale au Sahel à partir des données NDVI et précipitation*. Journées d'Animantion Scientifique (JAS09) éd. Alger: AUF.
 - ❖ EMILY, E. A. 2012. *World Forest Area Still on the Decline*. [consulté le 4 Novembre 2014]. [En ligne] disponible sur: http://www.earth-policy.org/indicators/C56/forests_2012
 - ❖ EPFL, 2013. *Chapitre 3: Les précipitations*. [consulté le 02 Avril 2014]. [En ligne] disponible sur: <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre3/chapitre3.html>
 - ❖ EVANS, J. & GEERKEN, R. 2004. Discriminate between climate and human-induced dryland degradation. *Journal Arid of Environment*, 57(0140-1963), pp. 535-554.
 - ❖ FAO. 2001. *Forest Ressource Assessment*. [consulté le 4 Novembre 2014]. [En ligne] disponible sur: <http://www.fao.org/forestry/fo/fra/index.jsp>
 - ❖ FAO. 2005. *Progress towards sustainable forest management*.
 - ❖ GAUSMAN, H. W. 1985. *Plant leaf optical properties in visible and near-infrared light*. Texas: Texas Technival Press, Lubbock.
 - ❖ GIEC, 2001, *Bilan 2001 des changements climatiques : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au Troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Genève 2, Suisse
 - ❖ GIEC, 2007. *Résumé à l'intention des décideurs. In: Changements climatiques 2007 : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Cambridge, UK et New York, NY, USA: Cambridge University Press.
 - ❖ GRENIER, E. 2007. *Quelle est la "bonne" formule de l'écart-type?*. Reims Management School
 - ❖ HERRMANN, D. M., ANYAMBA, A. & TUCKER, C. J., 2005. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change*, 15(Issue 4), pp. 394-404.

-
- ❖ HERRMANN, S. M. & HUTCHINSON, C. F. 2005. The changing contexts of desertification debate. *Journal of Arid Environments*.
 - ❖ HOUEROU, H.-N. L. 1992. *Relations entre la variabilité des précipitations et celle des productions primaire et secondaire en zone aride*. Paris: ORSTOM.
 - ❖ HUETE, A., LIU, H., BATCHILY, K. & YANLEEUWEN, W. 1997. A comparison of vegetation indices globalset of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, Volume 59, pp. 440-451.
 - ❖ HULME, P. E. 2005. Adapting to climate change: Is there scope for ecological management in the face of a global threat?. Issue 42.
 - ❖ JACQUIN, A. 2010. *Dynamique de la végétation des savanes en lien avec l'usage des feux à Madagascar. Analyse par série temporelle d'images de télédétection*. Fonctionnement des écosystèmes et agrosystèmes éd. Université de Toulouse: Institut National Polytechnique de Toulouse.
 - ❖ JENSEN. 1996. *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*. Prentice Hall.
 - ❖ KOECHLIN , J., Guillaumet, J. & Morat, P. 1974. *Flore et Végétation de Madagascar*. J. Cramer, Vaduz éd.
 - ❖ KOECHLIN, J. & Guillaumet, J. 1971. Contribution à la définition des types de végétation dans les régions tropicales (exemple de Madagascar). *Candollea*, Issue 2612, pp. 263-211.
 - ❖ LANDIS, J. R. & KOCH, G. G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. Dans: *Biometrics*. pp. 159-174.
 - ❖ LARSEN, J. 2003. *Le déclin mondial du couvert forestier*. [consulté le 04 Novembre 2014]. [En ligne] disponible sur: <http://vertigo.revues.org/4858>
 - ❖ LETOUZEY, . R. 1982. *Manuel de botanique Afrique Tropicale*. Tome 2 A éd. Nogent sur Marne: CTFT.
 - ❖ LINDNER, M. et al. 2010. *Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems*. Elsevier éd. s.l.:Forest Ecology and Management, Elsevier.
 - ❖ MAEP. 2003. *Monographie de la Région du Menabe..* Unité de politique pour le Développement Rural (UPDR)

