



Vulnérabilité des paysages forestiers en relation avec les activités humaines et la variabilité climatique en Tanzanie : analyse prospective des dynamiques de l'occupation du sol des réserves forestières de Pugu et de Kazimzumbwi

Guy Boussougou Boussougou

► To cite this version:

Guy Boussougou Boussougou. Vulnérabilité des paysages forestiers en relation avec les activités humaines et la variabilité climatique en Tanzanie : analyse prospective des dynamiques de l'occupation du sol des réserves forestières de Pugu et de Kazimzumbwi. Géographie. Université de la Réunion, 2017. Français. NNT : 2017LARE0035 . tel-01913084

HAL Id: tel-01913084

<https://theses.hal.science/tel-01913084>

Submitted on 6 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de La Réunion

Faculté de Lettre

Ecole Doctorale Lettres et Sciences Humaines / Droit-Economie-Gestion-Sciences Politiques

UMR 228 ESPACE-DEV (UAG, UM2, UR)

Thèse de Géographie

Présentée par : Guy Fidèle BOUSSOUGOU BOUSSOUGOU

**Vulnérabilité des paysages forestiers en relation avec les
activités humaines et la variabilité climatique en Tanzanie :
Analyse prospective des dynamiques de l'occupation du sol des
réserves forestières de Pugu et de Kazimzumbwi**

Date : 14 novembre 2017

Directeur : Yao Télesphore BROU

Composition du Jury

Sylvain BIGOT	Professeur à l'Université de Grenoble Alpes	Rapporteur
Yamna DJELLOULI	Professeur à l'Université du Maine	Rapporteur
Bénédicte THIBAUD	Professeur à l'Université de Bordeaux Montaigne	Examinatrice
Béatrice MOREL	Maître de Conférences à l'Université de La Réunion	Examinatrice
Hassan BENCHERIF	Professeur à l'Université de La Réunion	Examineur
Yao Télesphore BROU	Professeur à l'Université de La Réunion	Directeur de thèse
Patrick VALIMBA	Senior lecturer à l'Université de Dar Es Salaam	Co-directeur de thèse

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier grandement mon directeur de thèse, Monsieur Yao Télésphore BROU, Professeur des Universités à l'Université de La Réunion, sans qui cette thèse n'aurait jamais vu le jour, ni être soutenue aujourd'hui. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse. Je voudrais également remercier Dr. Patrick VALIMBA, Senior lecturer à l'Université de Dar Es Salaam, mon co-directeur de thèse pour son accueil chaleureux en Tanzanie lors de missions de terrain.

Monsieur Sylvain Bigot, Professeur à l'Université de Grenoble Alpes et Madame Yamna DJELLOULI, Professeur à l'Université du Maine m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs de ma thèse, ils ont pris le temps de lire et de corriger mon travail. Pour tout cela je les remercie. J'exprime tous mes remerciements à l'ensemble des membres de mon jury : Mesdames Bénédicte THIBAUD, Professeur à l'Université de Bordeaux Montaigne, Béatrice MOREL, Maître de conférence à l'Université de La Réunion et Monsieur Hassan BENCHERIF, Professeur à l'Université de La Réunion.

Je tiens également à remercier Frédérique SEYLER, directrice de l'UMR ESPACE-DEV de m'avoir accepté au sein de l'Unité, dans la composante AIMS (Approche Intégrée des Milieux et Société). Dans le même optique, je remercie Madame Gwenaëlle PENNOBER, la directrice adjointe de l'UMR à La Réunion pour son soutien.

Cette thèse a bénéficié du soutien financier de : l'Agence Nationale des Bourses du Gabon (ANBG), qui a financé mes études depuis mon arrivée en France en 2012 ; de l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) via le Collège Doctoral RAMI « observations environnementales et Risques naturels en Milieu Insulaire », qui m'a apporté l'aide financière nécessaire pour réaliser toutes mes missions de terrain en Tanzanie et aux Comores; de l'Ecole Doctorale de l'Université de la Réunion pour sa contribution à mes déplacements aux colloques internationaux. Pour tout cela, je les remercie.

Je ne saurais oublier toute l'équipe de SEAS-OI : Vincent HERBRETEAU, pour l'aide apportée notamment en statistique (logiciel R), Pierre TESSIER Directeur de la station SEAS-OI, Christophe REVILLION, Erwann LAGABRIELLE, Stéphane GUYARD, Didier BOUCHE, Pascal MOUQUET, Aurelie SAND, Stéphanie GOUTORBE, Artadji ATTOUMANE et Annabel CELESTE pour leur soutien et leur bonne humeur.

Je remercie également les personnes qui m'ont aidé dans la relecture de cette thèse : Philippe ROUET, Mathilde ANDRE et Diane OBONO. Une dédicace à tous les doctorants de l'UMR ESPACE DEV de La Réunion et aux doctorants du programme RAMI de l'Océan Indien. A toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet, je leur dis un grand merci.

Enfin, je remercie toute ma famille, et tous ceux que je ne nomme pas ici, mais qui se reconnaîtront. Mention spéciale à ma mère SAMOUANA Jeannine sans qui je ne serais pas là aujourd'hui et qui a toujours eu confiance en son fils.

Sommaire

REMERCIEMENTS.....	2
SOMMAIRE	3
LISTE DES ACRONYMES	5
RESUME.....	6
ABSTRACT	8
INTRODUCTION.....	10
1.1 - Contexte, problématiques et objectifs	11
1.2 - Contexte environnemental en Tanzanie	18
1.3 - Contexte environnemental des réserves forestières au sud-est de Tanzanie : les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi	24
CHAPITRE 1 - DONNEES ET METHODES ADOPTEES DANS L'ETUDE	33
1.1 - Les données satellites disponibles.....	34
1.2 - Autres données	40
1.3 - Méthodologie générale de l'étude.....	43
CHAPITRE 2 - ETUDE DES RELATIONS PLUIE ET COUVERT VEGETAL DE 2001 A 2013 A L'ECHELLE DES GRANDES ZONES BIOCLIMATIQUES DE LA TANZANIE A PARTIR DES IMAGES BASSE RESOLUTION SPATIALE NDVI- MODIS ET TRMM	60
Introduction.....	61
2.1 - Analyse spatio-temporelle des précipitations à l'échelle de la Tanzanie à partir des images basse résolution spatiale NDVI MODIS et TRMM sur la période 2001-2013	62
2.2 - Variabilité de l'activité végétale en Tanzanie.....	75
2.3 - Relation pluie-NDVI.....	87
2.4 - Conclusion du chapitre 2.....	93
CHAPITRE 3 - MODIFICATION DE LA COUVERTURE VEGETALE EN RELATION AVEC LES ACTIVITES HUMAINES A L'ECHELLE LOCALE :	

RESERVES FORESTIERES DE PUGU ET KAZIMZUMBWI	94
Introduction	95
3.1 - Données et méthodes d'analyse des modifications dans la couverture forestières des réserves de Pugu et Kazimzumbwi.....	96
3.2 - Résultat du traitement des images SPOT 6 et LANDSAT	109
3.3 - Localisation spatiale des zones à pressions anthropiques à la périphérie des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi par une analyse multicritères.....	122
3.4 - Conclusion du chapitre 3.....	135
 CHAPITRE 4 - MODELISATION PROSPECTIVE DE L'OCCUPATION DU SOL A L'ECHEANCE 2050.....	 136
Introduction	137
4.1 - Land Change Modeler (LCM).....	138
4.2 - Résultat de la modélisation prospective	145
4.3 - Conclusion du chapitre 4.....	157
 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	 158
 BIBLIOGRAPHIE	 162
 LISTE DES PHOTOGRAPHIES	 179
 LISTE DES FIGURES.....	 180
 LISTE DES EQUATIONS.....	 183
 LISTE DES TABLEAUX	 184
 ANNEXES.....	 186
 TABLE DES MATIERES.....	 208

Liste des acronymes

ACP: Analyse en Composante Principale

AGEOS : Agence Gabonaise d'Etudes et d'Observations Spatiales

AMC: Analyse Multicritère

CCIAM: Climate Change Impacts, Adaptation and Mitigation

CNES : Centre National d'Etudes Spatiales

ESA: Agence Spatiale Européen

FAO : Organisation des Nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

GPM: Global Precipitation Measurement

GPS: Global Positioning System

HDF: Hierarchical Data Format

HRS: Haute Résolution Spatiale

LCM: Land Change Modeler

LP DAAC: Land Processes Distributed Active Archive Center

MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NDVI : Indice de Végétation par Différence Normalisée

NOAA-AVHRR: National Oceanic and Atmospheric Administration-Advanced Very High Resolution Radiometer

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

SIG: Système d'Information Géographique

SPOT : Satellite Pour l'Observation de la Terre

THRS: Très Haute Résolution Spatiale

TRMM: Tropical Rainfall Monitoring Mission

USGS: United States Geological Survey

ZCIT : Zone de Convergence Intertropicale

Résumé

L'objectif de ce travail est de montrer la vulnérabilité des paysages forestiers en relation avec la variabilité climatique à l'échelle de la Tanzanie d'une part et d'analyser les dynamiques forestières, afin de réaliser une étude prospective des dynamiques de l'occupation des sols dans les réserves forestières de Pugu et de Kazimzumbwi d'autre part.

L'analyse des données TRMM sur la période 2001-2013 a permis de mettre en évidence une variabilité saisonnière et interannuelle des précipitations à l'échelle du pays. Les cartes de précipitations interannuelles ont permis de distinguer les années à faible pluviométrie (2003, 2005, 2012), les années à forte pluviométrie (2002, 2004, 2006, 2011) et les années à pluviométrie intermédiaire (2001, 2007, 2008, 2009, 2013). Cette analyse a également permis de mettre en évidence 11 types de régimes pluviométriques marqués par des modes de variabilité saisonnière différents à l'échelle de la Tanzanie. Des oppositions existent entre les régimes pluviométriques de la région centrale savannicole marquées par des hauteurs annuelles faibles, un nombre de mois secs important (7 mois) et plus affectée par la variabilité interannuelle des précipitations d'une part et d'autre part les régions forestières du nord, sud et l'est plus humides et présentant des faibles déficits des hauteurs pluviométriques interannuelles.

La sensibilité de la phénologie végétale à la variabilité pluviométrique a été analysée par l'étude des relations spatio-temporelles entre l'indice de végétation normalisé NDVI-MODIS et la pluviométrie (pluie TRMM). Les cartes de corrélations pluie/NDVI mettent en évidence une opposition entre les régions sèches du centre marquée par des paysages de savane fortement vulnérables à la variabilité pluviométrique et les régions du sud de forêts humides de montagnes et des régions côtières de forêts de mangroves réagissant peu à cette variabilité pluviométrique. Dans les régions de savanes du centre l'intensité de la dépendance pluie/NDVI est mesurée par un coefficient de corrélation de 0.70.

Un suivi de l'analyse des pressions humaines sur les réserves forestières a été réalisé à partir de l'exemple des forêts de Pugu et de Kazimzumbwi sur la période 1995-2015 à partir de l'imagerie SPOT 6 (haute résolution) et LANDSAT. Les classifications de l'occupation du sol ont été réalisées à partir de la méthode orientée objet. Le bilan forestier montre que, des deux réserves forestières, seule la réserve de Pugu conserve encore près de la moitié de sa surface en forêt en 2015 (55% dont 32 % de forêt dense). A l'inverse la réserve de Kazimzumbwi ne contient que 5 % de forêt dense de sa superficie. Sur l'ensemble de la période étudiée (1995-2014), la sous-période 2009-2014 a été la plus critique en terme de perte de forêt. En effet, en l'espace de 5 ans les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi ont presque perdu le double de leur superficie.

Partant du constat d'une vulnérabilité accrue des pressions humaines dans les réserves forestières de Pugu et de Kazimzumbwi et dans leur périphérie, une analyse multicritère a permis d'identifier les zones de fortes et faibles pressions humaines. Les zones les plus vulnérables restent celles situées à proximité des axes de communication et des villes. Ainsi,

les réserves forestières sont plus vulnérables dans leurs parties est, proches des routes principales et des grands centres urbains comme Pugu et Kisarawé.

L'utilisation d'un modèle pour une modélisation prospective en 2050 a nécessité l'intégration des variables explicatives des changements observés et des cartes d'occupation du sol de 1995 et 2014. Le modèle est validé à partir d'une carte prédite et d'une carte réelle. Le résultat montre une simulation exacte à 72 %. Partant sur cette hypothèse d'une intensification des pressions humaines anthropiques sur les deux réserves forestières au cours du temps, nous avons prédit la carte d'occupation du sol de 2050 sous l'effet des variables explicatives. Cette modélisation prospective prévoit donc à l'horizon 2050 une expansion et densification des surfaces artificialisées notamment à la périphérie nord-est de la réserve de Pugu et au sud dans la réserve de Kazimzumbwi. Cette croissance des surfaces artificialisées entraînera un recul important des surfaces forestières existantes à l'intérieur des réserves.

Mots-clés : vulnérabilité de la végétation, variabilité climatique, pressions anthropiques, modélisation prospective, télédétection spatiale, Tanzanie, réserves forestières, Pugu, Kazimzumbwi, précipitation, NDVI.

Abstract

The objective of this work is to show the vulnerability of forest landscapes in relation to climate variability in the case of Tanzania on the one hand and to analyze forest dynamics, in order to carry out a prospective study of the dynamics of the land use in the Pugu and Kazimzumbwi Forest Reserves on the other.

The analysis of the TRMM data over the period 2001-2013 has revealed seasonal and interannual variability of precipitation across the country. The inter-annual rainfall maps distinguish years with low rainfall (2003, 2005, and 2012), years with high rainfall (2002, 2004, 2006, and 2011) and years with intermediate rainfall (2001, 2007, 2008, 2009, and 2013). This analysis also revealed 11 types of rainfall patterns marked by different patterns of seasonal variability across Tanzania. Oppositions exist between the rainfall patterns of the central savannah region marked by low annual heights, a number of dry months significant (7 months) and more affected by the interannual variability of rainfall on the one hand and the forest regions on the other hand northern, southern and eastern parts are wetter and have low inter-annual rainfall heights.

The sensitivity of plant phenology to rainfall variability was analyzed by studying the spatio-temporal relationships between NDVI-MODIS standardized vegetation index and rainfall (TRMM rainfall). The rain / NDVI correlation maps show a contrast between the dry regions of the center marked by savannah landscapes highly vulnerable to rainfall variability and the southern regions of moist mountain forests and coastal areas of mangrove forests with low response rates this rainfall variability. In the central savannah regions the intensity of the rain / NDVI dependence is measured by a correlation coefficient of 0.70.

A follow-up of the analysis of the human pressures on the forest reserves was carried out starting from the example of the forests of Pugu and Kazimzumbwi over the period 1995-2015 starting from the SPOT 6 (high resolution) and LANDSAT imagery. The classifications of land use were made from the object-oriented method. The forestry balance sheet shows that, of the two forest reserves, only the Pugu reserve still conserves nearly half of its forest area in 2015 (55% of which 32% is dense forest). Conversely, the Kazimzumbwi reserve contains only 5% dense forest of its area. Over the entire period studied (1995-2014), the 2009-2014 sub-period was the most critical in terms of forest loss. In fact, in the space of 5 years the forest reserves of Pugu and Kazimzumbwi have almost lost twice their area.

Starting from the observation of an increased vulnerability of human pressures in the forest reserves of Pugu and Kazimzumbwi and in their periphery, a multicriteria analysis made it possible to identify areas of strong and weak human pressure. The most vulnerable areas are those located near roads and cities. Thus, forest reserves are more vulnerable in their eastern parts, close to major roads and large urban centers such as Pugu and Kisarawé.

The use of a model for a prospective modeling in 2050 required the integration of the explanatory variables of the observed changes and the land use maps of 1995 and 2014. The model is validated from a predicted map and from a real map of 2016. The result shows an exact simulation at 72%. Based on this hypothesis of an intensification of anthropogenic

human pressures on the two forest reserves over time, we predicted the land cover map of 2050 under the effect of the explanatory variables. This prospective modeling therefore anticipates an expansion and densification of artificialized areas by 2050, particularly in the north-eastern periphery of the Pugu reserve forest and in the south in the Kazimzumbwi reserve forest. This growth in artificial surfaces will lead to a significant decline in existing forest areas inside the reserves.

Keywords: vegetation vulnerability, climate variability, anthropogenic pressures, prospective modeling, remote sensing, Tanzania, forest reserves, Pugu, Kazimzumbwi, rainfall, NDVI.

Introduction

1.1 - Contexte, problématiques et objectifs

Située en bordure de l'Océan Indien, la Tanzanie est un vaste territoire aux paysages très variés. En effet, sa topographie a favorisé la naissance des grands et profonds lacs d'eau douce et de sel, au point le plus élevé de l'Afrique : le Mont Kilimandjaro (5 895 m). Les nombreux parcs nationaux riches en faune et flore en font un des vingt-cinq hotspots mondiaux de la biodiversité.

A des fins de gestion et de planification, le gouvernement Tanzanien a regroupé la multitude des paysages observés en trois catégories : les « forêts classées » avec près de 14,3 millions d'hectares ; les « réserves forestières » avec 2,5 millions d'hectares et enfin les « parcs à gibiers » avec 2 millions d'hectares (URT, 2010 ; Akida et Blombey, 2006). En 2010, la superficie de forêt et terres boisées était estimée à 334 000 km² (FBD, 2010) ; ce qui représentait 39,9% de la superficie totale du pays qui est estimée à 95400 km² (FAO, 2009).

Depuis plusieurs années, on observe une diminution de l'étendue des surfaces forestières due à de nombreux facteurs pouvant être d'origine naturelle ou anthropique. En effet, entre 1961 et 1998, près de 10 millions d'hectares de forêt ont disparu, soit une perte annuelle de 0,73 % (Msuya et *al.*, 2011). Ce taux de déforestation s'est accru entre 1990 et 2010. Au cours de cette décennie, le pays a perdu en moyenne 403350 ha de forêt, soit une perte de 0,97% par an. Cela représente une perte totale de 19,4% soit environ 8067000 ha de forêt en 20 ans. Or il est à noter que le secteur forestier a un rôle important dans l'économie Tanzanienne, car près de 90 % des besoins énergétiques sont fournis par le bois de chauffe (Banque mondiale, 2009; URT, 2015b). Le charbon de bois, moins cher est la principale source d'énergie en zone urbaine. De plus, entre 2001 et 2007, la proportion des ménages de Dar Es Salaam (ancienne capitale du pays) utilisant le charbon de bois est passé de 47% à 71 %. La ville de Dar Es Salaam consomme près de la moitié de la production du charbon de bois, soit environ 500000 tonnes. La consommation du charbon de bois a donc augmenté de manière relative et absolue ces dernières années pour trois raisons : la croissance rapide de la population, l'urbanisation continue et l'augmentation relative du prix des ressources alternatives d'énergie fossile (Chamshama, 2011).

La dégradation de la couverture forestière est donc en lien avec la dynamique de la population. Selon le recensement de 2002, la population Tanzanienne a augmenté très rapidement entre 1986 et 2002, passant de 34 millions en 1986 à 40 millions en 2002 (URT, 2002). Le taux de croissance démographique était de 2,6 % en 2002 ; en 2008, il est passé à 2,9 %, entraînant ainsi un accroissement important de la population (Lusekelo, 2008). En 2012, cette population est estimée à 44,9 millions d'habitants dont plus de 43,6 millions de personnes vivent sur le continent, tandis que 1,3 million résident sur l'île de Zanzibar. Les estimations suggèrent que la population rurale restera élevée jusqu'en 2040 et que la population urbaine dépassera néanmoins la population rurale en 2050 (Figure 1).

Cette situation entraîne dans les milieux ruraux une pression de plus en plus importante sur

les terres forestières. Le taux d'urbanisation élevé (32 %) (URT, 2012) représente également un facteur additionnel de dégradation des forêts à cause du grignotage sur les espaces forestiers et d'une demande importante des produits issus des forêts (charbon de bois, bois de chauffe, bois d'œuvre...). Ainsi, la population urbaine de Tanzanie est passée de 1 à 12 millions au cours des 50 dernières années (FAO, 2016). Cette tendance de croissance devrait se poursuivre, avec une augmentation concomitante de la proportion de la population utilisant le charbon de bois (Sander et *al.*, 2013).

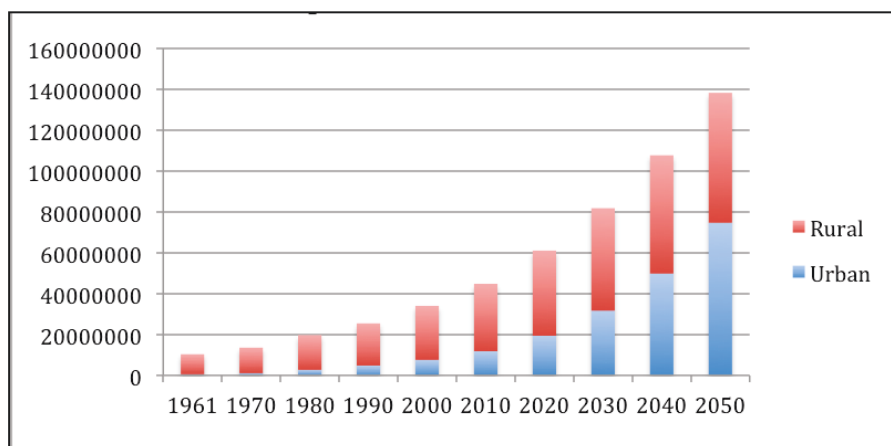


Figure 1: Evolution de la population Tanzanienne depuis 1961 et projections jusqu'en 2050
(source : FAOSTAT, 2013)

En plus des dégradations dues aux activités humaines, les variations climatiques affectent également les végétaux, notamment dans le changement des quantités de biomasse, de la phénologie végétale ou de la distribution géographique de certains groupes végétaux (Do, 2014). Les modifications climatiques se manifestent notamment par une hausse des températures et une modification du régime de précipitations. Les scénarii développés à partir des Modèles de Circulation Générale (MCG) indiquent qu'il y aura une augmentation de la pluviométrie dans la partie nord de Tanzanie (zone de pluviométrie bimodale) variant de 5 à 45%, alors que les régions Sud, Sud-ouest, Ouest, Centre et Est du pays connaîtront des baisses de pluviométrie allant de 5 à 15% (Munishi et *al.*, 2008). Ces auteurs observent également une augmentation des températures maximales et minimales dans presque toutes les stations sauf dans le centre de la Tanzanie.

A l'instar des autres territoires de l'Afrique de l'Est, la Tanzanie connaît une augmentation de la température annuelle de 1 ° C depuis les années 1960 (Urquhart et Lotz-Sisitka, 2014). En effet, à l'échelle de la région est Africaine les anomalies de températures entre 1950 et 2013 ont évolué vers une tendance positive (Figure 2). La Figure 2, permet d'observer que, jusqu'à la fin des années 90, il y a une alternance relativement régulière de périodes aux anomalies positives et négatives. Au-delà de l'année 1990, les anomalies de températures deviennent positives. Le réchauffement de température amorcé depuis les années 60 devient ainsi plus effectif au début des années 90 avec une tendance à l'augmentation des anomalies thermiques.

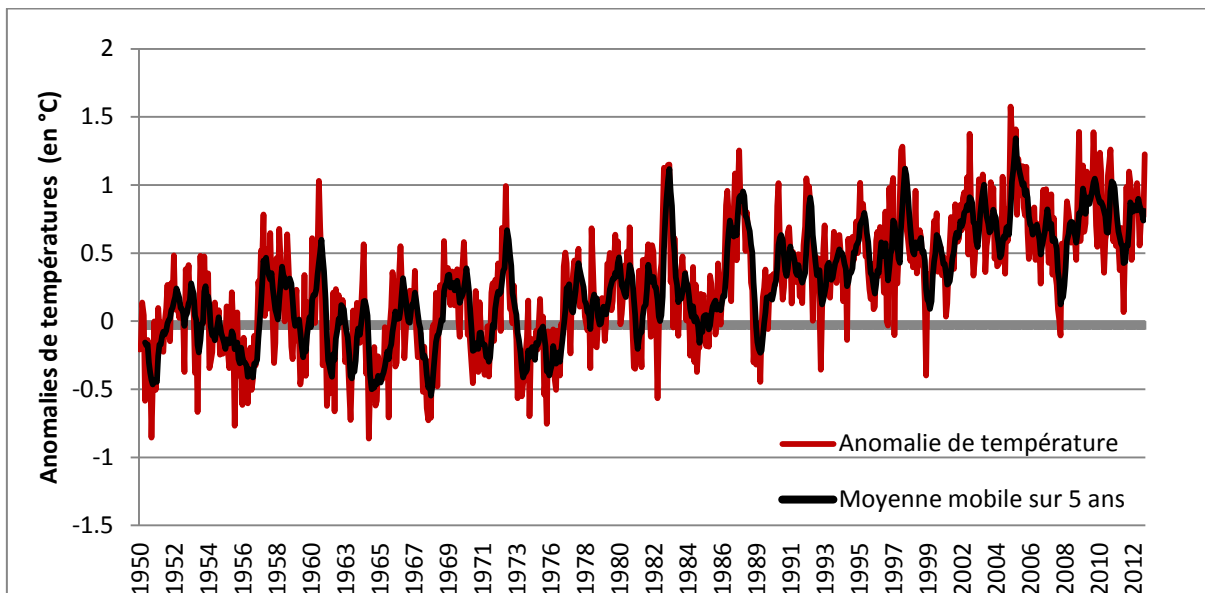


Figure 2: Anomalies des températures mensuelles moyennes à l'échelle de l'Afrique de l'est sur la période 1950 à 2013 calculée à partir des données mises par Berkeley Earth (<http://berkeleyearth.lbl.gov/regions/Tanzania>)

La Tanzanie suit cette tendance régionale observée entre 1950 et 2013 (Figure 3). Entre 1950 et la fin des années 80, les anomalies de température oscillent entre -1 et +1.5 °C ; entre le début des années 90 et la fin des années 2012, les anomalies de température oscillent moins entre le négatif et positif et ont tendance à être positives. A partir de la fin des années 80 (1990), les anomalies deviennent à des rares exceptions négatives. Le réchauffement amorcé dans les années 1960 devient ainsi effectif.

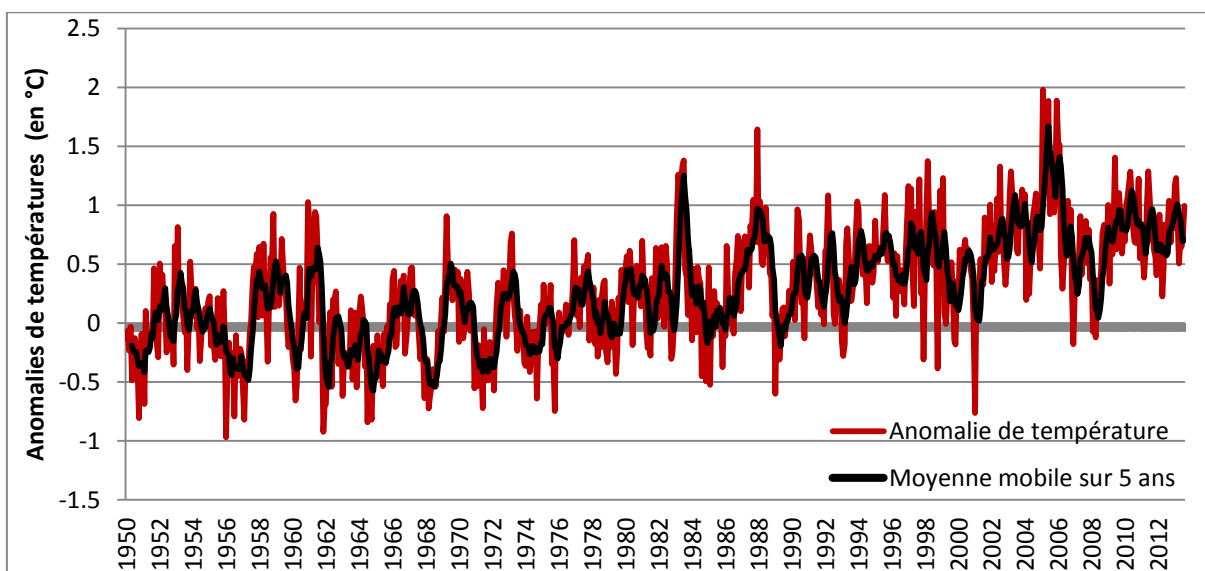


Figure 3: Anomalies des températures mensuelles moyennes à l'échelle de la Tanzanie sur la période 1950 à 2013 calculée à partir des données mises par Berkeley Earth (<http://berkeleyearth.lbl.gov/regions/Tanzania>)

L'ensemble de ces évolutions de température en Tanzanie aboutit à une hausse de plus de 1,9°C entre 1960 et 1990. C'est une hausse plus importante que celle observée à l'échelle de

l'Afrique de l'est, mais plus faible par rapport aux observations moyennes réalisées à l'échelle de l'ensemble de l'Afrique (Tableau 1). Toutefois, l'augmentation des températures en Tanzanie a eu pour conséquence la survenue des épisodes d'importantes sécheresses qui ont entraîné une baisse de la production agricole. Cela a par exemple engendré des graves pénuries alimentaires entre 2002 et 2003 (Bakari, 2015).

Tableau 1: Comparaison entre les évolutions thermiques (en °C par siècle) observées en Tanzanie (échelle nationale) et celles observées à des échelles géographiques régionale et continentale de 1910 à 2000 (les évolutions en Tanzanie sont calculées à partir de 19 stations nationales fournis par le *Berkeley Earth*)

Zone géographique	1910	1960	1990	2000
Tanzanie	0.97 ± 0.13	1.98 ± 0.27	1.98 ± 0.77	1.98 ± 0.77
Afrique de l'Est	0.97 ± 0.15	1.93 ± 0.20	1.83 ± 0.65	1.83 ± 0.65
Afrique	0.92 ± 0.12	1.99 ± 0.21	2.49 ± 0.45	2.49 ± 0.45

De même, il a été observé dans le pays, une augmentation relativement faible des journées chaudes et une augmentation très forte de la fréquence des nuits chaudes depuis les années 1960 (McSweeney, 2012). En outre le régime de précipitations révèle également des tendances à la baisse statistiquement significatives, ainsi que l'augmentation de la variabilité interannuelle des précipitations (McSweeney, 2010). Ce qui a pour conséquence, une augmentation de la fréquence et la gravité des inondations, des sécheresses et des tempêtes tropicales (Urquhart et Lotz-Sisitka, 2014).

Selon le rapport du GIEC (2007), l'Afrique est un continent identifié comme très vulnérable aux variations naturelles et particulièrement au changement climatique en cours (Figure 4). En conséquence, tous les types d'écosystèmes terrestres en Afrique, y compris les déserts, les prairies et les zones arborées (arbustives, savanicoles et forestières) sont en cours de changement. Ils sont en effet, influencés dans leur distribution, leur évolution ou leur dynamique. On observe alors, un ensemble complexe de changements dans la répartition spatiale des formations végétales naturelles restantes (Bégué et *al.*, 2011), avec une forte augmentation des terres cultivées et des surfaces d'érosion liées à la végétation clairsemée (Ruelland et *al.*, 2011). En Afrique de l'est les impacts de la variabilité et du changement climatique sont entre autres la diminution de la productivité agricole, la détérioration de la qualité et de la quantité de l'eau et la perte de la biodiversité. De plus, ces impacts sont susceptibles de se renforcer dans la mesure où les scénarios climatiques régionaux indiquent une augmentation des précipitations en Afrique de l'est, surtout vers la fin de l'été (Hewitson, 2006).

Des mesures prises dans certains pays d'Afrique de l'est comme le Kenya et la Tanzanie (Ericksen, 2001) montrent à quel point le changement climatique et la désertification sont liés. Ces mesures portent notamment sur l'augmentation de la résistance de l'agriculture à la variabilité climatique et à la sécheresse, sur la promotion des moyens de vie alternatifs et sur la gestion des ressources locales. Au Kenya, l'accent a été mis sur l'agriculture et la sécurité

alimentaire tandis qu'en Tanzanie, la priorité est à l'utilisation des espèces végétales (Dorsouma et *al*, 2008).

Dans les pays tropicaux, le climat contrôle la distribution spatiale des principaux types de végétation. Le lien entre végétation et précipitations reste bien documenté aux échelles régionales. Mais, aux échelles nationales et locales les études sont peu nombreuses, ce qui pose le problème de l'accès aux données pour la modélisation climat/végétation aux échelles nationales. Les techniques de télédétection permettent désormais de suivre l'évolution de la végétation sur de petites à grandes surfaces et ce plusieurs fois durant les saisons (Baret et *al*., 1991). En effet, grâce aux satellites de plus en plus performants, il est maintenant possible d'extraire et de suivre l'évolution de la végétation à des échelles de temps et d'espaces variés

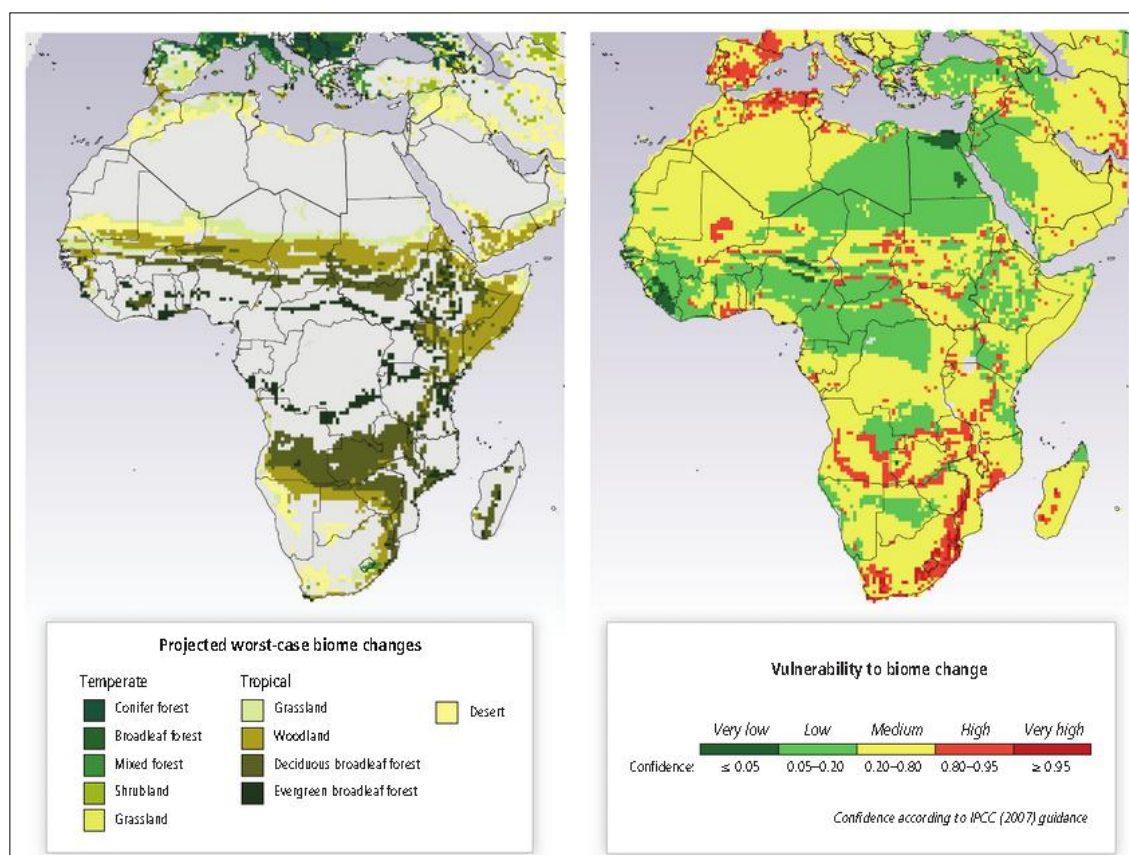


Figure 4: Vulnérabilité des principaux biomes africains qui changeront sous l'influence du changement climatique entre la période historique 1901-2002 et la période projetée 2071-2100, et incertitude des simulations se basant sur la synthèse des 9 principaux scénarios (Niang et al, 2014)

L'apport de la télédétection satellitaire est fondamental dans ces suivis et analyses des évolutions environnementales, en particulier pour les zones tropicales où les réseaux de mesure sont parcellaires et difficiles à pérenniser. C'est aussi un moyen adapté pour établir des comparaisons spatialisées des types de milieux. Comme par exemple, pour mettre en évidence les niveaux de sensibilité de chaque formation végétale aux variations hydro-climatiques.

Par ailleurs, dans ce contexte, la Tanzanie doit faire face à de nombreux défis environnementaux, notamment dans la gestion des impacts de l'activité humaine sur la végétation (l'expansion de l'agriculture, le pâturage et les feux de bois), l'érosion des sols, et sur l'appauvrissement des ressources en eaux ainsi que de la biodiversité végétale et animale. La dégradation forestière observée depuis plusieurs années sur l'ensemble du pays, est particulièrement intense autour des aires protégées, principalement celles situées à proximité des grandes villes. C'est le cas, par exemple, des deux réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi qui sont situées à environ 20 km de l'ancienne capitale Dar Es Salaam et qui subissent de fortes pressions du fait de la croissance rapide de la population.

Cet accroissement rapide de la population couplé à la variabilité climatique actuelle, à l'extension incontrôlée des espaces de cultures ainsi qu'aux dynamiques rapides de villes, rendent de plus en plus complexe la gestion des milieux forestiers. Ainsi cette thèse vise un double objectif :

1) La contribution à l'étude de la variabilité de l'activité de la végétation, en lien avec la pluviométrie aux échelles nationales à partir d'images à basse résolution spatiale ; 2) La contribution aux études sur la modélisation prospective sous l'effet d'une identification des activités humaines à la périphérie des réserves forestières à partir d'images à haute résolution spatiale.

Trois objectifs spécifiques vont donc être réalisés afin d'atteindre ce double objectif :

1) Relations pluie et couvert végétal de 2001 à 2013 à l'échelle nationale (Tanzanie).

Parmi les facteurs qui influencent la distribution géographique des espèces végétales en milieu tropical, la pluie est sans doute le facteur dominant. La phénologie de la végétation est mise en relation avec les variations saisonnières et interannuelles de la pluie de 2001 à 2013 à partir des images satellite à basse résolution spatiale MODIS et TRMM. L'analyse de l'indice de végétation permettra de montrer les variations spatio-temporelles de la phénologie végétale en Tanzanie en rapport avec les différents types d'occupation du sol et la variabilité de la pluviométrie estimée par satellite. Cela permettra d'identifier les types de formations végétales les plus sensibles à la variation des précipitations.

2) Modification de la couverture végétale en relation avec les activités humaines à l'échelle locale (réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi).

L'expansion des villes (routes, urbanisation...), le poids démographique, l'intensification de la production agricole sont d'autres sources de pressions qui s'ajoutent aux variations climatiques et accentuent la fragilité des espaces forestiers. L'utilisation des données satellitaires multi-sources à haute résolution spatiale pour analyser la dynamique des paysages forestiers est l'un des outils les mieux adaptés pour un suivi de la végétation à une échelle locale soit à l'échelle des aires protégées. Il s'agira ici de croiser les différentes pressions humaines identifiées avec les différentes classes d'occupation de sol issues des traitements des images LANDSAT et SPOT par des analyses multicritères. On souhaite ainsi faire ressortir le poids de chacun des facteurs sur les modifications paysagères qui ont lieu dans les

deux réserves forestières. Enfin, les données issues de ces traitements serviront à alimenter la modélisation prospective qui sera mise en œuvre dans la dernière partie de cette étude.

3) Modélisation prospective des états de surface des réserves forestières de Pugu et de Kazimzumbwi à l'horizon 2050.

La mise en relation des dynamiques urbaines et des états de surface des réserves forestières périurbaines de Pugu et Kazimzumbwi débouche sur l'évaluation du niveau de pression sur la ressource foncière et sur l'analyse des risques de dégradations des forêts et des sols. L'ampleur de ces risques est liée, entre autres, à l'implantation des localités, au poids de la population rurale ainsi qu'aux aménagements et infrastructures. Évaluer les risques de vulnérabilité future des forêts revient à établir les niveaux de transformation des paysages forestiers face à la dynamique des populations rurales. Les méthodes de modélisation prospectives permettront d'avoir une vision future des états de surface à l'horizon 2050. D'un point de vue opérationnel, il s'agira de fournir aux autorités un outil d'aide à la décision efficace pour la gestion et la protection des deux réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi.

1.2 - Contexte environnemental en Tanzanie

1.2.1 - Situation géographique

La Tanzanie (Figure 5), en forme longue, la République unie de Tanzanie ou en anglais The United Republic of Tanzania, est un pays d'Afrique de l'Est situé en bordure de l'Océan Indien, dans la partie tropicale de l'hémisphère sud. Elle a pour coordonnées géographiques E 30°4' - E 40°11' / S 1°40' - S 11°41'. Le pays est limité au nord par le Kenya et l'Ouganda, à l'ouest par le Rwanda, le Burundi et la République Démocratique du Congo, au sud-ouest par la Zambie et le Malawi et au sud par le Mozambique. Elle compte également plusieurs îles dont les principales sont Zanzibar, Pemba et Mafia. Sa superficie totale de 945100 km², dont 2634 km² pour les îles. Les analyses des relations entre les précipitations et la couverture végétale se feront à cette échelle de travail (nationale).

1.2.2 - La topographie

La Tanzanie est constituée d'un vaste plateau central dont l'altitude moyenne avoisine 1200 m prolongé au nord par les hauts sommets d'Afrique, le prestigieux Kilimandjaro (5895 m) et le mont Méru (4567 m) coupé à l'ouest par une faille qui a favorisé la formation des grands lacs (lac Tanganyika et lac Nyasa) (Figure 5), le lac Victoria, immense nappe d'eau que se partagent au nord-ouest la Tanzanie, l'Ouganda et le Kenya.

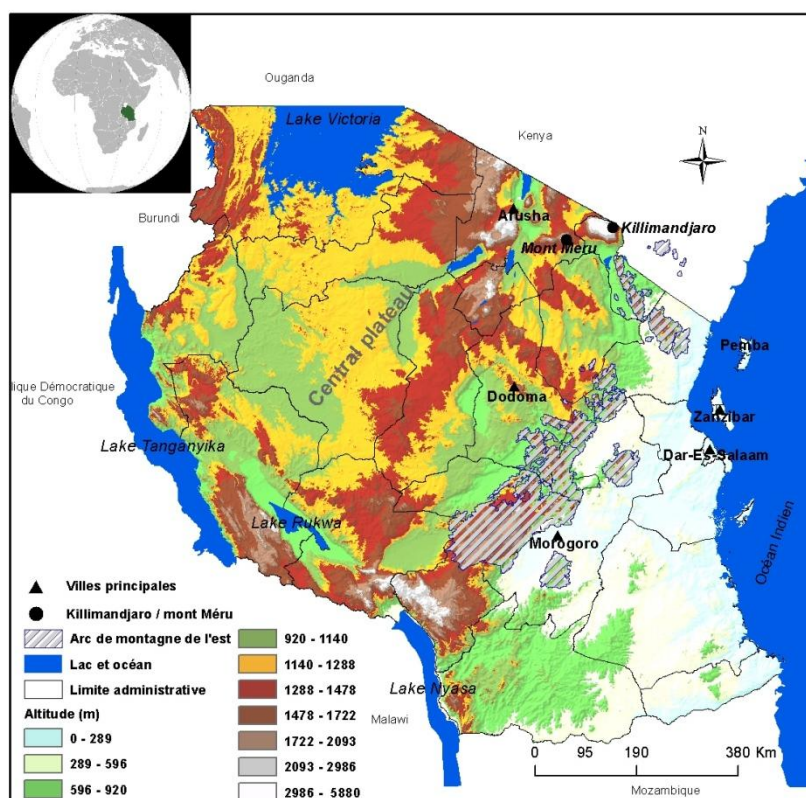


Figure 5: Localisation et altitudes (SRTM, 90 m) de la Tanzanie
(Source : Boussougou, 2017)

Le pays présente également de nombreuses chaînes de montagnes, dont le mont Udzungwa,

qui est la plus grande et la plus riche en biodiversité d'une douzaine de grandes montagnes qui se dressent majestueusement dans les broussailles côtières de l'est de la Tanzanie (arc de montagne de l'est). Riche en zones forestières en matière de biodiversité, elles abritent plus de 400 espèces d'oiseaux, dont plus d'une douzaine d'espèces endémiques.

Quant à la Tanzanie insulaire, elle est composée de Zanzibar (1 554 km²) et de Pemba (906 km²) plus au nord, l'une et l'autre sont séparées du continent par un bras de mer de 35 km environ. Les régions côtières, bordées de récifs coralliens, présentent un relief relativement plat.

1.2.3 - Cadre climatique

Le climat en Tanzanie est varié et résulte de nombreux facteurs comme : la proximité de l'Océan Indien, les lacs intérieurs, l'altitude qui gouverne la température et la latitude (PLDPT, 1984). La diversité de la topographie et des autres composantes donne lieu à des précipitations allant de 200 à 2000 mm par an. La plus grande partie du pays reçoit moins de 1000 mm, sauf les hautes terres et l'extrême sud et ouest, qui peuvent s'attendre à 1400-2000 mm de pluies. Dans les zones centrales arides, il tombe en moyenne 200-600 mm. Ainsi, le pays connaît deux saisons pluvieuses, une grande saison de pluie de début mars à début mai, puis une petite, de début novembre à mi-décembre (Tableau 2), où les précipitations sont moins abondantes. La grande saison sèche s'étend quant à elle de mai à octobre, la petite saison sèche allant de janvier à mars (Tableau 2). Les précipitations sont abondantes (750 à 2000 mm par an) le long de la côte, dans le sud-est ainsi que dans les forêts tropicales bordant le lac Victoria et le lac Tanganyika. Elles sont beaucoup plus faibles au centre, avec 100 à 500 mm de pluie par an. En ce qui concerne les températures, dans les hautes terres, elles varient entre 10 et 20 ° C pendant les saisons froides et chaudes respectivement. Le reste du pays à des températures supérieures à 20 ° C toute l'année (rarement en dessous de 20 ° C).

Tableau 2 : Saison pluvieuse, sèche et direction du vent en Tanzanie

Mois	Direction du vent	Saison (<i>en swahili</i>)	Grande zone		
			Nord	Centre	Sud
Décembre-mars	Nord-est	Kashazi	Sèche	Sèche	Humide
Mars-mai	variable	Masika			Humide
Juin-septembre	Sud-est	Kusi	Sèche	Sèche	Sèche
Octobre-novembre	Nord-est	Vuli	Humide	Humide	Humide

1.2.4 - Région agro-écologique de Tanzanie

Le climat lié à la topographie (Welcomme, 1979a), donne lieu en Tanzanie aux grandes zones agro-écologiques (Figure 6) : zone côtière, zone aride, zone semi-aride, zone des plateaux, zone montagneuse et les zones de plaines alluviales. La pluie est unimodale au nord et à l'est du pays et bimodale au centre et au sud. La zone de plateaux occupe une grande partie du pays (centre et au sud), suivi de la zone semi-aride. Les régions nord et est se distinguent des autres en termes de régime de pluie avec un régime bimodal (deux saisons de pluie). Les caractéristiques de chaque zone (Bakari, 2015) sont présentées ci-dessous :

- zone côtière (nord, sud et îles): elle se situe à une altitude inférieure à 300 m et se localise sur toute la côte de Tanzanie partant du nord vers le sud, y compris les îles. Au nord les précipitations sont bimodales entre 730 et 1200 mm et au sud, elles sont unimodales en 800 et 1200 mm de pluie.

- zone aride (nord et terres masai): les altitudes dans cette zone varient du nord au sud. En effet, au nord elles sont comprises entre 1300 et 1800m et au sud entre 500 et 1500m. Les précipitations sont faibles et unimodales entre 500-600 mm et 400-600 au nord et au sud respectivement.
- zone semi-aride (centre et sud-est): les précipitations sont également faibles et unimodales avec au centre du pays (altitudes entre 100-1500 m) les valeurs allant de 500-800 mm et au sud-est entre 600 et 800 mm.
- zone des plateaux (ouest et sud): elle occupe la région comprise entre 800 et 1500 m d'altitude, située à l'ouest, au sud et au sud-ouest où respectivement les précipitations sont bimodales (1000-2000 mm), unimodales (800-1400 mm) et unimodales faible comprise entre 800 et 1000 mm.
- zone hautes terres (sud, sud-ouest, ouest, nord et sur des montagnes granitiques isolées): au sud et au sud-ouest les précipitations sont unimodales (800-1400 ; 800-1000mm) et les altitudes sont comprises entre 1200-1500 m au sud et entre 1400-2300 m au sud-ouest. Le nord par contre présente les précipitations bimodales entre 1000-2000 mm, pour des altitudes variant entre 100 et 2500 m.
- zone de plaines alluviales des principales rivières (Kilombero (Morogoro), R-Rufiji (Côte), Usangu (Mbeya) et Wami (Morogoro)) qui s'écoulent vers l'est, de 300 à 1 000 m d'altitude. Le régime de pluies est essentiellement unimodal variant de 500 à 1800 mm.

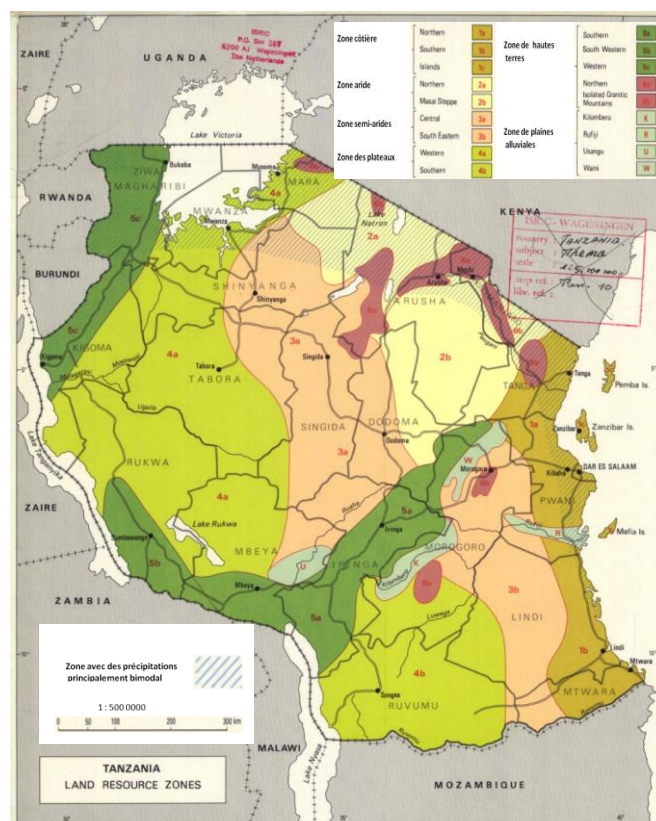


Figure 6: Répartition des zones agro-écologiques de Tanzanie

(Source : http://esdac.jrc.ec.europa.eu/images/Eudasm/Africa/images/maps/download/afr_tz2001_to.jpg)

1.2.5 - La végétation

Les conditions climatiques et topographiques font qu'on retrouve en Tanzanie une végétation qui est un peu le condensé de toutes les formations végétales des principales zones écologiques de l'Afrique tropicale. En effet, la Tanzanie couvre quatre régions phytogéographiques: la région sudano-zambéenne, région de Guinée-Congo, région d'Afromontane et région d'Afroalpine (Brenan, 1978). Cette combinaison des régions phytogéographiques, sa grande variété altitudinale et topographique, son histoire géologique, son climat fortement saisonnier, la proximité de l'océan Indien et de la vallée du rift, rendent la Tanzanie floristiquement unique et étonnamment riche, avec près de 12000 espèces connues, dont environ 1200 espèces d'arbres (Schabel, 2006). Ainsi, six grands types de végétaux sont identifiés en Tanzanie par plusieurs auteurs (Polhill 1968, Trapnell et Langdale-brown, 1972 ; Knapp 1973, Lovett et Wasser, 1993) : forêts et les mosaïques de forêt/prairie ; terres boisées, prairies et pâturages boisés ; formations de montagne ; arbres et arbustes ; mangroves (Figure 7). A cela, s'ajoute des vastes étendues de forêts claires du miombo, des régions marécageuses du centre et du sud du pays, des plantations d'Acacia dans les régions nord, des mosaïques de forêts côtières/forêts claires à l'est, les mangroves le long de la côte de l'Océan Indien et les forêts denses des anciennes montagnes de l'Arc de l'Est (Akida et Blomley, 2006). De ce fait, depuis la fin des années 1980, la biodiversité de Tanzanie est reconnue comme 'hotspot' de la diversité biologique mondiale (Stuart et *al.*, 1990; Myers et *al.*, 2000; Kuper, 2004; Burgess et *al.*, 2007).

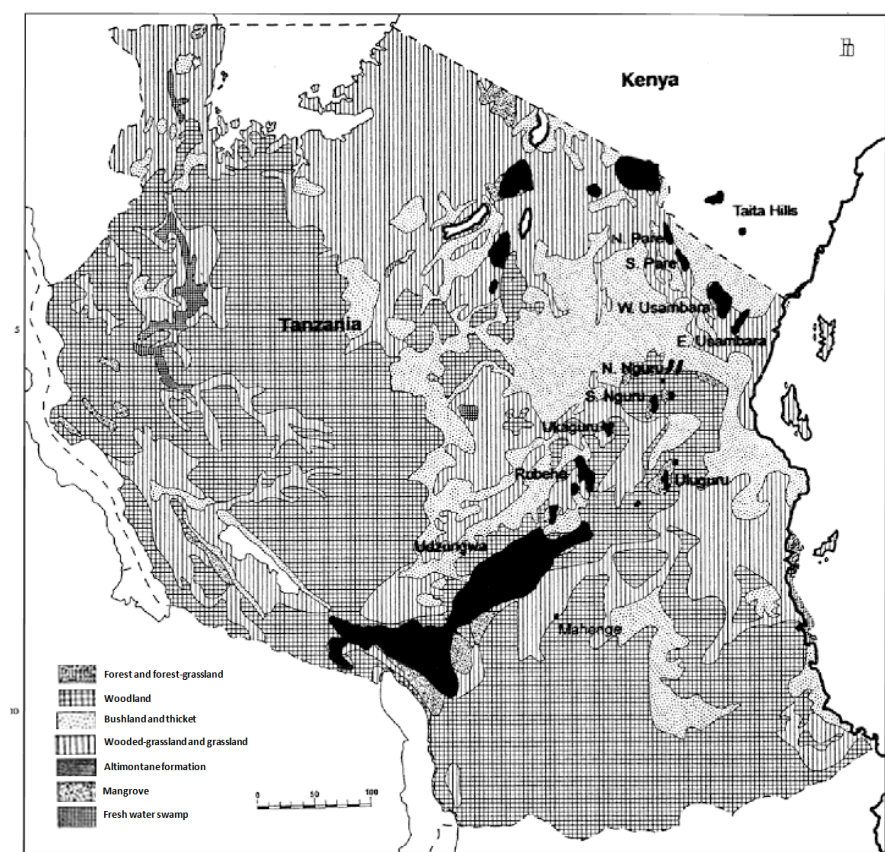


Figure 7: Carte des types de végétation en Tanzanie, mettant en évidence (en noir massif) les montagnes de l'arc oriental. Sources (Polhill (1968) et Burgess et al. (2002))

Les forêts et terres boisées représentent environ 33,5 millions d'hectares (MNRT, 1998), près de 38 % de la superficie du pays. Ces dernières sont classées en : forêt classée avec 14,3 millions d'hectares; réserves forestières avec 2,5 millions d'hectares et parcs à gibier ou parcs nationaux avec environ 2 millions d'hectares (URT, 2001; Akida et Blomley, 2006).

La répartition de la superficie forestière par type, usage, et statut juridique est représentée dans le Tableau 3 (MNRT, 1998).

Tableau 3: Répartition des forêts de Tanzanie par type, usage, et statut juridique (*source : Chamshama, 2011*)

Répartition des forêts	1000 ha	Proportion (%)
Type de forêt		
Forêt (autres que forêts mangroves)	1141	3,40
Forêts mangrove	115	0,30
Région boisées	32299	96,30
Total	33555	100
Utilisation de la terre forestière		
Etendue forestière productive	23818	71,00
Zones forestières protégées (zones hydrographiques en général)	9745	29,00
Total	3355	100
Statut juridique		
Réserves forestières	12517	37,30
Forêts/régions boisées se trouvant dans des parcs nationaux	200	6,00
Forêts non classées en réserve	19038	56,70
Total	33555	100

Les forêts et les régions boisées jouent un rôle important dans la vie des tanzaniens. La bioénergie représente environ 90 % de l'énergie totale consommée dans le pays selon la Division des forêts et de l'apiculture (FBD, 2000). La population utilise l'énergie à base de biomasse pour faire la cuisine et pour le chauffage. Elles sont également une source de différents produits non ligneux comme les fruits, noix, plantes médicinales, le miel, la cire d'abeille, les tanins et la gomme arabique (MNRT, 1998). En outre, ces régions sont importantes en tant que zones hydrographiques. Par exemple, les forêts des montagnes de l'arc oriental sont des sources de plusieurs rivières telles que la Ruvu et la Sigi qui approvisionnent en eau respectivement la ville de Dar-es-Salaam et la municipalité de Tanga (VPO, 1998). De même, la Pangani et la Ruaha fournissent l'eau pour la production de l'énergie hydroélectrique.

Cependant, les ressources tirées des forêts et celles provenant des régions boisées font l'objet d'énormes pressions dues aux activités agricoles, aux établissements humains, au pâturage, aux feux de brousse, à la carbonisation, à l'exploitation illicite et à l'exploitation minière. Il n'existe pas de données fiables concernant le déboisement mais les estimations montrent que 91200 hectares disparaissent chaque année (FAO, 2000). Ce déboisement mène, entre autre à la perte de la biodiversité, à une grave dégradation des sols et à la désertification. Comme dans de nombreux pays d'Afrique tropicale, pendant très longtemps les forêts et régions boisées en Tanzanie ont été mises en aménagement sans la pleine participation des communautés locales vivant dans leurs environs. Les communautés locales ont un rôle considérable à jouer pour améliorer la gestion des forêts et des régions boisées, et leur participation peut contribuer d'une manière non négligeable à la durabilité et à la gestion de ces ressources.

Les forêts sont de plus en plus menacées, principalement à cause de la coupe illégale qui a détruit environ 500000 hectares de forêt vierge par an au cours des deux dernières décennies (Carrere, 2002). Un des impacts négatifs est associé à la substitution des forêts par des activités agricoles et minières dont les produits sont destinés à l'exportation. Au cours de ces dernières années, le gouvernement de la Tanzanie a donné la priorité à la production agricole destinée aux marchés d'exportation, ce qui a entraîné la disparition de près de la moitié des forêts au profit des cultures agricoles d'exportation. Dans le district de Simanjiro, par exemple, plus de 50000 hectares de terres ont été déboisées pour permettre la culture de haricots secs ; 80 établissements agricoles commerciaux, de 90 à 13000 hectares de superficie, produisent ces légumes, principalement exportés aux Pays Bas, entraînant la migration des populations locales (masaï) (Carrere, 2002). Ainsi la disparition de près de la moitié des forêts se doit aux cultures agricoles d'exportation. En conséquence, environ 25% des forêts de la nation ont été détruites entre 1980 et 1993, cette destruction est aggravée par les coupes illicites des bois qui sont particulièrement intenses aux frontières du pays (Carrere, 2002). C'est le cas à *Brachylaena Hutchinsii* (Muhuhu), du côté de la frontière Tanzanie-Kenya, où la plupart du bois commercialisé est illégalement coupé, puis illégalement exporté (Carrere, 2002) rendant ainsi vulnérable la faune sauvage dont certaines espèces sont menacées d'extinction.

1.3 - Contexte environnemental des réserves forestières au sud-est de Tanzanie : les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi

Les réserves forestières et les aires protégées de Tanzanie (les parcs nationaux, les zones de conservation, les réserves naturelles...) regorgent de paysages extraordinaires et d'une biodiversité riche qu'il faut préserver. C'est dans ce contexte de préservation qu'en 1951, Serengeti est devenu le premier parc national de Tanzanie et en 2001, le parc national du plateau de Kitulo est devenu le dernier (Schabel *et al.*, 2006). La Tanzanie, comme la plupart des pays d'Afrique a ratifié toutes les conventions et accords internationaux majeurs concernant les ressources naturelles et possède actuellement 25% du territoire national en aires protégées (Schabel *et al.*, 2006). Elle dépasse ainsi, les normes internationales de conservation de la nature et l'engagement envers la biodiversité. Parmi ses aires protégées, les zones côtières sont riches en biodiversité. En effet, les forêts côtières regorgent de nombreux espèces floristique et de faunistique qui sont presque toutes endémiques (Burgess *et al.*, 1992; Polhill, 1952 ; Polhill, 1989; Voile-Sen, 1992).

Les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi font parties des aires protégées côtières de Tanzanie. Ce sont des restes d'une ancienne grande zone de couverture forestière appartenant à la section Zanzibar-inhambane de la région phytogéographique guinéenne et congolaise (White, 1983). Ces réserves forestières sont situées dans la zone péri-urbaine de l'ancienne capitale tanzanienne, Dar es-Salaam. Malgré leur taille limitée, ces forêts sont reconnues mondialement comme des « points chauds » de la diversité de l'endémisme (Howell, 1981). Par exemple, sur les 190 espèces d'arbres forestiers reconnus dans la région de la côte, 92 sont endémiques (White, 1983). Une part de leur importance biologique / botanique, est également source d'une large gamme de produits forestiers de grande valeur, qui sont d'une importance vitale pour les moyens de subsistance de nombreux Tanzaniens, en particulier de Dar es-Salaam et des régions côtières.

Les deux réserves se trouvent à la frontière entre la région de Pwani et Dar Es Salaam et appartiennent au district de Kisarawe (Figure 8). Elles ont respectivement pour coordonnées géographiques : 6°55'S-7°02'S ; 39°02' E-39°04'E et 6°55'S-7°02'S ; 39°02' E-39°04'E. Leurs altitude varient entre 120 et 280 mètres et se situent à environ 20 à 25 kilomètres de Dar Es Salaam (accessible par voie terrestre). La superficie des réserves forestières est de 7856.928 hectares (soit 2423,38 pour Pugu et 5433,548 pour Kazimzumbwi). On observe des nombreux paysages, comme par exemple la forêt, la savane, mosaïque savane-brousse-végétation arbustive, des brousses, ancienne carrière de sable recouverte d'herbes, rivière... (Figure 8).

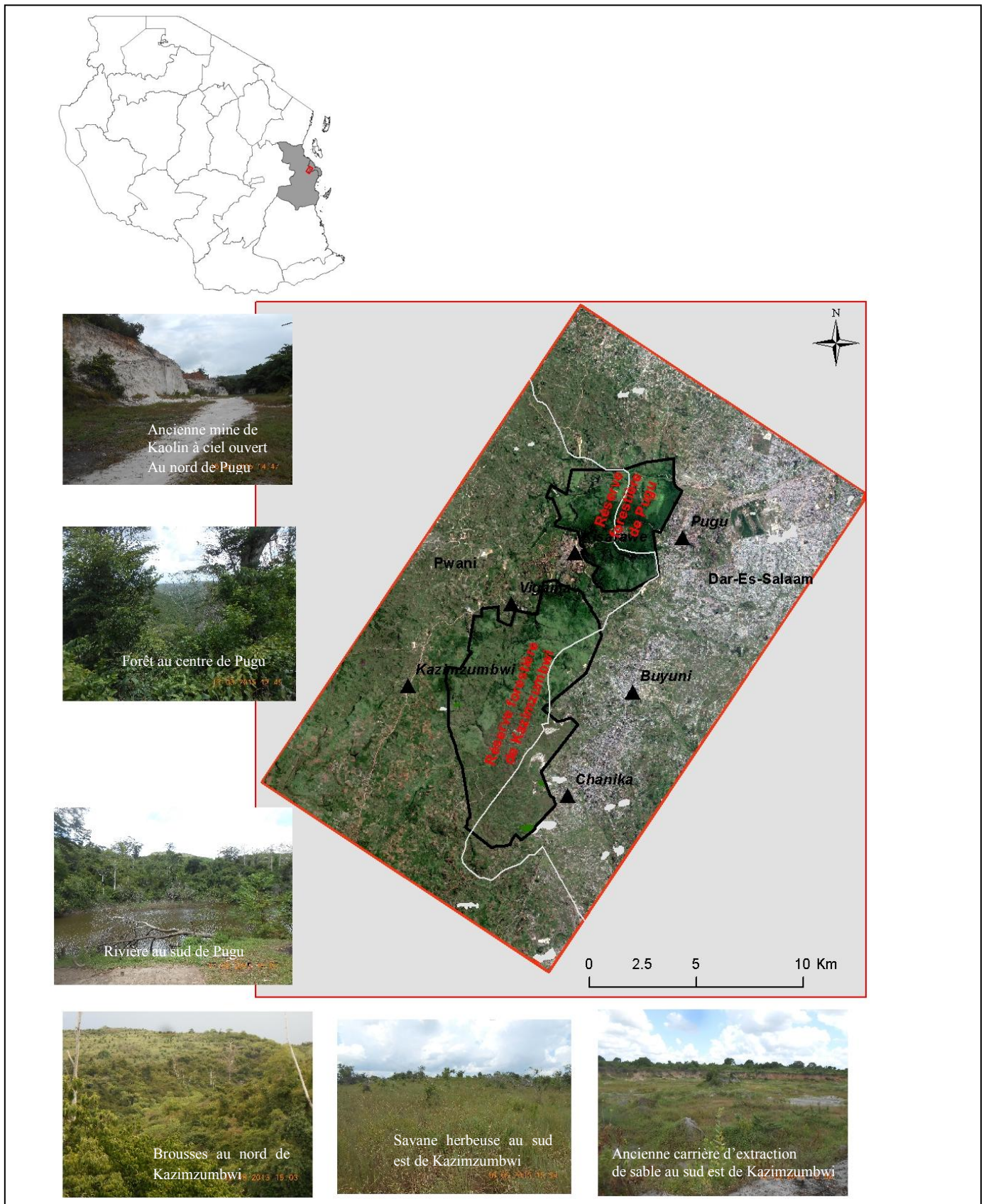


Figure 8: Carte de localisation des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi et les villages périphériques. Quelques paysages observés sur le terrain en 2015 (Source : Boussougou, 2017. Clichés : Boussougou, 2015)

1.3.1 - Pressions anthropiques à la périphérie des réserves forestières

L'importance biologique et économique de ces réserves forestières est bien connue. Une enquête réalisée en 1994 a montré que près de 30% des espèces végétales dans les réserves sont endémiques (Mbwana, 1994). Cependant, la conservation de la biodiversité n'a pas été prise en considération dans les politiques forestières existantes, ni dans les pratiques de gestion des réserves forestières (Mbwana, 1994). En plus de cette situation, ces dernières années, les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi ont été menacées par la combinaison d'activités humaines induites par les villes, principalement l'agriculture, la collecte du bois et la coupe de poteaux. Au fur et à mesure que la population humaine grandit, les zones résidentielles se sont développées dans les zones boisées. Les autres domaines des forêts sont soumis à un abattage et à une exploitation forestière non durable. Cette situation est telle que la forêt de Pugu est l'une des forêts naturelles côtières les plus perturbées de Tanzanie. La perte de la biodiversité dans les réserves forestières de Pugu et de Kazimzumbwi est principalement due à la pression de la population qui pousse certains villageois à gagner leurs moyens de subsistance au-delà des limites des réserves à la recherche de bonnes terres, avec la surexploitation des ressources (Mwalyosi, 1994).

