

TABLE DES MATIERES

Résumé	i
Abstract	ii
Table des matières	iii
Liste des annexes.....	v
Liste des cartes	v
Liste des équations	vi
Liste des photos.....	vi
Liste des tableaux.....	vi
Listes des acronymes.....	vii
Glossaire.....	ix
 Introduction	 1
I. Problématique et Hypothèses	2
I.1 Problématique.....	2
I.2 Hypothèses	4
I.3 Objectifs	4
II. Matériels et Méthodes	5
II.1 Dispositif du milieu d'étude	5
II.1.1 Géologie et géomorphologie	7
II.1.2 Climat	8
II.1.2.1 Répartition spatiale du climat	8
II.1.2.2 Répartition temporelle du climat	8
II.1.2.3 Changements observés ces dernières années.....	11
II.1.3 Types de sols dans la région	12
II.1.4 Ecosystèmes et biodiversité spécifiques.....	14
II.1.4.1 Forêts denses humides.....	14
II.1.4.2 Forêts sèches.....	15
II.1.4.3 Forêts de transition	15
II.2 Données météorologiques et géographiques de base	16
II.2.1 Rappels des objectifs de l'étude	16
II.2.2 Données météorologiques	18
II.2.3 Images LANDSAT	18
II.2.4 Cartes topographiques	20
II.3 Méthodes	20
II.3.1 Prétraitements des images satellites	20

II.3.1.1	Corrections radiométriques	20
II.3.1.2	Correction atmosphérique	21
II.3.1.3	Correction géométrique	21
II.3.2	Cartographie des occupations du sol	22
II.3.3	Théories et utilisations pratiques des indices de végétation	23
II.3.3.1	Comportements spectraux des cibles.....	23
II.3.3.2	Formule et interprétations de NDVI.....	24
II.3.4	Cartographie de l'évolution des valeurs du NDVI	26
II.3.4.1	Création d'une matrice d'échantillonnage des images NDVI	26
II.3.4.2	Validation de la classification	28
II.3.5	Analyse des corrélations entre la pluviométrie et les valeurs NDVI.....	28
II.3.6	Etablissement d'un modèle théorique de valeurs de NDVI.....	28
II.3.7	Cadre opératoire	30
III.	Résultats et Interprétations	31
III.1	Cartographie des types de forêts en 2009.....	31
III.2	Valeurs moyennes de NDVI et états des forêts	31
III.3	Formation des images NDVI, extraction des valeurs et vérification de la classification	32
III.4	Influence de la précipitation sur les forêts.....	34
III.5	Evolution spatiale et temporelle des valeurs de NDVI.....	35
III.6	Capacité de résilience de la forêt de transition et de la forêt humide	42
III.6.1	Etablissement du modèle théorique.....	42
III.6.2	Tendance de l'état de la végétation	43
IV.	Discussions et recommandations.....	45
IV.1	Discussions	45
IV.1.1	Sur les méthodes.....	45
IV.1.2	Sur les résultats.....	46
IV.1.3	Sur les hypothèses	48
IV.2	Recommandations	49
IV.2.1	Améliorer la qualité des données météorologiques.....	49
IV.2.2	Renforcer les mesures d'adaptations face aux changements climatiques.....	50
IV.2.3	Renforcer les mesures d'anticipation de lutte contre la sécheresse et la désertification	50
	Conclusion.....	52
	Références	54

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Détails du milieu d'étude.....	I
Annexe 2 : Indices de végétation les plus couramment utilisés	III
Annexe 3 : Données climatiques	IV
Annexe 4 : Résultats du test de Kolmogorov de la différenciation des classes.....	VII
Annexe 5 : Description des logiciels de télédétection et SIG.....	VIII

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Les Aires protégées dans la zone d'étude.....	6
Carte 2 : Zones climatiques et hydrographiques	9
Carte 3 : Types de sols	13
Carte 4 : Répartition des stations pluviométriques.....	17
Carte 5 : Echantillonnage par pixels des valeurs de NDVI (Exemple de la forêt de transition – Image de Novembre 2009).....	27
Carte 6 : Occupations du sol.....	33
Carte 7 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt humide (Novembre 1984)	37
Carte 8 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt humide (Janvier 2002)	37
Carte 9 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt humide (Novembre 2009)	37
Carte 10 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt humide (Juillet 1991)	37
Carte 11 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt humide (Septembre 2001).....	37
Carte 12 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt humide (Juin 2009)	37
Carte 13 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt de transition (Novembre 1984)	39
Carte 14 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt de transition (Janvier 2002).....	39
Carte 15 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt de transition (Novembre 2009)	39
Carte 16 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt de transition (Juillet 1991)	39
Carte 17 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt de transition (Septembre 2001)	39
Carte 18 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt de transition (Juin 2009)	39
Carte 19 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt sèche (Novembre 1984)	41
Carte 20 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt sèche (Janvier 2002).....	41
Carte 21 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt sèche (Novembre 2009)	41
Carte 22 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt sèche (Juillet 1991)	41
Carte 23 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt sèche (Septembre 2001)	41
Carte 24 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt sèche (Juin 2009)	41

LISTE DES EQUATIONS

Équation 1 : Formule du NDVI.....	25
Équation 2 :Equation de régression de NDVI en fonction de la pluviométrie de la forêt de Transition.....	43
Équation 3 : Equation de régression de NDVI en fonction de la pluviométrie pour la forêt Sèche.....	43

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Aperçu des reliefs dans la zone d'étude	7
Figure 2 : Courbe ombrothermique de la Station de Behara	10
Figure 3 : Courbe ombrothermique de la station de Fort-Dauphin	10
Figure 4 : Variation de la précipitation dans les deux zones depuis 1980.....	11
Figure 5 : Courbe de réflectance des végétaux, sols et eaux (Soudani, 2006)	23
Figure 6 : Comportement spectral de l'eau	24
Figure 7 : Illustration du principe du NDVI au niveau d'un arbre	26
Figure 8 : Synthèse de la démarche méthodologique	29
Figure 9 : Evolution des valeurs moyennes du NDVI de la forêt humide en saison humide	36
Figure 10 : Evolution des valeurs moyennes du NDVI de la forêt humide en saison sèche	36
Figure 11 : Evolution des valeurs moyennes du NDVI de la forêt de transition en saison humide	38
Figure 12 : Evolution des valeurs moyennes du NDVI de la forêt de transition en saison sèche	38
Figure 13 : Evolution des valeurs moyennes du NDVI de la forêt sèche en saison humide	42
Figure 14 : Evolution des valeurs moyennes du NDVI de la forêt sèche en saison sèche.	42

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Haut fourré à Didieraceae	15
Photo 2 : <i>Dypsis decaryi</i> (Palmier trièdre) dans la parcelle III du Parc National d'Andohahela	16

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des Aires protégées dans la zone d'étude	5
Tableau 2 : Caractéristiques générales des images Landsat utilisées	18
Tableau 3 : Utilisation des bandes des capteurs LANDSAT TM et ETM+	19
Tableau 4 : Cadre opératoire	30
Tableau 5 : Valeurs moyennes des NDVI par classe et par saison.....	31
Tableau 6 : Valeurs du NDVI et de la pluviométrie.....	34
Tableau 7 : Matrice de corrélation entre NDVI et la pluviométrie.....	35
Tableau 8 : Comparaison du NDVI théorique avec le NDVI observé	44
Tableau 9 : Plan d'action	51

LISTES DES ACRONYMES

AEDES	: Association Européenne pour le Développement et la Santé
AP	: Aires Protégées
ASECNA	: Agence pour la Sécurité de la Navigation en Afrique et à Madagascar
AVHRR	: Advance Very High Resolution Radiometer
CCPI	: Canopy Chlorophyll Ration Index
CCT	: Centre Canadien de Télédétection
CRD	: Comité Régional de Développement
ENSO	: El Niño Southern Oscillation
ENVI	: Environmental for Visualizing Image
ESRI	: Environmental System Research Institute
ETM+	: Enhanced Thematic Mapper
FAO	: Food and Agricultural Organization
FTM	: Foiben-Taosaritanin'i Madagasikara
GIEC	: Group of Intergovernmental Experts on Climate
GRET	: Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques
IEFN	: Inventaire Ecologique Forestier National
ISODATA	: Iterated Self-Organizing Data Analysis Technics
MSS	: Multispectral Scanner System
NAP	: Nouvelles Aires Protégées
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NCPI	: Normalised Pigment Chlorophyll Ration Index
NDVI	: Normalized Difference Vegetation Index
NIR	: Near InfraRed
NOAA	: National Oceanographic and Atmospheric Administration
NORAD	: Norwegian Agency for Development Cooperation
ONE	: Office National pour l'Environnement
ORSTOM	: Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
OSS	: Observatoire du Sahara et du Sahel
PAN/LCD	: Plan d'Action National de Lutte Contre la Désertification
PCS	: Points de Contrôle aux Sols
PHBM	: Projet de mise en valeur du Haut Bassin du Mandrare
PIR	: Proche Infra-Rouge

PNA	: Parc National d'Andohahela
PVI	: Perpendicular Vegetation Index
QMM	: Quit Madagascar Minerals
ROI	: Region Of Interest
SAP	: Système d'Alerte Précoce
SAPM	: Système des Aires Protégées de Madagascar
SAVI	: Soil-Adjusted Vegetation Index
SD	: Standard Deviation
SIG	: Système d'Information Géographique
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
TM	: Thematic Mapper
TSAVI	: Transformed Soil Adjusted Vegetation Index
USGS	: United States Geological Survey
USAID	: United States Agency for International Development
VI	: Vegetation Indices
WCS	: Wildlife Conservation Society
WDVI	: Weighted Difference Vegetation Index
WWF	: World Wildlife Fund

GLOSSAIRE

Changement climatique : Variation de l'état du climat, que l'on peut déceler (par exemple au moyen de tests statistiques) par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), dans son article premier, définit les changements climatiques comme des « changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables » (GIEC, 2007).

Désertification : Ce terme désigne la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines (OMM, 2005).

Forêt humide : Forêt pluristratifiée composée de trois strates ou plus. La canopée est fermée avec une hauteur de 15 à 25m. Les émergents peuvent dépasser 30m de hauteur.

Forêt de transition : C'est un habitat qui a des caractères intermédiaires entre deux écosystèmes : entre forêt littorale et forêt sèche d'une part ou forêt sèche et forêt humide d'autre part.

Forêt sèche : Peuplement fermé pluristrate, de stature moins élevée que la forêt dense humide; la plupart des arbres des étages supérieurs perdent leurs feuilles; le sous-bois arbustif est soit sempervirent, soit décidu et le tapis graminéen généralement discontinu (Koechlin et Guillaumet, 1991)

Fourré xérophile : Peuplement fermé de petits arbres principalement, buissons et plantes grimpantes, de hauteur comprise généralement entre 3 et 7m. Les espèces *Euphorbia stenoclada*, *Euphorbia leucodendron* ainsi que *Didierea madagascariensis* se retrouvent très souvent dans cette unité paysagère caractéristique des milieux littoraux arides et rocaillieux.

Résilience : Capacité d'un système social ou écologique d'absorber des perturbations tout en conservant sa structure de base et ses modes de fonctionnement, la capacité de s'organiser et la capacité de s'adapter au stress et aux changements (GIEC, 2007).

Sècheresse : Ce terme désigne le phénomène naturel qui se produit lorsque les précipitations ont été sensiblement inférieures aux niveaux normalement enregistrés et qui entraîne de graves déséquilibres hydrologiques préjudiciables aux systèmes de production des ressources en terres.

Télédétection : Ensemble de techniques servant à l'acquisition d'images ou d'autres types de données sans contact direct avec l'objet étudié, ainsi que le traitement et l'analyse de ces données. Elle est basée sur la détection à distance et la mesure des radiations électromagnétiques. Ces radiations proviennent de l'énergie diffusée ou émise par des éléments de surface appelés cibles, après que celles-ci ont elles-mêmes reçu de l'énergie issue d'une source primaire, généralement le soleil ou d'un capteur actif (CCT, 2001). Le traitement et l'analyse des informations véhiculées par le rayonnement enregistré permettent d'accéder à certaines propriétés de cette cible : géométriques (position, forme et dimensions), optiques (réflexion, transmission, absorption, etc.) et physico-chimiques (température, teneur en eau, chlorophylle foliaire, phyto-masse, matière organique du sol,...), etc (Soudani, 2006).

Transformation d'images : La transformation d'images est un procédé qui implique la manipulation de plusieurs bandes de données, que ce soit pour transformer une image provenant d'un capteur multispectral ou pour transformer plusieurs images de la même région prises à des moments différents (données multitemporelles). La transformation d'images génère une "nouvelle" image en combinant les différentes sources d'information de manière à rehausser certaines caractéristiques ou certaines propriétés des données qui sont moins évidentes dans l'image originale (CCT, 2001).

Variabilité climatique : se rapporte aux 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).

Xérophile : Se dit en matière d'habitat d'une plante capable de vivre dans des conditions de sécheresse accusée.

ooo

INTRODUCTION

ooo

Introduction

A une échelle régionale, des changements climatiques ont déjà été observés dans de nombreuses parties du globe et ont déjà eu une influence sur un large éventail de systèmes physiques et biologiques (GIEC, 2001). Les changements des précipitations ne sont pas uniformes, une humidification des régions tropicales et subtropicales et une diminution des précipitations en Afrique Australe ont été constatées (Tadross *et al.*, 2008). Cela aura un impact sur les cycles des saisons (Bauza et Leger, 2010) et provoque des bouleversements sur le monde vivant : régression de certaines populations végétales et animales ou précocité de la floraison des arbres (GIEC, 2001).

A Madagascar, au cours des 100 dernières années, le niveau des précipitations a connu une grande variabilité. Le niveau de réchauffement de la partie Sud est plus important que celui du Nord. En l'an 2000, la température moyenne de cette région a augmenté approximativement de 0,2°C par rapport aux observations de 1950 (Tadross *et al.*, 2008). La tendance de la précipitation à partir des années 1980 dans le Sud est à la baisse (WWF, 2010). Pourtant, Madagascar est un des pays tropicaux et insulaires de l'hémisphère Sud où la diversité biologique est particulièrement importante. La diversité spécifique y est représentée par différentes adaptations évolutives et écologiques des espèces (animales et végétales) aux particularités de l'environnement. Les forêts sèches, les forêts de transition et les forêts humides de la partie Sud de la Région Anosy sont des écosystèmes recelant autant de diversités surtout sur les formes d'adaptation aux conditions stationnelles comme l'altitude ou la précipitation. A l'instar du Parc National d'Andohahela ces forêts jouent un rôle très important dans la vie économique de la région de Fort Dauphin et d'Amboasary-Sud grâce à l'importance de son réseau hydrographique. En effet, plusieurs rivières y prennent naissance dont la plupart sont permanentes. Plusieurs zones de culture en dépendent. Même l'alimentation en eau de la population d'Ambovombe dépend de la rivière de Mandrare qui sort du parc.

Ainsi, les bouleversements subis par ces différents types de forêts à cause du changement climatique surtout au niveau du paramètre précipitation constituent des enjeux écologiques et économiques importants. A cet effet, cette étude contribuera à la mise en lumière du niveau d'adaptation de ces forêts face aux variabilités de la précipitation. Ces variabilités se manifestent à deux échelles différentes : à l'échelle interannuelle et à l'échelle intraannuelle.

Pour cela, l'étude a été subdivisée en quatre principales parties : d'abord la problématique suivie des hypothèses constituent le fil conducteur de la recherche, puis, la méthodologie adoptée, ensuite la présentation des résultats et enfin les discussions et recommandations issues de la recherche. Une conclusion terminera ce travail.

ooo

PROBLEMATIQUE, HYPOTHESES

ET

OBJECTIFS

ooo

I. Problématique et Hypothèses

I.1 Problématique

La végétation est un des éléments naturels très sensibles aux changements environnementaux mais qui, réciproquement via le cycle de l'eau et le bilan radiatif, peut aussi influencer ces changements (Ioana-Toroimac *et al.*, 2006). Les précipitations et la température sont les principaux facteurs déterminants du climat de la planète. Elles déterminent la distribution possible de la végétation terrestre et constituent les facteurs premiers de la genèse et de l'évolution des sols. Ressource indispensable à la croissance des plantes, l'eau est un élément constitutif majeur de la matière végétale, mais aussi une source d'hydrogène et d'oxygène pour la photosynthèse notamment lors de l'hydrolyse. Si la quantité d'eau disponible dans le sol est limitée, la plante souffrira de stress hydrique. Elle réduira alors son activité photosynthétique et biologique et sa consommation en eau (Gaume, 2000). Ainsi, il existe une étroite corrélation entre les précipitations et la biomasse (OMM, 2005).

De même que le climat répartit le type de végétation dans le monde, ses changements peuvent également avoir des impacts sur le comportement de celle-ci. Le facteur hydroclimatique est responsable des principales variations dans la constitution des paysages (organisation, constituants, relations, diversité, etc.), aux échelles saisonnières et interannuelles. Les précipitations expliquent notamment la majeure partie de la variance de la phénologie régionale (Bigot, 1997). En Afrique tropicale, la variabilité de la phénologie végétale est très souvent mise en relation avec les éléments du cycle de l'eau (Prince *et al.*, 1998 ; Tucker *et al.*, 2005 ; Diallo *et al.*, 2005).

Sur une grande superficie de forêts, l'analyse des états de la végétation (phénologie et biomasse) peut être effectuée par les observations par satellite et les outils de télédétection. L'analyse des séries chronologiques de données issues de la télédétection et les calculs d'indice s'avèrent être de puissantes techniques autorisant la surveillance des changements des états des forêts et de leur modélisation (modélisation de l'évolution des proportions d'état de surface élémentaires détectées au cours du temps) (OSS, 2005). Le calcul de ces indices part du principe sur les capacités des chlorophylles, la substance qui produit la couleur verte de la majorité des plantes, à agir face aux rayonnements de longueur d'onde situés entre 0,5 et 0,7 μm . Dans la partie du spectre électromagnétique située entre 0,5 et 0,7 μm , la végétation verte absorbe fortement le rayonnement, alors qu'entre 0,7 et 1,1 μm , les épidermes foliaires ont l'effet inverse de réflexion (Tucker et Sellers, 1986). La végétation en santé contient une grande quantité de chlorophylle. Les plantes reflètent très peu le rayonnement rouge (0,6 à 0,7 μm) et bleu (0,4 à 0,500 μm) car la chlorophylle les absorbe, cependant elles réfléchissent beaucoup le vert (0,500 à 0,6 μm) et l'infrarouge (s'étend approximativement de 0,7 à 15 μm) (Bonn et

Rochon, 1993)). La réduction en chlorophylle réduit la quantité de rayonnement vert réfléchi, tandis que les changements de la structure interne des plantes réduisent la quantité de rayonnement proche infrarouge (PIR (0,73-1,10µm)) réfléchi. Ces réductions permettent donc une détection rapide du stress au niveau de la végétation. L'analyse de la proportion d'infrarouge réfléchi par rapport au rouge donne une excellente mesure de la santé de celle-ci. Ce rapport sert de principe de base pour certains indices de végétation : PVI (*Perpendicular Vegetation Index*), SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*), NCPI (*Normalised Pigment Chlorophyll Ration Index*), CCPI (*Canopy Chlorophyll Ration Index*), VI (*Vegetation Index*) ou le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Le plus utilisé est l'indice de végétation normalisé ou NDVI (Lafrance *et al.*, 1990).

Mis au point par Rouse *et al.* en 1973, l'indice de végétation NDVI est très utilisé car il est facile à mettre en œuvre et fonctionne dans la majorité des cas. Le NDVI donne des informations sur l'état du couvert végétal ainsi que sur la biomasse. Le stade phénologique et la santé des plantes sont les facteurs majeurs qui influencent la valeur du NDVI. Des plantes en santé possèdent une valeur NDVI élevée, car elles réfléchissent beaucoup de lumière infrarouge et ne réfléchissent presque pas de lumière rouge. Une diminution du NDVI correspond à une activité photosynthétique réduite et une biomasse verte faible. En revanche, une végétation dense se caractérise par un NDVI fort (Pouchin *et al.*, 2002) traduisant une activité chlorophyllienne développée.

A Madagascar, ces caractéristiques du NDVI ont été exploitées par Jacquin en 2010 en étudiant la dynamique de végétation dans les savanes en lien avec l'usage des feux dans la région de Marovoay. Ces résultats ont été évalués par comparaison avec ceux issus de techniques de détection des changements basées sur l'analyse diachronique d'images à haute résolution spatiale. Deux approches de détection des changements, basées sur le traitement de série temporelle de NDVI, ont été testées. La première repose sur l'analyse des variations inter annuelles d'un indicateur phénologique traduisant l'activité végétale pendant la phase de croissance des savanes. La deuxième utilise une technique de décomposition temporelle pour extraire la tendance d'une série de NDVI.

En revanche, dans le contexte de changement climatique et ses impacts sur la végétation, une autre analyse de séries de NDVI sur 18 ans depuis 1982 à 1999 mensuellement via les images satellites *National Oceanographic and Atmospheric Administration's* (NOAA), *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) sur l'ensemble des forêts malgaches a été effectuée par Ingram et Terence en 2004. Sur une échelle interannuelle et saisonnière, ils ont discerné une dynamique des végétations sur toute l'île. Ces deux scientifiques ont trouvé une corrélation forte entre le phénomène ENSO (*El Niño Souther Oscillation*), un phénomène climatique qui se produit dans l'océan Indien et qui peut être attribué à des phénomènes de sécheresse, et les valeurs de NDVI.

Quant à la présente étude, elle essaie de mettre en évidence la tendance temporelle et spatiale des états de végétation dans la partie Sud de la région Anosy en utilisant des valeurs NDVI obtenues à partir des traitements d'images Landsat. Pour mieux expliquer la liaison de cette tendance avec les variabilités climatiques, la corrélation entre NDVI et la précipitation est étudiée. Le choix de cette zone d'étude est dû à la diversité de la végétation et du climat. En effet, cette zone présente des contrastes d'origines naturelles du paysage forestier, une forêt dense humide sempervirente est rencontrée à l'Est tandis qu'à l'Ouest une forêt sèche constitue l'écosystème. Entre les deux types de forêts existent une forêt de transition ayant à la fois les caractéristiques des forêts sèches ainsi que celles des forêts humides. Les précipitations y sont également variées dues principalement aux chaînes Anosyennes. Enfin, par rapport à la population de la région, ces écosystèmes jouent un rôle important dans l'approvisionnement en eau des Communes alentours.

Suite à ces diverses théories sur l'utilisation du NDVI et suite aux variabilités de la précipitation qui se sont produites dans la région Anosy ces dernières années, la présente étude tente de répondre à la question suivante : **Comment les forêts humides, les forêts sèches et les forêts de transition réagissent-elle face aux variabilités de la précipitation?**

I.2 Hypothèses

Dans un premier temps, étant donné qu'il existe une relation étroite entre la quantité de pluie et NDVI, la première hypothèse avance que de la variabilité interannuelle des précipitations résulte une fluctuation annuelle des valeurs de NDVI, par conséquent, des états des différents types de forêts dans la zone étudiée. Dans la mesure où la tendance pluviométrique est à la baisse (WWF, 2010), cette fluctuation peut aussi aboutir à la réduction de la verdure des forêts à long terme. Autrement dit, étudiées sur un intervalle d'années assez large (en référence aux variabilités interannuelles), les valeurs de NDVI diminuent et les forêts se dégradent.

Dans un deuxième temps, la dégradation est plus forte dans le cas où une variabilité intra annuelle des précipitations est constatée. Effectivement, la variabilité intra annuelle des précipitations d'une année à une autre pourrait causer une fragilité rapide des forêts. Ainsi, la deuxième hypothèse stipule que les variabilités interannuelles renforcées par les variabilités intra annuelles avanceraient la dégradation des forêts dans la partie Sud de cette région.

I.3 Objectifs

Grâce aux outils de télédétection et SIG (Système d'Information Géographique) cette étude vise à observer les comportements de ces végétations en fonction de la précipitation. Les objectifs porteront sur l'évaluation de la tendance de ces forêts c'est-à-dire l'évaluation de la capacité d'adaptation des différents types de forêts sur une échelle de 20 ans (1984 à 2009).

ooo

MATERIELS

ET

METHODES

ooo

II. Matériels et Méthodes

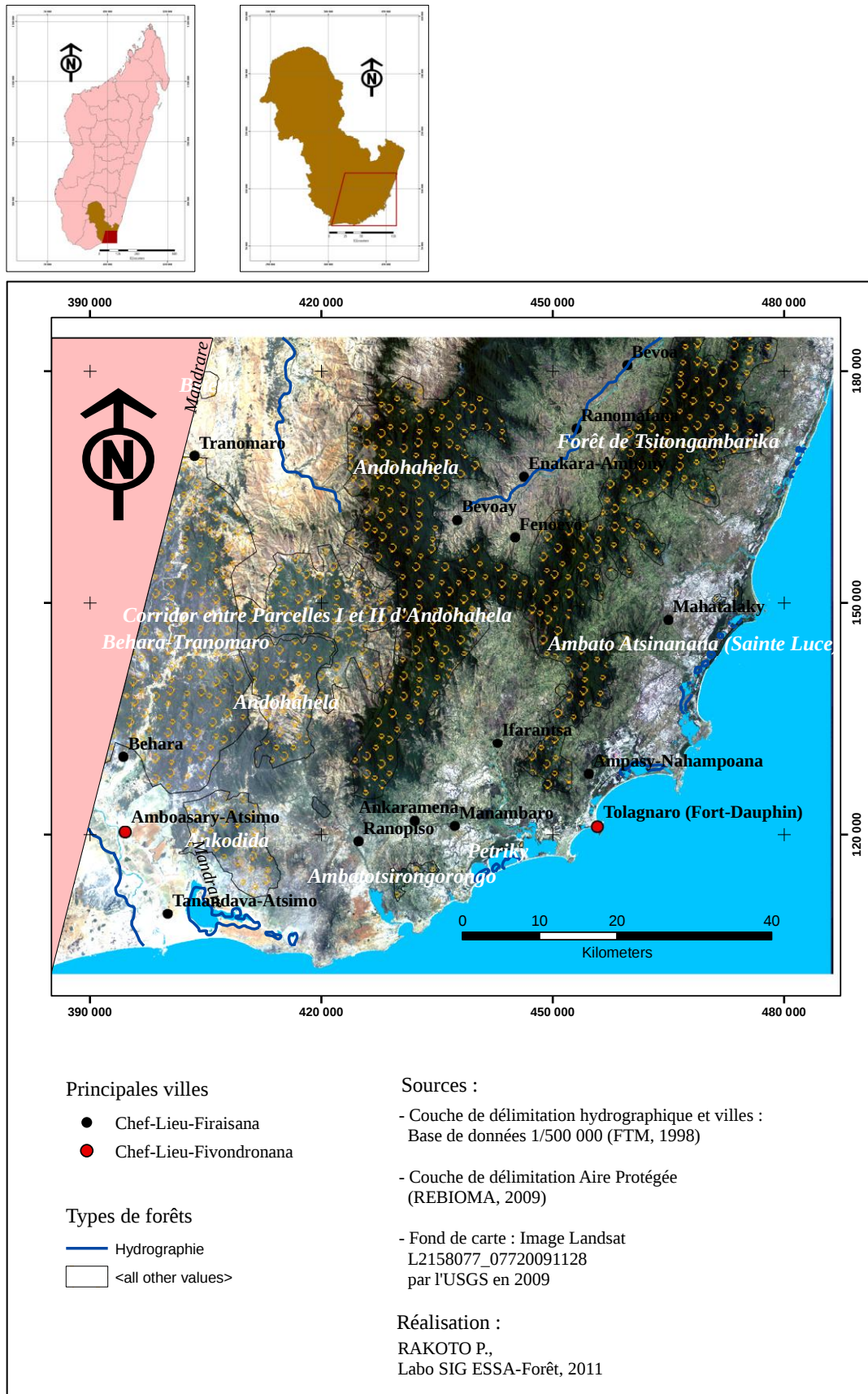
II.1 Dispositif du milieu d'étude

L'étude a été effectuée au niveau des écosystèmes forestiers de la région Anosy localisés entre le Fivondronam-pokontany de Fort-Dauphin et celui d'Amboasary-Atsimo. La zone est délimitée par les coordonnées géographiques suivantes au Nord (Latitude : 24°22'34,06''S) par les longitudes 46°24'30,29''E et 47°17'54,00''E et au Sud (Latitude : 25°10'38,86''S) par les longitudes 46°14'12,31''E et 47°17'54,00''E.