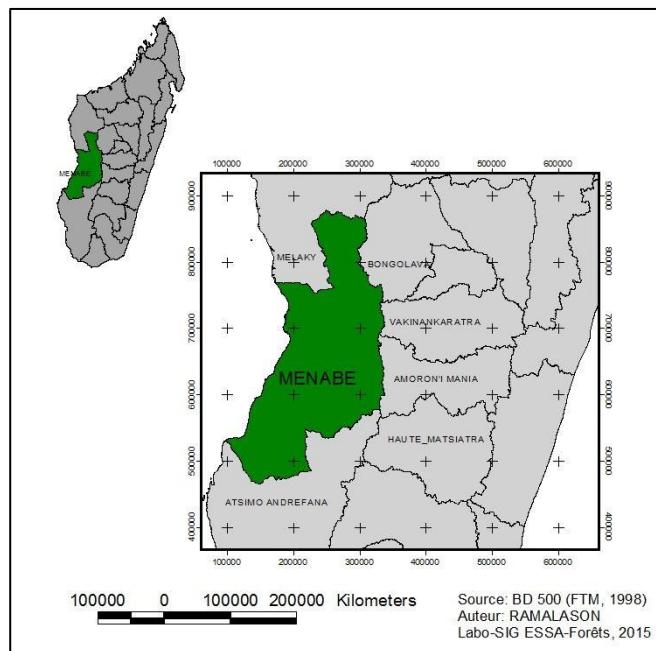
-
- ❖ MATSUSHITA, B. *et al.* 2007. Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic. *Sensors*, 7(ISSN 1424-8220), pp. 2636-2651.
 - ❖ MEFT, USAID & CI. 2009. *Evolution de la couverture de forêts naturelles à Madagascar, 1990-2000-2005*.
 - ❖ MENESES-TOVAR, C. L. 2011. L'indice différentiel normalisé de végétation comme indicateur de la dégradation. 62(238).
 - ❖ NASA. 2015. *LANDSAT*. [consulté le 01 Mars 2015]. [En ligne] disponible sur: <http://eoedu.belspo.be/fr/satellites/landsat.htm>
 - ❖ NICODEMUS, F. E., RICHMOND, J. C., Hsia, J. J. 1977. *Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance*. Instute for Basic Standards National Bureau of Standards. Washington. D. C. 20234. p.67
 - ❖ OMM. 2005. *Le climat et la dégradation des sols*, Organisation météorologique mondiale.
 - ❖ ONE, DGF, FTM & CI. 2013. *Evoluion de la couverture de forêts naturelles à Madagascar 2005-2010*, Antananarivo.
 - ❖ PAULE, Bernard. 2003. *Eclairagisme: Eléments de base*. Espace et Lumière: Le Projet d'Eclairage. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, p. 86
 - ❖ PRASAD, K. V., Badarinath, K. V. S. & Eaturu, A. 2007. Saptial patterns of vegetation phenology metrics and related climatic controls of eight constracting forest types in India - analysis from remote sensing datasets. *Theoretical and Applied Climatology*, 89(Issue 1-2), pp. 95-107.
 - ❖ RAKOTO, Y. P. 2011. *Analyse du comportement des différents types de forêts de la partie Sud de la Région Anosy face aux variabilités de la précipitation*. Antananarivo: ESSA-forêts, Université d'Antananarivo.
 - ❖ RAKOTOMALALA, R. 2011. *Pratique de la Régression Linéaire Multiple: Diagnostic et sélection des variables*. Université Lumière Lyon 2 éd. Lyon: version 2.0.
 - ❖ RAMADE, F. 1984. Eléments d'écologie. Dans: *Ecologie fondamentale*. Paris: McGraw Hill, p. 285.
 - ❖ RANDRIANASOLO, Zafyson, 2012. *Impacts du changement climatique sur la biomasse des produits forestiers assurant la sécurité alimentaire dans la forêt dense sèche et la mangrove*,

cas de Morondava, région Menabe-central, centre ouest de Madagascar. Antananarivo: Mémoire de DEA, ESSA-forêts, Université d'Antananarivo.