1.3.2 - Evolution de la population

Les réserves forestières de Pugu et de Kazimzumbwi sont entourées de villages qui sont essentiellement de caractère rural. Néanmoins, parce que ces villages sont adjacents (20-30 km) à la ville de Dar es-Salaam en pleine expansion, ils sont sensibles aux influences des zones urbaines. Cette influence est en termes de demande croissante de terres pour la culture, les logements et les produits forestiers dont la production de charbon de bois et de bois de chauffe est le plus important. Certains villages, en particulier ceux du côté est de la réserve de Pugu, peuvent dans les années à venir, être désignés comme partie intégrante des zones urbaines de la ville de Dar Es Salaam.

Depuis 1978, la population des villages à la périphérie des réserves forestières ne cesse de croître et ont vu leur population doubler depuis les années 80 (Tableau 4). La population du village de Kazimzumbwi, par exemple, a plus que doublé entre 2002 et 2012, passant de 11844 habitants en 2002 à 100598 habitants en 2012, ce qui donne un taux d'évolution de 7 % (Tableau 4). De même, la population de la ville de Pugu a pratiquement triplé pendant cette même période (2002-2012) passant de 14652 à 49422 habitants avec un taux d'évolution de 2 %. Une grande partie de cette croissance démographique se produit dans le groupe d'âge adulte, indiquant que l'augmentation est principalement attribuable à l'immigration. Ceci est également suggéré par l'ethnie mixte Composition de la population du village (Mwamfupe, 1998).

Tableau 4: Taux de croissance démographique dans les villages périphériques des réserves de Pugu et Kazimzumbwi
(Source : Shishira et al, 1998 ; Lupala , 2015)

Année de recensement	Pugu	Chanika	Buyuni	Masaki	Kisarawe	Vigama	Kazimzumbwi
1978	3129	1322	572	-	3317	-	1525
1988	8143	12258	1295	-	6027	-	1186
2002	14652	23450	2243	5909	11844	465	1586
2012	49422	43912	3417	7274	100598	572	1952
Taux d'évolution (%) 2002-2012	2.3	0.87	0.52	0.23	7.49	0.23	0.23

Les facteurs économiques jouent un rôle important dans la plupart de ces mouvements. Les personnes se déplaçant dans ces zones périurbaines sont à la recherche de terres arables. Ceci est le résultat d'un cycle de migration provoqué par les pressions économiques où les gens se déplacent d'abord des villages ruraux dans la zone urbaine de Dar es-Salaam en recherche d'emploi, puis déménagent dans des zones périurbaines et rurales pour compléter leurs maigres revenus avec des parcelles agricoles rurales. En raison de l'augmentation de la population de ces villages, la densité est passée de 37 personnes par kilomètre carré en 1967 à 90 personnes en 1978 et 120 personnes par kilomètre carré en 1988 (Mwamfupe, 1996).

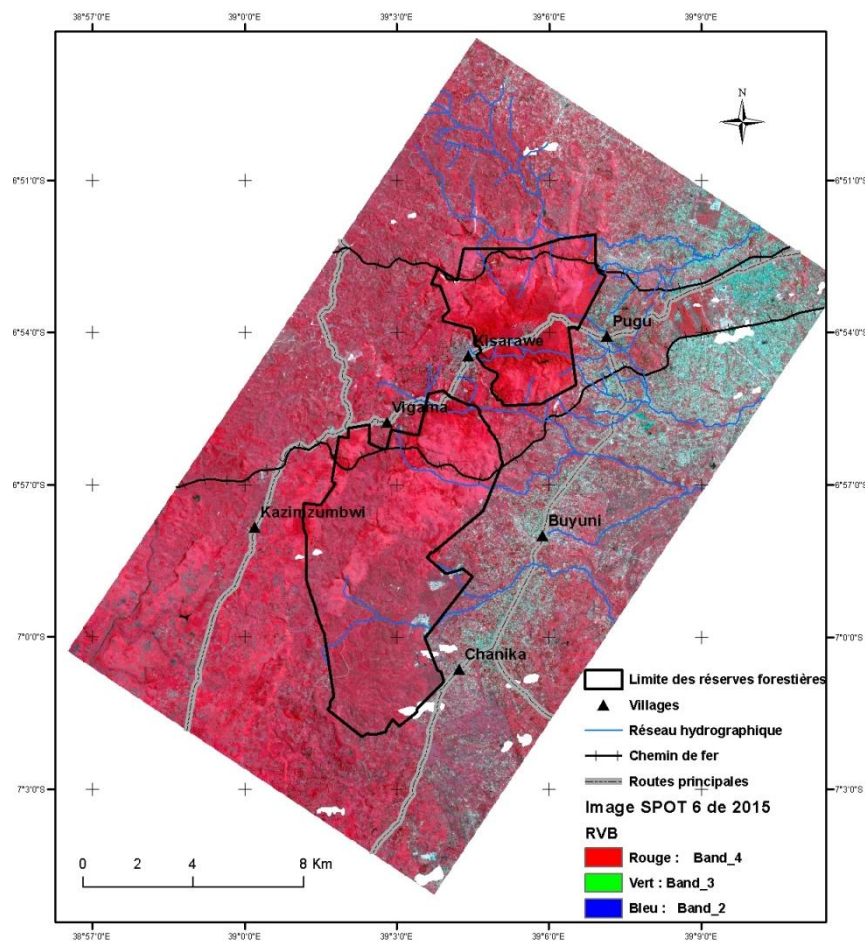


Figure 9: Les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi (limite en noir), localisation des villages (triangle noir), le réseau routier (linéaire gris), le chemin de fer (linéaire noir avec barre), le réseau hydraulique (linéaire bleu). Le fond de carte est l'image SPOT 6 2015 et en blanc le masque nuage (Source : Boussougou, 2017)

1.3.3 - Pression foncière

La croissance de la population entraîne une demande accrue de terres dans certains villages. En effet, la valeur des terres a augmenté en même temps que la croissance démographique des villages à la périphérie des réserves (Mung'ong'o et *al.*, 1997). Les terres sont désormais vendues deux à trois fois plus cher par rapport aux normes villageoises.

Le processus d'acquisition semble être dicté par certains employés du secteur privé ou public possédant des terrains. En effet, la terre acquise devient un atout social et économique pour l'avenir. En outre, une fois que la terre est acquise, elle forme une base pour la mise en place d'un logement permanent et des activités économiques (culture, bovins laitiers, volailles, porcherie, maraîchage, etc.). Les revenus issus de ces activités constituent un complément de revenu important pour les populations.

Dans ces villages, les terres sont achetées auprès des populations locales pauvres. Après la vente, cette population pauvre achète à son tour des terres moins chères à la périphérie des villages, ce qui entraîne la création de nouveaux villages ou l'agrandissement de villages existant mais aussi l'ouverture des nouvelles terres pour la culture. Ce processus de distribution et d'acquisition des terres pousse l'installation des villageois à l'extérieur des villages existants, ce qui dans le temps empiète dans le domaine des réserves forestières.

1.3.4 - Surexploitation du bois

En raison des coûts élevés des sources d'énergies alternatives telles que l'électricité et le kérosène, le charbon est devenu la principale source d'énergie du pays. En effet, environ 85% de la population urbaine à Dar es Salaam, et plus de 90% de la population rurale dans les villages entourant les réserves forestières, dépendent du bois comme principale source d'énergie pour le chauffage et la cuisson (Mng'ong'o et *al.*, 1997).

La production de charbon de bois commercial est devenue une grande entreprise en raison de la facilité de l'accès aux marchés de la ville de Dar es-Salaam et des petites villes de Pugu et Kisarawe. En 1987 par exemple, les districts d'Ilala et Temeke entourant les réserves produisaient en moyenne environ 20.000 sacs de charbon de bois par mois. Ce chiffre pouvait être bien supérieur, car il ne comprenait que le charbon de bois enregistré dans les stations d'enregistrement officielles. Car en effet, de nombreux producteurs n'enregistrent pas leurs productions pour éviter les taxes et utilisent donc d'autres voies de communication, comme le chemin de fer au nord de la réserve de Pugu.



Photographie 1: Vente de charbon de bois dans le village de Vigama (gauche), transport du charbon par motos pour la vente dans la ville de Dar Es Salaam (droite). Clichés : Boussougou, 2015

L'exploitation des ressources forestières dans la zone environnante de Dar Es Salaam est causée par la forte demande de ces produits. Le processus d'exploitation implique que les producteurs possédant des terrains souvent à proximité des ressources des villageois, des agents, principalement basés à Dar es Salaam, qui achètent auprès de ces producteurs les produits forestiers et les transportent dans les villes pour la vente en gros et détail (Photographie 1).

1.3.5 - Pression sur les limites des réserves

Les limites des réserves ont été mises en place depuis la création des réserves et publiées dans le journal officiel. Mais la pression autour des réserves est telle qu'on a assisté au fil des années à leur modification. La Figure 10 montre les anciennes limites datant de 1987 issues de la carte topographique de cette même année et les limites actuelles observées sur le terrain entre 2015 et 2016. La réserve de Kazimzumbwi est celle qui a subi les modifications les plus importantes, notamment dans sa partie sud. A l'inverse, la réserve de Pugu a subi des modifications dans sa partie nord et ouest suite à l'intensification des pratiques agricoles. Le manque de main d'œuvre et l'absence des installations permanentes de surveillance rendent de plus en plus difficile la surveillance desdites limites. Il est donc difficile de faire respecter la législation.

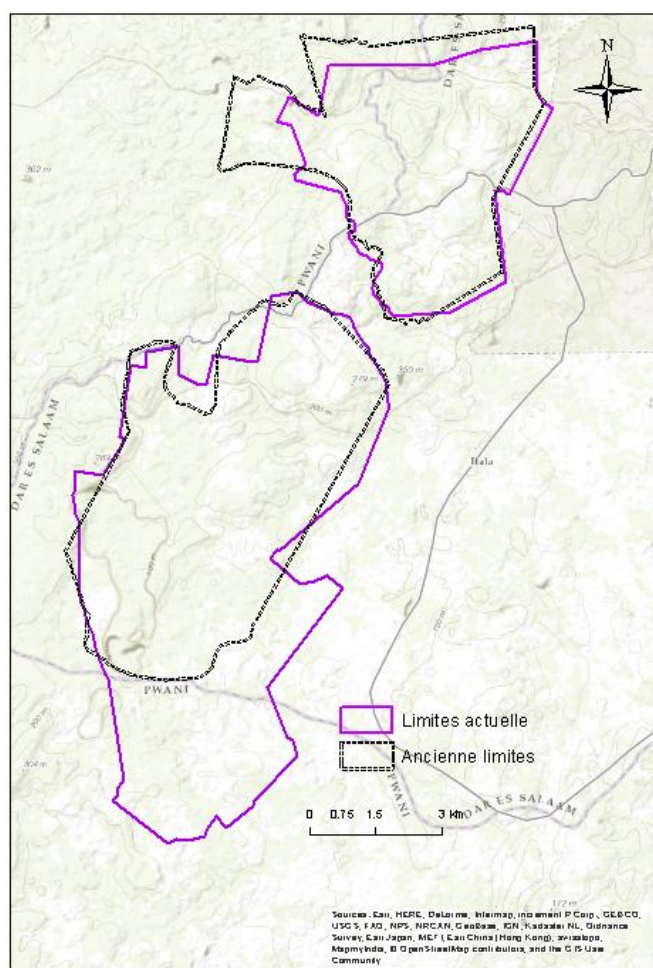


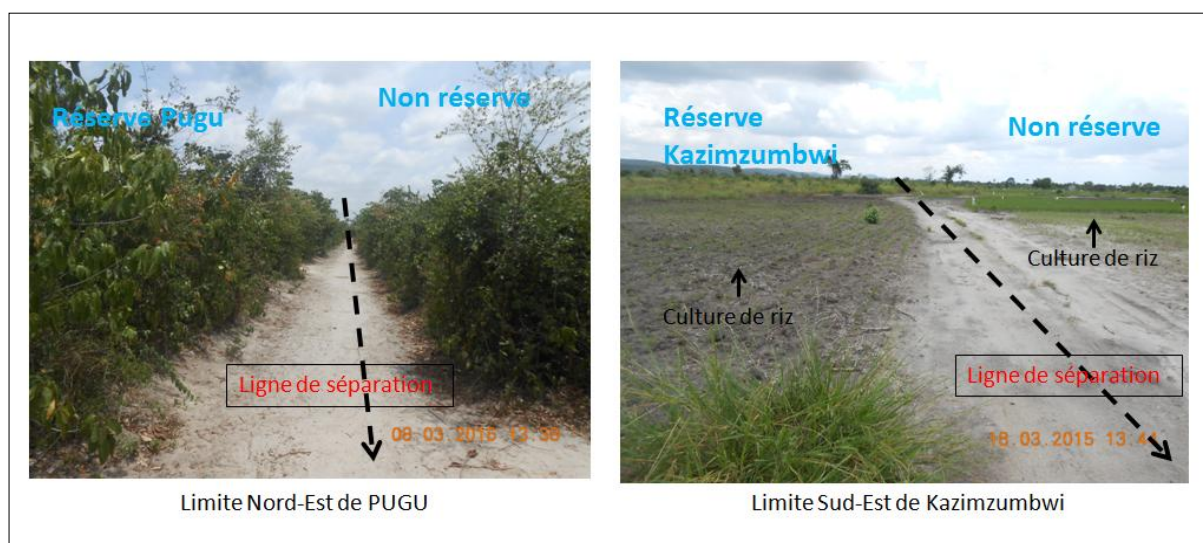
Figure 10: Limites anciennes (digitalisé sur la carte topographique (*United Republic of Tanzania, 1978*)) et nouvelles (fournies par le département Géographie de l'Université de Dar Es Salaam) des réserves forestières

Les villageois vivant à la périphérie des réserves expriment souvent leur désaccord suite aux modifications des limites des réserves par des actes de vandalisme et par des feux de brousse volontaires dans les réserves, comme le montre la Photographie 2 prise sur le terrain en 2015, pendant la période de récolte de données terrain.



Photographie 2: 2a : un poste de contrôle détruit au Sud-ouest de la réserve de Kazimzumbwi ; 2b : les traces d'un incendie volontaire au Nord de la réserve de Pugu. Clichés : Boussougou, 2015

Les modifications des limites des réserves sont aussi la conséquence du manque de barrière physique qui aurait pu limiter la pénétration des populations qui cherchent à réaliser des coupes illicites dans les réserves. Aujourd'hui, seul un tracé au sol sépare le domaine protégé de la partie non protégée, comme l'illustre la Photographie 3 (Photographie 3) ci-dessous :



Photographie 3: Limite des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi (à gauche dans la partie nord-est de Pugu et à droite dans la partie sud-est de Kazimzumbwi). Clichés : Boussougou, 2015

La réserve de Pugu moins dégradée bénéficie d'une surveillance plus intensive que celle de Kazimzumbwi. Cette surveillance ne plaît pas aux populations riveraines. Certains villageois poussés par la colère génèrent des incendies dans la réserve (Photographie 2b). De plus, certains villageois ont développé des méthodes de production de charbon sous la canopée pour échapper à la vigilance des gardes, ou encore des méthodes d'extractions des grands arbres pour la fabrication des meubles. A l'inverse de la réserve de Pugu, la réserve de Kazimzumbwi, de par sa superficie plus grande (54.34 contre 24.23 km²) bénéficie d'une

surveillance moins efficace car nécessitant plus de moyens (financier et main-d'œuvre). Les produits issus des forêts sont vendus soit sur le bord des routes à proximité des villages, ou sont transportés pour être vendus dans les villes de Pugu et Kazimzumbwi ou encore dans la capitale Dar Es Salaam (Photographie 1).

Les observations sur le terrain en 2015 et 2016, nous ont permis d'identifier, dans les réserves et à proximité immédiates de leurs limites, différents indicateurs témoignant de la pression anthropique : des zones agricoles, des carrières d'extraction de roche ou de sable, d'anciennes mines d'extraction de kaolin et les anciens villages des travailleurs de l'usine de fabrication de brique au nord de Pugu (Photographie 4). De plus, les nombreuses pistes à l'intérieur de la réserve de Kazimzumbwi témoignent d'une dégradation très avancée de la réserve et d'une facilité de déplacement des véhicules qui transportent le sable extrait des carrières. L'extraction des roches identifiée au sud de la réserve de Pugu, qui empiète sur les limites de la réserve, constitue une véritable menace pour cette réserve. En effet, des carrières d'extraction de roches prolifèrent depuis quelques années dans cette zone, ce qui engendre une augmentation de la surface de sols nus à l'intérieur de la réserve.

1.3.6 - Importance des réserves forestières pour les villageois périphériques

Une enquête réalisée en 1995 auprès des populations entourant les deux réserves, indique que les villageois reconnaissent l'importance des forêts. Cependant, la plupart semblent valoriser les avantages directs des ressources forestières (utilisations de consommation) que les avantages indirects (utilisations non consommatrices). Le classement par ordre d'importance des forêts par les villageois de Pugu et Kazimzumbwi montrent que le "facteur d'extraction" semble être plus important que le "facteur conservation". En effet, les forêts sont des sources de bois de chauffage, du bois pour la construction et le charbon de bois et sont classés parmi les trois valeurs les plus importantes des forêts. En revanche, des aspects tels que « bassin versants » et « valeur de l'environnement » sont classés en dernières position respectivement. Les activités économiques dominantes menées dans et autour des deux réserves comprennent la fabrication de briques, la production de charbon de bois, l'exploitation forestière et l'agriculture. La production de charbon de bois est le facteur de pression le plus important des forêts réserves. Le charbon de bois est produit à des fins commerciales, en lien à la demande croissante des habitants urbains de la ville de Dar Es Salaam. Avant sa fermeture, l'usine de briques et de tuiles (située dans la Réserve de Pugu) dépendait de la forêt comme source de bois de chauffage, qui est utilisée dans le processus de gravure de briques pour les rendre plus solides. Il existait également des mines à ciel ouvert de kaolin dont les vestiges sont visibles au nord de la réserve forestière de Pugu (Photographie 4).

Pendant des années aussi, la réserve de Kazimzumbwi (au sud-est), a servi de site d'extraction de sables pour la construction.



Villageois transportant du bois de chauffe extrait de la réserve de Kazimzumbwi



Ancienne mine de Kaolin au nord dans la réserve de Pugu



Ancienne carrière d'extraction de sable au sud dans la réserve de Kazimzumbwi



Ancienne usine de fabrication de briques et de tuiles dans réserve de Pugu

Photographie 4: Exemples de quelques avantages directs des réserves forestières. Clichés : Boussougou, 2015

De ce qui précède, les réserves forestières de Pugu et de Kazimzumbwi sont menacées par des pressions humaines de plus en plus importantes au fil des années. Il est donc nécessaire pour les autorités de préserver ce qui reste comme biodiversité et penser à la restauration de ce qui a été dégradé. C'est dans ce contexte qu'en 2009, un programme naît entre le gouvernement Norvégien et Tanzanien afin d'améliorer les espaces protégés de Tanzanie. C'est le projet CCIAM « Climate Change Impacts, Adaptation and Mitigation ». L'objectif est l'amélioration d'un environnement plus vert par la promotion de la conservation des forêts naturelles, le reboisement et l'amélioration des pratiques agricoles permettant d'augmenter les moyens de subsistance dans le cadre de la REDD (Réduction des émissions dues à la déforestation de la dégradation des forêts). Parmi les composantes de ce projet, on note le sous projet « Analyse des impacts de l'utilisation des terres urbaines et des changements climatiques sur l'écosystème côtier forestier et leur gestion (IULUCC-CFM) ». Ainsi la compréhension des processus de dégradation à partir des analyses sur la dynamique d'occupation des réserves de Pugu et Kazimzumbwi de notre étude vise à compléter et apporter une contribution dans la politique de gestion et suivi des espaces forestiers à long terme, notamment des aires protégées de Tanzanie.

Chapitre 1 - Données et méthodes adoptées dans l'étude

1.1 - Les données satellites disponibles

1.1.1 - Rappel des principes fondamentaux de la télédétection

Grâce aux progrès technologiques liés à la télédétection au cours des dernières décennies, les données d'observation de la Terre par des capteurs embarqués à bord d'avions ou d'engins spatiaux sont de plus en plus diverses (suivi des ressources végétales, des précipitations, de l'atmosphère...) et disponibles rapidement (Toukiloglou, 2007 ; Dubreuil, 2010 ; Diwakar et *al.*, 2013). Ces données issues de la télédétection sont le plus souvent d'abord accessibles sous forme d'images. L'interprétation d'une image satellite est principalement fondée sur l'hypothèse qu'il est possible de reconnaître un certain nombre d'éléments présents à la surface de la Terre à partir des valeurs de luminance de ces objets dans les différentes fenêtres du spectre électromagnétique (i.e. leur signature spectrale). Les données fournies par les satellites d'observation de la Terre sont surtout définies par trois principales caractéristiques (Caloz et Collet, 2001) :

- La résolution spatiale : c'est l'aptitude du capteur à distinguer deux objets rapprochés. Elle s'exprime en termes de taille du pixel. L'image possédant une résolution spatiale fine fournit une bonne fonctionnalité d'identification des objets de base. L'image possédant une résolution spatiale grossière apporte moins de fonctionnalité d'identification. Dans le domaine civil, quatre catégories de résolution se distinguent (Source : Centre canadien de télédétection) :

- la basse résolution (> 100 m) ; capteur de MODIS
- la moyenne résolution MR (80 m) ; capteur LANDSAT TM
- la haute résolution HR (5 à 30 m) ; capteur SPOT
- la très haute résolution spatiale THR (inférieure à 5 m) ; capteur Pléiades HR

- La résolution temporelle : correspond à la période entre deux acquisitions de la même scène. En effet, le temps que prend un satellite pour effectuer un cycle orbital complet est généralement de quelques jours. Il faut donc quelques jours à un tel satellite pour qu'il puisse observer de nouveau exactement la même scène à partir du même point dans l'espace. La résolution temporelle absolue du système de télédétection est égale à cette période. Cette résolution ne dépend pas du capteur mais de l'orbite et du mode de manœuvre du satellite.

- La résolution spectrale : c'est la plus petite largeur de la bande spectrale enregistrée par le capteur. Strictement parlant, la "résolution" spectrale se réfère à la "largeur" d'une bande de fréquence spectrale utilisée pour générer une bande d'image. Il est plus utile de considérer le "nombre", la "position" et la "largeur" de toutes les bandes de fréquences spectrales comprises dans une image. Quatre régions spectrales se distinguent généralement (Source : Centre canadien de télédétection) :

- le visible (V) : $0,4 \mu\text{m}$ à $0,7 \mu\text{m}$
- le proche infrarouge (PIR) : $0,7 \mu\text{m}$ à $1,5 \mu\text{m}$
- le moyen infrarouge (MIR) : $1,5 \mu\text{m}$ à $3 \mu\text{m}$
- l'infrarouge lointain (FAR-IR) : $3 \mu\text{m}$ à $15 \mu\text{m}$

Ainsi, la télédétection est le seul outil actuellement capable de fournir à un pas de temps

court, et à presque toutes les échelles spatiales, des informations sur l'état des phénomènes ou des surfaces naturelles (atmosphère, océan ou surface de la terre).

1.1.2 - Les données de végétation

1.1.2.1 - Indices de végétation

Les indices de végétation ont été créés afin de suivre et de quantifier l'état de santé de la végétation. Ils expriment le contraste entre les comportements spectraux de la végétation chlorophyllienne et des sols nus dans la bande du rouge (R) et le proche infrarouge (PIR). Ces deux canaux concentrent la part d'information la plus importante sur le couvert végétal, soit plus de 90 % (Baret et Guyot, 1991). Le rouge et l'infrarouge sont particulièrement bien adaptés pour décrire l'activité photosynthétique de la végétation, tandis que l'infrarouge IRCL (InfraRouge de Courte Longueur d'onde, qualifié quelquefois de moyen infrarouge) traduit plutôt le taux d'humidité du sol et de la végétation (Iona-Toroimac et *al.*, 2006; Thomson, 1984).

De nombreux indices dédiés à la végétation existent de nos jours, mais l'indice le plus utilisé reste l'indice de végétation normalisé (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI). Malgré quelques limites dénoncées par certains auteurs comme par exemple la saturation ou encore l'effet des sols, le NDVI est reconnu pour sa robustesse dans les calculs et bien adapté pour le suivi temporel de la végétation.

L'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est un néo-canal construit à partir des canaux rouge (R) et proche infrarouge (PIR). Son principe repose sur le fait qu'un couvert végétal absorbe l'énergie dans la bande rouge et réfléchit beaucoup dans le proche infrarouge, d'où la formule suivante (Rouse et *al.*, 1973 ; Tucker, 1979) où le NDVI équivaut à :

Équation 1: Formule du NDVI

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

Une forte activité photosynthétique implique une forte biomasse et donc, de fortes valeurs du NDVI. Il peut varier entre -1 et 1. Les très faibles valeurs (-0,9 à 0) surviennent dans les régions dépourvues de végétation (les zones rocheuses, les sols nus, l'eau, la neige) ou alors, si la végétation est sénescente. Les valeurs modérées (0,2 à 0,3) représentent les zones arbustives et la plupart des types de cultures alors que les valeurs élevées (0,5 à 0,9) traduisent une végétation dense abondante (Pettorelli et *al.*, 2005). Le NDVI est un bon indicateur du comportement de l'activité photosynthétique de la végétation, des productions de biomasse et des différences de paysage. Il est bien adapté pour l'étude de leur variabilité spatiale et temporelle (Philippon et *al.*, 2006).

1.1.2.2 - Les données NDVI MODIS

Le capteur MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) est une série d'instruments d'observation scientifique couplés à un système embarqué satellitaire, lancé par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) à bord du satellite Terra en 1999, puis à bord du satellite Aqua (deux satellites de l'EOS - Earth Observing System) destinés à l'observation à long terme des sols, biosphère, atmosphère et océans de la Terre. Les images MODIS utilisées dans notre étude sont des images d'indice de végétation normalisée NDVI issus des produits MODIS mode 13Q1 du capteur Terra-MODIS de résolution spatiale 250m et de résolution temporelle de 16 jours. Il s'agit de synthèses composées de 16 jours, disponible depuis février 2000.

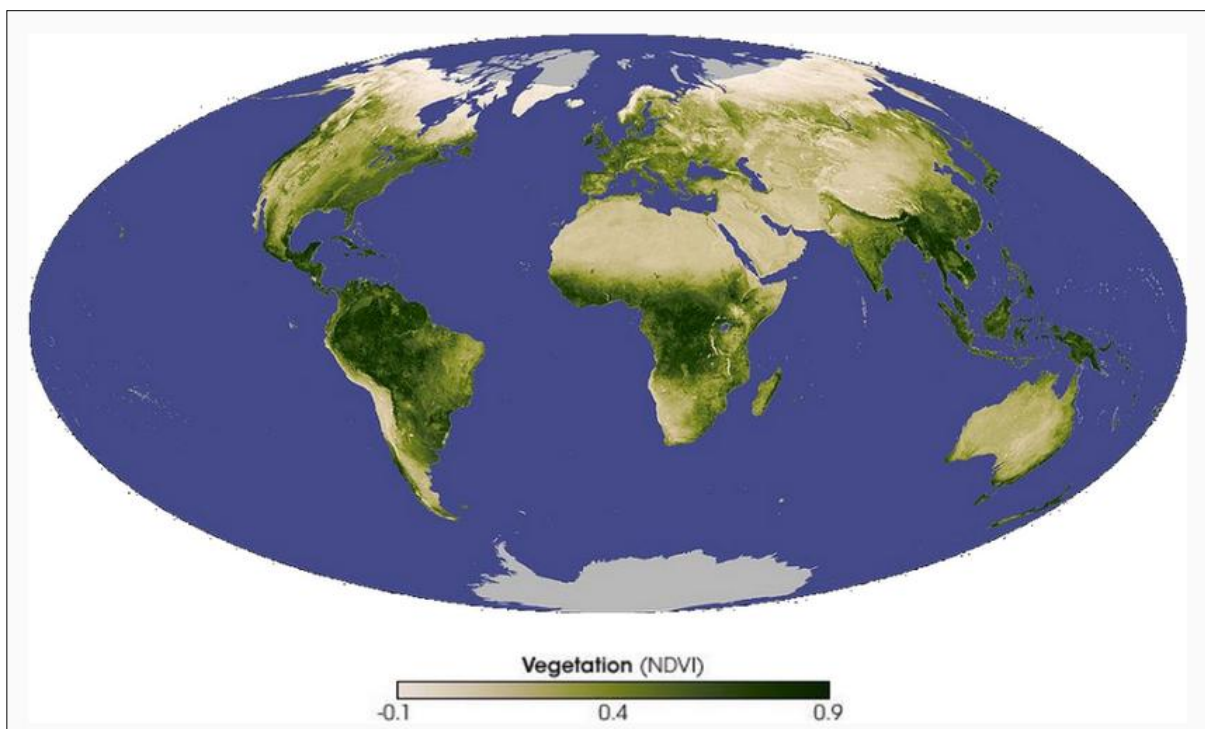


Figure 11: Exemple de la cartographie planétaire de NDVI de novembre 2007 issue des données MODIS (MOD13Q1)
(Source : <http://www.space-awareness.org>)

Les données sont téléchargées pour la Tanzanie à partir du logiciel R. Les produits MODIS étant téléchargés par grille (dalle), il a fallu 3 dalles pour couvrir l'ensemble du territoire. Ainsi à partir de ModisDownload, les images sont archivées de 2001 à 2013. L'outil MODIS Reproject Tool (MRT) permet ensuite la mosaïque des images téléchargées et la reprojection au système de coordonnées correspondant à la Tanzanie. Comme le format des images source en LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center) est HDF (Hierarchical Data Format), cet outil permet également de les convertir en d'autres formats (Geotif, dans notre cas).

1.1.3 - Les données climatiques

1.1.3.1 - Données d'estimation des pluies tropicales par satellite (TRMM)

La Tropical Rainfall Monitoring Mission (TRMM), est un projet entre la NASA et l'agence spatiale japonaise JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) dont l'objectif était de fournir des estimations de précipitations et d'émissions de chaleur latente à l'échelle tropicale, données particulièrement importantes pour la compréhension du climat terrestre. En effet, les tropiques sont couverts à 75% par les océans, les précipitations dans cette région ne peuvent être mesurées indirectement que par satellite (Simpson et *al.*, 1996). L'imageur hyperfréquence (TMI) du satellite TRMM, qui mesure les pluies tropicales, est un capteur hyper spectral passif conçu pour fournir des données quantitatives sur la pluviosité recueillie dans un large couloir de fauchée. En mesurant soigneusement les quantités minimales d'énergie hyperfréquence émises par la Terre et son atmosphère, le TMI peut quantifier la vapeur d'eau, l'eau nuageuse et l'intensité des précipitations dans l'atmosphère. L'algorithme de traitement TRMM fournit les estimations de précipitations à une résolution de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ depuis l'espace (Huffman et *al.*, 2007 ; Arvor et *al.*, 2006). Les précipitations mondiales sont mesurées toutes les trois heures, et les accumulations totales et moyennes sont présentées sur une base quotidienne, hebdomadaire ou mensuelle (Huffman et *al.*, 2007).

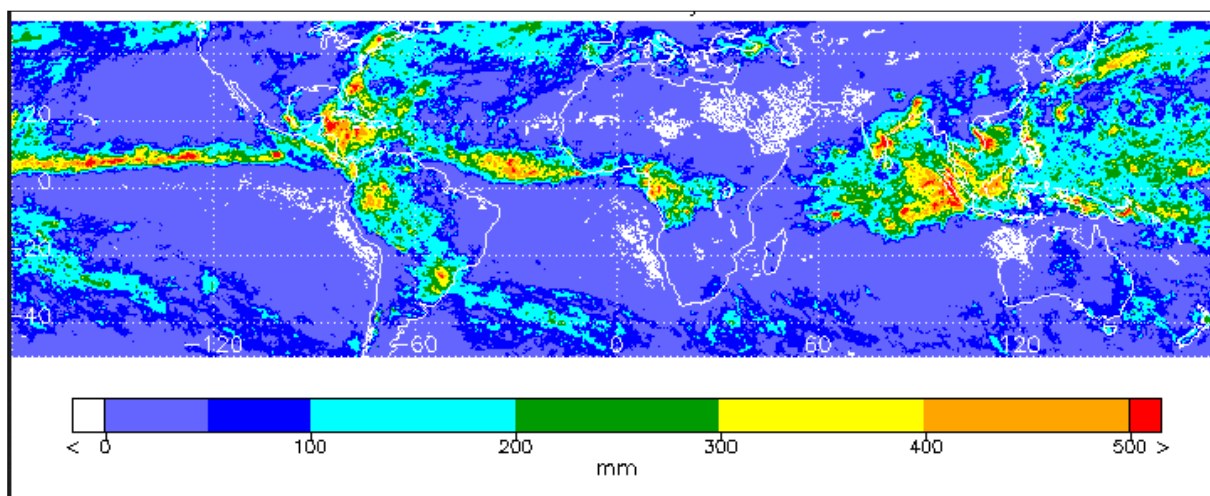


Figure 12: Exemple de cartographie du cumul pluie mensuel (mm) de TRMM 3B43 à 0.5° de résolution entre octobre 2005 et novembre 2005 (source : https://disc.gsfc.nasa.gov/services/opensap/TRMM/07_07_other_Data_Source_3B_43)

Dans cette étude, parmi l'ensemble des bases de données TRMM pré-calibrées et/ou pré analysées, les données utilisées sont les synthèses mensuelles (TRMM 3B43) acquises depuis 2001 à une résolution spatiale de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Il s'agit, à l'heure actuelle, d'un des meilleurs produits disponibles à cette résolution spatiale pour la cartographie des pluies entre 50°N et 50°S (Arvor et *al.*, 2008).

Les données TRMM mensuelles sont téléchargeables sur le site de la NASA gratuitement (<https://mirador.gsfc.nasa.gov/>), pour la période 2001-2013. Malgré leur résolution spatiale assez faible (0.25°), elles conviennent à spatialiser et observer les variations saisonnières des pluies en Tanzanie.

1.1.4 - Les images hautes résolutions spatiales

Pour des analyses à une échelle locale, la très haute résolution spatiale est privilégiée dans cette étude. Nous présentons ainsi les images à très haute résolution spatiale qui serviront à analyser les états de changements de surfaces. Il s'agit des données LANTDSAT et SPOT.

1.1.4.1 - Données LANDSAT

Le programme LANDSAT est le premier programme spatial d'observation de la Terre dédié à des fins civiles, sept satellites LANDSAT ont été lancés entre 1972 et 1999 et un huitième le 11 février 2013. Les archives des satellites LANDSAT ont permis de capturer plusieurs millions d'images (NASA, 2002 ; Chander *et al.*, 2009). Celles-ci constituent des ressources uniques pour l'étude des changements climatiques, l'utilisation des sols, la cartographie, la gestion de l'habitat etc. Les images LANDSAT ont une résolution variable, partant de 120 à 15 mètres. Les images LANDSAT sont téléchargeables sur le site de la NASA: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Tableau 5: Caractéristiques des images LANDSAT ETM+ (Source : <https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>)

Bandes ETM+	Bandes spectrales	Résolution spatiale (m)	Longueur d'onde (µm)
Bande 1	Bleu	30	0,45-0,52
Bande 2	Vert	30	0,52-0,6
Bande 3	Rouge	30	0,63-0,69
Bande 4	Proche infra rouge	30	0,75-0,9
Bande 5	Moyen infra rouge	30	0,5-1,7
Bande 6	IR thermique/lointain	60	10,4-12,5
Bande 7	IR moyen	30	2,08-12,5
Bande 8	Panchromatique	15	520-900 nm

1.1.4.2 - Données SPOT

Depuis le premier lancement du satellite SPOT1 en 1986 (Ariane 1) et le dernier SPOT 6/7 en 2015, les satellites SPOT représentent désormais une référence en matière de télédétection civile. Ils permettent de découvrir des objets d'une dizaine de mètres (de quelques mètres avec SPOT 6) sur chacune des images de 60 kilomètres de côté. Leurs capacités de visée oblique autorisent l'observation répétée d'une même région sans attendre d'en repasser à la verticale, Le dernier né de la génération des satellites SPOT est SPOT 6/7 et a été lancé le 9 septembre 2012 de la base spatiale de Kourou¹. Il diffère des précédents satellites SPOT par une meilleure résolution de prise de vue des capteurs haute résolution visible et proche infrarouge puisque les deux instruments jumeaux acquièrent des images multi-spectrales avec une résolution de 6 m.

L'image SPOT acquise dans notre étude est une image récente SPOT 6 de 2015. Elle a été fournie par la station de réception des données satellites de l'Océan Indien (SEAS-OI). Les principales caractéristiques de cette image SPOT 6 sont présentées dans le Tableau 6 suivant :

¹ Le Centre spatial guyanais ou CSG est une base de lancement française et européenne, située à Kourou en Guyane française qui a été mise en service en 1968

Tableau 6: Caractéristiques des images SPOT 6

Mode	Bande	Bande spectrale	Résolution
Multispectral	Bleu	0,455 – 0,525 μm	6m x 6m
	Vert	0,530 – 0,590 μm	6m x 6m
	Rouge	0,625 – 0,695 μm	6m x 6m
	Proche IR	0,760 – 0,890 μm	6m x 6 m
Panchromatique	PAN	0,455 – 0,745 μm	1.5m x 1.5m

L'ensemble des images satellites utilisées dans l'étude est synthétisé dans le Tableau 7.

Tableau 7: Récapitulatif des images satellites de l'étude

Satellite	Période couverte	Nombre total d'images
TRMM (0.25°)	2001-2013	144
MODIS (250m)	2001-2013	276
LANDSAT (30m)	1995, 2009, 2014,2016	4
SPOT 6 (6m)	2015	1

1.2 - Autres données

1.2.1 - Données d'occupation du sol 2005 de Tanzanie (GLOBCOVER)

Pour avoir une idée globale de l'état de surface de la Tanzanie, nous avons eu recours aux données d'occupation de sol disponibles gratuitement sur internet. Les données ont été acquises à partir du Globcover de résolution spatiale de 300 m publié en 2008 par l'ESA (<http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer>). Le Globcover convient à des grands territoires comme la Tanzanie. En effet, il est actuellement l'une des meilleures archives sur la couverture terrestre à l'échelle mondiale (FAO, 2009). Les données ont été téléchargées sur le site de la FAO en format shapefile (http://www.glcg.org/databases/lc_gc-africa_en.jsp).

On distingue 22 grandes classes d'occupation de sol réparties sur l'ensemble du pays (Figure 13). La distribution des classes se fait selon la zone géographique. Ainsi le centre du pays est dominé par la végétation de types herbeux (savane, prairie), tandis que le sud est constitué de végétations arborées (forêt dense, mosaïque de forêt...) et enfin l'est est plutôt constitué des zones agricoles.

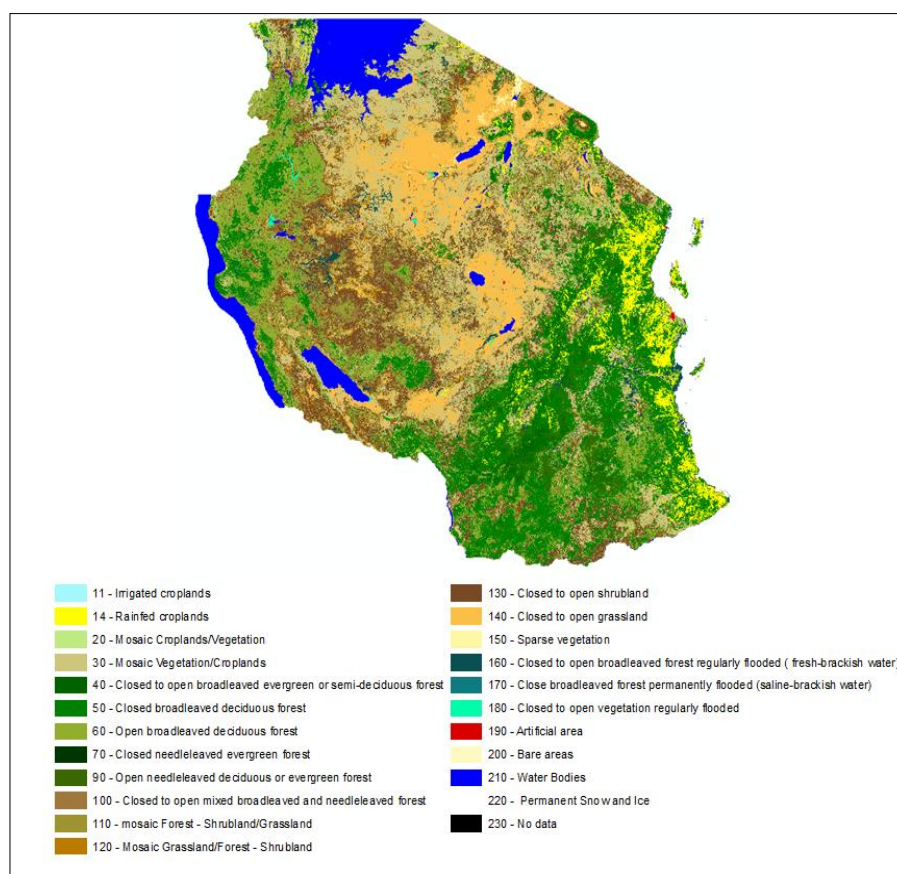
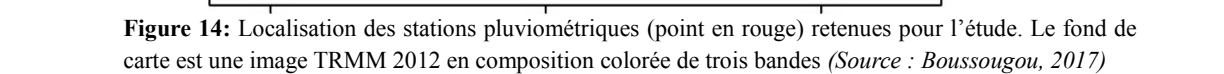


Figure 13: Etat de surface de la Tanzanie en 2005

(Source : http://www.glcg.org/databases/lc_gc-africa_en.jsp)

1.2.2 - Données pluviométriques issues des stations au sol

Pour valider les données d'estimation de pluie par satellites (TRMM), nous avons récolté sur le terrain les données de pluies pour 11 stations pluviométriques. Les données *in situ*



1.2.4 - Les données de terrain GPS

Les données GPS collectées (Figure 15) sont des données des différents habitats observés sur le terrain. Elles renseignent sur la localisation exacte des habitats, avec des photos pour mieux apprécier les classes d'occupations de sol. Ce sont des données qui servent de base pour la validation des classifications des images satellitaires du site d'étude. Cette partie sera plus détaillée dans le chapitre concerné.

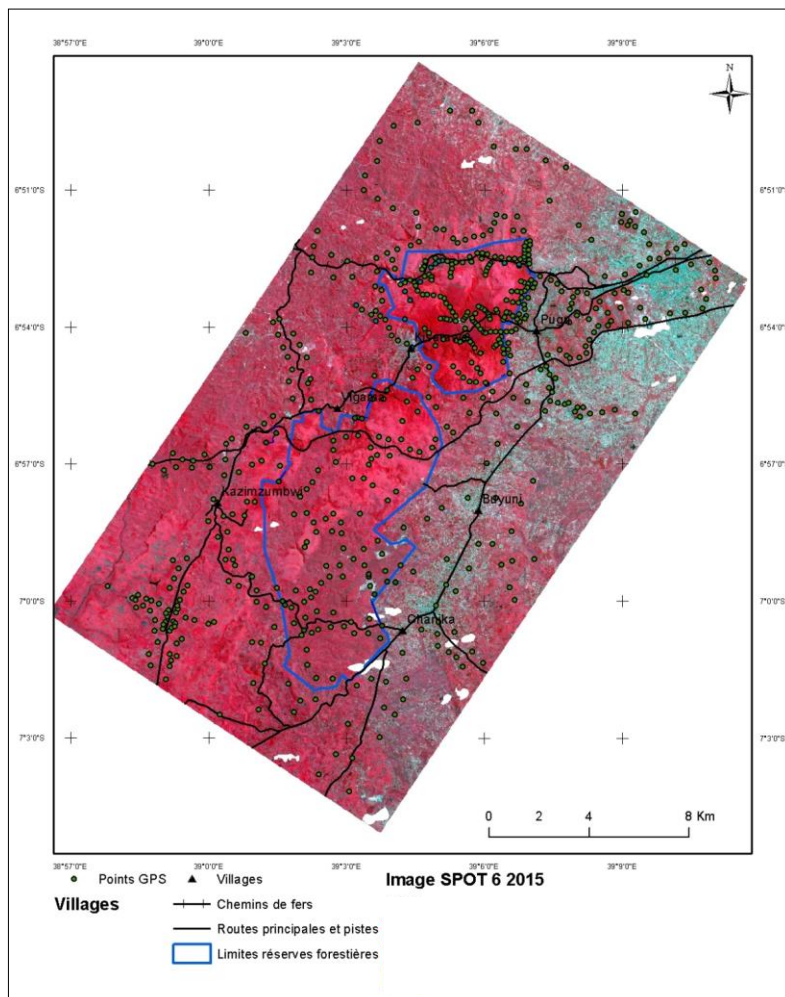


Figure 15: Répartition des relevés GPS établis lors de deux missions terrain réalisées en 2015 et 2016. Fond de carte : Image SPOT 6 en composition colorée fausse couleur. En rouge foncé, on retrouve la forêt dense ; en rouge clair la végétation dégradée et végétation arbustive ; en cyan la zone urbaine, en gris les sols nus, en blanc le masque nuage (*Source : Boussougou, 2017*)

D'autres types de données en format SIG (shapefile) ont été utilisées. C'est le cas notamment des couches vecteurs sur les routes, limites des réserves forestières, habitations ou encore les chemins de fer. Nous avons également utilisé les données d'altitudes en format raster (SRTM : Shuttle Radar Topography Mission).

1.3 - Méthodologie générale de l'étude

Les données multisources (climatiques, satellitaires, socio-économiques) acquises dans cette étude, nous amènent à adopter une méthodologie interdisciplinaire. Nous présentons dans cette partie la méthodologie générale de chaque objectif fixé de l'étude. Une méthodologie plus détaillée des chapitres sera présentée dans chaque début de partie spécifique.

Nous avons choisi de commencer par la présentation de la méthodologie générale de l'objectif 1 de l'étude qui porte sur :

→ *Le suivi des relations existantes entre la pluie et le couvert végétal sur la période 2001 à 2013 à l'échelle nationale (Tanzanie).*

La Tanzanie est un vaste territoire où les réseaux de mesures de données environnementales sont difficiles à pérenniser à cause notamment des coûts d'entretien élevés. Les images de télédétection basse résolution spatiale semblent être l'alternative la plus efficace et moins coûteuse pour les autorités pour combler ce déficit de données. Les images à basse résolution spatiale TRMM et NDVI MODIS seront donc privilégiées dans cette partie de l'étude.

Notons que cette étude repose sur l'hypothèse d'une *vulnérabilité de plus en plus accrue de la végétation du fait des modifications du régime des précipitations enregistrées au cours de douze dernières années.*

Pour mener à bien cette étude, il importe d'abord d'actualiser la connaissance des paramètres du climat en Tanzanie, en particulier la quantité de pluie et sa répartition spatiale au long de l'année. Tout aussi importante est l'étude de l'évolution tendancielle et fréquentielle des données climatiques pour les plus longues séries d'observations disponibles dans la zone d'étude. Les données satellite d'estimation des pluies (TRMM) seront utilisées pour caractériser les précipitations du pays. Le traitement de ces images par des méthodes statistiques (moyennes, écart-type, analyse en composante principale...) permettront la spatialisation de la distribution des pluies en Tanzanie, mais aussi des analyses et observations des variations saisonnières, annuelles et interannuelles des précipitations.

En parallèle, nous analyserons à partir de l'indice de végétation normalisé (NDVI) du capteur MODIS la variabilité annuelle et saisonnière pour les groupes de végétaux en rapport avec la carte d'occupation du sol du pays. On espère observer les changements enregistrés dans le NDVI et donc dans la couverture végétale pour la période d'observation 2001-2013. En effet, L'indice de végétation normalisé (NDVI MODIS) est un bon indicateur pour caractériser les états de surface. Plusieurs paramètres végétatifs permettront également de suivre la variabilité saisonnière interannuelle de la végétation, c'est par exemple les dates de début et fin, la durée de la saison végétative.

Enfin les effets des précipitations sur le couvert végétal sont analysés à partir des corrélations existant entre les deux paramètres (pluie, NDVI). Il s'agira de montrer les différentes corrélations entre les groupes de végétaux et la variabilité des pluies. De même, il sera question de trouver s'il existe un temps de latence de réaction pour les types de végétation, c'est-à-dire un temps de réponse (de 0, 1,2 ou 3 mois) entre le moment où il y a apparition des pluies et la réaction des plantes.

Pour atteindre ce premier objectif, plusieurs prétraitements, traitements et analyses sont menés.

1.3.1 - Prétraitements des données NDVI MODIS et TRMM

L'utilisation des images satellitaires de télédétection demande, une étape très importante avant tout traitement des images : c'est l'étape de prétraitement des images, elle consiste à harmoniser l'ensemble des images dans un même format et système de coordonnées pour permettre des meilleurs traitements et analyses.

C'est pour cette raison que l'ensemble des images utilisées dans toute l'étude a subi un certain nombre de prétraitements avant leur utilisation. Pour cette partie, sont décrites les prétraitements des images à basse résolution spatiale NDVI et TRMM. Les prétraitements ont été réalisés en parallèle.

1.3.1.1 - Création de séries temporelles de NDVI et de TRMM

Dans un premier temps les données (NDVI, TRMM), ont été téléchargées afin de constituer des séries temporelles. Les étapes sont décrites ci-dessous :

- ➔ Les produits NDVI -MODIS sont téléchargés par dalle (Figure 16). Trois dalles par mois ont été nécessaires pour couvrir l'ensemble du pays. Pour accélérer le prétraitement, nous avons eu recours au logiciel R. Dans R, nous avons utilisé un package afin de mettre en place un script. Ainsi, dans un premier temps les données ont été archivées en utilisant la fonction « ModisDownload », ensuite la fonction « Reproject Tool » (MRT) a permis de faire des mosaïque des images téléchargées et reprojeter l'ensemble des images au système de coordonnées correspondant à la Tanzanie. Comme le format des images source en LP DAAC est HDF, cet outil permet également de les convertir en d'autres formats (Geotif dans notre cas).

L'ensemble des images téléchargées constitue une base de données de 276 images NDVI MODIS (soit 23 images par an en raison de 2 images par mois). La compilation des images pour créer la série temporelle, puis l'extraction des contours de Tanzanie a été réalisé avec le logiciels Envi (avec outil layer stacking) et le logiciel Arcgis (avec l'outil découper).

- ➔ Les images d'estimation de précipitation par satellites (TRMM) par contre, ont été directement téléchargées à partir de l'outil disponible sur le site de la NASA pour la même période (2001-2013). Les images sont téléchargées au format HDF, mensuellement sur toute la bande subtropicale en raison d'une image par mois, soit 144 images sur la période d'observation. L'extraction de la zone d'étude (Tanzanie), puis la création de la série temporelle ont été faites sur le logiciel Envi avec l'outil layer stacking. Les images ont ensuite été reprojétées dans le système de coordonnées adapté à la Tanzanie, c'est-à-dire WGS84, UTM 37 S.

La série temporelle d'image est constituée de 144 images, à raison d'une synthèse mensuelle par mois (Figure 17).

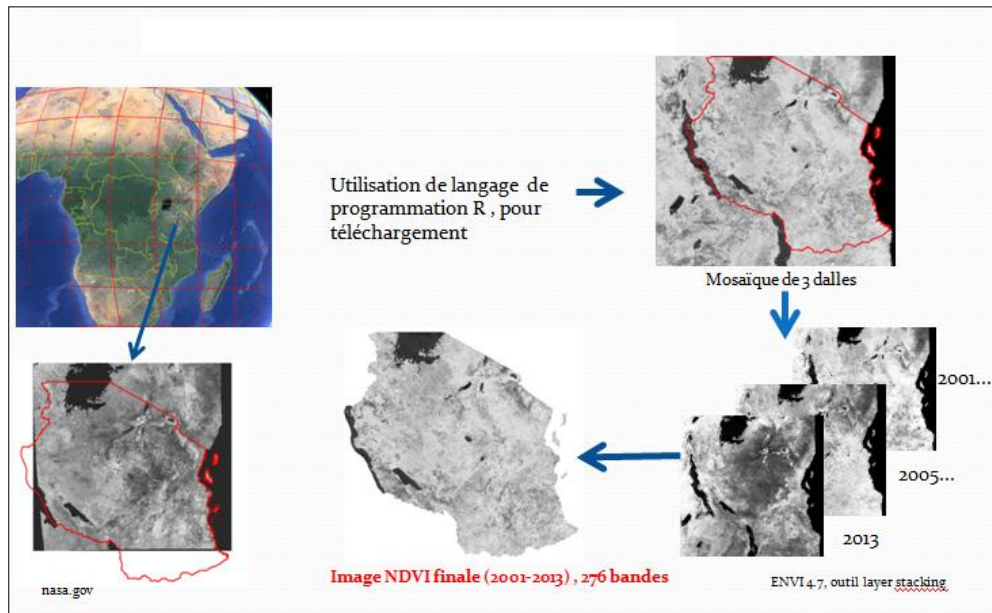


Figure 16: Etape de la création de la série temporelle NDVI sur la période 2011-2013. A gauche le téléchargement d'une image NDVI MODIS via le site de la NASA par dalle (une portion du sud et de l'ouest manque à l'image finale), à droite le téléchargement effectué à partir de R qui englobe toute la Tanzanie. L'image finale est constituée de 276 bandes, chaque bande représente une image composite de 16 jours de NDVI (Source : Boussougou, 2017)

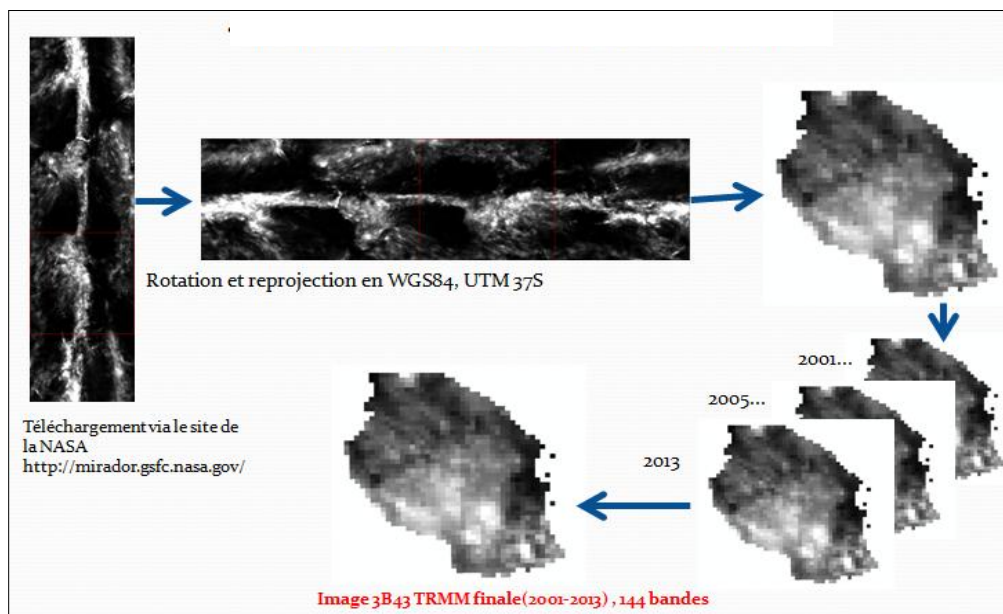


Figure 17: Etape de la création de la série temporelle de précipitation TRMM. Etape de téléchargement via le site de la NASA, puis une rotation et projection au système de coordonnées de la Tanzanie ; ensuite une extraction de la Tanzanie et enfin une compilation des images. L'image finale comporte 144 bandes (soit une image chaque mois sur la période 2001-2013) (Source : Boussougou, 2017)

1.3.1.1.1 - Création des profils temporels de NDVI

Cette étape de prétraitement consiste à extraire les profils temporels de NDVI des grandes classes de végétation du pays. Ainsi seront extraits les profils temporels des grands ensembles végétaux en accord avec la carte d'occupation du sol de l'ensemble du pays (Globcover) (Figure 18).

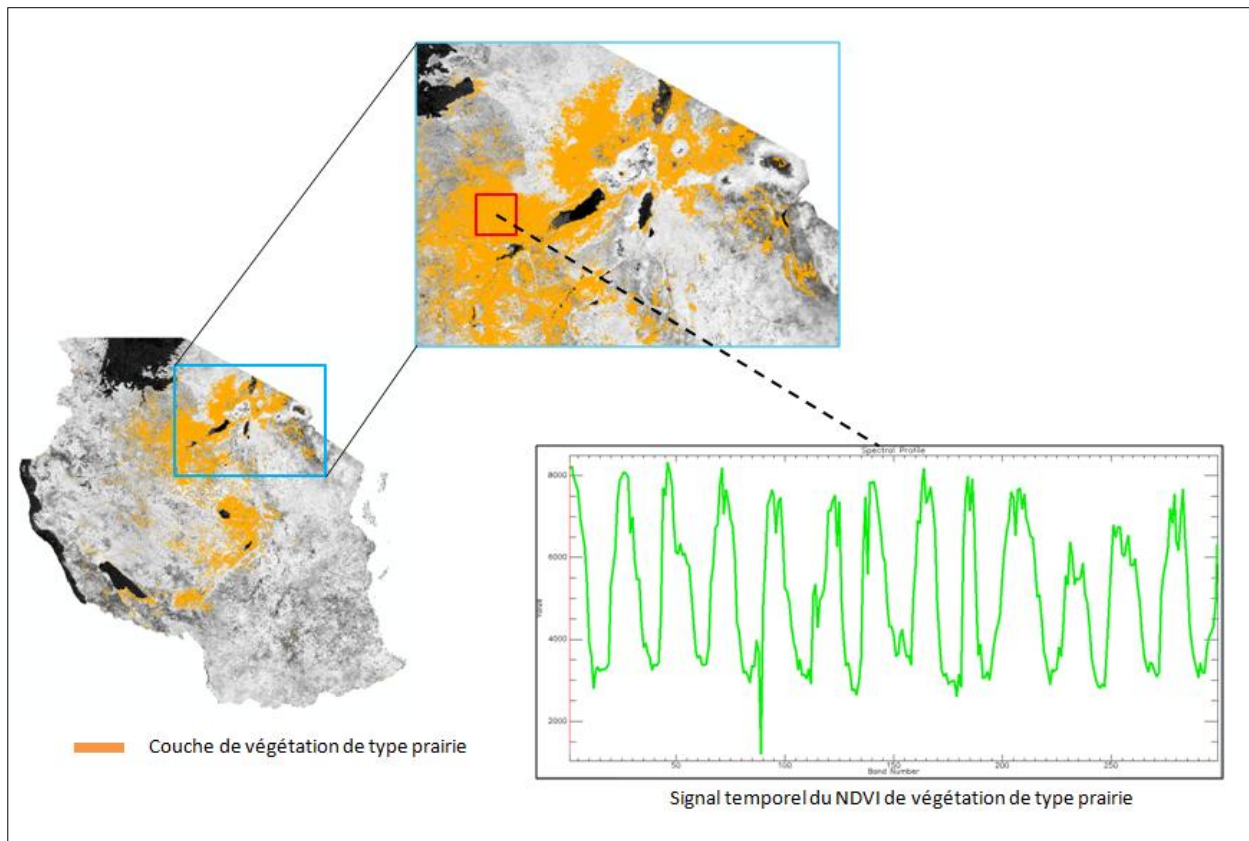


Figure 18: Exemple d'extraction de profil temporel de NDVI MODIS d'un type de végétation (prairie) à partir de la série d'image NDVI MODIS. La courbe en vert représente le signal du NDVI de prairie au nord-est de Tanzanie sur la période 2001-2013 (Source : Boussougou, 2017)

1.3.2 - Traitements des images NDVI MODIS et TRMM

1.3.2.1 - L'analyse statistique de la dynamique spatio-temporelle (NDVI, Pluie) : somme, moyenne, coefficient de variation, classification ascendante hiérarchique (CAH)

Une fois les images prétraitées, les images sont traitées par diverses méthodes statistiques. Nous donnons ici, une présentation sommaire des principales méthodes de calcul utilisées.

1.3.2.2 - L'analyse statistique de la dynamique spatio-temporelle (NDVI, Pluie)

La première partie des traitements des images basse résolution consiste à faire une analyse statistique descriptive (analyse de position et de variation) des valeurs des pixels des images. Ainsi sont calculés sous forme image la somme, la moyenne, l'écart-type, le coefficient de variation de chaque série d'image. Les formules utilisées s'expriment ainsi :

- Somme = $\sum_{j=1}^N x_j$
- Moyenne ($\bar{x}$) = $\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j$

- Variance $(x + a)^n = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (x_i - \bar{x})^2$

X_j =valeur du pixel

N = nombre de bandes qui correspond au nombre d'images de chaque série pour l'étude de la dynamique interannuelle de 2001 à 2013. Ces formules de base permettent de calculer l'écart-type et par conséquent le coefficient de variation spatiotemporel des pixels.

- Coefficient de variation (CV) $= \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100$

Avec σ l'écart-type de la moyenne et $\bar{x}$ la moyenne de la série d'image

1.3.2.3 - Classification végétale par la méthode de la classification hiérarchique ascendante du NDVI MODIS (CAH)

Il existe de nombreuses techniques statistiques visant à partitionner une population en différentes classes ou sous-groupes. La classification ascendante hiérarchique (CAH) (Kalkstein et al., 1987) est l'une d'entre elles. Elle a pour objectif de construire une suite de partitions emboîtées des données en n classes, $n-1$ classes,..., 1 classe (Lebarbier, 2006).

Effectuer une CAH consiste donc à effectuer une partition en plusieurs sous-ensembles tels que tous les éléments de la population soient dans un sous-ensemble et un seul. Le choix d'un indice d'agrégation (distance entre groupes ou entre un individu et un groupe) s'effectue en plusieurs étapes (Djoufack, 2011):

- mesurer les distances interindividuelles (calcul des distances selon une métrique)
- déterminer la plus petite d'entre elles (calcul du minimum)
- regrouper ces deux individus entre eux (calcul du barycentre)
- recalculer les distances interindividuelles sur $n-2$ individus plus 1 groupe, et ainsi de suite.

On recense un grand nombre de critères d'agrégation entre autres: le "single linkage" (distance minimum) ; le "complete linkage" (distance maximum) ; la moyenne non pondérée des groupes associés; le centroïde non pondéré des groupes associés ; la méthode de Ward. Ce dernier critère a été pris en compte parce que c'est une méthode du moment d'ordre 2 qui se distingue des autres par sa capacité à minimiser la somme des carrés de tous les couples de classes pouvant être formés à chaque étape. En d'autres termes, elle utilise une analyse de la variance approchée pour évaluer les distances entre classes, et se justifie bien lorsque la "distance" entre les individus est le carré de la distance euclidienne.

En coupant l'arbre (dendrogramme) au niveau d'un saut important de l'indice d'agrégation, on peut espérer obtenir une partition de bonne qualité car les individus regroupés en-dessous de la coupure sont proches, alors que ceux regroupés après la coupure sont éloignés.

1.3.2.4 - Caractéristique de la végétation : date de début, fin et longueur de saison végétative

Selon plusieurs auteurs l'un des paramètres les plus sensibles à la variabilité interannuelle du climat et excellent descripteur de l'activité végétale au cours de l'année est la durée de la

saison végétative, incluant les dates du début et de la fin de la période phénologique (DO, 2014). Plusieurs méthodes mathématiques ont été développées pour l'analyse des séries radiométriques permettant de déterminer les paramètres du cycle de la végétation (Jönsson et Eklundh, 2004 ; Eklundh et Jönsson, 2011) et sont intégrés dans de nombreux logiciels statistiques. Le logiciel TIMESAT développé par Eklundh et Jönsson est particulièrement utilisé pour la détermination de ces paramètres. Il propose des filtres et fonctions (moyenne gaussienne, loi logistique, filtres de Savitzky Golay) qui prennent en compte des artefacts dus à la nébulosité et ainsi retrouver les dates de début et de fin de saison (Figure 19). Dans notre étude la méthode de la moyenne gaussienne est utilisée car fournissant les meilleurs résultats. De nombreuses études ont utilisé cette méthode pour caractériser la variabilité saisonnière et interannuelle du cycle végétal à l'échelle du continent Africain (Eklundh et Olsson, 2003 ; Olsson *et al.*, 2005; Hickler *et al.*, 2005 ; Seaquist *et al.*, 2006, Heumann *et al.*, 2007; Seaquist *et al.*, 2009) ou encore le suivi des pressions anthropiques opéré par le biais des saisons d'incendies de végétation (Le Page *et al.*, 2010).

Les profils temporels de NDVI des types de végétations extraites sont utilisés dans cette partie, après lissage des courbes afin de déterminer et caractériser les saisons végétatives.

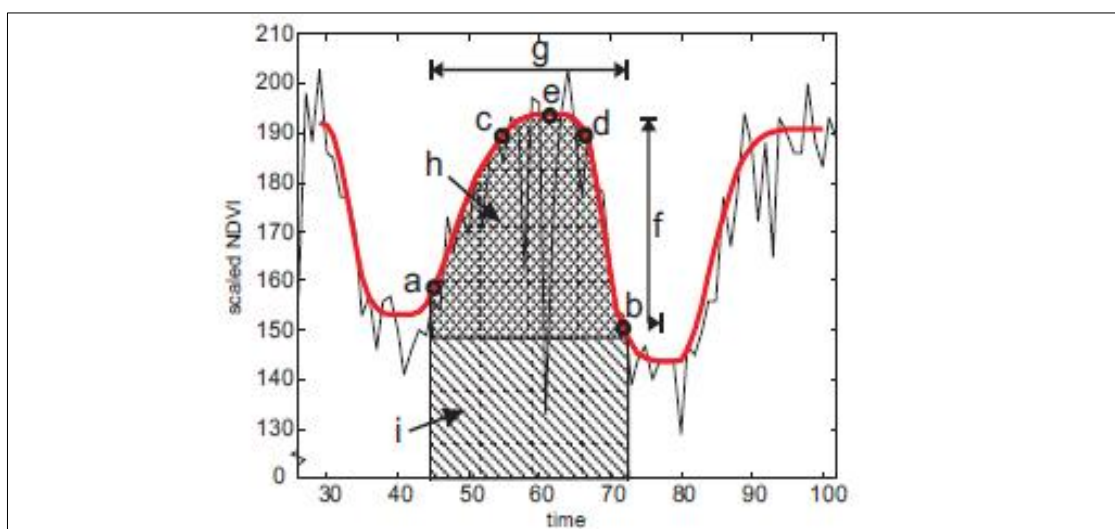


Figure 19: Paramètres évalués sur le logiciel TIMESAT avec en (a) et (b) le début et la fin de saison végétative, en (c) et (d) le niveau 80% de la saison, en (e) la valeur maximale, en (f) l'amplitude de la saison, en (g) sa longueur et en (h) et (i) la surface représentant l'intégrale de la saison végétative sur la courbe.
Source: Jönsson et Eklundh (2004)

1.3.2.5 - Les tests de corrélation et de significativité statistiques

1.3.2.5.1 - Le test d'homogénéité de Mann-Kendall

Le test de Mann-Kendall sert à déterminer avec un test non paramétrique si une tendance est identifiable dans une série temporelle qui comprend éventuellement une composante saisonnière. Ce test de tendance non paramétrique est le résultat d'une amélioration du test d'abord étudié par Mann (1945) puis repris par Kendall (1975) et finalement optimisé par Hirsch (1982) de façon à prendre en compte une composante saisonnière. L'hypothèse nulle H_0 de ces tests est qu'il n'y a pas de tendance. Les trois hypothèses alternatives de tendance négative, non nulle ou positive peuvent être choisies. Les tests de Mann-Kendall s'appuient sur le calcul du tau de Kendall mesurant l'association entre deux échantillons et lui-même

basé sur les rangs à l'intérieur des échantillons. La statistique S de Kendall et sa variance sont données par :

$$S = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{Sgn}(x_j - x_i)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

Où n est le nombre de données de la série, et les x_i ($i=1 \dots n$) sont les observations, supposées indépendantes.