La zone comprend des Aires Protégées comme le parc national d'Andohahela (PNA : 76020Ha), les forêts classées de Tsitongambarika, la réserve de renommée internationale de Berenty et des Nouvelles Aires Protégées (NAP) en cours de création comme le complexe de Behara-Tranomaro, la forêt d'Ankodida, Ambatotsirongorongo, et Petriky.

Tableau 1 : Liste des Aires protégées

Nom	Descriptions	Classe	Gestionnaire
Ambato Atsinanana (Sainte Luce)	Aire Protégée à Statut Temporaire	SAPM	QMM
Ambatotsirongorongo	Aire Protégée à Statut Temporaire	SAPM	WCS
Ankodida	Aire Protégée à Statut Temporaire	SAPM	WWF
Mandena	Aire Protégée à Statut Temporaire	SAPM	QMM
Andohahela	AP gérée par MNP	SAPM	MNP
Forêt de Tsitongambarika	Nouvelle Aire Protégée	SAPM	ASITY MADAGASCAR
Petriky	Nouvelle Aire Protégée	SAPM	QMM
Beteny	Nouvelle Aire Protégée	SAPM	WWF
Behara-Tranomaro	Nouvelle Aire Protégée	SAPM	WWF
Corridor entre Parcelles I et II d'Andohahela	Nouvelle Aire Protégée	SAPM	WWF



Carte 1 : Les Aires protégées dans la zone d'étude

II.1.1 Géologie et géomorphologie

L'Anosy (Taolagnaro) est formé de roches granitiques avec des sols ferralitiques. Le granite migmatite et migmatite granitoïde sont les plus rencontrés. Le soubassement cristallin est constitué par des roches plus tendres (schistes, paragneiss recouverts par des épandages de matériaux sableux).

Les différentes sortes de formations rocheuses rencontrées dans cette partie de l'île sont :

- Roches volcaniques (bassin du Mandrare) ;
- Des dérivées de roches : Sables le long du littoral Androyen, alluvions le long des fleuves Mandrare et Menarandra, concrétions et cuirasses, dans les massifs de l'Ivakoana et les chaînes anosyennes.

Quant aux reliefs, ils peuvent être assimilés au profil transversal de Madagascar qui est marqué par une forte dissymétrie entre les versants Est et Ouest. Les massifs montagneux qui divisent longitudinalement la grande île en deux versants (Est et Ouest) se terminent par les chaînes Anosyennes à Taolagnaro, et par le massif de l'Ivakoana, au niveau de Tsivory. A l'Est, l'altitude s'élève rapidement et les régions centrales se caractérisent par une falaise escarpée. De ce fait, les plaines côtières sont très étroites. Vers l'Ouest par contre, le relief s'abaisse de façon beaucoup plus progressive vers des régions basses infiniment plus étendues. Cette opposition entre les régions orientales et centrales d'une part, occidentales d'autre part est la conséquence directe de la structure tectonique et géologique de Madagascar (Koechlin *et al.*, 1997).

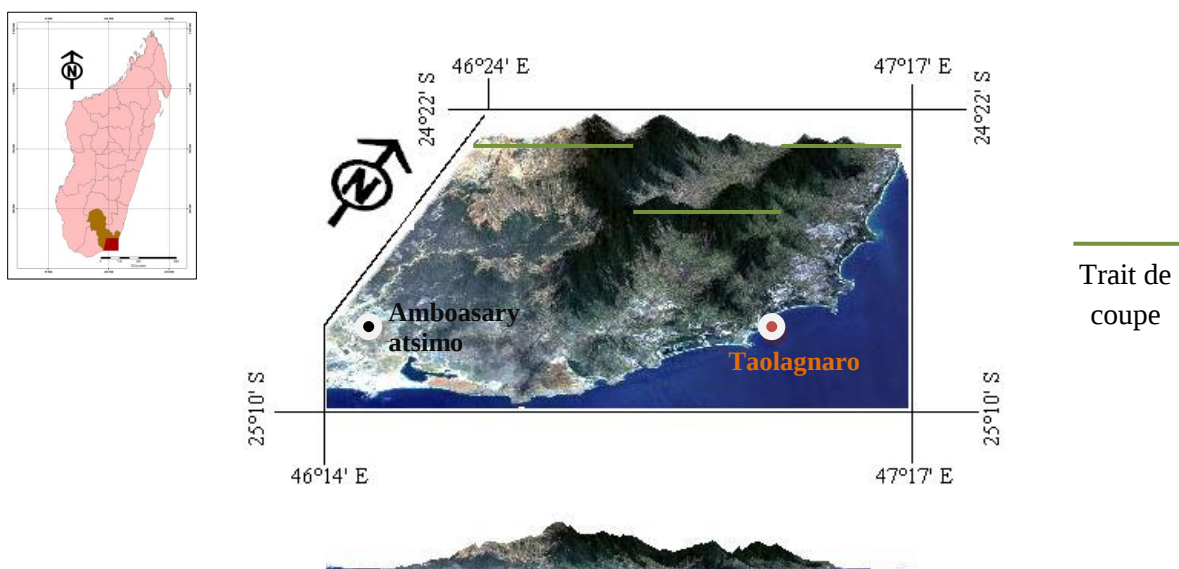


Figure 1 : Aperçu des reliefs dans la zone d'étude

(Modèle obtenu à partir de la superposition de l'image de Novembre 2009 L5158077_07720091128 avec des images SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) en 2000 de Landsat fournies par USGS)

II.1.2 Climat

D'une façon générale, l'Est fait partie de la région climatique orientale de Madagascar qui est chaude et humide. Par contre l'Ouest subit un climat chaud et aride.

Pour les zones de Taolagnaro et d'Amboasary, les variations de pluviosité et de températures sur les versants, en face et opposés au vent, des chaînes Anosyennes sont expliquées par l'effet de fœhn dû à ces chaînes. En escaladant un versant, les vents se déchargent de la quasi-totalité de leur humidité et provoquent des précipitations abondantes sur ces versants sous le vent appelés «adrets».

Les effets de la continentalité jouent également un rôle non négligeable dans la répartition des régions thermiques à travers la diminution de l'influence régulatrice et modératrice des vents humides au fur et à mesure que l'on se déplace à l'intérieur du continent.

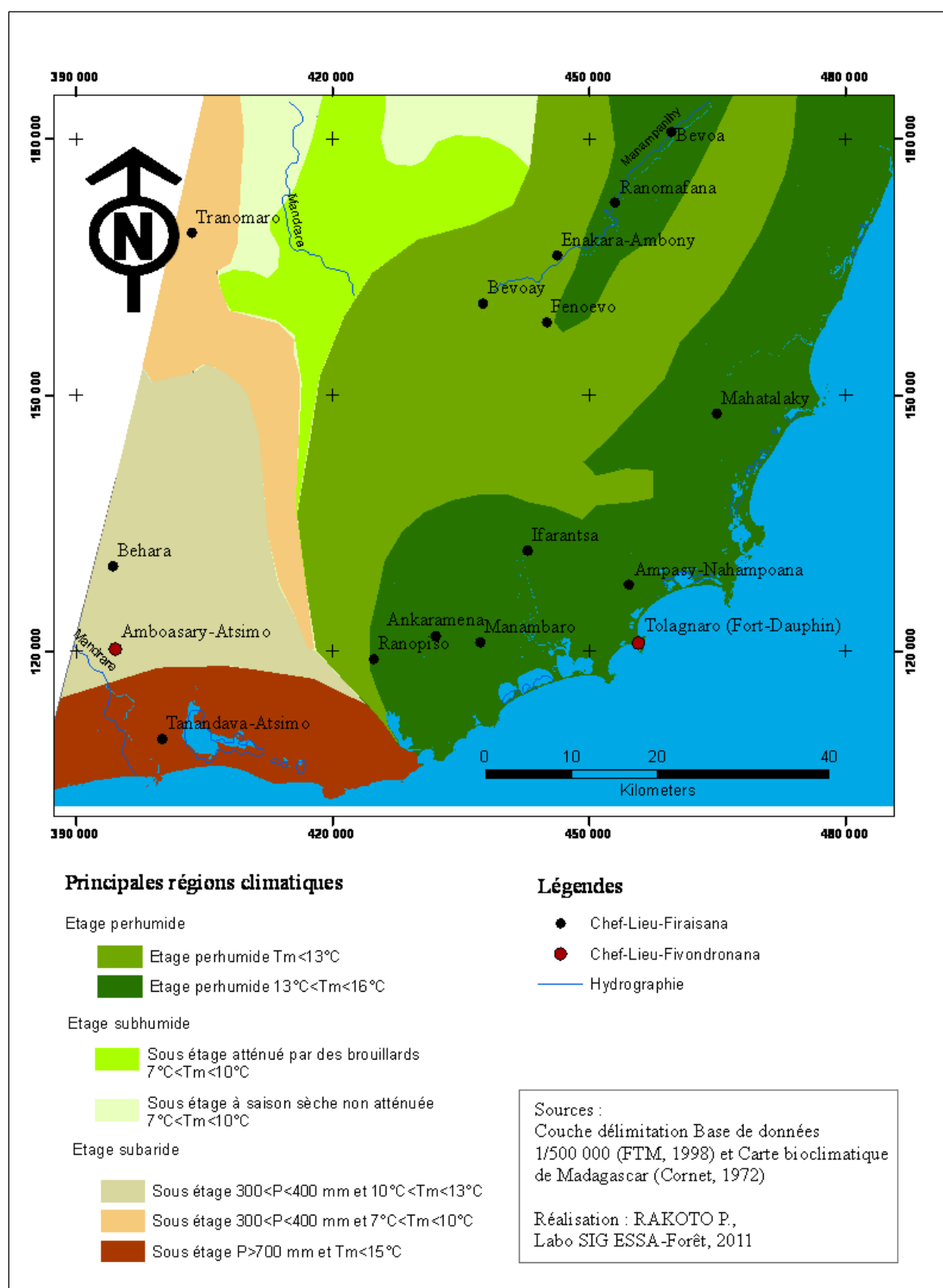
II.1.2.1 Répartition spatiale du climat

Une diminution rapide des précipitations de l'Est vers l'Ouest est remarquée, avec 1 527 mm de pluie annuelle à Taolagnaro contre moins de 547 mm à Behara situé à l'Ouest (Hervieu, 1960). La distance séparant les pentes Est des montagnes anosyennes aux cotes sont relativement courte. Ces montagnes bloquent le mouvement des nuages porteurs de pluies venant de l'Est (Paulian *et al.*, 1973). Le coté Ouest reçoit beaucoup moins de précipitations. À 60km à vol d'oiseau à partir des cotes, il existe une transition (Donque, 1972). La modification des précipitations est beaucoup plus abrupte que celle décrite par Donque, mais faute de stations pluviométriques dans cette aire de transition, il est impossible d'être plus précis (Paulian *et al.*, 1973. Donque, 1975; Goodman *et al.*, 1997).

II.1.2.2 Répartition temporelle du climat

La répartition annuelle du climat a été définie selon le principe de Walter et Lieth en 1967. D'après ce modèle, trois cas peuvent se présenter :

- Quand la précipitation ne dépasse pas le double de la valeur de la Température alors, la saison est dite sèche.
- Quand et que alors, la saison est dite humide.
- Quand et que alors, la saison est dite perhumide.



Carte 2 : Zones climatiques et hydrographiques

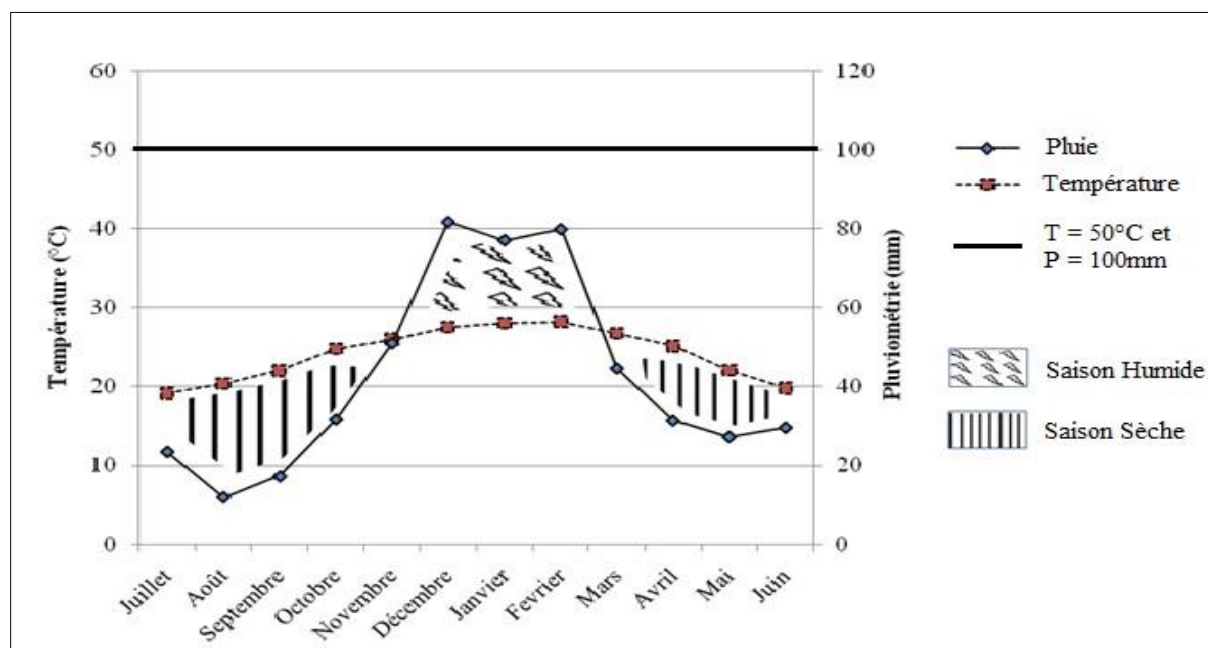


Figure 2 : Courbe ombrothermique de la Station de Behara

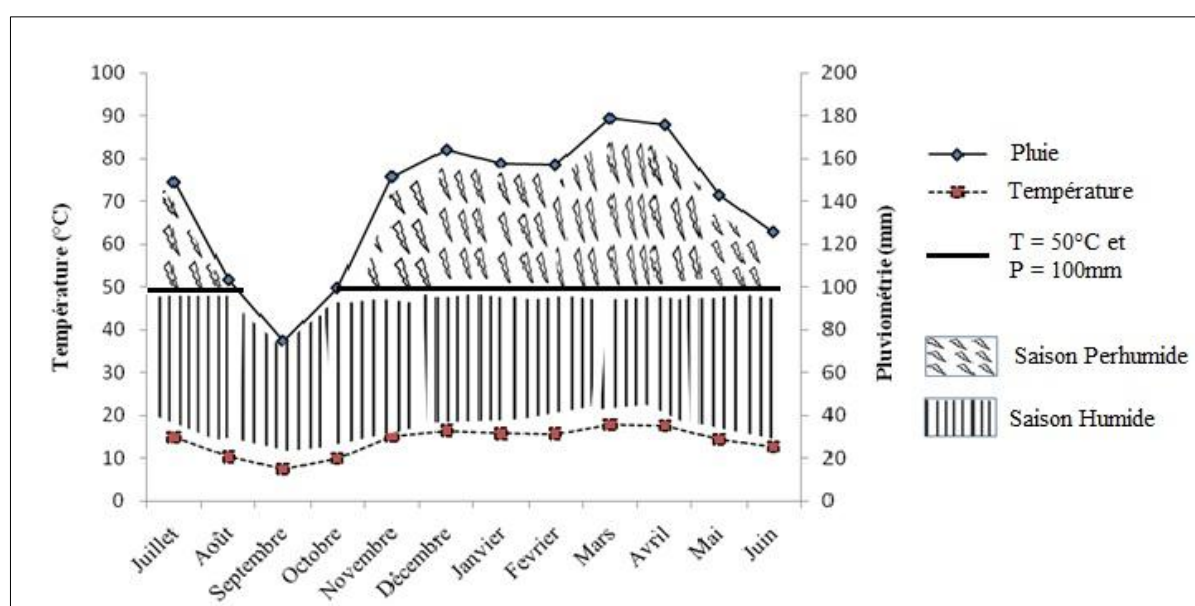


Figure 3 : Courbe ombrothermique de la station de Fort-Dauphin

(Pour les tableaux associés à ces climadiagrammes, Cf. Annexe 3)

Ainsi, la saison humide et chaude s'étale de Novembre à Mars (Cinq mois) et la saison sèche s'étale d'Avril à Octobre (Sept mois) dans la zone Ouest (Cf. Figure 1). La zone Est est caractérisée par une saison perhumide de Novembre à Juillet (Neuf mois) et une saison humide d'Août à Octobre (Trois mois) (Cf. Figure 2).

II.1.2.3 Changements observés ces dernières années

Au niveau de la région Anosy, de 1961 à 2005, une augmentation de la température, notamment de la température minimale journalière a été constatée. En moyenne, une hausse de plus de 1°C en 45 ans a été enregistrée. Pendant cette période, une diminution de la quantité des pluies journalières (surtout en hiver) a également été observée. La saison pluvieuse s'est raccourcie et les intensités moyennes des pluies journalières ont baissé (WWF, 2010).

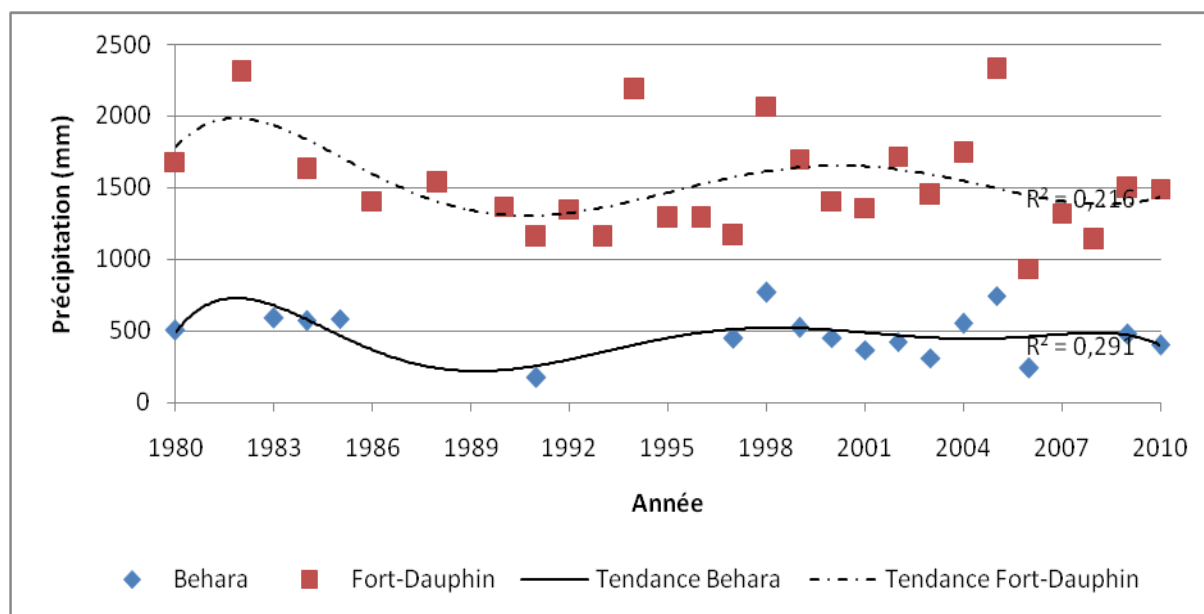


Figure 4 : Variation de la précipitation dans les deux zones depuis 1980

Pour la zone Est (Fort-Dauphin), les pluviométries ont été enregistrées au niveau de la station météorologique nationale de Fort-Dauphin pour les années 1980 à 1992 puis de 2000 à 2010. Par contre, pour les années 1993 à 1999, les précipitations enregistrées par la station de l'ASECNA ont été prises. La quantité de pluie de l'année 1980 correspond à la moyenne interannuelle de 1960 à 1990. Par contre, pour la zone Ouest, la station de Behara est la station pouvant représenter le mieux cette zone (Rarivomanana, 2006). Mais les données issues de cette station présentent des lacunes et comme toutes les autres stations du Sud, elle a été fermée avant 1980 mais des relevés ont été effectués en 1991. Par conséquent, les données proviennent de deux sources différentes :

- 1980 à 1991 : au niveau du service de la météorologie. La moyenne prise sur 30 ans est celle enregistrée à Behara (1951-1980). Pour les années 1983, 1984 et 1985, les données disponibles ont été celles de la station d'Amboasary Atsimo. En 1991, la station de Behara fut de nouveau opérationnelle.

- 1997 à 2010 : dans les bulletins SAP¹ (Système d'Alerte Précoce). Ces bulletins sortent tous les mois et contiennent des données pluviométriques de la région Anosy et Androy. Pour les années 1997, 1998 et 1999, les précipitations de Behara ont été considérées. A partir de l'an 2000, ce sont les données pluviométriques d'Ambovombe qui sont prises faute de bulletins. Contrairement à Behara, Ambovombe est une des zones d'intervention du GRET lequel a bien voulu fournir les données pluviométriques.

Malgré les lacunes des données météorologiques, une tendance à la baisse de la pluviométrie annuelle est constatée dans les deux zones. L'année 1991 a été l'année la plus sèche. En fait, cette année correspond à la grande famine qui a sévi le Sud de Madagascar à la fin du siècle dernier. Les précipitations ont été de 175,3mm alors que les moyennes interannuelles se situent autour de 547mm (Données Météo entre 1951 et 1980 de la station de Behara).

II.1.3 Types de sols dans la région

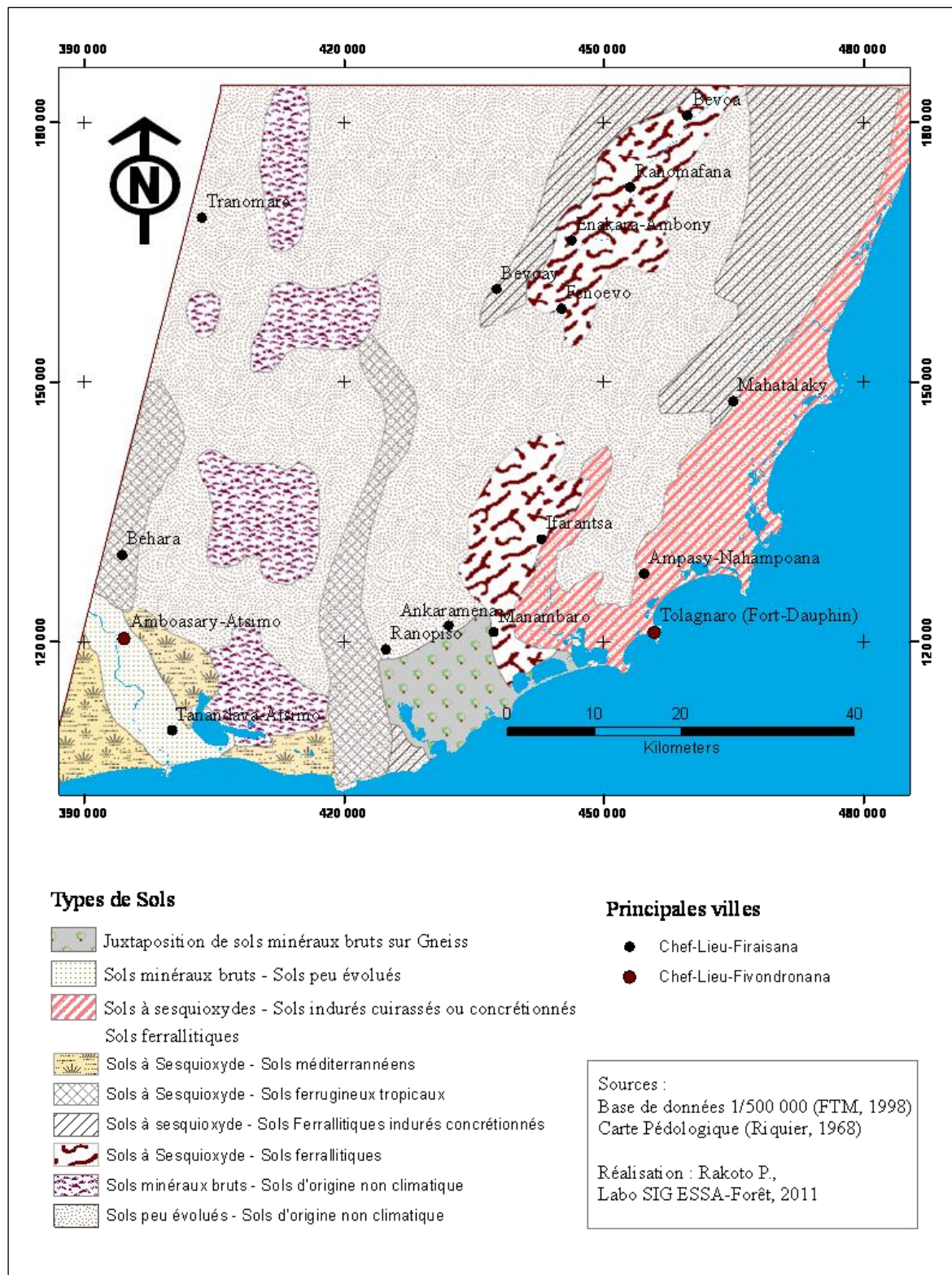
D'une façon générale, les sols sont particulièrement pauvres, peu ou pas humifères. Les sols ferrugineux tropicaux formés sur roches métamorphiques, couvrant de vastes surfaces, sont le plus souvent des sols squelettiques, superficiels, d'une faible valeur agricole et pastorale.