- ❖ RASAMIMANANANA, N., RATSIRARSON, J. & ALSON, . F. R. 2012. *Influence de la variabilité climatique sur la phénologie de la forêt de la réserve de Bezà Mahafaly.*
- ❖ ROUSE, J. W. et al. 1974. *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation.* Maryland: Grennbelt.
- ❖ SALOMON, J. 1987. *"Le Sud-Ouest de Madagascar, étude de géographie physiqueé,* Marseille: Université d'Aix Marseille, Thèse de doctorat d'Etat, Tomes.
- ❖ SCHATZ, G. E. & LESCOT, M. 2003. *Gazetteer to Malagasy Botanical Collecting Localities.* [consulté le 01 Mars 2015]. [En ligne] disponible sur : <http://www.mobot.org/mobot/research/madagascar/gazetteer/>
- ❖ TRAORE, F., DJABY, B., WELLENS, J. & TYCHON, B. 2013. *Estimation des zones agricoles irriguées du bassin versant du Kou à l'aide de la télédétection.* Burkina Faso: Geocarto International.
- ❖ USAID. 2007. *Adaptation à la variabilité et aux changements climatiques.* Washington: DC..
- ❖ USGS. 2014. *The band designations for the Landsat satellites.* [consulté le 01 Mars 2015]. [En ligne] disponible sur: <http://landsat.usgs.gov>
- ❖ UVED. 2008. *ENVCAL- Suivi de l'environnement par télédétection.* [conducté le 05 Mars 2015]. [En ligne] disponible sur: <http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/urved/envcal/html/vegetation/indices/index.html>
- ❖ UVED. 2013. *Glossaire des SIG.* [consulté le 07 Avril 2015]. [En ligne] disponible sur: http://www.emse.fr/tice/urved/SIG/Glossaire/co/Resolution_spatiale.html
- ❖ VIANA, D. R. & ALVALA, R. C. d. S. 2011. Vegetation index performance for the Pantanal region during both dry and rainy seasins. *GEOGRAFIA*, 36(Mumero Especial), pp. 143-158.
- ❖ VOGEL, J. 2005. *Un projet scolaire d'étude de l'influence des raisons sur les cycles biologiques,* Suisse: GLOBE.
- ❖ WALTER, H. & LIETH, H. 1967. *Klimadiagramm-Weltatlas.* 8000. Gustav Fischer Jena.
- ❖ WWF. 2010. *Témoignage de Madagascar.* [consulté le 4 Novembre 2014]. [En ligne] disponible sur: http://awsassets.panda.org/downloads/110125_temoignage_de_madagascar