Le test de Mann-Kendall avec saisonnalité est adopté ici pour sa robustesse (Kundzewicz et Robson, 2004; Yue et Pilon, 2004; Chaouche et *al.*, 2010; Lopez et Leynet, 2011). Ici, les données mensuelles ayant une saisonnalité de 12 mois, on ne va pas chercher à savoir s'il y a une croissance au global sur la série, mais simplement si d'un mois de janvier à l'autre, d'un mois de février à l'autre, et ainsi de suite, il y a une tendance. Pour ce test, on calcule d'abord l'ensemble des taus de Kendall pour chaque saison, puis on calcule un tau de Kendall moyen. La variance de la statistique peut être calculée en faisant l'hypothèse que les séries sont indépendantes (par exemple les valeurs des mois de janvier et des mois de février sont indépendantes) ou dépendantes, ce qui requiert le calcul de covariances.

1.3.2.6 - Analyses en Composante Principale des précipitations TRMM (ACP)

L'Analyse en Composante Principale est une technique mathématique qui permet de détecter les dépendances statistiques entre un grand nombre de variables quantitatives. C'est une méthode d'analyse de données descriptive qui a pour objectif la réorganisation de grands tableaux de données et la hiérarchisation de l'information (Arvor et *al.*, 2008). L'utilisation d'une ACP sans rotation ici, permet avec les 12 années complètes et homogènes d'observations TRMM 3B42 d'envisager l'étude des modes de variabilité interannuelle des précipitations en Tanzanie.

1.3.2.7 - Détermination des années sèches et humides : Indice de Nicholson

L'indice de Nicholson (Hoopingarner et *al.*, 1988) apparaît comme une variable centrée et réduite. Cette méthode permet de suivre les fluctuations des régimes pluviométriques et hydrologiques dans un territoire donné.

Équation 2: Indice de Nicholson

$$I = \frac{x_i - \bar{X}}{\sigma}$$

Avec : X_i = hauteur de pluie en mm (ou débit en m^3/s) de l'année i ; $\bar{X}$ = hauteur de pluie en mm (ou débit en m^3/s) moyenne sur la période d'étude ; σ = écart type de la hauteur de pluie (ou débit) sur la période d'étude.

1.3.2.8 - Le coefficient de corrélation (r)

Le coefficient de corrélation linéaire (r), permet de mesurer l'intensité d'une dépendance

linéaire entre deux variables (Saporta, 2006). Soient D_y et D_x les droites de régression (ou ajustement affine) de y en x et de x en y . ces deux droites sont confondues lorsque leurs coefficients directeurs a et a' sont non nuls et que $aa' = 1$, c'est à dire lorsque le nombre r_{xy} défini par :

Équation 3: Coefficient de corrélation

$$R_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

Tel que $r_{xy}^2 = 1$, sachant que $\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$ et $\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$

Où σ_y , et σ_x sont les écarts types de D_y et D_x , respectivement.

La significativité statistique de la liaison linéaire est obtenue en utilisant le test de Bravais-Pearson, compte tenu du nombre réel de degrés de liberté des séries. Toutefois, le coefficient de corrélation est souvent transformé en variance expliquée r^2 , mesurant ainsi la part de l'information totale de D_y prise en compte par D_x et exprimée en %.

Note: le coefficient de corrélation est un nombre entre -1 et 1 ; s'il est proche de 1 en valeur absolue, la corrélation est forte ; s'il n'est pas suffisamment proche de 1 en valeur absolue il est utile d'envisager d'autres types d'ajustements (non linéaires).

La seconde méthodologie générale présentée ici, concerne le second objectif de l'étude, qui porte sur :

→ Le suivi des modifications de la végétation liées aux activités humaines à une échelle locale de 1995-2015 : les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi

L'évolution de l'impact des pressions humaines sur les aires protégées est basée sur l'hypothèse d'une augmentation des pressions des populations autour des réserves forestières au fil des années.

La dynamique et les changements d'occupations du sol dans les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi et leurs périphéries seront analysés au moyen d'images haute/très résolution spatiale LANDSAT à 30 mètres et très haute résolution spatiale SPOT 6 à 6 mètres.

Les traitements de ces images par des méthodes de classification supervisée (orientée objet) permettront de cartographier les changements d'occupation du sol dans le site d'étude. La recherche des facteurs explicatifs (routes, urbanisation...) de la dynamique d'occupation de sol permettra à l'aide d'analyse multicritère, de donner un poids à chaque variable. Ce qui permettra la production d'une carte de pression anthropique sur le site. Ainsi, cette étude permettra de comprendre le lien entre la dynamique spatio-temporelle des types de paysages et les facteurs humains responsables des changements observés dans les réserves forestières sur la période 1995-2015.

1.3.3 - Prétraitements des images LANDSAT et SPOT de l'étude

Comme pour les images à basse résolution spatiale vu précédemment, les images à haute résolution spatiale LANDSAT et SPOT ont subi avant tous traitements une phase de

prétraitements qui consistait dans un premier temps à apporter des corrections radiométriques et géométriques. Car en effet, le suivi du couvert végétal en télédétection exige que le signal des images soit calibré de manière à assurer la comparaison des données entre elles. Cette étape permet d'une part de corriger les effets perturbateurs de l'atmosphère et d'autre part de prendre en compte le relief et corriger les effets orbitaux du satellite.

1.3.3.1 - Correction radiométrique

Les images sont acquises par différents capteurs et sous des conditions atmosphériques et géométriques différentes. Il apparaît donc important d'apporter des corrections atmosphériques avant toute utilisation afin d'enlever les effets perturbateurs de l'atmosphère qui résultent de deux processus : absorption et diffusion (exercées conjointement par les deux constituants majeurs de l'atmosphère, les gaz et les aérosols). Plusieurs scientifiques ont développé différents modèles qui permettent de corriger ces perturbations du signal reçu par le satellite, allant des méthodes simples basées sur des informations contenues dans l'image à l'exemple du Dark Object Soustraction (DOS) proposée par Song et *al.*, 2001, à des méthodes plus complexes de transfert radiatifs comme SMAC (Rahman et Dedieu, 1994), 6S (Vermote et *al.*, 1997a), MODTRAN (Berk et *al.*, 1999), et ATCOR (Richter, 1996).

Dans notre cas, nous avons utilisé la méthode 6S qui simule la réflectance au sol, Top Of Canopy (TOC), à partir de la réflectance au sommet de l'atmosphère Top Of Atmosphere (TOA), cette dernière étant dérivée du rayonnement mesuré par le capteur.

1.3.3.2 - Correction géométrique

Les images acquises par les systèmes d'observation de la Terre subissent plusieurs déformations d'origine diverse telles que la courbure de la Terre, la variabilité d'altitude du sol, le mouvement de la plate-forme etc., les rendant ainsi non superposables à des cartes (Bonn et Rochon, 1993). Il s'agit ici, d'apporter des coordonnées géographiques précises pour les rendre superposables entre elles et à d'autres données spatiales. Nous avons donc apporté, des corrections géométriques à l'ensemble de nos images. Cette étape demande l'utilisation d'une image de référence, qui ici est l'image SPOT 6 de 2015. Cette dernière image étant fournie orthorectifiée et se superposant parfaitement aux données géographiques existantes du site d'étude, sert de base pour le processus de géo-référencement des images LANDSAT.

Une fois les images géo-référencées et vérifiées à l'œil nu par la superposition des images, une extraction du site d'étude contenant les réserves forestières est effectuée pour limiter la durée de traitement et toute interférence avec les nuages présents dans l'image. Les images satellites LANDSAT ont ensuite été projetés au système de coordonnées de référence de Tanzanie WGS84/UTM, zone 38 S.

1.3.4 - Traitements des images à haute et très haute résolution spatiale LANDSAT et SPOT

1.3.4.1 - La méthode de classification

1.3.4.1.1 - Classification orientée objet

Les images de hautes et très hautes résolutions spatiales sont de plus en plus utilisées pour

la classification des couvertures terrestres, mais la variation spectrale élevée au sein de la même classe, la confusion spectrale entre les différentes couvertures terrestres, et le problème de l'ombre rendent les classificateurs par pixel de moins en moins performants. L'approche de classification orientée objet (COO) est conçue pour traiter le problème de l'hétérogénéité de l'environnement, elle ne traite plus le pixel de manière isolée mais des groupes de pixels (objets) dans leur contexte.

L'approche orientée objet comprend deux étapes principales : la création des objets images, qui est appelée segmentation, et leur classification. La segmentation vise à créer des zones individuellement définies en terme d'homogénéité spectrale, texturale et spatiale (la simplicité géométrique du contour des segments) ou selon des catégories thématiques spécifiques à l'étude. Une fois les objets définis, la classification vise à les regrouper à l'aide d'attributs spectraux (ex : moyenne des niveaux de gris de l'objet), spatiaux (ex : taille de l'objet, critère de forme), structuraux (relation spatiale entre les objets) ou d'autres variables géographiques (ex : altitude, pente, ou densité de population). Le résultat final de l'analyse de l'image dépend grandement de la qualité de la segmentation (Dey et *al.*, 2010; Taubenböck et *al.*, 2006). Au cours des 40 dernières années, environ 4300 algorithmes de segmentation ont été développés et il existe différentes façons de classer ces algorithmes en catégories (Zhang 2006), qui peuvent être divisés en trois groupes: détection des régions, détection des contours (ou arêtes) et méthodes hybrides (Bonn et Rochon, 1992; Cheng et *al.*, 2001; Dey et *al.*, 2010; Guindon, 1997; Zhang, 1997).

1.3.4.1.2 - Validation des classifications

La pertinence et la précision des classifications sont évaluées à l'aide des matrices de confusion (Godard, 2005) entre les données de vérité-terrain et celles des traitements des images satellitaires, par le calcul de l'indice de Kappa (Kenny et *al.*, 2006).

Tableau 9: Exemple de matrice de confusion entre classification et vérité de terrain

Vérité terrain	Classifications			
		forêt	agriculture	sol
	forêt	x	c	e
	agriculture	a	y	f
	sol	b	d	z

L'indice de Kappa est le quotient du rapport entre le nombre de pixels bien classés (diagonale) et le total des pixels sondés. En d'autre terme, il représente le degré d'accord entre les données à classer (observées) et les données de référence (aléatoires).

Équation 4: Formule de l'indice Kappa

$$kappa = \frac{|N \sum_{i=1}^l x_{ii} - \sum_{i=1}^l (x_{i+} \times x_{+i})|}{[N^2 - \sum_{i=1}^l (x_{i+} \times x_{+i})]}$$

Où l = nombre de données à classer et N = nombre total d'observations (données de référence). Le résultat est un nombre réel, sans dimension, compris entre -1 et +1. Il sera d'autant meilleur que la valeur de Kappa est proche de +1.

1.3.5 - Modélisation des zones de pression anthropique par l'Evaluation Multicritères (EMC)

Afin de déterminer et localiser les pressions anthropiques à la périphérie des réserves forestières, nous utiliserons l'Evaluation multicritère (EMC). Ce dernier, est un outil d'aide à la décision développé pour résoudre des problèmes multicritères complexes qui incluent des aspects qualitatifs et ou quantitatifs dans un processus décisionnel (Yager, 1988 ; Diamont et right, 1989 ; Carver, 1991 ; Eastman (1996, 2003) ; Alonso, 1986).

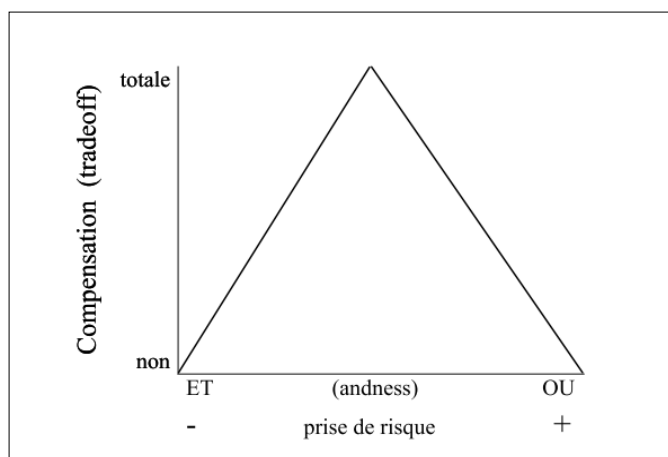


Figure 20: Espace dans l'évaluation multicritère: source Eastman, 2003

1.3.5.1 - Facteurs et contraintes

L'approche EMC fait partie des techniques d'aide à la décision se basant sur l'hypothèse que plusieurs critères influencent l'objectif à atteindre (Paegelow, 2004). Dans l'EMC les critères (variables environnement considérées potentiellement explicatives de l'état de la variable modélisée) se scindent en deux catégories :

Contrainte : un critère binaire. L'objectif, l'état de notre variable occupation du sol, est possible ou ne l'est pas. Rentrent dans la catégorie des contraintes toute décision booléenne du genre limites altitudinales ou des exclusivités du type : forêt impossible sur bâti. L'effet d'une contrainte est qu'elle masque une portion de l'espace. Celle-ci est exclue du traitement ultérieur.

Facteurs : il indique un degré d'aptitude pour l'objectif, c'est un degré de probabilité que l'état se réalise. Les critères se matérialisent sous forme d'images où chaque pixel exprime son degré de probabilité pour l'état considéré de la variable modélisée. Si cette dernière possède n états finis et discrets, nous aurons n images de probabilité pour le facteur considéré. Ces facteurs, en l'occurrence l'altitude, la pente, l'exposition, l'accessibilité, la proximité au même état, la probabilité de leur transition etc. sont exprimés dans les unités différentes (degré, indices,...) qu'il convient d'ajuster selon les diverses techniques : recodage manuel se basant sur les tests statistiques ou encore selon les fonctions d'appartenance par logique floue (Paegelow, 2004).

Les facteurs ajustés sont ensuite pondérés selon leur degré d'influence par la technique de Saaty (1977). Une fois les facteurs ajustés, il faut les combiner. Cette étape est basée sur le choix d'un niveau de prise de risque et d'un niveau de compensation entre facteurs. Le niveau

de prise de risque est approché par un continuum de logique floue (andness) dont les extrémités sont les opérateurs booléens classiques ET (intersection = minimum de risque) et OU (union = maximum de risque). Les possibilités de combinaison décrivent un espace de décision dans le sens de Eastman (1996, 2003) (Figure 20).

1.3.5.2 - La logique floue

Le concept de la logique floue naît des deux théories des sous-ensembles flous (1965) et la théorie des possibilités (Zadeh, 1978 ; 1965). La première théorie débouche sur une fonction d'appartenance et la seconde sur une fonction de possibilité associée à un événement .Elle trouve son emploi notamment dans le cadre de problèmes marqués par une connaissance lacunaire et ou incertaine (Bouchon-Meunier, 1995; Dragicevic et *al.*, 2000) ou encore en tant qu'interface entre un niveau expert et un niveau utilisateur non expert (Paegelow, 2004).

Le principe de la commande floue est présenté dans la Figure 21. Les variables réelles sont traduites en variables floues selon des fonctions d'appartenance (fuzzification). Celles-ci sont traitées par un moteur d'inférence (alimenté par une base de règles) qui produit des variables floues de sortie sur la base d'une fonction d'appartenance. La défuzzification en extrait une variable réelle.

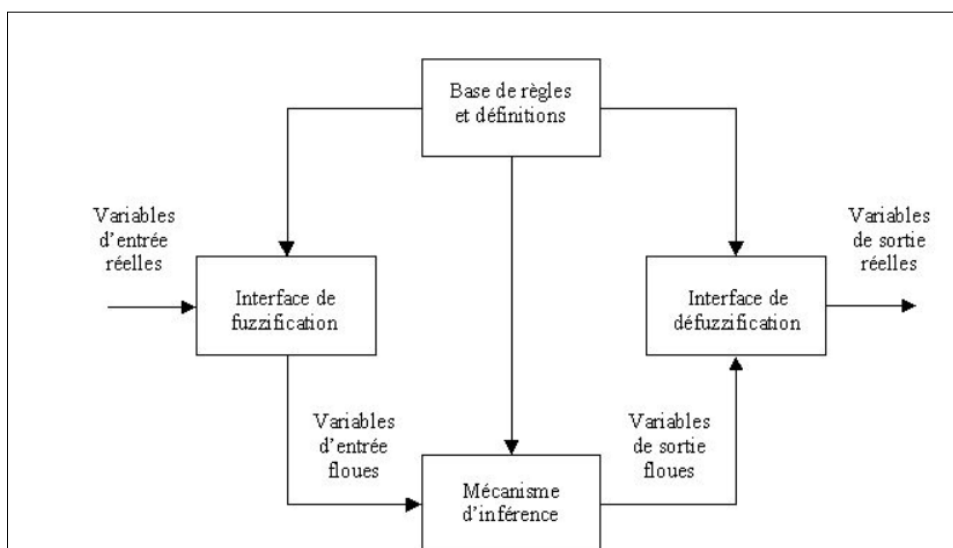


Figure 21 : Principe de la commande flou. *Source Gadrat, 2004*

Le moteur d'inférence utilise des règles d'inférence pour relier les variables floues d'entrée aux variables floues de sortie. Ces règles, définies par le modélisateur, utilisent des opérateurs logiques flous ET, OU, NON dont la signification diffère de la logique booléenne (Tableau 10) qui peuvent être combinés.

Tableau 10: Opérateurs de la logique floue et degré de vérité (fonction d'appartenance): *source: ELAJ, 2004*

Opérateurs	Opérateur sur le degré de vérité des variables
ET	minimum
	produit
OU	maximum
	Valeur moyenne
NON	Complément à 1

1.3.6 - Modélisation prospective LCM

Enfin, la troisième et dernière méthodologie générale présentée concerne le dernier objectif (objectif 3) de l'étude, qui porte sur :

→ L'analyse de risque et scénario futur de vulnérabilité des surfaces forestières face aux intensifications des activités humaines à proximité des aires protégées (réserves forestières Pugu et Kazimzumbwi)

La compréhension de la dynamique des paysages forestiers passe par la connaissance des paramètres qui influencent directement la dégradation des couverts végétaux. L'évolution à long terme des paysages des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi se base sur *l'hypothèse d'une intensification des pressions humaines dans les réserves et leurs périphéries au cours du temps*. Les méthodes de modélisation prospectives permettent désormais de prédire les scénarios futurs de changement après avoir identifié les facteurs qui les influencent.

Avant de présenter le modèle de modélisation prospective qui sera utilisé dans notre étude, nous présentons une synthèse des modèles les plus connus, dans le domaine environnemental permettant de prédire les scénarios futurs.

→ Modèles stochastiques : Il s'agit de modèles probabilistes à événements discrets, c'est-à-dire qui n'évoluent pas de façon continue au cours du temps, mais avec des pas temporels discrets (Coquillard *et al.*, 1997). Les chaînes de Markov font partie des méthodes les plus communément employées afin de prédire des changements entre plusieurs états de catégories (Pontius *et al.*, 2005). Elles ont été largement utilisées afin d'étudier les dynamiques de végétation (Coquillard *et al.*, 1997; Balzter, 2000 ; Paegelow *et al.*, 2005 ; Camacho *et al.*, 2007).

→ Les Automates Cellulaires (AC) : sont une autre forme de modèles stochastiques qui discrétisent un espace continu en une série de cellules. Les études scientifiques faisant usage des automates cellulaires sont nombreuses, en témoigne la synthèse réalisée par Balzter (Balzter *et al.*, 1998). L'apport des AC dans l'analyse des processus écologiques réside dans la considération des interrelations spatiales entre les communautés végétales et les effets de voisinage qui les caractérisent.

→ Les modèles à base d'intelligence artificielle, les modèles multi-agents (ou Systèmes Multi-Agents – SMA) (Bonnefoy *et al.*, 2001 ; Parker *et al.*, 2003 ; Daudé, 2005 ; Ferber, 2006) permettent d'appréhender et de représenter des systèmes complexes et dynamiques en modélisant directement les individus, leurs comportements et leurs interactions.

→ Les réseaux neuronaux artificiels (ANNS) : Il existe plusieurs types de réseaux neuronaux (Lek *et al.* 1999). Mais, nous nous intéressons au système perceptron multi-couche (ou multi-layer feed-forward - MLP). Car, ce dernier est l'une des architectures les plus employées pour l'étude des dynamiques d'occupation et d'utilisation du sol (Lek *et al.*, 1999 ; Mas *et al.* 2004 ; Paegelow *et al.*, 2004). Le MLP permet d'examiner et de modéliser des relations complexes entre plusieurs variables. Sa capacité à appréhender des relations non-linéaires en fait un outil puissant pour l'analyse des processus écologiques (Maestripiéri, Paegelow, 2013).

→ Les modèles empiriques-statistiques spatialement explicites : ils sont employés pour prédire les dynamiques de la végétation notamment dans le domaine des changements d'occupation et d'utilisation du sol (Perry *et al.*, 2008). Le modèle CLUE (Conversion of Land Use and its Effects) a été développé pour prédire et visualiser les dynamiques d'occupation du sol en se basant sur les relations empiriquement quantifiées entre ces dynamiques et leurs facteurs explicatifs (biophysiques et humains) (Veldkamp *et al.*, 1996 ; Verburg *et al.*, 2002). À la différence de CA-Markov, Land Change Modeler qui utilise les chaînes de Markov pour estimer les quantités de changement, le modélisateur doit intégrer les quantités (en pixels) de changement pour chaque année de simulation (Mas *et al.*, sous presse). C'est ce dernier modèle qui sera utilisé dans notre étude, afin de prédire les dynamiques paysagères des réserves forestière de Pugu et Kazimzumbwi. Nous utiliserons LCM (Land Change Modeler).

1.3.6.1 - Justification du choix du modèle LCM

Au cours des dernières années, des études ont été réalisées en utilisant une approche de modélisation de la chaîne CA-Markov à différentes échelles et environnements (Araya et Cabral 2010, Guan *et al.*, 2011, Jokar Arsanjani *et al.*, 2013, Kamusoko *et al.*, 2009). De même récemment, les modèles basés sur les Systèmes Multi-Agents ont été utilisés pour expliquer et simuler les interactions entre l'action humaine et les composants spatiaux (Roy, 2016). Dans ces modèles, les facteurs socioéconomiques, démographiques et les attributs spatiaux sont utilisés avec une composante spatiale pour décrire et simuler un phénomène (Roy, 2016)

Dans notre étude, les variables explicatives topographiques avec plusieurs composantes de l'aménagement du territoire pour simuler les changements d'occupation du sol sans tenir compte d'un attribut spatial particulier tel que la population ou les données socioéconomiques seront utilisées. Par conséquent, nous n'utiliserons aucune approche de modélisation fondée sur les Systèmes Multi-Agents. Nous utiliserons le modèle de changement d'occupation du sol (LCM) d'IDRISI. C'est un modèle basé sur CA-Markov, pour simuler des modèles temporels et spatiaux de changement d'occupation du sol à court et à long terme. LCM est décrit comme étant un puissant outil de modélisation pour simuler des changements avec divers types de couverture terrestre, y compris des études de simulation de croissance urbaine (Landis 1977 ; Pérez-Vega *et al.*, (2012) ; Fuller *et al.*, 2011 ; Khoi (2011)).

Les analyses d'implication (analyse de l'habitat et évaluation telles que l'habitat et la modification de la biodiversité, et la modélisation) et la planification (contraintes et incitations, planification de l'infrastructure, planification des corridors) sont incluses dans le modèle LCM pour diverses applications (Eastman, 2012). Le réseau de neurones Perceptron Multi-Layer (MLPNN), la chaîne de Markov et les modèles de régression sont entièrement intégrés dans LCM. MLPNN est une approche de modélisation très puissante, un système non linéaire basé sur la fonction du cerveau humain, capable de prendre en compte une relation complexe entre les variables entrées (Mas *et al.*, 2004). De nombreuses études ont montré l'efficacité de LCM dans des analyses et simulations des phénomènes tels que la déforestation, étalement urbain (Khoi, 2011 ; Ahmed, 2012 ; Tewolde et Cabral, 2011) en utilisant l'approche de la chaîne de Markov à la couche de Markov (MLPNN-M) Multi-Layer.

Aguejda et Houet (2008) ont utilisé LCM pour simuler l'étalement urbain à court terme de Rennes, et les résultats suggèrent que LCM pourrait être utilisé pour simuler à la fois la croissance urbaine et les multiples changements de couverture terrestre de n'importe quel environnement.

1.3.6.2 - Réseau neuronal

Un réseau de neurones artificiels (ANN) est une méthode statistique non linéaire définie comme un complexe, fonction mathématique qui convertit les données d'entrée en une sortie souhaitée et se compose d'une connexion réseau d'unités de traitement créés sur la base du réseau des neurones du cerveau humain (Eastman, 2012). Les ANNs ont été appliqués avec succès à de nombreux domaines et ont prouvé leur aptitude à résoudre divers problèmes (Mas et *al.*, 2004). Dans IDRISI, le Perceptron Multi-Layer du réseau de neurone (MLPNN) calcule les potentiels de transition de multiples couvertures de terres en fonction de l'information provenant des sites de formation en utilisant plusieurs neurones de sortie appliquant une propagation de l'algorithme DOS (Li et Yeh, 2002). Il présente plusieurs avantages tels que la capacité de modéliser le groupe de transitions et relations complexes entre de nombreuses variables et multiples couvertures terrestres (Eastman, 2012 ; Li et Yeh 2002). Le MLPNN (Figure 22) contient une couche d'entrée, une couche de sortie et une ou plusieurs couches cachées où chaque couche contient des nœuds (ou des neurones) et des couches sont connectées par le biais de poids de connexion. La performance de MLPNN dépend de son architecture (nombre de Couches et nœuds cachés) et sur les paramètres de formation (taux d'apprentissage, momentum et nombre des itérations dans le cas d'un algorithme d'apprentissage de la rétro-propagation). L'exactitude de la formation et le taux est affiché en pourcentage (Eastman, 2012 ; Pérez-Vega et *al.*, 2012). Un fichier HTML est affiché avec des informations sur le processus de formation, y compris le pouvoir relatif des variables explicatives utilisées après avoir terminé le processus de simulation, et des cartes de potentiel de transition sont créées (Eastman, 2012). Cependant, des potentiels de transition avec un taux de précision élevé (plus de 80%) sont recommandés pour une prévision future afin d'obtenir de meilleurs résultats de simulation (Roy, 2016).

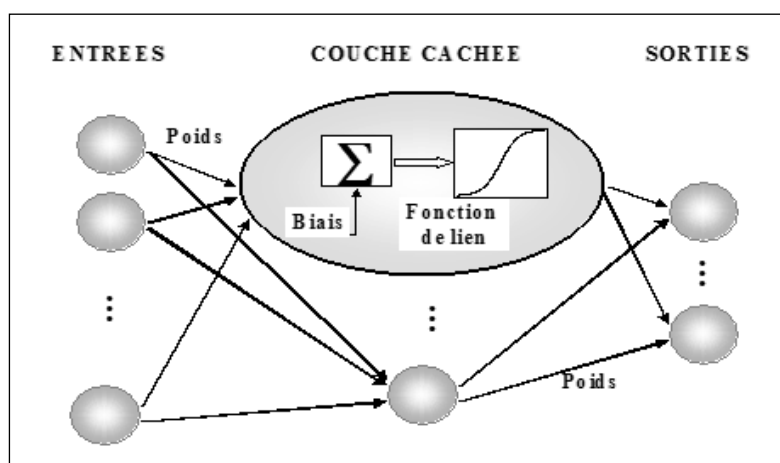


Figure 22: Architecture d'un réseau à une couche cachée (Source : Mas, 2004)

La Figure 22 présente la structure simple d'un MLPNN qui est un réseau de neurones feed-forward (Mas et *al.*, 2004). Les unités de traitement de base sont des neurones ou des nœuds qui sont indiqués comme des cercles et les poids de connexion sont présentés par lignes. Le nombre de neurones (n) dans les couches d'entrée et de sortie est le même et la couche cachée contient $2n + 1$ neurones (Li et Yeh, 2002). Ils ont suggéré que $2n + 1$ neurones cachés peuvent assurer une simulation parfaite et une réduction du nombre de neurones peut entraîner une inexactitude accrue. L'architecture de ce réseau et son fonctionnement sont présentés en détail par M. Paegelow (Paegelow et *al.*, 2004).

Fonctionnement du réseau neuronal : en entrée, la valeur des neurones est celle des variables explicatives du modèle ; chacune de ces valeurs numériques est multipliée par un certain nombre de poids pour être, finalement, additionnée et transformée par une fonction de lien au niveau des neurones de la couche cachée. Enfin, les valeurs numériques des neurones de la couche cachée subissent à leur tour une multiplication par des poids et leur addition donne la valeur des neurones de sortie qui modélisent la variable expliquée. Les poids, généralement notés w , sont choisis lors d'une phase dite d'apprentissage sur un jeu de données test et minimisent l'erreur quadratique de ce jeu de données. Finalement, les réseaux de neurones à une couche cachée sont les fonctions de la forme :

Équation 5: Couche cachée du réseau neuronal

$$\psi_w(x) = \sum_{i=1}^{q_2} w_i^{(2)} g(x^T w_i^{(1)} + w_{i0}^{(1)})$$

x est le vecteur des variables explicatives du modèle, q_2 le nombre de neurones sur la couche cachée, g la fonction de lien de la couche cachée (typiquement g est la sigmoïde $g :$

$x \rightarrow \frac{1}{1+e^{-x}}$), $w^{(1)}$ sont les poids entre la couche d'entrée et la couche cachée et $w^{(2)}$ les poids entre la couche cachée et la couche de sortie. Les réseaux de neurones à une couche cachée permettent d'approcher, avec la précision souhaitée, n'importe quelle fonction continue (ou d'autres fonctions qui ne sont pas nécessairement continues) : c'est ce que l'on appelle la capacité d'approximateur universel et c'est aussi ce qui leur permet de s'appliquer avec une grande efficacité à un grand nombre de modèles.

1.3.6.3 - Chaîne de Markov

La modélisation de la chaîne de Markov (Balzter, 2000 ; Basharin et *al.*, 2004) est une technique de simulation connue sous le nom de modélisation de Markov ou d'analyse de Markov. L'analyse de la chaîne de Markov est une méthode analytique de processus stochastiques ou aléatoires (Balzter, 2000 ; Lopez et *al.*, 2001).

Elle est appliquée dans différentes études géographiques et environnementales: la dynamique de la végétation (Balzter, 2000), la dynamique de l'urbanisation dans les zones agricoles (Muller et Middleton, 1994) ect. Les modèles de Markov créent la relation statistique entre le changement d'occupation du sol et les facteurs environnementaux (Benenson et Torrens, 2004).

Le processus de Markov peut être décrit comme un ensemble d'états, $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ où un état passe successivement à un autre état avec une certaine probabilité à chaque étape (Zhang et *al.*, 2011). La probabilité de passer d'un état à un autre état est appelée une probabilité de transition qui peut être calculée à partir de deux cartes d'occupation du sol de dates différentes (t_1, t_2) (Benenson et Torrens, 2004 ; Jokar Arsanjani et *al.*, 2013). Si l'état initial est S_i , se déplace à l'état S_j dans la période de temps t , alors la probabilité de transition

peut être désignée par P_{ij} et elle donnée pour chaque ensemble d'états ordonnés. Ces probabilités peuvent être représentées sous la forme d'une matrice de transition, P , comme indiqué ci-dessous:

Équation 6: Formule matrice de transition P

$$P = (P_{ij}) = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm} \end{bmatrix}$$

La méthode de la chaîne de Markov est simple et pratique pour des modèles complexes de changements, et modélisation de changements d'occupation du sol à catégorie multiple (Eastman 2012). Elle est combinée avec les SIG pour générer un outil pour projeter différentes catégories de changement d'occupation du sol (Weng, 2002).

Chapitre 2 - Etude des relations pluie et couvert végétal de 2001 à 2013 à l'échelle des grandes zones bioclimatiques de la Tanzanie à partir des images basse résolution spatiale NDVI- MODIS et TRMM

Introduction

Les précipitations représentent l'élément prépondérant de la diversification des paysages forestiers tropicaux (Meneses-Tovar, 2011 ; Brou et *al.*, 2004). En Afrique, la plupart des études sur les relations pluies/NDVI concerne l'échelle continentale ou régionale (Afrique de l'Ouest, Afrique orientale, Afrique de l'Est...) (Nicholson et al. 1990 ; Fuller et Prince, 1996 ; Richard et Pocard, 1998 ; Camberlin et *al.*, 2007) et n'ont pas permis de répondre à toutes les questions sur les relations entre ces deux paramètres à une échelle nationale. Ainsi, à cette échelle, quelle est l'intensité de la réponse de la végétation aux précipitations ? Existe-t-il des différenciations spatiales, temporelles dans la réponse végétale ? Quelles sont les formations végétales les plus vulnérables aux pluies ?

Pour répondre à ces questions à l'échelle de la Tanzanie, nous posons l'hypothèse selon laquelle il existe une vulnérabilité de plus en plus accrue des grandes formations végétales du fait des modifications du régime climatique enregistrées au cours des douze dernières années (2001-2013).

Il s'agit alors, dans un premier temps d'étudier les cycles de précipitations aux échelles annuelles et saisonnières sur la période 2001-2013 sur l'ensemble de la Tanzanie. Dans un second temps, il sera question d'étudier la variabilité saisonnière de la végétation afin de déterminer les paramètres végétatifs comme les dates de début, fin et longueurs de saison. Enfin, dans la troisième partie, les cycles végétatifs seront mis en lien avec les variations des précipitations afin de déterminer le temps de réponse de la végétation aux variations du climat et d'identifier les groupes de végétaux les plus sensibles à la modification des régimes pluviométriques.

Ainsi, à la fin de cette partie on s'attend à mettre en évidence les formations végétales les plus vulnérables à la variabilité climatique en comparant des situations de différentes zones géographiques. On espère pouvoir aussi identifier les tendances au regard de la fréquence des déficits et excédents hydriques détectés dans les séries chronologiques.

2.1 - Analyse spatio-temporelle des précipitations à l'échelle de la Tanzanie à partir des images basse résolution spatiale NDVI MODIS et TRMM sur la période 2001-2013

2.1.1 - Validation des données d'estimation de pluie par satellite (TRMM)

L'utilisation des données d'estimation de pluies TRMM nécessite une étape importante, qui consiste à comparer les estimations issues du satellite avec les données météorologiques *in situ*. De nombreuses études, ont montré la fiabilité des données TRMM, pour le suivi saisonnier, annuel et interannuel des précipitations pour des régions ne disposant pas d'un réseau de stations climatiques au sol (Dubreuil et *al.*, 2007). Ainsi, pour la Tanzanie (absence d'un réseau de stations climatiques dense), les données TRMM sont utilisées et validées à partir de 11 stations pluviométriques (Figure 14) pour lesquelles nous disposons des mesures sur les périodes 2001-2013.

Le processus de validation des données TRMM se fait en comparant la mesure sur un pixel TRMM (24 km environ) avec la mesure de la station se trouvant dans le même pixel. Les moyennes mensuelles de TRMM ont été utilisées, car elles montrent les meilleurs résultats de corrélation (Arvor et *al.*, 2008).

La méthode de validation est le calcul d'un certain nombre de critères statistiques (Laurent et *al.*, 1998) : coefficient de corrélation, biais, RMSE (Root Mean Square Error).

Tableau 11: Résultats statistiques de la validation des données TRMM 3B42 par rapport aux données des stations au sol

Stations	Critère statistique		
	Coefficient de corrélation	Biais	RSME
Wami prison	0,81	-5,28	0,51
Utete Bonami	0,81	-58,00	5,61
Morogo meteo	0,80	-35,00	3,19
Hombolo agromet	0,89	-158,00	14,92
Lukenge mtibwa	0,63	-37,00	115,34
Mlali	0,69	-155,74	14,21
Kisarawe	0,84	-6,00	0,59
Dar Es Salaam	0,90	-33,24	2,89
Moshi airport	0,64	2,29	0,22
Ruhungu	0,61	-26,27	2,41
Pangani office	0,58	0,00	0,03

Le Tableau 11 et la Figure 23 montrent respectivement le résultat du calcul des critères statistiques (coefficient de corrélation, biais, RMSE) et la représentation graphique des nauges de points et les droites de régressions linéaires.

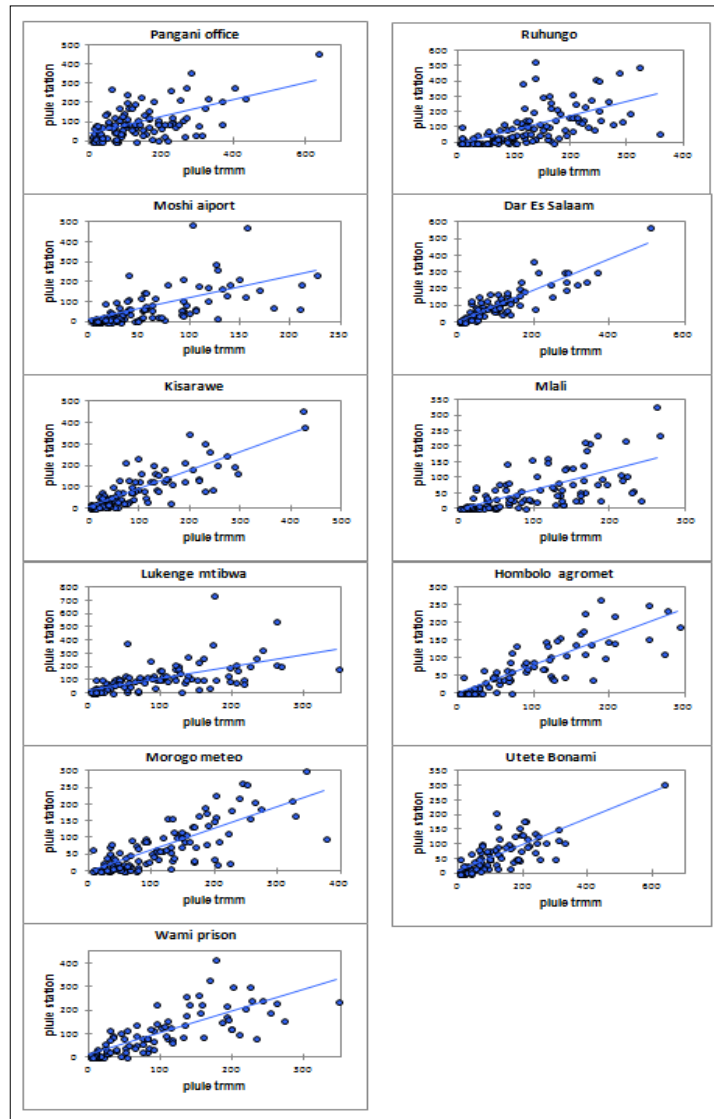


Figure 23: Nuages de points et droites de régressions linéaires entre les données des stations pluviométriques et les données TRMM

Les droites de regression linéaire et la forme des nuages de points (Figure 23) montrent une forte relation existante entre les deux types de données. Cette forte relation se confirme par les coefficients de corrélation supérieurs à 0.50 (Tableau 11) avec un seuil de significativité inférieur à 5% pour toute les stations retenues pour la validation. En outre, les valeurs négatives du biais entre les deux données montrent que les données TRMM sous-estiment les précipiations par rapport aux données stationnelles de presque toutes les stations, excepté les staions de Pangani et Moshi. En effet, les pixels TRMM au niveau de ces stations montrent une sur-estimation des pluies avec des biais positifs. Les erreurs quadratiques relativement faibles pour l'ensemble des stations, sauf les stations de Mlali, Lukenge et Hombolo permettent de dire que les données d'estimation de pluie par satellite sont proches des données enregistrées au sol pour les stations retenues.

D'une manière générale, on observe en Tanzanie que les données d'estimation de pluie TRMM et stationnelles se superposent relativement bien malgré quelques différences

enregistrées sur la période 2001-2013. Cette étape de validation permet dans la suite du travail, l'utilisation des données d'estimation de pluie par satellite en accord avec d'autres études réalisées en Tanzanie (Martinka, 1999 ; Timiza, 2011 ; Debien et *al.*, 2010 ; Verlinde, 2011).

2.1.2 - Spatialisation des précipitations à l'échelle de la Tanzanie sur la période 2001-2013

Un des premiers traitements des données TRMM est une cartographie moyenne annuelle des pluies sur la période d'observation (2001-2013) (Figure 24). La cartographie fait apparaître une zonation des précipitations des régions à faible pluviométrie (centre) et des régions à forte pluviométrie (nord-ouest et sud-ouest). On distingue ainsi les zones qu'on nomme :

- Zone de « précipitations élevées (les plaines côtières tropicales chaudes et humides) » localisées au Nord et au Sud-ouest avec des précipitations supérieures à 1000 mm ;
- Zone de « précipitations modérées (les plateaux tempérés) » avec des pluies comprises entre 700 et 900 mm situées au Sud-est et à l'Ouest du pays ;
- Zone de « précipitations faibles (le plateau central aride) » localisées dans la partie centrale de la Tanzanie avec une pluviométrie inférieure à 700 mm.

On retient ainsi de cette cartographie que la Tanzanie est un territoire relativement sec recevant en moyenne moins de 700 mm de pluie par an. Cependant, il existe plusieurs secteurs qui reçoivent beaucoup plus de précipitations. Ces zones reçoivent en moyenne plus de 1500 mm de pluie par an. C'est le cas par exemple de la pointe nord du lac Nyasa, les montagnes d'Uluguru et d'Usambara, la pente sud et orientale du mont Kilimanjaro, les hauts plateaux du nord près du lac Victoria. Cette variabilité pluviométrique observée dans le pays est causée par des multiples facteurs tels que la topographie, l'orographie ou encore la convergence des courants d'air de la mousson (Kovar, 1996).

Une comparaison de la carte moyenne mensuelle des pluies estimée par TRMM (2001-2013) avec la cartographie annuelle réalisée à partir d'une carte d'échelle 1 : 3000000, sur la base d'une carte antérieure des précipitations annuelles de l'Afrique de l'est (Niewolt, 1973, 1977), permet d'observer une bonne superposition des zones pluviométriques (Figure 24 et 25).

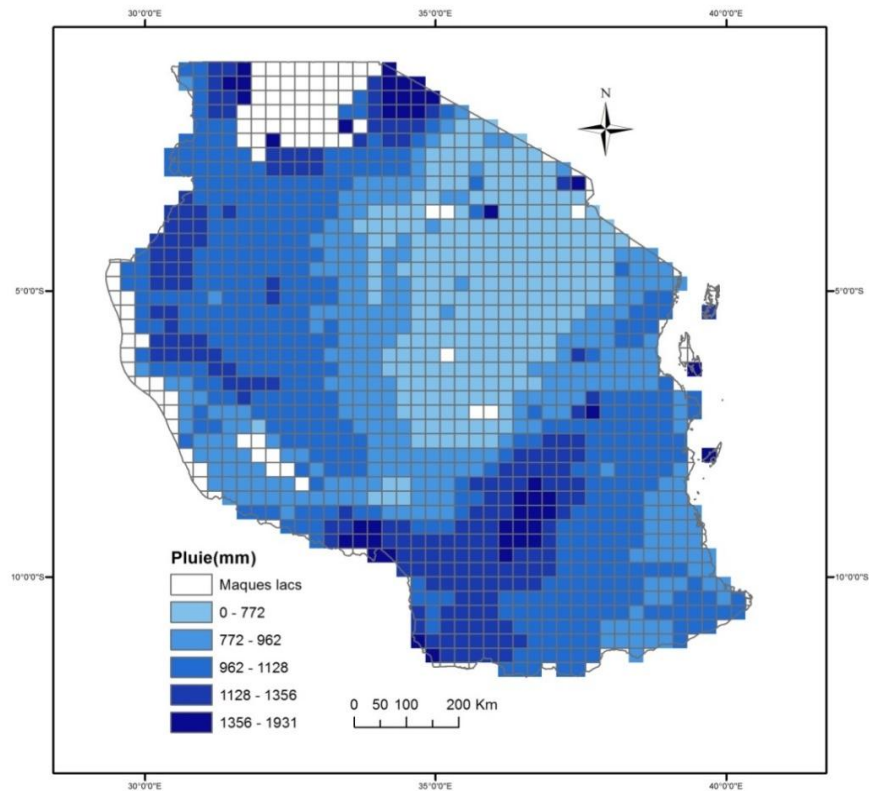


Figure 25: Spatialisation des précipitations annuelles moyennes calculées à partir des données TRMM (mm) sur la période 2011-2013 (*Source : Boussougou, 2017*)

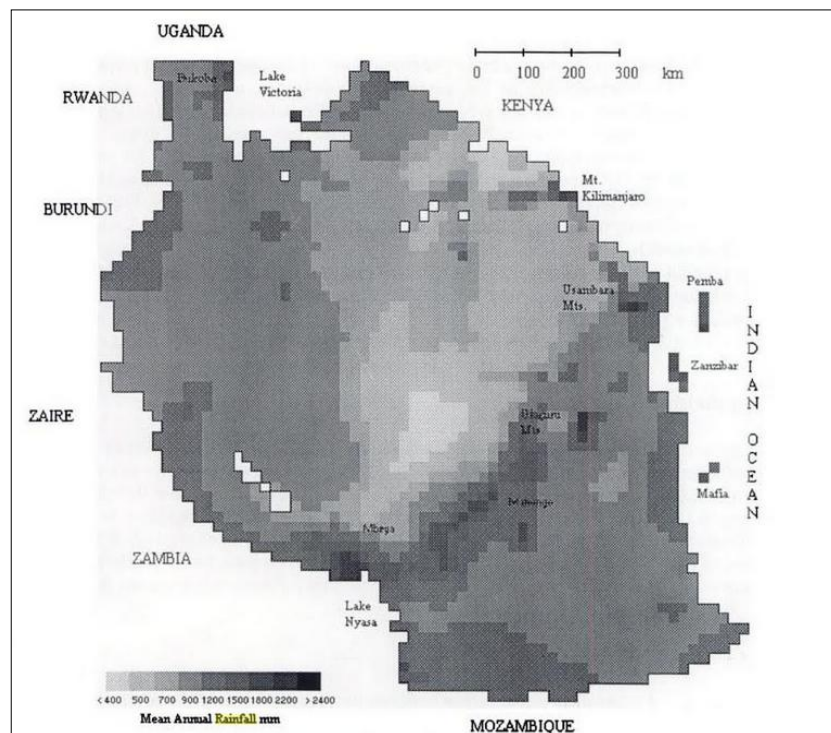


Figure 24: Précipitations annuelles moyennes pour la Tanzanie (*source : Kovar, 1996*)

2.1.3 - Variabilité saisonnière des précipitations en Tanzanie

Afin de connaître la saisonnalité des précipitations en Tanzanie, une synthèse mensuelle des précipitations a été effectuée sur les données TRMM. Le résultat permet d'observer les variations saisonnières des pluies sur la période 2001-2013. Les cartes (Figure 26) permettent de voir une alternance entre des mois à faible précipitation (inférieure à 60 mm) et des mois à forte pluviométrie (supérieure à 1000 mm).

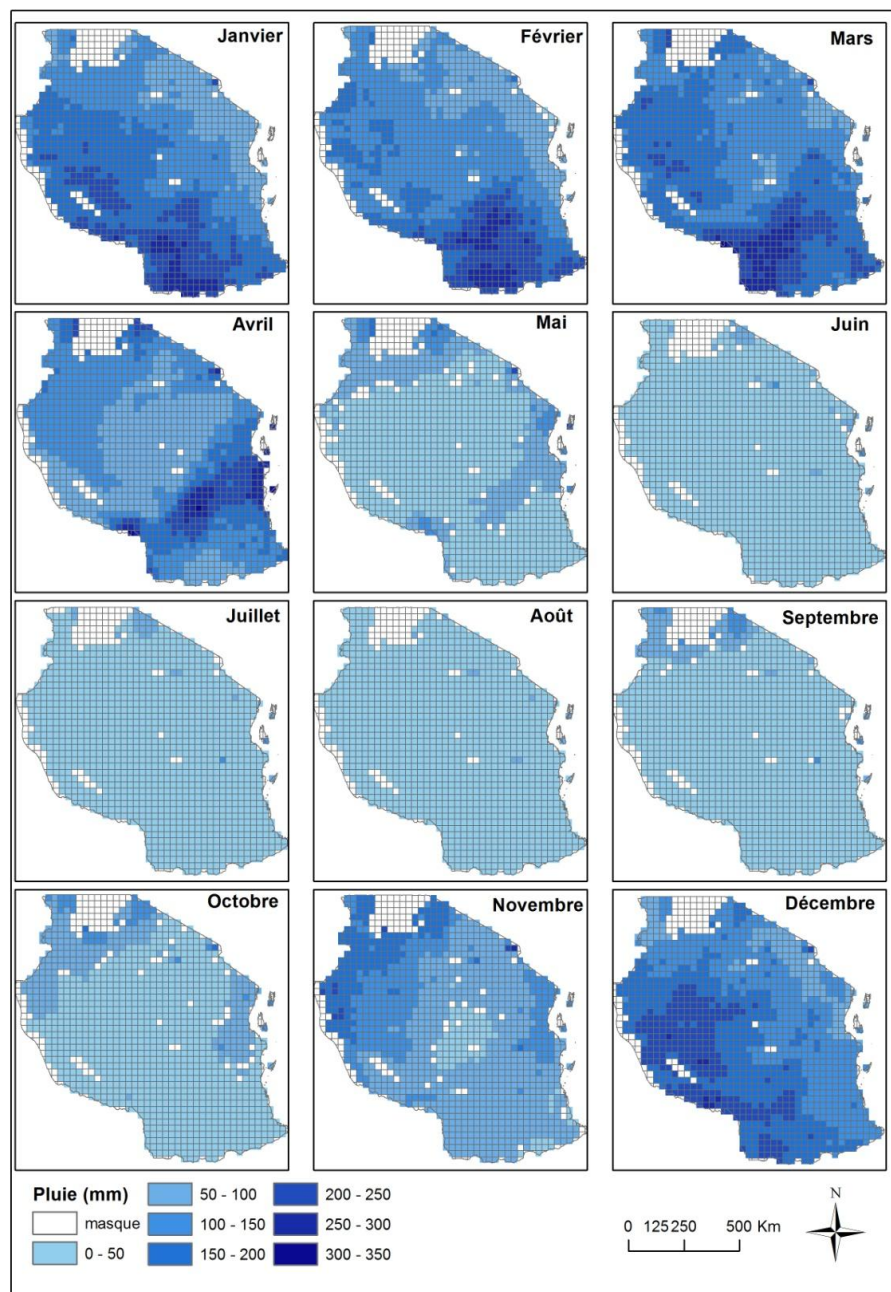


Figure 26: Précipitations moyennes mensuelles estimée par TRMM (Source : Boussougou, 2017)

Les mois de mai à octobre sont des mois secs (pluies inférieures à 60 mm) sur l'ensemble du pays, excepté les régions nord et est qui enregistrent des précipitations supérieures à 60 mm en mai, septembre et octobre.

A l'inverse les mois de novembre à avril, sont des mois humides avec des précipitations

supérieures à 100 mm en moyenne. On observe un déplacement des fortes valeurs de précipitation du Nord vers le sud d'août à avril.

En fait, les pluies s'installent d'abord dans le nord au cours des mois de septembre à octobre, puis se diffusent progressivement vers l'intérieur du pays pour atteindre le Sud entre mars et avril. A partir du mois d'avril s'amorce une diminution des pluies du sud vers le centre et le nord du pays. La variation spatiale des pluies en Tanzanie suit donc un gradient de précipitation nord-sud.

On peut donc dire que les pluies s'installent progressivement du nord vers l'est et l'ouest de septembre à novembre, pour atteindre le sud du pays entre janvier et mars.

D'avril à mai, on assiste à une diminution des pluies du sud et du centre vers le nord et l'est de Tanzanie.

On remarque que les variations saisonnières de précipitation en Tanzanie suivent les mêmes évolutions que les mouvements de la zone de convergence intertropicale (ZCIT). C'est cette migration de la ZCIT au cours de l'année qui engendre l'apparition des pluies. En Tanzanie, elle migre vers le sud d'octobre à décembre pour atteindre le sud du pays en janvier et février. Elle remonte vers le nord en mars, avril et mai (McSweeney et *al.*, 1993 ; Timiza, 2011 ; Mohamed, 2013).

2.1.4 - Variation annuelle des précipitations en Tanzanie entre 2001 et 2013

Les variations des précipitations d'une année à l'autre sont analysées à partir des moyennes annuelles des pluies sur la période 2001-2013. Sur la carte de la Figure 27, on observe des disparités spatiales des pluies. Ces contrastes entre les régions varient d'une année à l'autre.

D'une façon générale, la cartographie (Figure 27) permet de distinguer 3 groupes d'années : les années à faible pluviométrie (inférieure à 500 mm), les années à forte pluviométrie (supérieure à 1500 mm) et les années à pluviométrie intermédiaire (entre 500 et 1500 mm)

Les années à faible pluviométrie sont considérées comme les années où la pluie annuelle est inférieure à 500 mm sur presque tout le pays. C'est notamment le cas des années 2003, 2005, 2012. L'année 2005 est exceptionnellement moins pluvieuse que les autres. La topographie accidentée du pays peut être à l'origine de la forte pluviométrie observable dans certaines régions durant ces années à pluviométrie faible. Cette situation ne concerne pas la région de montagne du Kilimandjaro et au Nord autour du lac Victoria qui garde un niveau de précipitation élevé (supérieure à 1500 mm) durant ces années considérés comme sèches en Tanzanie.

Les années à pluviométrie intermédiaire se caractérisent par une hétérogénéité spatiale des pluies qui varient entre 500 et 1500 mm au cours d'une même année. Il s'agit des années 2001, 2007, 2008, 2009 et 2013. Au cours de ces années les régions de l'Est reçoivent de faibles précipitations (inférieure à 1500) tandis que les régions du Nord et du Sud sont humides avec des précipitations supérieures à 1500 mm.

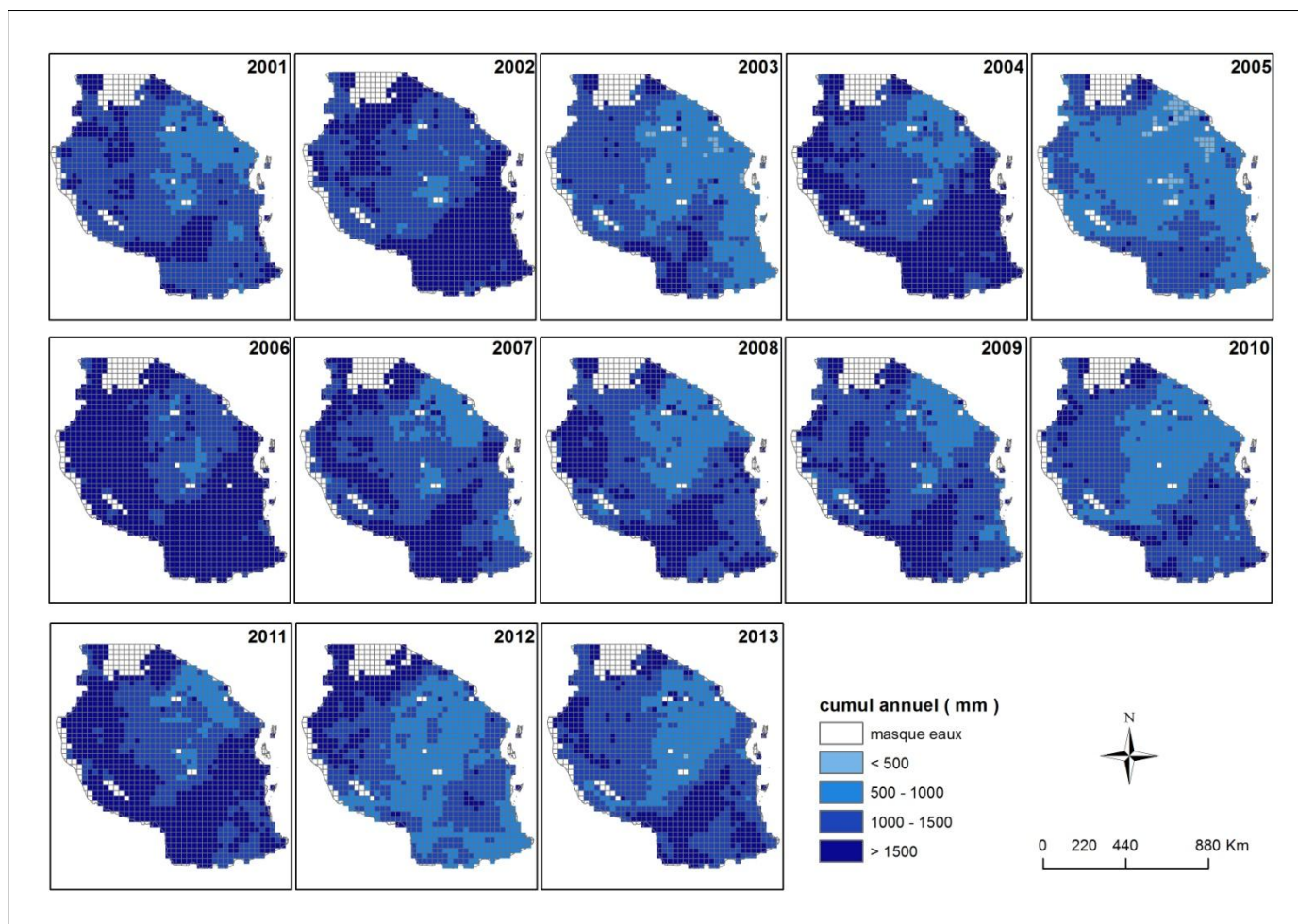


Figure 27 : Cartographie des précipitations interannuelles sur la période 2001-2013 à partir des données TRMM (Source : Boussougou, 2017)

Les années à fortes précipitations, sont les années 2002, 2004, 2006 et 2011. Les pluies sont supérieures à 1500 mm dans presque tout le pays. L'année 2006 se distingue des autres car les fortes valeurs de pluie (supérieures à 1500 mm) recouvrent presque l'ensemble du territoire Tanzanien, excepté la région des terres centrales qui reste à pluviométrie faible sur toute la période d'observation.

2.1.5 - Evolution de l'indice de sécheresse entre 2001 et 2013 en Tanzanie

Afin de bien cerner les variations interannuelles sur la période d'observation, nous avons calculé l'indice de sécheresse (Indice de Nicholson) dans le but d'identifier les années pluvieuses (humides) et non pluvieuses (sèches) (Figure 28). La spatialisation de l'indice de sécheresse sur la Tanzanie fait ressortir quatre années considérées comme humides : les années 2002, 2004, 2006 et 2011. Les neuf autres années de la période sont alors considérées comme sèches. Cette cartographie permet également de voir qu'en réalité, aucune année n'est totalement sèche ou humide en Tanzanie. En effet, le territoire étant vaste avec une topographie marquée certaines régions restent humides quand la grande majorité du pays est sèche et vice-versa. L'année 2004 en Tanzanie par exemple considérée comme humide présente dans sa partie nord et centrale des régions sèches. De même pour l'année 2002, la partie centrale et ouest sont sèches pour une année considérée pourtant humide. La carte des indices permet ainsi de mettre en évidence l'intensité de la sécheresse et des excès d'eau à partir des valeurs des indices, du moins sur les années exceptionnelles.

On remarque que, les années à fortes précipitations identifiées dans l'analyse précédente correspondent aux années identifiées comme étant humides. Ce qui permet de confirmer ce résultat.

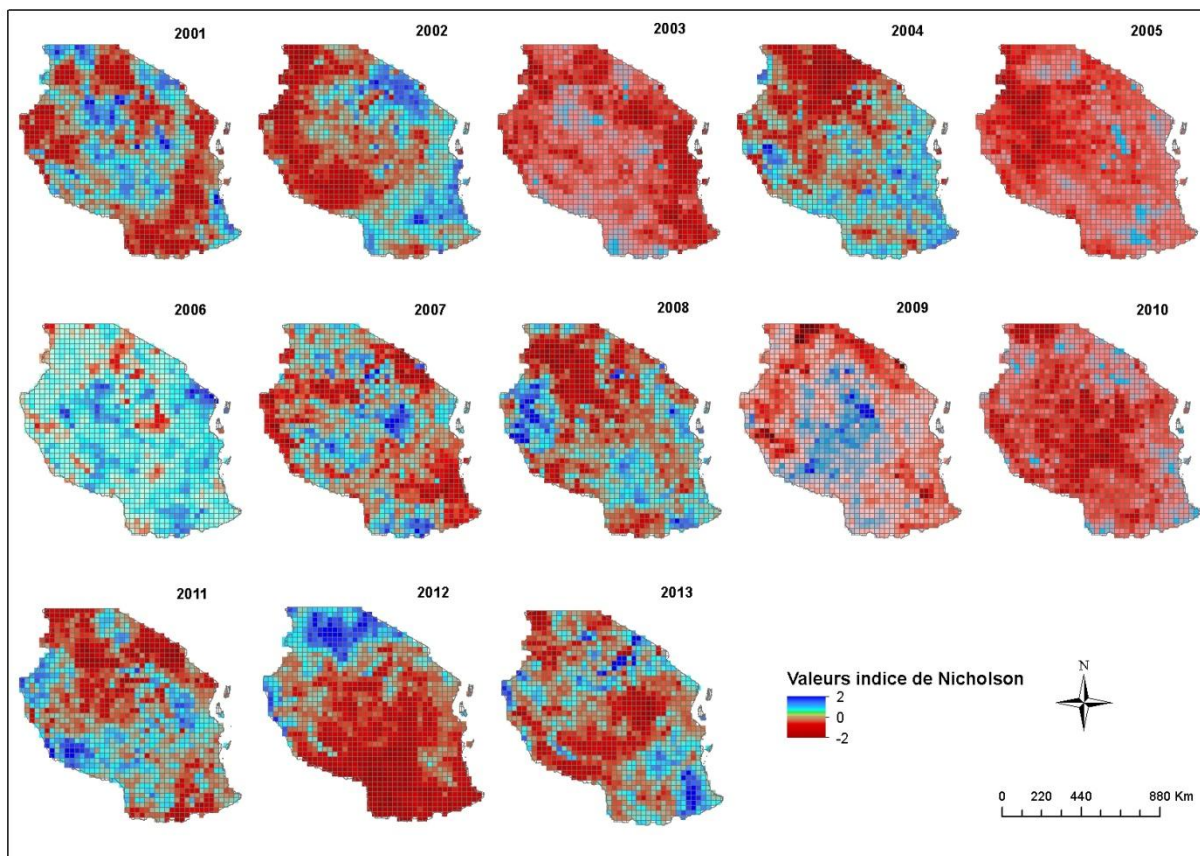


Figure 28: Identification des années sèches et des années humides sur la période 2001-2013, obtenues à partir des données TRMM (Source : Boussougou, 2017)

2.1.6 - Analyse de la variabilité des régimes pluviométriques en Tanzanie

Pour mieux comprendre la structure de la distribution des pluies en Tanzanie, nous réalisons une analyse en composante principale (ACP) sur les données mensuelles des précipitations.

Le résultat de l'ACP (Figure 29) montre que les trois premières composantes principales expliquent près de 80 % (soit 83 %) de la variance totale avec 70% pour le premier axe (C1), 8% pour le deuxième axe (C2) et enfin 5 % pour le troisième axe (C3).

La première composante principale qui exprime 70% de la variance (Figure 29) correspond à un effet de masse qui oppose les régions du sud-ouest où il pleut beaucoup aux régions du nord-est où il pleut peu. Cette figure ressemble beaucoup à celle de la moyenne annuelle de précipitation en Tanzanie (Figure 24). La composante temporelle associée à ce premier facteur montre que l'opposition entre le nord-est et le sud-ouest est particulièrement marquée pendant les mois d'été austral, c'est-à-dire de novembre à avril.

La deuxième composante principale (Figure 29), bien qu'ayant une variance faible (8%) caractérise surtout le nord et l'est de Tanzanie avec une saisonnalité très marquée (plus de pluie en hiver et moins de pluie en été). La composante temporelle associée permet surtout de mettre en évidence le régime unimodal de Tanzanie de l'ouest, sud et centre qui se caractérise

par une longue saison de pluie d'avril à décembre. Ce régime de précipitation en Tanzanie est en lien avec les mouvements de la zone de convergence intertropical (ZCIT). En effet, la migration de la ZCIT en Tanzanie d'octobre à avril vers le sud apporte les pluies sur près de six mois dans les régions du sud-ouest, le centre et Ouest. A l'opposé dans le nord, la côte nord, les hauts plateaux du nord-est, le lac Victoria, la ZCIT provoque l'apparition de deux périodes humides distinctes (régime bimodal) : la petite saison de pluie d'octobre à décembre (Vuli en swahili) et la longue saison de pluie mars à mai (Masika in Swahili) ; (Agrawala et *al.*, 2003 ;Younos et Grady, 2014).

La troisième composante principale (Figure 29) qui elle, ne représente que 5 % de la variance permet quant à elle de caractériser la zone côtière. On remarque au sud-est des périodes plus pluvieuses (janvier 2004 à juin 2004 par exemple), et d'autres plus sèches (d'août 2011 à mars 2012 par exemple). La variabilité dans ce cas se décline à l'échelle interannuelle. Cette variabilité interannuelle des pluies est en grande partie contrôlée par les vents de la mousson à l'est de l'océan Indien, aux effets orographiques pluviaux des collines côtières (Mwasumbi et *al.*, 1993). On attribue aussi à cette saisonnalité des précipitations les changements dans les températures de surface de la mer (TSM), en particulier sur l'océan indien (Black et *al.*, 2003, Black 2005, Anyah et Semazzi, 2007).