- Dans les Sous préfectures d'Amboasary (tout ce qui est à l'Est de la route Amboasary - Tsivory) : un complexe de sols ferrugineux tropicaux et peu évolués.
- Toutes Communes dans la Sous préfecture de Taolagnaro : sols ferralitiques jaune/rouge ; sols ferralitiques rouges ; association sols ferralitiques jaune/rouge et rouge. Ces sols occupent toutes les zones montagneuses dont le réseau de drainage se dirige vers l'Est.
- Le long des rivières Mandrare et Menarandra : sols peu évolués alluviaux plus ou moins hydromorphes.

Les sols appartiennent également à la classe des sols minéraux bruts ou de sols à sesquioxydes. Les sols minéraux bruts sont caractérisés par une absence presque complète d'humus. Ces sols sont des sols d'érosions bruts ou des sols bruts d'apport. Les sols d'érosion bruts se trouvent généralement dans la partie occidentale. Ces sols proviennent de l'altération chimique des roches mères généralement

¹ Le projet SAP, dont l'Association Européenne pour le développement et la Santé (AEDES) est l'agence d'exécution, a pour objectif d'éviter les crises alimentaires dans le Sud de Madagascar. Le SAP identifie les zones et populations risquant de connaître des problèmes alimentaires ou nutritionnels, détermine les aides à apporter et recommande des actions à mettre en place.

calcaire ou calcique. Par contre, les sols bruts d'apport sont des sols éoliens ou des sols colluviaux calcaires. Les colluviaux sont très sableuses et supportent une maigre végétation (Hervieu, 1960).



Carte 3 : Types de sols

II.1.4 Ecosystèmes et biodiversité spécifiques

A titre de référence, la couverture forestière (fourrés inclus) représente 19% de la superficie totale de la région Anosy soit 563524 ha environ (CRD Anosy(Comité Régional de Développement, 2001). Une dominance des formations graminéennes telles que savane et pseudo-steppes a été observée : environ 69% de la région. La superficie des forêts dans la zone d'étude obtenue après classification de l'image de Novembre 2009 est de 250 340 Ha.

Un aperçu général sur les écosystèmes des AP et NAP dans la zone étudiée permet de différencier divers types de forêts peuvent être observés allant des bush épineux semi-aride de l'Ouest composés de Fourrés xérophiles à Didieraceae et Euphorbiaceae, caractéristiques du Sud malgache, aux forêts denses humides de l'Est en passant par une forêt de transition. Quelques formations savaneuses sont également observées.

La diversité des habitats présents dans cette région est due aux montagnes Anosyennes lesquelles agissent comme barrière de pluie (Battistini, 1964 ; Goodman *et al.*, 1997). En effet, le principal facteur de cette diversité est la différence des précipitations annuelles entre le coté Est et le coté Ouest de ces montagnes (Ratsivalaka-Randriamanga, 1985).

II.1.4.1 Forêts denses humides

Généralement, la forêt orientale est une forêt dense humide sempervirente. Le caractère le plus frappant de cette forêt orientale réside dans les dimensions relativement réduites des arbres de la strate supérieure : la futaie, haute de 25 à 30 m, n'est pas composée de ces arbres immenses à troncs énormes qui sont les caractéristiques des autres forêts tropicales (Koechlin *et al.*, 1997). C'est un milieu particulièrement favorable à la vie végétale. Les forêts littorales font partie des forêts humides sempervirentes, leur déterminisme est à la fois climatique et édaphique. Les forêts littorales sont définies comme des variations édaphiques des forêts denses humides de basse altitude du domaine oriental de Humbert en 1965 (Koechlin *et al.*, 1971). En effet, les caractéristiques physionomiques (canopée moins élevée, abondance d'arbres de diamètre moyen...) et floristiques de cette formation végétale sont étroitement liées au substrat qui est essentiellement du sable. Cette spécificité liée à la nature du substrat se manifeste surtout par une grande richesse en biodiversité floristique et faunique.

Localement, dans le parc d'Andohahela, la parcelle I proche de Tsitongambarika (à l'extrême Est de la zone) présente des formations végétales variées : la forêt pluviale de basse altitude (domaine de l'Est), la forêt du Centre Est (domaine du Centre) et les formations sclérophylles d'altitude (domaine de Haute Montagne). Les principales rivières de la région prennent source dans la parcelle I. Ce qui lui confère le rôle de château d'eau ou de réservoir hydrique de la région de Fort Dauphin.

II.1.4.2 Forêts sèches

Caractérisée par des broussailles caducifoliées ou des fourrés épineux allant de Ranopiso jusqu'aux limites nord et ouest de la préfecture d'Amboasary, à partir du niveau de la mer jusqu'à 800 m d'altitude, la forêt dense sèche constitue le climax de tout le domaine phytogéographique de l'Ouest et il en reste encore des superficies importantes. Ce type forestier se présente là avec une très grande variété de formes (Koechlin et Guillaumet, 1971). Les formations sèches sont composées de fourré sur calcaire, fourré sur latérite, fourré transition le long du Mandrare et de la forêt dense sèche proprement dite. Les Didiéracées sont toutes des plates ligneuses fortement adaptées à la sécheresse, (épines, pour la plupart crassulescentes) et dont les feuilles sont généralement caduques en saison sèche.



Photo 1 : Haut fourré à Didieraceae

(Source : ANGAP Toliara, 2003)

II.1.4.3 Forêts de transition

C'est un habitat qui a des caractères intermédiaires entre deux écosystèmes : entre littorale et forêt sèche d'une part ou forêt sèche et forêt humide d'autre part. La "transition" entre la forêt humide du domaine de l'Est et la forêt sèche du Sud est limitée au Sud par la forêt d'Ambatorongorongo, à l'Est par le PNA (Parc National d'Andohahela), incluant la parcelle III, la forêt se trouvant juste à l'Ouest de la parcelle I du PNA, la zone de Mahamavo, et à l'Ouest par le bush épineux d'Amboasary. C'est un habitat relativement important en termes de biodiversité et en terme de fonction écologique (fonction de régulation) en tant que corridor. L'autre particularité de ces forêts est la présence à la fois d'essences de la forêt humide et de celles du fourré xérophile.

Comme illustrations, les forêts se situant aux environs de l'aire protégée d'Ankodida constituent la barrière entre l'écotone des forêts humides et celles des forêts épineuses. Cette ceinture végétale fait la transition entre ces deux écosystèmes. La parcelle III du PNA a été créée spécialement (en tant qu'AP) pour la protection de *Dypsis decaryi* (Arecaceae) ou palmier trièdre. C'est le site principal de cette espèce endémique (Nicoll et Langrand, 1989). Une autre espèce emblématique de la forêt de transition est le Manaribe faisant partie de la famille des Sarcocaulaceae et dont le nom scientifique est le *Xylocarpus humbertii*. C'est un arbre atteignant 8m de haut, ses feuilles sont ovales et subcoriaces. Dans la parcelle II du PNA existent également des formations de transition (Ravivomanana, 2006).

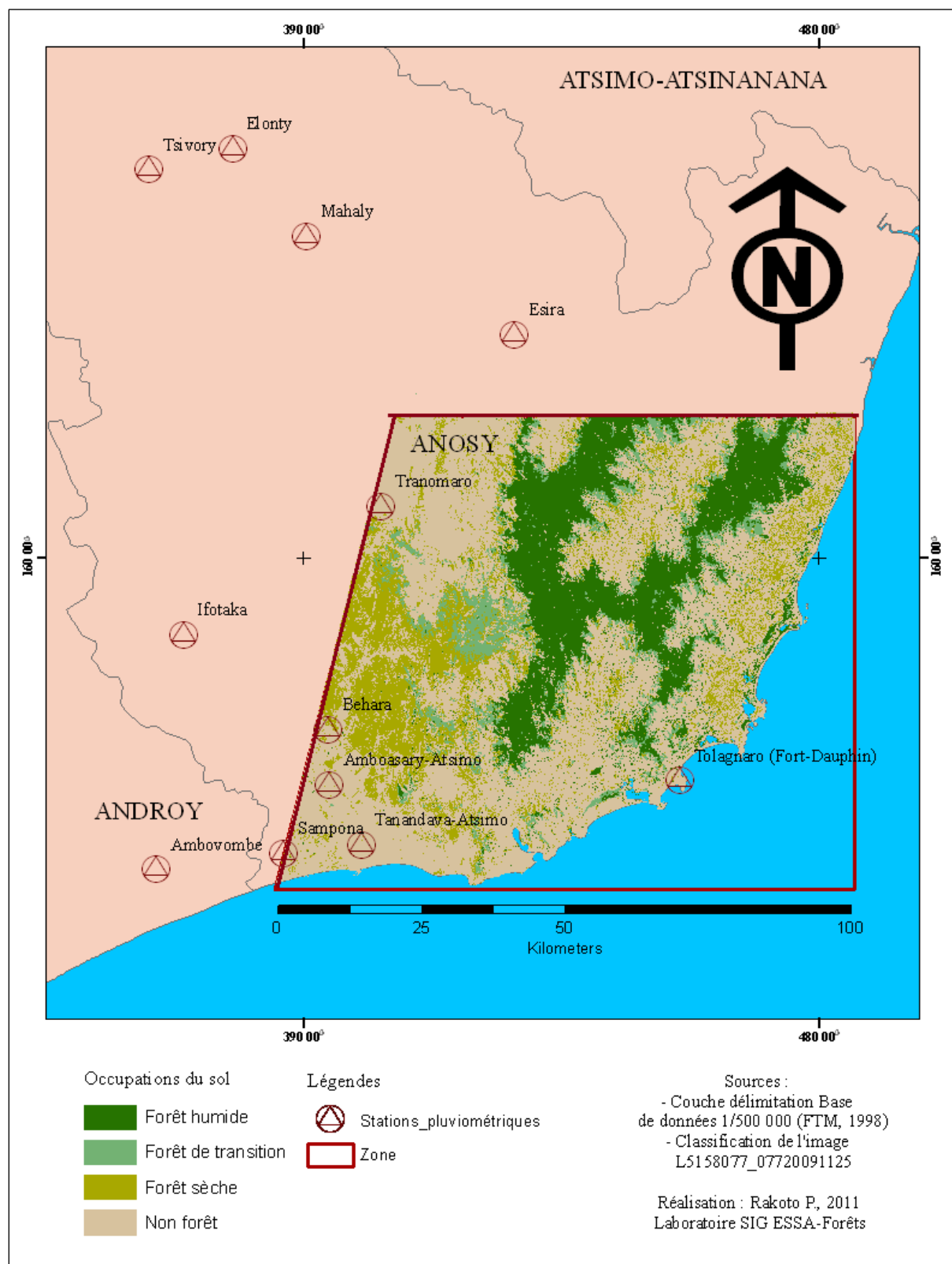


Photo 2 : *Dypsis decaryi* (Palmier trièdre) dans la parcelle III du Parc National d'Andohahelo
(Source : ANGAP Toliara, 2003)

II.2 Données météorologiques et géographiques de base

II.2.1 Rappels des objectifs de l'étude

L'objectif principal de l'étude est d'évaluer la tendance des états des forêts dans la région Anosy face aux variabilités des précipitations. Grâce aux principes de la télédétection, et aux logiciels télédétection et SIG, des indices de végétations (NDVI) seront calculés. Ensuite, une matrice de corrélation entre NDVI et précipitation sera établie. Enfin, l'évaluation des tendances à partir de la comparaison entre un modèle théorique et les valeurs observées de NDVI ainsi que la répartition spatiale des valeurs de NDVI permettront d'aboutir à cet objectif principal.



Carte 4 : Répartition des stations pluviométriques

II.2.2 Données météorologiques

Deux groupes de stations pluviométriques ont été choisies celui du côté Ouest des chaînes anosyennes et celui de l'Est. Du côté Ouest, les stations de Behara, d'Amboasary Atsimo et d'Ambovombe ont été sélectionnées tandis du côté Est, ce sont la station gérée par le service de la météorologie et celle gérée par l'ASECNA. En conséquence, des données météorologiques proviennent du service de la direction de la météorologie nationale d'Ampandrianomby mais la plupart surtout pour la zone Ouest ont été obtenues en consultant des bulletins mensuels du SAP. D'autres ont été acquises auprès des institutions ayant des projets de type humanitaire dans le Sud (Androy et Anosy) comme GRET. Pourtant, à part le centre météorologique de Taolagnaro et celle de l'ASECNA, les autres stations, sont très rustiques (un seau et une éprouvette). Le SAP ne fournit pas des données sur la température ni sur d'autres paramètres météorologiques, le seul paramètre climatique pris en compte est la pluviométrie.

Suivant le mois de prise de vue des images, et afin de mieux expliquer la réaction ou le temps de réponse de la végétation face aux fluctuations de la pluviométrie, plusieurs variables sur la répartition temporelle de la précipitation ont été prises. Il s'agit de la quantité de pluie tombée durant le mois en cours (mois de prise de l'image), durant le mois précédent, deux mois ou trois mois avant le mois en cours. Les cumuls des quantités de pluies font également partie de ces variables, entre autre, le cumul des deux mois (mois en cours et mois précédent), le cumul des trois mois et le cumul des quatre mois.

Les principales limites rencontrées lors de la collecte des données météorologiques résident au niveau de leurs lacunes ainsi que de l'hétérogénéité des stations choisies. La plupart des stations pluviométriques à l'intérieur ou proche de la zone de la présente étude sont presque toutes fermées depuis des « lustres ». Selon le service de la météorologie d'Ampandrianomby, la station de Behara a été fermée officiellement en 1979, celle d'Amboasary en 1985, Ambovombe en 1986, Sampona en 1971, Ifotaka en 1983, Ebelo en 1974 et Tsivory en 1967.

II.2.3 Images LANDSAT

Les images utilisées dans cette étude ont été acquises à différentes dates correspondant à différentes saisons pour rendre compte des changements de la phénologie du couvert végétal.

Tableau 2 : Caractéristiques générales des images Landsat utilisées

Epoque	Capteur Landsat	Identification de l'image	Résolution spectrale	Date d'acquisition	Saison
1	TM	L5158077_07719841125	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	25/11/1984	Humide
	TM	p158r77_5t910724	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	24/07/1991	Sèche
2	ETM+	LE72158077_07720010913	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	13/09/2001	Sèche
	ETM+	LE72158077_07720020119	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 61 ; 62 ; 7 ; 8	19/01/2002	Humide
3	TM	L5158077_07720090607	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	07/06/2009	Sèche
	TM	L5158077_07720091128	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	28/11/2009	Humide

Un grand avantage de l'utilisation d'images Landsat réside dans la résolution spatiale des images. En effet, la résolution² (30m) est classée de moyenne à haute (Trichon, 2007), cette résolution permet de mieux cerner le comportement de la végétation. La résolution de la bande N°8 des capteurs ETM+ est de 15m. Par ailleurs, la zone de recouvrement d'une image Landsat est de 185km x 185km.

Les capteurs optiques possèdent l'avantage de pouvoir détecter, non seulement le rayonnement visible, mais aussi le rayonnement infrarouge qui est très sensible à la santé, au stress et aux dommages subis par les cultures. En particulier, l'intérêt des bandes rouge (Spectre N°3) et des bandes proche infrarouge (spectre N°4) présentes sur les instruments TM et ETM+, réside dans l'absorption de la première par les pigments chlorophylliens et ses carotènes, et dans la sensibilité de la seconde à la structure mésophile des feuilles.

Tableau 3 : Utilisation des bandes des capteurs LANDSAT TM et ETM+

Bande	Domaine spectral (µm)		Application
	TM	ETM+	
1	0,45 – 0,52 (bleu)	0,45 – 0,52 (bleu)	Discrimination entre le sol et la végétation, bathymétrie/cartographie côtière; identification des traits culturels et urbains
2	0,52 – 0,6 (vert)	0,53 – 0,61 (vert)	Cartographie de la végétation verte (mesure le sommet de réflectance); identification des traits culturels et urbains
3	0,63 – 0,69 (rouge)	0,63 – 0,69 (rouge)	Discrimination entre les espèces de plantes à feuilles ou sans feuilles : (absorption de chlorophylle); identification des traits culturels et urbains
4	0,76 – 0,9 (NIR)	0,75 – 0,9 (NIR)	Identification des types de végétation et de plantes; santé et contenu de la masse biologique; délimitation des étendues d'eau; humidité dans le sol
5	1,55 – 1,75 (SWIR)	1,55 – 1,75 (SWIR)	Sensible à l'humidité dans le sol et les plantes : discrimination entre la neige et les nuages
6	10,4 – 12,5 (TIR)	10,4 – 12,5 (TIR)	Discrimination du stress de la végétation et de l'humidité dans le sol relié au rayonnement thermique; cartographie thermique
7	2,05 – 2,35 (SWIR)	2,1 – 2,35 (SWIR)	Discrimination entre les minéraux et les types de roches; sensible au taux d'humidité dans la végétation
8		0,52 – 9	Augmentation de la résolution spatiale (Panchromatique)

² Basse résolution spatiale (sup à 300m) - Moyenne à haute résolution spatiale (15m à 300m) - Très haute résolution spatiale (0,60m à 15m) (Trichon, 2007).

II.2.4 Cartes topographiques

Les cartes topographiques à l'échelle 1 : 100000 ont servi pour la correction géométrique des images durant laquelle des points d'amer³ sont identifiés sur ces cartes. Ces cartes sont fournies par le FTM (Foiben-Taosarintanin' i Madagasikara).

II.3 Méthodes

II.3.1 Prétraitements des images satellites

Les opérations de pré-traitement, parfois appelées restauration et rectification d'image, sont conçues pour corriger les distorsions géométriques et radiométriques des plates-formes et capteurs spécifiques. Chacun de ces facteurs variera selon le capteur et la plate-forme utilisés, et selon les conditions d'acquisition des données. Aussi, il peut être souhaitable de convertir et de calibrer les données avec une unité de rayonnement ou réflexion connue (absolue) pour faciliter la comparaison entre les données.

II.3.1.1 Corrections radiométriques

L'énergie radiante qui atteint le capteur est exprimée en "*digital data counts*" (d.c.) adimensionnels et de valeurs comprises entre 0 et 255. En utilisant des formules d'étalonnage, ces valeurs ont été converties en données physiques (Watts.m-2.sr-e1t) ensuite en valeurs de réflectance. Les corrections radiométriques sont nécessaires à cause des variations dans l'illumination et dans la géométrie de visée d'une scène, des conditions atmosphériques, du bruit et de la réponse du capteur. Les facteurs comme l'angle d'élévation du soleil, la distance terre-soleil, la calibration des capteurs, les conditions atmosphériques et la géométrie de visée affectent la valeur numérique des pixels (Eckhardt *et al.*, 1990). Des éléments de calibration téléchargés sur le site de USGS-Landsat (CPF ou *Calibration Parameter Files*) et les métadonnées associées aux images lors de leur livraison ont été utilisés pour effectuer la calibration sous ENVI. Ainsi, elle a été seulement réalisée de manière relative et réduite à une simple normalisation et correction des erreurs de dérayage des différents détecteurs qui composent le capteur TM et ETM+ (Bannari *et al.*, 2007).

³ Points d'amer : Ce sont des points facilement repérables à la fois sur la carte topographique et sur les images satellites. Ces points sont en générale des pointes de cours d'eau, d'une route,...

II.3.1.2 Correction atmosphérique

Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur. Les gaz, les aérosols et les autres molécules présentes dans l'atmosphère peuvent modifier la valeur des radiances des rayonnements électromagnétiques provenant de la cible. Le principe de correction atmosphérique consiste à convertir les comptes numériques de l'image (niveau de gris) en luminance ($\text{wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$) au niveau du capteur satellitaire et ensuite d'extraire de cette nouvelle variable les effets perturbateurs atmosphériques afin d'aboutir finalement à une mesure physique de la réflectance au niveau de la surface visée. La méthode adoptée dans la suite, dite *Dark Object Subtraction* (DOS) est celle proposée par Song *et al.* 2001 (Soudani, 2006). Elle est simple à exécuter sous le logiciel ENVI.

II.3.1.3 Correction géométrique

Toutes les images de télédétection sont sujettes à des distorsions géométriques. Ces distorsions peuvent être dues à différents facteurs, notamment la perspective des capteurs optiques, le mouvement du système de balayage, le mouvement de la plate-forme, l'altitude, l'orientation et la vitesse de la plate-forme, le relief du terrain, la courbure et la rotation de la Terre.

Les corrections géométriques sont appliquées pour compenser ces distorsions afin que la représentation géométrique de l'imagerie soit aussi proche que possible de la réalité. La correspondance géométrique de l'imagerie à un système connu de coordonnées au sol doit être effectuée. Dans cette étude, le système de projection des images satellites (WGS 1984) a d'abord été converti en Projection Laborde (Ellipsoïde_international_1924).

La correction « image-à-carte » a été effectuée pour une image de 2009 (image de base), les images restantes ont subi une correction de type « **image-à-image** » durant laquelle l'image de base est l'image de 2009. Cette méthode est facile et permet de s'assurer que toutes les images se calent entre elles.

Une correction de type "**image-à-carte**" est un processus de correction géométrique qui consiste à identifier des coordonnées de l'image (c'est-à-dire ligne et colonne) de plusieurs points clairement distincts, appelés **points de contrôle au sol** (PCS) et à les assortir à leur véritable position en coordonnées au sol (latitude et longitude). Des cartes topographiques représentant la zone ont été scannées puis géoréférencées sous ArcGIS. Ces cartes serviront à prélever les PCS. Au total 21 PCS ont été enregistrés.

Durant la correction géométrique de l'image originale qui a été effectuée sous ENVI, un procédé appelé rééchantillonnage a été appliqué afin de déterminer la valeur numérique à placer dans la nouvelle localisation du pixel de l'image de sortie corrigée. Le processus de rééchantillonnage calcule la nouvelle valeur du pixel à partir de sa valeur originale dans l'image non corrigée. Il existe trois principales méthodes de rééchantillonnage : le plus proche voisin, l'interpolation bilinéaire et la convolution cubique. La méthode du plus proche voisin utilise la valeur numérique du pixel de l'image originale qui se trouve le plus près de la localisation du nouveau pixel dans l'image corrigée. Sous ENVI, cette méthode a été choisie vue qu'elle est la plus simple et qu'elle n'altère pas la valeur originale des pixels.

II.3.2 Cartographie des occupations du sol à partir des images de 2009 par la classification semi-supervisée

L'objectif est d'avoir une délimitation constante des différentes classes (superficie égale et au même endroit). Les images de 2009 ont été choisies dans l'hypothèse où en cette période car les images de 2010 ont sujettes à l'existence de nuages.

La classification semi-supervisée consiste à chevaucher une classification supervisée par une classification non supervisée. Elle permet de réduire la subjectivité de l'analyste notamment dans la définition des échantillons d'apprentissage pour la classification supervisée (Ratovoson, 2011).

a) Classification non supervisée

Cette classification consiste à associer des pixels d'une image en classes spectrales sans connaître à priori la signification thématique de celle-ci. Sous le logiciel ENVI, le modèle ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technics*) a été choisi. Après 10 itérations, 20 à 40 classes ont été obtenues. Les classes ayant les mêmes thématiques ont ensuite été combinées. Durant la nomenclature des classes thématiques, la forêt humide et la forêt sèche sont facilement identifiables. Pour pouvoir discerner les forêts de transition, une carte d'occupation du sol d'ANGAP (2003) a servi de référence.

b) Classification supervisée

Cette classification est basée sur les besoins de l'analyste. Ce dernier définit au préalable le nombre de classes ainsi que leur nomenclature. Ces classes ont été obtenues de la classification non supervisée. Sous ArcGIS, elles ont d'abord subi un échantillonnage en éliminant les extrêmes en terme de superficie. De cette façon, la probabilité à ce que chaque échantillon d'apprentissage appartienne réellement à telle ou telle classe est plus élevée. Ces échantillons d'apprentissage ou zone

d'entraînement (ROI : *Region Of Interest*) ont servi pour la classification supervisée durant laquelle le module *Maximum likelihood* (Maximum de vraisemblance) a été choisi.

Enfin, une hypothèse a été émise selon laquelle la délimitation de la forêt de transition est le résultant de la superposition des forêts humides prises en périodes sèches (Image Juin 2009) avec les forêts sèches prises en périodes humides (Image Novembre 2009) après une classification non supervisée des deux images. En effet, en saison sèche, les forêts de transitions acquièrent les caractéristiques des forêts sèches tandis qu'en période humide, elles ressemblent tantôt aux forêts humides.

II.3.3 Théories et utilisations pratiques des indices de végétation

II.3.3.1 Comportements spectraux des cibles

L'analyse et l'interprétation des images de télédétection se fait en fonction du comportement spectral qui est le produit de l'interaction du rayonnement et de l'objet à traiter.

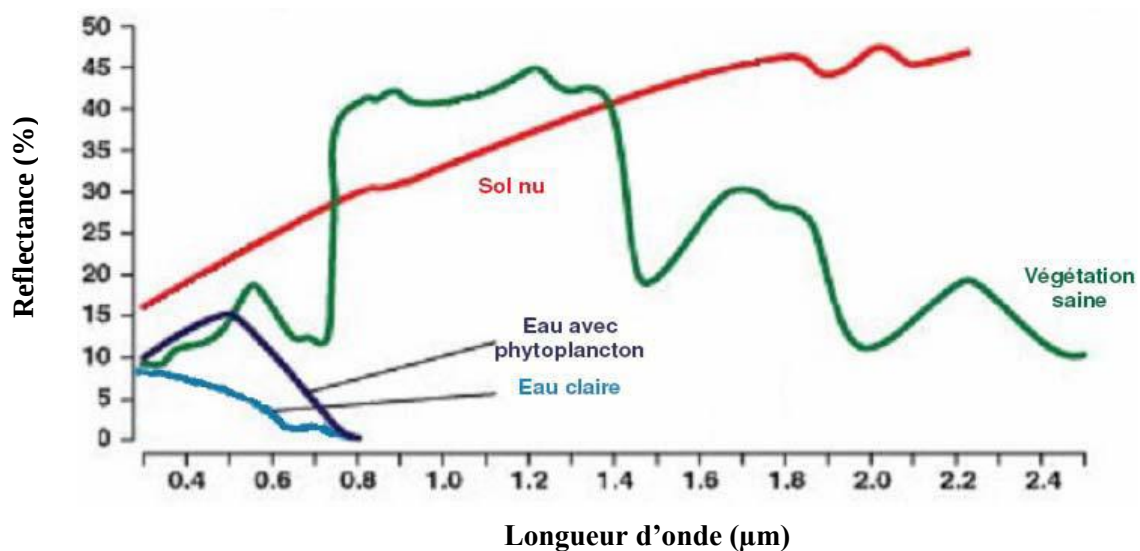


Figure 5 : Courbe de réflectance des végétaux, sols et eaux (Soudani, 2006)

a) Eau

L'eau absorbe plus les grandes longueurs d'onde (proche infrarouge, rouge et vert) et réfléchit plus les petites longueurs d'onde bleue (origine de la couleur bleue de l'eau). La réflectance de l'eau pure, forte dans le Bleu, décroît rapidement et présente une valeur pratiquement nulle dans le proche infrarouge PIR. La turbidité, transport de matériaux en suspension et une eau peu profonde, modifient ses caractéristiques et la réflectance devient plus importante pour toutes les longueurs d'ondes (Benkrid, 2008).