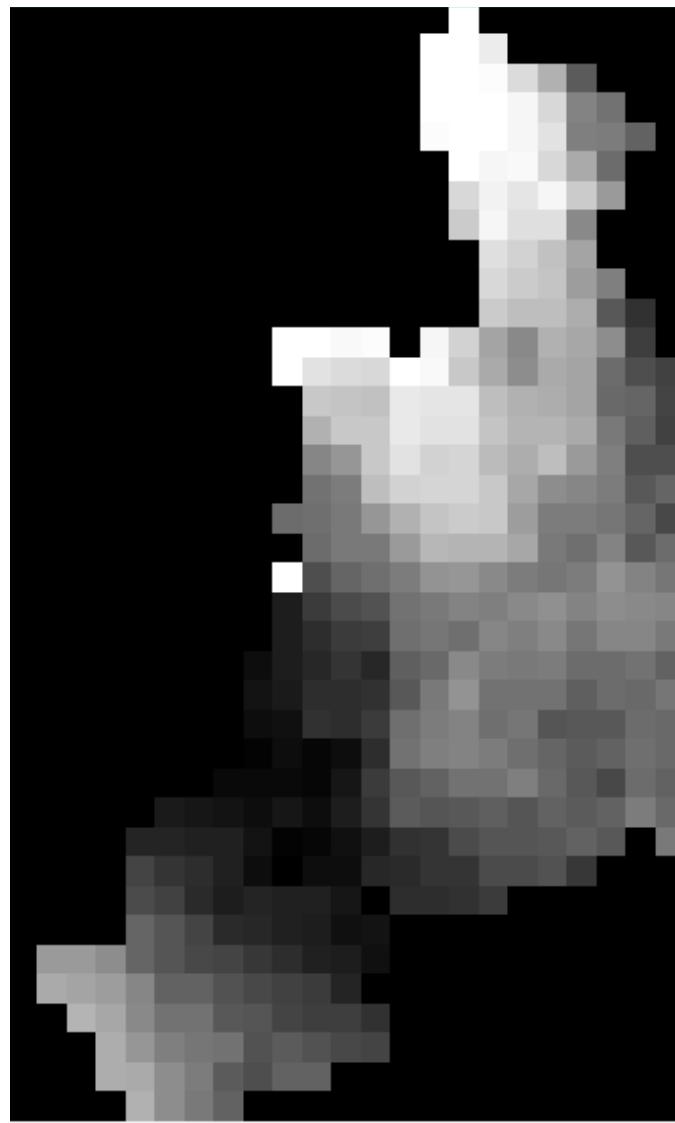
Annexes

Annexe 1: Carte de localisation de la zone d'étude



Annexe 2: Carte hydrographique du Menabe

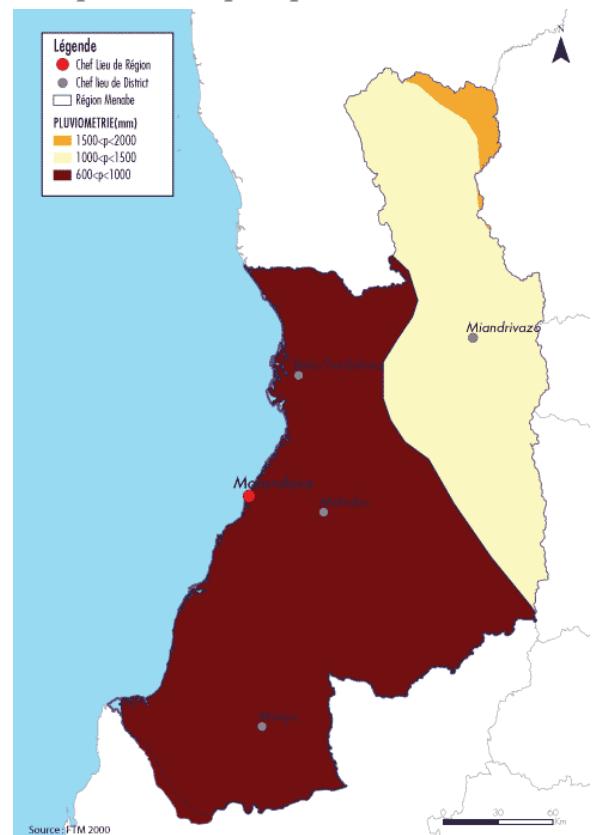


Annexe 3: Exemple d'une image satellite météorologique*Annexe 4: Détails et caractéristiques des images Landsat utilisées*

N°	Capteur <i>Landsat</i>	identification de l'image	date d'acquisition	résolution spectrale	saison
1	TM	LT51600732000292JSA00	18.10.2000	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	sèche
	TM	LT51600742000292JSA00	18.10.2000	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	sèche
	TM	LT51600752000292JSA00	18.10.2000	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	sèche
	TM	LT51610732000299JSA00	25.10.2000	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	sèche
	TM	LT51610742000299JSA00	25.10.2000	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	sèche
	TM	LT51610752000299JSA00	25.10.2000	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	sèche
2	ETM+	LE71600732002065JSA00	06.03.2002	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	humide
	ETM+	LE71600742002065JSA00	06.03.2002	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	humide