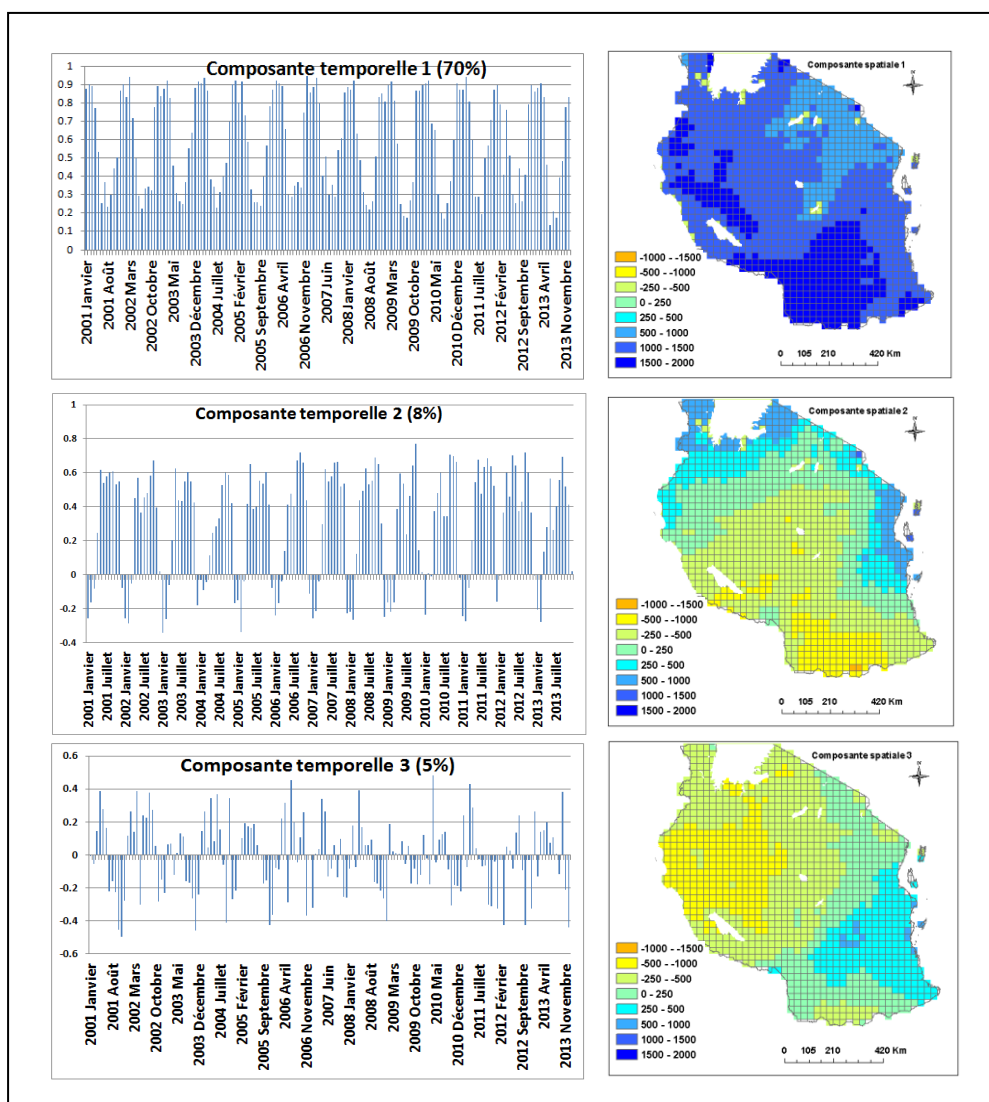


Figure 29: Résultat d'une ACP sans rotation sur les totaux pluviométriques mensuels bruts (janvier 2001 à décembre 2013) : à gauche les composantes temporelles et à droite les composantes spatiales (*Source : Boussougou, 2017*)

Le résultat de l'ACP, est utilisé pour réaliser une classification non supervisée K-mean (Hartigan et *al.*, 1979). Le résultat de cette classification permet de proposer une nouvelle cartographie des régimes pluviométriques de la Tanzanie pour la période 2001-2013 (Figure 30).

La cartographie (Figure 30) fait ressortir 11 régimes pluviométriques sur l'ensemble du territoire Tanzanien. Nous avons décidé de les nommer par les lettres de A à K. On observe pour tous les régimes une répartition spatiale qui se fait en fonction des régions géographiques précises, à l'exception des régimes de précipitation G, H et D (Figure 30). En effet, le régime D par exemple se localise dans la région de Shinyanga (centre), mais aussi dans la partie ouest et est du pays. De même, le régime H se trouve dans le sud-sud et aussi dans le sud-ouest.

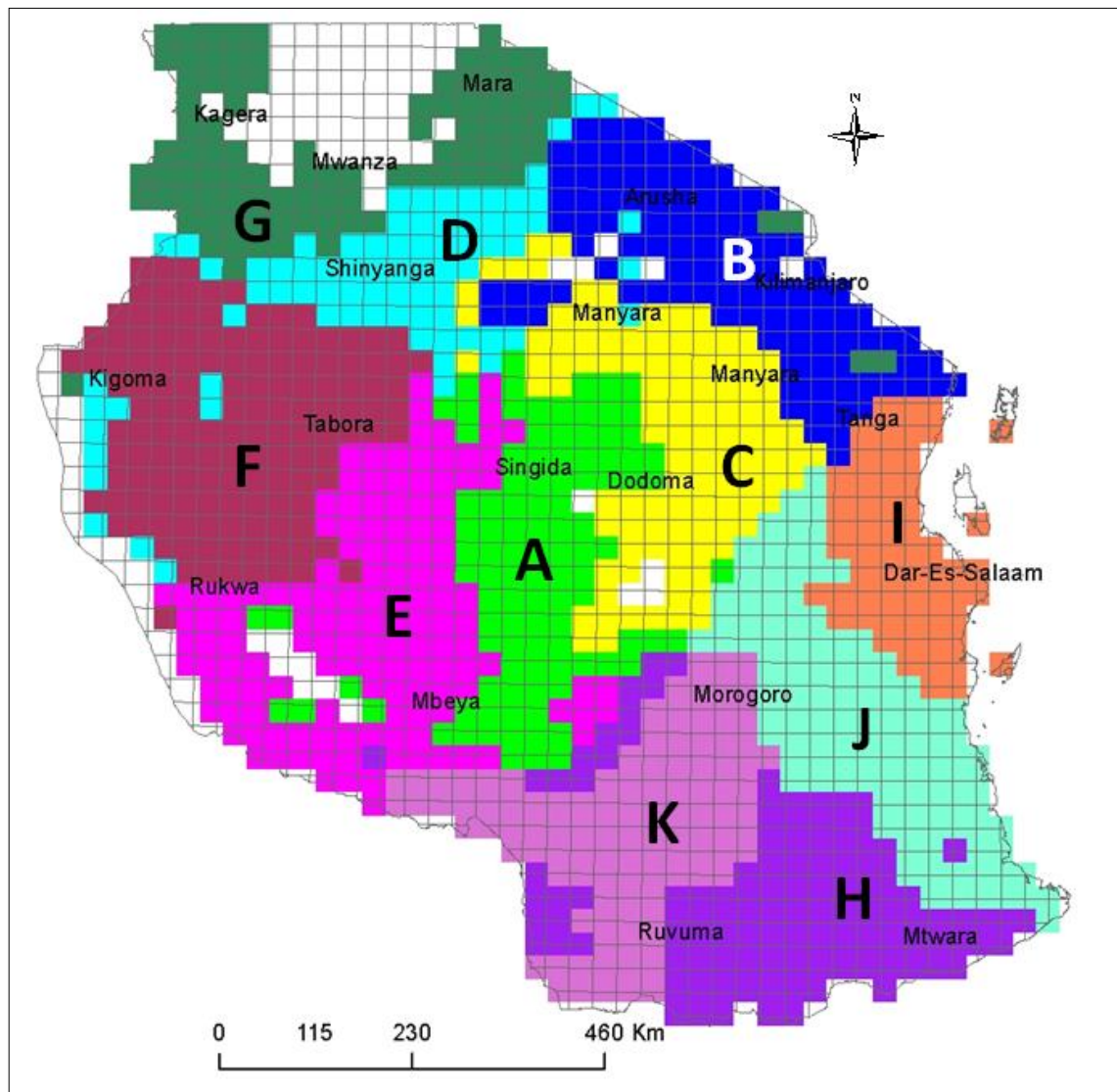


Figure 30: cartographie des régimes moyens obtenus à partir des résultats de l'ACP sur les précipitations mensuelles TRMM en Tanzanie (janvier 2001 à décembre 2013) (Source : Boussougou, 2017)

Le cycle saisonnier associé à chacun des régimes pluviométriques, permet de mieux les

caractérisés (Figure 31).

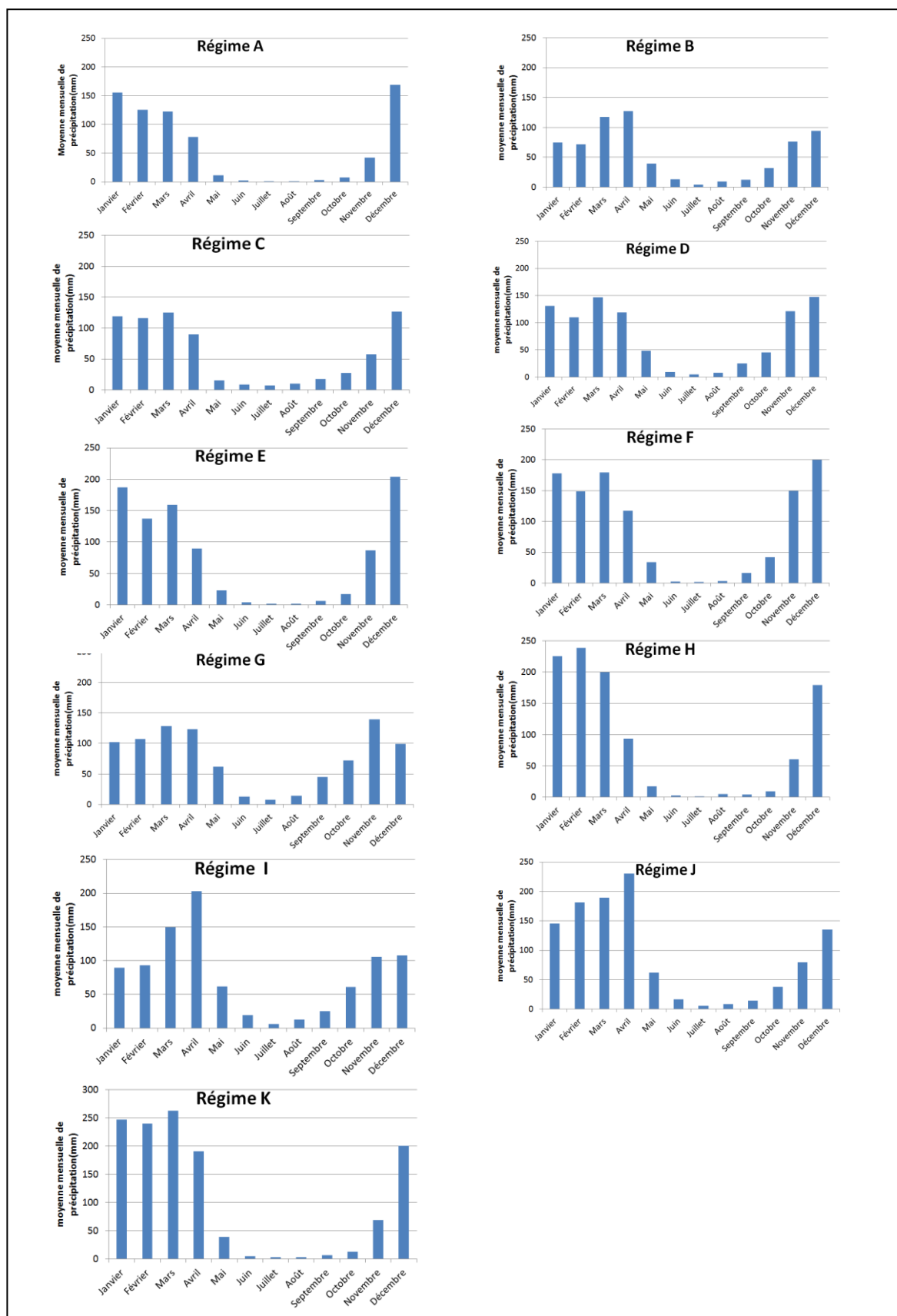


Figure 31: cycle saisonnier des régimes de précipitation en Tanzanie (Source : Boussougou, 2017)

L'observation des 11 régimes pluviométriques permet de regrouper l'ensemble des régimes en deux grands régimes en accord avec les études faites en Tanzanie. D'une part le régime bimodal (B, I, J et G) qui se caractérise par la présence de deux saisons de pluie. La première saison de pluie se situe janvier et avril avec des pics de précipitation qui varient entre 128 à 230 mm (Figure 31) et la seconde saison de pluie s'observe entre octobre et décembre. D'autre part le régime unimodal (A, C, D, E, F, H et K) se caractérisant par la présence d'une seule saison de pluie qui débute vers le mois de novembre pour finir au mois de mai (Figure 31).

La variabilité saisonnière observée dans les régimes de pluies de Tanzanie varie considérablement dans l'espace et le temps, avec une variation plus élevée observée pendant la petite saison des pluies que dans la grande (Zorita, Tilya, 2002 ; Camberlin et *al.*, 2009). En effet, les précipitations qui tombent dans ces saisons varient généralement de 50 à 300 mm par mois, mais varie considérablement d'une région à l'autre et peut atteindre 400 mm par mois dans les régions et les saisons les plus humides (McSweeney et *al.*, 2010). Des quantités plus importantes de précipitations saisonnières sont enregistrées dans le sud-ouest et les hauts plateaux du nord-est, tandis que la Tanzanie centrale reçoit des précipitations saisonnières de moins de 100 mm par mois en été. Les précipitations annuelles moyennes sur la Tanzanie vont de 534 mm à 1837 mm (Luhunga et *al.*, 2016).

La carte des régimes de précipitation sur la période 2001-2013 (Figure 30) réalisée à partir des données d'estimation de pluie par satellites (TRMM) est comparée à la carte des régimes des pluies faite à partir des données *in situ* produit par l'agence météorologique de Tanzanie (Figure 32).

La carte de la figure 30 (à partir des données TRMM) se superpose bien à la carte de l'agence météorologique de Tanzanie (Figure 32). En effet, le régime bimodal dans les deux cartographies se localise dans la partie nord et est du pays (B, I, J et G pour TRMM et 1, 2, 3,4 et 11 pour des données *in situ*) et pour le reste de la Tanzanie, on observe un régime unimodal dans les deux cartes. On note néanmoins quelques différences dans le découpage des régimes des pluies qui peut être lié aux différents types de données (satellitaire et au sol), mais aussi à la méthode d'interpolation des données *in situ* utilisée par l'agence météorologique de Tanzanie. Le réseau de station au sol étant peu dense, le résultat de cette méthode d'interpolation peut être biaisé par le manque des données dans certaines régions du pays.

De ce fait, les données d'estimation de pluie par satellite (TRMM) peuvent alors être une alternative pour pallier au manque de données que rencontrent plusieurs pays tropicaux comme la Tanzanie n'ayant pas de station de mesure assez dense pour couvrir l'ensemble de leur territoire. L'un des avantages de la donnée TRMM est la disponibilité et son accès libre sur le web, qui permet une mise à jour plus rapide que les données provenant des stations au sol.

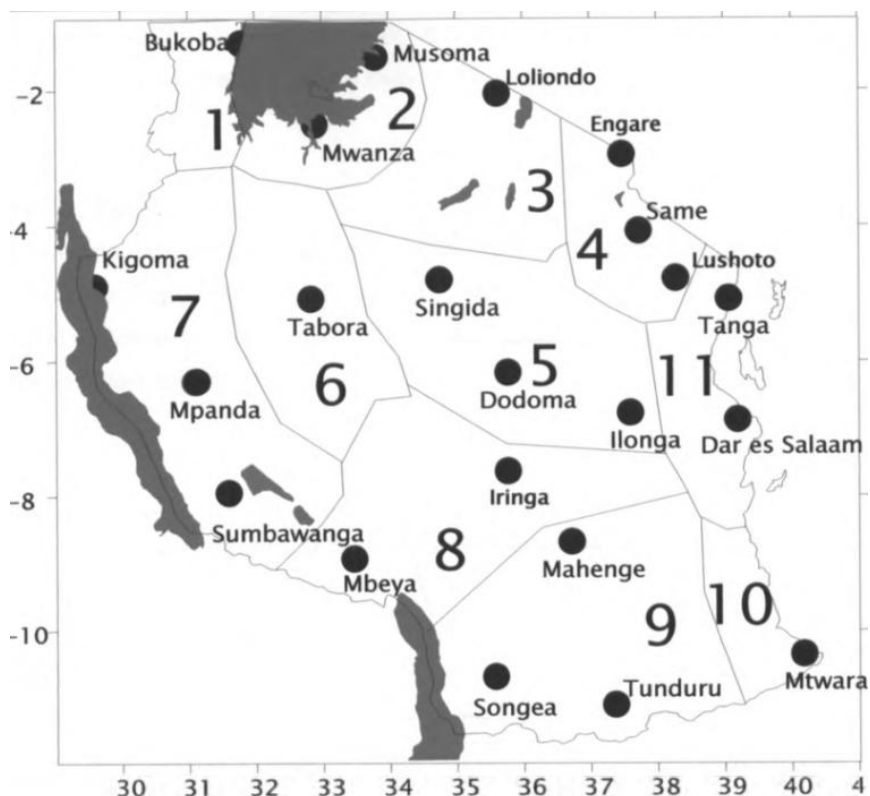


Figure 32: Régimes des précipitations utilisés par l'agence météorologique de Tanzanie à partir des données *in situ* (Source: www.meteo.go.tz.TMA© 1999)

En somme, les variations spatio-temporelles des précipitations en Tanzanie ont pu être mises en évidence par l'utilisation des pluies estimées par satellite sur la période 2001-2013. L'analyse des résultats permet de mieux comprendre la distribution des pluies dans le territoire Tanzanie qui dépend non seulement de la topographie et le relief, mais aussi des mouvements de la zone de convergence intertropicale (ZCIT). Il est maintenant question de voir, dans la suite de ce travail comment l'activité végétale varie aussi spatialement et temporellement en considérant les mêmes échelles (spatiales, temporelles) que celles utilisées pour l'étude des précipitations (saisonnières et annuelles), puis nous analyserons les relations spatio-temporelles entre la pluie et NDVI.

2.2 - Variabilité de l'activité végétale en Tanzanie

2.2.1 - Analyse spatio-temporelle de la végétation en Tanzanie

2.2.1.1 - Spatialisation de l'activité végétale sur la période 2001-2013 à partir des données NDVI MODIS

Comme pour la carte des précipitations moyennes annuelles sur la période 2001-2013, la figure 33 montre la cartographie moyenne annuelle de NDVI sur la même période. Celle-ci présente une zonation qui semble bien se superposer à celle des précipitations annuelles de la période d'observation. On distingue ainsi:

- NDVI faible, inférieur à 0.46 : localisé principalement dans la partie centrale du pays, mais aussi dans quelques régions au sud et au nord.
- NDVI moyen compris entre 0.46 et 0.60 : se trouve dans la partie ouest, sud et quelques zones dans les terres centrales.
- NDVI fort supérieur à 0.60: extrême ouest, au sud et à l'est du pays. On retrouve les zones de fortes valeurs (principalement dans la région côtière et les îles), mais aussi sur l'arc de chaîne de montagne de l'est de Tanzanie. La partie ouest frontalière au Congo, et donc de la grande forêt du bassin du Congo présente également des fortes valeurs de NDVI.

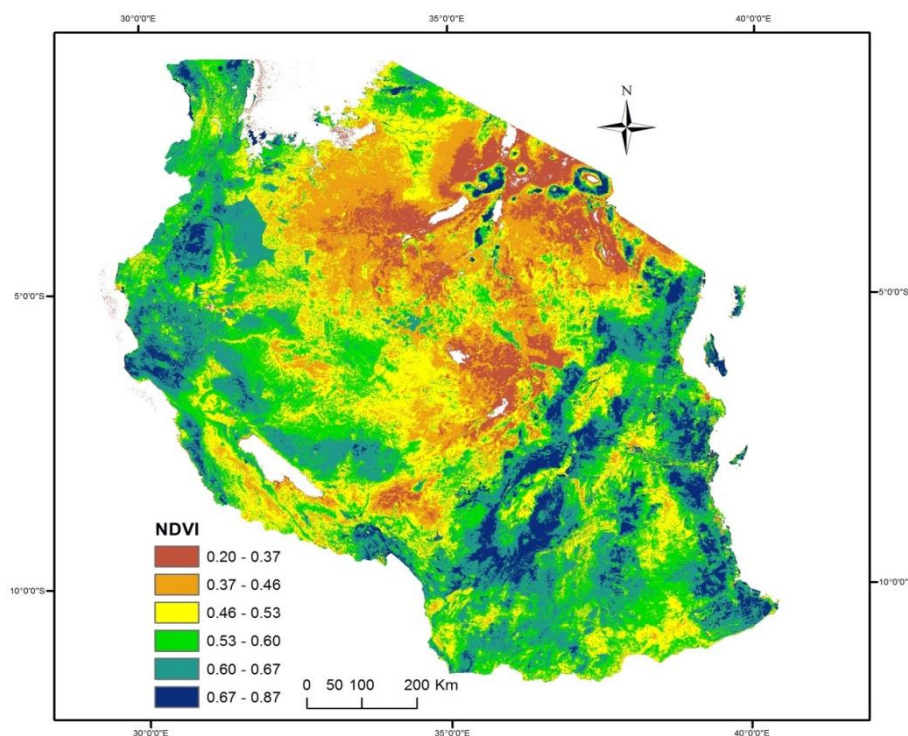


Figure 33: Carte moyenne annuelle de NDVI-MODIS de 2001 à 2013 (Source : Boussougou, 2017)

2.2.1.2 - Variabilité interannuelle du NDVI sur la période d'étude

D'une manière générale, la zonation du NDVI moyen dans le pays est observable chaque année durant la période d'étude (Figure 34). On note néanmoins des différenciations dans la répartition de l'intensité de l'activité végétale d'une année à l'autre. Les années de fortes valeurs de NDVI sont celles de 2001 et 2003. En effet, sur l'ensemble du pays de fortes valeurs de NDVI (0.70) sont observables, notamment dans la partie ouest et sud du pays où les valeurs dépassent 0.70.

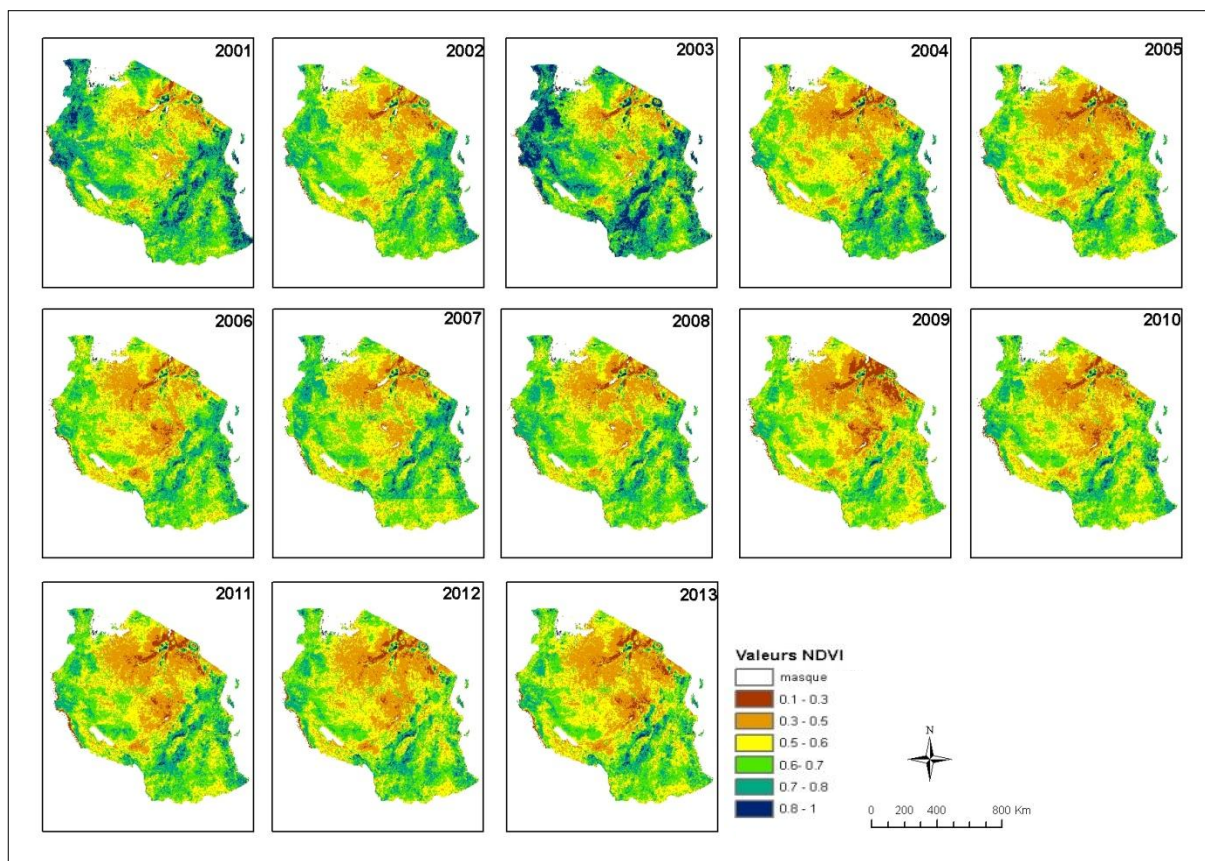


Figure 34: Variation inter annuelle du NDVI sur la période 2001 à 2013 en Tanzanie (Source : Boussougou, 2017)

A l'inverse on note des années où les valeurs de NDVI inférieures à 0.43 s'étalent sur presque toute la zone des terres centrales. C'est le cas de 2004, 2005, 2009, 2010. On remarque alors que les structures spatiales restent les mêmes d'une année à l'autre, mais que leur extension spatiale peu varier (l'augmentation des zones de plus fiable valeur de NDVI se fait au détriment des zones voisines).

2.2.1.3 - Variation saisonnière de l'activité végétale

Le cycle saisonnier végétal permet aussi de caractériser l'activité végétale en complément des variations annuelles et interannuelles de NDVI.

2.2.1.4 - Suivi du contraste saisonnier végétal

Le coefficient de variation calculé pour chacune des années de la période d'observation (2001-2013) permet de suivre le contraste saisonnier de la végétation d'une année à l'autre.

Pour un couvert végétal régulièrement sec au cours de l'année, le coefficient de variation sera faible. A l'inverse, les milieux où le contraste saisonnier est marqué, le coefficient de variation est élevé en raison de la forte variation entre le NDVI des types de mois.

Le résultat du calcul du coefficient de variation du NDVI présenté dans la Figure 35, permet de mettre en évidence les années à couvert végétal sec avec des coefficients de variation faibles (0 à 5 %) qui sont 2001, 2003, 2004 et 2009. Les faibles valeurs indiquent une productivité végétale faible pendant ces années.

A l'opposé, le reste des années de la période d'étude présente des coefficients de variation relativement forts (10 à 80 %). En effet, en dehors de la partie centrale (sèche toute l'année), l'ensemble du pays présente des fortes valeurs de variation au cours de ces années.

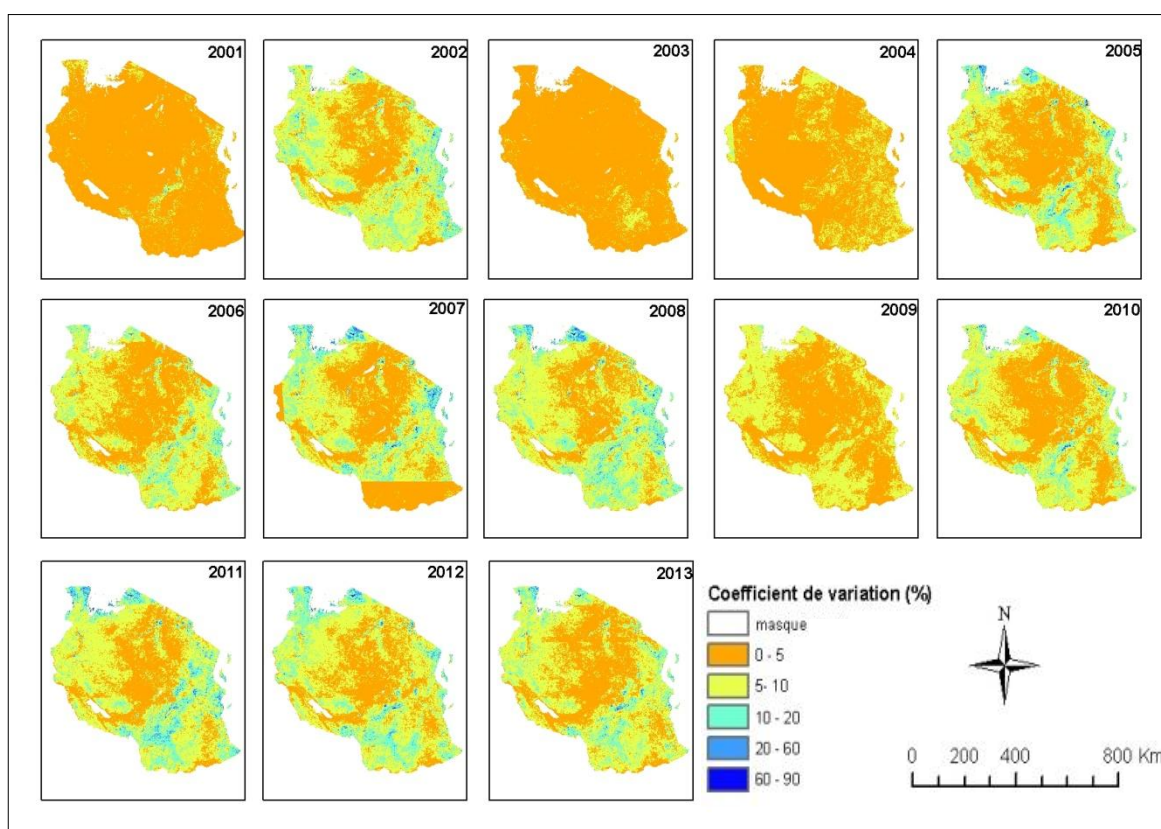


Figure 35: Variabilité interannuelle de la dynamique de la productivité végétale à partir du coefficient de variation. En 2007, les faibles valeurs au sud de la Tanzanie sont causées dues aux artefacts (*Source : Boussougou, 2017*)

Les régions est, nord, ouest et sud enregistrent des fortes valeurs de variation supérieures à 60 %. On a donc un fort contraste saisonnier dans ces régions en raison des fortes valeurs de NDVI observées pendant la période d'étude. Les faibles valeurs de variation au centre s'expliquent par la faible pluviométrie enregistrée dans cette partie du pays pendant notre étude. A l'inverse les fortes valeurs de coefficients de variation correspondent aux zones les plus arrosées du pays, notamment l'ouest et le sud.

L'analyse globale du contraste saisonnier du NDVI sur la période 2001-2013, nous amène dans la suite à regrouper les valeurs de NDVI par classe, afin de mieux étudier les variations saisonnières des différents types de végétation dans le but de ressortir les différences et les similitudes des classes de NDVI sur la période d'observation.

2.2.2 - Cartographie des classes de NDVI et détermination des profils saisonniers

Dans l'objectif d'identifier et de localiser les changements dans la couverture végétale de Tanzanie par type de végétation, nous traitons les données NDVI mensuelles par la méthode de « classification hiérarchique ascendante (CHA) ». Le résultat de la CHA est présenté dans la figure 36 ci-dessous :

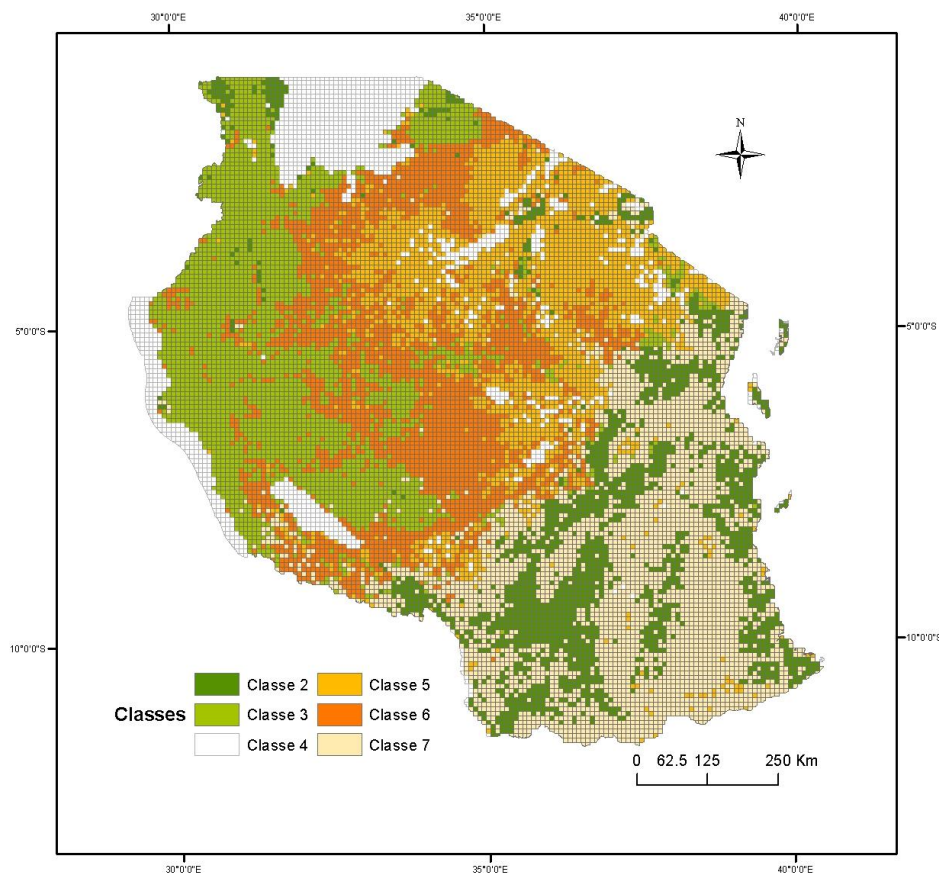


Figure 36: Cartographie des classes de végétations (Source : Boussougou, 2017)

La classification CHA nous permet ici, de distinguer cinq grandes classes de végétation regroupées selon leurs caractéristiques communes. Les classes se localisent pour la plupart dans une région précise (soit à l'ouest, ou au sud par exemple), excepté la classe 2 qu'on retrouve au nord, à l'est ainsi qu'au sud du pays. Pour mieux comprendre la répartition des classes, nous devons mettre cette carte en lien avec la carte d'occupation du sol de Tanzanie (Globcover, 2005). On remarque ainsi que les 5 classes de végétation correspondent aux grands types de végétaux identifiés en Tanzanie.

On peut alors regrouper les 22 classes d'occupation du sol de Tanzanie (Figure 37) en 5 grands groupes végétaux qui correspondent aux classes de NDVI :

Classe 1 : surfaces en eaux (lacs, rivières...)

Classe 2 : forêt feuillus à feuilles larges

Classe 3 : forêt semi-caducue à feuilles larges feuillus à feuilles larges fermées, forêt à feuilles persistantes fermées à l'aiguille, terres pluviales

Classe 5 : mosaïque végétation / terres cultivées fermée et à prairie ouverte

Classe 4: sol nu/surfaces artificialisées

Classe 6 : forêt feuillue (ou fermée) régulièrement inondée, forêt fermée feuillue inondée en permanence, végétation (ouverte/fermée) régulièrement inondée

Classe 7 : mosaïque prairie / forêt – arbustive-feuillue fermée, mosaïque végétation / terres cultivées fermée –arbustive ouverte, mosaïque forêt - arbuste / prairie, mosaïque prairie / forêt - arbustive

Les fluctuations interannuelles de l'activité végétale par classe sont observées par la méthode d'extraction des profils temporels de NDVI. La Figure 37 montre les profils temporels des 5 classes de NDVI identifiées sur la période d'observation. Ces dernières suivent la même allure en cloche avec une variabilité plus ou moins marquée selon les années.

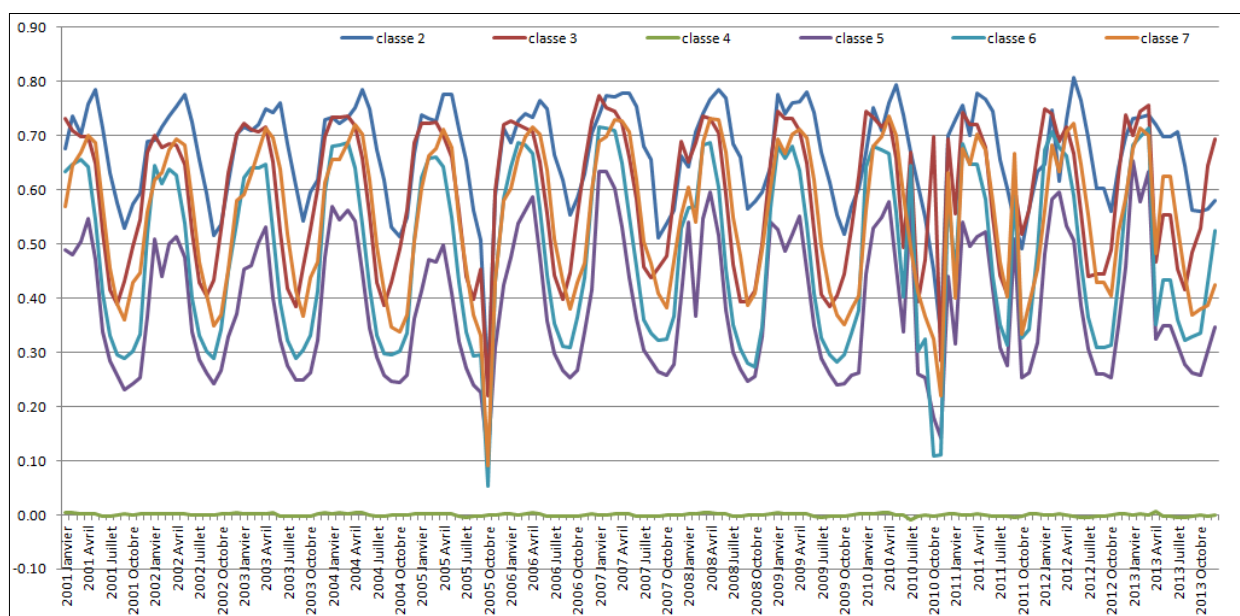


Figure 37: Evolution interannuelle de NDVI des classes d'occupation de sol (Source : Boussougou, 2017)

Les profils temporels des classes de végétation sur la période d'étude permettent de voir que les valeurs de NDVI oscillent entre 0 et 0.90. Seul le profil représentant les sols nus présente des très faibles valeurs et fluctue entre les faibles valeurs positives et négatives. Les faibles valeurs de cette dernière classe, nous amènent à l'exclure dans la suite de notre analyse.

La Figure 37 permet également de voir que pendant toute la période d'étude la classe 2 conserve les plus fortes valeurs de NDVI et la classe 5 les plus faibles. Ceci s'explique par le fait que la classe 2 est constituée de forêt de feuillus à feuilles larges dont le feuillage reste vert toute l'année (forêt dense tropicale), contrairement à la classe 5 qui est constituée de terres cultivées et des prairies, qui elles varient en fonction des périodes de récoltes ou en période sèche. On observe également sur la période d'observation deux années particulières

qui présentent des pics de plus faibles valeurs de NDVI : 2005 et 2010. Ces deux pics de NDVI peuvent être le résultat des artefacts ou la présence de nuages abondants dans ces deux années.

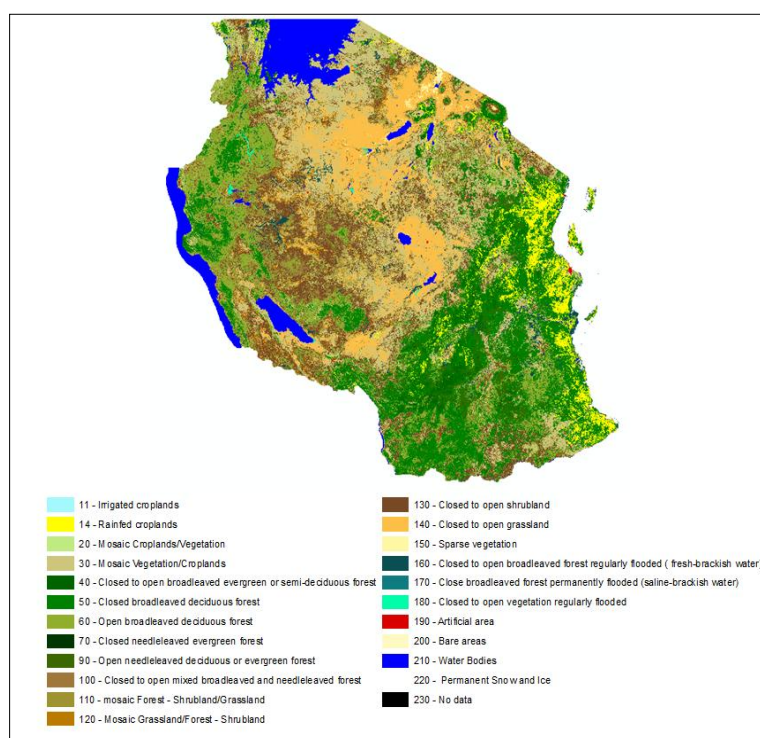


Figure 38: Carte d'occupation du sol de Tanzanie en 2005 (rappel)

2.2.3 - Détection des ruptures dans les profils des classes de végétation et caractérisation des saisons végétatives

2.2.3.1 - Tendance des classes de NDVI

L'application du test d'homogénéité encore appelé test de tendance de Mann-Kendall aux données NDVI MODIS de la moyenne mensuelle de chaque classe dans la zone de recherche, montre des tendances positives durant la période considérée (Tableau 12).

Tableau 12: Test de Mann-Kendall avec saisonnalité appliquée aux classes

	Classe 2	Classe 3	Classe 5	Classe 6	Classe 7
Tau of Kendall	0.05	0.23	0.23	0.23	0.15
S'	50.00	212.00	212.00	218.00	136.00
p-value	0.39	0.00	0.00	0.00	0.02
alpha	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

Le test de Mann-Kendall avec saisonnalité appliquée aux classes permet de rejeter ou d'accepter les hypothèses H_0 (il n'y a pas de tendance dans la série) et H_a (il existe une tendance dans la série). Ainsi, une tendance positive est observée dans les séries des classes 3, 5, 6 et 7 car la p-value calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha=0.05$, on rejette l'hypothèse nulle H_0 et retient l'hypothèse alternative H_a . Pour la classe 2, aucune tendance

n'est observée, car la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 . Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 alors qu'elle est vraie est 51 %.

L'examen des profils temporels par classe (Figure 39), permet d'observer au cours de la période d'étude, les fluctuations interannuelles des valeurs de NDVI. Ces fluctuations sont très variables d'une classe à l'autre, mais néanmoins des similitudes existent sur l'allure des courbes. En effet, on observe pour l'ensemble des classes une baisse de la valeur de NDVI pour l'année 2005, suivi d'une croissance des valeurs entre 2006 et 2007, puis une autre baisse de NDVI en 2010 pour finir avec une reprise en 2012.

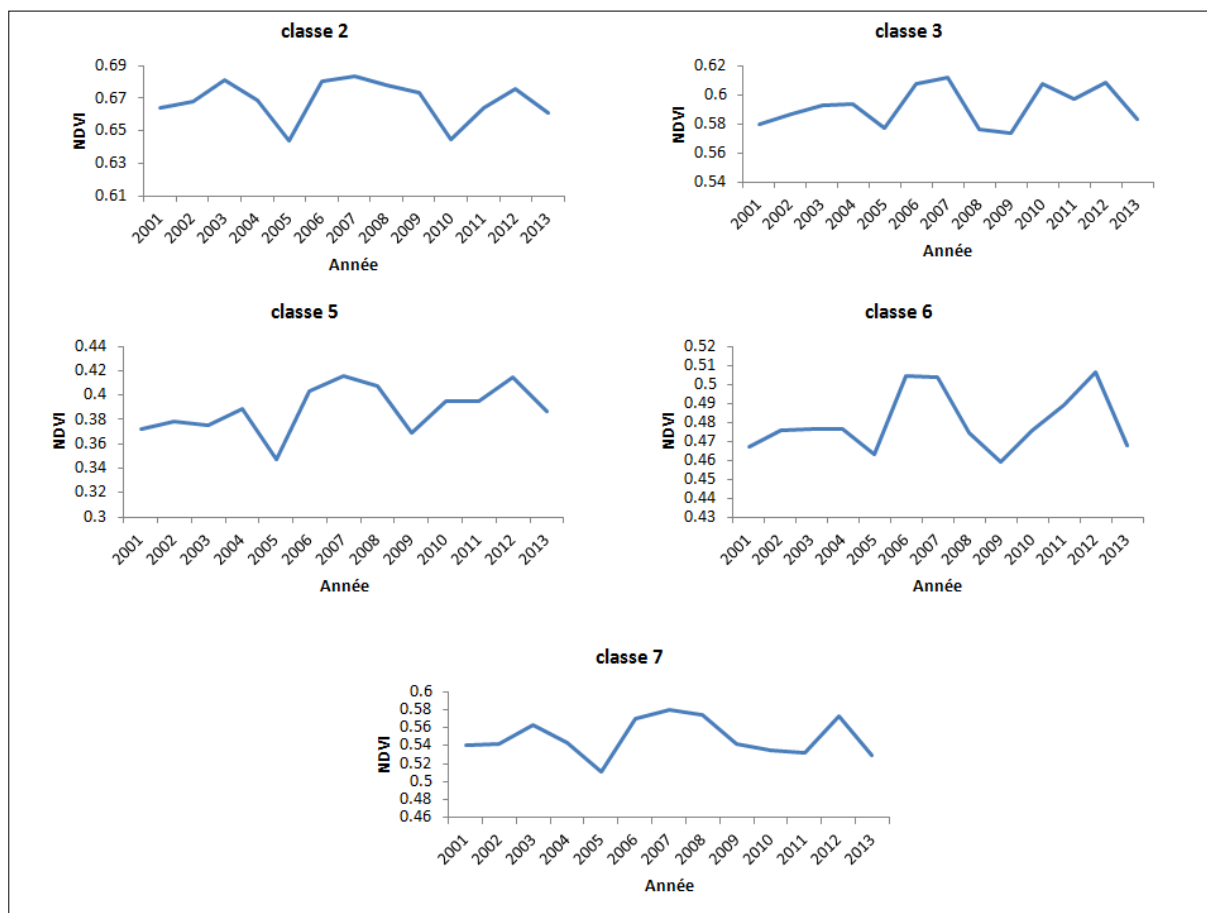


Figure 39: Fluctuation interannuelle de NDVI des classes de végétations (Source : Boussougou, 2017)

Les fluctuations interannuelles observées peuvent être attribuées à de nombreux facteurs, notamment, aux facteurs météorologiques et agro écologiques du milieu qui sont déterminants dans le cycle de croissance des plantes et donc de la variation de l'intensité de l'activité chlorophyllienne mesurée par le NDVI. On peut également lier cette fluctuation annuelle au rythme et la distribution des pluies au cours de l'année. En effet, en zone tropicale, la pluie est le principal facteur de croissance pour les plantes.

2.2.3.2 - Caractéristiques de la saison végétative : date de début, date de fin et longueur de la saison végétative

La mise en évidence des dates de début, de fin et longueur de la saison végétative est effectuée à partir du logiciel TIMESATE.

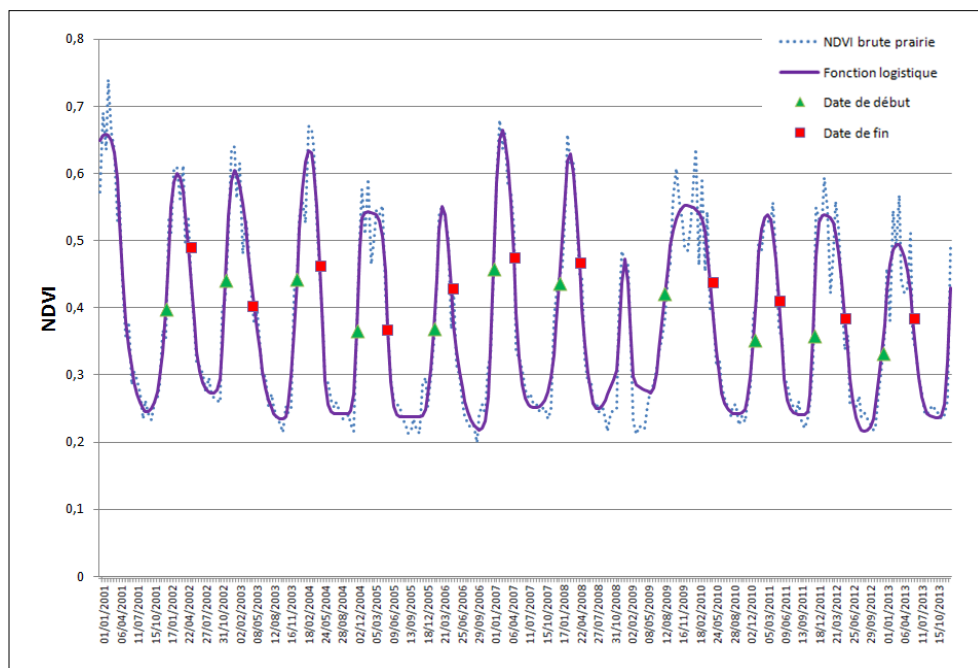


Figure 40: Estimation de la phénologie saisonnière moyenne du NDVI-MODIS sur la période 2001 à 2013 pour classe X (Source : Boussougou, 2017)

La Figure 40 montre un exemple de résultat graphique en sortie du traitement de NDVI dans TIMESAT. On note les dates de début (carré rouge) et fin (triangle vert) ainsi que la courbe de lissage (violet) des données brutes de NDVI (pointillés).

Ainsi, pour chacune des 5 classes de NDVI, nous avons extrait les paramètres cités plus hauts (date début, date fin et longueur de la saison végétative). Ceux-ci sont présentés dans la Figure 41. Cette figure montre en effet, que les variations dans les dates de début et fin de saison végétative s'observent dans chaque classe. On remarque une instabilité dans les mois de démarrage de saison végétative qui peut varier de un à trois mois selon la classe. Par contre, les mois de fin de saison sont relativement stables pour toutes les classes excepté la classe 2.

Pour distinguer les différentes phases phénologiques des classes de végétations, on s'intéresse aux phases de démarrage et à la fin de la saison végétative. Celles-ci, pouvant être tardive ou précoce. La saison végétative s'étale en moyenne de novembre à juin, mais varie d'une classe à l'autre. La figure 41 permet aussi de montrer que certaines saisons végétatives s'observent sur une année civile, exemple pour les classes 2, 5 et 7 en 2010. On remarque également que chaque classe de NDVI présente au moins 3 années où aucune saison n'a été détectée (absence de saison). Cette absence de saison est observable à partir de l'année 2007 pour la classe 2 et 2008 pour les classes 3, 7, 5 et 6.

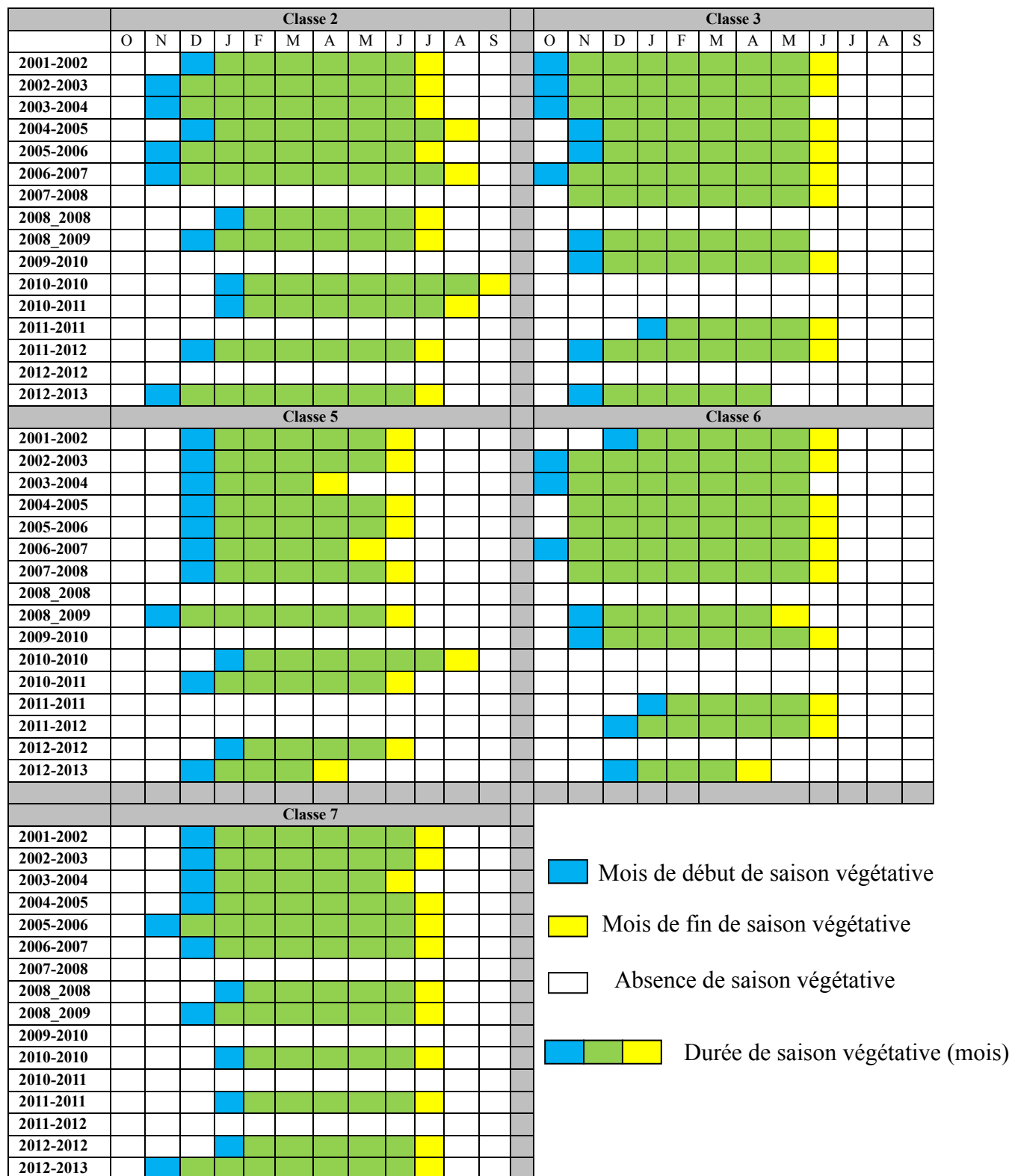


Figure 41: Figure : Dates de débuts et fins de saison végétative des classes de NDVI (Source : Boussougou, 2017)

Les mois de démarrage de la saison végétative oscille entre novembre et décembre. Les classes 2 et 3 ont un démarrage précoce au mois d'octobre contrairement aux classes 5, 6 et 7 qui elles ont un démarrage tardif en décembre. En ce qui concerne la fin de la saison, elle a lieu entre avril et Août. Les classes 3, 5 et 6 ont une fin de saison précoce (juin) tandis que les classes 2 et 7 ont une fin tardive (juillet).

Les démarrages/fins précoces ou tardifs ont une influence sur la durée de la saison. En effet, il est évident que pour une classe qui a un démarrage précoce et une fin tardive, la saison sera plus longue que celle qui a un démarrage tardif et fin précoce ou encore démarrage précoce et fin précoce. Prenons par exemple la classe 2, dont les variations du NDVI pendant la période d'étude restent faibles. Cette dernière montre les plus longues saisons végétatives pouvant atteindre huit mois, à cause des démarrages précoces et fins tardives. A l'inverse, la classe 5, qui on l'a vu montre les plus faibles variations de NDVI, présente les durées les plus courtes (six mois).

Pour l'ensemble des classes, une tendance à la baisse de la durée des mois est observée à partir de 2005. En effet, de 2001 à 2005 les durées sont relativement stables avec quelques fluctuations de moins de 1 mois par classe. Mais au-delà de 2005, on note une forte variation des courbes et en 2012 une baisse importante de la durée des classes 5, 3 et 6. A l'inverse les courbes des classes 7 et 2 enregistrent une augmentation de durée pendant cette année 2012. En comparant les classes par les longueurs de la saison végétative, c'est la classe 2 qui enregistre la plus longue durée soit 8 mois, suivi des classes 3 et 7 avec 7 mois enfin les classes ayant la plus petite longueur sont les classes 5 et 6 (Figure 42).

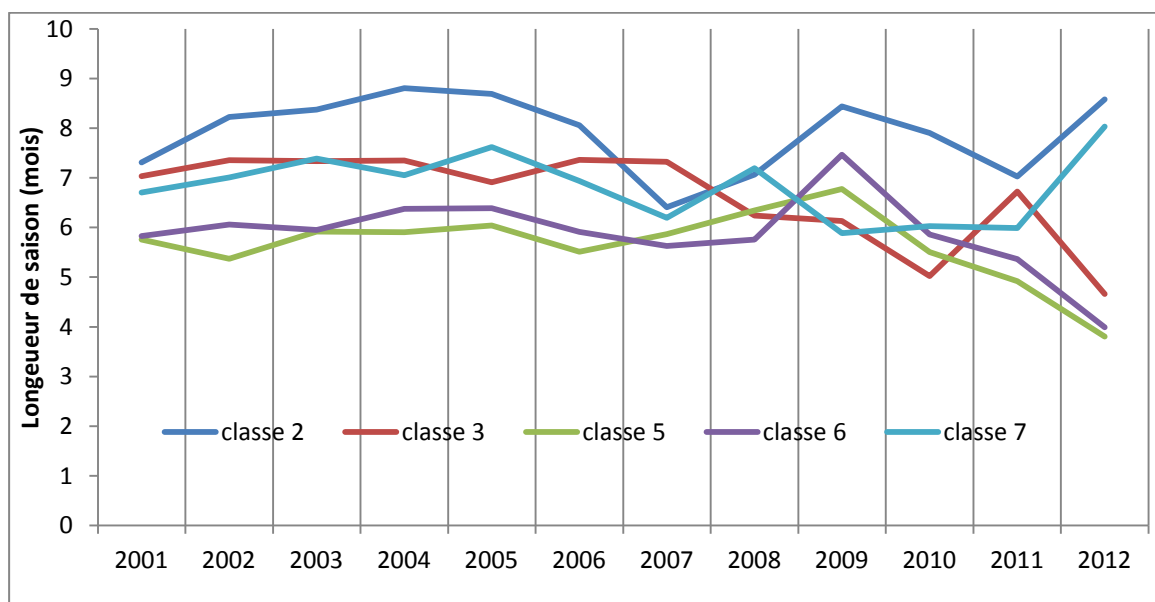


Figure 42: Variation de la durée de saison végétative par classe (Source : Boussougou, 2017)

2.2.3.3 - Analyse des cycles saisonniers de NDVI

Les profils saisonniers ou encore cycles saisonniers associés aux classes de NDVI, permettent d'observer les variations saisonnières d'une classe à l'autre pendant la période 2001-2013. On observe ainsi les différenciations par classe (Figure 43) :

- Le cycle saisonnier de la classe 2 présente des faibles variations de NDVI durant l'année. Les valeurs de NDVI sont relativement constantes avec des valeurs qui oscillent entre 0,5 et 0,73. Une légère croissance de valeurs est observée pour la classe 2 d'octobre (O) à janvier (J), puis de février (F) à juin

(J). Les valeurs restent constantes avec une légère baisse observée en mai (M). De juin (J) à septembre (S) une baisse est observée. La saison végétative ici a donc de longue durée qui s'étale sur presque 8 mois de l'année.

- Le cycle saisonnier de la classe 3 présente également des variations moyennes de 0.4 à 0.70. De décembre (D) à Mai (M). Les valeurs sont stables, tandis que d'octobre (O) à décembre (D) une hausse de valeurs est observée. De mai (M) à août (A), une baisse est enregistrée pour finir avec une légère remontée à partir du mois de septembre (S). La saison végétative est d'environ 7 mois pour cette classe 3.
- Les profils saisonniers des classes 5, 6 et 7 quant à eux, présentent les plus fortes variations de NDVI pendant l'année. Les valeurs oscillent respectivement entre 0.22 et 0.55 pour la classe 5, entre 0.29 et 0.69 pour la classe 6 et entre 0.38 et 0.70 pour la classe 7. On note une augmentation des valeurs d'octobre (O) à mars (M), puis une baisse à partir du mois de mai (M), une légère montée en août pour les classes 5 et 6. La classe 7 présente un pic de NDVI au mois d'avril (le plus important), puis un autre au mois de juin (J) et entre les deux mois une baisse de NDVI de mars à avril. Pour les classes 5 et 6, les pics sont observés en mars et avril respectivement. La forme en cloche des courbes permet de bien observer la saison végétative qui est de 6 mois, donc plus courte que celle des classes 2 et 3.

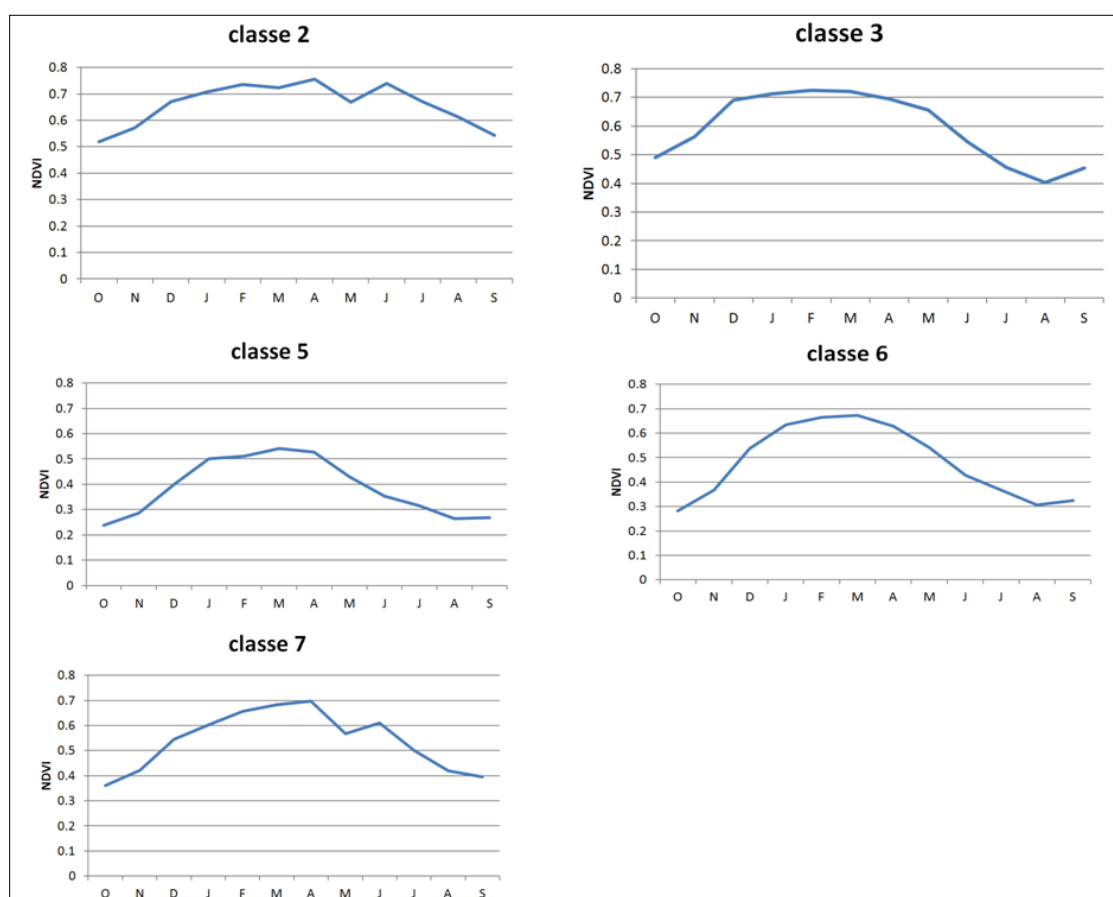


Figure 43: Variations cycles saisonniers de NDVI par classe (Source : Boussougou, 2017)

Les analyses spatio-temporelles des précipitations et de l'activité végétale faites précédemment suggèrent un lien étroit entre ces deux variables. En effet, il a été observé des évolutions annuelles et interannuelles presque similaires entre la pluie et le NDVI. C'est pourquoi, dans la suite et fin de cette partie de l'étude, nous montrerons par des calculs statistiques les relations fortes ou faibles existant entre les deux (pluie et NDVI) à l'échelle du pays. Tout ceci dans le but d'identifier et localiser les milieux sensibles à la variabilité climatique (pluies) observée précédemment.

2.3 - Relation pluie-NDVI

2.3.1.1 - Corrélation entre classes de NDVI et précipitation

Une première façon de montrer le lien entre les précipitations et l'activité végétale (NDVI MODIS), est la détermination du coefficient de corrélation. Dans un premier temps, nous testons les corrélations entre classes de NDVI et les précipitations correspondantes sur la période d'étude (Figure 44) et dans un second nous montrerons les corrélations entre pixels de NDVI et pixels de TRMM sur la même période (Figure 46).

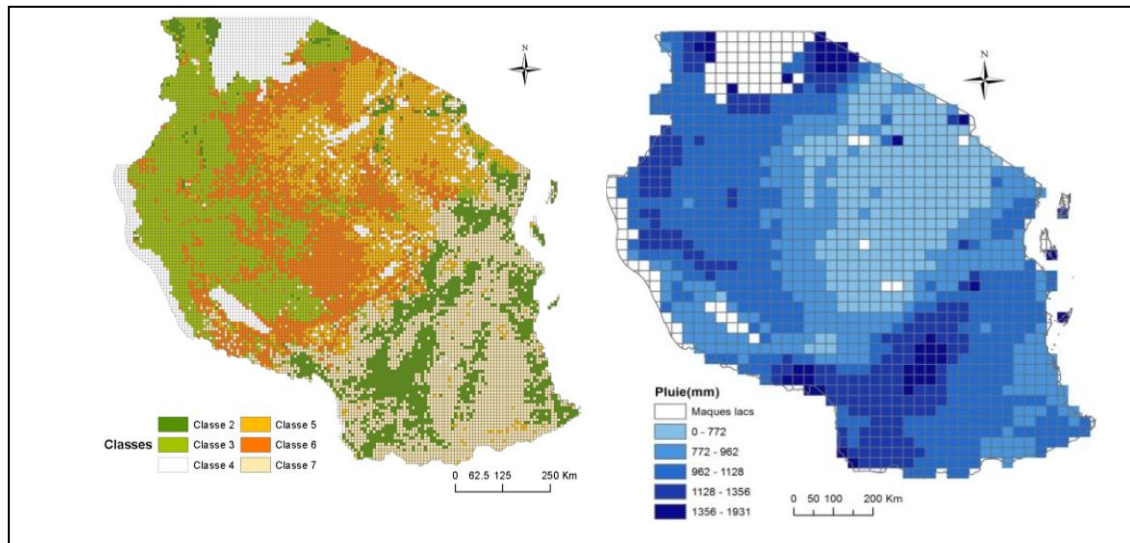


Figure 44: classes de NDVI (gauche) et précipitation moyenne annuelle (droite) (Source : Boussougou, 2017)

Nous avons choisi de représenter sur un même graphique les cycles saisonniers de NDVI et des pluies correspondant à ces derniers (Figure 45). On note que les classes 2, 7 et 3 ne suivent pas les mêmes variations de précipitation de leurs zones géographiques. C'est-à-dire, en période de faibles précipitations les valeurs de NDVI continuent d'augmenter (de février à juin pour la classe 2 ; de février à mai pour la classe 3). Pour les autres classes, les courbes suivent à peu près les mêmes évolutions, mais sont décalées dans le temps de deux à trois mois.