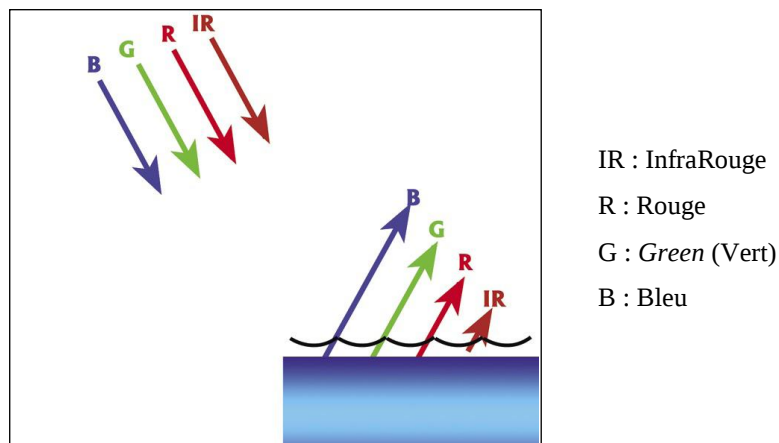


Figure 6 : Comportement spectral de l'eau

b) Sables et sols nus

Le sable ou un sol nu sont réfléchissants pour tous les rayons bleus, verts, rouges et PIR : ils apparaissent très lumineux et donc « blancs » en télédétection. Un sol humide ne réfléchit pas les rayons PIR, car l'eau absorbe ces rayonnements. Dans le visible et le proche infrarouge, la réflectance est liée aux premiers millimètres du sol, et donc aux états de surfaces définis par la composition et l'organisation de la surface des sols à un instant donné (Escadafal, 1989).

c) Végétation

Les feuilles de la végétation contiennent de la chlorophylle. La chlorophylle est une molécule qui absorbe fortement les rayons bleus et rouges, et qui réfléchit dans le vert (origine de la couleur verte des feuilles). Mais la végétation réfléchit également dans le proche infrarouge (PIR), et qui sont proches des longueurs d'onde des rayons lumineux rouges. Dans ce domaine de longueur d'onde, ce ne sont plus les pigments qui sont responsables de la réflexion mais la structure du feuillage (le parenchyme lacuneux, un des composants des feuilles, réfléchit le rayonnement proche infrarouge).

II.3.3.2 Formule et interprétations de NDVI

Les comportements spectraux des cibles ci-dessus servent de base pour la formulation d'indices de détection comme les indices de végétation. Ces différents indices exploitent essentiellement la différence de réponse spectrale de la végétation et des sols dans la bande rouge (R) qui est liée à l'absorption de la lumière par la chlorophylle et la bande PIR qui est liée à la densité de la végétation verte.

Ces indices sont mathématiquement exprimés de manière à utiliser le contraste important entre ces deux bandes. Ce contraste résulte de la forte absorption du rayonnement dans le rouge et de la forte réflectance dans le PIR.

Plusieurs indices de végétations peuvent être obtenus par la combinaison de ces deux bandes spectrales : PVI, WDV (Weighted Difference Vegetation Index), SAVI, TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index), NDVI... (Cf. Annexe 2)

Parmi ces indices, NDVI en fait parti des plus utilisés (Rouse *et al.*, 1973). Pour la végétation, le canal du rouge, avec une longueur d'onde de 0,58 μm -0,68 μm se trouve dans la bande d'absorption de la chlorophylle, tandis que le canal du PIR, entre 0,725 et 1,1 μm , se trouve dans la bande de forte réflectance. Les caractéristiques des canaux correspondent donc de près aux propriétés caractéristiques des feuilles ce qui rend le NDVI un bon indicateur de la biomasse du végétal.

Équation 1 : Formule du NDVI

- : Normalized Difference Vegetation Index (pas d'unités)
- : Valeur de la réflectance de la cible dans l'intervalle des longueurs d'onde de la bande Proche Infra-Rouge (μm)
- : Valeur de la réflectance de la cible dans l'intervalle des longueurs d'onde de la bande Rouge (μm)

Dans le cas de Landsat, le canal 4 se trouve dans la bande spectrale du proche infrarouge et le canal 3 dans celle du rouge, de sorte que le NDVI se calcule comme suit :

Sous le logiciel ENVI, un traitement rapide des images pour obtenir la valeur du NDVI existe dans la rubrique Transformation d'images.

La valeur du NDVI est comprise dans un intervalle de -1 à 1. Une végétation verte a une valeur NDVI comprise entre 0,2 et 0,8. Plus particulièrement, la valeur NDVI d'une végétation dense est comprise entre 0,3 et 0,8. Les plans d'eau (comme les mers, les lacs ou les rivières) ayant une très faible réflectance par rapport aux deux bandes ont une valeur de NDVI très faible voire même négative. Les sols nus ayant une réflectance plus élevée au niveau de la bande du PIR que celle du Rouge ont une valeur de NDVI très faiblement positive (0,1 à 0,2). Les valeurs NDVI des nuages et des neiges sont négatives (Myneni *et al.*, 1995).

Cas particuliers

- **Au niveau de la végétation**

En général, si la radiation réfléchie par une cible dans les longueurs d'onde du PIR (0,7 à 1,1 μm) est plus élevée que celle réfléchie par cette même cible dans les longueurs d'onde du Visible (0,4 à 0,7 μm) comprenant le Rouge (0,63 à 0,69 μm), alors, la végétation dans ce pixel est considéré comme dense et pourrait contenir différents types de forêts.

- **Au niveau de l'arbre**

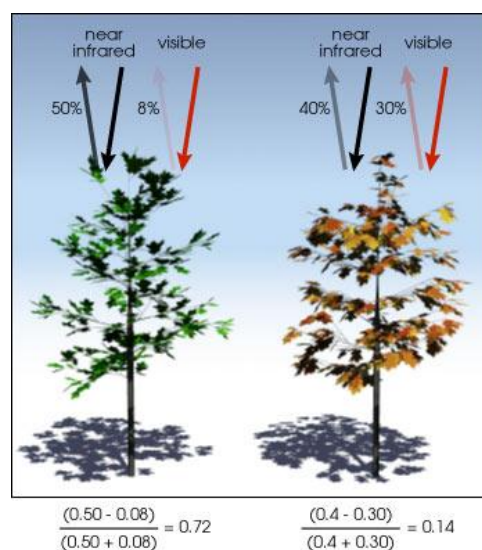


Figure 7 : Illustration du principe du NDVI au niveau d'un arbre

A gauche, un arbre en santé absorbe le maximum de longueur d'onde dans le Visible (Contenant le Rouge) et réfléchit une large portion du PIR. A droite, un arbre « malade » réfléchit plus de longueurs d'ondes du Visible et moins de PIR.

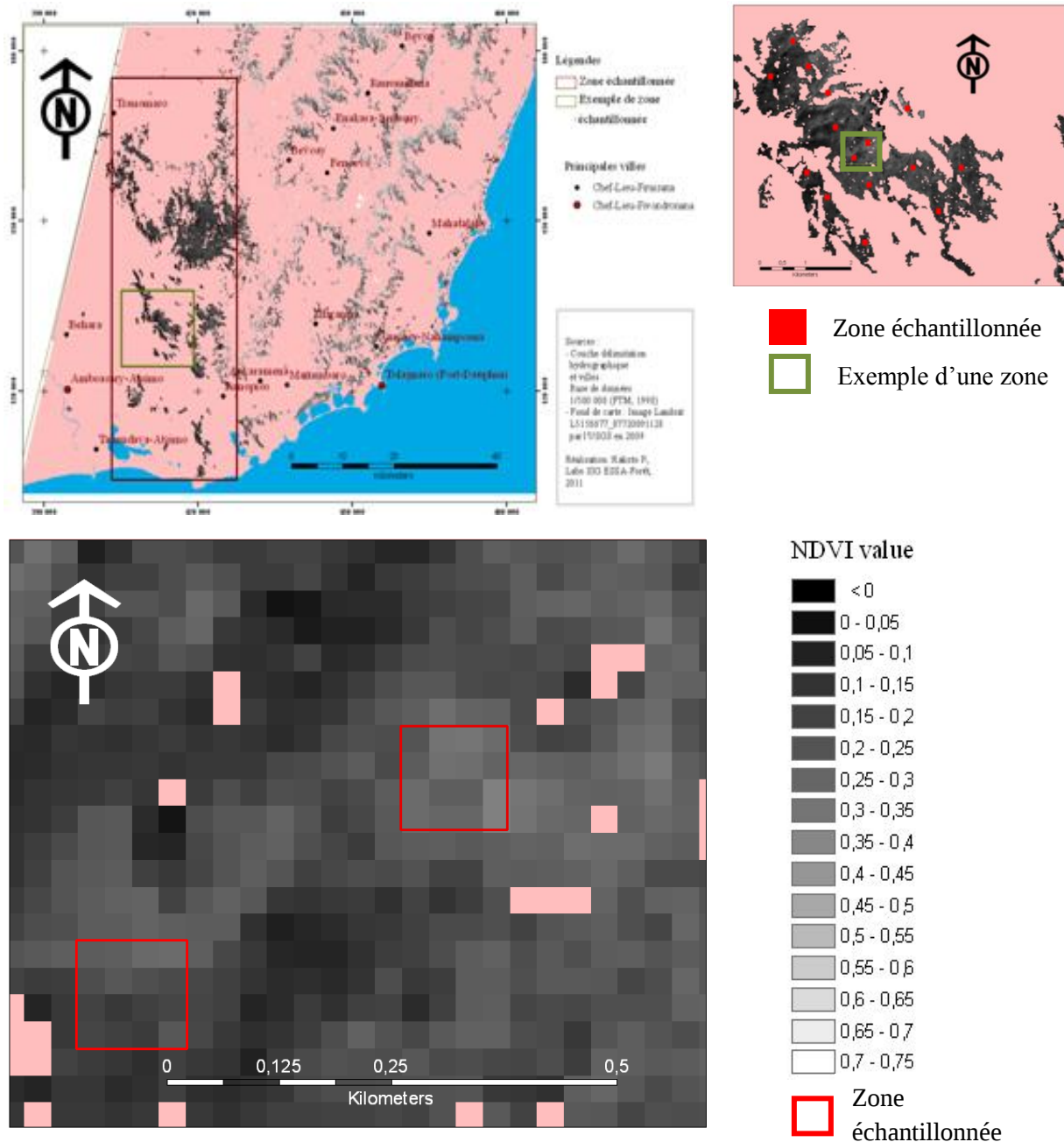
II.3.4 Cartographie de l'évolution des valeurs du NDVI

II.3.4.1 Création d'une matrice d'échantillonnage des images NDVI

Les plans d'eau (rivières ou lacs) qui n'ont pas été hormis des précédentes classifications font également partie des images NDVI formées. Pourtant la valeur de leur NDVI est pratiquement nulle voire négative. Cela peut nettement fausser la moyenne des NDVI par classe. Par conséquent, un échantillonnage aléatoire par pixel dans un carré de 120 m de côté (4 pixels x 30m) a été effectué. Etant donné que les images de chaque époque ont bien été corrigées c'est-à-dire qu'elles se calent

parfaitement les unes sur les autres, cette matrice d'échantillonnage enregistre également les modifications de la végétation aux mêmes endroits (pixel par pixel).

L'extraction des valeurs de NDVI par pixel a été effectuée sous ArcGIS. 90 carrés par classe ont été échantillonnés ce qui donne le total de 1440 pixels par classe.



Carte 5 : Echantillonnage par pixels des valeurs de NDVI (Exemple de la forêt de transition – Image de Novembre 2009)

II.3.4.2 Validation de la classification

Le test non paramétrique de Kolmogorov Smirnov sur toutes les valeurs de NDVI a permis de différencier les classes définies par la précédente classification. Les NDVI des images ont été classées en deux : ceux pris en saison humide et ceux pris en saison sèche. La différenciation des classes a été effectuée pour chaque saison. Etant donné qu'il existe six images et que le nombre de pixels échantillonnés a été de 1440/classe/image, au total, 4320 valeurs de NDVI par classes ont été utilisées.

II.3.5 Analyse des corrélations entre la pluviométrie et les valeurs NDVI

D'un côté, les valeurs de NDVI et de l'autre celles de la précipitation du mois d'acquisition de l'image, celle des mois d'avant et les précipitations cumulées ont été présentées dans un tableau afin de d'établir une matrice de corrélation entre les deux variables. L'analyse a concerné d'abord sur la significativité de la corrélation c'est-à-dire sur le p-value puis sur le niveau de corrélation (coefficient de corrélation). L'analyse permet de conclure sur les variabilités interannuelles et intra annuelles des états des forêts.

II.3.6 Etablissement d'un modèle théorique de valeurs de NDVI et comparaison des valeurs théoriques aux valeurs observées

Le modèle théorique est obtenu à partir de la matrice de corrélation ci-dessus. Le modèle est linéaire et s'apprécie par la valeur du coefficient de corrélation r . A partir de ce modèle, des valeurs de NDVI théoriques ont été calculées. Par la suite, ces valeurs ont été comparées aux valeurs de NDVI observées c'est-à-dire aux valeurs de NDVI des images étudiées.

Trois cas peuvent se présenter : soit NDVI observé est inférieur à NDVI théorique, ou soit le contraire ou soit les deux valeurs sont égales. Ce dernier cas pourrait ne pas se présenter dans la mesure où NDVI est une valeur calculée à des millièmes près. La comparaison de ces deux valeurs permet de conclure sur l'assèchement de la végétation (premier cas) ou au contraire sur sa résilience (deuxième cas). La résilience est un phénomène de résistance face à des modifications stationnelles notables.

D'une autre façon, si la tendance des valeurs observées de NDVI est supérieure ou égale aux valeurs théoriques, alors, une conclusion peut être tirée que les forêts sont stables par rapport aux variabilités de la précipitation. Autrement dit, quand bien même la tendance à la baisse des précipitations dans la région Anosy aurait été manifeste (*Cf.II.1.1.3. Changements observés ces derniers temps*) et que NDVI théorique aurait suivi cette tendance les forêts résistent et gardent leurs caractéristiques.

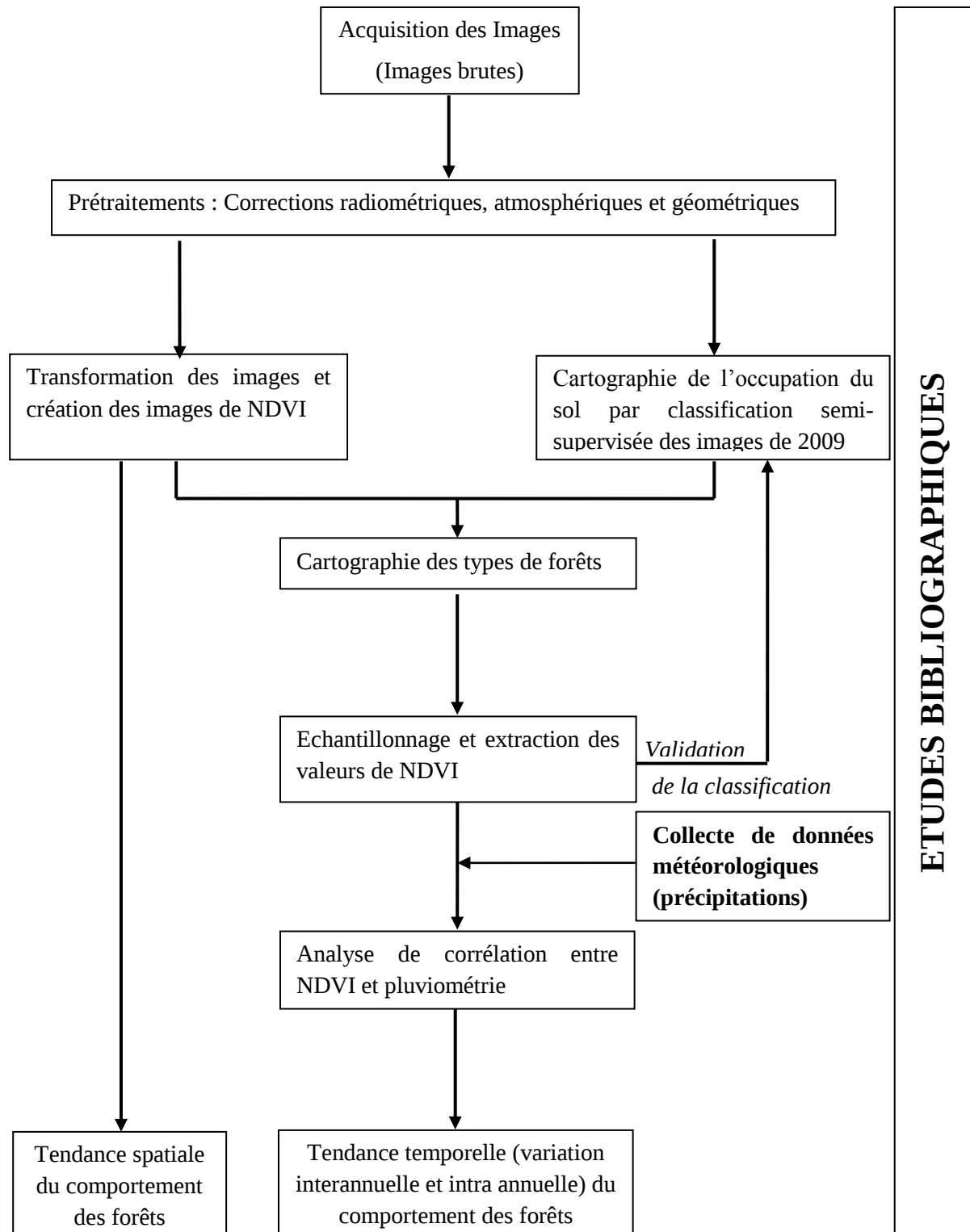


Figure 8 : Synthèse de la démarche méthodologique

II.3.7 Cadre opératoire

Tableau 4 : Cadre opératoire

Problématique : Comment la végétation réagit-elle face aux variabilités de la précipitation?

Hypothèses	Indicateurs	Méthodes	Résultats
H1 : La variabilité interannuelle des précipitations résulte une fluctuation annuelle des valeurs de NDVI, par conséquent, sur les états des forêts dans la zone étudiée.	Précipitations par rapport à la zone climatique et la date d'acquisition de l'image.	Définition des stations météorologiques et récolte de données pluviométriques.	Précipitations mensuelles et cumulées.
	NDVI par type de forêts	Traitements d'images satellites (LANDSAT) par télédétection et SIG sous ENVI et ArcGIS.	Cartes des types de forêts Moyenne des NDVI par type de forêts.
	Niveaux (<i>p-value</i>) et coefficients de corrélation entre NDVI et précipitations.	Création d'une matrice de corrélation entre NDVI et précipitations.	Niveaux interannuels de réactions des forêts face aux variabilités de la précipitation.
H2 : Les variabilités interannuelles renforcées par les variabilités intra annuelles avanceraient la dégradation des forêts dans la partie Sud de cette région.	NDVI théorique interannuelle	Etablissement d'un modèle théorique de NDVI à partir d'une équation de régression.	Etat théorique des forêts.
	Différence entre NDVI observé et NDVI théorique par type de forêts.	Comparaison des valeurs NDVI théoriques aux valeurs observées.	Tendances de l'évolution des forêts.

ooo

RESULTATS

ET

INTERPRETATIONS

ooo

III. Résultats et Interprétations

III.1 Cartographie des types de forêts en 2009

Les deux images prises en 2009 ont subi une classification non supervisée. Pour définir les classes issues de cette classification, une carte de l'ANGAP sortie en 2003 a servi de référence. Trois principales classes ont été retenues :

- Les forêts humides qui appartiennent dans la zone Est
- Les forêts sèches de l'Ouest
- Et les Forêts de transition à l'Ouest en générale.

Ensuite, afin d'améliorer la classification surtout pour la forêt de transition, les classe de forêts sèches prises en saison humide (Novembre 2009) ont été superposées avec les classes des forêts humides prises en saison sèche (Juin 2009). La classe obtenue de cette superposition a ensuite été combinée avec la les classes initiales (Cf. Carte 5).

III.2 Valeurs moyennes de NDVI et états des forêts

Les moyennes de NDVI montrent une amplitude faible de ces valeurs dans la forêt humide de l'Est contrairement aux deux autres types de forêts qui se trouvent à l'Ouest. NDVI de la forêt humide se situent dans un intervalle allant de à alors ceux de la forêt de transition sont comprises entre à et ceux de la forêt sèche entre et (Cf. Tableau 4).

Tableau 5 : Valeurs moyennes des NDVI par classe et par saison

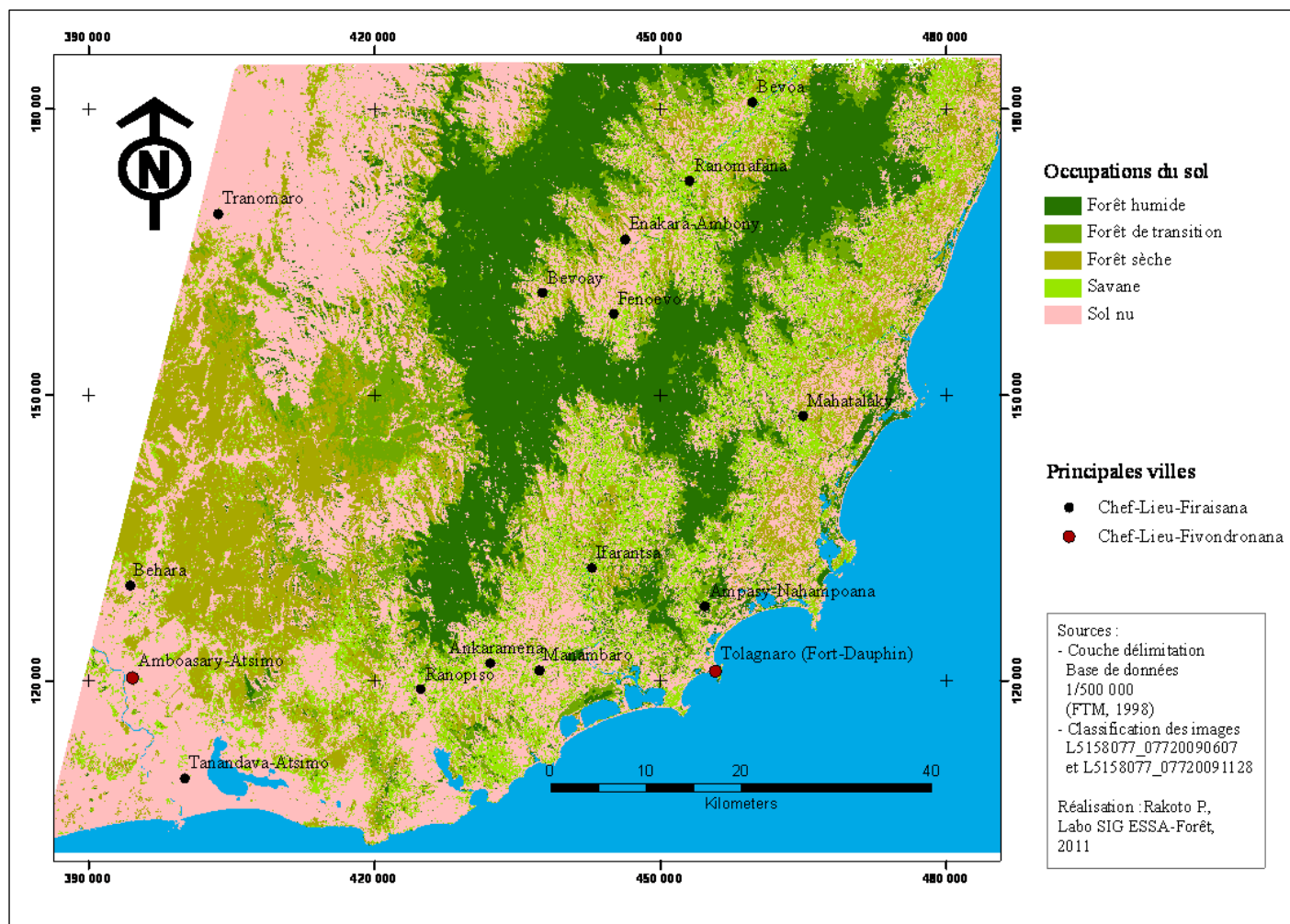
Saison	Classe	Forêt Humide		Forêt de Transition		Forêt Sèche		Moyenne/Mois d'acquisition	
	Mois d'acquisition	Moyenne	SD	Moyenne	SD	Moyenne	SD	Moyenne	SD
Saison Humide	nov-84	0,607	0,107	0,587	0,055	0,500	0,069	0,564	0,077
	janv-02	0,576	0,047	0,495	0,069	0,386	0,065	0,486	0,060
	nov-09	0,631	0,036	0,475	0,069	0,346	0,042	0,484	0,049
	Moyenne/Classe	0,605	0,063	0,519	0,065	0,411	0,059		
Saison Sèche	juil-91	0,477	0,173	0,308	0,148	0,237	0,083	0,344	0,134
	sept-01	0,589	0,069	0,317	0,139	0,158	0,064	0,354	0,090
	juin-09	0,497	0,180	0,418	0,126	0,359	0,068	0,424	0,125
	Moyenne/Classe	0,502	0,164	0,348	0,138	0,251	0,072		
Moyenne/classe		0,554	0,608	0,107	0,587	0,055	0,500		

SD : Standard Deviation

Le NDVI moyen maximal a été enregistré en Novembre 2009 pour la forêt humide (). En fait, si le mois d'Août, le mois de Septembre et le mois d'Octobre sont habituellement des mois durant lesquelles les précipitations les plus faibles dans la zone Est sont enregistrées, cette année, les quantités de pluies tombées entre le mois d'Août et le mois de Novembre ont été de 528,1mm soient 34,6% de la précipitation de l'année (1497,1mm), et ces quantités ont largement dépassé les moyennes mensuelles interannuelles desdites mois (*Cf. Courbe Ombrothermique de la zone Est*). De même, le NDVI moyen minimal a été enregistré en septembre 2001 pour la forêt sèche. Cette année, il y a eu un déficit pluviométrique en particulier entre Juillet et Septembre dans la zone Ouest : 32mm sur les 369,3mm (déjà faible par rapport à la moyenne interannuelle qui est de 547mm) de pluie seulement ont tombé.

La transformation des images sous ENVI a permis d'obtenir des images Raster sous format tiff contenant les valeurs de NDVI par pixels et exploitables sous ArcMap. Les classes définies précédemment ont été utilisées comme shapefiles de coupe pour toutes les images rasters de NDVI formées. L'échantillonnage aléatoire (90 carrés de 120m de côté soient 16 pixels de 30m de côté par carré) a permis d'extraire 1440 valeurs par classes et pour toutes les images.

32



Carte 6 : Occupations du sol

III.4 Influence de la précipitation sur les forêts

Si une interprétation des valeurs de NDVI variant suivant les précipitations a déjà été entamée (suite aux résultats de nombreux scientifiques de l'influence de la pluviométrie sur le NDVI), l'objectif dans ce paragraphe est de trouver la meilleure corrélation entre les valeurs de NDVI et les données pluviométriques mensuelles afin d'élaborer une équation de régression. Cette équation donne les valeurs théoriques des NDVI.