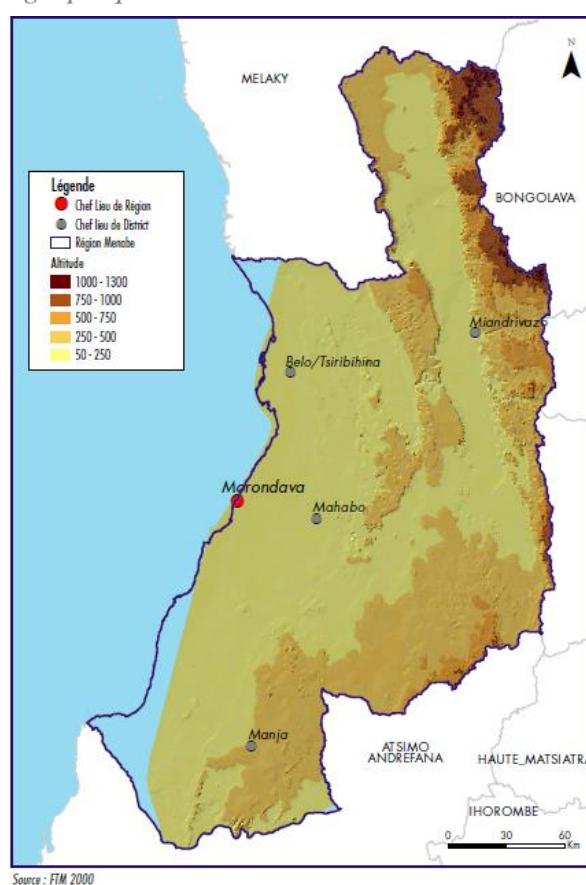
	ETM+	LE71600752002065JSA00	06.03.2002	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	humide
	ETM+	LE71610732002088JSA00	29.03.2002	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	humide
	ETM+	LE71610742002088JSA01	29.03.2002	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	humide
	ETM+	LE71610752002088JSA02	29.03.2002	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	humide
3	TM	LT51600732007215JSA00	03.08.2007	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	sèche
	TM	LT51600742007215JSA00	03.08.2007	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	sèche
	TM	LT51600752007231JSA00	19 08 2007	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	sèche
	TM	LT51610732008241JSA00	28.08.2008	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	sèche
	TM	LT51610742008241JSA00	28.08.2008	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	sèche
	TM	LT51610752007270JSA00	27.09.2007	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	sèche
4	TM	LT51600732007087JSA00	28.03.2007	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	humide
	TM	LT51600742007039JSA00	08.02.2007	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	humide
	TM	LT51600752007039JSA00	08.02.2007	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	humide
	TM	LT51610732008065JSA00	05.03.2008	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	humide
	TM	LT51610742008065JSA01	05.03.2008	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	humide
	TM	LT51610752008065JSA00	05.03.2008	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	humide
5	ETM +	LE71600732013239ASN00	27.08.2013	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	sèche
	ETM +	LE71600742013239ASN00	27.08.2013	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	sèche
	ETM +	LE71600752013239ASN00	27.08.2013	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	sèche
	ETM +	LE71610732013214JSA02	02.08.2013	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	sèche
	ETM +	LE71610742013214JSA02	02.08.2013	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	sèche
	ETM +	LE71610752013214JSA02	02.08.2013	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	sèche
6	ETM +	LE71600732013063PFS00	04.03.2013	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	humide
	ETM +	LE71600742013063PFS00	04.03.2013	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	humide
	ETM +	LE71600752013063PFS00	04.03.2013	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	humide
	ETM +	LE71610732013086ASN00	27.03.2013	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	humide
	ETM +	LE71610742013086ASN00	27.03.2013	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	humide
	ETM +	LE71610752013086ASN00	27.03.2013	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	humide

Annexe 5: Répartition spatiale des précipitations



Source : CREAM, 2013

Annexe 6: Carte topographique du Menabe



Annexe 7: Détails sur la répartition annuelle des précipitations

Année	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
2000	288.80	184.09	264.16	13.96	0.68	0.00	1.36	0.00	4.46	18.85	182.12	163.47	1121.95
2001	163.47	207.01	130.78	117.89	39.51	2.15	0.00	0.00	0.60	2.49	26.13	80.54	770.57
2002	221.79	236.12	198.72	88.80	25.87	29.70	0.00	2.90	0.00	10.10	55.63	109.30	978.93
2003	98.01	410.19	303.64	131.85	43.34	15.00	0.00	2.54	0.00	9.13	27.68	27.40	1068.78
2004	136.19	174.47	79.41	275.49	53.92	0.11	0.21	1.47	1.44	6.78	61.10	54.22	844.79
2005	286.46	427.41	131.44	93.64	15.49	18.40	0.00	0.07	0.00	1.09	24.35	74.60	1072.94
2006	93.32	167.91	313.68	102.13	34.19	3.89	0.05	1.36	3.47	5.21	13.29	51.41	789.92
2007	115.48	463.38	251.33	29.20	47.59	4.82	0.77	0.00	0.00	4.81	32.77	58.55	1008.71
2008	169.24	129.93	368.25	93.43	8.27	9.44	0.00	0.00	0.00	4.53	40.75	79.90	903.74
2009	78.43	182.49	134.99	101.16	49.98	1.53	0.00	0.00	0.00	0.15	40.00	36.92	625.65
2010	73.54	122.42	81.86	164.69	10.38	54.51	6.08	0.00	2.20	0.00	66.08	44.12	625.88
2011	155.85	111.39	149.92	90.02	12.06	0.00	0.00	0.00	0.00	21.52	61.14	63.23	665.13
2012	354.39	201.68	137.27	231.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55	143.10	93.04	198.38	1359.77
2013	179.94	258.57	89.90	19.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	121.08	73.87	142.63	886.14
2014	507.26	103.71	44.34	44.54	1.05	0.00	-	-	-	-	-	-	700.90
Total	172.49	234.08	188.24	110.96	24.38	9.97	0.61	0.60	0.94	24.92	57.00	84.62	894.92