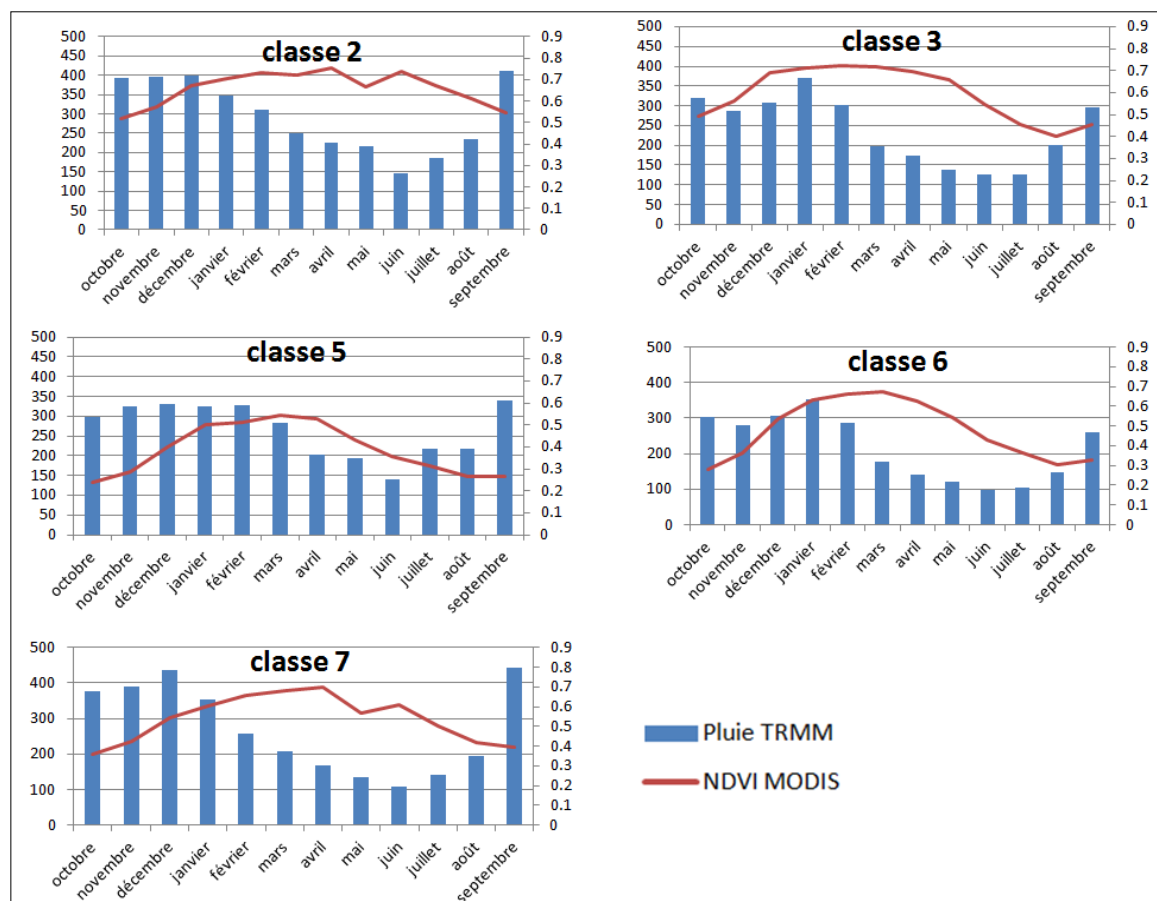


Figure 45: comparaison entre les variations saisonnières de NDVI et les pluies mensuelles sur la période 2001-2013 (Source : Boussougou, 2017)

Cette figure 45 permet encore une fois de plus de confirmer que les fortes variations de NDVI correspondent bien aux zones de précipitations bien marquées. C'est-à-dire peu de pluie en hiver et beaucoup de pluie en été. A l'inverse les classes de faibles variations de NDVI sont aussi des zones où les précipitations varient peu toute l'année. Donc les classes de NDVI se répartissent bien en fonction des zones de précipitations.

Cette première analyse, nous amène à déterminer les corrélations entre les classes de NDVI et les pluies correspondantes, en cherchant également s'il existe un temps de réponse de chaque classe face aux précipitations. Ce temps de réponse sera déterminé en décalant le NDVI de 1, 2 ou 3 mois par rapport aux mois de précipitations.

Tableau 13: Corrélation entre classe de NDVI et pluie correspondant (Source : Boussougou, 2017)

Classe NDVI/décalage	0 mois	1 mois	2 mois	3 mois
Classe 2 (forêt dense et humide)	-0.38	-0.54	-0.51	-0.41
Classe 3 (forêt sèche)	0.14	-0.18	-0.49	-0.63
Classe 5 (mosaïque cultures/prairie)	-0.01	-0.26	-0.38	-0.48
Classe 6 (forêt de mangrove)	0.08	-0.26	-0.58	-0.76
Classe 7 (mosaïque prairie/arbustive)	-0.38	-0.58	-0.62	-0.54

Le résultat du calcul de corrélation est présenté dans le Tableau 13. On remarque tout d'abord que les valeurs de corrélation de toutes les classes augmentent avec le décalage temporel entre le NDVI et la pluie. A partir de 3 mois de décalage, les valeurs des classes 2 et 7 diminuent. Mais le fait le plus marquant dans ce résultat est le signe des corrélations. En effet, toutes les corrélations sont négatives, ce qui suggère un lien inverse entre la pluie et le NDVI. Ce résultat est contraire aux études menées dans la sous-région. On peut trouver une explication dans le choix des classes considérées pour le calcul de corrélation. En effet, chaque grande classe de NDVI étant un regroupement de plusieurs types de végétaux, qui eux-mêmes peuvent être impactés différemment par la pluie peut biaiser le calcul et donc montrer un effet inverse.

Ce résultat peu concluant nous amène à changer d'échelle de corrélation. En effet, les données TRMM ayant une résolution spatiale grossière (environ 24 km), la corrélation entre une classe de NDVI de taille inférieure au pixel peut expliquer les corrélations négatives observées.

Ainsi, la deuxième manière de montrer le lien existant entre l'activité végétale et les variations de précipitation est la méthode de corrélation pixel par pixel. C'est-à-dire montrer la liaison entre un pixel de TRMM (24km) et le pixel de NDVI MODIS (250m) ré-échantillonné à la résolution de TRMM. Pour observer l'effet temporel de la pluie sur le couvert végétal on décale comme dans la première méthode, le NDVI de 1, 2 et 3 mois par rapport au mois de pluie.

2.3.1.2 - Corrélation pluie-NDVI par pixel

La deuxième méthode de corrélation entre la pluie et le NDVI testée, est celle basée sur le pixel. C'est-à-dire pour un pixel TRMM, on cherche à voir la relation qu'il y a avec le pixel NDVI MODIS qui se superpose à ce dernier (Figure 46).

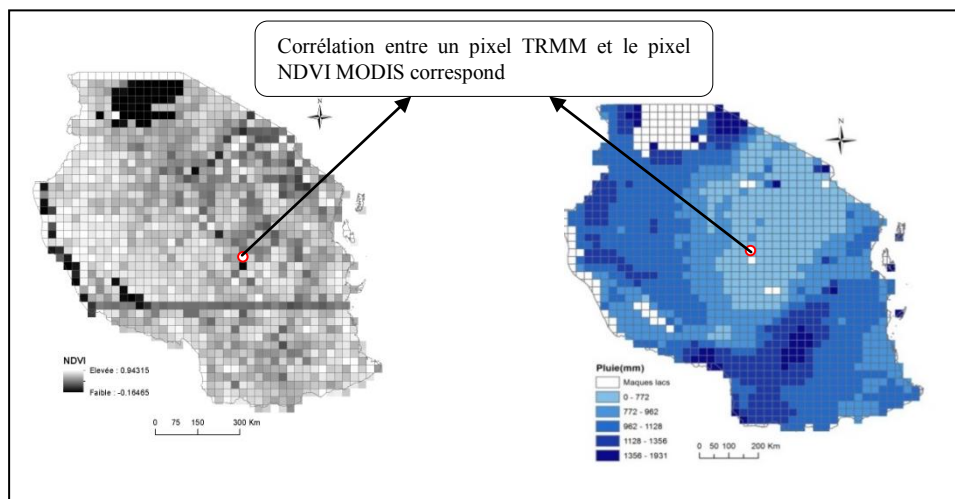


Figure 46: NDVI MODIS, pluie TRMM, occupation de sol en Tanzanie (Source : Boussougou, 2017)

Le résultat des corrélations entre la pluie de TRMM et de NDVI de MODIS sont présentés dans la Figure 47. La figure 47 présente les corrélations en fonction du décalage temporel de 0, 1,2 et 3 mois.

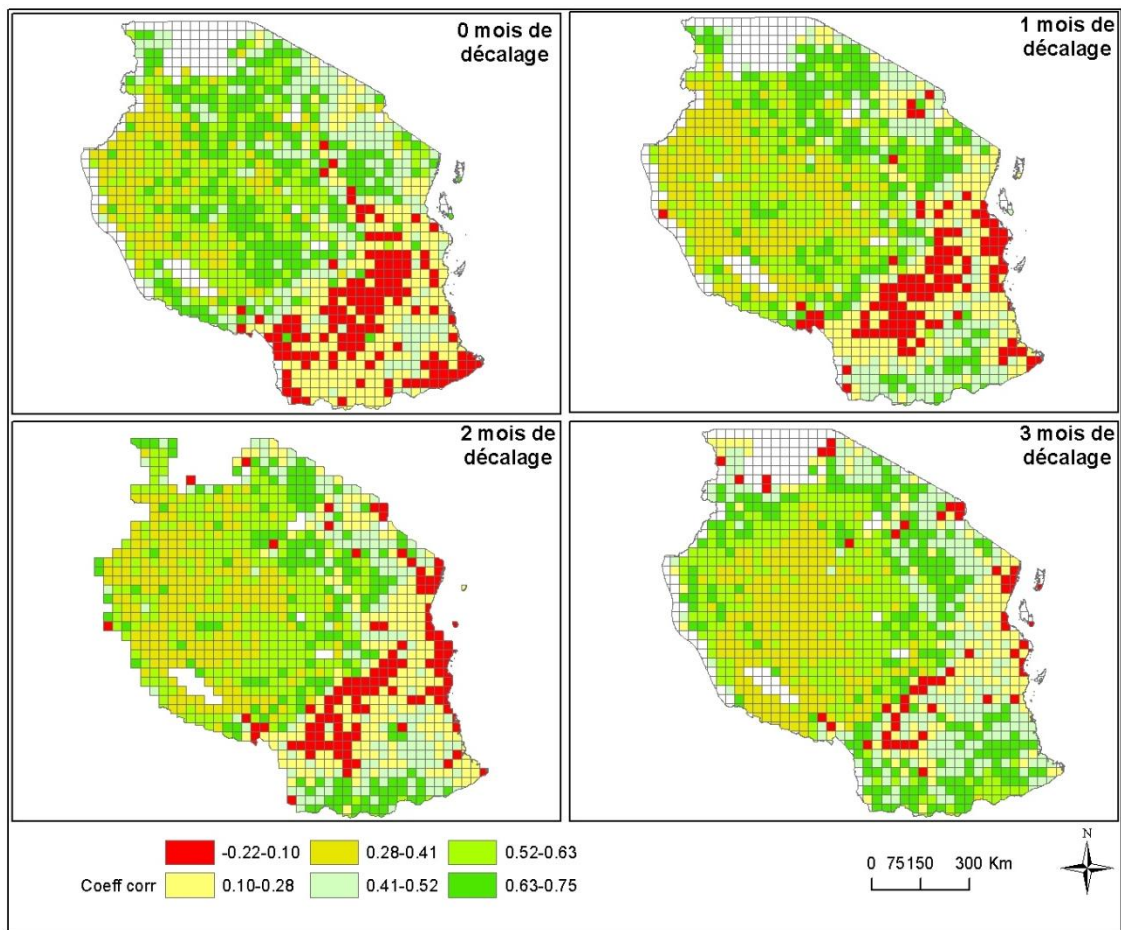


Figure 47: Corrélations pluie/NDVI pixel par pixel et décalage temporel de 0, 1, 2 et 3 mois (Source : Boussougou, 2017)

D'une vue générale, plus on décale les mois de NDVI dans le temps par rapport aux mois des précipitations, plus les fortes valeurs de coefficients de corrélation se déplacent du centre du pays vers l'est et le sud. A l'inverse les valeurs négatives disparaissent et sont remplacées par des pixels positifs dans le sud. On retrouve quelques pixels négatifs isolés à partir de 3 mois de décalage au nord et à l'est. Le test de significativité (Gibbons, 1975) (p -valeur inférieure à 0.05 pour les fortes corrélations et p -valeur supérieures à 0.05 pour les faibles valeurs de corrélation) appliqué aux corrélations par pixel confirme le lien existant entre les deux paramètres (Annexe B: test de significativité).

Les corrélations pixel par pixel sur la période d'observation nous montrent des fortes variations du coefficient de corrélation partant des valeurs négative aux positives (-0.22 à 0.75). Ce premier résultat est en accord avec les travaux réalisés en Tanzanie par Debien (Debien et *al.*, 2010).

Lorsqu'on s'intéresse de plus près à chaque déphasage temporel et au temps de réaction végétal par rapport aux pluies, on a :

- A zéro mois de décalage, c'est-à-dire pluie de janvier et NDVI de janvier par exemple : le sud du pays enregistre des faibles valeurs de corrélations (-0.22-0.10), tandis que le centre et le nord montrent des fortes valeurs. Les fortes valeurs du centre témoignent d'une réponse rapide de la végétation dans cette zone face aux pluies. A

l'inverse les valeurs négatives du sud témoignent d'un effet inverse (nul) des précipitations.

- A 1 mois de décalage, c'est-à-dire pluie de janvier et NDVI de février : apparition des fortes valeurs dans le sud du pays et déplacement des fortes valeurs vers le nord-est. On observe également un étalement des valeurs intermédiaires (0.28-0.41) de l'ouest vers le centre. On assiste à un remplacement des pixels négatifs par des pixels positifs dans le sud de Tanzanie et inversement apparitions des pixels négatifs au nord-est. Le déplacement des pixels de forts coefficients de corrélation à partir d'un mois de décalage, nous indique une réaction tardive de la végétation face aux précipitations.
- A 2 et 3 mois de décalage : on observe une disparition presque totale des valeurs négatives de corrélation au sud du pays. Aussi les fortes corrélations tendent à gagner tout le territoire. On parle dans ce cas de réponse végétale très tardive, notamment dans la partie sud. On peut ainsi imaginer qu'au-delà de 3 mois de décalage toute la végétation sera impactée par les précipitations.

Pour mieux comprendre les changements dans les valeurs de corrélation des pixels, il faut superposer la carte de corrélation spatiale à la carte d'occupation du sol de Tanzanie. Ainsi, en se référant à cette dernière on constate que les pixels à réponse rapide (0 mois de décalage entre la pluie et le NDVI), correspondent aux zones de végétation de types savanes, prairie et arbustive. En effet, cette zone étant identifiée comme zone semi-aride (PLDPT, 1984), la réponse presque simultanément aux précipitations du centre de Tanzanie est en accord avec les observations faites en zone semi-aride en Afrique par d'autres auteurs (Philippon et Martiny, 2011 ; Martiny *et al.*, 2006; San Emeterio *et al.*, 2009).

Les pixels du sud à réponse tardive (plus de 1 mois de décalage) correspondent aux zones de forêt de types forêt à feuilles caduques, forêt à feuilles persistantes. Ces types de végétation gardent leurs feuillages verts presque toute l'année due à un effet mémoire des forêts. Il faut donc plusieurs mois, ici plus de 3 mois de précipitation pour observer un impact sur la couverture végétale.

Nous regardons par la suite, comment varient les corrélations avec la variabilité saisonnière des précipitations. Pour cela, on calcule la valeur moyenne mensuelle en tenant compte de toute la période de temps (2001-2013), c'est-à-dire la moyenne pour janvier, moyenne pour février... La corrélation est estimée entre (i) les valeurs moyennes de NDVI pour tous les mois et (ii) les valeurs correspondantes de précipitations. On obtient un coefficient de corrélation par pixel. Pour le décalage temporel, il suffirait de décaler les valeurs de NDVI avec les précipitations.

La Figure 48 nous permet de voir les variations spatio-temporelles des coefficients de corrélation mensuels sur la période d'étude. Les corrélations varient d'un mois à l'autre et il est difficile de distinguer une tendance saisonnière dans une région précise. Néanmoins, de mai à août (saison sèche), on observe un déplacement des faibles valeurs (-0.45,-0.18) de corrélation de l'est vers le sud et l'ouest. Pour les mois de saison de pluies d'octobre à mai les faibles valeurs se déplacent de l'ouest vers l'est. A l'inverse les fortes valeurs se déplacent du centre vers l'ouest et le sud du pays. On voit ici, que le comportement végétal varie fortement d'un mois à l'autre à cause de la forte variabilité pluviométrique d'une région à l'autre, parfois sur quelques kilomètres dans la même région. Cette forte variabilité des corrélations suggère que seule la pluviométrie ne peut pas expliquer les changements observés

dans le NDVI (activité végétale). Il est donc important de mettre en relation la liaison NDVI/Pluie avec d'autres variables, comme par exemple la topographie ou encore l'humidité observées.

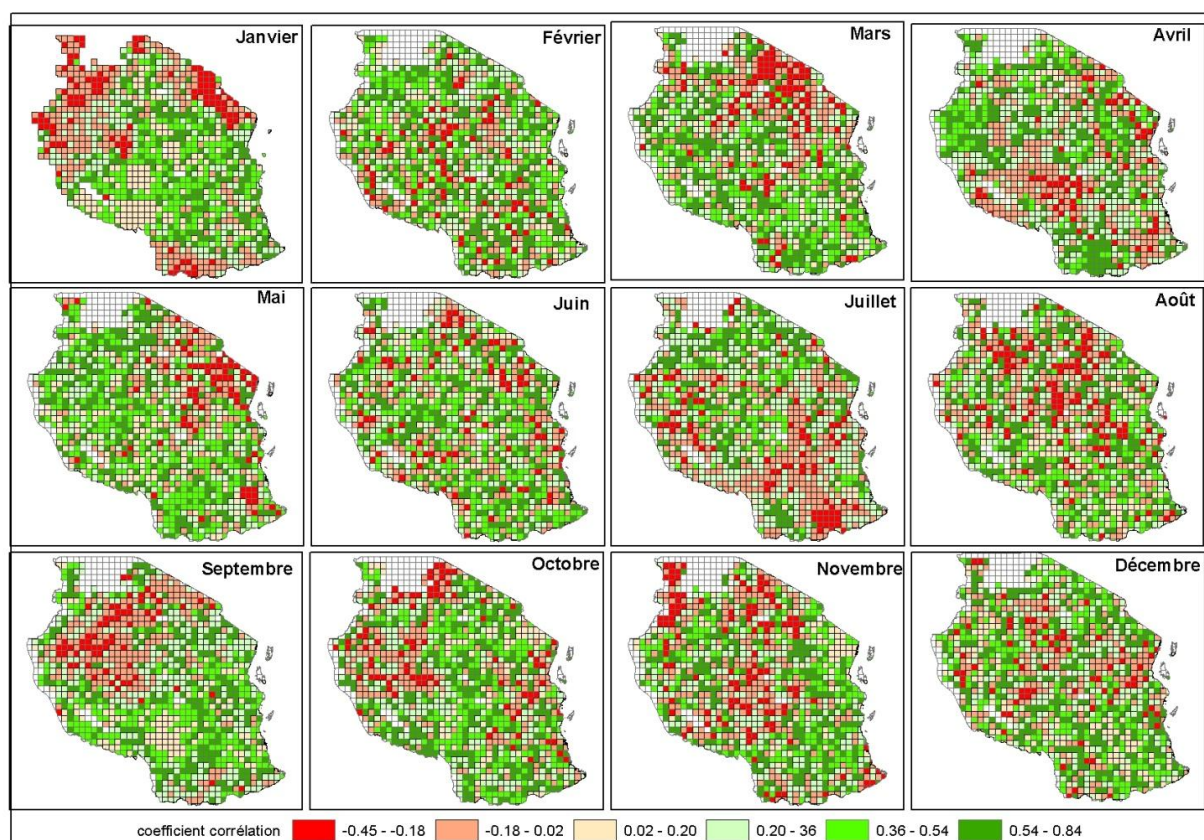


Figure 48: corrélation mensuelle pluie TRMM/NDVI MODIS sur la période 2001-2013 (Source : Boussougou, 2017)

2.4 - Conclusion du chapitre 2

La première étape de notre travail avant le traitement des données TRMM a été la validation de cette dernière à partir des données des stations *in situ*. Les résultats des calculs statistiques indiquent une bonne corrélation ($> 0,50$) entre les données mensuelles TRMM (3B43) et les données stations pluviométriques. La validation a été limitée à quelques stations (11 stations).

Les cartes mensuelles de pluies nous ont permis de distinguer la variabilité de la saison de pluie et de la saison sèche qui varie elle-même, d'une zone géographique à l'autre et même au sein d'une même zone. De même, nous avons observé, une variabilité annuelle et interannuelle des précipitations sur la période 2001-2013. Cette variabilité se manifeste par l'alternance des années dites pluvieuses (humides) comme par exemple 2006 et 2011 et des années dites non pluvieuses (sèches), comme 2004 et 2009. L'analyse en composantes principales a permis d'observer les modes de variabilité des pluies. Enfin, la classification de l'ACP nous a permis de proposer une nouvelle cartographie des régimes pluviométriques de Tanzanie sur la période 2001-2013. Nous avons identifié 11 régimes pluviométriques marqués par des modes de variabilité saisonnière différents à l'échelle de la Tanzanie. Il a également été observé des oppositions entre les régimes pluviométriques de la région centrale constituée de savane et prairie marquée par des hauteurs annuelles faibles, un nombre de mois secs important (7 mois) et plus affectée par la variabilité interannuelle des précipitations d'une part et d'autre part les régions forestières du nord, sud et l'est plus humides et présentant des faibles déficits des hauteurs pluviométriques interannuelles.

La sensibilité de la phénologie végétale à la variabilité pluviométrique a été analysée par l'étude des relations spatio-temporelles entre l'indice de végétation normalisé NDVI-MODIS et la pluviométrie (pluie TRMM). Ce lien est déterminé statistiquement par le calcul du coefficient de corrélation de deux manières : par classes de NDVI et par pixel de NDVI. Il en ressort que les corrélations par pixel décrivent mieux la réalité du terrain par rapport aux corrélations par grandes classes de végétation. Ainsi nous avons remarqué que certaines végétations sont plus sensibles à la présence ou absence d'eau sur des courtes périodes (mensuelle). Les savanes et les cultures par exemple sont de ce type de végétation à sensibilité forte face aux précipitations avec des coefficients de corrélation supérieurs à 0,70. A l'opposé on retrouve les mangroves et les forêts qui sont très peu impactés par les précipitations avec des coefficients inférieurs à 0,50.

En somme, l'étude met en évidence une forte relation ($r=0.70$) entre la dynamique saisonnière des paysages de végétation et celle des précipitations. Le temps de réponse végétale est quasi instantané (au cours du mois) au signal pluviométrique pour la végétation (savanes, prairie...) se localisant au centre du pays (réponse précoce). A l'opposé, les paysages de forêts et mosaïques de végétation du fait de leur réserve en eau réagissent tardivement aux précipitations (réponse tardive).

Cette étude a permis également de montrer que la pluie ne peut à elle seule expliquer l'ensemble des changements observés dans le couvert pour un grand territoire comme la Tanzanie. D'autres paramètres, tel que la température, la topographie doivent également être considérés pour mieux expliquer pour certaines régions la variabilité du NDVI.

Chapitre 3 - Modification de la couverture végétale en relation avec les activités humaines à l'échelle locale : Réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi

Introduction

Dans ce chapitre, nous analyserons la dynamique et les changements d'occupation du sol à l'échelle des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi situées dans le sud-est de la Tanzanie. On utilise pour cela des séries d'images à haute et très haute résolution spatiale respectivement de LANDSAT et SPOT 6. De là, les techniques de télédétection permettront de suivre les évolutions des différents paysages forestiers sous l'effet des activités anthropiques. En effet, l'expansion des villes (routes, urbanisation...), le poids démographique, l'intensification de la production agricole sont d'autres sources de menaces qui s'ajoutent aux variations climatiques accentuant la fragilité des espaces forestiers (aires protégées).

Ainsi, l'évolution de l'impact des pressions humaines sur les aires protégées est basée, dans notre étude, sur l'hypothèse d'une augmentation des pressions des populations autour des réserves forestières au fil des années.

L'utilisation des données satellitaires à haute résolution spatiale pour analyser la dynamique des paysages forestiers semble être l'outil le mieux adapté à une échelle locale. Il s'agira de croiser les différentes pressions humaines identifiées avec les différentes classes d'occupation du sol issues des traitements des images satellitaires par une analyse multicritère. Le but final étant de déterminer le poids de ces différents facteurs pour une modélisation prospective des deux réserves forestières étudiées.

3.1 - Données et méthodes d'analyse des modifications dans la couverture forestières des réserves de Pugu et Kazimzumbwi

3.1.1 - Les données utilisées

Nous disposons dans cette étude d'un jeu de données de quatre images satellitaires. Une image SPOT 6 du 10/06/ 2015 et trois images LANDSAT du 09/06/ 1995, du 01/09/2009 et du 13/06/2014 (Tableau 14).

L'image satellite SPOT 6 de 2015 a été obtenue gratuitement grâce au partenariat établi avec la station d'acquisition d'images satellites de l'Océan Indien basée à l'île de La Réunion, SEAS-OI (Station de Surveillance de l'Environnement Assistée par Satellite pour l'Océan Indien) (Figure 49) mise en fonction en 2012.

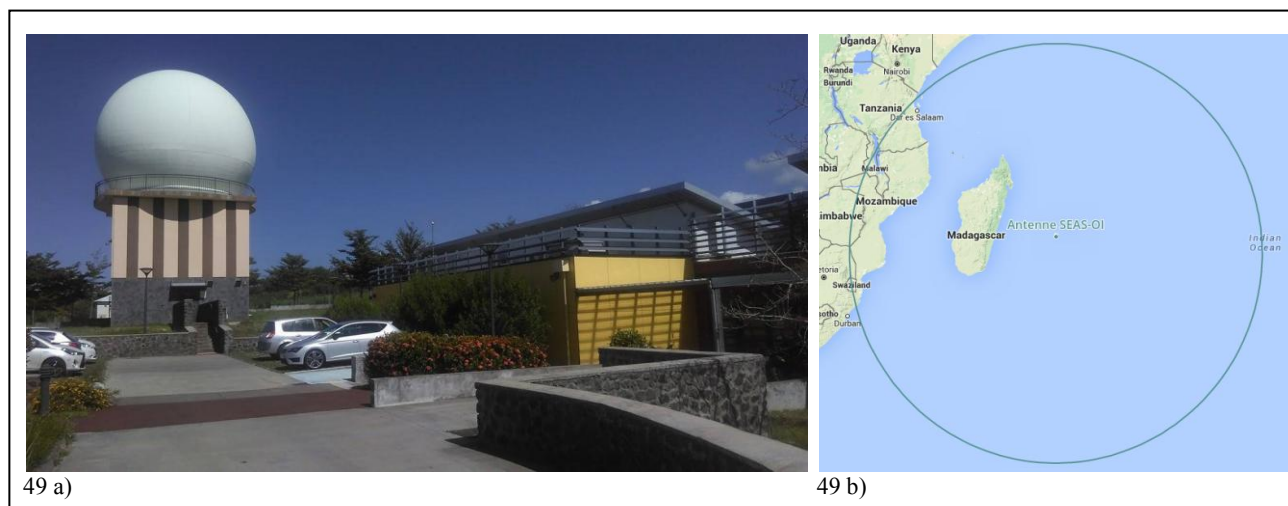


Figure 49: 8a : Station SEAS-OI (cliché: Boussougou, 2017) ; 8b : Zone d'acquisition de la station (source : <http://www.seas-oi.org>)

Les images LANDSAT de 1995, 2009 et 2014 ont été obtenues gratuitement via le site de la NASA (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Afin d'obtenir des images les plus propres possible, c'est-à-dire présentant le moins de perturbations atmosphériques visibles possible, les images ont été sélectionnées en période de saison sèche, entre mai et août de chaque année. Cela permet également une meilleure comparaison des résultats entre les différentes dates. L'ensemble des images satellite retenu dans l'étude est présenté dans la figure 50 et les caractéristiques des images sont consignées dans le Tableau 14.

Tableau 14: Images SPOT et LANDSAT retenues pour l'étude et principales caractéristiques radiométriques

Images	périodes	bandes	Résolution (m)	saison
LANDSAT 4,7	09/06/ 1995	Bande 1 : Bleu	30	sèche
	01/09/2009	Bande 2 : Vert	30	
	13/06/2014	Bande 3 : Rouge	30	
	06/08/2016	Bande 4 : Pir	30	
		Bande 5 : Mir	30	
		Bande 6 : IR th	30	
		Bande 7: Mir 2	30	
SPOT 6	10/06/ 2015	Panchromatique	1.5	sèche
		Bande 1 : Bleue	6	
		Bande 2 : Verte	6	
		Bande 3 : Rouge	6	
		Bande 4 : Proche infrarouge	6	

La Figure 50 permet d'illustrer la composition colorée des images en RVB (Rouge, Vert, Bleu) : la forêt dense apparaît en rouge foncé et la végétation arbustive ou dégradée en rouge clair. Le vert représente la végétation herbacée (prairie, savane) et enfin les sols et les surfaces bâties apparaissent en cyan. Dans l'image SPOT 6, les nuages sont masqués et apparaissent en blanc.

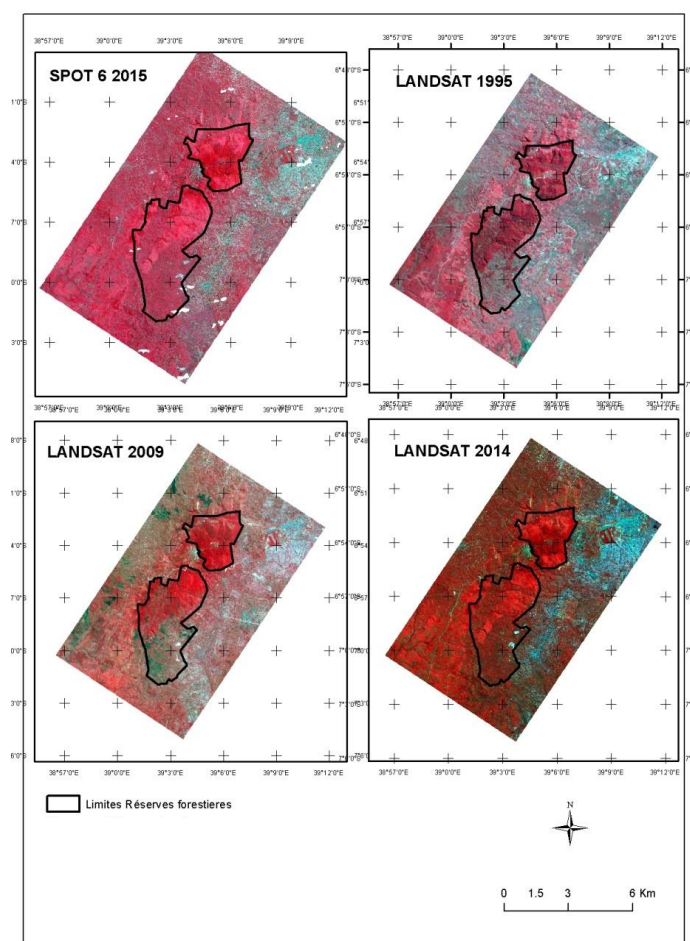


Figure 50: Visualisation des images SPOT et LANDSAT extraites de la zone d'étude (Source : Boussougou, 2017)

3.1.2 - Typologie des principales formations végétales dans les réserves forestières Pugu et Kazimzumbwi et dans leur périphérie

En télédétection, les données réalité-terrain sont indispensables pour valider tout traitement d'images satellitaires. L'objectif est de réaliser une cartographie détaillée de l'occupation du sol en accord avec les observations sur le terrain.

Pour cela, deux missions de terrain ont été réalisées sur le site d'étude : la première de février à avril 2015 et la seconde de mars à avril 2016. Les deux missions de terrain avaient pour objectif de déterminer et localiser les différentes formations végétales dans les réserves forestières de Pugu et de Kazimzumbwi et leur périphérie.

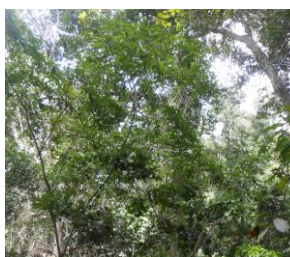
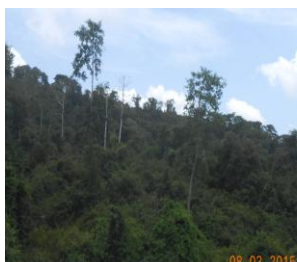
La première mission de terrain a permis de rentrer en contact avec les autorités locales en charge de la gestion et de la surveillance des réserves forestières dans le district de Kisarawe. Un guide forestier proposé par les autorités locales nous a permis, dans un premier temps de faire la reconnaissance terrain, puis dans un second temps d'identifier les différentes formations végétales présentes dans les réserves et dans leur périphérie. L'expertise du guide forestier et nos observations ont permis de déterminer et de définir les différentes classes d'occupation de sol. Les travaux antérieurs dans la zone (Mdemu et al., 2012; Anderson et al. 1976 ; Jensen, 1996; Mundia and Aniya, 2006; Kashaigili et Majaliwa, 2010) ont permis également de compléter la définition des différents types d'habitats.

La sortie sur le terrain se déroulait de la manière suivante : 1) Identification et définition des classes d'occupation de sol ; 2) prise des points GPS et photographies de chaque type de végétation représentatif de la classe d'occupation du sol. Leur surface devait être suffisante (au moins 30 hectares) pour être repérée sans ambiguïté sur l'image satellite. Un minimum de trente points GPS a été relevé par classe d'occupation du sol.

La seconde mission de terrain en 2016 avait pour objectif de compléter la première mission de terrain inachevée en 2015 et d'identifier les différentes pressions intérieures et extérieures aux réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi. Les deux missions de terrain nous ont ainsi permis d'identifier neuf classes d'occupation du sol. De plus, elles ont permis la validation des cartes d'occupation du sol obtenues par télédétection.

Classe 1 : Forêt dense

Cette formation végétale est extrêmement hétérogène et se localise au sommet des collines, sur des pentes et dans des vallées. Elle est très peu impactée par l'homme car leur accessibilité est difficile. Le feuillage de cette forêt humide est persistant et la taille moyenne des arbres est de dix mètres environ. Elle est souvent mélangée avec de la forêt dégradée. Les espèces dominantes sont : le *Scorodophloeus fischeri* et le *Manilkara sulcata*. Sur les pentes modérées, on retrouve les espèces *Antiaris toxicaria* et *Dialium holtzii*. C'est dans ces espaces que l'on peut rencontrer les derniers animaux de la réserve.



Photographie 5: Forêt dense : Clichés: Boussougou, 2015

Classe 2 : Forêt dégradée

Elle se caractérise par l'ouverture de la cime des plantes et la présence de dégradations liées aux activités anthropiques. Cette formation végétale est constituée de fourrés. On y retrouve les anciennes plantations forestières de *Cassia siamea*, d'*Eucalyptus sp.* et de *Grevillea robusta*.

Les grands arbres sont absents et seuls les troncs ne pouvant être transformés en bois d'œuvre résistent encore dans cette végétation. Les conséquences des actions de l'homme y sont visibles : on y trouve notamment d'anciens troncs des grands arbres et des zones de fabrication de charbon de bois.



Photographie 6: Forêt dégradée. Clichés: Boussougou, 2015

Classe 3 : Végétation arbustive

Elle est composée d'espèces végétales ligneuses dont la taille varie entre 1 et 5 mètres. On retrouve dans cette strate de la végétation certaines plantes cultivées comme le clou de girofle. On note également un mélange avec des espaces en jachère.



Photographie 7: Végétation arbustive. Clichés: Boussougou, 2015

Classe 4 : Savanes

C'est une formation végétale composée en majorité d'herbes. On retrouve dans cette formation des savanes dites arborées, arbustives et même boisées. On observe aussi un mélange avec certaines cultures, comme l'arachide, le maïs ou le riz.



Photographie 8: Savane. Clichés: Boussougou, 2015

Classe 5 : Cultures

Cette végétation correspond à des parcelles agricoles cultivées ou non mais du moins destinées à la culture. On retrouve des cultures comme l'ananas, la banane, le manioc, le riz ou le maïs.



Photographie 9: Cultures. Clichés: Boussougou, 2015

Classe 6 : Brousses

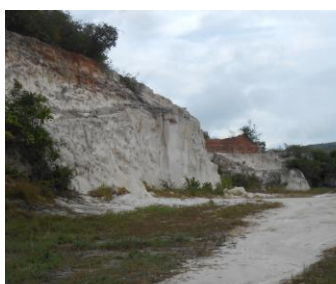
Cette végétation est très touffue et composée d'un mélange d'espèces arbustives, de savane et d'arbres isolés.



Photographie 10: Brousses. Clichés: Boussougou, 2015

Classe 7 : Sol nu

Il s'agit de toutes les surfaces dépourvues de végétation ou faiblement végétalisées. On y trouve par exemple les carrières d'extraction de roche utilisées pour la construction, d'anciennes carrières de sable ou d'anciennes mines de kaolin. Cette classe regroupe aussi les routes bitumées et certaines toitures de maisons recouvertes de poussières qui se confondent avec le sol nu.



Photographie 11: Sol nu. Clichés: Boussougou, 2015

Classe 8 : Bâti

Il s'agit ici des zones construites : logements des villes et villages, des hangars, des commerces...



Photographie 12: Surface artificialisée. Clichés: Boussougou, 2015

Classe 9 : Eau

On y retrouve les surfaces en eau telles que les rivières ou les réserves d'eau.



Photographie 13: Surface en eau. Cliché: Boussougou, 2015

La localisation spatiale des classes d'occupation du sol est illustrée dans la figure 51.

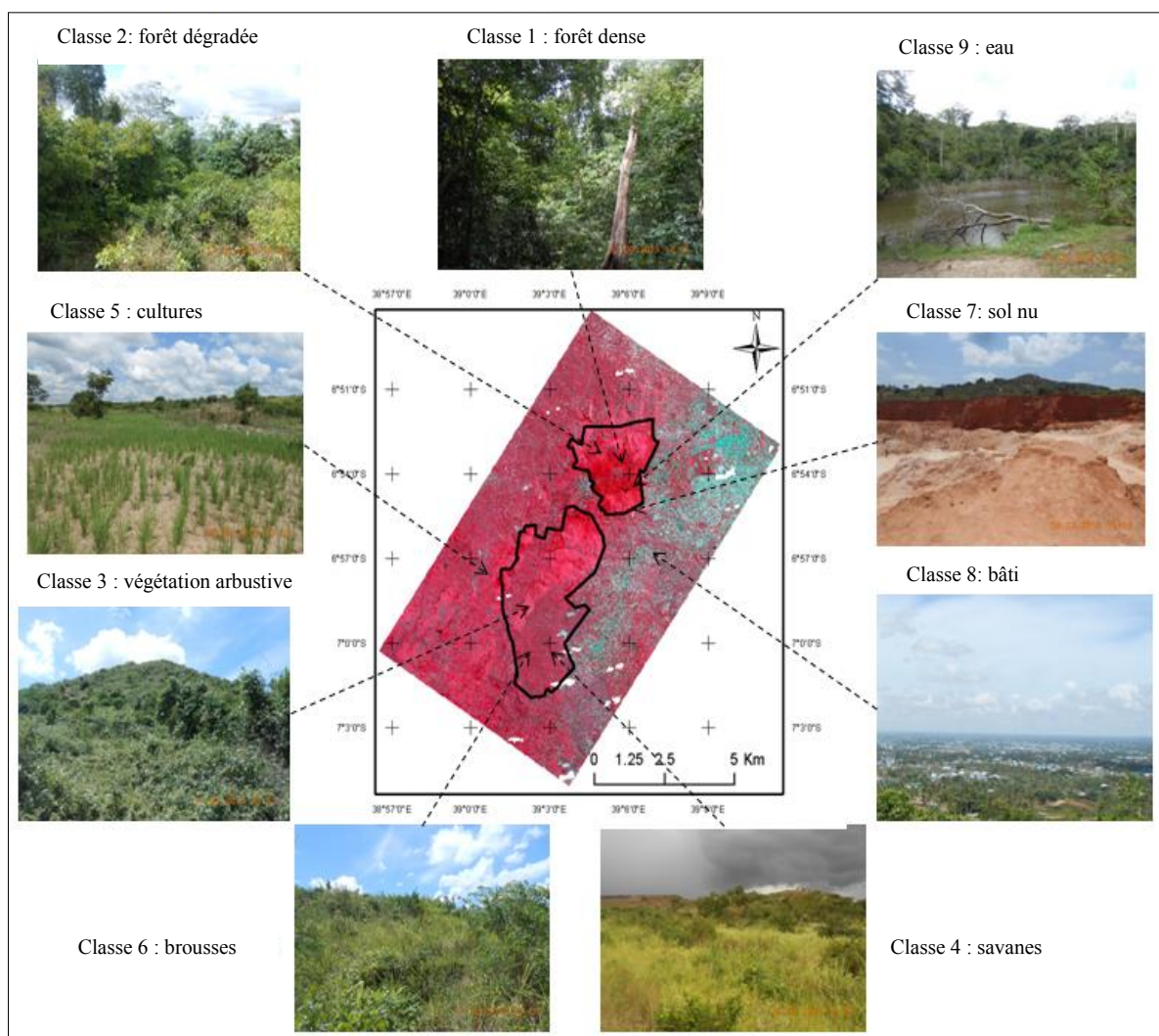


Figure 51: Répartition des relevés GPS des principales classes d'occupation du sol dans les réserves forestières et leurs périphéries (Source : Boussougou, 2017)

3.1.3 - Démarche générale du traitement des images satellitaires utilisées dans l'étude

Les images à haute et très haute résolution (SPOT et LANDSAT) ont subi un ensemble de prétraitements et traitements qui permettront d'obtenir des résultats cartographiques pertinents. La méthodologie générale des prétraitements et traitements est présentée dans le diagramme ci-dessous (Figure 52).

Les images ont d'abord subi des traitements géométriques qui les rendent superposables aux données vectorielles de la zone d'étude. L'image SPOT 6 ayant déjà été ortho-rectifiée au moment de la mise à disposition, elle a été choisie comme image de référence pour géoréférencer les images LANDSAT.

Des traitements radiométriques ont également été appliqués afin de corriger les effets de l'atmosphère sur la radiométrie des pixels.

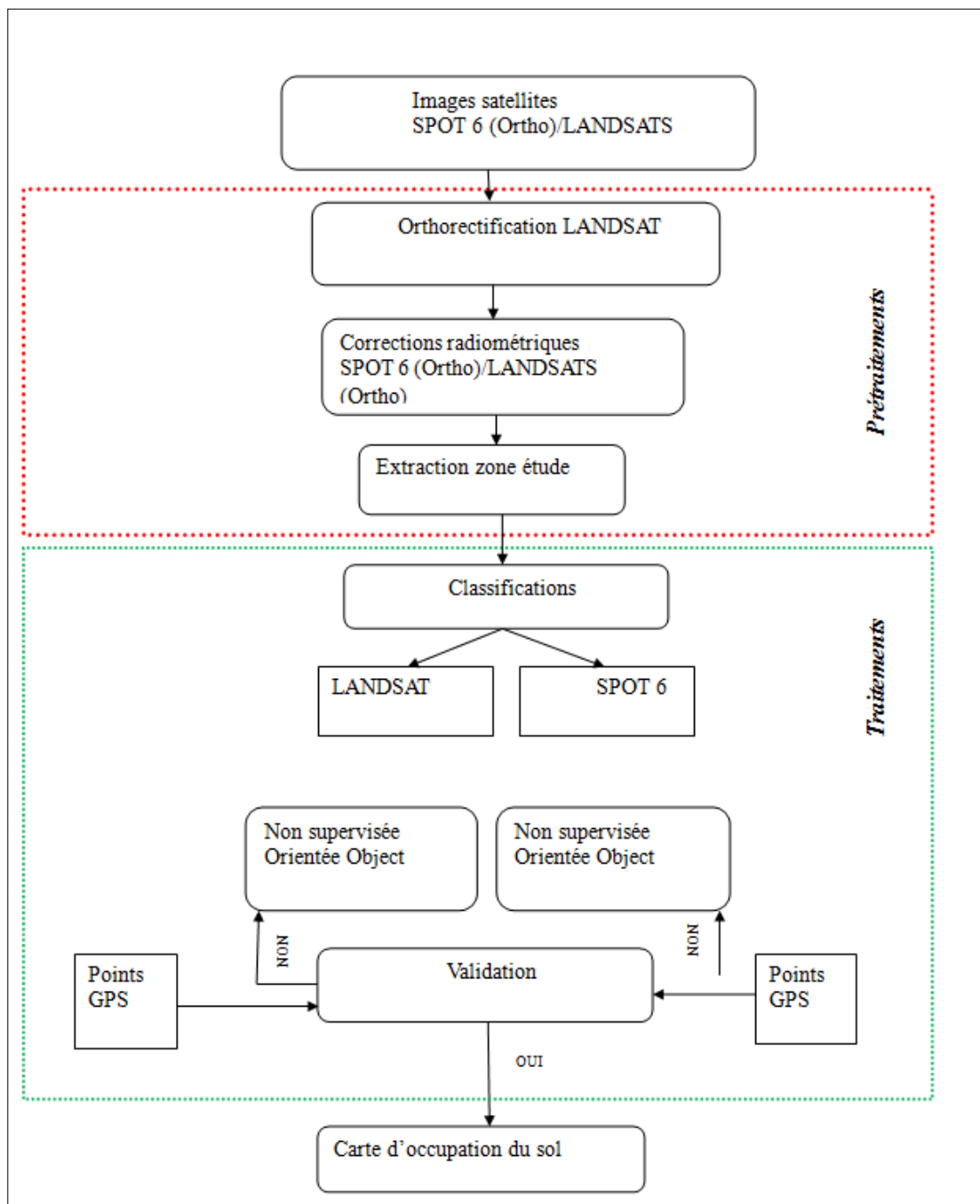


Figure 52: Méthodologie générale des traitements des images SPOT et LANDSAT (Source : Boussougou, 2017)

3.1.3.1 - Prétraitements des images LANDSAT

3.1.3.1.1 - Géoréférencement des images LANDSAT de 1995, 2009, 2014 et 2016

Les images d'archive LANDSAT sont fournies par l'USGS (United States Geological Survey) orthorectifiées. Une vérification visuelle de la superposition de ces images entre elles, nous a permis de voir que les images LANDSAT étaient décalées par rapport à l'image SPOT 6 de référence. Nous avons donc effectué une étape de géoréférencement des images d'archive LANDSAT par rapport à l'image SPOT 6 de 2015 qui, on le rappelle, se superpose

parfaitement à la carte topographique de Tanzanie. A partir des images géoréférencées, nous avons extrait les réserves et leurs périphéries pour réduire le temps de traitements et supprimer les zones ennuagées de l'image (Figure 53).

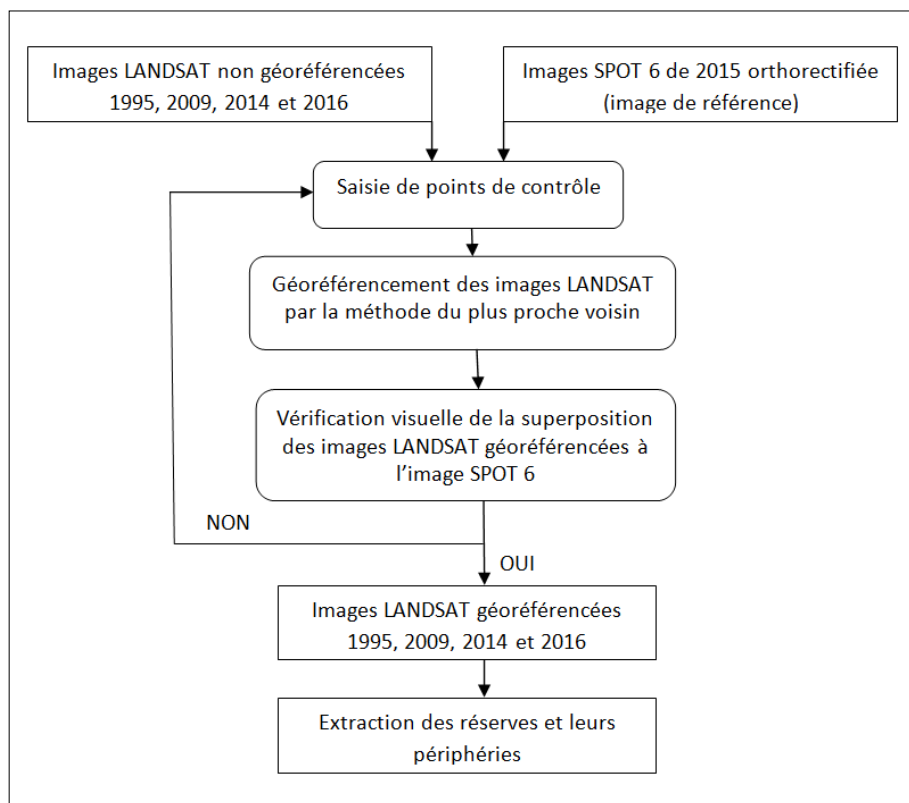


Figure 53: Schéma de géoréférencement des images LANDSAT (Source : Boussougou, 2017)

3.1.3.1.2 - Correction radiométrique de l'image SPOT: Correction Top Of Atmosphere (TOA)

Une des méthodes de correction la plus utilisée est la méthode 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum; Vermote et *al.*, 1994, 1997). Cette méthode a été développée par le Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA) de Lille pour corriger les mesures radiométriques des effets de l'atmosphère (absorption par les gaz, diffusion par les molécules et les aérosols). Elle simule le signal émis par une surface (de 0,25 à 4,0 microns) et est observé par un capteur radiométrique embarqué à différentes altitudes par satellite ou avion et sous différentes conditions de l'atmosphère, d'éclairement solaire et d'angle de visée. C'est cette méthode que nous avons appliqué à l'ensemble des images SPOT et LANDSAT de l'étude. Puisque nous ne possédons pas de données précises sur les conditions météorologiques de la zone d'étude au moment des différentes prise de vue, la correction radiométrique s'est arrêtée au niveau de l'atmosphère, c'est-à-dire Top Of Atmosphere (TOA) (Figure 54).

Comptes numériques de l'image brute
$L = Cn / Ce$ L : luminance en $W.m^2.str^{-1}.μm^{-1}$ Cn : compte numérique du pixel dans une bande spectrale données Ce : coefficient d'étalonnage, fournit par la documentation SPOT avec les scènes
Passage des comptes numériques en luminance
$Rea = 100 * (\pi * L / \cos\Theta * E^{-1}s)$ Rea : réflectance exo-atmosphérique L : luminance en $W.m^2.str^{-1}.μm^{-1}$ Θ : angle zénithal (fournit par la documentation SPOT) E^{-1} : éclairement solaire équivalent en $W.m^2.str^{-1}.μm^{-1}$ La multiplication de la formule par 100 permet d'obtenir des réflectances en pourcentage
Transformation des luminances en réflectance exo-atmosphériques
$Rs = (Rea - Ratm) / \tau_g$ Rs : réflectance au sol Rea : réflectance exo-atmosphérique Ratm : réflectance propre à l'atmosphère τ_g : transmission gazeuse totale pour le canal considéré (obtenu à partir du modèle 6S)
Passage des valeurs exo-atmosphériques aux réflectances au sol

Figure 54: Modèle de correction atmosphérique des images SPOT
(Source : Kergomard, 2000)

3.1.3.2 - Traitement des images SPOT et LANDSAT

Le suivi de la dynamique des paysages forestiers nécessite le choix d'une méthode adéquate et applicable sans ambiguïté sur l'ensemble des images de la série temporelle. Ainsi, nous allons dans un premier temps traiter l'image la plus récente, c'est-à-dire l'image SPOT 6 du 10/06/2015. Ce traitement permettra de connaître l'état actuel de la couverture forestière des réserves et leurs périphéries dans leur globalité. Dans un second temps, nous allons traiter les images d'archive LANDSAT afin de suivre la dynamique d'occupation du sol sur la période 1995-2014.

3.1.3.2.1 - Traitement des images

Nous avons opté dans cette étude pour une méthode de classification orientée objet et non sur la méthode basée uniquement sur la radiométrie des pixels.

3.1.3.2.2 - Classification orientée Objet

La classification orientée objet regroupe des pixels en objets dans leur contexte à différentes échelles de perception du paysage. Cette méthode se base non seulement sur les valeurs spectrales des objets mais aussi sur des paramètres morphologiques (taille, forme, voisinage des objets) (Benz et al., 2004). La qualité de l'information extraite des images à haute

résolution spatiale est ainsi améliorée.

L'approche orientée objet comprend deux étapes principales : la création des objets images, qui est appelée segmentation, et leur classification.

Pour chaque type d'objet à classer, le processus consiste à formuler un certain nombre de règles de « connaissance ». Plusieurs règles peuvent être combinées pour classer un type d'objet donné. Elles sont basées sur un ensemble de relations hiérarchiques entre les différents objets classés en niveau. Ces relations traduisent l'imbrication des différents niveaux de segmentation. En outre, elle permet aux classes « enfants » de récupérer les critères de classement des classes « parents » (Figure 55)

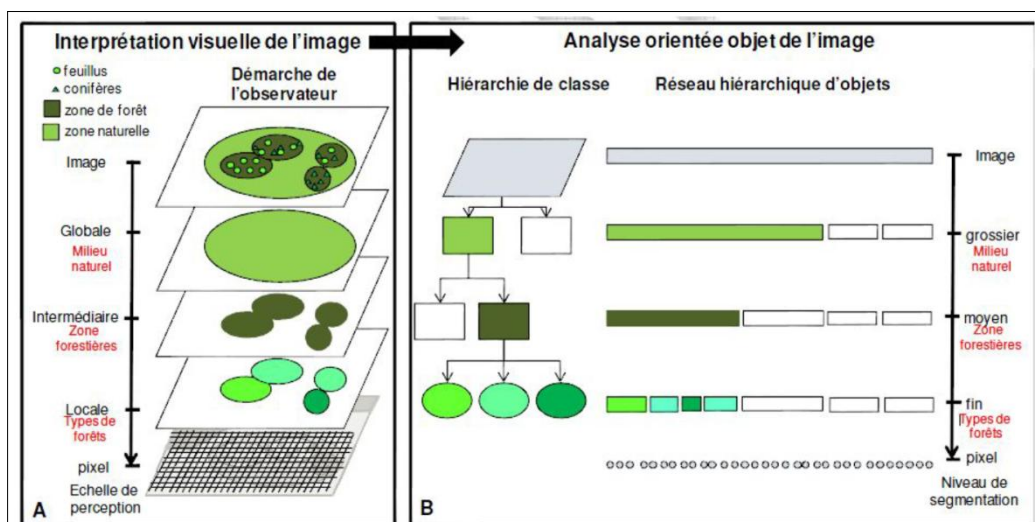


Figure 55: Comparaison entre l'approche orientée objet et l'interprétation visuelle : application à un milieu forestier (source : Tormos, 2011)

3.1.3.2.3 - Principe de la segmentation

La segmentation consiste à fusionner les pixels avec leurs voisins pour créer des objets de plus en plus grands en respectant un seuil d'homogénéité (Benz et *al.*, 2004). Il est calculé en fonction de plusieurs paramètres tels que la couleur (valeur spectrale) et la forme. Le logiciel eCognition propose plusieurs types de segmentation (User Guide, eCognition Developer 8.0.1), dont la segmentation multi-résolution. C'est cette dernière qui est retenue dans nos traitements. Car en effet, elle permet l'utilisation de données de sources et de types divers ainsi qu'une analyse multi-échelle et une prise en compte des dépendances hiérarchiques entre les niveaux de segmentation (Benz et *al.*, 2004).

La segmentation multi-résolution se base sur plusieurs critères :

- La pondération des couches (Image layers weights), qui permet de donner un poids plus ou moins important à certains canaux en entrée afin d'optimiser les résultats.
- Le paramètre d'échelle (scale parameter), qui permet de fixer une limite abstraite définissant l'hétérogénéité maximale des objets produits par la segmentation
- Les critères d'homogénéité : Le paramètre d'échelle se réfère à l'homogénéité de l'objet.

Cette homogénéité est déterminée par deux paramètres :

→ La forme (Shape) qui s'oppose à la couleur : elle correspond à l'homogénéité spectrale de l'objet.

→ La compacité (Compactness) : le critère de forme est également défini par deux critères : 1) Smoothness, qui représente le rapport entre la longueur d'un côté de l'objet et la longueur du côté le plus court donné par la fenêtre englobant l'objet ; 2) Compactness, qui représente le rapport entre la longueur de la bordure de l'objet et la racine carrée du nombre de pixels formant cet objet.

Une fois la segmentation terminée, c'est-à-dire lorsque l'homogénéité des objets dépasse l'hétérogénéité maximale acceptée, on passe à l'étape de classification de l'image.

3.1.3.2.4 - Classification

Il existe plusieurs types de classification proposés par le logiciel eCognition. Mais la classification retenue dans notre étude est la classification expertisée (Robin, 1998). Elle vise à regrouper les objets à l'aide d'attributs spectraux (ex : moyenne des niveaux de gris de l'objet), spatiaux (ex : taille de l'objet, critère de forme), structuraux (relation spatiale entre les objets) ou d'autres variables géographiques (ex : altitude, pente).

L'opérateur doit, à partir de l'observation directe et de ses connaissances, construire une hiérarchie de classe et choisir la combinaison et les seuils d'indices pertinents pour chaque classe d'occupation du sol.

L'apport des néo-canaux pour la classification des images associées entre autres aux paramètres spatiaux, variables géographiques (altitude)..., améliorent la précision et le résultat des classifications. La description de ces néo-canaux, créés à partir des bandes spectrales d'une part pour les images SPOT et d'autre part par des images LANDSAT et l'ensemble des attributs utilisée, est présentée en annexe A.

3.1.3.2.5 - Validation des classifications

La pertinence et la précision des classifications sont évaluées à l'aide des matrices de confusion (Congalton et Green, 1999 ; Foddy, 2002 ; Godard, 2005 ; Lillesand et *al.*, 2008) entre les données dites « vérité-terrain » et celles des traitements des images satellitaires. Pour un meilleur résultat de la validation, 30 points de contrôle minimum par classe doivent être introduits dans la matrice (Girard et Girard, 2010).

L'indice Kappa est utilisé pour évaluer la classification. Lorsque le kappa est supérieur à 0.81, il est considéré comme excellent ; entre 0.61 et 0.8 il est bon ; entre 0.41 et 0.6 il est modéré ; entre 0.21 et 0.4 il est mauvais et enfin lorsqu'il est négatif, il est alors très mauvais (Landis et Koch, 1977). La précision globale correspond au nombre de pixels correctement classifiés par rapport au nombre total de pixels d'entraînement. Elle est donnée par le calcul du coefficient kappa (Kenny et *al.*, 2006 ; Girard et Girard, 2010).

Les points terrain ont été définis sur l'image SPOT 6 dont la date est la plus proche de la période de terrain. Ensuite, par correspondances spectrales des types d'occupation du sol observés en 2015, les mêmes classes ont été déterminées pour les années antérieures : 1995,

2009 et 2014. Les points terrain doivent se répartir de la manière la plus homogène possible (Girard et *al.*, 2010). Ainsi nous disposons pour chaque image d'au minimum 200 points GPS répartis sur la zone d'étude, avec une concentration dans les réserves de Pugu et de Kazimzumbwi et autour des voies de communication (Figure 15 du chapitre 1).

Le schéma méthodologique pour le suivi de la dynamique d'occupation du sol dans la zone d'étude est présenté dans le diagramme ci-dessous (Figure 56) :

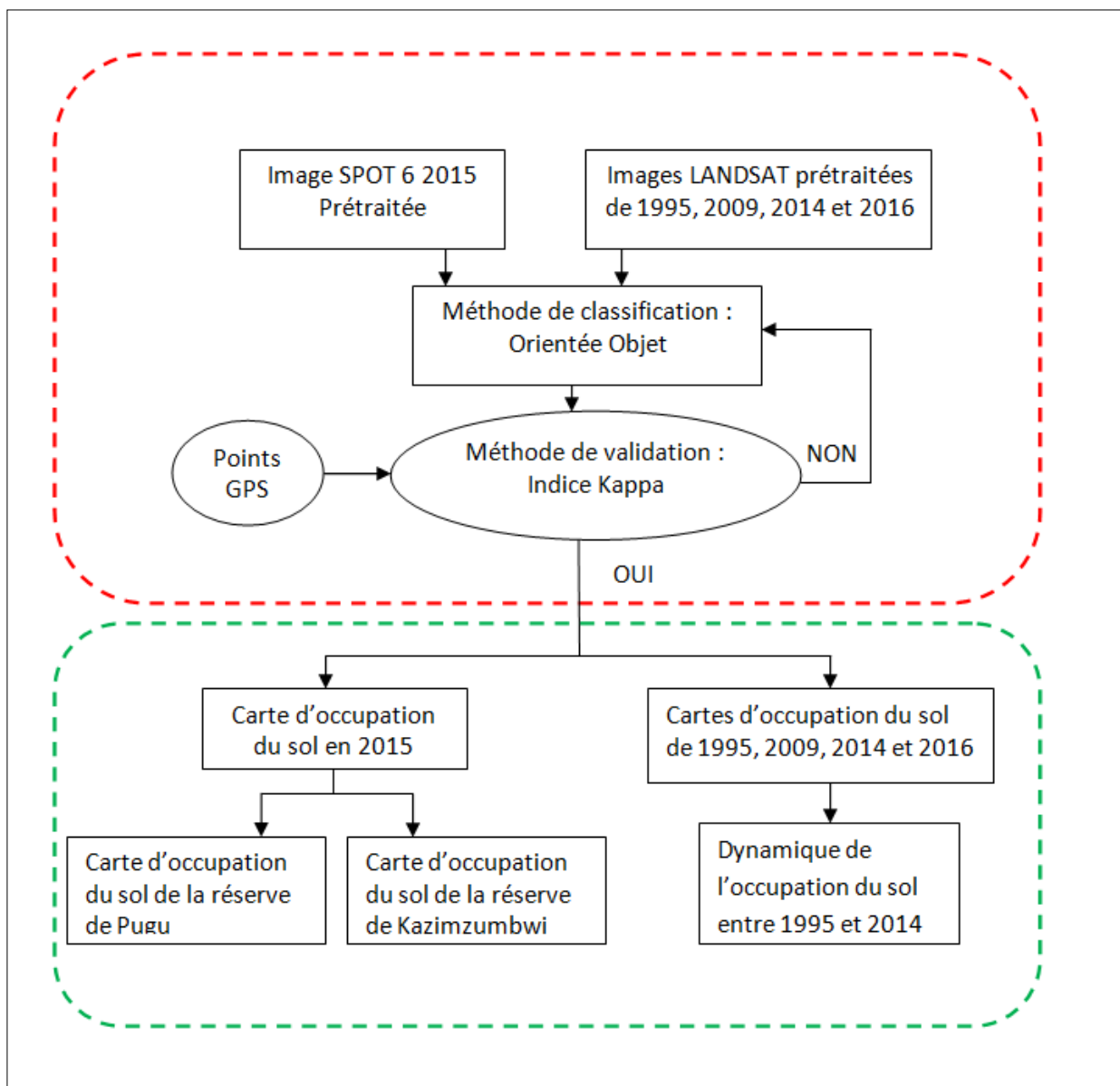


Figure 56: Schéma méthodologique des traitements des images SPOT et LANDSAT (Source : Boussougou, 2017)

3.2 - Résultat du traitement des images SPOT 6 et LANDSAT

3.2.1 - Analyses des résultats des traitements des images satellitaires SPOT et LANDSAT

3.2.1.1 - Etat de l'occupation du sol dans les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi et de leurs périphéries à partir de l'image SPOT 6 de juillet 2015

3.2.1.1.1 - Validation de la classification de 2015

L'image SPOT 6 du 10/06/ 2015 présente un coefficient de kappa de 85.39 %, pour une précision globale de 91 %. Ce résultat est certes pertinent, mais il doit être pris avec beaucoup de précaution. En effet, la matrice de confusion (Tableau 15, en colonne se trouve les classes à partir de la classification de l'image SPOT et en ligne les classes à partir des points terrain (GPS)) nous permet de voir que beaucoup de confusion existe entre certaines classes. C'est le cas notamment de la végétation arbustive qui se confond avec la savane arborée (regroupée dans la classe « savane »), ou encore la forêt dégradée qui à certains endroits se mélange avec de la forêt dense. Il est également difficile de discriminer les espaces de cultures des savanes, brousses ou végétation arbustive à cause de la similitude de leur morphologie (taille, recouvrement...). Par exemple, les cultures de manioc peuvent se confondre avec des arbustes, ou encore les plantations de riz peuvent se mélanger avec de la savane.

Tableau 15:Matrice de confusion entre la classification à partir de l'image SPOT 6 2015 et les points réalité de terrain des classes d'occupation du sol pour cette même date (voir Tableau 9 du chapitre 1).

		classification									
Classes		arb	bat	bro	cult	eau	For-d	For-dg	sav	sol	To
terrain	arb	91		0	0	0	0	0	32	0	123
	bat	0	28	6	8	0	0	0	0	18	60
	bro	2	0	333	0	0	24	14	24	0	397
	cult	3	0	9	1732	0	0	0	48	0	1792
	eau	0	0	0	0	40	0	14	0	0	54
	For-d	4	0	3	0	0	54	42	0	0	103
	For-dg	0	0	3	0	0	6	98	0	0	107
	sav	4	0	36	4	0	0	0	488	0	532
	sol	0	2	0	0	0	0	0	24	162	188
	To	104	30	390	1744	40	84	168	616	180	3356

Arb : arbustive ; bat : bâti ; bro : brousses ; cult : cultures ; eau : surface en eau ; for-d : forêt dense ; for-dg : forêt dégradée ; sav : savane ; sol : sol nu ; to : total.

Kappa= 85.39 %

Précision globale = 90.88 %

3.2.1.1.2 - Etat de l'occupation de sol en 2015

Le résultat cartographique de l'image du 10/06/2015 est présenté dans la Figure 57. La superposition des limites des réserves permet de distinguer visuellement les zones encore recouvertes de forêt dense et dégradée situées à l'intérieur des réserves, et les zones de cultures et bâtis situées à leur périphérie. La carte (Figure 57) nous montre également, que la partie Est de Pugu est celle où l'on observe une forte densité urbaine. L'ouest et l'est de Kazimzumbwi par contre sont caractérisés par des zones de cultures en abondance.

La part de chaque classe d'occupation du sol dans les réserves et leurs périphéries, est mise en évidence par le pourcentage occupé par chacune d'elle (Figure 58). La classe « brousse » est la plus représentée car elle occupe près de 30 % de la surface étudiée, suivie de la classe « savane » (24%). Les deux classes se localisent aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur des réserves forestières de Pugu et de Kazimzumbwi. Seules les surfaces bâtis (7% de la zone d'étude) sont concentrées sur une partie de la carte, ici à l'Est des deux réserves. Les zones de cultures se situent quant à elles principalement à la périphérie directe des réserves et des voies de communication, représentant plus de 10 % de la surface totale de la zone d'étude. Concernant les forêts denses et dégradées, elles s'étendent sur plus de 15 % de la zone d'étude. Enfin, les classes de végétation arbustive, sol nu et eaux représentent respectivement 9%, 2 % et 0.01 % de la zone d'étude. Le pourcentage restant est lié aux zones masquées par la présence de nuages, elle n'est donc pas prise en compte.