Tableau 6 : Les valeurs du NDVI et de la pluviométrie

Type de forêt	Mois de l'image	NDVI							
Forêt Humide	Nov-1984	0,607	113,3	39,2	167,2	90,3	152,5	319,7	410
	Jan-2002	0,576	230,9	392,4	54,2	44,7	623,3	677,5	722,2
	Nov-2009	0,631	89,7	154,9	134,5	139	244,6	379,1	518,1
	Jui-1991	0,420	66,6	182,5	306,5	201,7	249,1	555,6	757,3
	Sept-2001	0,589	27,4	113,3	106,7	106,7	140,7	247,4	354,1
	Nov-2009	0,497	35,8	160,5	142,9	262,3	196,3	339,2	601,5
Forêt de Transition	Nov-1984	0,586	70,1	53	9,5	25	123,1	132,6	157,6
	Jan-2002	0,494	29,7	49,1	17,5	39,5	78,8	96,3	135,8
	Nov-2009	0,474	14,7	17,6	6	35,7	32,3	38,3	74
	Jui-1991	0,267	16,53	5,89	70,09	14,13	22,42	92,51	106,64
	Sept-2001	0,317	8,6	13	10,4	34,4	21,6	32	66,4
	Nov-2009	0,418	26,5	27,30	50,8	109,3	53,8	104,6	213,9
Forêt Sèche	Nov-1984	0,420	70,1	53	9,5	25	123,1	132,6	157,6
	Jan-2002	0,386	29,7	49,1	17,5	39,5	78,8	96,3	135,8
	Nov-2009	0,346	14,7	17,6	6	35,7	32,3	38,3	74
	Jui-1991	0,237	16,53	5,89	70,09	14,13	22,42	92,51	106,64
	Sept-2001	0,158	8,6	13	10,4	34,4	21,6	32	66,4
	Nov-2009	0,358	26,5	27,30	50,8	109,3	53,8	104,6	213,9

- : Précipitations du mois d'acquisition de l'image (mm)
- : Précipitations du mois, un mois avant le mois d'acquisition de l'image (mm)
- : Précipitation du mois, deux mois avant le mois d'acquisition de l'image (mm)
- : Précipitation du mois, trois mois avant le mois d'acquisition de l'image (mm)
- : Précipitation cumulées des deux premiers mois (mm)
- : Précipitation cumulées des trois premiers mois (mm)
- : Précipitation cumulées des quatre premiers mois (mm)

Tableau 7 : Matrice de corrélation entre NDVI et la pluviométrie

NDVI des Forêts Humides	0,2987	-0,1568	-0,5954	-0,7252	0,0203	-0,2881	-0,6388
	p=,565	p=,767	p=,212	p=,103	p=,969	p=,580	p=,172
NDVI des Forêts de Transition	0,8112	0,8776	-0,5533	0,0186	0,8825	0,5157	0,3775
	p=,050	p=,022	p=,255	p=,972	p=,020	p=,295	p=,461
NDVI des Forêts Sèches	0,8601	0,8511	-0,2718	0,1333	0,8968	0,7197	0,592
	p=,028	p=,032	p=,602	p=,801	p=,015	p=,107	p=,216

A partir de cette matrice de corrélation, il est constaté qu'au seuil de 5%, il n'existe aucune corrélation entre le NDVI des forêts humides et les données pluviométriques et ce ni avec les données mensuelles, ni avec les données cumulées.

Pour les forêts de transition, NDVI corréle à la fois avec la quantité de pluie du mois précédant le mois d'acquisition de l'image et le cumulé des précipitations des deux mois (Mois d'acquisition de l'image et son précédent ou). La meilleure corrélation est enregistrée avec avec un coefficient de corrélation de 0,8825 (élevé car proche de 1).

Quant aux forêts sèches, NDVI corréle à la fois avec les précipitations du mois d'acquisition de l'image , celles de son précédent et . Encore une fois, la meilleure corrélation est observée avec avec un coefficient de corrélation élevé de 0,8968.

En conséquence, l'état des forêts sèches et des forêts de transition, pouvant être qualifié de mauvais à bon, varie positivement avec la somme des quantités de pluies tombées en deux mois. Ces types de forêts ont ainsi un besoin en ressource en eau élevé. Par ailleurs, vu que le coefficient de corrélation entre NDVI et des forêts sèches est plus élevé que celui des forêts de transition, les forêts sèches dépendent beaucoup plus des ressources hydriques que les forêts de transition.

III.5 Evolution spatiale et temporelle des valeurs de NDVI

a) Forêt humide

A partir des cartes de répartition des valeurs du NDVI (en saison sèche et en saison humide), une persistance de la verdure des forêts est constatée. Même si la saison la moins verte est celle de Juillet 1991, aucune information sur les variabilités interannuelles des valeurs du NDVI ne peut être soutirée à partir de ces cartes. Par contre, le caractère sempervirente (verte toute l'année) de cette forêt est confirmée.

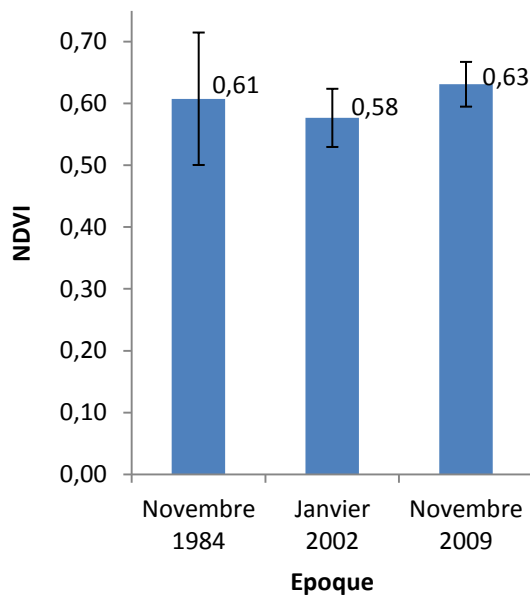


Figure 9 : Evolution des valeurs moyennes du NDVI de la forêt humide en saison humide

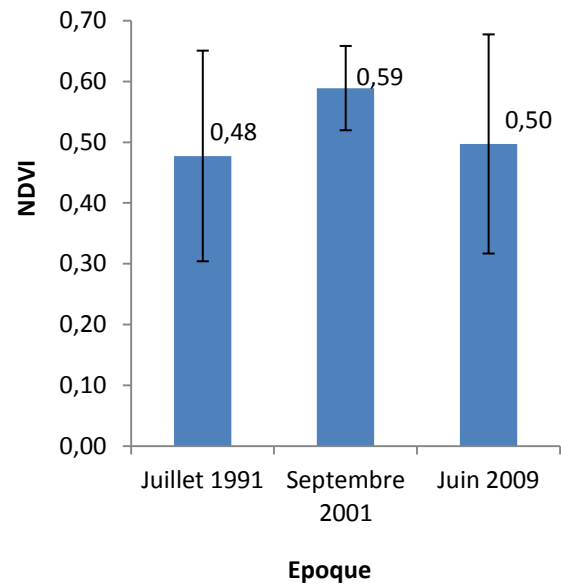
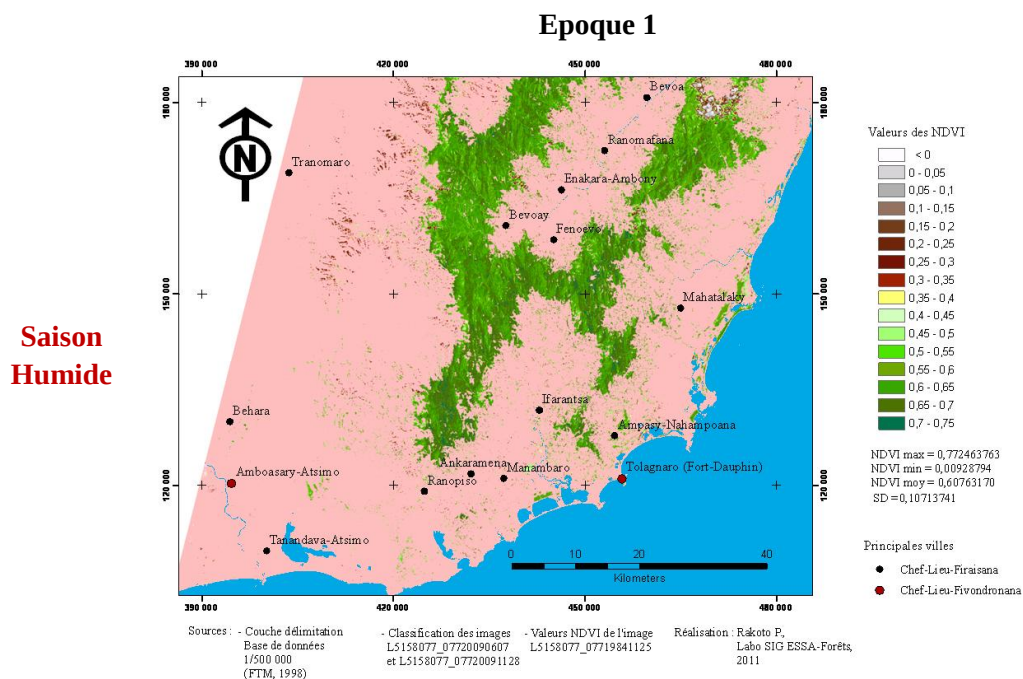


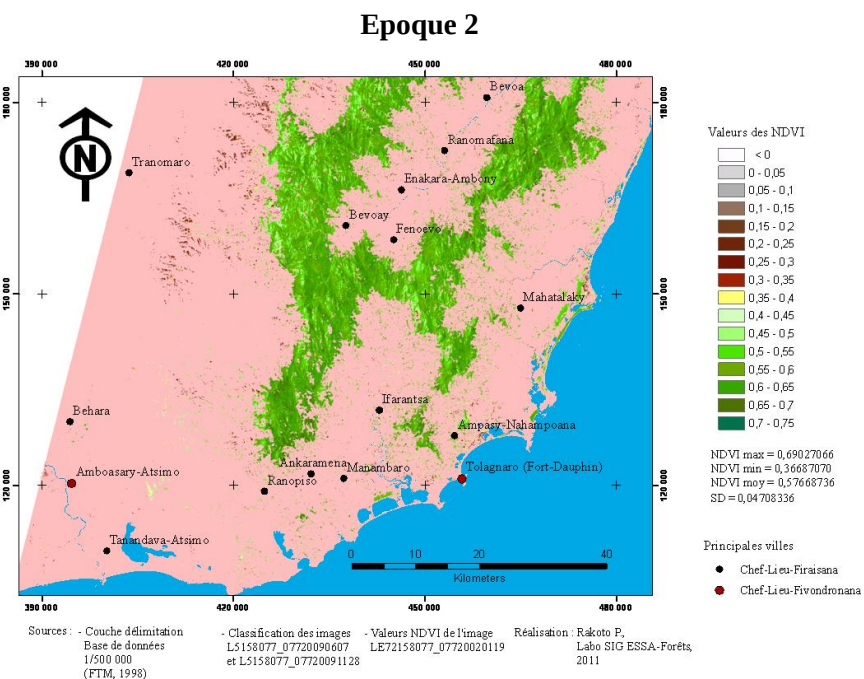
Figure 10 : Evolution des valeurs moyennes du NDVI de la forêt humide en saison sèche

En saison humide, les valeurs moyennes du NDVI des forêts humides appartiennent dans l'intervalle compris entre (Janvier 2002) et (Novembre 2009). Cet intervalle est étroite ce qui peut s'expliquer par une stabilité de la forêt en saison humide.

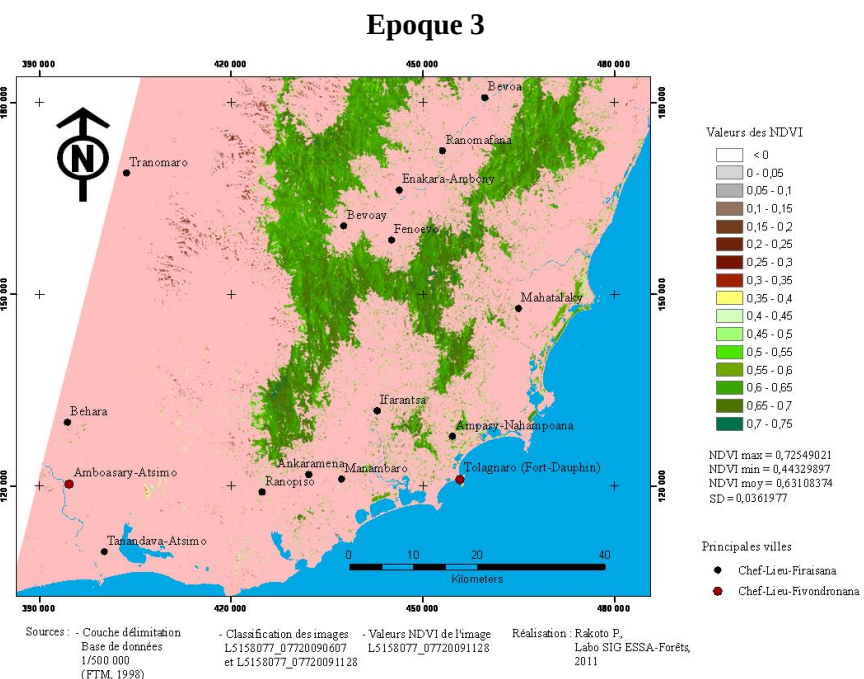
En saison sèche, les valeurs moyennes se situent entre (Juillet 1991) et (Septembre 2001). La différence entre ces extremums est plus grande que celle en saison humide. Ainsi, cette différence pourrait avoir des impacts sur les variabilités interannuelles du NDVI.



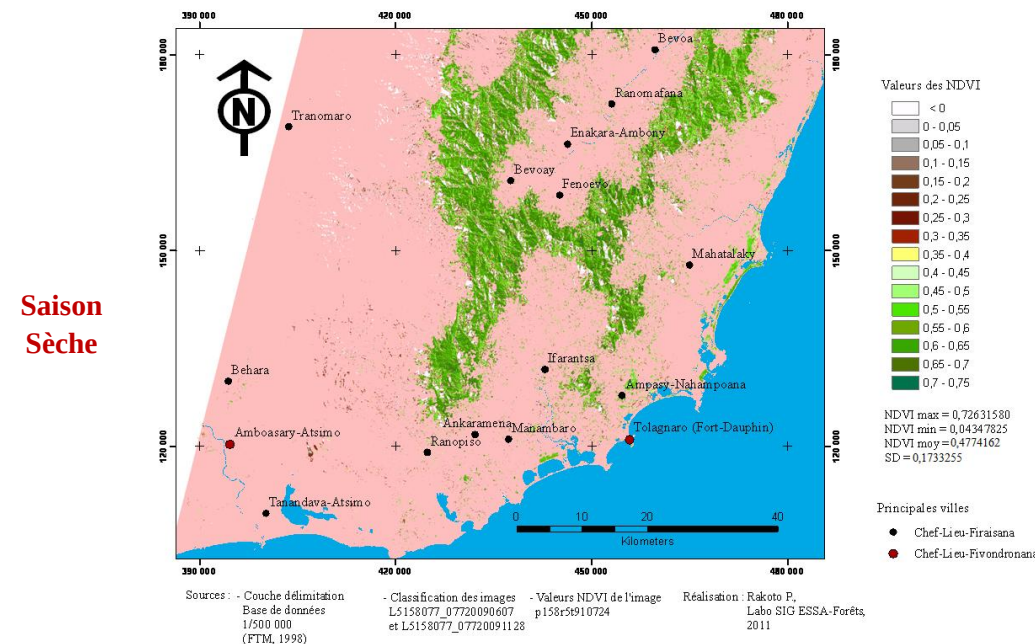
Carte 7 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt humide (Novembre 1984)



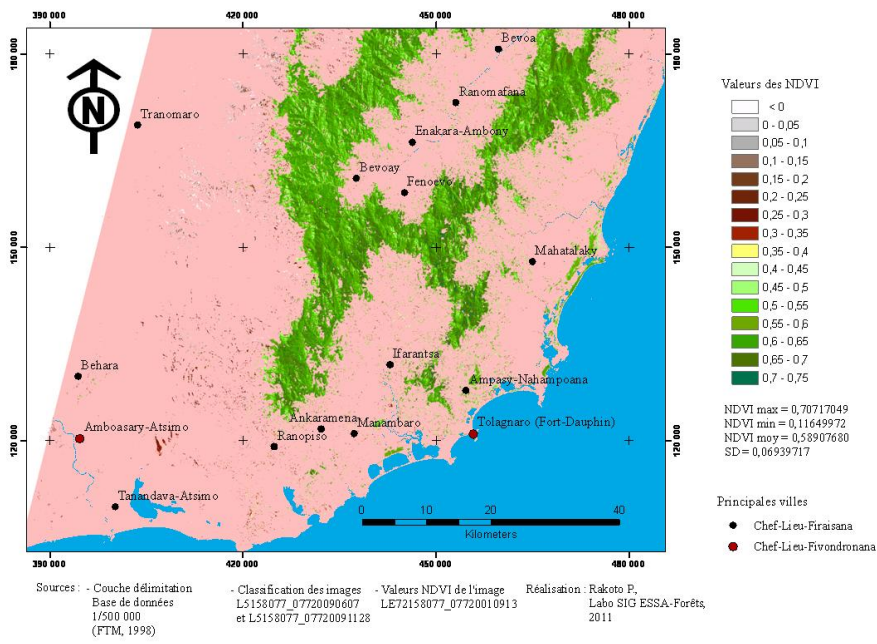
Carte 8 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt humide (Janvier 2002)



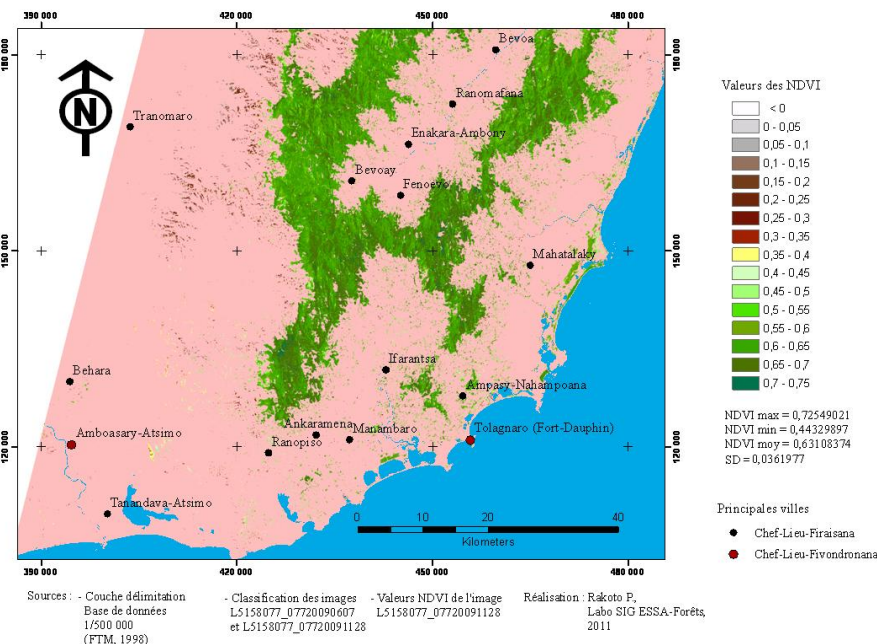
Carte 9 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt humide (Novembre 2009)



Carte 10 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt humide (Juillet 1991)



Carte 11 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt humide (Septembre 2001)



Carte 12 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt humide (Juin 2009)

b) Forêt de transition

Les résultats cartographiques montrent une différence assez significative des valeurs NDVI illustrées par une diversification des couleurs et ce dans toutes les saisons. Les couleurs confirment la variation saisonnière (intraannuelle) de ce type de végétation : verte en saison humide et rouge (sèche) en saison sèche.

Dans l'ensemble, l'existence de la corrélation entre NDVI et précipitation est mieux illustrée. En saison sèche et pour l'image de Juillet 1991 et celle de Septembre 2001 lors desquelles les précipitations étaient faibles, les valeurs de NDVI étaient également faibles. Pareillement, même en période sèche mais pour le mois de Juin 2009 la pluviométrie a été de , les valeurs de NDVI ont également augmenté.

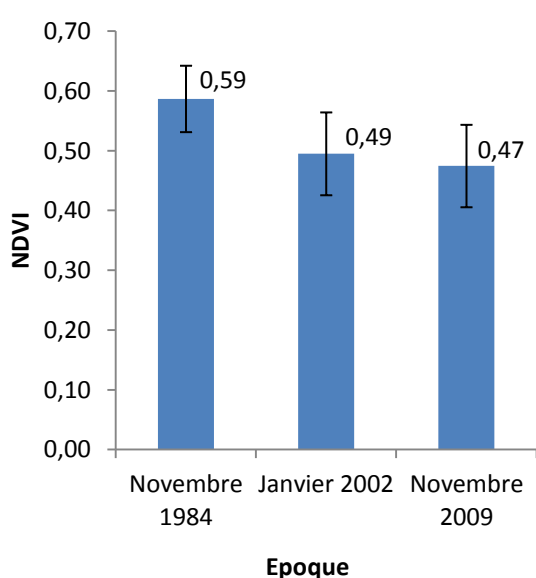


Figure 11 : Evolution des valeurs moyennes du NDVI de la forêt de transition en saison humide

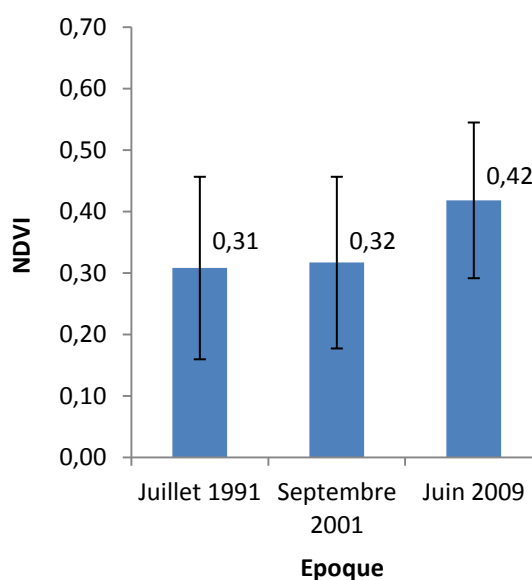
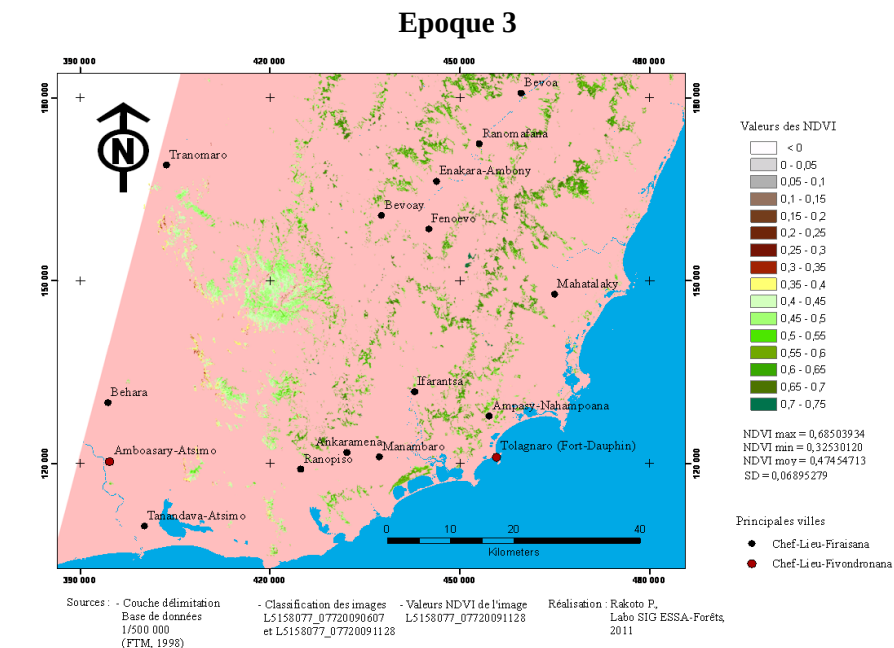
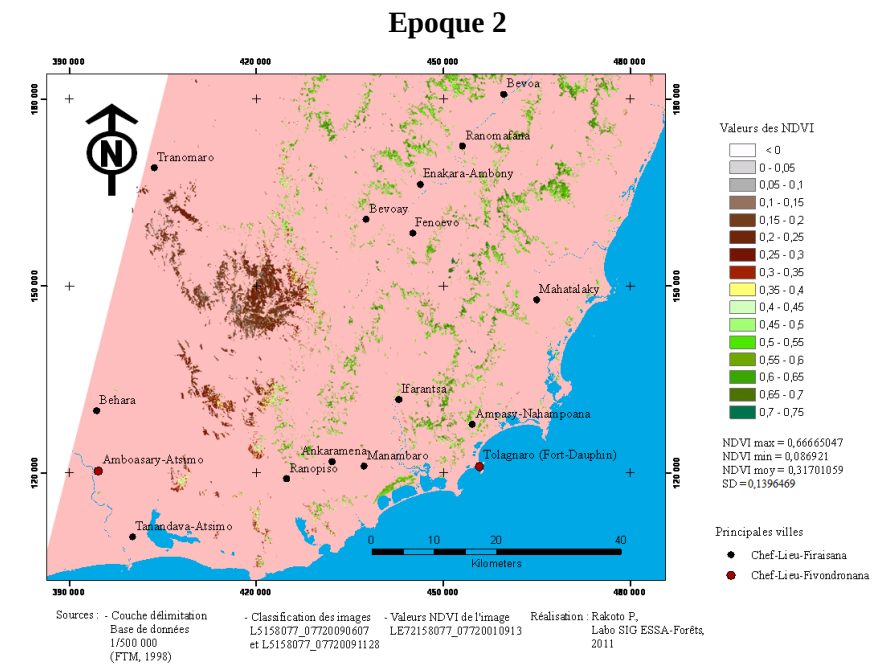
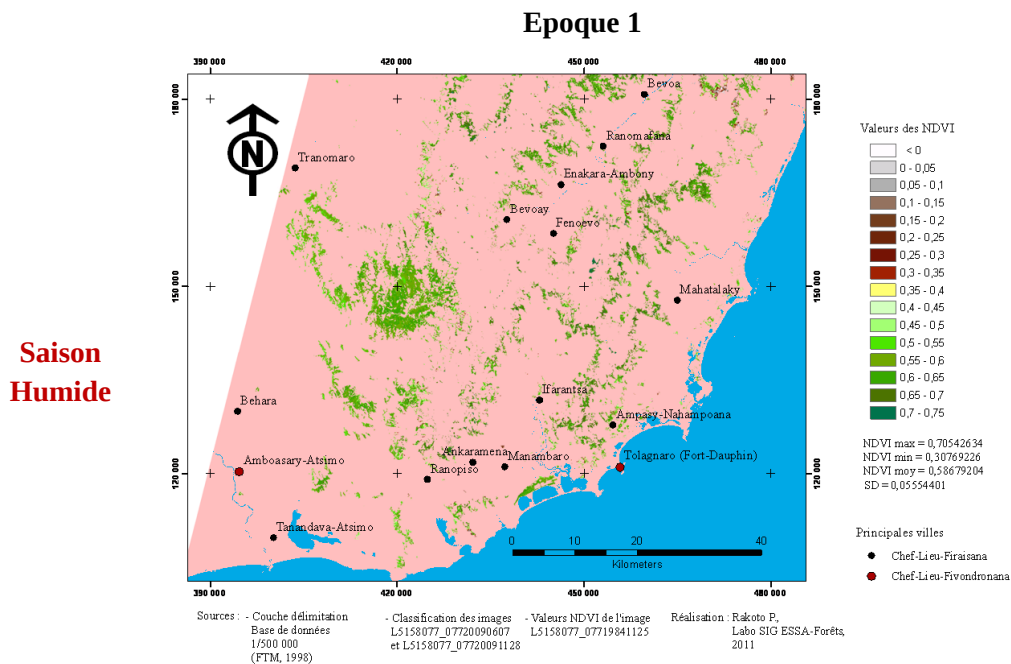