Annexe 8 : Test de significativité de la tendance des précipitations

Statistiques descriptives :

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Précipitation totale annuelle	14	0	14	625.647	1359.771	908.777	210.076
Test de tendance de Mann-Kendall / Test bilatéral (Précipitation totale annuelle) :							
Taux de Kendall							
S	-17.000						
Var(S)	0.000						
p-value (bilatérale)	0.388						
alpha	0.99						

La p-value est calculée suivant une méthode exacte.

Interprétation du test :

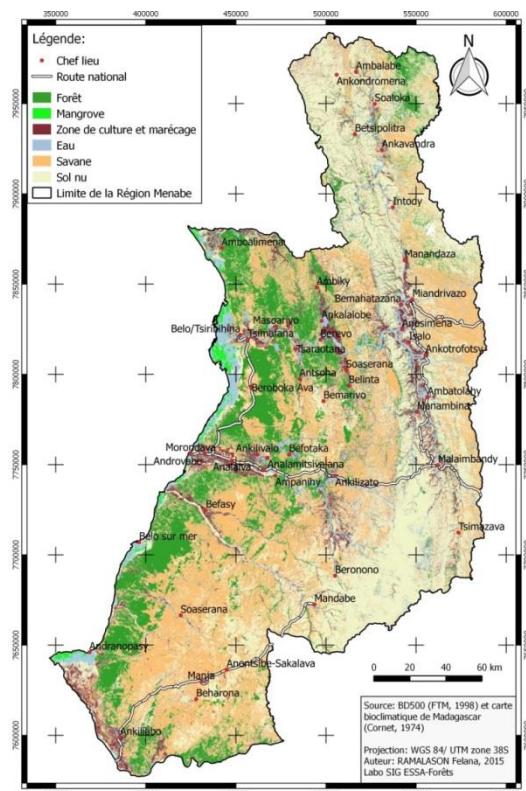
H0 : Il n'y a pas de tendance dans la série

Ha : Il existe une tendance dans la série

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est inférieure à 38.80%.

Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification alpha=0.99, on doit rejeter l'hypothèse nulle H0, et retenir l'hypothèse alternative Ha.

Annexe 9: Carte d'occupation du sol en 2014



Annexe 10: Tableau récapitulatif sur l'évolution des indices de végétations réels et théoriques suivant les variabilités des précipitations

	NDVI obs	NDVI th	Ecart	EVI obs	EVI th	Ecart	P-1	P-2	P-3	Pc2	Pc3	Pc4	Pc5
Époque 1 saison humide													
Moyenne	0.729	0.679	0.050	0.659	0.611	0.048	205	200	207	491	698	739	757
Ecart-type	0.076	174.000	0.177	0.102	0.165	0.179	106	85	88	241	323	346	355
Époque 1 saison sèche													
Moyenne	0.44	0.459	-0.019	0.27	0.295	-0.025	0	1	5	8	13	14	20
Ecart-type	0.108	0.094	0.125	0.107	0.051	0.114	1	1	5	11	14	15	21
Époque 2 saison humide													
Moyenne	0.73	0.693	0.037	0.622	0.588	0.034	356	262	122	758	854	879	893
Ecart-type	0.05	0.189	0.193	0.071	0.172		284	135	121	453	449	456	457
Époque 2 saison sèche													
Moyenne	0.425	0.458	-0.033	0.299	0.334	-0.035	1	2	12	4	16	57	95
Ecart-type	0.093	0.082		0.08	0.057		2	3	11	4	14	65	60
Époque 3 saison humide													
Moyenne	0.713	0.668	0.045	0.552	0.511	0.041	276	184	120	496	615	673	756
Ecart-type	0.079	0.134		0.093	0.106		85	214	43	314	342	351	375
Époque 3 saison sèche													
Moyenne	0.465	0.535	-0.070	0.275	0.349	-0.074	0	0	5	0	5	15	695
Ecart-type	0.08	0.089		0.054	0.016		5	20	31	24	54	130	322