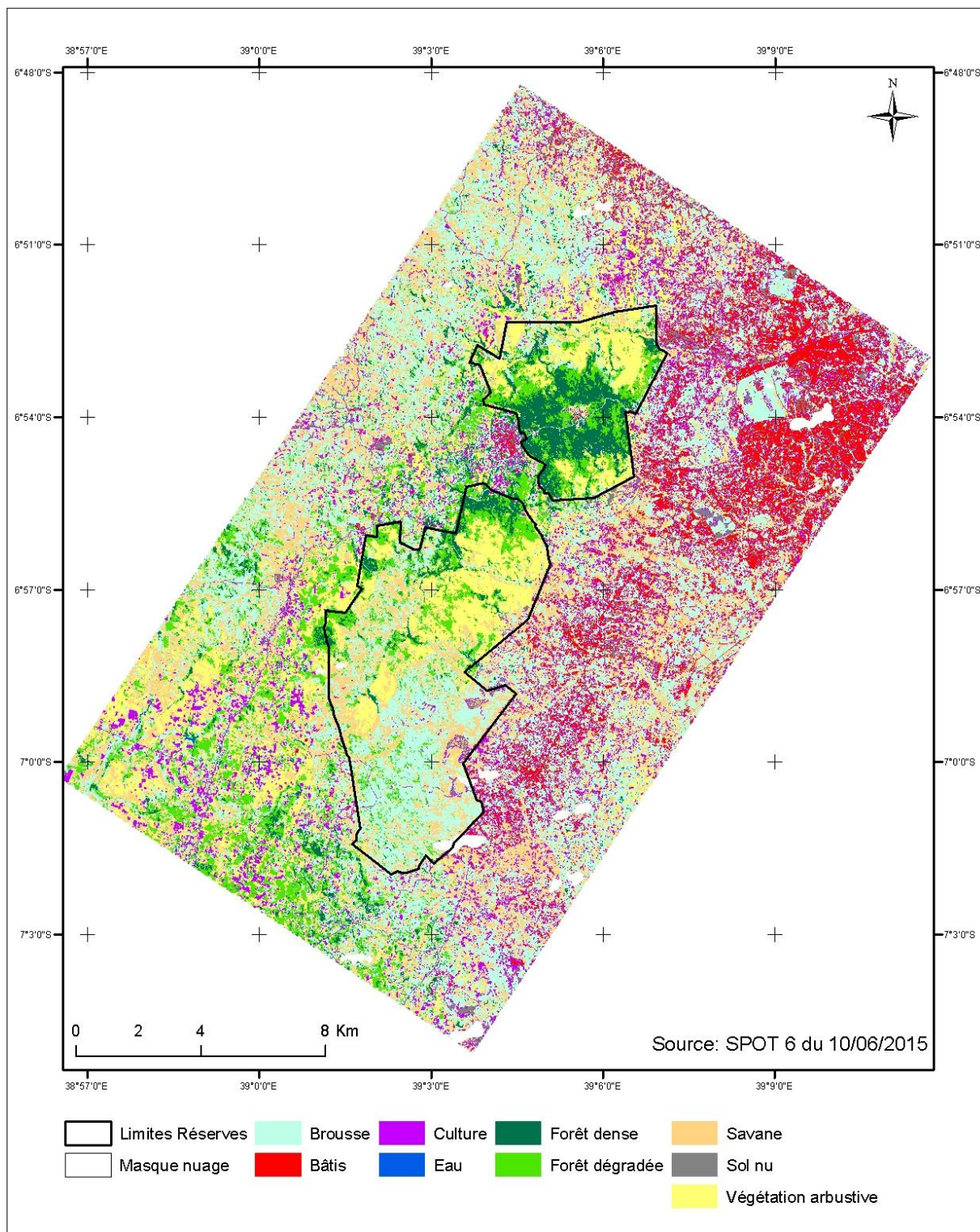


Figure 57: Carte d'occupation de sol de la zone d'étude à partir de l'image SPOT 6 2015 (Source : Guy Boussougou, 2017)

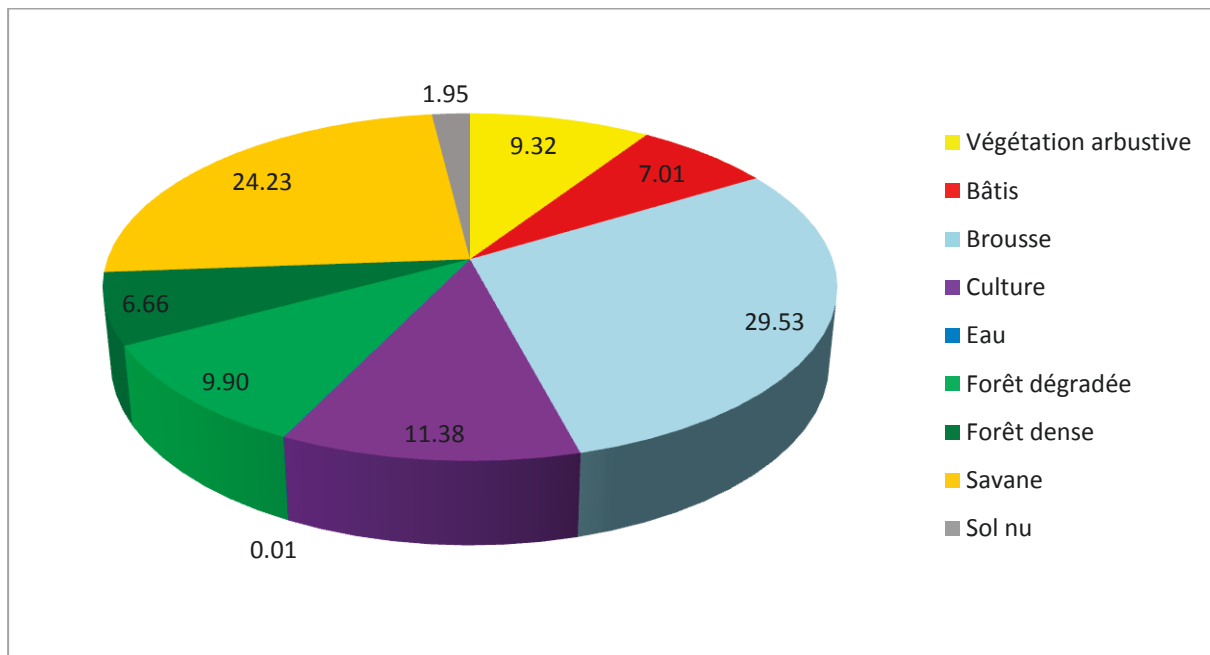


Figure 58: Répartition des surfaces (en %) de chaque classe d'occupation du sol de la zone d'étude (Source : Boussougou, 2017)

A l'échelle des deux réserves (Figure 59), une première analyse visuelle permet de constater que les forêts denses et dégradées sont plus présentes dans la réserve forestière de Pugu que celle de Kazimzumbwi. En effet, la forêt dense représente 33% de la réserve de Pugu contre 5% dans la réserve de Kazimzumbwi. De même, la surface de forêt dégradée de Pugu est de 23%. Elle est supérieure à celle de la réserve de Kazimzumbwi qui est de 14 %. A l'inverse certaines classes sont plus représentées dans la réserve de Kazimzumbwi par rapport à celle de Pugu : les classes « brousses », « savane » et « végétation arbustive » représentent respectivement 33%, 23% et 22% de la réserve de Kazimzumbwi contre 10%, 6 et 28 % pour la réserve de Pugu.

La comparaison des classes d'occupation du sol des deux réserves en 2015 (Figure 59) montre que la surface forestière (dense et dégradée) de la réserve forestière de Kazimzumbwi ne contient que 20 % de surface forestière, dont 5 % de forêt dense tandis que dans la réserve forestière de Pugu, la forêt recouvre encore près de la moitié, c'est-à-dire 53 % dont 32 % de forêt dense.

Les figures 60 et 61 représentent les pourcentages d'occupation du sol d'une part dans les deux réserves regroupées et d'autre part les pourcentages dans une zone tampon de deux kilomètres autour des réserves.

On note que près de 7 % des surfaces de cultures se trouvent à la périphérie des réserves principalement à l'Ouest et l'Est de la réserve de Kazimzumbwi contre moins de 1% à l'intérieur des réserves, localisées surtout dans la partie sud de Kazimzumbwi. Les classes bâties, cultures et sol se localisent prioritairement à l'extérieur des réserves. En effet, plus on se rapproche des limites forestières, plus leurs pourcentages augmentent (Figure 60).

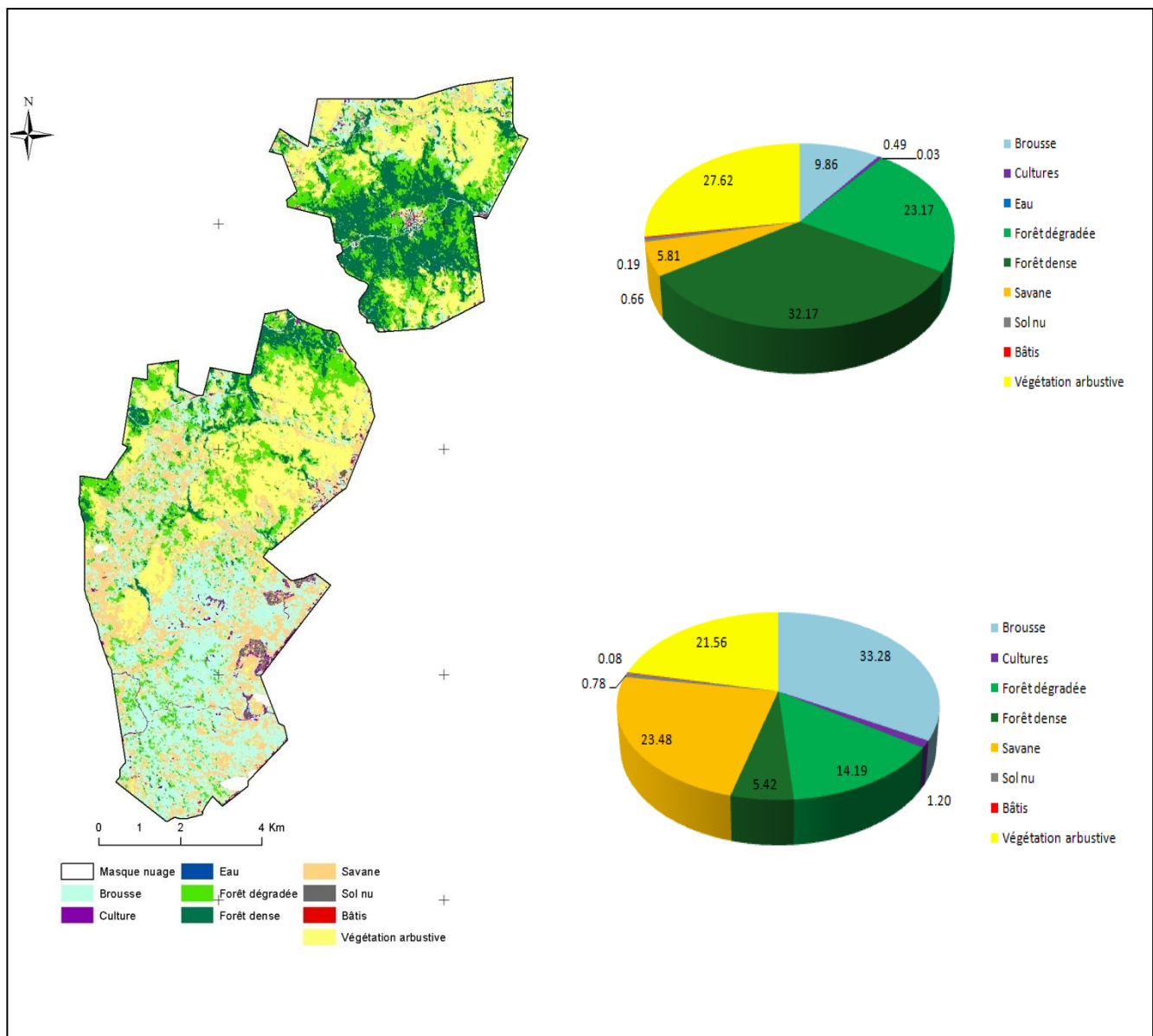


Figure 59: Carte d'occupation du sol de chaque réserve forestière et répartition des surfaces (en %) de chacune de classes (Source : Boussougou, 2017)

A l'inverse, l'intérieur des réserves (Figure 61) se distingue par le faible pourcentage (inférieur à 1%) de ses mêmes classes bâti, cultures, mais aussi sol nu. Les forêts (dégradées et denses), les brousses, végétation arbustive et savane représentent la plus grande part de la superficie des réserves forestières. On note ainsi que, plus de 25 % de la superficie totale des réserves sont attribués aux forêts et brousses, suivis de la végétation arbustive qui représente 24 %.

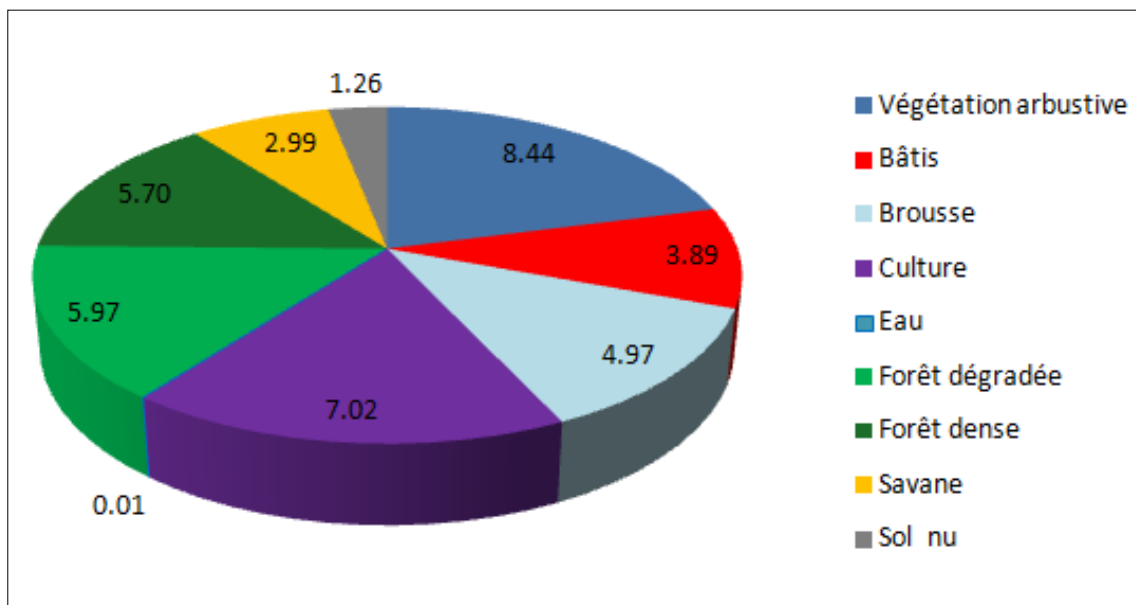


Figure 60: Répartition des surfaces (en %) de chaque classe d'occupation du sol à l'extérieur des deux réserves dans une zone de 2 Km. (Source : Boussougou, 2017)

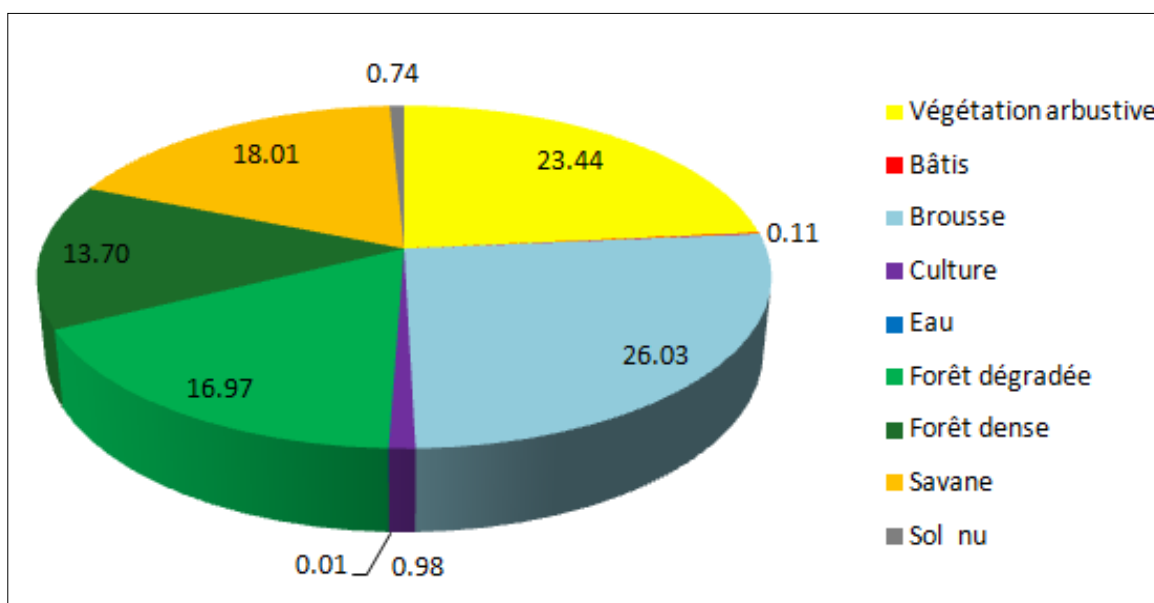


Figure 61: Répartition des surfaces (en %) de chaque classe d'occupation du sol à l'intérieur des deux réserves forestière de Pugu et Kazimzumbwi. (Source : Boussougou, 2017)

3.2.1.2 - Evolution de l'occupation du sol entre 1995 et 2014

3.2.1.2.1 - Validation des classifications des images LANDSAT

Le résultat des classifications des images LANDSAT permet de distinguer 5 classes d'occupation du sol (Tableaux 16, 17 et 18) au lieu de 9 comme dans l'image SPOT 6 (Tableau 15). Ainsi, pour les classifications des images LANDSAT de 1995, 2009 et 2014, le coefficient kappa était respectivement de 83.67 % (88.30 % précision globale), 88.55% (91 % précision globale) et 91.88 % (93.88 % précision globale). Comme pour la classification de

l'image SPOT 6 de 2015, la confusion entre certaines classes est présente. Mais globalement, le coefficient kappa et la précision des classifications des images LANDSAT sont meilleures par rapport à l'image SPOT 6 2015.

Tableau 16: Matrice de confusion classification image LANDSAT 1995

Classes	Végétation arbustive	Brousse	Forêt	Végétation herbeuse	Sol-urbain	Total
Végétation arbustive	126	8	12	12	5	163
Brousse	12	292	3	32	25	364
Forêt	3	0	159	0	0	162
Végétation herbeuse	1	8	0	656	140	805
Sol-urbain	1	0	0	4	775	780
Total	143	308	174	704	945	2274

Kappa = 83.67 %

Précision globale = 88.30 %

Tableau 17: Matrice de confusion classification image LANDSAT 2009

Classes	Végétation arbustive	Brousse	Forêt	Végétation herbeuse	Sol-urbain	Total
Végétation arbustive	71	10	27	0	0	108
Brousse	3	136	9	16	5	169
Forêt	3	0	177	0	0	180
Végétation herbeuse	0	8	320	320	20	348
Sol-urbain	0	2	8	8	510	520
Total	77	156	213	344	535	1325

Kappa = 88.55 %

Précision globale = 91 %

Tableau 18: Matrice de confusion classification image LANDSAT 2014

Classes	Végétation arbustive	Brousse	Forêt	Végétation herbeuse	Sol-urbain	Total
Végétation arbustive	52	12	9	0	0	73
Brousse	0	142	0	8	0	150
Forêt	3	0	174	248	0	177
Végétation herbeuse	0	12	0	20	0	260
Sol-urbain	0	0	0	0	415	437
Total	55	163	183	276	415	1097

Kappa= 91.88 %

Précision globale = 93.88 %

Les coefficients kappa s'améliorent au fur et à mesure qu'on évolue dans le temps. En effet, on remarque la classification de 2014 présente moins de classes confuses dans la matrice de confusion (Tableau 18) que les deux autres classifications (tableaux 16 et 17). Par exemple si, on considère la classe sol-urbain (qu'on appellera surface artificialisée par la suite) pour les trois dates, en 1995 cette classe se confond à la classe de la végétation arbustive et à la végétation herbeuse. De même en 2009, elle est confondue à la classe brousses, à la végétation herbeuse et à la forêt. Par contre, en 2014 la classe surface artificialisée n'est

confondue a aucune des classes. Mais, on peut également observer l'inverse dans la classe forêt qui se distingue mieux dans les deux premières dates (1995 et 2009) qu'en 2014.

3.2.1.2.2 - Dynamique d'occupation du sol des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi et leurs périphéries sur la période 1995-2014

Afin de mieux comprendre les dynamiques paysagères qui se sont opérées entre les années 1995, 2009 et 2014, nous avons choisi de diviser la période 1995-2014 en deux sous périodes : 1995-2009 et 2009-2014.

3.2.1.2.3 - Période 1995-2009 (14 ans)

Pendant la sous-période 1995-2009 (Tableau 19 et Figure 62), les surfaces forestières sont passées de 28 % à 13 %, soit une perte de 15 % sur la période. Cette perte forestière s'est faite à un rythme de 5 hectares par an (4 ha/an). On note également que la végétation de type herbeuse a légèrement perdu en superficie avec une diminution très faible de l'ordre de 0.14 %, soit une perte annuelle de 2 ha/an. Les autres classes d'occupation du sol ont connu, pour cette période d'observation, une augmentation de leur surface. En effet, les surfaces artificialisées (urbain_sol) ont augmenté de 8 % à un rythme de 6 ha/an, la végétation arbustive a vu sa surface augmenter de 5% à un rythme annuel de 10 ha et pour finir, la surface artificialisée a vu sa surface augmenter de 8 % à un rythme de 6 ha/an.

Tableau 19: Occupation du sol et taux d'évolution entre 1995 et 2009 sur la zone d'étude (Source : Boussougou, 2017)

Classes	1995		2009		Changement %	Taux annuel de changement (ha/an)
	Ha	%	Ha	%	1995-2009	1995-2009
Forêt	11951.24	27.97	5599.53	13.11	-14.87	4.40
Végétation arbustive	6610.21	15.47	8782.74	20.56	5.09	10.79
Végétation herbeuse	11256.15	26.35	11197.62	26.21	-0.14	1.77
Brousse	9174.58	21.48	9870.48	23.10	1.63	7.09
Urbain_sol	3729.76	8.87	7270.47	17.02	8.29	6.33
Total	42721.94	100	42720.84	100		

En comparant la dynamique d'occupation du sol dans les réserves forestières de Pugu et de Kazimzumbwi, on note que la réserve de Kazimzumbwi a perdu plus de surface forestière que celle de Pugu sur la même période (Tableaux 21 et 22). En effet, la réserve de Kazimzumbwi a vu sa surface forestière passer de 62 % à 36 % soit une perte de 26% et à un rythme de 4 ha/an. La réserve de Pugu par contre a perdu 9 % de sa superficie à un rythme de 0.8 ha /an. Une baisse des surfaces de brousse est également observée pour la réserve de Kazimzumbwi pendant cette période. Concernant les autres classes d'occupation du sol, leur surface a augmenté pendant la période concernée. Ainsi, la végétation arbustive, la végétation herbeuse et les surfaces artificialisées ont gagné respectivement 5 %, 2 % et 0.3 % dans la réserve de Pugu contre 14 %, 12 % et 2% pour la réserve de Kazimzumbwi. Le taux de changement annuel s'est fait à un rythme plus rapide dans la réserve de Kazimzumbwi que dans la réserve de Pugu. Par exemple, dans la réserve de Kazimzumbwi, les espèces arbustives ont connu un rythme de disparition deux fois supérieur à celui de Pugu (11 ha/an contre 7ha/an).

3.2.1.2.4 - Période 2009-2014 (5 ans)

Pour la période 2009-2014 (Tableau 20 et Figure 62), la surface forestière de la zone d'étude a diminué de 5 % à un rythme de 8 ha/ an. De même, la végétation arbustive a baissé de 2 %, soit 14 ha/an. Les autres classes ont augmenté de 0.52 %, 5 % et 0.04 % respectivement pour les brousses, les surfaces artificialisées et les surfaces herbeuses. Sur l'ensemble de la période 1995-2014, les changements les plus importants de la période d'étude ont eu lieu entre 2009 et 2014.

Comme pour la période 1995-2009, la comparaison des deux réserves sur la période 2009-2014 permet de voir que la réserve de Kazimzumbwi a perdu plus de forêt par rapport à la réserve de Pugu (Tableaux 21 et 22). Avec un taux annuel de changement de 17 ha contre 6 ha dans la réserve de Pugu, la perte de forêt est plus rapide dans la réserve de Kazimzumbwi. Pour les autres classes, les évolutions sont quasi similaires dans les deux réserves. Les brousses et la végétation herbeuse ont les taux de variation annuels les plus élevés avec respectivement 42 et 20 ha par an pour la réserve de Pugu et de 29 et 9 hectares pour la réserve de Kazimzumbwi.

La réserve de Kazimzumbwi est celle qui a subi le plus de perte de forêt avec 26% lors de la période 1995-2009 et 21 % lors de la période 2009-2014 (Tableau 22). La réserve de Pugu par contre a perdu moins de surface forestière durant la période 1995-2009 avec 10 % contre 20 % durant la période 2009-2014 (Tableau 21). La vitesse de la déforestation est également plus rapide dans la réserve de Kazimzumbwi par rapport à la réserve de Pugu. En effet, lors de période 1995-2009, le taux annuel de déforestation est de 4ha contre 1 ha respectivement pour Kazimzumbwi et Pugu, et il est de 6 ha contre 17 ha au cours de la période 2009-2014.

A l'opposé des surfaces forestières, on note que les surfaces artificialisées n'ont cessé d'augmenter pendant toute la période d'observation. Lesdites surfaces sont passées de 9 % en 1995 à 18 % en 2014 principalement dans les parties Nord-Est et Sud-Est de la zone d'étude. Par contre, dans les réserves cette classe varie très peu passant de 0.93 % en 1995 à 1 % pour Pugu contre 2 % en 1995 à 4 % pour la réserve de Kazimzumbwi.

Tableau 20: Occupation du sol et taux d'évolution entre 2009 et 2014 sur la zone d'étude (Source : Boussougou, 2017)

Classes	2009		2014		Changement %	Taux annuel de changement (ha/an)
	Ha	%	Ha	%	2009-2014	2009-2014
forêt	5599.53	13.11	3719.34	8.71	-5.25	7.86
Végétation arbustive	8782.74	20.56	4173.66	9.77	-2.05	13.83
Végétation herbeuse	11197.62	26.21	11952.54	27.98	0.04	1.31
Brousse	9870.48	23.10	12903.12	30.20	0.52	5.50
Urbain_sol	7270.47	17.02	9973.08	23.34	4.88	6.53
Total	42720.84	100	42721.74	100		

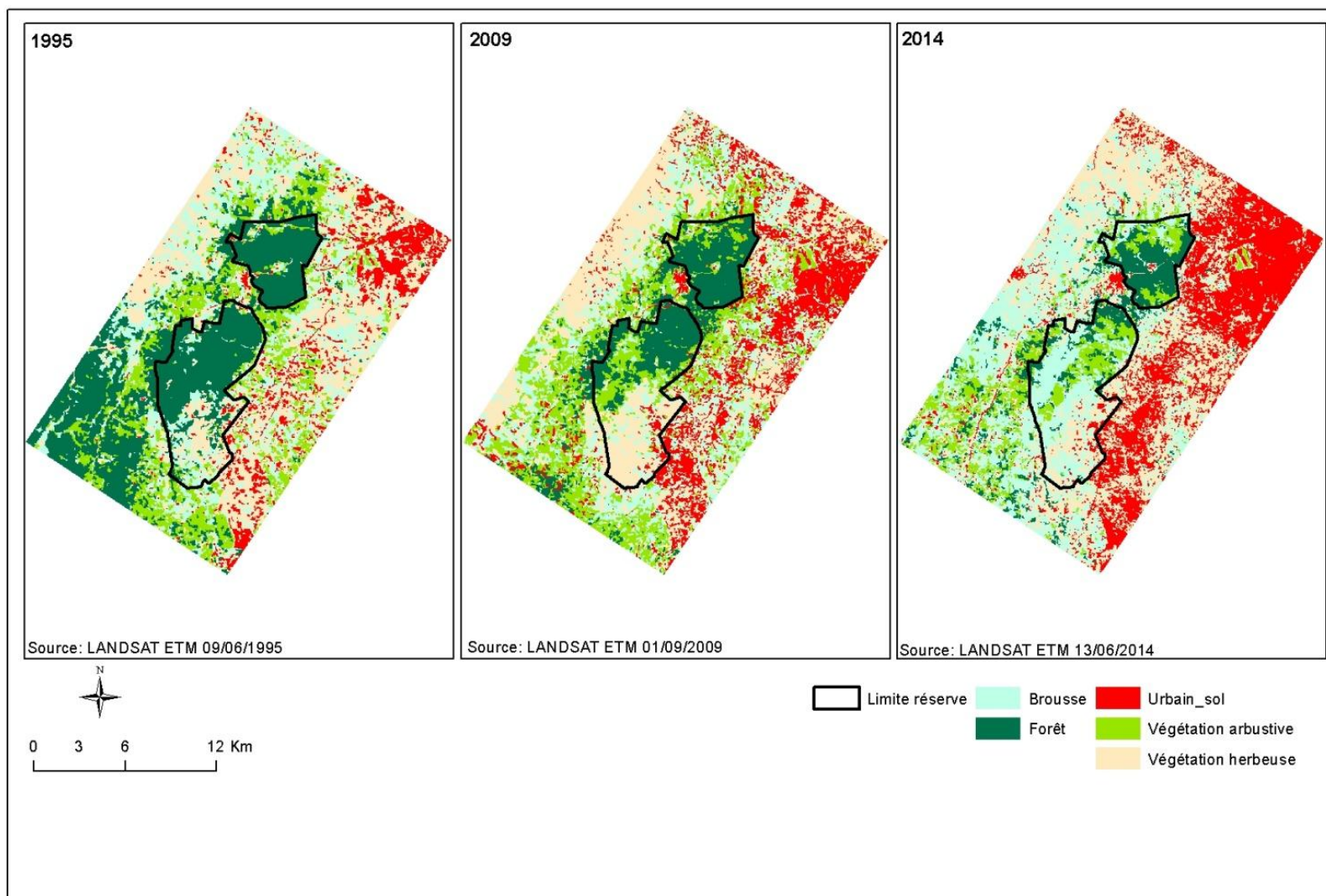


Figure 62: Carte d'occupation du sol : 1995, 2009, 2014 (Source : Boussougou, 2017)

En ce qui concerne, la dynamique des paysages forestiers de la zone d'étude, l'analyse de dégradation des surfaces forestières, permet de compléter les analyses faites précédemment sur les forêts. Les cartes de dégradations forestières entre 1995-2014 font ressortir les espaces forestiers qui ont été les plus touchés, ceux qui connaissent une reprise végétale et ceux qui n'ont pas changé (Figure 63). Pour les deux périodes (1995-2009 ; 2009-2014) près de 36 % des surfaces couvertes de forêts n'ont pas été transformés en d'autre type d'occupation de sol. Ces surfaces se situent majoritairement à l'intérieur des réserves forestières, au nord de Kazimzumbwi et sur presque toute la surface de la réserve de Pugu (Figure 63). On remarque que les pertes en surfaces forestières sont très supérieures aux surfaces forestières gagnées dans les deux périodes. En effet, sur la période 1995-2009 les forêts ont perdus 56 % de couverture contre 8% gagnée. Cette dégradation s'est faite principalement dans la partie sud-ouest de notre zone d'étude, au sud de la réserve de Kazimzumbwi et au nord de la réserve de Pugu.

Tableau 21: Taux d'évolution des classes d'occupation du sol de la réserve forestière de Pugu pour la période 1995-2014
(Source : Boussougou, 2017)

Classes	1995		2009		2014		Changement %		Taux annuel de changement (ha/an)	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%	1995-2009	2009-2014	1995-2009	2009-2014
forêt	2093.46	86.39	1866.77	77.02	1386.76	57.22	-9.37	-19.79	0.82	5.77
Végétation arbustive	159.65	6.59	432.49	17.85	557.02	22.99	11.26	5.14 5	-7.38	5.19
Végétation herbeuse	53.05	2.19	25.81	1.06	64.34	2.65	1.12	1.59	5.02	20.05
Brousse	94.74	3.91	68.03	2.81	391.01	16.14	1.10	13.33	2.34	41.87
Urbain sol	22.48	0.93	30.69	1.27	24.26	1	0.34	0.27	-2.25	4.59
Totale	2423.38	100	2423.38	100	2423.38	100				

Tableau 22: Taux d'évolution des classes d'occupation du sol de la réserve forestière de Kazimzumbwi pour la période 1995-2014 (Source : Boussougou, 2017)

Classes	1995		2009		2014		Changement %		Taux annuel de changement (ha/an)	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%	1995-2009	2009-2014	1995-2009	2009-2014
forêt	3358.45	61.81	1943.18	35.76	779.68	14.35	-26.05	-21.41	3.83	16.69
Végétation arbustive	235.17	4.33	994.79	18.31	1007.67	18.55	13.98	0.24	-10.85	0.26
Végétation herbeuse	925.44	17.03	1600.19	29.45	975.36	17.95	12.42	11.50	-3.99	9.43
Brousse	812.61	14.96	683.16	12.57	2470.21	45.46	-2.38	32.89	1.23	29.31
Urbain sol	101.87	1.87	212.06	3.90	200.63	3.63	2.03	0.21	-5.38	1.10
Totale	5433.55	100	5433.55	100	5433.55	100				

Dans la seconde période 2009-2014, par contre on observe plus de gain que de perte. On note 46 % de gain contre 18 % de perte. Contrairement à la période 1995-2009, cette fois-ci les dégradations se localisent majoritairement à l'intérieur des réserves forestières. Au nord pour Kazimzumbwi et au sud, au nord pour Pugu. On remarque également que les gains de forêts dans les deux périodes se font principalement, hors des réserves forestières. En effet, pour la période 1995-2009, cette régénération de forêt se localisait principalement à la frontière des deux réserves et sur des zones à l'intérieur de celles-ci. La période 2009-2014 par contre montre des reprises forestières majoritairement à l'extérieur des réserves, dans la partie Ouest de la zone d'étude (Figure 63).

La perte de surface forestière n'étant pas proportionnelle à la reprise de forêt, témoigne d'une dégradation très avancée des forêts. On a ainsi une dégradation plus rapide et plus visible dans la zone d'étude, par rapport à la régénération des forêts sur la période d'observation 1995-2014.

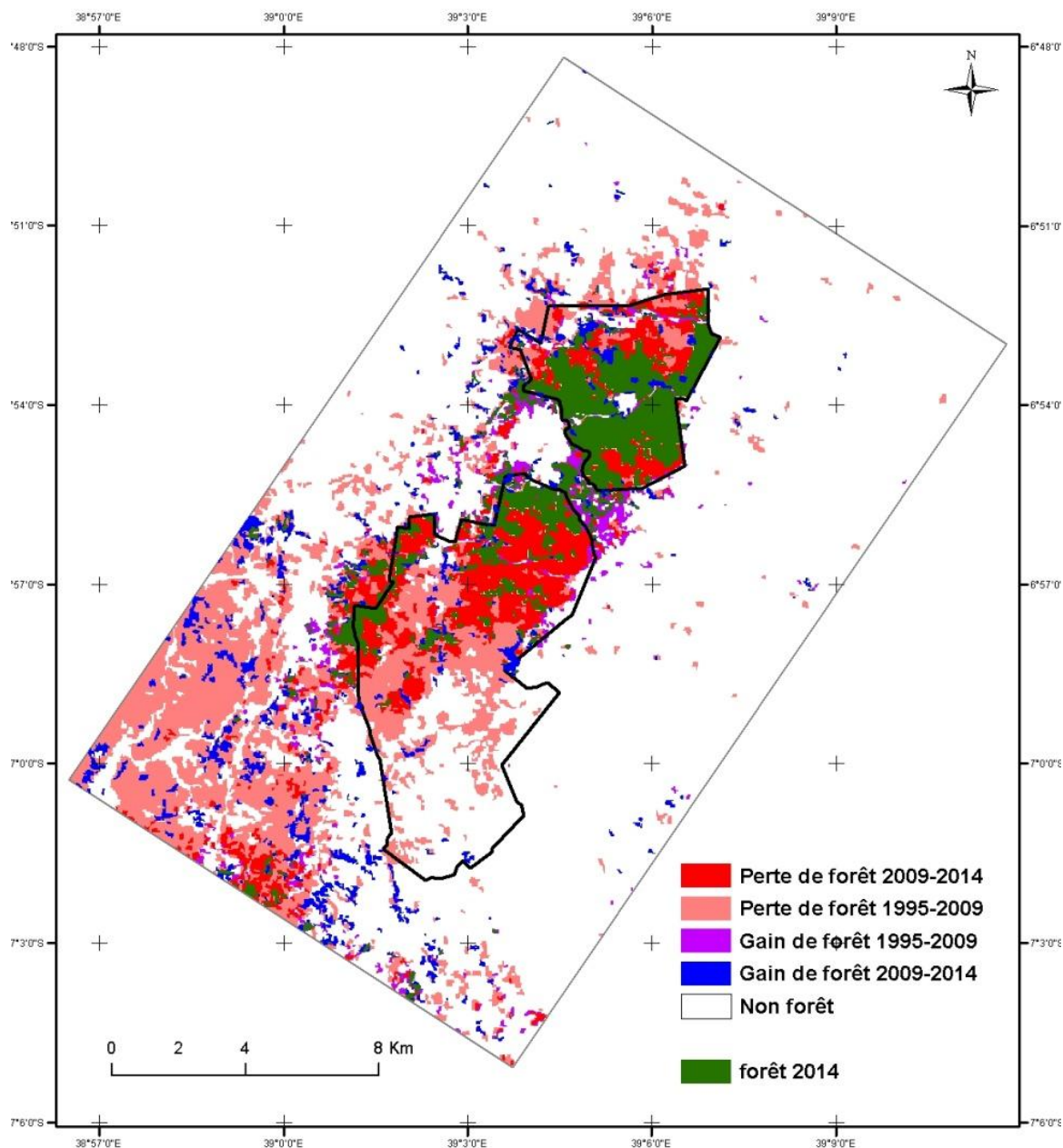


Figure 63: Carte de dégradation des milieux forestiers réalisée à partir de la classification orientée objet : images LANDSAT du 09/06/1995 et du 01/09/2009 et des images LANDSAT du 01/09/2009 et du 13/06/2014
(Source : Boussougou, 2017)

3.3 - Localisation spatiale des zones à pressions anthropiques à la périphérie des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi par une analyse multicritères

Afin de mettre en évidence les zones fragilisées par les pressions anthropiques dans la zone d'étude, notamment à la périphérie des réserves forestières de Pugu et de Kazimzumbwi, nous nous sommes basés sur l'application d'une Analyse Multi-Critères (AMC). Le but ici est de produire une carte de pression contenant des zones de très forte à faible pression anthropique. La localisation et la spatialisation de ces zones exige un certain nombre de données : la carte d'occupation du sol issue du traitement de l'image SPOT 5 de 2015, les couches de données vecteurs (routes, cours d'eaux, chemin de fer) provenant de la carte topographique, et enfin les altitudes et pentes issues du modèle numérique de terrain (SRTM à 90 mètres).

Dans cette approche, la télédétection est utilisée comme un moyen incontournable pour la mise à jour des données cartographiques à référence spatiale, notamment les routes, les zones urbaines et les zones de contraintes qui interdisent l'installation de la population à l'intérieur des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi.

Ainsi la carte d'occupation du sol issue de l'image SPOT 6 2015 est utilisée afin de mieux localiser les classes d'occupation du sol présentes dans la zone, notamment les zones urbaines.

D'autre part, l'analyse multicritère va permettre d'établir la carte de pression démographique en se basant sur l'approche d'agrégation complète. C'est une procédure d'évaluation multicritère basée sur une combinaison linéaire pondérée des informations relatives aux différents critères pour produire un indice d'évaluation unique. En effet, l'application du module MCE (Multi-Criteria Evaluation) de l'analyse multi-critère sur les critères va générer une image de sensibilité du milieu forestier vis-à-vis de l'anthropisation. Sur cette image, chaque maille représente la somme pondérée en fonction de tous les critères pris en compte.

3.3.1.1 - Analyses multicritères (AMC) et modélisation des pressions humaines autour des réserves forestières

La modélisation des données qui peuvent influencer la présence ou l'absence d'une population à un endroit par rapport à un autre est complexe. Dans ce genre de problématique, on est souvent confronté à des situations d'ordre décisionnel de nature multicritère. C'est ainsi, que l'AMC doit son émergence à la nécessité de disposer d'une aide pour trouver, de façon plus transparente, des compromis dans une situation de choix complexe. Vincke (1989) a ainsi défini l'aide multicritère de la façon suivante : « L'aide multicritère à la décision vise à fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution d'un problème de décision où plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte ». L'utilisation de l'analyse multicritère demande l'emploi des critères (facteurs et contraintes) qui renforcent ou réduisent la pertinence d'une alternative particulière avec l'activité considérée. Ces critères peuvent être exprimés sur une échelle de mesure continue. Par exemple, on pourra estimer que plus les routes sont proches des réserves forestières, plus la

pression humaine sera forte. L'étape la plus importante pour la modélisation des données est celle qui consiste à identifier les différents critères (facteurs et contraintes) susceptibles d'être pris en considération par l'analyse multicritères. La méthodologie de l'analyse multicritères adoptée dans l'étude est présentée dans la Figure 64.

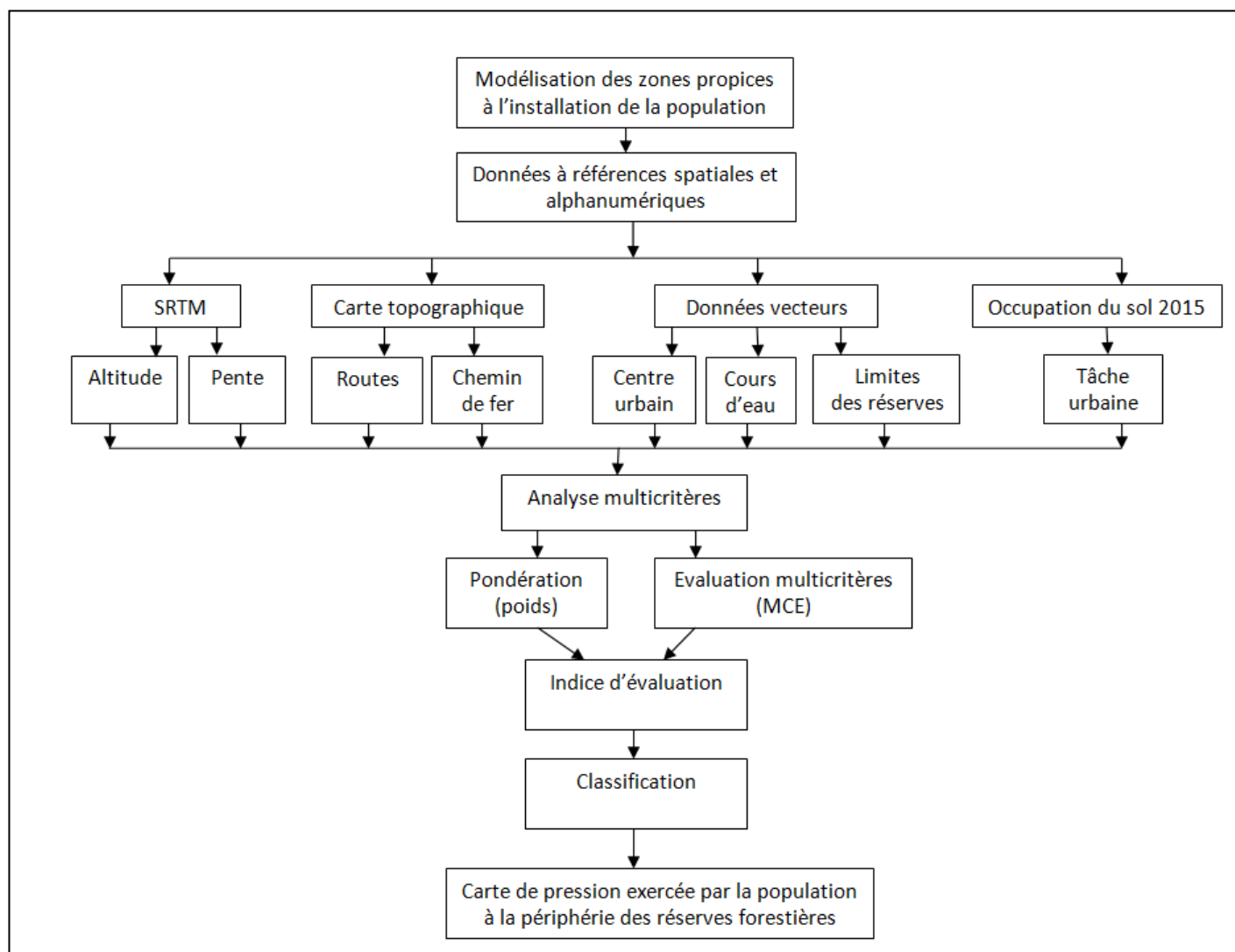


Figure 64: Méthodologie de l'analyse multicritère (Source : Boussougou, 2017)

3.3.1.2 - Identification des facteurs et contraintes

3.3.1.2.1 - Facteurs identifiés

Les données sur les facteurs impactant les réserves forestières étant limitées dans notre étude, nous avons identifié 7 facteurs en concertation avec les acteurs locaux dans le district de Kisarawe et nos observations sur le terrain : la proximité du réseau routier, la proximité aux voies ferrées, la proximité aux cours d'eau, la proximité des habitats aux limites des réserves, la proximité aux centres urbains (villages/villes), la pente, l'altitude. La principale contrainte à l'installation des populations à l'intérieur des réserves est sans doute les limites de celles-ci.

3.3.1.2.2 - Critère de proximité du réseau routier

Une grande partie de la population se localise autour des grands axes de communication. Ces axes routiers permettent aux populations de s'approvisionner en produits agricoles et de les vendre dans les agglomérations les plus proches, notamment dans la grande ville de Dar Es Salaam ou encore les petites villes de Pugu et Kisarawe. L'éloignement des agriculteurs et des producteurs de charbon de bois par rapport aux voies de communication induit sans doute un surcoût pour le transport proportionnellement à la distance.

Ainsi afin de représenter au mieux les axes de communications anciens et récents, nous nous sommes servis de la carte topographique à l'échelle 1 : 200 000 de la zone, de l'image Google Earth et l'image SPOT 6 panchromatique de résolution spatiale 1.5 mètres. Le réseau routier est alors obtenu par numérisation de ces derniers. Les données vectorielles du réseau routier ont ensuite été transformées en données matricielles pour pouvoir appliquer la fonction DISTANCE du logiciel IDRISI sur cette image. La figure 65 illustre la carte des distances par rapport aux axes routiers.

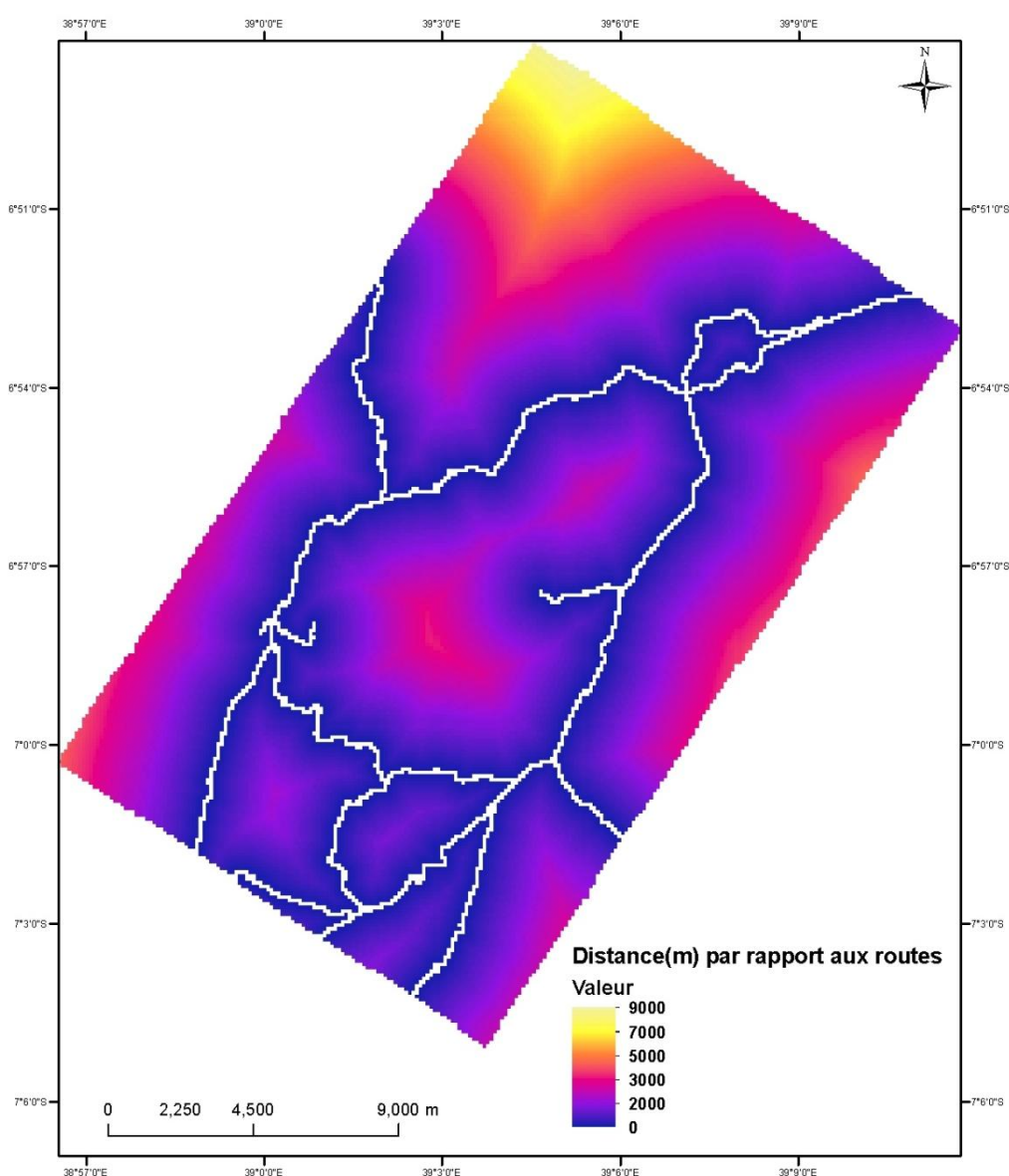


Figure 65: Proximité du réseau routier (Source : Boussougou, 2017)

3.3.1.2.3 - Critère de proximité aux chemins de fer

Contrairement aux axes de communication routière, le réseau ferroviaire est resté inchangé depuis l'époque coloniale jusqu'à présent. La station de Pugu qui a longtemps servi de gare pour les voyageurs n'est plus fonctionnelle. Les trains utilisant lesdits chemins de fer n'effectuent aucun arrêt à proximité des réserves forestières. Mais ces chemins donnent un accès facile aux populations dans les réserves, car traversant le nord des réserves. Les producteurs de charbon illégaux utilisent ces voies de communication pour fuir tout contrôle. Ils se servent des motos pour le transport des produits jusqu'aux villages le plus proches. La figure 66 illustre la carte de distance par rapport aux voies ferrées.

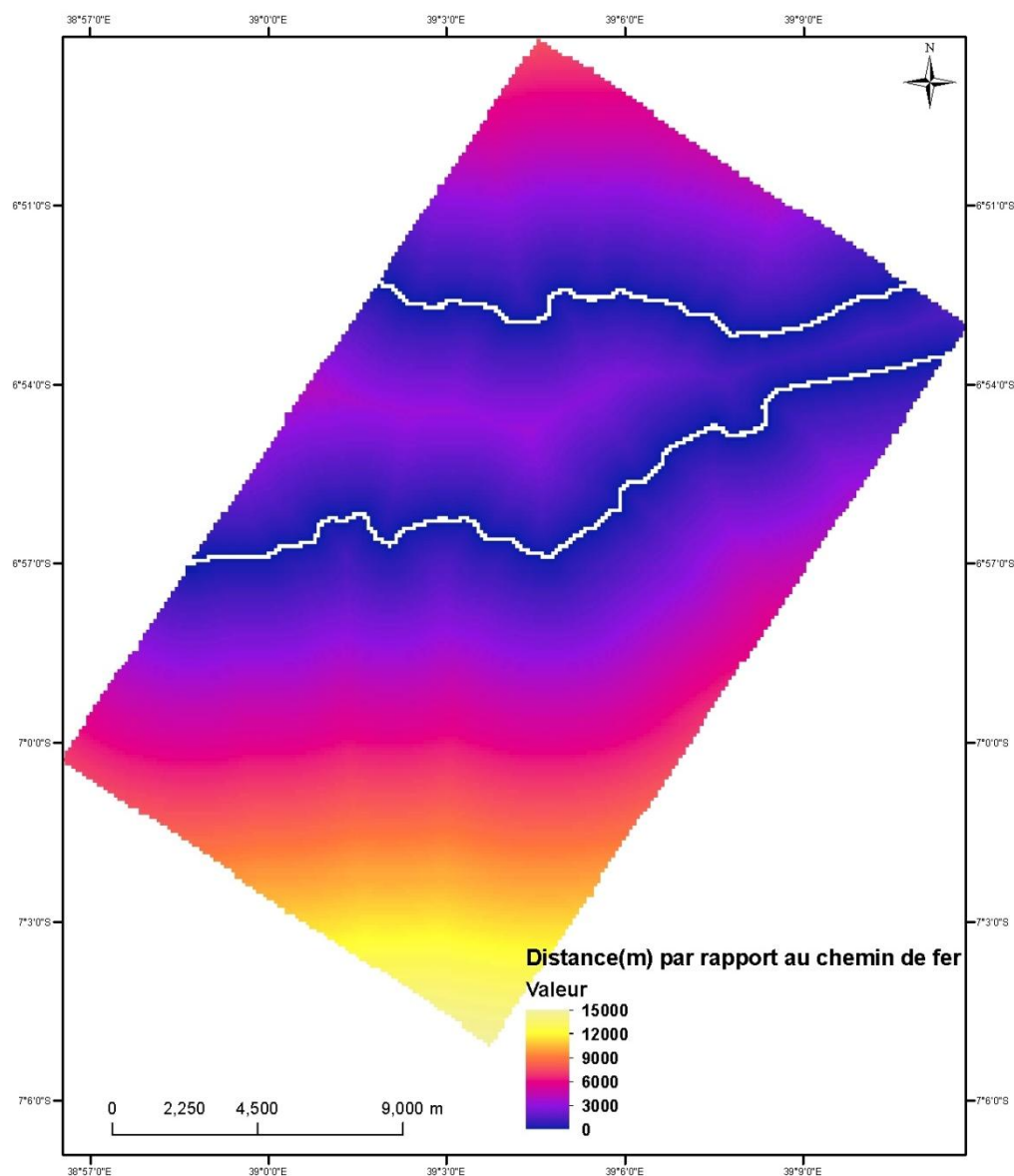


Figure 66: Proximité aux chemins de fer (Source : Boussougou, 2017)

3.3.1.2.4 - Critère de proximité au cours d'eau

L'installation de toute population rurale dans un espace donné dépend en grande partie de la présence d'eau. En l'absence de réseau d'adduction d'eau potable en milieu rural comme c'est le cas dans les villages périphériques des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi, le réseau hydrographique naturel devient la seule source d'approvisionnement en eau de boisson, de cuisine, pour l'agriculture et l'élevage. La carte des distances par rapport aux cours d'eaux est présentée dans la figure 67.

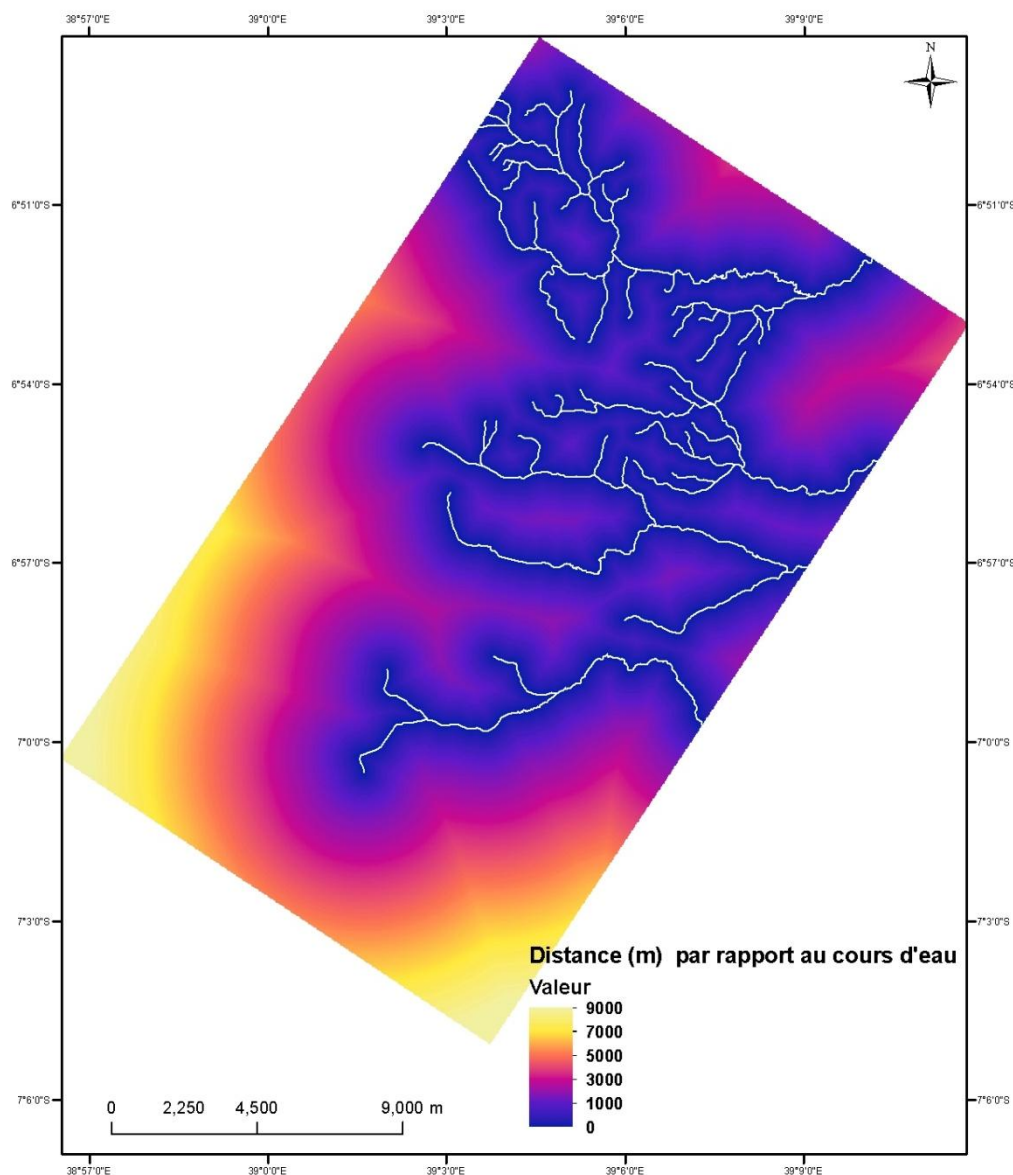


Figure 67: Proximité au cours d'eau (Source : Boussougou, 2017)

3.3.1.2.5 - Critère de proximité aux habitations

La population croissante entraîne une demande accrue de terres pour l'implantation des habitations. En effet, on note depuis plusieurs années un agrandissement des villages existant depuis la période coloniale et la création de nouveaux foyers de peuplement. L'étalement urbain autour des aires protégées est stoppé par la présence des limites des réserves forestières. Néanmoins la proximité des habitations autour des réserves, facilite la pénétration des populations à l'intérieur de celles-ci. La tache bâties ici a été extraite de la carte d'occupation de sol de l'image SPOT 6 de juin 2015. La carte des distances par rapport aux habitations autour de 2 km des limites est dans la figure 68.

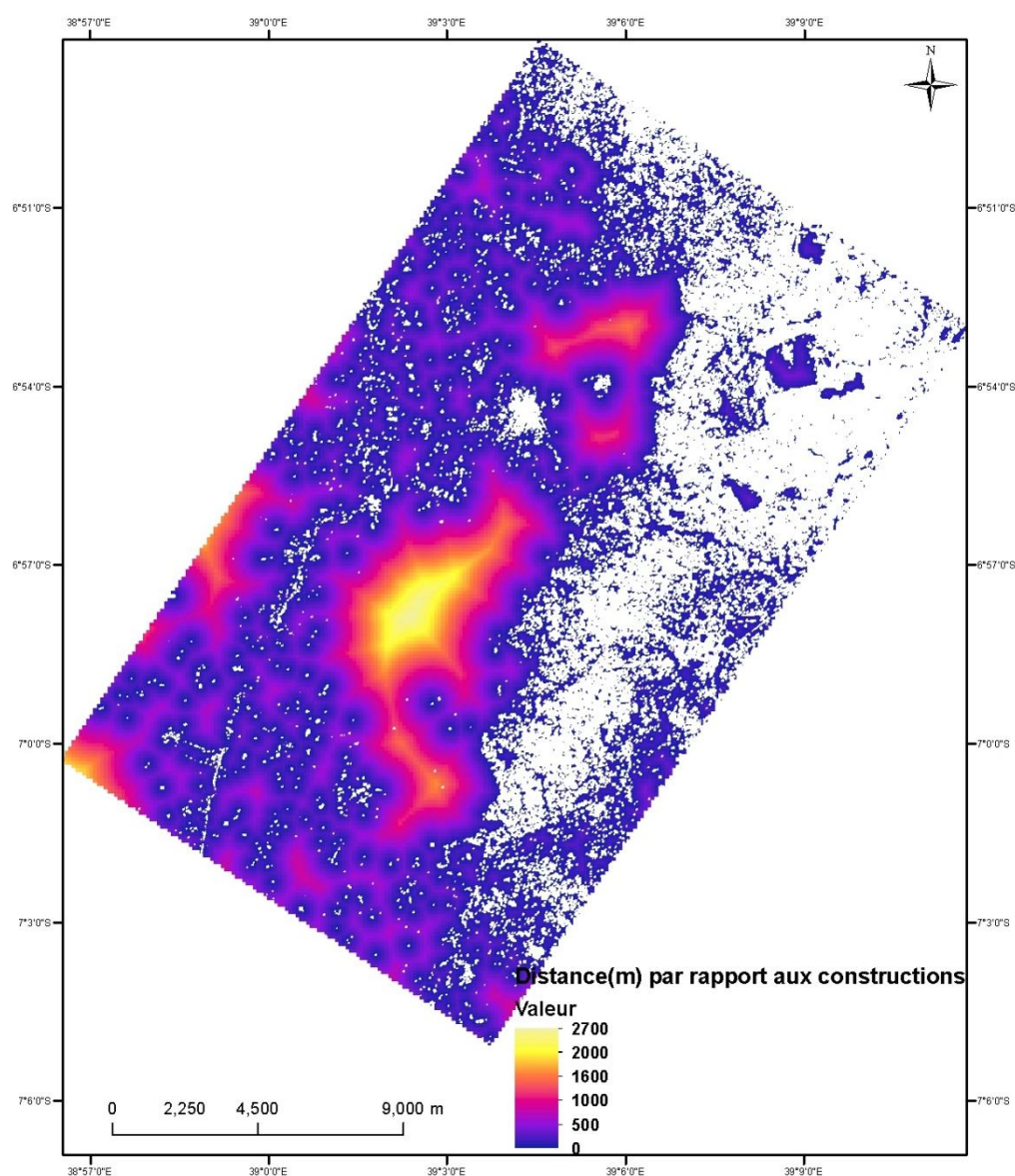


Figure 68: Proximité aux habitations (bâties) (Source : Boussougou, 2017)

3.3.1.2.6 - Critère de proximité par rapport au centre urbain

Les centres urbains des villes situés à proximité des réserves forestières sont des lieux où sont vendus la grande partie des produits issus des forêts : bois d'œuvre (lit, chaises...), des poteaux pour la construction, les plantes médicinales, le charbon de bois qui constitue près de 90 % de l'énergie des populations. La proximité de ces dernières permet aux exploitants ou vendeurs d'écouler facilement leurs produits sans trop de coût de transport. C'est cette raison qui nous amène à considérer ce facteur. Les centres urbains ici, sont les villages à la périphérie immédiate des réserves : Pugu, Kazimzumbwi, Vigama, Masika, Buyuni, Kisarawe. La carte des distances par rapport aux centres urbains est dans la figure 69.

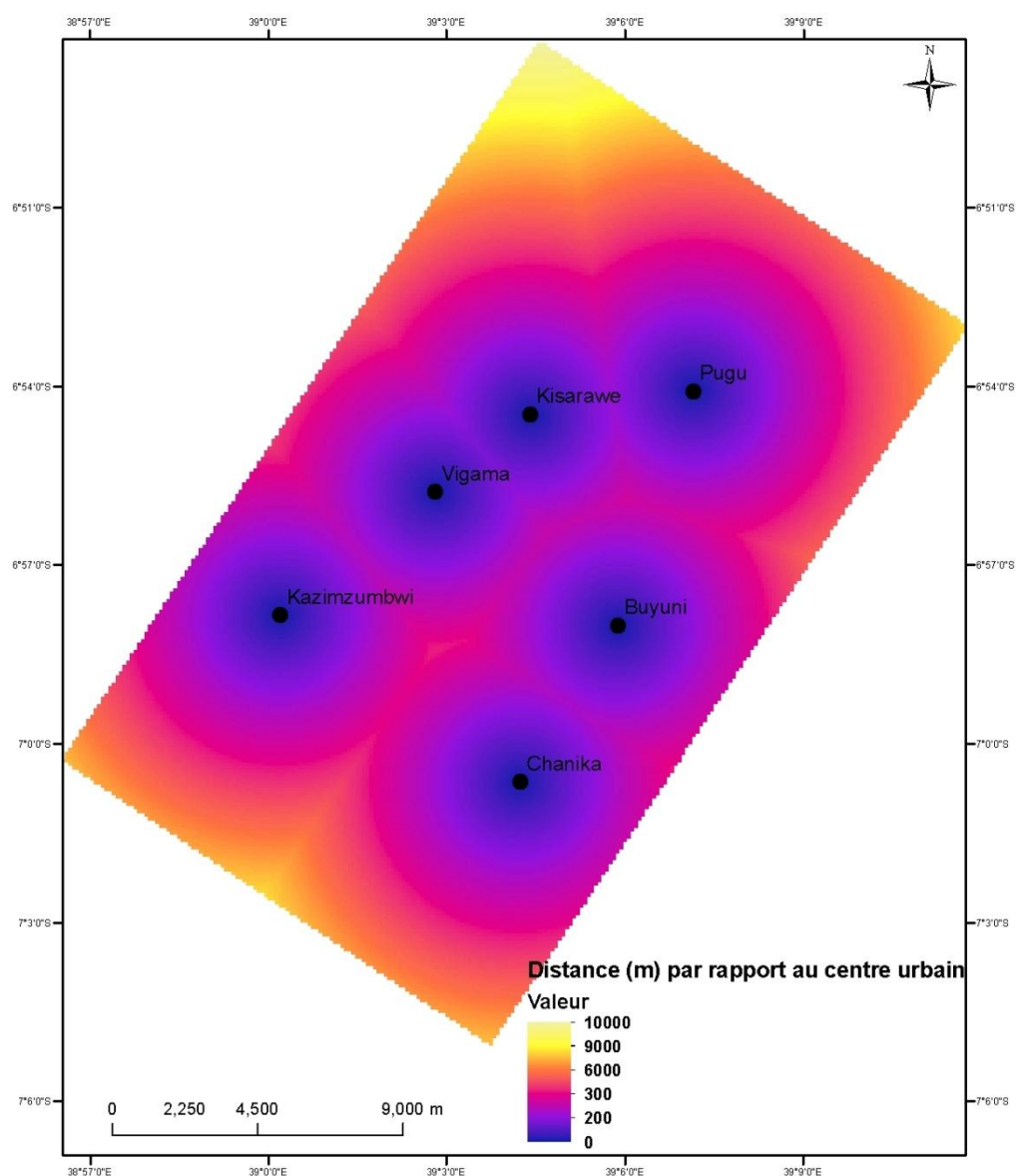


Figure 69: Proximité aux centres urbains (Source : Boussougou, 2017)

3.3.1.2.7 - Critère de la pente

La pente du terrain est un paramètre important à prendre en compte pour la modélisation de la répartition de la population. Les zones accidentées à fortes pentes sont moins propices à l'implantation des habitations et à l'agriculture. La variable « pente » est une donnée endogène qui est dérivée directement à partir du SRTM (MNT). Le SRTM à 90 mètres est retenu ici, car étant le modèle numérique de terrain le plus fin de notre zone d'étude. Les pentes ont été obtenues à l'aide de la fonction slope (pente) dans arcgis. La carte des pentes est présentée ci-après (Figure 70).