Figure 12 : Evolution des valeurs moyennes du NDVI de la forêt de transition en saison sèche

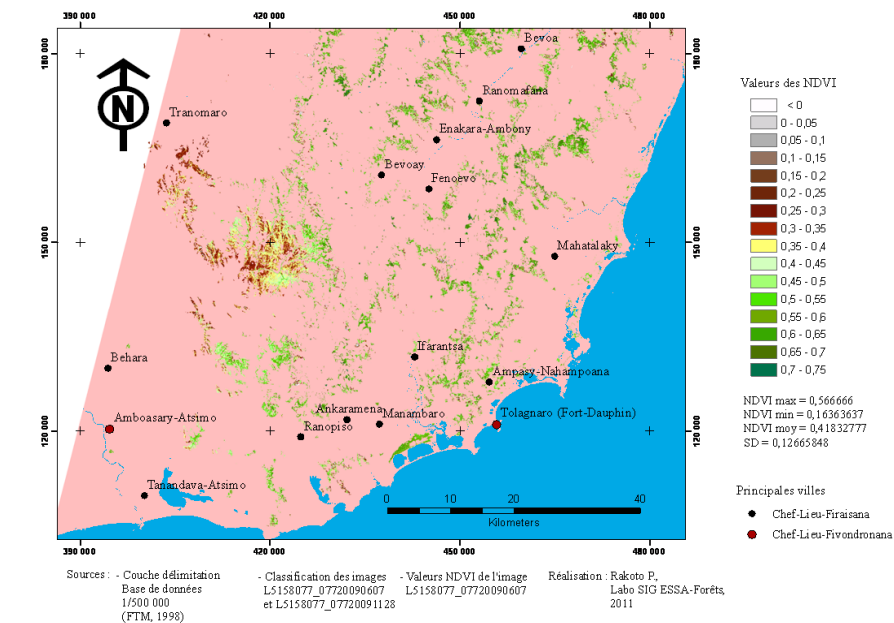
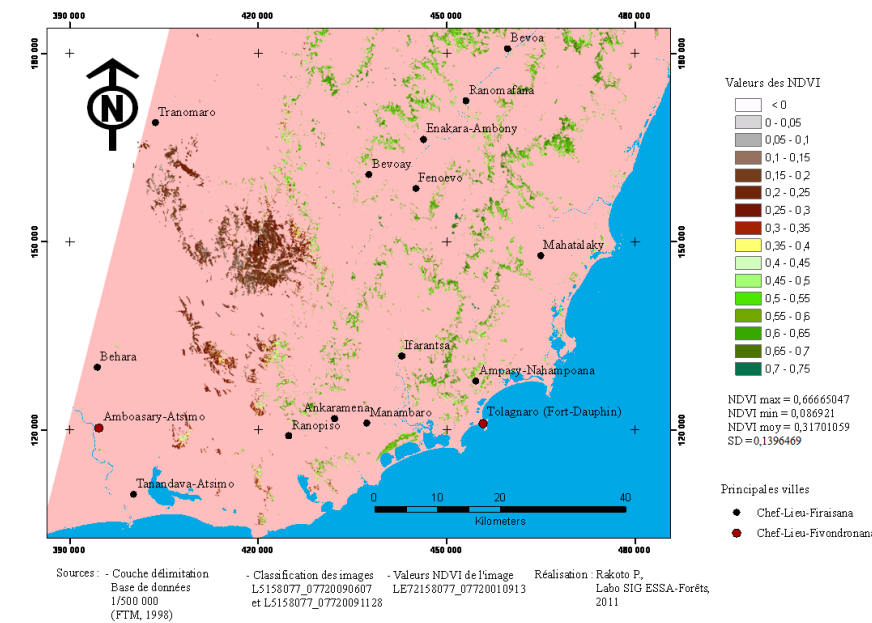
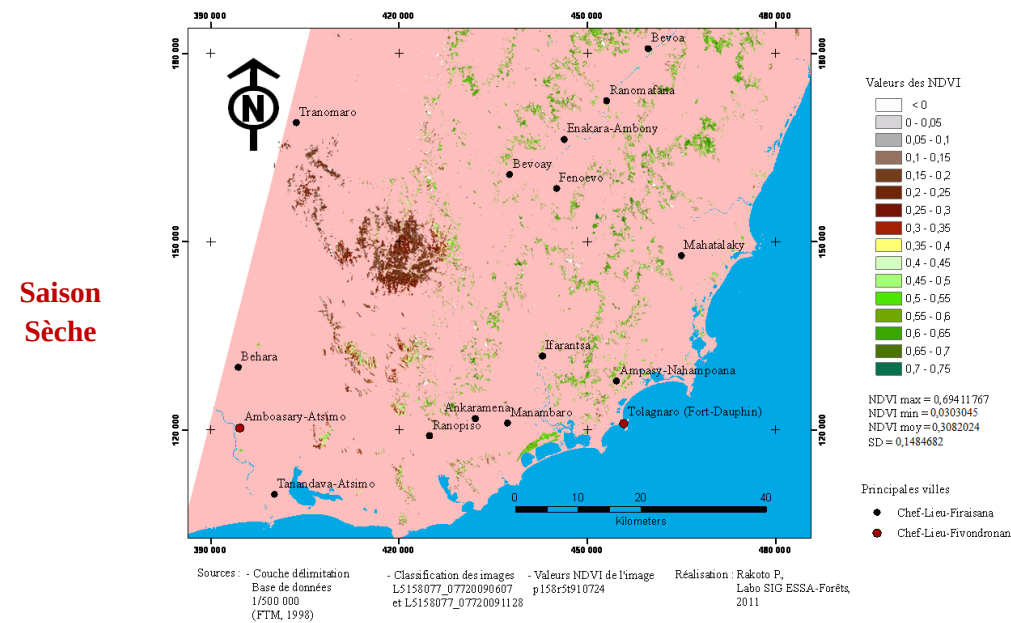
Une différence remarquable entre les valeurs des écart-types des deux saisons est constatée. En saison humide, les Ecart-types sont tous inférieurs à 0,1 alors qu'en saison sèche ils ne le sont pas. Or, l'interprétation des valeurs de NDVI se joue à des millièmes près. Normalement, la valeur des écart-types est de préférence la plus faible possible. Les valeurs élevées durant la saison sèche proviendraient d'une mauvaise répartition des valeurs de NDVI dans l'espace. En cette saison, suivant la différenciation des couleurs, les forêts proches des forêts sèches (en gris, en rouge ou en jaune) semblent avoir une moyenne de NDVI plus faible que les forêts de transition proches de la forêt humide (en vert clair).



Carte 13 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt de transition (Novembre 1984)

Carte 14 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt de transition (Janvier 2002)

Carte 15 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt de transition (Novembre 2009)



Carte 16 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt de transition (Juillet 1991)

Carte 17 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt de transition (Septembre 2001)

Carte 18 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt de transition (Juin 2009)

D'un côté, en termes mathématiques, les écarts entre ces valeurs auraient eu des conséquences sur la valeur des Ecart-types. De l'autre côté, en termes écologiques, les forêts de transition se trouvant beaucoup plus à l'Ouest commencent à acquérir les caractéristiques des forêts sèches. Et même si durant la saison humide, toutes les forêts (Ouest et Est⁴) acquièrent les mêmes caractéristiques (très différentes des forêts sèches), à long terme, la disparition des structures et des composantes qui forment les caractéristiques de ce type de forêt est à craindre.

c) Forêt sèche

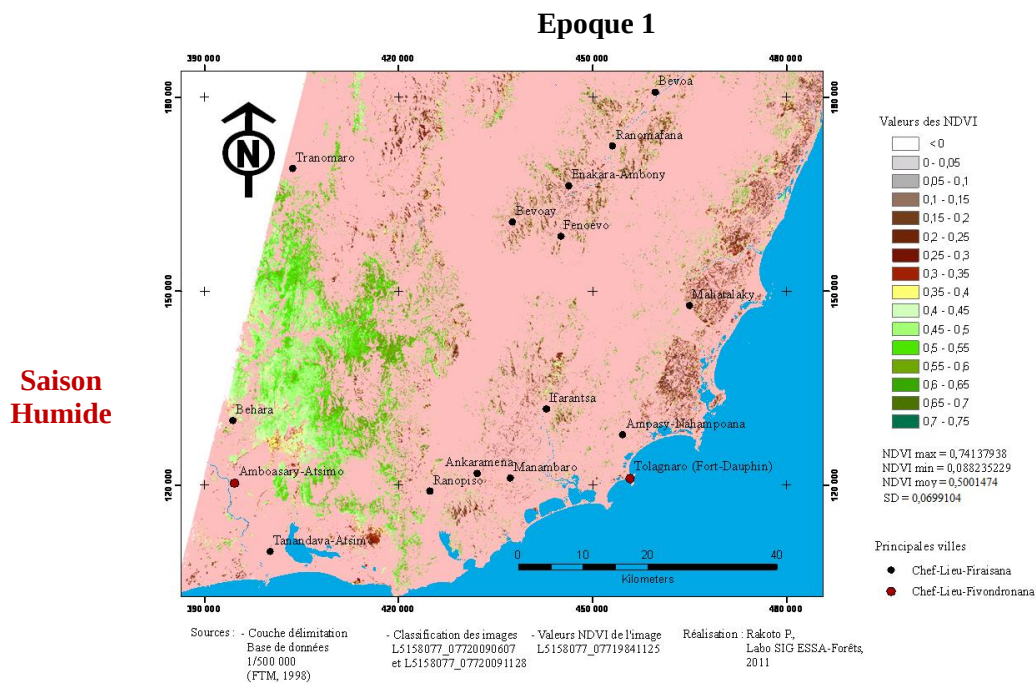
En termes de couleurs, la persistance du rouge est constatée. Cela signifie que ce type de forêt garde plus ou moins ses caractéristiques.

Dans toutes les saisons, l'influence de la précipitation sur le comportement de la végétation (valeur de NDVI) se confirme. Par exemple, en 2009, la forêt a été plus verte en Juin (saison sèche) qu'en Novembre (Saison humide) vu que de Juin est supérieure à de Novembre. Pourtant, d'après les courbes ombrothermiques de la station de Behara (station représentative de ce type de forêt), le mois de Juin correspond à la saison sèche et celui de Novembre à la saison humide.

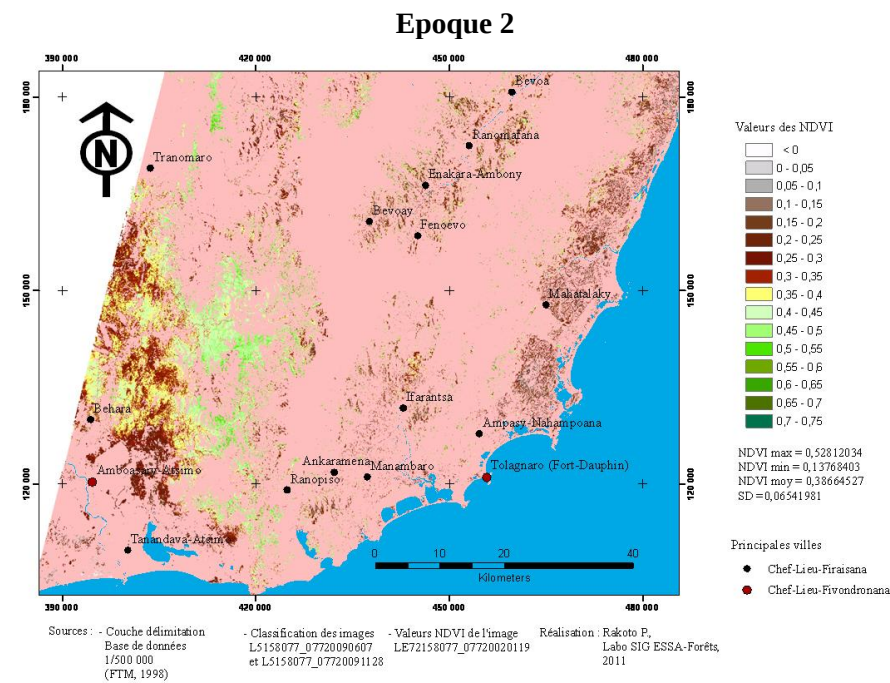
En Janvier 2002 (Saison humide), malgré une hauteur de pluie assez élevée (proche de la hauteur de pluie en 1984), la forêt sèche n'a pas été aussi verte qu'en 1984. Cela proviendrait de la capacité de la forêt à la récupération suite à une sécheresse en 2001. L'image de Septembre 2001 montre un état très sec de la végétation (). Cela pourrait également découler des successions de sécheresses (ou périodicité des sécheresses illustrée par l'exemple de Juillet 1991 et de Septembre 2001) une période très sensible à la végétation.

Ces résultats montrent à la fois l'existence à la fois de variabilités interannuelles et de variabilités intraannuelles de l'état de cette forêt. Certes, elle semble arriver à faire face, dans la mesure où durant la période sèche de Juin 2009 (mais avec une précipitation élevée par rapport à la normale), un peu de verdure de la forêt est constaté (), mais à long terme, ce type de d'écosystème risque de se dégrader.

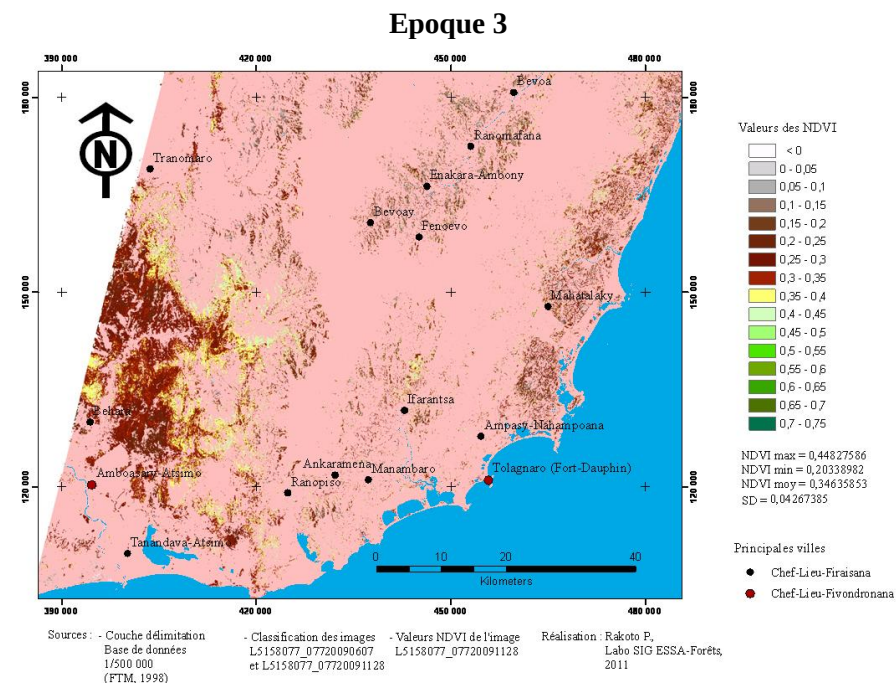
⁴ La forêt de transition Est se limite ici sur les forêts de transitions de la zone Ouest mais qui se trouvent plus à l'Est et se limitent à la verticale passant par Ranopiso.



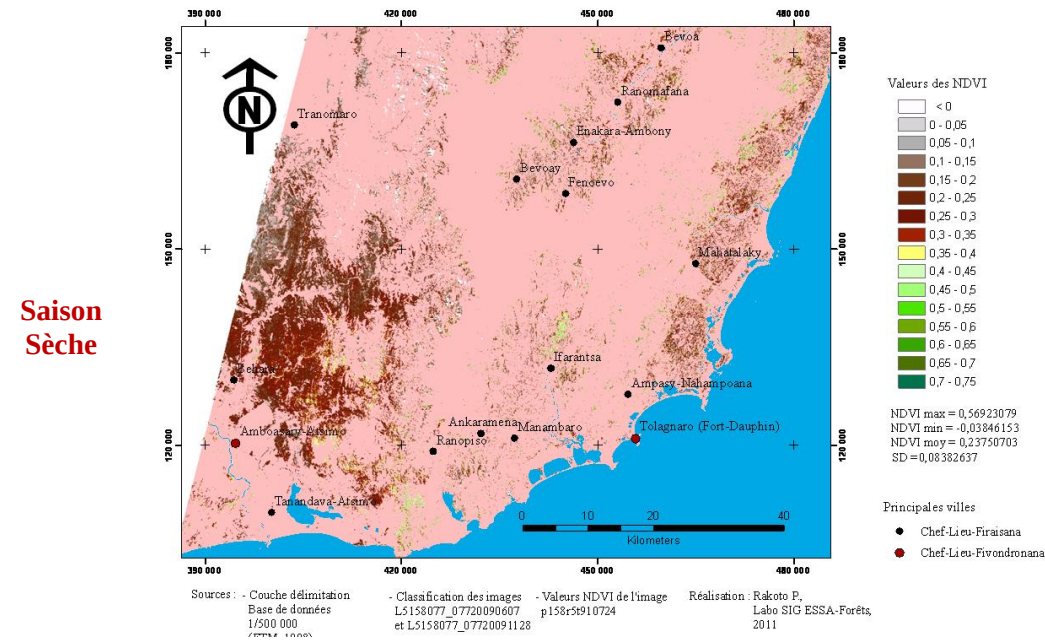
Carte 19 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt sèche (Novembre 1984)



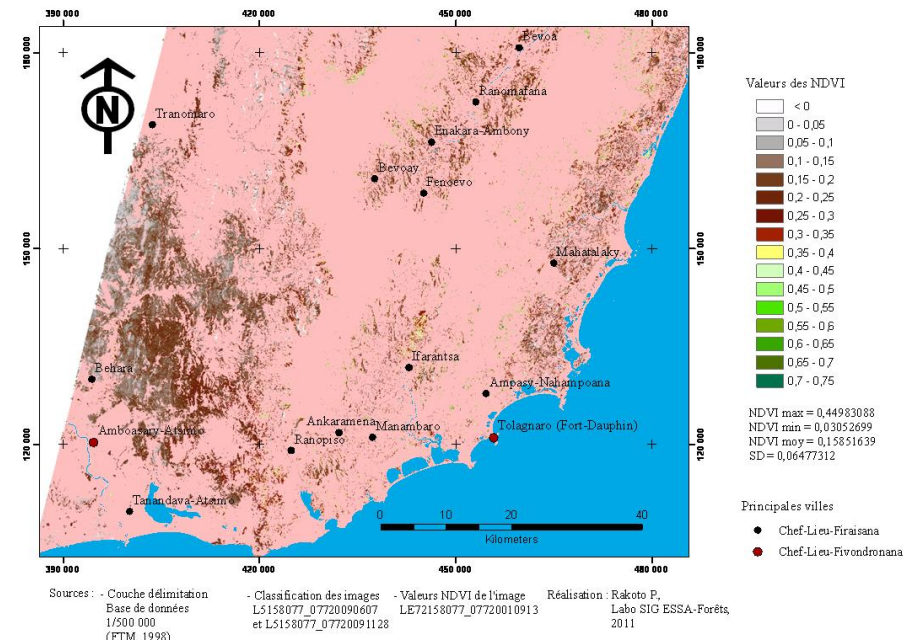
Carte 20 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt sèche (Janvier 2002)



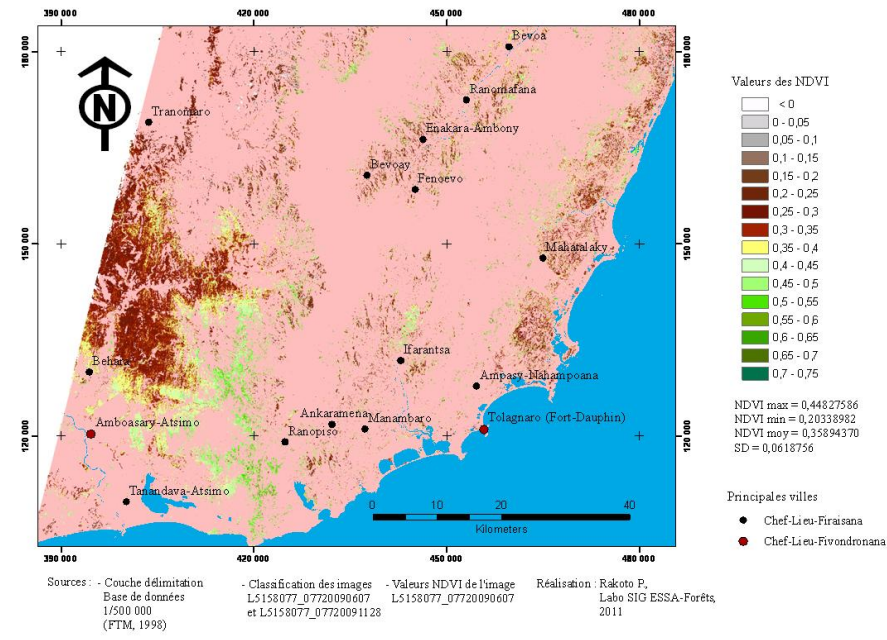
Carte 21 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt sèche (Novembre 2009)



Carte 22 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt sèche (Juillet 1991)



Carte 23 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt sèche (Septembre 2001)



Carte 24 : Répartition des valeurs de NDVI de la forêt sèche (Juin 2009)

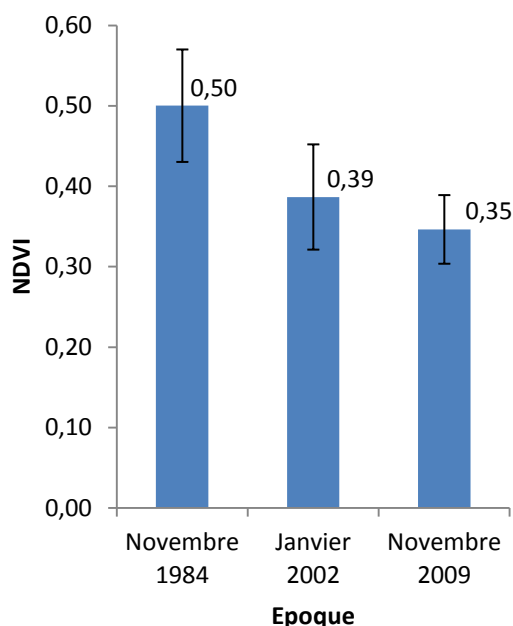


Figure 13 : Evolution des valeurs moyennes du NDVI de la forêt sèche en saison humide

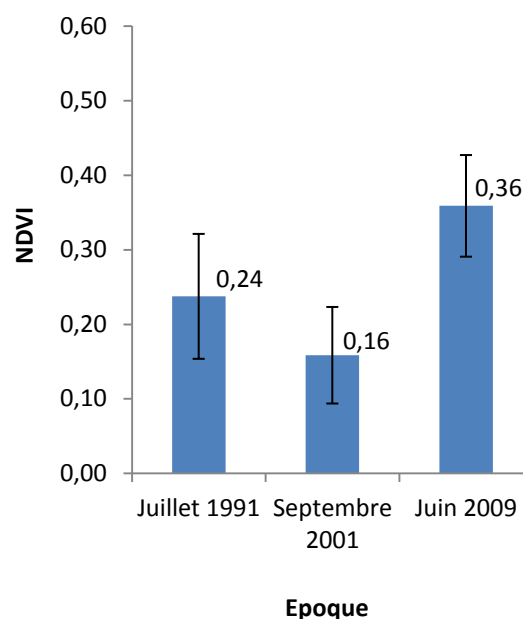


Figure 14 : Evolution des valeurs moyennes du NDVI de la forêt sèche en saison sèche.

Les variations intraannuelles des états de la forêt sèche sont mieux illustrées par les diagrammes ci-dessus. Entre septembre 2001 et janvier 2002 (intervalle de cinq mois), les variations sont très significatives. En effet, en septembre 2001

tandis qu'en janvier 2002 . Ainsi, en cinq mois, il y a eu une augmentation des valeurs du NDVI de , c'est-à-dire que NDVI moyen a plus que doublé.

III.6 Capacité de résilience de la forêt de transition et de la forêt humide

Faisant suite à la matrice de corrélation dans l'avant précédent paragraphe, une équation théorique donnant la valeur du NDVI en fonction de la précipitation a été déduite pour les deux types de forêts entre autre la forêt de transition et la forêt sèche. L'objectif de la comparaison des valeurs théoriques de NDVI aux valeurs observées vise à connaître la capacité de résilience et la stabilité des types végétales face aux variabilités de la précipitation.

III.6.1 Etablissement du modèle théorique

Les états théoriques des forêts sèches et des forêts de transition peuvent être modélisées par des équations obtenues à partir de la matrice de corrélation ci-dessus. Il s'agit d'équations de régression à partir desquelles des valeurs du NDVI ont été estimées.

a) Forêt de transition

Équation 2 : Equation de régression de NDVI en fonction de la pluviométrie de la forêt de Transition

: NDVI théorique de la forêt de Transition

: Précipitation cumulées des deux premiers mois (mm)

Le coefficient de corrélation est de 0,8825.

b) Forêt sèche

Équation 3 : Equation de régression de NDVI en fonction de la pluviométrie pour la forêt Sèche

: NDVI théorique de la forêt Sèche

: Précipitation cumulées des deux premiers mois (mm)

Le coefficient de corrélation est de 0,8968.

D'après ces équations et étant donné que ces deux types de forêts appartiennent à une zone où la quantité de pluie est la même, les résultats doivent à chaque fois indiquer que est supérieur à . Cela confirme l'étroite dépendance de la forêt sèche vis-à-vis de la précipitation (Ressource en eau).

III.6.2 Tendance de l'état de la végétation

En générale, la différence entre les valeurs absolues des écarts entre NDVI observé et NDVI théorique n'est pas significative. Le maximum se situe en Novembre 2009 de la forêt de transition tandis que le minimum en novembre 1984 de la forêt sèche.