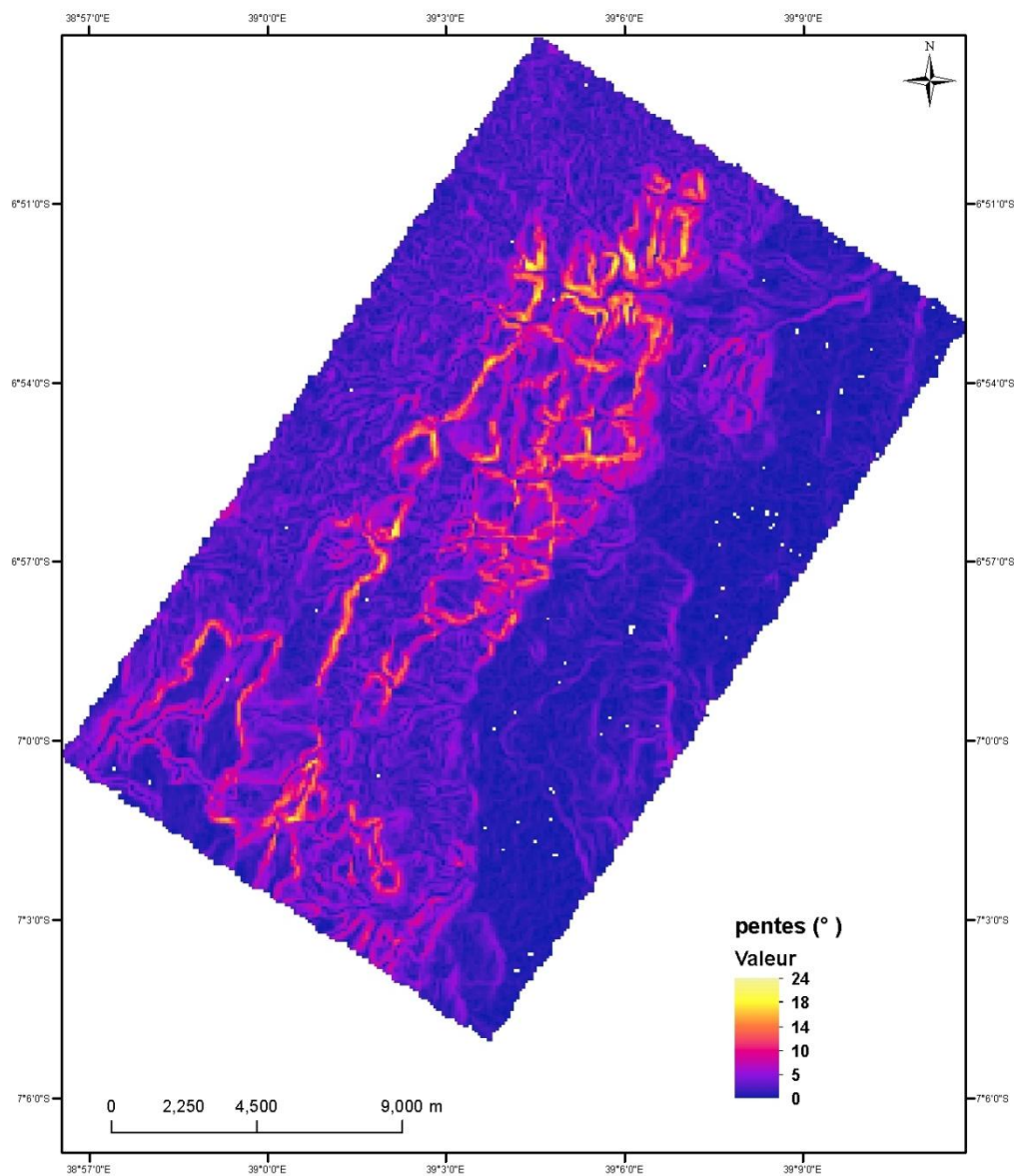


Figure 70: Pente. Les points blancs sont des artefacts du SRTM (Source : Boussougou, 2017)

3.3.1.2.8 - Critère de l'altitude

L'altimétrie de la zone est également à prendre en compte dans la distribution spatiale des populations. En effet, les populations auront tendance à s'installer dans les zones basses, pour se protéger des mauvaises conditions météorologiques (exemple passage d'un cyclone). Il en est de même pour les zones cultivées, qui seront elles plus dans les vallées qu'aux sommets des collines. C'est ce qui peut expliquer la forêt abondante dans les collines des réserves. La carte altimétrique est présentée ci-après (Figure 71).

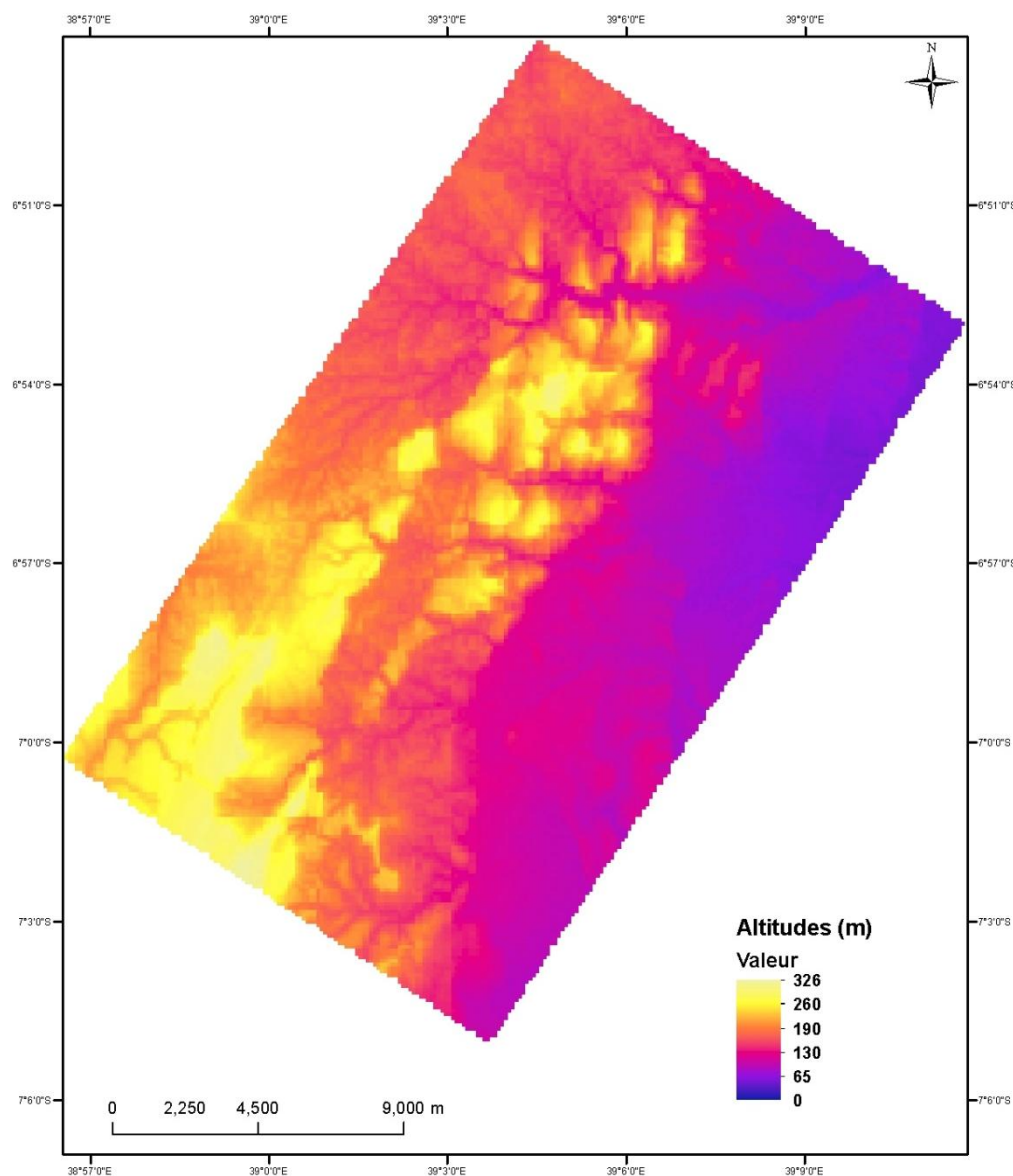


Figure 71: Altitude (Source : Boussougou, 2017)

3.3.1.2.9 - Contrainte

Les contraintes concernent principalement les limites des réserves qui constituent un obstacle juridique à l'installation de la population. Elles sont exprimées sous forme d'une couche codée en binaire (0 et 1). La valeur 0 est affectée aux zones non favorables à l'installation de la population, tandis que celles potentiellement favorables sont codées avec la valeur 1.

Dans notre cas d'étude, la seule contrainte véritable qui limite les populations à s'installer

dans les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi reste les limites de celles-ci (Figure 72). Malgré lesdites limites, certaines populations tentent quand même de s'y s'installer, mais voient leurs installations détruites par les autorités. Aujourd'hui la loi est devenue plus stricte et les personnes appréhendées risquent de fortes amendes voire la prison. Les seules constructions dans les réserves sont l'école primaire de Mikani et les logements des enseignants dans la réserve de Pugu et la base militaire dans la réserve de Kazimzumbwi.

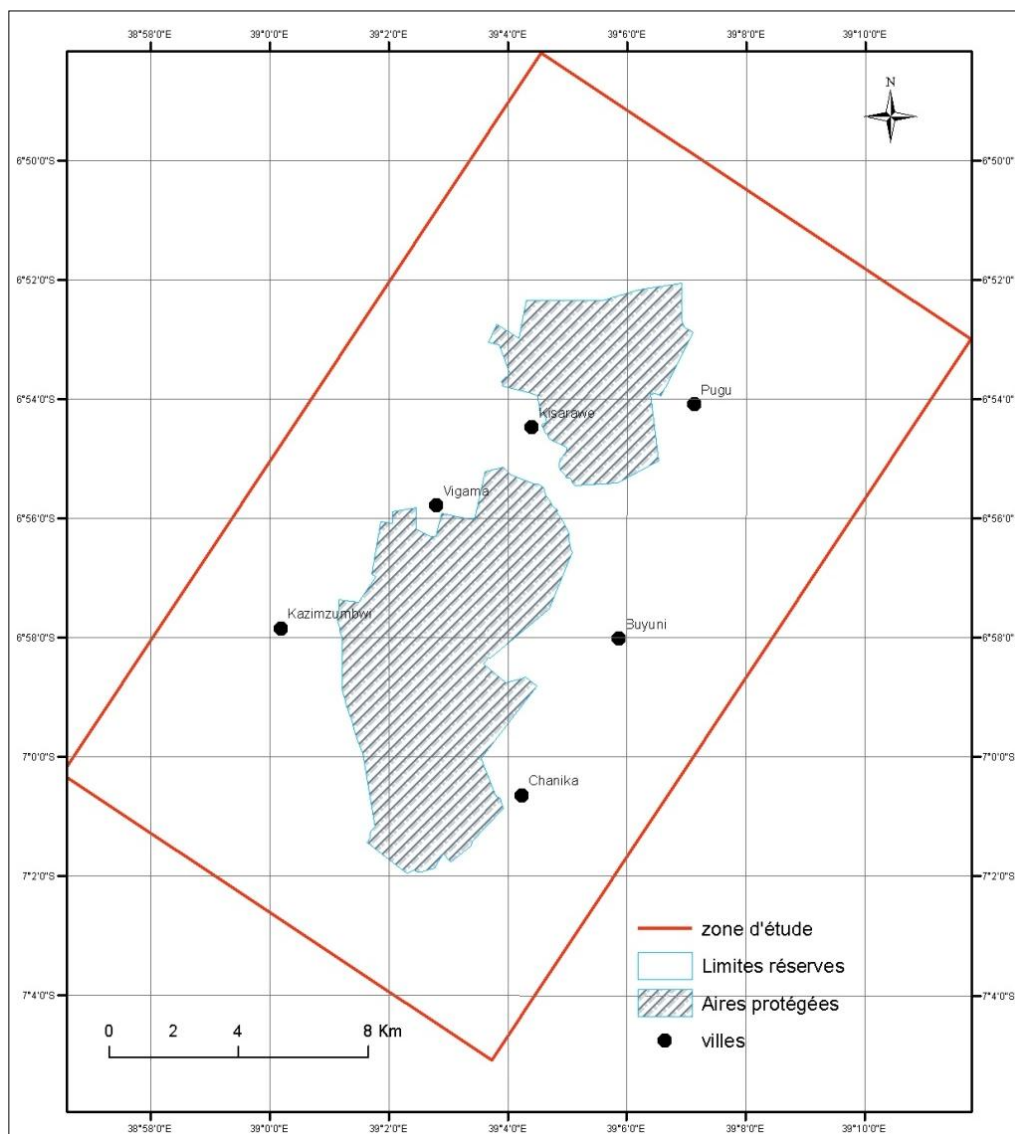


Figure 72: Contrainte (Source : Boussougou, 2017)

3.3.1.3 - Évaluation multicritère et pondération

Après avoir déterminé l'ensemble des critères favorables à la présence d'une population en un endroit plutôt qu'à un autre, nous avons procédé à l'AMC basée sur la méthode linéaire pondérée (Daoud, 1997). Cette méthode est réalisée à l'aide de la fonction MCE d'IDRISI, qui représente la procédure de combinaison de critères prenant la forme :

Équation 7: Equation de pondération

$$C = \sum_i S X_i W_i * P C_j$$

Où C est l'indice composite, X_i est la valeur du facteur i , W_i est le poids de chaque facteur et C_j est la valeur de la contrainte j .

Toutefois, il importe de rappeler que, pour le fonctionnement de cette méthode, on doit normaliser les différentes échelles de mesure, et cela pour chaque facteur. A cet effet, tous les facteurs ont été exprimés dans une fourchette allant de 0 à 255. Ainsi, la valeur maximale (255) représente la meilleure évaluation et donc le meilleur endroit en fonction du critère considéré.

Pour la pondération des critères, nous avons utilisé l'approche dite de comparaison par paire développée par Saaty (1990) dans le contexte du processus décisionnel appelé AHP (Analytical Hierarchy Process). Cette technique est programmée dans le logiciel IDRISI avec la fonction WEIGHT. Cette fonction permet d'établir les poids relatifs pour un groupe de facteurs dans le cadre d'une évaluation multicritère. Les poids sont déterminés à partir d'une série de comparaisons par paires de facteurs en fonction de leur importance dans la détermination de l'aptitude pour produire des coefficients de pondération standardisés dont la somme est égale à 1. Ces poids peuvent ensuite être utilisés pour pondérer les facteurs dans le cadre d'une combinaison par pondération linéaire faisant appel à la fonction MCE.

Cette étape est très délicate et elle exige l'intervention des décideurs (autorités locales) pour l'affectation d'un coefficient à chaque facteur. Donc, pour chaque paire de facteurs possibles, on introduit une évaluation dans une matrice couplée. Les poids sont alors déterminés à partir du vecteur propre principal de la matrice d'évaluation. Pour notre étude, nous avons utilisé les valeurs présentées sur le Tableau 23.

Tableau 23: Matrice de pondération des critères pour l'analyse multicritères

	Routes	Chemins de fers	Bâtis	Centres urbains	Pentes	Altitudes	Cours d'eaux
Routes	1						
Chemins de fers	1/3	1					
Bâtis	1/5	5	1				
Centres urbains	1	2	2	1			
Pentes	2	5	5	2	1		
Altitudes	3	5	5	3	2	1	
Cours d'eaux	1	3	2	2	1	1/3	1

Les valeurs de pondération sont calculées à l'aide de la fonction WEIGHT. Cette fonction permet aussi d'évaluer a posteriori la cohérence des jugements à l'aide de l'IGC (indice global de cohérence). Cette dernière mesure la proximité à des jugements cohérents. D'après Saaty (1990), si l'IGC est supérieur à 0,1 la matrice des évaluations devrait être réévaluée. Dans notre application, cet indice représente une valeur de 0,06 exprimant une cohérence satisfaisante des jugements (Tableau 24).

Tableau 24: Valeurs de poids pour chaque facteur à l'aide de l'indice global de cohérence (Source : Boussougou, 2017)

Facteurs	Poids
Routes	0.2012
Chemins de fers	0.0687
Bâties	0.3172
Centres urbains	0.0969
Pentes	0.1376
Altitudes	0.1388
Cours d'eaux	0.0396
Indices global de cohérence	0.06

Le poids de chaque facteur, permet de ressortir l'impact primordial de la proximité des habitations (32 %) et des routes (20 %). Les altitudes et les pentes jouent également un rôle dans l'implantation des populations avec respectivement 13.88 % et 13.76 %. Le chemin de fer, les centres urbains et les cours d'eaux jouent un rôle minime, mais pas négligeable. Ils participent respectivement de 7 et 3 % dans l'installation des populations de la zone d'étude.

3.3.2 - Résultat de l'analyse multicritères

A partir des résultats de l'analyse multicritères (AMC) nous avons établi une carte de la pression anthropique de la zone périphérique des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi (Figure 73). Nous avons identifié 4 zones de pressions : 1) très sensible, 2) sensible, 3) moyennement sensible et 4) peu sensible.

D'après l'analyse de la Figure 73, nous constatons que la zone la plus vulnérable (très sensible) à la dégradation par l'influence humaine se situe dans la partie Est autour des grandes villes (Chanika Buyuni, Pugu et Kisarawe), le long des routes principales bitumées. Ce qui rend les réserves forestières particulièrement très sensibles dans leurs parties Est également à la périphérie immédiate. On remarque, que les réserves forestières sont globalement sous pressions humaines dans leur ensemble, partant des zones très sensibles à moyennement sensibles. On note, quelques zones peu sensibles aux pressions humaines dans la partie ouest de la zone d'étude, de la réserve de Kazimzumbwi et au nord de la réserve de Pugu.

La superposition de cette carte de pressions à la carte d'occupation du sol récente issue de l'image SPOT 5 de juin 2015 et de la carte d'altitude, permet de voir que les zones très sensibles correspondent aux zones à forte urbanisation (grands villages : Pugu, Kazimzumbwi, Byuni et Chanika). Les zones sensibles correspondent quant à elles aux zones de faible urbanisation, de cultures et de savanes. On note également que la topographie de la zone est un frein à l'installation des populations à certains endroits. C'est notamment les zones dont l'altitude est supérieure à 200 m, qui correspondent aux zones peu sensibles aux pressions humaines.

L'analyse multicritères basée sur la méthode linéaire pondérée, en utilisant sept critères ainsi que la carte des contraintes, a permis d'établir une carte de pression anthropique autour des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi. On retient ainsi que les deux réserves sont très vulnérables aux pressions humaines, surtout dans leurs partie est.

Cette carte pourrait constituer un outil d'aide à la décision au service des gestionnaires des deux réserves en montrant les zones les plus exposées au phénomène de dégradation forestières liées aux pratiques des hommes. Face à ce document, les décideurs et aménageurs

pourraient ainsi définir à court terme les premières actions d'intervention prioritaire.

L'analyse multicritères, nous a permis également identifier le poids de facteurs responsables de cette dégradation (routes, urbain, pentes, altitudes...). Cette étape, est très importante pour la suite de notre travail. En effet, les facteurs identifiés serviront d'entrée pour la modélisation prospective d'occupation du sol à l'horizon 2050 dans les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi en particulier (Chapitre 4).

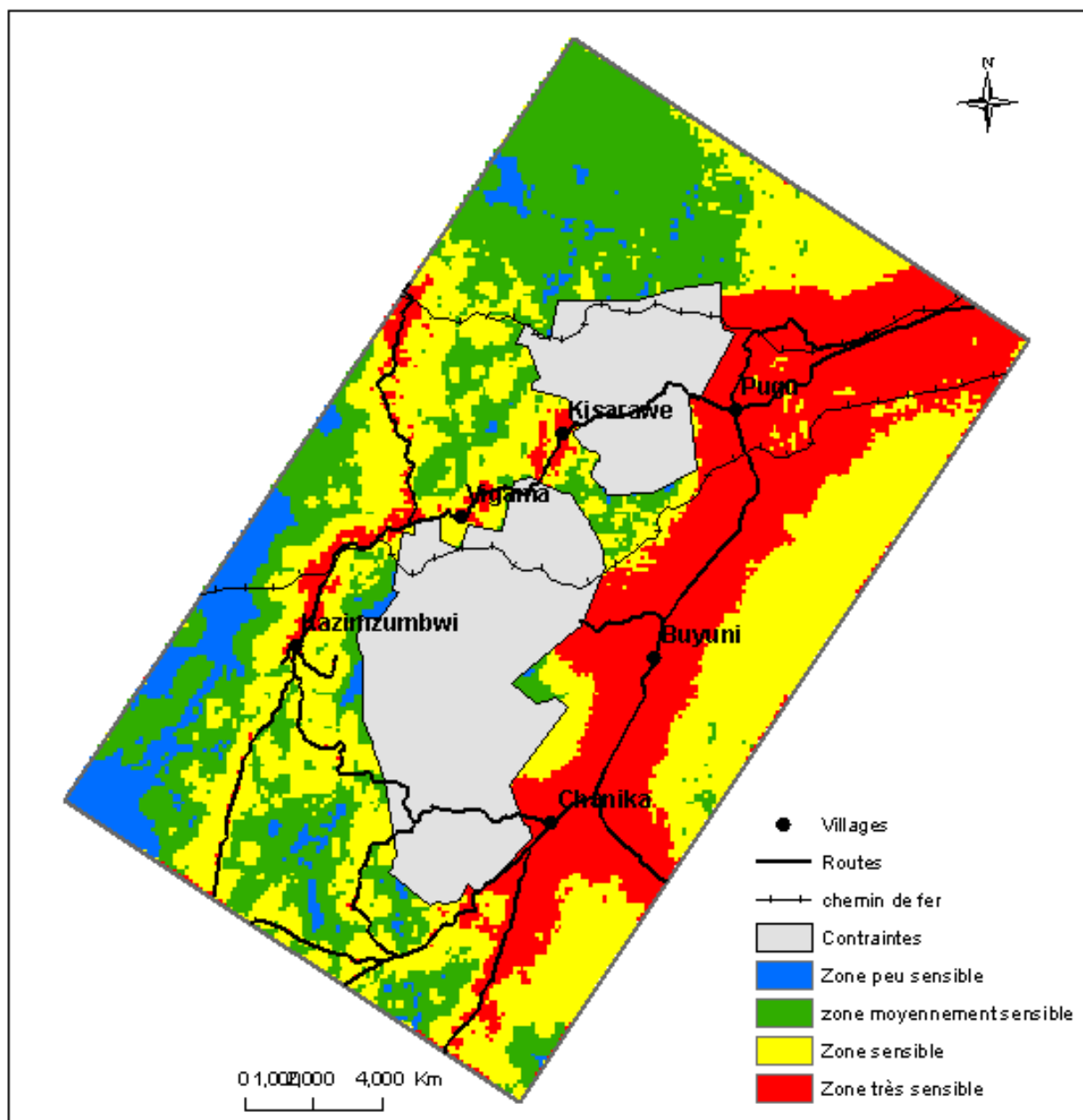


Figure 73: Carte de pression exercée par la population autour des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi (Source : Boussougou, 2017)

3.4 - Conclusion du chapitre 3

Dans cette partie, l'utilisation des images satellitaires SPOT 6 et LANDSAT nous a permis de suivre les « modifications de la végétation liées aux activités humaines à une échelle locale de 1995-2015 dans les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi ». Après une phase de prétraitement des images, le traitement s'est basé sur une classification orientée objets. Le traitement de l'image SPOT 6 a permis de mettre à jour l'état actuel de la couverture terrestre dans les réserves avec 9 classes d'occupation du sol identifiées : forêt dense, forêt dégradée, savane, végétation arbustive, brousses, sol, bâtis et eau. Le traitement des images LANDSAT par contre, du fait de leur résolution spatiale plus grossière que l'image SPOT 6 (30 m contre 6 m), a permis de distinguer 5 classes : forêt, brousses, végétation herbeuse, végétation arbustives et surfaces artificialisées.

Des deux réserves forestières, seule la réserve de Pugu conserve encore près de la moitié de sa surface en forêt. A l'inverse la réserve de Kazimzumbwi ne contient que 5 % de forêt de sa superficie.

La dynamique d'occupation de sol a été mise en évidence par les cartes d'occupation du sol de 1995, 2009 et 2014 réalisées à partir des images LANDSAT. Ainsi, il a été montré que la sous-période 2009-2014 a été plus critique que la sous-période 1995-2009 en terme de perte de forêt. En effet, en l'espace de 5 ans les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi ont presque perdu le double de leurs surfaces de forêt (20% pour la réserve de Pugu et 21% pour la réserve de Kazimzumbwi et) en comparaison à la première période 1995-2009 (14 ans) (9 % pour la réserve de Pugu et 26% pour la réserve de Kazimzumbwi). La croissance des surfaces artificialisées témoigne de l'installation des populations au fil du temps. L'augmentation de ces surfaces en 5 ans (7%) est presque proportionnelle à celle faite en 14 ans (8%).

Partant de l'hypothèse d'une vulnérabilité accrue des pressions humaines dans les réserves forestières et dans leur périphérie. L'analyse multicritère a permis d'identifier les zones de fortes et faibles pressions humaines. Les zones les plus vulnérables restent celles situées à proximité des axes de communication et des villes. Ainsi, les réserves forestières sont très sensibles dans leur partie est, proches des routes principales et des grands centres urbains comme Pugu et Kisarawé.

Les résultats de la dynamique d'occupation de sol dans les deux réserves forestières sont en accord avec ceux réalisées par Mdemu et *al.*, en 2012 sur la période 1988 à 2010. En effet, ils notent dans leur étude, une disparition alarmante des surfaces forestières enregistrée depuis les années 88 au profit des surfaces agricoles à cause des coupes illicites de bois pour la fabrication du charbon de bois et l'extension des villages. Ils montrent également en parallèle, l'effet du changement climatique sur la vulnérabilité des réserves forestières, avec une baisse de la pluviométrie et une hausse de température enregistrée les 50 dernières années dans la région qui pourraient affecter les réserves.

Chapitre 4 - Modélisation prospective de l'occupation du sol à l'échéance 2050

Introduction

Les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi sont soumises à de fortes pressions humaines, notamment à leurs périphéries. En effet, pour des raisons socio-économiques les populations environnant les réserves ont augmenté à cause d'une forte migration des régions voisines à la recherche de meilleures conditions de vie. Les cartes d'occupation du sol passées et actuelles (1995, 2009, 2014 et 2016) et leur analyse permettent d'observer une forte dynamique des paysages forestiers (Chapitre 3). En outre, les analyses faites ont montré que la réserve forestière de Kazimzumbwi a perdu près de 47% de sa superficie forestière entre 1995 et 2014 comparé à sa voisine la réserve forestière de Pugu qui dans la même période a perdu 29 % de surface forestière. On note aussi que les surfaces artificialisées et herbeuses autour des réserves ont augmenté sur la même période, témoignant d'une croissance démographique importante dans les villages périphériques des réserves. La dégradation des surfaces forestières sur la période 1995-2014 a eu pour conséquence une importante de la faune et la flore des deux réserves forestières.

Partant de ce constat, il est plus que nécessaire de préserver ce qui reste en terme de biodiversité actuelle desdites réserves forestières et d'anticiper sur leurs changements futurs, afin de mieux les protéger à long terme. C'est dans cette optique que, nous analyserons les changements futurs des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi à partir d'une méthode de modélisation prospective.

Le travail de modélisation prospective a pour but ici, de réaliser la carte d'occupation du sol en 2050. Ce qui permet d'analyser l'évolution possible de la couverture terrestre suivant différents modes de gestion forestière. Les réserves ayant connu des fortes pressions humaines, conduisant à la fragmentation du paysage, il est intéressant d'avoir une vision à long terme de son évolution afin d'accompagner les acteurs concernés dans leur prise de décision. Cette vision prospective permettra à la fois une meilleure gestion des réserves suivant les objectifs fixés à long terme (rétablir un paysage forestier, préservation des zones forêts) et cela permet aussi d'anticiper les conséquences des décisions actuelles sur le paysage futur. Pour réaliser cette vision future des paysages forestiers, nous utiliserons la modélisation prospective basée sur le modèle Land Change Modeler (LCM), qui fait partie des modèles stochastiques présentés dans le chapitre 1 (Justification du choix du modèle LCM.1.3.6.1).

4.1 - Land Change Modeler (LCM)

4.1.1 - Méthodologie

LCM est un modèle générique conçu pour la simulation des changements d'occupation et d'usage des sols (Eastman, 2009 ; Aguejda, 2009 ; Khoi et Murayama, 2010 ; Mas et *al.*, 2011 ; Maestripiéri et Paegelow, 2013 ; Mas et *al.*, 2014 ; Dodane et *al.*, 2014 ; Houet et *al.*, 2015). Il a été initialement conçu pour gérer les impacts sur la biodiversité, et analyser et prévoir l'utilisation des terres et les changements de couverture terrestre. LCM évalue les changements de couverture terrestre entre deux dates T1 (initiale) et T2 (finale). Il calcule les modifications et affiche les résultats sous forme statistique ou cartographique. Enfin, il prévoit la couverture terrestre future (T3, T4...) sur la base de cartes de potentiel de transition relative. LCM est utilisé dans cette étude pour identifier les variables explicatives, créer des transitions potentielles et prévoir les futures cartes de couverture terrestre.

La figure 74 présente toutes les étapes majeures du modèle LCM-IDRISI (Eastman, 2012) utilisées dans l'étude. Trois étapes majeures: l'entrée de données, les traitements (modules), la validation et les résultats de prédiction sont présentés dans ce diagramme.

Les données d'entrée du modèle (variables explicatives, cartes d'occupation du sol) sont les mêmes que celles utilisées dans le chapitre 2 sur la modélisation de pressions anthropiques (3.2), à partir de l'évaluation multicritères (EMC). On note néanmoins, quelques différences sur la variable « distance par rapport aux bâtis » issue de l'image SPOT 6 de 2015 remplacée par la variable « distance par rapport aux surfaces artificialisées » résultant de l'image LANDSAT de 1995. Aussi les variables « distance par rapport au chemin de fer » et « distance par rapport aux routes » sont regroupées en une variable « distance par rapport aux voies de communication ». Pour plus de détails sur l'ensemble des variables et des cartes d'occupation du sol, se référer au chapitre 3. Les sections traitement et validation sont présentées avec les modules associés qui sont incorporés pour prédire les cartes de couverture terrestre futures et pour valider l'exactitude des cartes de couverture terrestre prévues.

La prédiction du changement d'occupation de sol dans la modélisation LCM se fait en plusieurs étapes : analyse des changements, modélisation des transitions potentielles et enfin la simulation future. Elle se base sur le changement historique de la date T1 à la date T2 des cartes d'occupation du sol pour projeter les scénarios futurs.

-L'analyse des changements est évaluée entre deux cartes d'occupation du sol (T1 et T2). Les changements identifiés sont la transition d'un état d'occupation du sol à un autre. Le nombre de transitions potentielles dépend du nombre de classe d'occupation du sol. La procédure d'allocation spatiale des changements d'occupation du sol se fait par affectation multi-objectif (MOLA), qui se couple à l'estimation de la quantité de changement effectuée par des chaînes de Markov. Le MOLA prend en compte la totalité des conversions afin de lister les catégories d'occupation du sol perdant en surface et celles gagnant sur les premières. Le résultat est une carte de transition potentielle pour chaque transition (Eastman, 2009).

L'algorithme Multi-Layer Perceptron Neural Network (MLPNN) d'IDRISI (Eastman 2012) crée des potentiels de transition. Les transitions potentielles sont retenues lorsque le taux de précision est supérieur à 70%. Une fois calibré, le modèle est utilisé pour prédire les scénarios futurs.

-La troisième et dernière étape importante est la prédiction des changements futurs. En utilisant les taux historiques de changement et le modèle de potentiel de transition, LCM prédit les scénarios futurs pour une date future spécifiée (T3, T4...). Dans sa forme la plus simple, le modèle détermine comment les variables influencent les changements futurs, quelle variation a eu lieu entre les dates T1 et T2, puis calcule les transitions potentielles à venir.

En résumé, la prédiction du changement d'occupation du sol dans notre étude comporte deux aspects principaux: la quantité de changement et la matrice de transition du modèle est fournie par la chaîne de Markov, la distribution spatiale des changements est donnée par MLPNN. LCM fournit la quantité de changement en évaluant la matrice de Markov en comparant l'occupation du sol initiale (1995) et l'occupation du sol finale (2014), puis prédit la future couverture terrestre (2050) à l'aide d'une matrice de probabilités de transition pour l'avenir. La matrice de probabilités de transition affiche la probabilité que chaque catégorie d'occupation du sol se transforme en une autre catégorie. Les matrices de probabilités fournissent le potentiel de changement de chaque catégorie sans répartition spatiale du changement; Ceci est fourni par les cartes de potentiel de transition générées à l'aide de MLPNN. La carte de couverture terrestre de 2050 est produite en utilisant des cartes de potentiel de transition de la période historique précédente (1995-2014).

4.1.2 - Facteurs explicatifs des changements observés

La simulation de plusieurs catégories de changement de couverture terrestre dépend de plusieurs variables explicatives (Li et Yeh, 2002). Les variables explicatives qui ont été les facteurs de changement de couverture terrestre antérieure devraient être une force influente dans les changements futurs et sont sélectionnées en fonction de leurs disponibilités et de leurs capacités explicatives. Le MNT (modèle numérique de terrain, ici le SRTM à 90 m), la pente et la distance de la route représentent l'accessibilité d'un village, et la distance de la zone construite et centre urbain mettent en évidence l'emplacement immédiat de l'urbanisation. La signification des variables explicatives a été testée à l'aide du coefficient V de Cramer qui mesure la force d'association entre deux variables catégorielles basées sur les statistiques du Chi-carré (Pérez Vega et *al.*, 2012). Dans cette étude, le changement de couverture terrestre dans la période de temps historique et les variables explicatives sont pris en compte pour tester le coefficient V de Cramer pour chaque variable. LCM calcule le coefficient Cramer V automatiquement et affiche le niveau d'association des variables explicatives avec les catégories de couverture terrestre. Les variables avec des valeurs plus importantes sont considérées comme plus importantes que les autres variables. Les valeurs V de Cramer $\geq 0,4$ et $\geq 0,15$ sont considérées comme excellentes et bonnes, respectivement et les valeurs $< 0,15$ devraient être supprimées du modèle (Eastman, 2012). Deux variables topographiques (pente et altitude) et trois variables de distance (routes, cours d'eau et zone construite) ont des répercussions importantes sur le changement de couverture terrestre dans la zone d'étude, et

celles-ci sont utilisées dans le modèle.

Les variables explicatives des changements d'occupation du sol en entrée du modèle de l'étude sont présentées dans le Tableau 25 et leurs visualisations sur la figure 75. A ces variables sont ajoutées les cartes d'occupations du sol de 1995, 2014 et 2016. Les cartes 1995 et 2014 seront utilisées en entrée du modèle et la carte de 2016 servira pour la validation du modèle.

Tableau 25: Paramètres d'entrée du modèle (*Source : Boussougou, 2017*)

Variables	Description
Distance aux routes	30 à 7000 m
Distance aux centres urbains	100 à 11000 m
Distance aux surfaces artificialisées	30 à 400 m
Distance au cours d'eau	30 à 9000 m
Pentes	0 à 24 °
Altitudes	46 à 326 m
Occupation du sol 1995, 2014, 2016	5 catégories d'occupation du sol

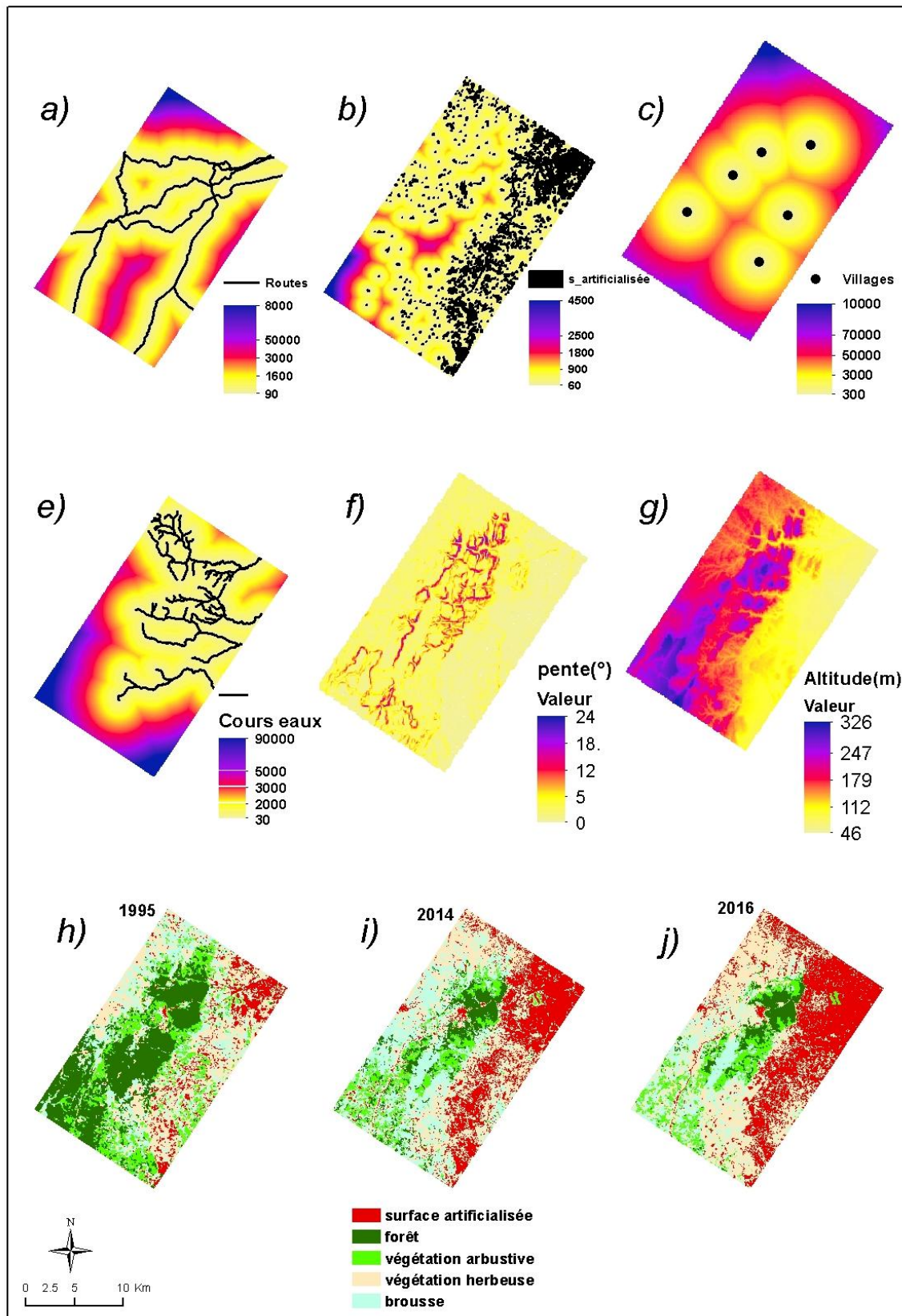


Figure 75 : visualisation des variables explicatives : a) Distance par rapport aux routes ; b) distance par rapport aux surfaces artificialisées, c) Distance par rapport aux centres urbains ; e) Distance par rapport aux cours d'eau ; f) Pent

4.1.3 - Validation

La validation d'un modèle est nécessaire pour évaluer sa précision de prédiction. Pour ce faire, une première carte d'occupation du sol est créée par le modèle pour l'année 2016, car nous disposons pour cette année, une carte d'occupation du sol (carte de référence). L'objectif ici est de comparer la carte simulée à la carte observée pour cette même date, afin de consolider le résultat de prédiction future du modèle. Les observations visuelles et des calculs statistiques (erreurs quantitatives et de localisation) sont effectués sur le premier résultat du modèle. L'erreur quantitative est la différence entre la quantité de cellules dans une catégorie de couverture terrestre particulière dans une carte (Prédit) et la quantité de cellules dans cette catégorie de l'autre carte (carte de référence), et l'erreur de localisation est l'écart spatial d'une catégorie dans une carte de la même catégorie dans une autre carte (Eastman, 2012).

La précision de la quantité et de l'emplacement indique des aspects totalement différents. Le taux de précision de 100% peut être de 0% pour la précision spatiale. Cependant, la plus grande précision spatiale (100%) et la précision quantitative la moins élevée ($> 0\%$) sont impossibles à trouver dans la même simulation pour une catégorie particulière de couverture terrestre, car la précision spatiale considère une surface surestimée et sous-estimée spatialement incorrecte là où la précision quantitative ne considère que la différence dans la carte simulée et réelle pour une catégorie particulière.

Les indices Kappa et l'analyse par matrice d'erreur sont incorporés dans l'étude pour la validation du modèle. L'indice Kappa standard est un processus analytique comparatif qui mesure les aspects spatiaux et non spatiaux entre les cartes prédites et les cartes de référence (Eastman, 2012). Les valeurs de Kappa sont excellentes pour des valeurs supérieures à 0,75, pour des valeurs comprises entre 0,40 et 0,75 bonnes, et les valeurs inférieures à 0,40 ; elles sont dites mauvaises (Eastman, 2012).

Les indices Kappa pour différents composants sont développés par Pontius (Pontius, 2000) pour évaluer la fiabilité d'un modèle qui peut être exprimé par l'équation suivante:

Si $P_o > P_c$, alors $Kappa > 0$

Si $P_o = P_c$, alors $Kappa = 0$ (2)

Si $P_o < 0$, alors $Kappa < 0$ (3)

Où P_o est la proportion observée correcte, P_c est la proportion attendue correcte due au changement, et P_p est la proportion correcte lorsque la classification est parfaite (100%). Dans l'équation (2), si la classification est parfaite, $P_o - P_c = P_p - P_c \neq 0$, alors $Kappa = 1$

Pontius (2011) montre plusieurs composants des indices Kappa: Kappa standard (Kstandard), Kappa pour l'emplacement (Klocation), Kappa pour la quantité (Kquantity) et Kappa pour aucune information spatiale et quantitative (Kno). (Pontius et Millones, 2011) définit "Kstandard comme un indice d'accord qui tente de comptabiliser l'accord attendu en raison de la réaffectation spatiale aléatoire des catégories dans la carte de comparaison, compte tenu des proportions des catégories dans les cartes de comparaison et de référence, indépendamment de la taille du désaccord quantitatif ". Kno dépend de la quantité sélectionnée au hasard et de l'attribution spatiale des catégories dans la carte de comparaison. Kquantity est un ratio de

différence quantitative entre les catégories dans la carte de comparaison et la carte de référence, et Klocation est l'accord d'allocation spatiale entre elles.

La matrice de confusion a été analysée à l'aide du module ERRMAT d'IDRISI (Eastman, 2012) pour évaluer l'aptitude de l'allocation des cellules spatiales entre les valeurs prédites et observées. ERRMAT produit une matrice d'erreur contenant le nombre de cellules trouvées dans chaque combinaison possible de catégories observées et prédites, et un résumé des statistiques (Eastman, 2012). L'erreur d'omission estime la proportion d'une couverture terrestre particulière qui est omise par le modèle et la superficie totale de la même catégorie de l'image de référence. L'erreur de commission représente la proportion de couverture terrestre incorrectement attribuée d'une catégorie particulière qui est surestimée par le modèle pour chaque catégorie. Les erreurs de commission et d'omission ont été calculées selon les formules suivantes:

Équation 8: Formule du calcul de l'erreur de commission

$$\text{Erreur de commission} = \frac{\text{Superficie totale d'une classe dans la carte projetée} - \text{Persistance}}{\text{Superficie totale de cette classe dans la carte simulée}}$$

Équation 9: Formule du calcul de l'erreur d'omission

$$\text{Erreur d'omission} = \frac{\text{Superficie totale d'une classe dans la carte observée} - \text{Persistance}}{\text{Superficie totale de cette classe dans la carte simulée}}$$

4.2 - Résultat de la modélisation prospective

4.2.1 - Analyse de la relation entre les variables explicatives et la carte des changements 1995-2014

Le niveau d'association entre les variables explicatives et les classes d'occupation du sol sur la période 1995-2014 est indiqué dans le tableau 26. Il est mesuré à travers le coefficient V. de Cramer. Presque toutes les variables ont une valeur V de Cramer $\geq 0,15$ avec toutes les classes à l'exception de : « distance aux cours d'eau » et la « distance aux centres urbains » et « distance aux routes ». La variable explicative la plus forte est l'altitude, qui a un bon niveau d'association (Cramer V $\geq 0,28$) avec toutes les classes d'occupation du sol et en particulier avec les classes brousses (0.36) et surfaces artificialisées (0.59). La bonne corrélation est également observée avec la « distance aux surfaces artificialisées » (Cramer V $\geq 0,23$), principalement pour la végétation arbustive (0.35) et surface artificialisée (0.49). Les pentes ont aussi une bonne association avec l'ensemble des classes (Cramer V $\geq 0,17$).

La distance aux routes montre un niveau moyen d'association avec la forêt, la végétation herbeuse et les surfaces artificialisées. La distance aux cours d'eau présente aussi un accord d'association moyen avec les brousses et les surfaces artificialisées enfin la distance aux centres urbains montre un bon accord avec les forêts et un accord moyen avec la végétation herbeuse.

La distance aux cours d'eau est la variable la plus faible. Elles montrent une association relativement limitée avec les classes de forêt, arbustive et herbeuse et n'a qu'un bon niveau d'association avec les brousses. L'association la plus basse est observée pour la forêt et brousses avec respectivement la distance aux cours d'eau et distance aux routes, ce qui indique que ces deux classes sont moins influencées par les dites variables.

Tableau 26: coefficient V de Cramer (relation entre changement de couverture terrestre et variables explicatives). Les valeurs $\geq 0,15$ sont en surbrillance en gras (Source : Boussougou, 2017)

Classes	Variables explicatives					
	AL	PE	D_RO	D_SA	D_EA	D_CU
Forêt	0.28	0.28	0.15	0.23	0.10	0.24
Végétation arbustive	0.38	0.26	0.11	0.35	0.12	0.11
Végétation herbeuse	0.28	0.17	0.19	0.24	0.12	0.15
Brousse	0.36	0.21	0.10	0.28	0.19	0.14
Surface artificialisée	0.59	0.38	0.17	0.49	0.15	0.14

AL : Altitude ; PE : Pente ; D_R : Distance aux routes ; D_SA : Distance aux zones artificialisées ; D_E : Distance aux cours d'eaux ; D_CU : Distance aux centres urbains

4.2.1.1 - Transition potentielle

Les cartes résultantes correspondent à chacune des transitions observées dans la période 1995-2014, en exprimant, pour chaque pixel, leur probabilité graduelle d'occurrence, sur une échelle continue de 0 à 1. Une valeur proche de 0 indique une faible probabilité de conversion, et 1 indique une probabilité de conversion élevée pour l'occupation du sol.

Les transitions potentielles de la période 1995-2014 sont nombreuses. Mais, seuls trois potentiels ont été retenus dans notre modélisation (Figure 76). Le choix a été basé sur les observations du terrain et les témoignages des agriculteurs. En effet, les forêts sont détruites au profit de la végétation herbeuse (agriculture, savane, prairie) ; ensuite lesdites surfaces sont mises à disposition pour l'installation des habitations (surface artificialisée).

Ainsi, on observe que les zones à potentiel élevé se retrouvent dans la végétation herbeuse et brousses (Figure 76-a). La plupart se produisent dans les altitudes inférieures à 200 m et des zones de pentes faibles ont montré également un potentiel de changement de la forêt en herbes. Le terrain plat près de la route et des villages existants sont plus vulnérables aux changements dans la végétation herbeuse. Les transitions dans cette classe sont des zones près du réseau routier et des zones existantes de surfaces artificialisées.

Les changements de brousses se produisent loin des cours d'eau et des routes principalement à l'Ouest de la zone et sur presque toute la réserve de Kazimzumbwi. Les potentiels des brousses à se convertir en végétation herbeuse sont plus élevés au sud et au Nord-est. La réserve de Pugu n'ayant pas de grandes surfaces de brousse, montre des faibles changements dans sa partie Nord (Figure 76-b).

Le potentiel de transition de la forêt vers la végétation herbeuse est présenté à la Figure 76-c. On observe des petites zones de transitions éparpillées à l'intérieur et extérieur des réserves. La proximité des surfaces artificialisées et routes ne contribue pas à la conversion de forêt en végétation herbeuse dans les réserves forestières. Les changements restent donc faibles pour la classe forêt.

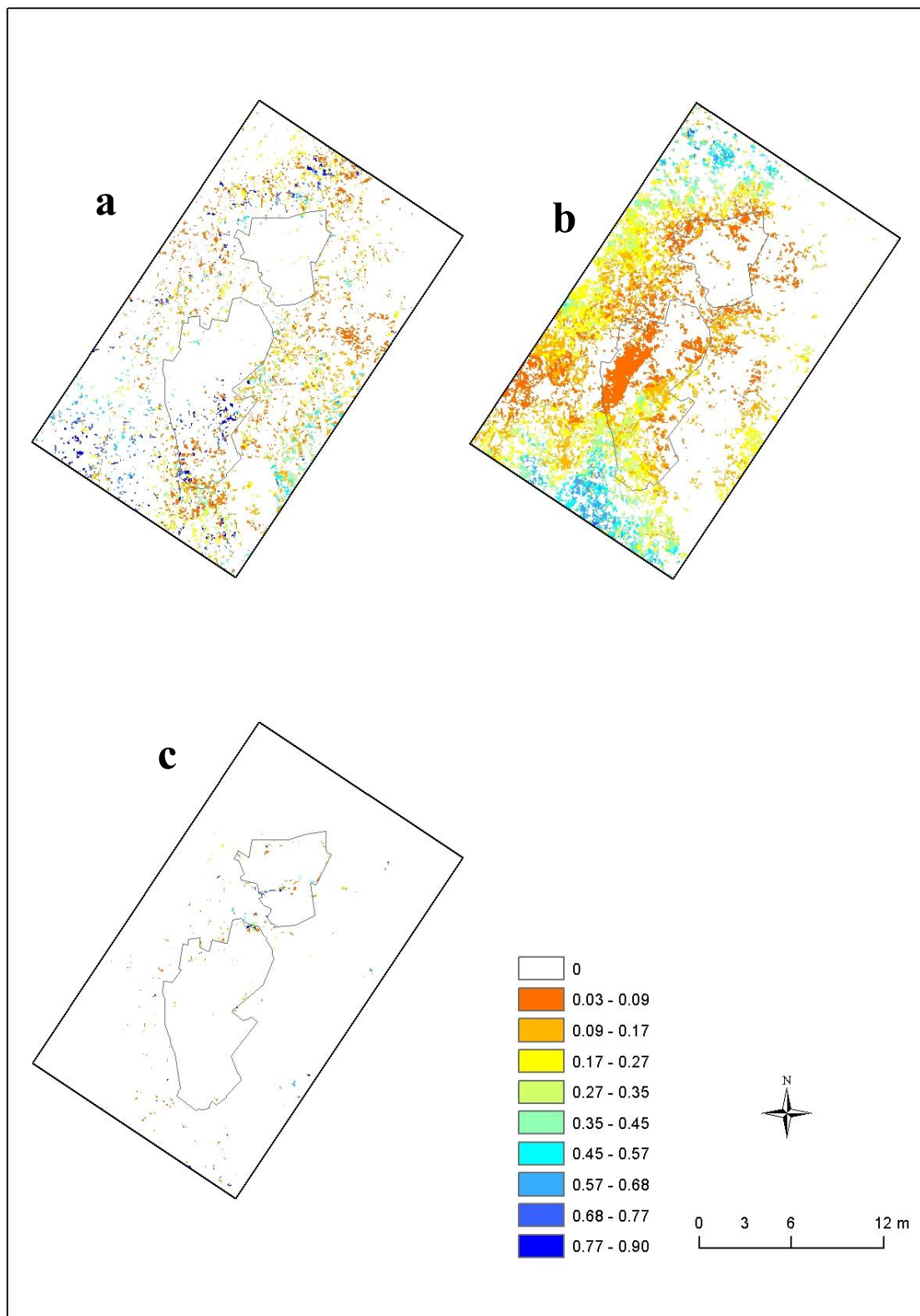


Figure 76: (a) Le potentiel de transition de la végétation herbeuse vers les surfaces artificialisées. (b) Le potentiel de transition des brousses vers la végétation herbeuse. (c) Le potentiel de transition de la forêt vers la végétation herbeuse (Source : Boussougou, 2017)

4.2.1.2 - Validation du modèle

4.2.2 - Carte d'occupation du sol prédite en 2016

La simulation de 2016 a été réalisée en utilisant des potentiels de transition entre 1995-2014. La carte d'occupation du sol simulée et réelle de 2016 sont présentées à la Figure 77. Les différences sont observées principalement dans la végétation herbacée et les surfaces artificialisées au Sud-ouest et Sud où la majeure partie de la conversion a eu lieu. Le modèle surestime les surfaces artificialisées dans la Sud et sous-estime cette même classe dans le Nord. On note également des zones de forêts dispersées dans le Sud-ouest qui en réalité n'existent pas sur le terrain. Cette interprétation visuelle suggère que la carte simulée en 2016 est raisonnablement similaire à la carte réelle de cette année (Figure 77). Le taux de précision de la simulation de 72 %, permet de confirmer cette première observation.

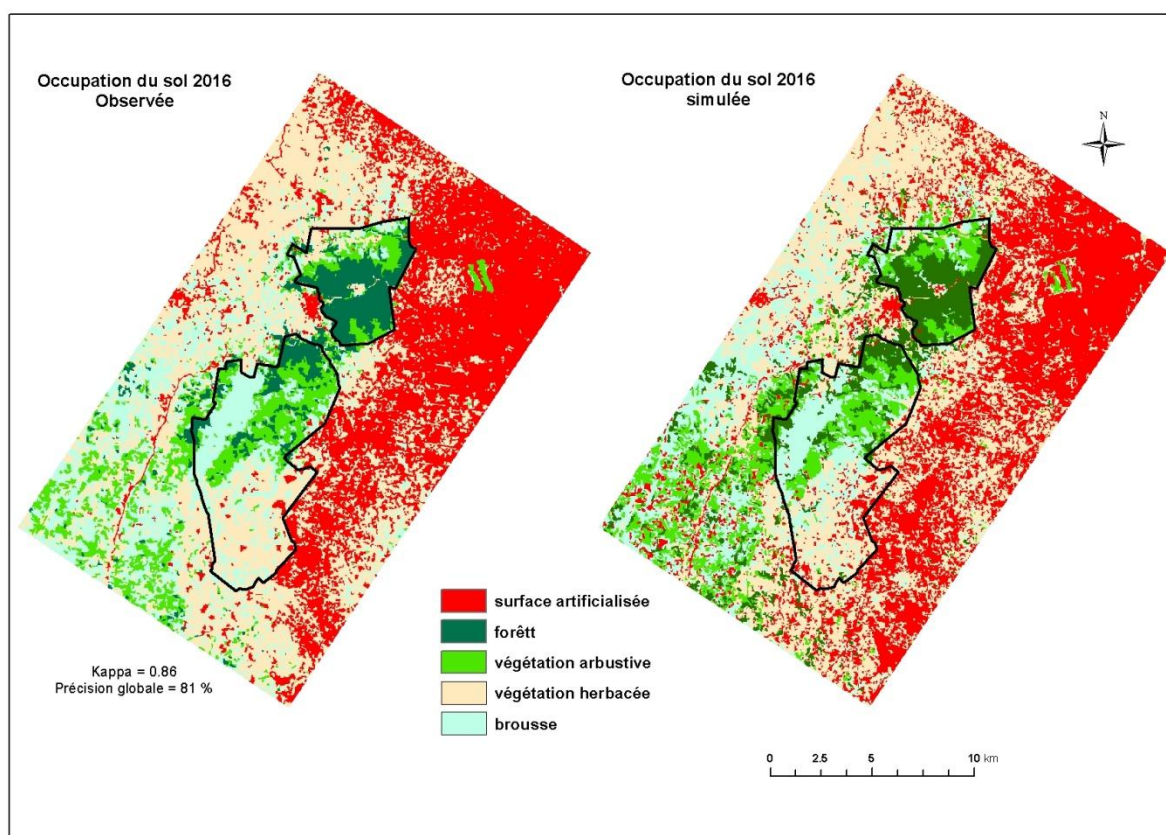


Figure 77: cartes d'occupation du sol observée 2016 (validée à partir des données de terrain de 2015) et prédite par le modèle LCM pour l'année 2016 (Source : Boussougou, 2017)

Cette première approche visuelle apporte des premières pistes de réflexion, mais son caractère subjectif nous oblige à évaluer et valider statistiquement le modèle par le calcul du coefficient kappa et des erreurs de matrice.

4.2.2.1 - Analyse de l'indice Kappa entre l'occupation du sol simulée et observée en 2016

Le résumé des indices Kappa est présenté dans le Tableau 28. Ces indices sont acquis à partir du module VALIDATION d'IDRISI (Dietzel et Clarke, 2006) et peuvent également être obtenus à l'aide de la matrice de Pontius (Pérez-Vega et al. 2012). Les résultats montrent des bons composants kappas ($kappa > 0.70$). Cependant, la simulation a un niveau d'accord raisonnable pour le $K_{standard}$.

Tableau 27: Résumé des indices Kappa

	Indice Kappa
$K_{quantité}$	0.74
$K_{allocation}$	0.71
$K_{standard}$	0.70

4.2.2.2 - Analyse de la matrice prédiction du modèle

Le tableau 28 présente l'analyse par matrice d'erreur de la carte d'occupation du sol observée 2016 (colonne) par rapport à la carte d'occupation du sol simulée (ligne). Ce Tableau 27 permet de voir qu'il y a des confusions entre les différentes classes prédites par le modèle et les classes observées pour l'année 2016. En diagonale se trouvent les pixels bien classés et hors de la diagonale les erreurs de classification. Ce tableau montre également où les erreurs se produisent. Par exemple, sur les 23001 pixels de forêt, 8240 sont attribués à tort à des pixels arbustifs, de même pour les 4899 pixels d'herbes et 4751 de brousses. Les erreurs de commission et d'omission les plus faibles ont été observées dans la classe forêt et arbustives. Les erreurs de commission et d'omission ont été de 0.44 et de 0.20, respectivement, pour la classe forêt et 0.30 et 0.55 % pour la classe arbustive. Une forte erreur de commission (0.58) a été observée dans la classe brousse où une grande quantité de la végétation herbeuse (28865) a été attribuée à tort. Toutefois, les erreurs de commission et d'omission les plus élevées ont été observées dans les brousses. Des quantités considérables de végétation herbeuse (28865) et arbustive (12362) ont été attribuées à tort comme de brousses et des quantités considérables de la végétation herbeuse ont été omises (0.44) par le modèle; cela s'est produit principalement en raison de l'échange élevé de la classe herbeuse avec les surfaces artificialisées. Pour cette raison, de grandes erreurs de commission et d'omission ont été générées pour les herbes. Les erreurs de commission des surfaces artificialisées sont inférieures à toutes les classes, sauf pour l'erreur d'omission de la classe forêt en raison de sa plus grande couverture dans la zone d'étude.

Tableau 28: Analyse par matrice d'erreurs de la carte d'occupation du sol observée 2016 (Colonne) contre la carte d'occupation du sol simulée en 2016 (ligne) à partir des potentiels de transition. Les valeurs sont exprimées en hectares (ha) et l'erreur de commission et d'omission est exprimée en% et en gras (*Source : Boussougou, 2017*)

	Occupation du sol observée en 2016							
Occupation du sol simulée en 2016		Artificialisée	Forêt	Arbustive	Herbe	Brousse	Total	Erreur C
	Artificialisée	101358	292	2340	34979	6069	145038	0.30
	Forêt	425	23001	8240	4899	4751	41316	0.44
	Arbustive	1315	2851	21222	8105	12864	46357	0.54
	Herbes	41749	614	3642	94764	19554	160323	0.40
	Brousse	4163	2268	12362	28865	33709	81367	0.58
	Total	149010	29026	47806	171612	76947	474401	
	Erreur O	0.31	0.20	0.55	0.44	0.56		0.42

4.2.3 - Evolution future de l'occupation du sol en 2050

4.2.3.1 - Présentation du scénario 2050

Après le calibrage du modèle et l'évaluation de sa validité (certitude 72%), nous examinons la structure et la tendance du changement à une date ultérieure (2050). Partant sur l'hypothèse d'une intensification des pressions anthropiques dans le site d'étude au cours du temps, nous produisons une carte d'occupations du sol future en 2050. Un de premiers résultats en sortie du modèle est la matrice de Markov. Cette dernière permet d'observer les probabilités de transitions de chaque classe de changer en d'autres sur la période 2014-2050 (Tableau 29).

Tableau 29: Probabilité de transition des classes d'occupation du sol entre 2014 et 2050(*Source : Boussougou, 2017*)

2014	2050				
	Artificielle	Forêt	Arbustive	Herbes	Brousse
Artificielle	0.61	0.00	0.00	0.27	0.10
Forêt	0.15	0.09	0.11	0.28	0.37
Arbustive	0.27	0.04	0.04	0.35	0.30
Herbes	0.47	0.01	0.01	0.34	0.17
Brousse	0.37	0.01	0.01	0.36	0.23

La période 2014-2050 (Tableau 29) est marquée par une tendance à la baisse des paysages forestiers. Ce recul de forêt se fera au profit de la végétation herbeuse, brousse et surface artificialisée avec respectivement des probabilités de 0.28, 0.37 et 0.15. La végétation herbeuse cédera également sa place aux surfaces artificialisées avec une probabilité de 0.47. Les brousses seront remplacés par les surfaces artificialisées et des herbes avec des probabilités respectives de 0.47 et 0.37. Enfin les surfaces arbustives auront une possibilité d'être convertis en végétation herbeuse, brousse et surface artificialisée avec une probabilité de 0.35, 0.30 et 0.27 respectivement.

La progression des surfaces artificialisées à la place des formations végétales affectera gravement la variabilité de l'écosystème des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi. L'analyse de celle-ci fait ressortir plusieurs remarques quant à l'évolution de l'occupation du sol dans les réserves et leurs périphéries (Figure 78) :

→ Une densification des surfaces artificialisées au Nord-est et apparition de nouvelles zones, notamment à l'ouest et dans les réserves forestières, plus particulièrement au Sud de Kazimzumbwi. Ce constat est prévisible dans la mesure où la proximité de la ville favorise ce type d'évolution. Le même phénomène tend à se reproduire, le long de la route principale. Cette situation s'explique par le fait que les populations s'installent le long des routes pour amoindrir le coût du transport des produits issus des forêts.

→ La montée de la classe herbeuse (savane, culture) par rapport aux classes des brousses et arbustive en 2050. Cette allure paraît logique car les zones recouvrant des brousses et végétation arbustive sont mises en culture par les populations locales pour répondre à leurs besoins alimentaires. La proximité de cette classe par rapport aux limites des réserves influence également la perte du couvert forestier.

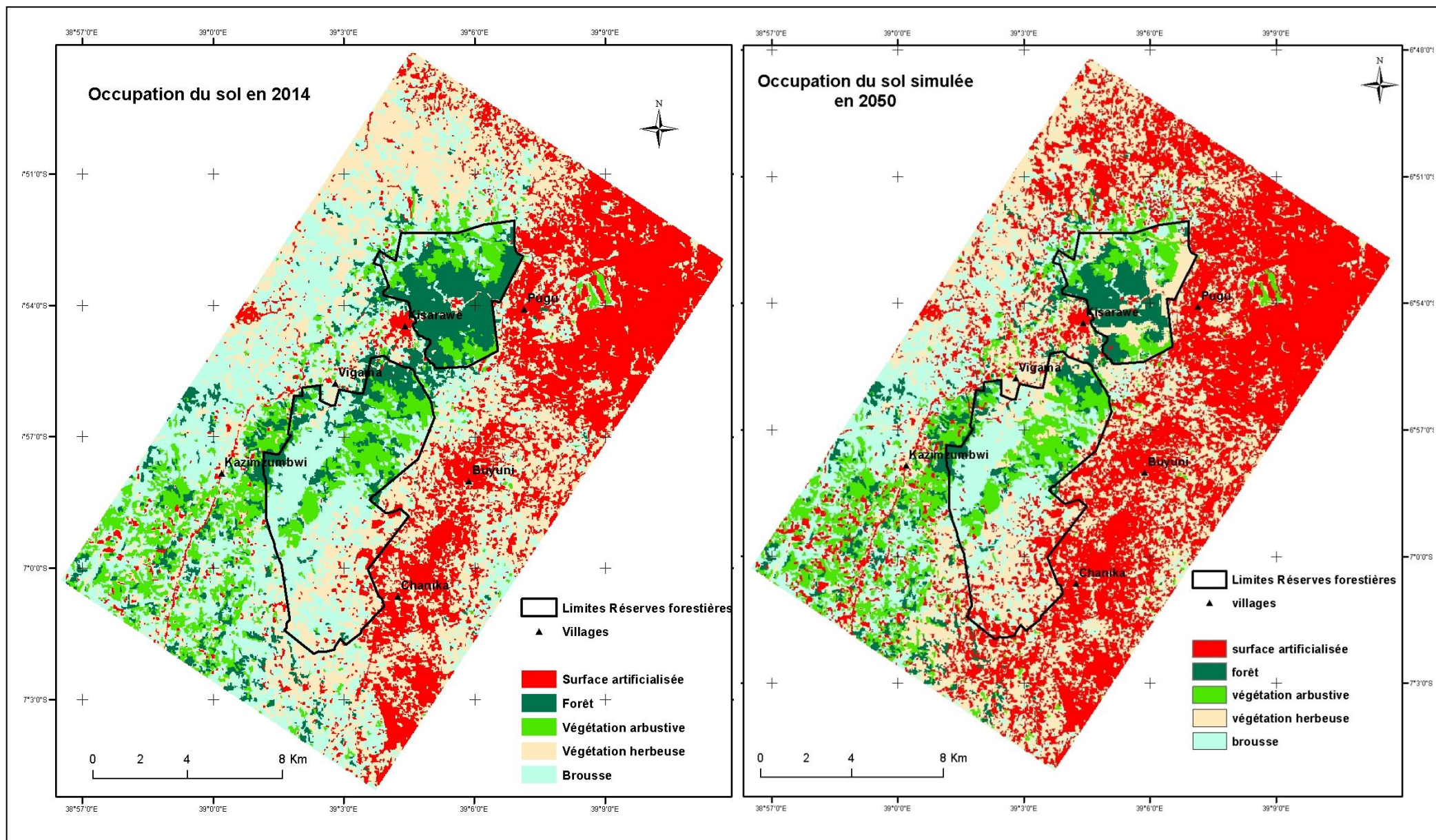


Figure 78: Carte d'occupation du sol simulée pour l'année 2050 et celle observée en 2014 (Source : Boussougou, 2017)

Du point de vue forestier, une régression des forêts s'observe dans les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi. Les forêts sont remplacées dans certains cas directement par de l'agriculture (agriculture sur brûlis). Cette perte de forêt se localise principalement dans le nord, sud et l'est de la réserve de Pugu. Le nord de Kazimzumbwi montre une faible perte de forêt, de sa superficie existante en 2014.