Tableau 8 : Comparaison du NDVI théorique avec le NDVI observé

Type de Forêts	Saison	Mois d'acquisition de l'image	(mm)	NDVI théorique	NDVI obs	Ecart :
Forêts de Transition	Saison Humide	Nov-84	123,1	0,595	0,586	-0,009
		Janv-02	78,8	0,489	0,494	0,005
		Nov-09	32,3	0,377	0,474	0,096
	Saison Sèche	Juil-91	22,42	0,354	0,308	-0,046
		Sept-01	21,6	0,352	0,317	-0,035
		Juin-09	53,8	0,429	0,418	-0,011
Forêts Sèches	Saison Humide	Nov-84	123,1	0,513	0,500	-0,013
		Janv-02	78,8	0,394	0,386	-0,007
		Nov-09	32,3	0,269	0,346	0,077
	Saison Sèche	Juil-91	22,42	0,242	0,237	-0,005
		Sept-01	21,6	0,240	0,158	-0,081
		Juin-09	53,8	0,327	0,358	0,031

a) Forêt de transition

La valeur de NDVI observé dépasse celle de NDVI estimée seulement en Janvier 2002 et en Novembre 2009. Ces résultats confirment l'existence de variabilités intraannuelles de l'état de cette forêt. Sur une échelle de 26 ans (1984-2009), la forêt de transition paraît fragile face aux variabilités de la précipitation (proportion d'écarts négatifs entre et supérieurs à la proportion des écarts positifs). Malgré une résistance en Novembre 2009, les écarts plus ou moins grands entre NDVI théoriques et NDVI observés des périodes intermédiaires indiquent une vulnérabilité élevée de cette forêt face à la diminution des ressources hydriques. Si les variations persistent, une tendance à la dégradation pourrait se produire même à long terme.

b) Forêt sèche

L'écart entre NDVI observé et NDVI théorique est positif en Juin 2009 et en Novembre de la même année. Même si l'an 2009 est la dernière époque étudiée dans cette recherche, et que ces écarts positifs peuvent être interprétés à une récupération de la végétation, les écarts négatifs des autres années indiquent et confirment la variabilité de l'état de cette forêt. Par exemple, entre juillet 1991 et septembre 2001, une diminution de la valeur des écarts est constatée alors que les précipitations ont augmenté. Ainsi, dans la mesure où les variations de la pluviométrie continuent, ces forêts auront tendance à se dégrader.

ooo

DISCUSSIONS

ET

RECOMMENDATIONS

ooo

IV. Discussions et recommandations

IV.1 Discussions

IV.1.1 Sur les méthodes

a) Données météorologiques hétérogènes

L'échelle de l'étude est locale ce qui explique l'utilisation d'images à moyenne résolution (30m). Il aurait été, alors, plus commode de mesurer exactement les pluies qui sont tombées à l'endroit où se trouve un type de forêts considéré. De cette façon, les données météorologiques auraient été plus compatibles avec la résolution. Mais faute de stations météorologiques ainsi que de la continuité dans la mesure des paramètres climatiques au niveau des stations du Sud de Madagascar, cela n'a pas pu être possible.

Pour renforcer les méthodes, des algorithmes de prédiction de la pluviométrie développés en Afrique par l'USAID (*United States Agency for International Development*) et le FEWS-NET (*Famine Early Warning Systems Network*) auraient pu être développés mais faute de stations contournant les forêts, cette méthode a dû être écartée. En plus, cette technique dite RFE (*Rainfall Estimates*) requiert l'utilisation de bases données satellitaires de NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) dont la résolution spatiale des images est de 1km x 1km (Kevin *et al.*, 2004) ce qui n'est pas encore compatible avec la résolution de 30m.

b) Etablissement d'un modèle théorique de NDVI et comparaison avec la valeur de NDVI observé

Cette méthode a déjà été utilisée par San Emeterio *et al.*, en 2009 pour l'évolution de la dégradation au Sahel. Dans leur étude, ils appelaient, « résidus » la différence entre la valeur obtenue (valeur observée) et la valeur espérée par la modélisation (valeur théorique). Selon eux, si les valeurs des dernières années sont situées systématiquement au-dessus de la droite de régression NDVI-précipitation, cela pourrait indiquer une tendance à la récupération (meilleure réponse de la végétation aux pluies) dans la région indiquée.

IV.1.2 Sur les résultats

a) Corrélation des valeurs de NDVI avec la précipitation

➤ Cas des forêts sèches et des forêts de transition

Ces résultats confirment que le développement des arbres varie étroitement avec la précipitation. En effet, dans la zone Ouest, là où ces classes de forêts étaient recensées, les niveaux de précipitations sont faibles par rapport à la zone Est (547mm de pluies seulement dans la station de Behara et 1527mm de pluies à Taolagnaro). Selon Châtelet en 2010, un des principaux facteurs limitant ou conditionnant la croissance des plantes dans les forêts est la ressource en eau, et en particulier la pluviométrie étant un facteur essentiel (Châtelet, 2010). Les essences des forêts sèches, en particulier, présentent des formes d'adaptations à la sécheresse comme la présence des bulbes dans les racines.

De nombreuses études ont déjà exploré les relations spatio-temporelles entre la pluie et le NDVI en Afrique tropicale. Elles ont montré par exemple que dans les régions sahéliennes semi-arides de l'Afrique de l'Ouest, les variations du NDVI évoluent généralement de manière synchrone avec celles des précipitations à l'échelle interannuelle (Malo et Nicholson, 1990, in (Djoufack-Manetsa, 2008)). Malo et Nicholson avait trouvé une relation linéaire entre ces deux variables au-dessous de 1000mm de précipitation par an. Ils ont conclu que si le NDVI mensuel a été corrélé avec les précipitations mensuelles, la meilleure corrélation a été atteinte lorsque la pluviométrie des deux mois précédents a été également incluse (Damizadeh *et al.*, 2001). Par contre, une étude de Justice *et al.* en 1991 a montré qu'à l'échelle saisonnière la meilleure corrélation entre les deux paramètres se fait avec un décalage de deux mois après les premières pluies. Le temps de réponse du développement de la végétation est approximativement de 10 à 20 jours. Les résultats de Malo et Nicholson semblent être en accord ceux de la présente étude.

Malgré l'existence d'une corrélation forte entre précipitation et NDVI, il est aussi nécessaire de distinguer d'autres variables pouvant influencer le comportement de la végétation, mathématiquement traduit sous la valeur du NDVI. Des travaux récents montrent que les précipitations et NDVI dépendent de facteurs environnementaux tels que le sol (Richard et Pocard, 1998).

Ainsi, selon Guillaumet et Koechlin (1971), si l'eau constitue, pour les forêts denses sèches malgaches, le facteur limitant de leur développement, elle l'est surtout parce que ces types de forêts sont extrêmement sensibles aux conditions édaphiques susceptibles d'aggraver ou au contraire de compenser les facteurs climatiques. Dans leur ouvrage, ils citaient également que Perrier de la Bathie (1921) distinguait dans ces forêts denses sèches malgaches quatre catégories, sur sols ferrallitiques, sur sables, sur calcaires et dans les zones alluviales. Les différences ne sont pas seulement floristiques : si, sur sables ou sur sols argileux profonds, la chute des feuilles constitue pratiquement le seul caractère

physionomiquement évident d'adaptation à la sécheresse, d'autres formes apparaissent au fur et à mesure de l'accentuation de ce facteur : formes aphyllées plus ou moins charnues (*Euphorbia sp.*), tiges charnues (*Pachypodium*, *Adansonia*, *Clyphostemma*, Didiéracées), développement du système racinaire (*Dolichos fangitsy*), etc. C'est dans les forêts sur calcaire que ces formes sont les plus nombreuses, pas suffisamment cependant pour marquer leur physionomie au point de justifier pour elles une appellation particulière sauf, peut-être, dans le cas des forêts à Didiéracées et de la forêt dense sèche à baobabs. Les différents types de sols dans la zone d'étude pourraient, alors, constituer d'autres facteurs limitants du développement des forêts (Cf. II.1.1 Types de sols dans la région)

➤ Cas des forêts humides

Ici, NDVI et précipitations ne se corrélaient pas. Il existerait une limite de quantité de pluies pour un indice de végétation donné. Ceci peut être expliqué par l'effet de saturation de la végétation pour des quantités de pluies élevées. Autrement dit, comme la pluie est abondante, elle ne représente plus un facteur limitant pour ces types de forêts. Effectivement, dans cette zone, deux types de saisons ont pu être identifiées : la saison humide et la saison perhumide (Cf. Répartition spatiale et temporelle du climat). La moyenne interannuelle de la pluviométrie est de 1527mm.

Selon Nicholson, à partir du seuil de 1000mm de pluie par an, la relation entre NDVI et pluviométrie devient logarithmique à cause de l'effet de saturation de l'indice de végétation pour un niveau élevé de précipitation (Justice *et al.*, 1991). Autrement traduit, il va falloir effectuer un changement de variable en réduisant la valeur des précipitations.

b) Tendance des états de la végétation

L'étude sur l'évolution spatiale et temporelle des NDVI et la comparaison des valeurs de NDVI théoriques aux NDVI observés ont permis de dégager la stabilité précaire des forêts sèches et une tendance à la dégradation des forêts de transition. Ce changement de la structure de la végétation laisserait penser au phénomène de désertification. En effet, la désertification concerne un processus de dégradation des terres lié à des facteurs naturels exacerbés par l'action de l'homme. La manifestation apparente du phénomène se traduit par une diminution de la couverture végétale et des potentialités des systèmes écologiques et une détérioration des sols et des ressources hydriques.

Du côté du Sahel, par contre, dans l'étude de San Emeterio *et al.*, en 2009, l'évolution des résidus a montré une nette récupération de la végétation pour la période 1982-2002. Certes, les envergures des deux études ne sont pas comparables (la région du Sahel s'étend entre 15°W et 21°E de longitude et 11,5°N et 18°N de latitude étalée sur une superficie de 8 728 407km² alors que notre milieu d'étude s'étend sur 100km x 100km seulement), la résolution des images utilisées par San Emeterio *et al.* est

de 1,1km (les résolutions des images Landsat sont de 30m), mais ces résultats illustrent soit le processus de désertification dans le Sud de Madagascar, soit la vulnérabilité plus accentuée des végétations dans cette région face aux changements climatiques.

c) Menaces accrues subies par l'espèce *Neodypsis decaryi*

Cette espèce est une espèce menacée. Elle est localisée seulement entre les forêts sèches et les forêts humides sur une distance de 20 Km. Connue sous le nom vernaculaire de Palmier trièdre, cette espèce joue un rôle important à la fois économiquement et écologiquement. En effet, elle est une source de produits forestiers non ligneux comme la fibre, ou matériaux de construction et constitue également une source d'alimentation pour les animaux de cette zone écologique lors des périodes critiques de l'année (Ratsirarson *et al.*, 1996 in (Ratsirarson, 2011)). Ainsi, l'altération de la forêt de transition qui constitue l'habitat de cette espèce pourrait renforcer les menaces anthropiques déjà subies par ce type de palmier endémique.

IV.1.3 Sur les hypothèses

La première hypothèse avançait que la variabilité interannuelle des précipitations résulte une fluctuation annuelle des valeurs de NDVI, par conséquent, des états des différents types de forêts dans la zone étudiée.

Il a été reconnu qu'un des principaux facteurs limitant du développement des arbres est la précipitation. Cette étude confirme cette théorie et met en évidence l'existence d'un niveau de précipitation pour chaque type de forêt.

Cependant, lors de l'élaboration de la matrice de corrélation entre NDVI et précipitation, trois cas très différents ont pu être soulignés : il n'existait pas de corrélation entre NDVI des forêts humides et la pluviométrie, cette corrélation est plus faible dans les forêts de transitions (0,8825) alors qu'elle est plus élevée dans les forêts sèches (0,8968). Autrement dit, la précipitation n'agit pas en tant que facteur limitant de la croissance de la forêt humide dans la mesure où elle varie inter annuellement mais est suffisante pour la croissance des arbres de la forêt. Cette conclusion entame les discussions sur la deuxième hypothèse qui concerne sur la résilience de la végétation par rapport aux variabilités intra annuelles de la précipitation.

La deuxième hypothèse stipulait que les variabilités interannuelles renforcées par les variabilités intra annuelles avanceraient la dégradation des forêts dans la partie Sud de cette région.

Cette hypothèse semble être entièrement vérifiée pour la forêt sèche et la forêt de transition. La forêt sèche est composée de Bush et de Didiéraceae. C'est une végétation xérophytique donc censé apte

face aux rudes conditions du climat surtout la sécheresse. Ce type de forêt ne devrait pas dépendre autant de ressource en eau que la forêt de transition. Cependant, il a été démontré que face aux variabilités intra annuelles de la précipitation, les forêts sèches ont du mal à se résilier et tend à la dégradation.

Quant à la forêt de transition, une tendance à rapprocher les caractéristiques des forêts sèches a été démontrée. Cette tendance est expliquée par une diminution de la verdure de la végétation faisant suite à des événements de sécheresses (1991 et 2001) comme en Janvier 2002. Par ailleurs, après la comparaison des valeurs théoriques des valeurs observées de NDVI, une tendance plutôt négative a été constatée inter annuellement et intra annuellement.

IV.2 Recommandations

IV.2.1 Améliorer la qualité des données météorologiques

Il s'agit de renouveler les appareils de collectes de données météorologiques dans les zones sensibles aux variabilités du climat et à la sécheresse en l'occurrence dans les zones sèches. Les recherches sur les causes et les effets des variations climatiques et sur les prévisions climatiques à long terme en vue de déclencher des alertes précoces (sécheresse...) sont essentielles.

L'OMM (Organisation Mondiale de la Météorologie) encourage l'observation systématique, la collecte, l'analyse et l'échange de données et d'informations météorologiques, climatologiques et hydrologiques; la planification, la prévention et la gestion des situations de sécheresse; les recherches sur les variations et les prévisions climatiques; et le renforcement des capacités et le transfert de connaissances et de technologie.

De plus, il est indispensable d'intégrer les informations climatologiques dans l'élaboration des pratiques viables puisque le changement climatique est l'un des principaux facteurs qui favorisent, et même qui déclenchent la dégradation des terres. Il est donc nécessaire d'étudier avec soin la façon dont le climat induit et influence la dégradation.

Pour ce faire, cette recommandation au niveau de l'amélioration des données scientifiques doit être accompagnée de mesures pratiques à travers les actions menées par les organismes sociaux et environnementaux afin de pérenniser la recherche, passage obligé pour la prise de décision, et de bien mener les actions desdits organismes. Le soutien de l'Etat est requis, surtout pour le renouvellement des stations météorologiques. Il ne faut pas toujours attendre l'initiative des organismes environnementaux ni même des bailleurs comme c'est le cas du projet SAP, mais prioriser cette étape de la recherche qu'est la formation d'une base de données scientifiques solides, complètes et

actualisées en l'occurrence les données météorologiques. Si cette recherche a été axée sur le comportement des forêts de la partie Sud de la Région Anosy, ces données météorologiques sont aussi indispensables dans prévention et la lutte contre les criquets pèlerins ainsi que la prévention de la famine. Ainsi, dans la mesure où l'Etat assure son rôle de providence au profit de la société, il doit collaborer et prendre sa part de responsabilité en fournissant les données météorologiques. Si le budget alloué n'est pas suffisant, des accords passés avec les organismes et les bailleurs sont souhaitables. De cette façon, l'Etat ne demeure pas un simple spectateur sur l'avenir de sa population.

IV.2.2 Renforcer les mesures d'adaptations face aux changements climatiques

Cadré dans le contexte de changement climatique, cette étude a permis de mettre en relief l'importance de ce fléau dans les zones arides de Madagascar. Les stations d'observations de la pluviométrie du SAP enregistrent continuellement les niveaux de précipitations dans le Sud. Comme la présente étude, l'étude d'images satellites peut renforcer les indicateurs de sécheresse. Le suivi temporel peut aussi servir à l'aménagement des forêts comme guide dans l'établissement d'objectifs et aussi pour vérifier si ces objectifs ont été atteints.

Par ailleurs, cette étude propose de mener plus d'actions en faveur la biodiversité dans le Sud comme le reboisement dans les forêts sèches ou dans les forêts de transition à travers le marché du carbone. Ainsi, les bénéfices récoltés de ces marchés sont donnés à la population locale laquelle bénéficiera également d'un allègement des conditions climatiques grâce aux reboisements. A part cela, dans le marché du carbone, il faut avantager les populations dans ces régions où les variabilités du climat sont plus ressenties.

IV.2.3 Renforcer les mesures d'anticipation de lutte contre la sécheresse et la désertification

Cette étude a permis de mettre en évidence la diminution de la capacité d'adaptation des différents types de végétation dans la région Anosy. Cette évolution peut être identifiée comme un processus de désertification. Certes, la dégradation du sol indique le niveau de désertification mais à long terme, un changement de paysage en désert peut être envisagé. « La dégradation des terres », n'est pas encore acquise à Madagascar où l'on assimile souvent la désertification à une lutte contre le désert. Il faut retenir que « dégradation » suppose un cycle, un processus et non l'état qui justifierait des actions de lutte.

A Madagascar, les parties Sud et Sud-Ouest, où sécheresse et famine se succèdent périodiquement, semblent être les plus touchées par la désertification. Madagascar s'est rallié à la Communauté Internationale pour lutter contre la désertification en ratifiant, en 1997, la CNUCLD (Convention des

Nations Unies sur la Lutte contre la Désertification). Par la suite, il a élaboré son Plan d'Action Nationale de lutte contre la désertification ou PAN approuvé par le Gouvernement par le décret N° 2003-199 du 11 mars 2003. Ce PAN est mis en œuvre dans le grand Sud de l'île, dans la partie Sud Ouest, dans le Centre Ouest (Menabe et Nord du Menabe), la pointe Sud du Sud Est (c'est-à-dire une partie de l'Anosy).

Par conséquent, cette étude propose de renforcer les mesures d'anticipation de la lutte contre la désertification en conservant les écosystèmes fragiles : les forêts sèches et les forêts de transition. L'intégration de la forêt sèche de Behara Tranomaro en tant que Nouvelles Aires Protégées est déjà une grande étape. L'étude propose la restauration de ces habitats en gardant les mêmes structures des forêts. Certes, la désertification touche plus particulièrement l'Homme par la famine, mais il faut aussi noter que des actions en faveur de la forêt doivent accompagner les actions humanitaires dans la mesure où les forêts permettent aux sols de mieux stocker l'eau et de desservir les réseaux hydrographiques sources d'eaux potables pour les populations du Mandrare.

Tableau 9 : Plan d'action

Axes stratégiques : Recherche/Actions	Activités	Indicateurs	Responsables
<i>Recherche :</i>			
R1- Améliorer la qualité des données météorologiques.	- Renouveler les stations météorologiques. - Collaborer avec les partenaires en cas d'insuffisance de budgets.	- Nombre de stations météorologiques rouvertes. - Nombre d'accords entre Etat et autres Organismes.	- Service de la météorologie. - Organismes de recherche. - Partenaires de réalisation des Actions.
<i>Actions :</i>			
A1- Renforcer les mesures d'adaptation face aux Changements Climatiques et Soutenir les services environnementaux	- Réaliser des reboisements à travers les marchés du Carbone - Dans un contrat de marché du Carbone, favoriser les populations vivant dans les zones arides et les encourager à la protection des habitats.	- Superficie de forêts reboisées. - Effectif de la population locale touchée. - Réduction des crises alimentaires et famines moins fréquentes.	- PHBM - WWF - PAM - SAP (Système d'Alerte Précoce)
A2- Anticiper des mesures de lutte contre la désertification.	- Continuer les actions humanitaires : Agriculture et élevage.		- ONN - FAO

ooo

CONCLUSION

ooo

Conclusion

La télédétection associée à des modélisations par ordinateur peut amener à anticiper la fragilité des écosystèmes dans les forêts sèches et les forêts de transition de la région Anosy. Le milieu d'étude présente une tendance à la baisse de la pluviométrie ces dernières années. Cela a eu pour conséquence, une altération de la qualité des végétations pouvant être traduite à partir des valeurs de NDVI. La variabilité interannuelle des précipitations associée à la variabilité des valeurs du NDVI ont montré cette étroite dépendance des forêts sur les ressources hydriques.

Cette étude s'est aussi focalisée sur l'analyse des corrélations entre NDVI et précipitations. Ainsi, il en a été déduit que la pluviométrie joue un rôle primordial dans la physiologie des forêts surtout des forêts sèches et des forêts de transitions. Cette étroite dépendance a permis de mettre en évidence les relations entre fluctuation des valeurs du NDVI et la variabilité intra annuelle des précipitations au niveau de ces forêts. Autrement dit, l'état des forêts sèches et celui des forêts de transition varient non plus à l'échelle annuelle comme celui des forêts humides mais à l'échelle saisonnière. Cela requiert un niveau d'adaptation plus élevé de ces forêts. La comparaison des valeurs observées de NDVI aux valeurs estimées obtenues à partir de l'élaboration d'un modèle théorique a donné des résultats stipulant un signe diminution de ce niveau d'adaptation.

L'originalité de la présente recherche se situe au niveau des approches spatio-temporelles adoptées. Il a été question d'analyser le comportement de la végétation à l'échelle des forêts sèches, des forêts de transitions et des forêts humides de la partie Sud de la Région Anosy et sur différentes saisons à partir des données du NDVI à 30m de résolution. Malgré les limites liées à la télédétection et malgré les imperfections des données météorologiques, et partant des hypothèses de résiliences ou de la diminution de la capacité d'adaptation des forêts au fil du temps, cette étude a pu évaluer la tendance actuelle de ces trois types de forêts et ce sur une échelle de 26 ans (1984 à 2009). Dans une perspective plus détaillée, les résultats peuvent être améliorés en effectuant des surveillances directes de l'état physiologique des arbres (feuillaison, défeuillaison, fructification) ou en intégrant d'autres variables pouvant influencer le comportement de la végétation comme le sol.

Les résultats stipulant que les forêts de transitions et les forêts sèches, malgré l'arsenal qu'elles développent (surtout pour la forêt sèche) pour s'adapter aux conditions stationnelles, ont une capacité d'adaptation de moins en moins suffisante et cela suivant les précipitations répondent à notre objectif de départ. Celui-ci voulait connaître la réaction des forêts face aux variations de la pluviométrie.

Ce changement d'état de la forêt allant d'un état stable à un état instable (diminution de la capacité d'adaptation) peut constituer un signe du commencement de la désertification dans cette région.

Certes, dans sa définition, la désertification est évaluée suivant la dégradation des sols mais cette dégradation peut elle-même provenir de la disparition progressive de la végétation, ou de l'assèchement de celle-ci. En effet, il est reconnu que les arbres stabilisent le sol non seulement à travers la fixation racinaire mais ils protègent également le sol contre les érosions hydriques et éoliennes. De plus, la matière organique issue de la décomposition des feuilles mortes améliore la structure du sol et les activités biologiques qui s'y produisent. En conséquence, l'absence de la végétation renforcée par la rigueur du climat en l'occurrence la diminution de la précipitation peut mener à long terme à une transformation de paysage en désert.

La sécheresse, la famine et la diminution de la production agricole combinées à la dureté du climat constituent autant de signes de la dégradation du sol et de la désertification dans le Sud. En alternatives avec les actions de restauration des écosystèmes fragiles dans cette zone semi-aride de Madagascar, d'autres recherches doivent être effectuées pour mieux appréhender le phénomène de désertification par l'étude de la dégradation du sol. Achard et Blasco (1990) l'ont bien dit, un des types de transformations majeures de la planète devraient faire l'objet d'un contrôle continu par satellite dont l'extension de la désertification. La télédétection dispose des indicateurs adéquats à ce sujet comme le LDI (*Land Degradation Index*). La méthode peut être associée à une observation sur terrain du niveau de dégradation.

ooo

REFERENCES

ooo

Références

1. Achard, F. et Blasco, F. (1990). Rythmes saisonniers de la végétation en Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale. Paris : AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext.
2. ANGAP TOLIARA, (2003). Plan de gestion de conservation parc national d'Andohahela. Parcs Nationaux Madagascar. Toliara : ANGAP.
3. Bannari, A., Dennis, M. et Driss, A. (1998). Analyse des effets atmosphériques sur les indices de vegetation en milieu urbain. Sherbrooke (Quebec) : Laboratoire de télédétection et de géomatique, Département de Géographie, Université de Ottawa (Ontario) et Centre d'application et de recherche en télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke.
4. Bannari, A., El-Harti, A., Haboudane, D., Bachaoui, M. et El-Ghmari, E. (2007). Intégration des variables spectrales et géomorphométriques dans un SIG pour la cartographie des aires exposées à l'érosion. Télédétection.
5. Battistini, R. (1964). Etude géomorphologique de l'extrême sud de Madagascar. Editions Cujas, Toulouse.
6. Bauza, M. et Leger, F., (2010). Les peuples autochtones face au changement climatique. MS GDDCC
7. Benkrid, E-H. (2008). Etude de l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol dans la plaine du Bas Chélif (Algérie). Université Montpellier 2- AgroPariTech.
8. Bigot, S. (1997). Les précipitations et la convection profonde en Afrique centrale : cycle saisonnier, variabilité interannuelle et impact sur la végétation. Dijon : Thèse de doctorat, Université de Dijon.
9. Bonn, F. et Rochon, G. (1993). Précis de Télédétection – Vol 1 Principes et méthodes. Presse de l'Université du Québec/AUPELF.
10. Centre Canadien de Télédétection (CCT). (2001). Notions fondamentales de la télédétection. Ressources naturelles Canada.
11. Chatelet, P. (2010). Variations interannuelles de l'indice foliaire, de la chute des feuilles, et des données météorologiques en forêt guyanaise. Montpellier. Centre de Bio-Archéologie et d'Ecologie Institut de Botanique 163 rue Broussonet 34090 Montpellier.

12. Cornet, A. (1972). Carte bioclimatique de Madagascar. Tananarive : O.R.S.T.O.M.
13. CRD Anosy, (2001). Appui à la planification de développement durable dans la région de l'Anosy Madagascar. ONE
14. Damizadeh, M., Saghafian, B. and Gieske, A. (2001). Studying vegetation responses and rainfall relationship based-on NOAA/AVHRR images. Singapore. Centre for Remote Imaging, Sensing and processing (CRISP) - National University of Singapore -Singapore Institute of Surveyors and Valuers (SISV) - Asian Association on Remote Sensing.
15. Deering, D. W., Rouse, J. W., Haas, R. H. and Schell, J. A. (1975). Measuring forage production of grazeing units from Landsat MSS data. Remote sensing of environment, N°2.
16. Diello, P., Mahe, G., Paturel, J-E., Dezeter, A., Delclaux, F., Servat, E.et Ouattara, F., (2005). Relations indices de végétation-pluies au Burkina-Faso : cas du bassin versant du Nakambé, Journal des sciences hydrologiques, N°13.
17. Djoufack-Manetsa, V. (2008). Cycle saisonnier du NDVI dans le Nord-Cameroun et relations avec la pluviométrie (1982-2002). Yaoundé, Cameroun : Département de Géographie, Université de Yaoundé 1, BP 755.
18. Donque, G. (1972). Contribution géographique à l'étude du climat de Madagascar. Antananarivo. Nouvelle Imprimerie des Arts graphiques.
19. Donque, G. (1975). The climatology of Madagascar. In Battistini, R., and G. Richard-Vindard, eds. Biogeography and ecology in Madagascar. W. Junk, The Hague.
20. Eckhardt, D. V. (1990). Automated Update of an Irrigated Lands GIS Using SPOT HRV Imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.
21. Escadafal, R. (1989). Les propriétés spectrales des sols. Paris. Université de Pierre et Marie Curie – ORSTOM.
22. Gaume, E. (2000). Hydrologie : cycle de l'eau et modélisation pluie-débit. Marne. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Université Paris XII-Val de Marne.
23. GIEC, (2001). Bilan 2001 des changements climatiques : Conséquences, adaptation et vulnérabilité. OMM, PNUE.
24. GIEC, (2007). Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de Synthèse. OMM, PNUE.

25. Girard, M-C. et Girard C. (1999). *Traitement de données de télédétection*. Paris. Dunod.
26. Goodman, S. M., Pidgeon, A. F. A. Hawkins, and T. S. Schulenberg. (1997). *The Birds of Southeastern Madagascar*.
27. Hervieu, J. (1960). *Notices sur les cartes pédologiques de reconnaissance au 1/200.000è, Feuille N° 65 Fort-Dauphin*. Tananarive. Institut de recherche scientifique de Madagascar Tananarive -Tsimbazaza.
28. Huete, A.R. (1988). A Soil-adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote sensing of the environment*, N°25.
29. Ingram, D. and Terence, P., (2004). *Climate change impacts and vegetation response on the island of Madagascar*, Columbia University, Earth Institute, 1200 Amsterdam Avenue, New York, NY 10024, USA, Centre for Environmental Change and Sustainability,
30. Ioana-Toroimac, G., Zaharria, L., Bigot, S. et Beltrando, G. (2006). *Activité végétale et caractéristiques hydroclimatiques en Dobroudja (Roumanie) : L'apport des données spot-4 végétation*. Lille : Laboratoire de Géographie des Milieux Anthropisés (LGMA), CNRS.
31. Jackson, R.D. (1983). Spectral indices in n-space. *Remote sensing of the environment*, N°13.
32. 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*. Toulouse : Université de Toulouse.
33. Justice, C., Digdale, G., Townshend, J., Naracott, A. and Kumar, M. (1991). "Synergism between NOAA-AVHRR and Meteosat data for studying vegetation development in semiarid West Africa". *International Journal of Remote Sensing*, N°12
34. Kaufman, Y.J. and Tarne D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS, IEE. *Transaction Geoscience Remote sensing*, N°30.
35. Kauth, R.J. and Thomas. (1976). The Tassel Cap, a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings of the symposium on machine Processing of remotely sensed data*. LARS Pruuudue University, West Lafayette – Indiana.
36. Kevin, B., Janowiak, J. and Huffman, G. (2004). *Verification of rainfall estimates over Africa using RFE, NASA MPA-RT, AND CMORPH RS Information Systems/Climate Prediction*

-
- Center, NCEP/NWS/NOAA. Science Systems and Applications, Inc. and Laboratory for Atmospheres, NASA/GFSC.
37. Knipling, E. B. (1970). Physical and physiological bases for the reflectance of visible and near infrared radiation from vegetation. Remote sensing of the environment, N°1.
 38. Koechlin, J. et Guillaumet, J. (1971). Contribution à la définition des types de végétation dans les régions tropicales (Exemple de Madagascar). Antananarivo : ORSTOM.
 39. Koechlin, J., Guillaumet J. et Morat, P. (1997). Flore et Végétation de Madagascar. Vaduz Allemagne. A.R.G. Gantner Verlag FL 9490 Vaduz.
 40. Lafrance, P., Dubois, J. et Abdelaoui, A. (1990). Apport de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Paris. John Libbey Eurotext.
 41. Malo, A. and Nicholson, S. (1990). "A study of the rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using the Normalized Difference Vegetation Index". Journal of Arid Environments, N°19
 42. Myneni, R., Hall, F., Sellers, P. and Marshak, A. (1995). The interpretation of spectral vegetation indexes. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.
 43. Nicoll, M. et Landgrand, O. (1989). Madagascar : revue de la Conservation et des Aires Protégées. Gland. Suisse. WWF
 44. OMM. (2005). « Le climat et la dégradation des sols ». Temps-Climats-Eau, N°989.
 45. OSS, (2005). Indicateurs écologiques : Une première approche méthodologique a pour la surveillance de la biodiversité et des changements environnementaux. ROSELT (Réseau d'Observatoire Ecologique à Long Terme) / OSS.
 46. Paulian, R., C., Blanc, J.-L. Guillaumet, J.-M ; Betsch, P. Griveaud, et A. Peyriéras. (1973). Etude des écosystèmes montagnards dans la région malgache. II. Les chaînes Anosyennes. Géomorphologie, climatologie et groupements végétaux. (Campagne RCP 225, 1971-1972). Bulletin Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris. Ecologie générale &, série 3
 47. Perrier De La Bathie H., (1921). La végétation malgache. Ann. Mus. Colon. Marseille.
 48. Pouchin, T., Debrie, J., Bourcier, A., (2002). L'observation de la végétation de l'Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale : l'apport de végétation normalisé. Sécheresse, N°13.

49. Prince, S.D.E., De Colstoun, B. and Kravitz L.L. (1998). Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive sahelian desertification, *Global Change Biol.*, N°4
50. Rarivomanana, H. (2006). Contribution à la conservation de quelques espèces endémiques et menacées du genre *Pachypodium*. Cas du *Pachypodium lamerei* Darake et *Pachypodium cactipes* K. Schumann dans la région d'Andohahela; *Pachypodium horombense* Pichon dans la région d'Ihosy. Antananarivo : Université d'Antananarivo. Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques. Département des Eaux et Forêts.
51. Ratovoson, A. A. N. (2011). Analyse de la dynamique spatio-temporelle des paysages dans la région d'Analanjirifo. Antananarivo : Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques - Département des eaux et Forêts.
52. Ratsirarson, J, Silander, J. and Richard, F. (1996). Conservation and management of a threatened Madagascar palm species, *Neodypsis decaryi*, Jumelle. Conservation biology. In Ratsirarson, J.(2011). Ecologie descriptive et fonctionnelle : outils essentiels pour la conservation de la biodiversité. Caractérisation des espèces, suivis de la population et étude des interdépendances au sein de la communauté naturelle à Madagascar. Université d'Antananarivo, Ecole supérieure des sciences agronomiques, HDR.
53. Ratsivalaka-Randriamanga, S. (1985). Recherches sur le climat de Tolagnaro (ex Fort-Dauphin) (Extrême Sud de Madagascar). *Madagascar Revue de Géographie*, N°46
54. REBIOMA, (2009). Atlas numérique du Système des Aires Protégées de Madagascar (SAPM) et du système de gestion forestière durable (KOLOALA). WCS
55. Richard, Y and Pocard, I. (1998). "NDVI sensitivity to spatial and interannual rainfall variations in southern Africa". *International Journal of Remote Sensing*, N°19
56. Richardson, A.J. and Wiegrand C. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrametric Engineering and Remote sensing*, N°43.
57. Riquier, J. (1968). Carte pédologique de Madagascar à l'échelle de 1 : 1 000 000. Tananarive : ORSTOM.
58. Rouse, J., Hass, R., Shell and J., Deering, W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA

59. San Emeterio, J., Lacaze, B. et Mering, C. (2009). Détection des changements de la couverture végétale au Sahel à partir des données NDVI et précipitations. Paris : CNRS-UMR 8586 PRODIG.
60. Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney M. P. and Macomber, S. A. (2001). "Classification and change detection using Landsat TM data : When and how to correct atmospheric effects?". Remote Sensing of Environment, N°75
61. Soudani, K. (2006). Introduction générale à la télédétection. Paris : Faculté des Sciences d'Orsay - Université Paris Sud XI.
62. Tadross, M., Randriamarolaza, L., Rabefitia, Z. and Zheng, K. Y. (2008). Climate change in Madagascar, recent past and future. Washington, DC : World Bank.
63. Trichon, V. (2007). Ecosystèmes forestiers tropicaux et télédétection dans le contexte du changement globale : Apport de la très haute résolution spatiale. Fréjus : Ecole Thématique ECOFOR-CNRS.
64. Tucker C.J. (1979), Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation, Remote Sensing of Environment, N°8.
65. Tucker, C.J. and Sellers, P.J. (1986). Satellite remote sensing of primary production. International Journal of Remote Sensing, N°11.
66. Tucker, C. J., Pinzon, J., Brown, M. E., Slayback, D., Pak, E. W. and Mahoney, R. (2005). An extended AVHRR-8km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. International Journal of Remote Sensing, N°26
67. USAID, (2007). Adaptation à la variabilité et aux changements climatiques. Washington, DC. USAID.
68. Viollier, M., Belsher, T. et Loubersac, L. (1985). Signatures spectrales des objets du littoral. Proceedings IIIème Colloque Signatures Spectrales d'objets en Télédétection, Les Arcs, France - Noordwijk : ESA, ESTEC.
69. WWF. (2010). Témoignage de Madagascar : Changement Climatique et Modes de vie ruraux. WWF. NORAD.

ooo

ANNEXES

ooo

Annexe 1 : Détails du milieu d'étude

1. Flore spécifique

Le PNA abrite des espèces endémiques locales telles *Dypsis decaryi*, *Phelsuma malamakibo*, *Xiphopteris* sp, des espèces endémiques régionales et plusieurs espèces endémiques nationales. A propos des espèces endémiques régionales, Andohahela est l'unique AP à Madagascar abritant les espèces suivantes : *Paragehyra gabriellae*, *Mantella haraldmeieri*, *Calumma capuroni*, *Alluaudia ascendens*, *Hapalemur griseus meridionalis*.

Le haut fourré xérophile de la parcelle 2 qui présente une association d'*Alluaudia procera* et *alluaudia ascendens* est unique pour le Réseau. Cinq parmi les 11 espèces de Didiereaceae (haut fourré xérophile), famille endémique du Sud, sont présentes dans le parc : *Decarya madagascariensis*, *Alluaudia dumosa*, *Alluaudia humbertii*, *Alluaudia procera* et *Alluaudia ascendens*. Andohahela est la seule AP abritant cette dernière.

Selon les données disponibles, la forêt littorale de Petriky abrite 245 espèces de plante dont 21 espèces sont présumées endémiques (*Equipe de recherche de QMM, 2007*).

D'autres espèces floristiques importantes par leur distribution et leurs statuts de conservations sont cantonnées dans cette « forêt » entre autres, le baobab avec l'espèce *Adansonia za*, le palmier endémique et menacée : *Ravenea xerophila* (EN). Deux espèces d'Aloès endémiques citées dans la liste rouge de l'UICN y trouvent refuge : *Aloe suzannae* (CR) et *Aloe helenae* (CR)

2. Faune spécifique

Andohahela est la seule AP connue favorable à la conservation du lémurien diurne endémique de la région, l'*Eulemur fulvus collaris*. Des espèces menacées et en danger telles *Neodrepanis hypoxantha*, *Newtonia fanovanae*, *Uroplatus malahelo* et *Geochelone radiata*, sont aussi présentes dans le parc. Les espèces rares sont représentées par *Diospyros humberiana*, *Pachypodium lamerei*, *Pachypodium rosulatum* et *Rhipsalis baccifera*.

Quant à la forêt d'Ankodida, cette forêt est très riche en avifaune, herpétofaune et amphibiens héliophiles (*Mantidactylus sp nov*, *Brookesia nasus* et *Ithycyphus oursi*).

3. Pressions sur l'écosystème

Les forêts à l'instar du PNA sont sujettes à diverses pressions telles le défrichement, la coupe, le feu, la chasse, la divagation de bétail, l'occupation humaine, la collecte de produits secondaires et les plantes envahissantes. De 1993 à 2000, le taux de défrichement correspond à 11,57% dans la forêt

classée de Tsitongambarika (zone hors aires protégées). Il est de 0,35% pour le parc national d'Andohahela. Source : ONE – ANGAP, 2000

Sur une étude de 10 ans (1990 à 2000) effectuée à partir des traitements des données satellitaires, le taux de déforestation dans cette région est de 7,35%, ce qui correspond à une superficie de 19 356 ha. Source : Couverture forestière - Conservation International 2002

D'après les études faites dans le projet Système d'Information pour la Planification Régionale de l'Anosy et du Menabe (SIPRAM) entre 1993 et 1999, ce taux de déforestation est de 1,25% par an et correspond à une perte en forêts de 4 294 ha.

4. Milieu humain et biodiversité

En 2000, la population locale est estimée à 364 000 habitants dont 74 000 résidents en zone urbaine, Tolagnaro et Amboasary. Composée en grande partie d'agro-éleveurs, cette population croît plus vite que l'économie avec un taux de 2,9 % en moyenne chaque année.

a) Exploitation rationnelle de bois de construction et de bois d'œuvre

Plusieurs espèces issues des forêts humides et des forêts sèches sont exploitées comme bois de construction et bois d'œuvre. Outre les demandes locales, les villes de Taolagnaro et d'Amboasary sont les lieux d'écoulement des produits. Parmi les espèces exploitées, il y a :

Dalbergia sp, *Eliea articulata*, *Capurodendron sp*, *Leptolaena pauciflora*, *Evodia floribunda*, *Eugenia jambolana*, *Dombeya sp*, *Canarium sp*, *Ocotea sp* et diverses espèces de palmier dans les forêts humides : *Alluaudia procera*, *Cedrelopsis grevei*, *Dombeya sp*, *Diospyros sp* et *Terminalia sp* dans les forêts sèches. Les deux espèces, *Tetrapterocarpon geayi*, *Cordia varo*, sont utilisées pour la fabrication de charrette.

b) Collecte de plantes médicinales

Dans les zones sèches en particulier, plus de 90% des plantes entrent dans la pharmacopée locale. A Taolagnaro, l'exportation de la pervenche, le *Catharantus roseus* (Apocynaceae) constitue la principale activité de la société Pronatex. La collecte de cette plante fournit une source de revenu supplémentaire pour la population.

Annexe 2 : Indices de végétation les plus couramment utilisés (Girard M-C. et Girard C., 1999)

Dénomination	Formules	Caractéristiques	Auteurs
Rapport	$RVI = PIR/R$	Saturation aux forts indices, sensibilité à la contribution spectrale des sols et aux effets atmosphériques	(Knipling, 1970 ; Viollier <i>et al.</i> , 1985)
Indice de végétation normalisé	$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$	Sensibilité aux effets atmosphériques, gamme de variations angulaires de la visée, selon la position vis-à-vis du soleil « hot spot »	(Rouse <i>et al.</i> , 1974 ; Tucker, 1979)
Indice de végétation transformé		Essai d'élimination des valeurs négatives, stabilisation de la variance	(Deering <i>et al.</i> , 1975)
Indice de végétation perpendiculaire	$PVI = a1(PIR) - a2(R) + Cte$	Diminution de la contribution spectrale des sols	(Richardson and Wiegand 1977)
Chapeau à corne « tassell cap »	$TC = a1(V) + a2(R)^{\circ} + a3(PIR) + a4(PIR)$	Transformation orthogonale des 4 canaux pour réduire la sensibilité à la contribution spectrale des sols, sans pouvoir l'éliminer complètement.	(Kauth and Thomas, 1976)
Issu du précédent : Indice de verdure (Greeness)	$GR4 = -b1(V) - b2(R) + b3(PIR) + b4(PIR)$ pour canaux MSS		(Jackson, 1983)
Indice de végétation ajusté au sol (SAVI)	$SAVI = [(1+L)(pIR-R)] / (pIR+R+L)$ avec $L = 0,5$ pour diminuer l'effet du sol	De nombreux indices sont issus de celui-ci pour minimiser l'effet du sol (TSAVI, MSAVI...)	(Huete, 1988)
Indice de végétation normalisé corrigé des effets atmosphériques (ARVI : <i>Atmospherically Resistant Vegetation Index</i>)	B et R sont les réflectances dans le bleu et le rouge, fonction du type d'aérosols	Diminue l'effet des aérosols contenus dans l'atmosphère sur le NDVI mais sensible à la contribution spectrale des sols	(Kaufman and Tarne, 1992)

Annexe 3 : Données climatiques

1. Données climatiques sur 30 ans

Station : Fort Dauphin/Années 1961 – 1990

	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Pluie (mm)	157,5	157	178,7	175,8	142,8	125,6	148,9	103,2	74,5	99,4	151,5	164
Nb de j	13,8	15,1	16,4	15,6	12,9	13,4	13,6	11,2	9,7	11,6	13,9	15,3
Tmax (°C)	30,1	30	29,2	27,6	26	24,5	23,9	24,5	25,6	26,9	27,8	29
Tmin (°C)	23	23,1	22,3	20,7	18,3	16,4	16,2	16,6	17,4	19	20,4	21,9
Tmoy (°C)	26,6	26,6	25,8	24,2	22,2	20,4	20	20,5	21,5	22,9	24,1	25,5

Source : Service de la météorologie d’Ampandrianomby

Station : Behara/Années 1951 – 1980

	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Pluie (mm)	77,1	79,8	44,6	31,4	27,3	29,6	23,5	12,4	17,3	31,7	51	84,6
Nb de j	6,1	5,5	4,1	4,2	4,3	4,1	3,6	2,4	2,1	3,5	4,6	6,6
Tmax (°C)	34,7	34,8	33,2	31,9	29,4	27,2	26,9	28,6	30,6	32,7	33,3	34,3
Tmin (°C)	21,5	21,6	20,3	18,3	14,7	12,4	11,4	12,1	13,4	16,8	18,7	20,7
Tmoy (°C)	28,1	28,2	26,7	25,1	22	19,8	19,2	20,3	22	24	26	27,5

Source : Service de la météorologie d’Ampandrianomby

2. Données pluviométriques mensuelles annuelles

Station : Ambovombe

	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
1983	206	63	10,5	32	33,2	28	13	43	32	31,70	18	81,60	592
1984	47	1,5	145	108	11,5	29,60	23,50	25	9,5	53	70,1	46	569,7
1985	54,6	88,9	8,5	9,5	27,30	29,60	10	3	17,30	126,4	49,5	160	584,6

Source : Service de la météorologie d’Ampandrianomby

Station : Behara

	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
1991	0,0	21,8	2,9	14,1	70,1	5,9	16,5	0,0	4,6	2,0	28,2	9,3	175,3

Source : Service de la météorologie d'Ampandrianomby

Observateur SAP : Ambovombe

	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
2000	89,9	0	0	23,2	16,5	5,8	44,6	42,5	1,9	50,9	20,9	156,8	453
2001	61,3	4,7	29,2	94,1	7,5	34,4	10,4	13	8,6	39,5	17,5	49,1	369,3
2002	29,7	139,9	11	0	66,6	49,1	39,7	18,5	5,8	0	50,5	14	424,8
2003	30,2	20,2	47,8	23,2	15,6	18,7	41,3	5,5	20	38,8	49,5	0	310,8
2004	41,2	138,1	117	25,6	13,6	49,9	40,1	0	17,9	66,3	9,3	35,8	554,8
2005	373,3	31,7	184,4	72,7	9,6	10,6	28	0	0	0,4	15,7	18,5	744,9
2006	28,9	27,9	91,2	16,6	28,6	9,5	0	0	19,3	0	4,1	14,5	240,6
2009	29,5	18	109,3	50,8	27,30	26,5	9,8	35,7	6	17,6	14,7	131,6	476,8
2010	34,4	6,2	40,3	27,9	25,1	44,3	51	7,6	7,5	33,8	2,5	120,1	400,7

Sources : Bulletins SAP depuis 1997 à 2010

Station : Fort-Dauphin

	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
1982	173	219,7	363,2	263,1	182,5	89,3	600,2	51,8	106,6	46,8	151,2	59	2306,4
1984	248,2	404,2	140,2	100,3	136,4	99,6	45,9	90,3	167,2	39,2	113,3	44,1	1628,9
1986	96,2	146,2	93	268,3	81	80,7	60,7	76,9	16,6	85,9	183,1	219,8	1408,4
1988	158,7	86,5	45,3	149,6	93,7	181,2	48,1	142,4	24,9	70,6	289,9	241,8	1532,7
1990	276,2	153,7	190,7	218,2	64,4	29,9	30,3	149,1	35	55,6	62,3	105	1370,4
1991	106,5	16	65,4	201,7	306,5	182,5	66,6	49,5	19,9	50,1	12,8	79,7	1157,2
1992	372,3	105,7	72,5	13,9	115,9	29,5	32,1	183,5	16,9	130,9	212,7	65,4	1351,3
2001	84,7	71,7	91	147,8	133,8	90,9	106,7	113,3	27,4	44,7	54,2	392,4	1358,6
2002	230,9	10,3	152,8	206,4	194,9	34,5	73,6	99,1	40,2	35,7	262,8	378	1719,2
2003	84,5	134,6	200,8	161,4	225,3	155,5	101,5	137,0	56,6	48,1	34,7	109,4	1449,4
2004	97,1	305,9	492,1	85,1	103,8	156,4	158,0	26,7	44,9	90,5	73,4	106,0	1739,9
2005	511	146	747,1	377,7	26,8	63,1	95,2	10,3	10,9	28,5	75,9	232,6	2325,1
2006	52,4	73,5	82,6	213,7	85	33,3	18,3	103,1	101,9	24,3	74,2	70,8	933,1
2007	190,1	382,7	94,9	181,5	119,5	83,7	52,8	46,7	24,5	48,9	48,1	47	1320,4
2008	97,4	391,4	83,1	31,8	102,1	68,6	179	10,6	38,3	70	64,5		1136,8
2009	132	42	262,3	142,9	160,5	35,8	79,3	139	134,5	154,9	89,7	124,2	1497,1
2010	95,6	50,2	490,4	67,7	93,3	92,1	92,9	129,5	29,7	92,9	7	248,8	1490,1

Source : Service de la météorologie d'Ampandrianomby

Pluviométrie annuelle (mm)

Année	Ouest	Stations	Est	Stations
1980	507	Behara	1678,9	Fort-Dauphin
1982			2306,4	
1983	592	Amboasary Atsimo		
1984	569,7		1628,9	
1985	584,6			
1986			1408,4	
1987				
1988			1532,7	
1989				
1990			1370,4	
1991	175,3	Behara	1157,2	
1992			1351,3	ASECNA de Fort-Dauphin
1993			1155,9	
1994			2187,6	
1995			1287,2	
1996			1290,4	
1997	450	Observateur SAP : Behara	1168,1	
1998	771,7		2065,9	
1999	521,4		1699,9	
2000	453	Observateur SAP : Ambovombe	1405,2	
2001	369,3		1358,6	Fort-Dauphin
2002	424,8		1719,2	
2003	310,8		1449,4	
2004	554,8		1739,9	
2005	744,9		2327,1	
2006	240,6		933,1	
2007			1320,4	
2008			1136,8	
2009	476,8		1497,1	
2010	400,7		1490,1	

Source : Service de la météorologie d'Ampanandrianomby, Bulletins SAP et ASECNA Ivato

Annexe 4 : Résultats du test de Kolmogorov de la différenciation des classes

1. En saison humide

Groupe 1 = Forêt de transition ; Groupe 2 = Forêt sèche

Max Nég	Max Pos		Moyenne	Moyenne	Ec-Type	Ec-Type	N actifs	N actifs
Différ.	Différ.	niveau p	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 1	Groupe 2
-0,00023148	0,49857691	p < .001	0,5187680	0,38446957	0,0645984	0,20745964	4216	4307

Groupe 1 = Forêt sèche ; Groupe 2 = Forêt humide

Max Nég	Max Pos		Moyenne	Moyenne	Ec-Type	Ec-Type	N actifs	N actifs
Différ.	Différ.	niveau p	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 1	Groupe 2
-0,80972224	0,00023148	p < .001	0,4110504	0,60513389	0,0593346	0,0634728	4307	4179

Groupe 1 = Forêt de transition ; Groupe 2 = Forêt humide

Max Nég	Max Pos		Moyenne	Moyenne	Ec-Type	Ec-Type	N actifs	N actifs
Différ.	Différ.	niveau p	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 1	Groupe 2
-0,48925924	0,00995311	p < .001	0,51875025	0,60513389	0,08121445	0,0634728	4216	4179

2. En saison sèche

Groupe 1 = Forêt de transition ; Groupe 2 = Forêt sèche

Max Nég	Max Pos		Moyenne	Moyenne	Ec-Type	Ec-Type	N actifs	N actifs
Différ.	Différ.	niveau p	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 1	Groupe 2
-0,04075071	0,29340413	p < .001	0,3478469	0,2516557	0,1382579	0,0722625	4295	4269

Groupe 1 = Forêt de transition ; Groupe 2 = Forêt humide

Max Nég	Max Pos		Moyenne	Moyenne	Ec-Type	Ec-Type	N actifs	N actifs
Différ.	Différ.	niveau p	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 1	Groupe 2
-0,53328735	0,02082068	p < .001	0,378469	0,5021898	0,1382579	0,1641001	4295	4298

Groupe 1 = Forêt sèche ; Groupe 2 = Forêt humide

Max Nég	Max Pos		Moyenne	Moyenne	Ec-Type	Ec-Type	N actifs	N actifs
Différ.	Différ.	niveau p	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 1	Groupe 2
-0,74722224	0,05532407	p < .001	0,2516557	0,5021898	0,0722625	0,1641001	4269	4298

Annexe 5 : Descriptions des logiciels de télédétection et SIG

Les logiciels suivants ont été utilisés tout au long de ce travail :

- ENVI 4.4 (*Environmental for Visualizing Image*) pour la télédétection. Ce logiciel a été développé par ITTVIS (*ITT Visual Information Solutions*). Les outils utilisés à partir de ce logiciel ont été des outils de classification, d'amélioration et de manipulation des images mais également des outils pour l'exploitation des informations spectrales (Transformation d'images lors de la création des fichiers NDVI), des outils de géoréférencement, des outils de manipulation des fichiers vecteurs (surtout pour les ROI *Region Of Interests*).
- ArcGIS-ArcINFO 9.3 ESRI pour le SIG. Ce logiciel a été développé par ESRI (*Environmental System Research Institute*). C'est une version récente de l'ArcView. Trois applications sont disponibles sous ce logiciel : ArcCatalog, ArcToolbox et ArcMap. ArcCatalog a permis de créer des fichiers *shape* de type polygone ou point. ArcToolbox renferme toute les outils de SIG utilisables pour le traitement des cartes ou *geoprocessing*. Enfin, ArcMap est une application de gestion, de manipulation, d'analyses des différentes couches d'informations sur la base de données. ArcMap a permis également d'éditer les cartes effectuées.

De temps en temps, ces deux logiciels ont été utilisés alternativement. Par exemple, la classification des images a été effectuée sous ENVI, puis les fichiers obtenus après cette classification sont traités sous ArcGIS pour la création de fichiers vecteurs (ROI par exemple). Ou encore, lors de la correction géométrique, les données issues de la carte topographique ont été extraites sous ArcGIS puis exportés sous ENVI.