Les résultats prévisionnels de l'évolution de l'occupation du sol sont présentés par le calcul des surfaces de chaque classe d'occupation du sol en 2050. Le Tableau 30 montre que la classe « surface artificialisée » augmentera et passera à 37 % contre 23 en 2014. L'autre changement sera une baisse des surfaces pour les classes de forêt et brousse. Les classes de végétation arbustive et herbeuse présenteront par contre une évolution presque constante entre 2014 et 2050.

Tableau 30: Evolution possible des surfaces d'occupation du sol entre 2014 et 2050(*Source : Boussougou, 2017*)

	Occupation du sol en 2014		Occupation du sol en 2050	
	ha	%	ha	%
Surface artificialisée	9973.08	23	15613.46	37
Forêt	3719.34	9	2686.02	6
Végétation arbustive	4173.66	10	4170.68	10
Végétation herbeuse	11952.54	28	12019.21	28
Brousse	12903.12	30	8191.93	19
Total	42721.74	100	42681.33	100

4.2.4 - Discussion

Les changements dans l'occupation du sol ont été impactés par divers facteurs d'ordre anthropique. Comme il est décrit dans les résultats de validation, la forêt et les surfaces artificialisées sont faciles à prévoir et obtiennent les erreurs les plus faibles dans la simulation. La forêt se localise principalement dans les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi et se situe à des altitudes supérieures à 200 m et sur des pentes abruptes de la zone d'étude. La plupart des changements d'occupation du sol se produisent à l'extérieur des aires protégées, dans la végétation de type herbeuse. La végétation arbustive est choisie comme moins probable à changer dans tous les potentiels de transition à d'autres classes d'occupation du sol, et elle est prédite comme la même pour l'année 2050. La simulation est difficile à prévoir pour les herbes, les erreurs sont plus importantes en raison des changements dynamiques dans la période. Par conséquent, de nombreuses erreurs de commission et d'omission sont observées dans la simulation pour ses classes. Ces erreurs peuvent se produire en raison de la sélection des potentiels de transition.

Les forêts existantes appartenant au domaine protégé semblent très peu varier au cours du temps. Mais, les incendies de forêt, la production illégale de charbon de bois ou encore la coupe du bois pour la cuisson et fabrication des meubles pourraient être considérées comme une contrainte pour une prédiction précise de la dynamique forestière.

L'apparition de nouvelles surfaces artificialisées reste aussi difficile à prédire en raison de la complexité de l'urbanisation qui dépend de plusieurs variables spatiales, de l'urbanisme et de la demande d'utilisation des terres (He *et al.*, 2008). Le taux relativement rapide de croissance urbaine a eu une incidence sur la prédiction de surface artificialisée. Par exemple plusieurs zones urbaines éparpillées sont développées exceptionnellement loin de la zone construite existante au cours de la dernière année, ce qui reste difficile à prévoir car le modèle repose sur les tendances historiques.

La quantité des classes a été mieux prédite que leur emplacement, probablement en raison des surfaces artificialisées dominantes dans la zone d'étude. Par conséquent, Kquantity est de bonne qualité dans la période 2014-2016. Cependant, les changements complexes de la couverture terrestre et l'échange entre les couvertures terrestres génèrent des niveaux d'accord moins parfaits pour le KStandard. Le Klocation est dans une plage acceptable. Des erreurs maximales de commission et d'omission observées dans les herbes ont également été notées dans cette étude, car des changements complexes dans ces dernières sont difficiles à simuler.

Il y a lieu de noter qu'à l'exception des variables calées aux modèles pour prédire le futur, s'ajoutent d'autres variables dont la spatialisation et la quantification sont pratiquement impossibles. Il s'agit des facteurs politiques et institutionnels (pauvreté, chômage, conflits, code forestier, etc.), des facteurs démographiques (migration, distribution de la population), des facteurs culturels (consommation des ménages) et des facteurs économiques (coût du travail et du capital) etc. Parmi les variables retenues, la distance par rapport aux surfaces artificialisées semble jouer un rôle important au regard des principaux changements observés entre 1995-2014. L'importance de la distance aux routes, aux villages et la pente doivent également être soulignées.

En 2050, le modèle prédit une expansion et densification des surfaces artificialisées notamment à la périphérie nord est de la réserve de Pugu et au sud dans la réserve de Kazimzumbwi. Le même phénomène est observé le long des voies de communication (routes). Ce résultat est sans doute en lien avec l'expansion de la ville de Dar Es Salaam qui engendrera une pression foncière de plus en plus importante à sa périphérie. On peut également trouver une explication par la création des nouveaux villages due à une forte migration des populations des régions voisines à la recherche de meilleures conditions de vie. Ainsi, la forte croissance démographique déjà enregistrée dans la zone et les projections futures de la population de Dar Es Salaam, montre que la population passera de 5 à 10 millions d'ici 2050 (FAOSTAT, 2013), ce qui favorisera les changements cités.

L'évolution presque constante des surfaces herbeuses peut être due à l'absence de mise en jachère des anciennes zones de culture. Car en effet, la demande continue de la population à croissance rapide des produits agricoles pour leurs besoins alimentaires futurs, entraîne la raréfaction des bonnes terres pour l'agriculture. De plus, le manque de barrières physiques autour des réserves pousse certains villageois en quête de nouvelles terres pour l'agriculture

à cultiver dans les réserves malgré les interdictions, comme il à été observé sur le terrain en 2015.

Enfin, la perte des surfaces forestières s’observera autour des limites des réserves pour l’intérieur, mais aussi par expansion des zones déjà dégradées dans les réserves. L’est de la réserve de Pugu étant très proche des zones construites subira sans doute en premier cette dégradation. Mais également le sud qui était déjà dégradée. La réserve de Kazimzumbwi quant à elle perdra sa surface forestière due à la proximité des villages au Nord-est et au chemin de fer qui passe par cette zone de la réserve.

La période 2014-2050 sera le prolongement des observations passées, c'est-à-dire une dégradation des surfaces forestières. Il est donc plus que nécessaire que les autorités mènent des actions concrètes, s’ils ne veulent pas assister à la disparition des deux réserves forestières au delà de 2050. La Figure 79 permet d’observer l’évolution des surfaces des classes d’occupation du sol depuis 1995 jusqu’en 2050. On note une croissance continue des surfaces artificialisées depuis 1995 et inversement une diminution continue des paysages forestiers.

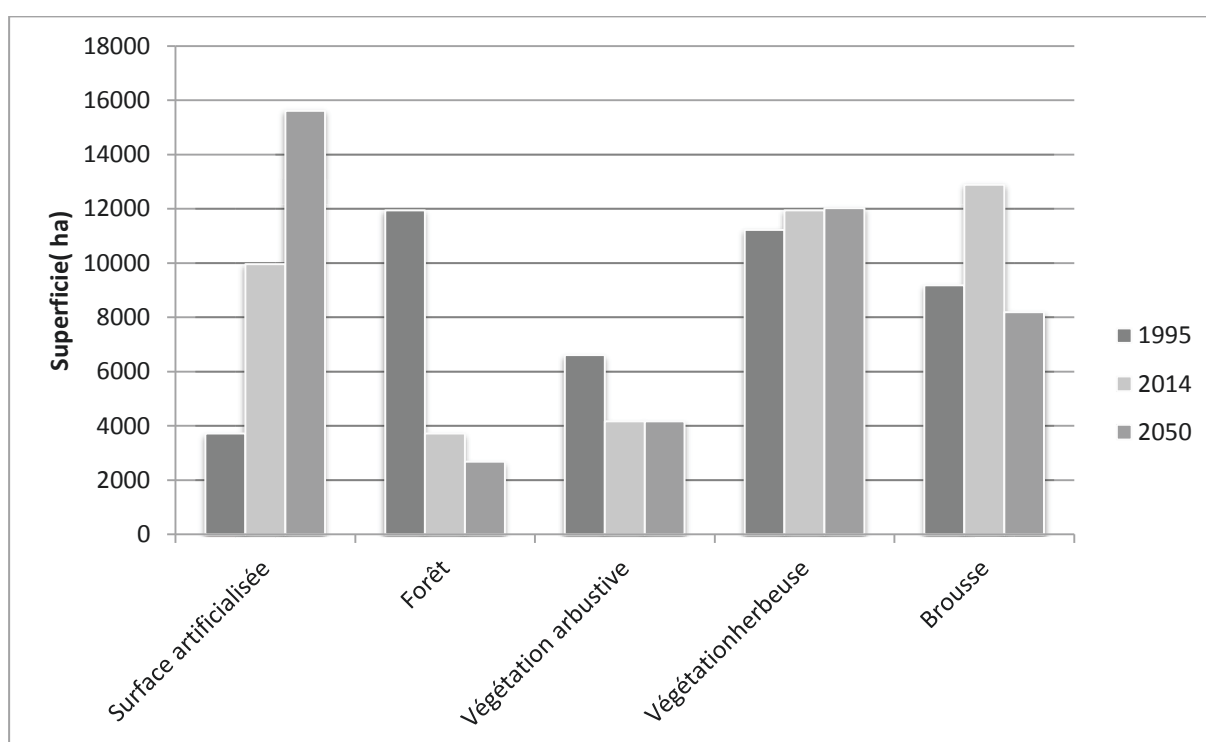


Figure 79: Evolution d’occupation du sol entre 1995 et 2014 et projection en 2050 (Source : Boussougou, 2017)

L’évolution des forêts se distingue des autres, avec une forte baisse de 1995 à 2014, puis une baisse moyenne entre 2014 et 2050. La même observation est faite pour la végétation arbustive. A l’opposé, la courbe des surfaces artificialisées présente une croissance exponentielle sur toute la période de 1995 à 2050. Les brousses et les herbes quant à elles présentent une phase de croissance entre 1995 et 2014, puis verront leurs surfaces baisser entre 2014 et 2050 au profit des surfaces artificialisées.

Ce scénario permet de comprendre les changements à long terme dans la zone d'étude, plus particulièrement dans les réserves forestières. Les grands changements se feront à la périphérie des réserves où presque toute la végétation sera complètement remplacée par des surfaces artificialisées (urbanisation) suite à l'expansion future de la ville de Dar Es Salaam. Aussi, si la mise en place des barrières physiques autour des réserves n'est pas effective d'ici 2050, les réserves forestières subiront des fortes pressions humaines qui entraîneront la perte totale de leurs biodiversité. Ses réserves pourront devenir des parcs urbains.

4.3 - Conclusion du chapitre 4

L'utilisation du modèle Land Change Modeler (LCM) pour réaliser une modélisation prospective de l'occupation du sol des réserves forestières en 2050 a nécessité l'intégration des variables explicatives des changements observés et des cartes d'occupation du sol de 1995 et 2014. Le modèle est validé à partir d'une matrice d'erreur et du coefficient kappa entre la carte d'occupation du sol prédite de 2016 et celle observée en cette même date. Le résultat montre une simulation exacte à 72 %, les coefficients kappas sont de bonne qualité ($> 70\%$). Malgré ce bon résultat, la validation doit être relativisée, car des certitudes existent sur les changements simulés par le modèle dans toutes les classes d'occupation du sol.

Partant de notre hypothèse de départ d'une intensification des pressions humaines anthropiques au cours du temps, nous avons prédit la carte d'occupation de 2050 sous l'effet des variables explicatives de la période 1995-2014. Le résultat de la modélisation permet de voir l'un de scénarios d'évolution possible de l'occupation du sol des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi.

Ainsi, de 2014 à 2050 sera observée une densification et expansion des surfaces artificialisées dans la zone d'étude. L'expansion desdites surfaces se fera principalement au sud de la réserve forestière de Kazimzumbwi (y compris à l'intérieur de la réserve) et à la périphérie nord de la réserve forestière de Pugu. A l'inverse, on assistera à une perte de surface forestière qui passera de 9 à 6 % pendant cette période. Ce phénomène s'observera majoritairement dans la réserve forestière de Pugu (à l'est et au sud).

L'expansion des surfaces artificialisées se fera au profit des surfaces de la végétation herbeuse (savane, cultures...). Car en effet, cette expansion sera liée à la croissance démographique qui entraîne une demande importante des terres agricoles. La perte de la surface de forêt se fera également au profit des surfaces herbeuses et des brousses. Cette observation pourra trouver son explication dans la consommation du charbon de bois qui ne cesse d'augmenter dans la zone d'étude et notamment dans la ville de Dar Es Salaam.

Le scénario d'évolution de l'occupation du sol des réserves à l'horizon 2050 présente une forte dégradation des paysages forestiers. Cette dégradation forestière affectera, sans aucun doute la faune et la flore desdites réserves, dont certaines espèces déjà menacées. Il est donc primordial, que les autorités locales entreprennent des actions concrètes pour la préservation et la restauration de ces deux réserves. Par exemple la mise en place d'une zone tampon pour mieux séparer les deux réserves des zones non protégées. Il serait également intéressant de privilégier les zones les plus sensibles aux pressions humaines (Est des deux réserves forestières) dans les actions de protection et restauration des réserves avec une attention particulière pour la réserve de Kazimzumbwi, car étant la plus impactée des deux. Une surveillance plus accrue par les gardes forestiers de la réserve forestière de Pugu permettra de conserver la biodiversité existante.

Conclusion générale et perspectives

La finalité de ce travail a été de montrer la vulnérabilité des paysages forestiers en relation avec la variabilité climatique à l'échelle de la Tanzanie d'une part et de réaliser une analyse prospective des dynamiques de l'occupation du sol des réserves forestières de Pugu et de Kazimzumbwi d'autre part. Dans l'optique de mener une analyse multi-échelle, c'est-à-dire du national (échelle du pays) au local (échelle des réserves forestières), les principaux outils méthodologiques utilisés ont été la télédétection spatiale, la géostatistique et les SIG. Les données utilisées sont également en rapport avec cette analyse multi-échelle. Ainsi, à l'échelle nationale, ont été utilisées des images basses résolutions spatiales MODIS (NDVI) et TRMM (pluie) pour comprendre l'évolution de la végétation en lien avec la variabilité des précipitations sur la période 2001-2013. A l'échelle locale, l'exploitation des images LANDSAT et SPOT 6 a permis de suivre la dynamique d'occupation du sol passée et future des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi en relation avec les pressions anthropiques entre 1995 et 2050.

Synthèse des analyses menées

La première partie de cette thèse avait pour objectif d'étudier les relations entre la pluie et le couvert végétal à l'échelle de la Tanzanie entre 2001 et 2013. L'utilisation des données d'estimation de pluie par satellite (TRMM) pour comprendre la variabilité des pluies à l'échelle du pays est justifiée par la faiblesse du réseau climatique stationnel pour le suivi des évolutions du climat en Tanzanie. Ainsi, les données TRMM mensuelles ont permis d'observer les variations saisonnières de précipitation et des situations régionales à l'échelle de la Tanzanie. On note également l'identification de onze régimes pluviométriques à partir du traitement des données TRMM. Ces régimes pluviométriques sont en accord avec les travaux d'Ouma et Oludhe (Tumaini, 2009) utilisant les données d'archives de l'Agence météorologique de Tanzanie sur la période 1961-2008. Par la suite, l'indice de végétation normalisée NDVI issu du capteur MODIS a permis de montrer l'existence d'une typologie de la variabilité annuelle et interannuelle de la phénologie végétale qui est tributaire du type de végétation. Par exemple, les savanes montrent une variation saisonnière plus marquée de leur activité végétale contrairement aux forêts dont la variabilité est difficilement perceptible du fait des faibles réactions à la saison sèche grâce à une plus grande disponibilité des réserves en eau dans le sol. Dans un dernier temps, la relation entre la pluie et le NDVI a été mise en évidence par le calcul du coefficient de corrélation. Ce qui a permis de quantifier l'intensité de cette relation entre les précipitations et l'activité végétale. Ainsi, la végétation de type herbeuse (savane herbeuse, savane arborée...) localisée dans la partie centrale et à l'est de la Tanzanie, présente une plus forte sensibilité à la pluie. La réponse de ce type de végétation face aux pluies est presque instantanée au démarrage de la saison de pluie dans le même mois (réaction précoce). A l'opposé, la végétation de type forêt (forêt dense, mosaïque de forêt...) localisée dans le sud, sud-est et l'ouest montre une faible sensibilité à la pluie avec un temps de réaction supérieur à deux mois (réaction tardive).

La deuxième partie de cette étude a permis de mieux cerner la dynamique de la couverture végétale en Tanzanie. Pour cela, nous sommes descendus à une échelle locale, c'est-à-dire aux échelles des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi situées au sud-est de Tanzanie. L'utilisation des images satellitaires à haute résolution spatiale SPOT 6 et LANDSAT nous a permis d'apporter des réponses à l'objectif 2 qui portait sur le suivi des modifications de la végétation liées aux activités humaines à une échelle locale de 1995-2015. Le traitement des

images satellitaires par la méthode de classification orientée objet, a permis d'une part de mettre à jour l'état actuelle des réserves forestières et leurs périphéries à partir de l'image SPOT 6 de 2015 et d'autre part de suivre leurs dynamique passée entre 1995 et 2014 à partir des images d'archives LANDSAT. L'analyse de l'état actuel de la couverture des réserves permet de dire que la réserve de Pugu conserve près de la moitié de sa surface en forêt. A l'inverse la réserve de Kazimzumbwi ne contient plus que 5 % de forêt de sa superficie. Ce constat suggère que les pressions autour des réserves n'ont cessé de croître au fil des années. Ainsi, la modélisation des pressions à partir de l'analyse multicritère (AMC) à la périphérie desdites réserves ont permis de localiser les zones à fortes pressions humaines. Les zones les plus vulnérables restent celles situées à proximité des axes de communication et des villes. Ainsi, les réserves forestières sont très sensibles dans leurs parties est, proches des routes principales et des grands centres urbains comme Pugu et Kisarawé.

L'analyse des dynamiques d'occupation du sol à partir des images d'archives LANDSAT, montre que sur la période 1995-2014, la sous-période 2009-2014 a été plus critique sur les réserves que la sous- période 1995-2009 en termes de perte de surfaces forestières. En effet, en l'espace de 5 ans les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi ont presque perdu le double de leurs surfaces de forêt en comparaison à la première sous-période 1995-2009 (14 ans). Cette perte forestière est perceptible sur le terrain par une croissance des surfaces artificialisées, qui témoigne de la forte croissance démographique villageoise à la périphérie des réserves forestières.

Enfin, la troisième et dernière partie de cette thèse, basée sur une analyse à l'échelle des réserves forestières, avait pour objectif de montrer une vision future de l'état d'occupation des sols dans les réserves forestières et leurs périphéries à l'horizon 2050. Ainsi, une des méthodes de modélisation prospective a été mise en œuvre à partir du modèle Land Change Modeler (LCM) d'Idrisi. Partant sur l'hypothèse d'une intensification des pressions anthropiques sur le site d'étude au cours du temps, nous avons prédit la carte d'occupation des sols de 2050 sous l'effet des variables explicatives comme la proximité des routes par rapport aux réserves, la proximité des villages ou encore les pentes et altitudes. Le résultat prédictif permet d'observer que la période 2014-2050 sera sans doute marquée par une densification et expansion des zones artérielles à la périphérie des réserves forestières, qui se fera au profit des surfaces de la végétation herbeuse. On observera également une perte des surfaces forestières au profit des surfaces herbeuses et des brousses à l'intérieur des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi. Cette dégradation des paysages forestiers affectera, sans aucun doute la biodiversité des réserves forestières qui au-delà de 2050 risque de disparaître dans cette zone géographique côtière de Tanzanie riche en faune et flore.

Perspectives de recherche

Cette thèse laisse en suspend certaines questions fondamentales de la dynamique des paysages forestiers sous l'effet conjugué des variations climatiques et des pressions humaines en Tanzanie. Il s'agit en premier lieu de la perception globale de l'évolution de l'activité végétale face aux variations climatiques à l'échelle de la Tanzanie. Cet aspect de l'étude est d'autant plus important qu'il permet de mieux cerner les causes de la dégradation forestière induit par les facteurs naturels. D'autre facteurs tels que la température, l'humidité ou encore des facteurs topographiques et pédologiques doivent s'ajouter aux variations des précipitations afin de déterminer les paramètres naturels les plus déterminants dans ce processus, et aussi de mieux orienter les politiques et stratégies d'atténuation des effets induits du climat. Dans ce cas, il est donc pertinent d'approfondir l'analyse des dynamiques forestières par l'usage des données basse résolution telle que NOAA-AVHRR qui remontent

au début des années 1980. Ce recul temporel permettra de mieux déterminer les variations à moyen et long terme de la végétation en Tanzanie. Aussi, en ce qui concerne les précipitations estimées par satellite (TRMM), il serait judicieux de compléter la série temporelle TRMM commencée en 2001 par le nouveau capteur GPM (Global Precipitation Measurement). Car en effet, GPM a été lancé en février 2014, pour poursuivre la mission de TRMM qui a cessé de produire des données en 2015.

Une deuxième question importante de l'étude est la modélisation des interactions climat/végétation/pressions humaines à l'échelle des réserves forestières. La collecte des données climatiques au sol (stations pluviométriques), des données socio-économiques sur les rendements agricoles, la production du charbon de bois et des données démographiques, ainsi que des données issues des interviews des populations locales à la périphérie des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi sont des données qui peuvent améliorer le suivi et la gestion des réserves forestières à court et long terme.

Toutefois, la mise en œuvre de ces questions de recherche demande, au niveau pratique, de résider en Tanzanie ou d'y être intégré dans le cadre d'un projet de recherche. Ce qui ne me permet pas de poursuivre cette recherche. Cependant, mon séjour en Tanzanie durant cette thèse m'a permis d'observer que, bien que se situant dans des zones géographiques différentes avec des réalités climatiques apparemment éloignées, la Tanzanie et le Gabon présentent de grandes similarités quant à la surveillance et protection de leurs aires protégées. Le Gabon avec un peu moins de 90 % de son territoire recouvert par la forêt du Bassin du Congo et un ensemble des parcs nationaux (13 parcs), nécessite des outils adaptés pour la surveillance de son environnement. C'est dans ce contexte que le gouvernement Gabonais en partenariat avec la France a mis en place fin 2012, l'Agence Gabonaise d'Etudes et d'Observations Spatiales : Terre, Climat, Homme (AGEOS) qui permet le suivi et l'évaluation des forêts du Bassin du Congo (qui est la 2ème plus grande forêt tropicale du monde) en général et les forêts Gabonaises en particulier. Ainsi, toutes les activités susceptibles d'entraîner une dégradation forestière, à savoir les activités d'exploitation forestière, minière, agricole et d'hydrocarbures, font désormais l'objet d'une surveillance satellitaire opérée par l'AGEOS grâce à l'antenne de réception directe installée au Centre de compétences en télédétection de Nkok². Mes perceptions de recherches visent à transposer la méthodologie pluridisciplinaire adoptée dans cette thèse sur le territoire Gabonais en prenant en compte les spécificités nationales et régionales, afin de contribuer à moyen et long terme aux études de protection et surveillance de la forêt du bassin du Congo (deuxième poumon mondial) dans un contexte de changement climatique global.

² Zone économique Spéciale (ZES) de NKOK - Site : www.ageosinfos@ageos.ga

Bibliographie

- Agrawala, S.A., Moehder, A., Hemp, M., Van Aalst, S.J., Hitz, H.M.S., Meena, T., Hyera, T. and Mwaipopo, O. 2003. Development and Climate Change in Tanzania: Focus on Mount Kilimanjaro. OECD, Paris.
- Aguejdad R., Houet T., 2008, "Modeling of urban sprawl using the Land Change Modeler on a French metropolitan area (Rennes): foresee the unpredictable", International Symposium, Spatial landscape Modelling: from dynamic approaches to functional evaluations, Toulouse, 3-5 June 2008, France.
- Aguejdad, R. and Houet, T., Modeling of urban sprawl using the land change modeller on a French Metropolitan area (Rennes): For see the unpredictable. ed. Symposium "Spatial landscape modelling: from dynamic approaches to functional evaluations", 2008 Toulouse, 2.
- Ahmed, B. and Ahmed, R. 2012. Modeling Urban Land Cover Growth Dynamics Using Multi-Temporal Satellite Images: A Case Study of Dhaka, Bangladesh. ISPRS International Journal of Geo-Information, 1(1), 3-31.
- Akida, A. and Blomley, T. 2006. Trends in Forest Ownership, Forest Resources Tenure and Institutional Arrangements: Are They Contributing to Better Forest Management and Poverty Reduction? Case Study from Tanzania. Unpublished Report. FAO, Rome, Italy
- Alonzo W., 1964: Location and land use: toward a general theory of land rent. Cambridge M.A., Havard University Press.
- Anderson, J. R., Hardy, E. E., Roach, J. T., & Witmer, R. E. 1976, A Land Use And Land Cover Classification System For Use With Remote Sensor Data, Geological Survey Professional Paper 964.
- Anyah, R.O. and Semazzi, H.H.M. 2007. Variability of East African rainfall based on multiyear RegCM3 simulations. IntJ Climatol, 27, 357–371.
- Araya, Y. H. and Cabral, P. 2010. Analysis and Modeling of Urban Land Cover Change in Setúbal and Sesimbra, Portugal. Remote Sensing, 2(6), 1549-1563.
- Arvor, D., Dubreuil, V., Ronchail, J., & Meirelles, M. (2008). Apport des données TRMM 3B42 à l'étude des précipitations au Mato Grosso. Climatologie, 5, 49-70.
- Arvor, Damien, Dubreuil, Vincent, Ronchail, Josyane, Meirelles, Margareth Simões Penello et Others, 2008. Apport des données TRMM 3B42 à l'étude des précipitations au Mato Grosso. In : Climatologie. 2008. Vol. 5, p. 49–70.
- Bakari, Mussa Said, 2015. Climate change impacts and adaptation strategies of small scale Agriculture production in Micheweni District Pemba, Tanzania [en ligne]. S.l. : Sokoine University of Agriculture. [Consulté le 2 août 2017]. Disponible à l'adresse : <http://www.suaire.suanet.ac.tz:8080/xmlui/handle/123456789/952>.

- Balster H., 1998, « Cellular automata models for vegetation dynamics », *Ecological Modelling*, vol. 107, 113-125.
- Balster H., 2000, « Markov chain models for vegetation dynamics », *Ecological Modelling*, vol. 126, 139-154.
- Baret F. Et Guyot G., 1991. Potentials and limits of végétation index for LAI and APAR assessment. *Remote Sens. Environ.*, 35, 161 - 173.
- Basharin, G. P., Langville, A. N. and Naumov, V. A. 2004. The life and work of A.A. Markov. *Linear Algebra and its Applications*, 386(0), 3-26.
- BD.2000. Forestry for poverty reduction and economic growth: national forest programme formulation in Tanzania. Ministère des ressources naturelles et du tourisme, Division de la foresterie et de l'apiculture, Tanzanie (projet).
- Bégué A., Vintrou E., Ruelland D., Claden M. et Dessay N., 2011 : Can a 25-year trend in Soudano-Sahelian vegetation dynamics be interpreted in terms of land use change? A remote sensing approach. *Global environmental change*, 21 (2), 413-420.
- Benenson, I. and Torrens, P. M., 2004. *Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena*. First ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Benz, U. C., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I., Heynen, M., 2004, Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 58:239-258.
- Berk, A., Bernstein, L.S., Anderson, G.P., Acharya, P.K., Robertson, D.C., Chetwynd, J.H., and Adler-Golden, S.M., 1998: MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS, *Remote Sens. Environ.*, 367-375p.
- Black, E. 2005. The relationship between Indian Ocean sea-surface temperature and East African rainfall. *Philos Trans R Soc*, 363, 43–47. doi: 10.1098/rsta.2004.1474.
- Black, E., Slingo, J., and Sperber, K.R. 2003. An observational study of the relationship between excessively strong short rains in coastal east Africa and Indian ocean SST. *Mon Weather Rev*, 131, 74–94.
- Bonn F et Rochon, 1993: *Précis de télédétection: Principes et méthodes*. Volume I, Ed. Presse de l'Université du Québec/AUPELF, 485p.
- Bonn, F., Rochon, G., 1992, *Précis Teledetection*, Volume 1 : Principes et méthodes .Presses de l'Université du Québec/AUPELF.
- Bonnefoy J-L., Bousquet F., Rouchier J., 2001, « Modélisation d'une interaction individus, espace et société par les systèmes multi-agents : pâture en forêt virtuelle », *L'Espace Géographique*, vol. 1, 13-25.
- Brenan, J. P. M. 1978. Some aspects of the phytogeography of tropical Africa.
- Brou, Y. T., B. Moppert, and F. Brial. 2013. Rainfall variability, wildfires and biodiversity conservation in La Réunion National Park : what prospects for climate resilient tourism

- development ? In International Conference on Green India: strategic knowledge for combating climate change: prospects and challenges, Pondicherry University. 15p.
- Burgess, N. D., Mwasumbi, L. B., Hawthorne, W. D., Dickinson, A. & Doggett, R. A. 1992. Preliminary assessment of the distribution, status and biological importance of coastal forests in Tanzania. *Biol. Conserv.* 62: 205-218.
- Burgess, N.D., N. Cordeiro, N. Doggart, J. Fjelds, K.M. Howell, F. Kilahama, S.P. Loader, J.C. Lovett, M. Mengon, D. Moyer, E. Nashanda, A. Perkin, W.T. Stanley, And S. Stuart. 2007. The biological importance of the Eastern Arc Mountains of Tanzania and Kenya. *Biological Conservation*, 134:209–231.
- Caloz R. et Collet C., 2001 : Précis de télédétection : Traitements numériques d'images de télédétection. Presses de l'Université du Québec, Volume 3, 386 pages
- Camacho Olmedo M.T., Paegelow M., Martinez P.J., 2007, « Modélisation géomatique rétrospective des paysages par évaluations multicritères et multiobjectifs », *Cybergeo : European Journal of Geography*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, <http://cybergeo.revues.org/4811>, No.365, 9 mars 2007, 24 p.
- Camberlin P, Moron V, Okoola R et al (2009) Components of rainy seasons' variability in Equatorial East Africa: onset, cessation, rainfall frequency and intensity. *Theor Appl Climatol* 98:237–249. doi:10.1007/s00704-009-0113-1.
- Camberlin, P., Martiny, N., Philippon, N. Et Richard, Y., 2007. Determinants of the interannual relationships between remote sensed photosynthetic activity and rainfall in tropical Africa. In : *Remote Sensing of Environment*. 30 janvier 2007. Vol. 106, n° 2, p. 199-216. DOI 10.1016/j.rse.2006.08.009.
- Camberlin, Pierre, Moron, Vincent, Okoola, Raphael, Philippon, Nathalie Et Gitau, Wilson, 2009. Components of rainy seasons' variability in Equatorial East Africa: onset, cessation, rainfall frequency and intensity. In : *Theoretical and Applied Climatology*. octobre 2009. Vol. 98, n° 3-4, p. 237-249. DOI 10.1007/s00704-009-0113-1.
- Carrão H., P. Gonçalves, and M. Caetano 2008. Contribution of multispectral and multitemporal information from MODIS images to land cover classification, *Remote Sensing of Environment*, 112 (3), 986-997.
- Carrere, Ricardo, 2002. Afrique Ses forêts menacées Mouvement Mondial pour les Forêts Tropicales [en ligne]. Hersilia Fonseca. Maldonado 1858, Montevideo, Uruguay : s.n. [Consulté le 2 août 2017]. ISBN 9974 - 7608 - 7 - 9. Disponible à l'adresse : http://wrm.org.uy/fr/files/2002/08/Afrique_Ses_forêts_menacees.pdf.
- Carver S.J., 1991: Integrating Multi-Criteria Evaluation with Geographic Information Systems. *International Journal of Geographic Information Systems*, 5 (3); p. 321-339.
- Chamshama, S. A. O., 2011. Plantations Forestières et Ilots Boisés dans les Pays de l'Afrique. In : [en ligne]. 2011. [Consulté le 31 juillet 2017]. Disponible à l'adresse : <http://afforum.org/sites/default/files/French/French.pdf>.

- Chander G., Markham B. L. et Helder D. L., 2009 :Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of Environment*, 113, 893-903.
- Chaouche K., Neppel L., Dieulin C., Pujol N., Ladouche B., Martin E., Salas D., et Caballero Y. (2010) Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change *C.R. Geosciences* 342,234 –243.
- Cheng, H. D., Jiang, X. H., Wang, J., 2001, Color image segmentation:advances and prospects, *Pattern Recognition* 34:2259-2281.
- Congalton, R.G., and K. Green, 1999. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*, CRC Press,Boca Raton, Florida, 137 p.
- Coquillard P., Hill D.R.C., 1997, *Modélisation et simulation d'écosystèmes. Des modèles déterministes aux simulations à évènements discrets*, Paris, Edition Masson.
- Daoud, B.H. 1997. *Intégration de l'analyse multicritère dans les systèmes d'information géographique : développement d'un prototype MapInfo-Electre*. Thèse de magister, Centre national des techniques spatiales, Arzew (Algérie), 93 p.
- Daudé E., 2005, « Systèmes multi-agents pour la simulation en géographie : vers une Géographie Artificielle », in : Germond Y. (dir.), *Modélisations en géographie. Déterminismes et complexités*, Paris, Lavoisier, 353-380.
- Debien, Annekatrien, Neerinckx, Simon, Kimaro, Didas Et Gulinck, Hubert, 2010. Influence of satellite-derived rainfall patterns on plague occurrence in northeast Tanzania. In : *International journal of health geographics*. 2010. Vol. 9, n° 60, p. 1–10.
- Dey, V., Zhang, Y., Zhong, M., 2010, A review on image segmentation techniques with remote sensing perspective, *ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS* (Wagner W., Székely, B., eds.), Vienne, pp. 31-42.
- Diamont J.T., Wright J.R., 1989: Efficient Land Allocation. *Journal of Urban Planning and Development*, 115 (2); p. 81-96.
- Dietzel, C. and Clarke, K. 2006. The effect of disaggregating land use categories in cellular automata during model calibration and forecasting. *Computers, Environment and Urban Systems*, 30(1), 78-101.
- Diwakar P. G., Raghavaswamy V., Saha S. K., Kiran Kumar A. S., Dadhwal V.K. et Shivakumar S. K., 2013 :Indian Remote Sensing Satellite Series and Applications: A Saga of 25 years. *Bulletin of the national natural resources management system, NNRMS (B)* - 37, 164 pages.
- Djoufack, Viviane, 2011. *Etude multi-échelles des précipitations et du couvert végétal au Cameroun: Analyses spatiales, tendances temporelles, facteurs climatiques et anthropiques de variabilité du NDVI [en ligne]. S.l. : Université de Bourgogne. [Consulté le 3 août 2017]. Disponible à l'adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00690359/>.*

- Djoufack-Manetsa, V. 2011. Etude multi-échelles des précipitations et du couvert végétal au Cameroun : Analyses spatiales, tendances temporelles, facteurs climatiques et anthropiques de variabilité du NDVI, Thèse de l'Université de Yaoundé I et de l'Université de Bourgogne. 321p.
- Do, T.P.T. (2014). Apport de la télédétection spatiale pour l'étude multiséculaire des interactions climat - surface en Afrique de l'Ouest : Etude du bassin versant de l'Ouémé supérieur (Bénin). Thèse en Science de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement, Université Grenoble.
- Dodane C., Joliveau T., Rivière-Honegger A., 2014, "Simuler les évolutions de l'utilisation du sol pour anticiper le futur d'un territoire", *Cybergeo : European Journal of Geography*, No. 689. DOI : 10.4000/cybergeo.26483.
doi: 10.1016/j.esd.2012.11.005.
- Dorsouma Al Hamndou et Mélanie Requier-Desjardins, « Variabilité climatique, désertification et biodiversité en Afrique : s'adapter, une approche intégrée », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*[En ligne], Volume 8 Numéro 1 | avril 2008, mis en ligne le 07 novembre 2008, consulté le 10 juin 2016.
- Dubreuil V., 2010 :Geographical Information, Remote Sensing, and Climatology. In "Geographical Information and Climatology" Dir.P.Carrega, WILEY-ISTE Ltd ed., London, 73-102.
- DUBREUIL, Vincent, RONCHAIL, Josyane Et ARVOR, Damien, 2007. Potentialités des données TRMM pour la spatialisation des précipitations des précipitations au Mato Grosso, Brésil. In : XXe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie [en ligne]. S.I. : AIC, Université de Tunis. 2007. p. 210–215. [Consulté le 3 août 2017]. Disponible à l'adresse : <https://hal-mnhn.archives-ouvertes.fr/hal-00325278/>.
- Eastman J.R., 2003: Idrisi Kilimanjaro. Guide to GIS and Image Processing. Worcester, Clarklabs; 328 p.
- Eastman J.-R., 2009, IDRISI Taiga, Guide to GIS and Remote Processing, Clark University: Worcester, MA, USA, pp. 234–256.
- Eastman J.R., Jiang H., 1996: Fuzzy Measures in Multi-Criteria Evaluation. In: Second International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in natural Resources and Environmental Studies. Colorado, 21-23 mai; p. 527-534.
- Eastman, J. R., 2012. IDRISI Selva. Version 17.02. Worcester, MA.: Clark Labs, Clark University.
- EIAJ/GHU (Ecole d'ingénieurs de l'arc Jurassien), 2004: Logique floue et processeur « flou ». Site de l'EIAJ.
http://www.eiaj.ch/v2/support_de_cours/electricite/Cours_GEL/ranches_techniques/Electronique_analogique/Cours%20PDF/Fuzzy.PDF
- Eklundh L. et Jönsson P., 2011 :Timesat 3.1 Software Manual, Lund University, Sweden.
- Eklundh L. et Olsson L., 2003 :Vegetation index trends for the African Sahel 1982-1999. *Geophysical Research Letters*, 30, 1430-1433.

- Eriksen, S., 2001, Linkages between climate change and desertification in East Africa (Part 1: Physical and social linkages), *Aridlands Newsletter*, N°49, May-June.
- FAO .2016 .FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome: FAO. Available online at:
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2000) ‘The Elimination of Food Insecurity in the Horn of Africa. A Strategy for Concerted Government and UN Agency Action’. Final report. Rome: FAO.
- FAO, 2010. State of World’s Forests. Rome.
- FAO.2000c. Evaluation des ressources forestières mondiales (Projet). FAO.
- FBD, 2010. Plantation forest management plans for all public plantations.
- Ferber J., 2006, « Concepts et méthodologies multi-agents », in : Amblard F., Phan D. (dir.), *Modélisation et Simulation Multi-Agents. Application pour les Sciences de l’Homme et de la Société*, Londres, Hermès science & Lavoisier, 23-27.
- Foody, G.M., 2002. Status of land cover classification accuracy assessment, *Remote Sensing of Environment*, 80:185–201.
- Fuller, D. O. and Prince, S. D., 1996: Rainfall and foliar dynamics in tropical Southern Africa: potential impact of global climatic change on savanna vegetation. *Climatic Change*, 33, 1, 69-96.
- Fuller, D., Hardiono, M. and Meijaard, E. 2011. Deforestation Projections for Carbon-Rich Peat Swamp Forests of Central Kalimantan, Indonesia. *Environmental Management*, 48(3), 436-447.
- Gadrat P., 2004: La logique floue. Site personnel. [http://fleche.org/pierre/logfloue/Génie Civil et Habitat de l’Académie de Paris](http://fleche.org/pierre/logfloue/Génie_Civil_et_Habitat_de_l'Académie_de_Paris), 2003: Géomatique – présentation. <http://geniecivil.scola.acparis.fr/delarue/Geomatique/geomatique.htm>
- Gibbons J.D, Pratt J.W, 1975: P-values: interpretation and methodology.
- GIEC, 2007: Changements climatiques 2007 : Rapport de synthèse. ©GIEC, ISBN 92-9169-222-0 .
- Girard M.-C. et Girard C. M. - 2010 - Traitement des données de télédétection. Ed. Dunod, 529p.
- Godard V. 2005. Typologie des paysages forestiers du sud du massif de Fontainebleau après la tempête de décembre 1999. Évaluation des dégâts forestiers à l’aide d’un semis de points et d’imagerie satellitale optique. *Revue Internationale de Géomatique*, p 281-302.
- Goupe Chadule,. 2001: Initiation aux pratiques statistiques en géographie. Collection U, série «Géographie», Edition Armand Colin, pp.103 et 109-110.
- Guan, D., et al. 2011. Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model. *Ecological Modelling*, 222(20–22), 3761-3772.

- Guindon, B., 1997, Computer-Based aerial image understanding: A review and assessment of its application to planimetric information extraction from very high resolution satellite images, *Canadian Journal of remote Sensing* 23(1):38-47.
- He, C., et al. 2008. Modelling dynamic urban expansion processes incorporating a potential model with cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 86(1), 79-91.
- Heumann B. W., Seaquist J. W., Eklundh L. et Jönsson P., 2007 :AVHRR Derived Phenological Change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982-2005. *Remote Sensing of Environment*, 108, 385-392.
- Hewitson, B.C., 2006, The development of Regional Climate Change scenarios for Sub-Saharan Africa,AIACC Project N° AF 07, University of Cape Town/START, 92 p.
- Hickler T., Eklundh L., Seaquist J., Smith B., Ardö J., Olsson L., Sykes M. et Sjöström M., 2005 :Precipitation controls Sahel greening trend. *Geophysical Research Letters*, 32, L21415.
- Hirsch, R.M., Slack, J.R. and Smith, R.A. 1982, Techniques for trend assessment for monthly water quality data, *Water Resources Research*, 18,107–121
- Hoopingarner, J., S. E. Nicholson and J. Kim. 1988. Atlas of African rainfall and its interannual variability. Tallahassee, Florida: Dept. of Meteorology, the Florida State University. 237p.
- Houet T., Schaller N., Castets M., Gaucherel C., 2014, "Improving the simulation of fine scale landscape changes coupling top-down and bottom-up land use and cover changes rules", *International Journal of Geographical Science*, vol. 28, No. 9, 1848–1876.
- Howell, K. M. 1981. Pugu Forest Reserve: biological values and development. *Af. L Ecol* 19: 73-81.
[http:// vertigo.revues.org/5356](http://vertigo.revues.org/5356); DOI: 10.4000/vertigo.5356.
<http://faostat.fao.org/default.aspx>
- Huffman G. J., Adler R. F., Arkin P., Chang A., Ferraro R., Gruber A., Janowiak J., McNab A., Rudolph B. Et Schneider U., 1995 : The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Combined Precipitation Dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 5-20.
- Huffman G. J., Adler R. F., Arkin P., Chang A., Ferraro R., Gruber A., Janowiak J., McNab A., Rudolph B. Et Schneider U., 1995 : The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Combined Precipitation Dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 5-20.
- Huffman G. J., Adler R. F., Bolvin D. T., Gu G., Nelkin E. J., Bowman K. P., Hong Y., Stocker E. F. Et Wolff D. B., 2007 : The Trmm Multisatellite Precipitation Analysis (Tmpa): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *Journal of hydrometeorology*, 8, 38-55.
- Institutional Arrangements: Are They Contributing to Better Forest Management and Poverty Reduction. Case Study from Tanzania. Unpublished Report. FAO, Rome, Italy.

- Iona-Toroimac, G, Zaharia, L Et Bigot, S, 2006. « Activité végétale et caractéristiques hydroclimatiques en Dobroudja (Roumanie) » : l'apport des données SPOT-4 Végétation. (PDF Download Available). In : ResearchGate [en ligne]. 2006. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/242423641_Activite_vegetale_et_caracteristiques_hydroclimatiques_en_Dobroudja_Roumanie_l_apport_des_donnees_SPOT-4_Vegetation.
- IPCC, 2014 : Climate Change 2014: Impacts, Adptation and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros V.R., Field C.B., Dokken D.J., Mastrandrea M.D., Mach K.J., Bilir T.E., Chatterjee M., Ebi K.L., Estrada Y.O., Genove R. C., Girma B., Kissel E.S., Levy A.N., MacCracken S., Mastrandea P.R., White L.L. (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 688p.
- Jensen, J.R., 1996. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective, 2nd ed. Prentice Hall, 316 p.
- Jokar Arsanjani, J., et al. 2013. Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 21(0), 265-275.
- Jönsson, P., and L. Eklundh. 2004. TIMESAT-A program for analyzing time-series of satellite sensor data. Computers & Geosciences 30 (8):833-845.
- Kahyarara, G., W. Mbowe and O. Kimweri 2002. Poverty and Deforestation around the Gazetted Forests of the Coastal Belt of Tanzania, Research on Poverty Alleviation, Research Report No: 02.3, REPOA, Dar es Salaam.
- Kalkstein, S., Tan, G. and Skindlov, J. A. 1987. 'An evaluation of three clustering procedures for use in synoptic climatological classification', 1 Clim. Appl. Meteorol., 26, 717-730.
- Kamusoko, C., et al. 2009. Rural sustainability under threat in Zimbabwe – Simulation of future land use/cover changes in the Bindura district based on the Markov-cellular automata model. Applied Geography, 29(3), 435-447.
- Kendall, M. G. 1975. Rank Correlation Methods. Griffin, London, UK.
- Kenny, D. A., Kashy, D. A. et Cook, W. L., 2006. Dyadic data analysis. New York: Guilford Press. 41p.
- Kergomard, C., 2000. Pratique des corrections atmosphériques en télédétection : utilisation du logiciel 5S-PC. Cybergeo, N°. 181.
- Khoi D.-D., Murayama Y., 2010, "Forecasting Areas Vulnerable to Forest Conversion in the Tam Dao National Park Region, Vietnam", *Remote sensing*, vol. 2, 1249–1272. DOI : 10.3390/rs2051249.
- Khoi, D. D., 2011. Spatial modeling of deforestation and land suitability assessment in the Tam Dao National Park region, Vietnam. (Ph. D.). University of Tsukuba.
- Knapp, R. (1973) Die Vegetation von Afrika. In: Walter, H. (ed.) Vegetationsmonographien der einzelnen Grossräume, Band 3. Fischer, Stuttgart.

- Kovar, Karel, 1996. Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management: Proceedings of the Hydrogis'96 Conference Held in Vienna, Austria, from 16 to 19 April 1996. S.I. : International Association of Hydrological Sciences. ISBN 978-0-947571-84-9.
- Kundzewicz, Z. W. & Robson, A. J. 2004. Change detection in hydrological records –a review of the methodology. *Hydrol. Sci. J.* 49(1).7-9
- Kuper, W., H. Sommer, J. C. Lovett, J. Mutke, H. P. Linder, H. J. Beentje, R.A. S. R. Rompaey, C. Chatelain, M. Sosef & W. Barthlott. 2004. Africa's hotspots of biodiversity re-defined. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 91: 525-535.
- Landis, J. R. and Koch, G. G. 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159-174.
- LANLY, J. P., 2003. Les facteurs de déforestation et de dégradation des forêts. In : XII World Forestry Congress. Invited paper. <http://www.fao.org/docrep/article/wfc/xii/ms12a-e.htm>. S.I. : s.n. 2003.
- Laurent H., Jobard I. et Toma A., 1998: Validation of satellite and ground-based estimates of precipitation over the Sahel. *Atmospheric Research*, 47-48, 651-670.
- Le Page Y., Oom D., Silva J. M. N., Jönsson P. et Pereira J. M. C., 2010 :Seasonality of vegetation fires as modified by human action: observing the deviation from eco-climatic fire regimes. *Global Ecology and Biogeography*, 19, 575-588.
- Lebarbier, E. et Mary-Huard T. 2006. Le critère BIC, fondements théoriques et interprétation, *Journal de la Société Française de Statistique*, 1, 39-57.
- Lek S., Guégan J.F., 1999, « Artificial neural networks as a tool in ecological modelling, an introduction », *Ecological Modelling*, vol. 120, 65-73.
- Li, X. and Yeh, A. G.-O. 2002. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(4), 323-343.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., Chipman, J.W., 2008. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons.
- Lopez B. et Leynet A., 2011. Evaluation des tendances d'évolution des concentrations en polluants dans les eaux souterraines: revue des méthodes statistiques existantes et recommandations pour la mise en œuvre de la DCE. Rapport BRGM/RP-59515-FR.
- Lovett, J.C. & Wasser, S.K. 1993. *Biogeography and Ecology of the Rain Forests of Eastern Africa*. Cambridge University Press.
- Luhunga, Philbert, Botai, Joel Et Kahimba, Frederick, 2016. Evaluation of the performance of CORDEX regional climate models in simulating present climate conditions of Tanzania. In : *Journal of Southern Hemisphere Earth System Science*. 2016. Vol. 66, n° 1, p. 32-54. DOI 10.22499/3.6601.005.

- Lusekelo, P. 2008, Population growth at 2.9% worrisome, says government, in Guardian News paper of 23rd June 2008 .
- Maestripietri, Nicolas Et Paegelow, Martin, 2013. Validation spatiale de deux modèles de simulation : l'exemple des plantations industrielles au Chili. In : Cybergeog : European Journal of Geography [en ligne]. 12 septembre 2013. [Consulté le 3 août 2015]. DOI 10.4000/cybergeog.26042. Disponible à l'adresse : <https://cybergeog.revues.org/26042>.
- Mann, H. B. 1945. Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica* 13, 245–259.
- Martinka, K., 1999. European Organisation For The Exploitation Of Meteorological Satellites. In : *Meteorologicky Casopis*. 1999. n° 4, p. 3–4.
- Martiny, N., Camberlin, P., Richard, Y. Et Philippon, N., 2006. Compared regimes of NDVI and rainfall in semi-arid regions of Africa. In : *International Journal of Remote Sensing*. décembre 2006. Vol. 27, n° 23, p. 5201–5223. DOI 10.1080/01431160600567787.
- Mas J.-F., Kolb M., Houet T., Paegelow M., Camacho Olmedo M.-T., 2011, "Éclairer le choix des outils de simulation des changements des modes d'occupation et d'usages des sols. Une approche comparative", *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 21, 405–430.
- Mas J.-F., Kolb M., Paegelow M., Camacho Olmedo M.-T., Houet T., 2014, "Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages", *Environmental Modelling and Software*, vol. 51, 94–111.
- Mas J.F., Puig H., Palacio J.L., Sosa-López A., 2004, « Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks. » *Environmental Modelling & Software*, vol. 19, 461–471.
- Mbwana, S 1994. Forest Protected Areas. Workshop on Protected Areas, Planning for Biodiversity Conservation in Tanzania. UNO/RAF/GEF.Field Document 4.
- McSweeney, C., Lizcano, G, New, M. and Lu, X. 2010. The UNDP Climate Change Country Profiles: Improving the accessibility of observed and projected climate information for studies of climate change in developing countries, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(2): 157-166.
- McSweeney, C., M. New and G. Lizcano. 2012. "UNDP Climate Change Country Profiles: Tanzania."
- Mdemu, M., Kashaigili, J.J., Lupala, J., Levira, P., Liwenga, E., Nduganda, A. and Mwakapuja, F: Dynamics of land use and land cover changes in the Pugu and Kazimzumbwi Forest Reserves, 2012 p 71-72.
- Meneses-Tovar, C. L. 2011. NDVI as indicator of degradation. *Unasylva*, 8p.
- Ministère des ressources naturelles et du tourisme (MNRT) 1998: Politique forestière, Imprimerie du Gouvernement, Dar-es-Salaam (Tanzanie). Roe, D., Mayers, J., Grieg-Gran, M., Kothari, A., Fabricius, C. et Hughes, R., eds. 2000. Evaluating eden: exploring the myths and realities of community-based wildlife management. Londres, International Institute for Environment and Development (IIED)

Missouri Botanical Garden 65: 437-478.

Moriba Touré et T.O Fadayomi, 1993: Migration et urbanisation au Sud du Sahara : Quels impacts sur les politiques et le développement des populations Sous la direction de Page 228-229.

Msuya, Neema, Masanja, Enock Et Temu, Abrahamu Kimangano, 2011. Environmental Burden of Charcoal Production and Use in Dar es Salaam, Tanzania. In : Journal of Environmental Protection. 2011. Vol. 02, n° 10, p. 1364-1369. DOI 10.4236/jep.2011.210158.

Mundia, C.N., Aniya, M., 2006. Dynamics of landuse/cover changes and degradation of Nairobi city, Kenya. Land Degradation and Development 17 (1), 97–108.

Mundia, C.N., Aniya, M., 2006. Dynamics of landuse/cover changes and degradation of Nairobi city, Kenya. Land Degradation and Development 17 (1), 97–108.

Mung'ong'o C.G,H. Kiwasila, A.S kauzeni and F.C sheehambo.1997. Sources of socio economic pressure on Coastal forest: Observations from Vikindu and Kazimzumbwi forest. East African Biodiversity Study. Research Report to GEF.

Munishi, P.K.T., N.I. Kihupi, S.J. Nindi , E. Mpeta , F.F. Tilya, L. Chang'a and P. Yanda, 2008. Profiling the Climate of Tanzania for Climate Change Mitigation and Adaptation.

Mwalyosi, R.B. 1994. Managing Biodiversity in Tanzania. Paper presented in the Workshop on Protected Areas, Planning for Biodiversity Conservation in Tanzania. UNO/RAF/GEF. Field. Document 4.

Mwamfupe, D. 1996. Impact of Human Population Factors on WWF Project: A Case Study of Pugu and Kazimzumbwi Forest Reserves, Coast Region, Tanzania. A consultancy report submitted to WWF Tanzania office – Project No. Tz 0056.

Mwamfupe, D., 1998. Demographic impacts on protected areas in Tanzania and option for action. Parks 8: 8–19.

Mwasumbi, L. B, Burgess, N. D Et Clarke, G. P, 1993. Vegetation of Pande and Kiono Coastal forests, Tanzania. In : [en ligne]. Belgium, 1993. [Consulté le 2 août 2017]. Disponible à l'adresse : <https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/TZA/2760%20TANZANIA%20Coastal%20Revised%20pro%20DOC%20%2017%20Dec%202013%20GA-.pdf>.

N. Myers, R.A. Mittermeier, C.G. Mittermeier, G.A. da Fonseca, J. Kent .Biodiversity hotspots for conservation priorities Nature, 403 (2000), pp. 853-858

NASA, 2002 :Landsat-7 Science Data User's Handbook. NASA/Goddard Space Flight, Center, Greenbelt, MD, Chap. 11.

Niang, I., O.C. Ruppel, M.A. Abdrabo, A. Essel, C. Lennard, J. Padgham, and P. Urquhart, 2014: Africa. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. 172

- Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1199-1265.
- Nicholson, S. E., Davenport, M. L. and Malo, A. R., 1990: A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using NDVI from NOAA-AVHRR. *Climatic Change*, 17, 207-24.
- Niewolt, S. 1973: Rainfall and evaporation in Tanzania. Research Paper no.24, Bureau of Resources Assessment and Land Use Planning, University of Dar Es Salaam, Tanzania
- Niewolt, S. 1977: Map of mean annual rainfall in Tanzania. Bureau of Resources Assessment and Land Use Planning, University of Dar Es Salaam, Tanzania.
- Ogallo, L.J. 1989 'The Spatial and Temporal Patterns of the Eastern Africa Seasonal Rainfall Derived from Principal Component Analysis'. *International Journal of Climatology* 9: 145-167.
- Olsson L., Eklundh L. and Ardö J., 2005 :A recent greening of the Sahel -trends, patterns and potential causes. *Journal of Arid Environments*, 63, 556-566.
- Paegelow M., Camacho Olmedo M.T., 2005, « Possibilities and limits of prospective GIS land cover modelling—a compared case study: Garrotxes (France) and Alta Alpujarra Granadina (Spain) », *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 19, No.6, 697-722.
- Paegelow M., Villa N., Cornez L., Ferraty F., Ferré L., Sarda P., 2004, « Modélisations prospectives de l'occupation du sol. Le cas d'une montagne méditerranéenne », *Cybergeog : European Journal of Geography , Systèmes, Modélisation, Géostatistiques*, <http://cybergeog.revues.org/2811>, No.295, 6décembre 2004, 18 p.
- Paegelow, Martin, 2004. *Géomatique et géographie de l'environnement. De l'analyse spatiale à la modélisation prospective [en ligne]*. S.l. : Université Toulouse le Mirail-Toulouse II. [Consulté le 4 août 2017]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01063119/>.
- Parker D.C., Manson S.M., Janssen M.A., Hoffman M.J., Deadman P., 2003, « Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review », *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 93, No.2, 314-337.
- Pérez-Vega, A., Mas, J.-F. and Ligmann-Zielinska, A. 2012. Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. *Environmental Modelling & Software*, 29(1), 11-23.
- Perry G.L.W., Millington J.D.A., 2008, « Spatial modelling of succession-disturbance dynamics in forest ecosystems: Concepts and examples », *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, vol. 9, 191-210.
- Pettorelli N., Vik J. O., Mysterud A., Gaillard J-M., Tucker C. J. et Stenseth N. C., 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change: *Trends in Ecology & Evolution*, v. 20, iss. 9, 503–510 p.

- Philippon N., Jarlan L et Mougin E., 2006: Characterization of the interannual and intraseasonal variability of West African vegetation between 1982 and 2002 by means of NOAA AVHRR NDVI data. *Journal of Climate*, 20, 1202-1218.
- Philippon, Nathalie Et Martiny, Nadège, 2011. Etude de l'impact des grands modes de variabilité climatique en Afrique sur les trente dernières années à travers les données de télédétection de l'activité photosynthétique de la végétation [en ligne]. DIJON. UMR 5210 CNRS – Centre de Recherche de Climatologie – Université de Bourgogne. [Consulté le 20 avril 2016]. Disponible à l'adresse : http://climatologie.u-bourgogne.fr/documents/theses_master/2011/rapportAurelie.pdf
- PLDP Proposal for livestock development programme for Tanzania 1984.
- Polhill, R. M. 1968. Tanzania. *Acta Phytogeogr. Suet.*, 54, 16678.
- Polhill, R. M. (ed.) 1952-to present. *Flora of Tropical East Africa*. Prepared by the Royal Botanic Gardens, Kew, with assistance from the East African Herbarium, Nairobi. Published on behalf of East African Governments by A.A. Balkema, Rotterdam.
- Polhill, R. M. 1989. East Africa (Kenya, Tanzania, Uganda). In: *Floristic Inventory of Tropical Countries*. Cambell, D.G. and Hammond, D. (eds.). New York Botanic Garden.
- Pontius Jr R.G., Malanson J., 2005, « Comparison of the structure and accuracy of two land change models », *International Journal of Geographical Information Science* , vol. 19, No.2, 243-265.
- Pontius, G. 2000. Quantification Error Versus Location Error in Comparison of Categorical Maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(8), 1011-1016.
- Pontius, R. G. and Millones, M. 2011. Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 32(15), 4407-4429.
- Presses de l'Université du Québec, Québec, pp. 485.
- Pringle, M. J. 2013, Robust prediction of time-integrated NDVI, *International Journal of Remote Sensing*, 34(13), 4791-4811
- Rahman, H.; Dedieu, G. SMAC, 1994: A simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum. *International Journal of Remote Sensing* 15, 123-143p.
- Richard, Y. and Pocard, I., 1998: A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa. *Int. J. Remote Sensing*, 19, 15, 2907-2920.
- Richter, R., 1997: Correction of atmospheric and topographic effects for high spatial resolution satellite imagery. *Int. J. Rem. Sens.*, 1099-1111.
- Robin, M. 1998. « Géographie, Nathan ».

- Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A. et Deering D. W., 1973 :Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 309-317.
- Roy, Hari Gobinda, 2016. Évolution de l'évolution de l'occupation du sol (1950-2025) et impacts sur l'érosion du sol dans un bassin versant méditerranéen [en ligne]. S.l. : Côte d'Azur. [Consulté le 4 août 2017]. Disponible à l'adresse : <http://www.theses.fr/2016AZUR2024>.
- Ruelland D., Dezetter A., Puech C. et Ardoin-Bardin S., 2008:Long-term monitoring of land cover changes based on Landsat imagery to improve hydrological modelling in West Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 12, 3533-3551.
- Saaty T.L., 1977: A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *J. Math. Psychology*, 15; p. 234-281.
- Saaty, T.L. 1990 How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, vol. 48, p. 9-26.
- San Emeterio, José Luis San, Lacaze, Bernard Et Mering, Catherine, 2009. Détection des changements de la couverture végétale au Sahel à partir des données NDVI et précipitation.pdf. 2009. S.l. : s.n.
- Sander, K., Gros, C., and Peter, C. 2013. Enabling reforms: analyzing the political economy of the charcoal sector in Tanzania.*Energy Sustain. Dev.*17, 116–126. doi: 10.1016/j.esd.2012.11.005
- Saporta G., 2006 : Probabilités, analyse des données et statistiques, Éd. Technip, 2ndédition, 582 p.
- Schabel, H. G. 2006. Introduction to Tanzania. *Forest Entomology in East Africa: Forest Insects of Tanzania*, 1-22.
- Schabel, Hans G., 2006. *Forest Entomology in East Africa: Forest Insects of Tanzania*. S.l. : Springer Science & Business Media. ISBN 978-1-4020-4655-1.
- Schechambo, F.C., Sosovele, H. and Kisanga, D. 1999 'Rethinking Natural Resource Degradation in Semi-Arid Sub-Saharan Africa: The Case of Semi-Arid Tanzania'. Report for ODI.
- Seaquist J. W., Olsson L., Ardö J. et Eklundh L., 2006 :Broad-scale increase in NPP Quantified for the African Sahel, 1982-1999. *International Journal of Remote Sensing*, 27,5115-5122.
- Simpson J., Kummerow C., Tao W.-K. Et Adler R. F., 1996: On The Tropical Rainfall Measuring Mission (Trmm). *Meteorology And Atmospheric Physics*, 60, 19-36.
- Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney, M. P., & Macomber, S.A., 2001: Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects. *Remote Sensing of Environment* 75, 230–244p.
- Stuart, SN, RJ Adams & DM Jenkins. 1990. Biodiversity in sub-Saharan Africa and its islands: Conservation, management, and sustainable use. *A contribution to the biodiversity* 175

conservation strategy programme (Occasional papers of the International Union for the Conservation of Nature Species Survival Commission, No. 6). Gland: World Conservation Union.

Taubenböck, H., Esch, T., Roth, A., 2006, An urban classification approach based on an object-oriented analysis of high resolution satellite imagery for a spatial structuring within urban areas, 1st EARSeL Workshop of the SIG Urban Remote Sensing Berlin, Germany.

Tewolde, M. G. and Cabral, P. 2011. Urban Sprawl Analysis and Modeling in Asmara, Eritrea. *Remote Sensing*, 3(10), 2148-2165.

Thomson, K.P.B., Bernier, M., Teillet, P., Horler, D. et Gosselin, C. 1984. Évaluation des capteurs TM, MSS et HRV pour estimer la superficie du maïs dans le contexte canadien. Les Actes du 8e symposium canadien de télédétection et 4e congrès de l'association québécoise de télédétection, 3-6 mai 1983, Montréal (Québec), 840 p

Timiza, Wilbert, 2011. Climate variability and satellite: observed vegetation responses in Tanzania. In : Lunds universitets Naturgeografiska institution-Seminarieuppsatser [en ligne]. 2011. [Consulté le 7 août 2017]. Disponible à l'adresse : <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/2153998>.

Tormos T. - 2011 - Analyse à l'échelle régionale de l'impact de l'occupation du sol dans les corridors rivulaires sur l'état écologique des cours d'eau. Thèse de doctorat en eaux continentales et société. AgroParisTech, 426p.

Toukiloglou P., 2007: Comparison of AVHRR, MODIS and VEGETATION for land cover mapping and drought monitoring at 1 km spatial resolution. Thèse de Doctorant, Université de Cranfield, England, 515 p.

Trapnell, C. G. & Langdale-Brown, I. 1972. Natural vegetation. East Africa. In: W. T. W. Morgan (ed.) East Africa: Its Peoples and Resources pp. 128-139, 2nd ed. Oxford University Press, Nai-robi, London, New York.

Trends in Ecology & Evolution, 20 (9), 503-510.

Tucker C.J., 1979 :Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, Vol 8 (2), 127-150.

Tumaini, Emanuel, 2009. *Analysis of rainfall characteristics in Tanzania for climate change signals* [en ligne]. Project report. Tanzania. [Consulté le 24 août 2017]. Disponible à l'adresse : http://erepository.uonbi.ac.ke:8080/bitstream/handle/11295/20626/Tumaini_Analysis%20of%20rainfall%20characteristics%20in%20Tanzania%20for%20climate%20change%20signals.pdf

Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127–150.

URQUHART, Penny Et LOTZ-SISITKA, Heila, 2014 : Tanzania Country Report: Strengthening University Contributions to Climate Compatible Development in Southern Africa [en ligne]. South Africa. SARUA: Southern African Regional Universities Association. Disponible à l'adresse :
176

https://www.researchgate.net/publication/316788217_Tanzania_Country_Report_Strengthening_University_Contributions_to_Climate-Compatible_Development_in_Southern_Africa.

URT. 2012.National Climate Change Strategy. United Republic of Tanzania

URT. 2015b.The National Energy Policy. United Republic of Tanzania

URT, 2010. Hali ya Uchumi wa Taifa katika Mwaka 2009. Wizara ya Fedha na Uchumi, Dar es Salaam. 241 pp.

URT, 2010. Hali ya Uchumi wa Taifa katika Mwaka 2009. Wizara ya Fedha na Uchumi, Dar es Salaam. 241 pp

URT. 2002, Tanzania population and housing census

Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change.

Veldkamp A., Fresco L.O., 1996, « CLUE: a conceptual model to study the Conversion of Land Use and its Effects », Ecological Modelling, vol. 85, 253-270.

Verburg P., Soepboer W., Veldkamp A., Limpiada R., Espaldon V., Mastura S.S.A., 2002, « Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: The CLUE-S Model », Environmental Management, vol. 30,No.3, 391-405

Verlinde, Johan, 2011. In the Pangani Basin in Tanzania. In : [en ligne]. [Consulté le 25 juin 2015]. Disponible à l'adresse : http://www.citg.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/CiTG/Over_de_faculteit/Afdelingen/Afdeling_watermanagement/Secties/waterhuishouding/Leerstoelen/Hydrologie/Education/MSc/Past/doc/Verlinde2011.pdf.

Vermote E.F., Tanré D., Deuzé J.L., Herman M., Morcrette J.J. (1994) Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6s: An Overview. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. vol. 35. n°. 3.

Vermote E.F., Tanré D., Deuzé J.L., Herman M., Morcrette J.J. 1997 “Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum (6S) - User guide version 2.” University of Maryland / Laboratoire d’optique Atmosphérique / European Centre for Medium Range Weather Forecast.

Vermote, E.F.; Tanre, D.; Deuze, J.L.; Herman, M.; Morcrette, J.J., 1997: Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6s: an overview. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 35, 675-686p

Vice President’s Office (VPO).1998.Tanzania country study on biological diversity. Dar-es-Salaam, Tanzania

Vincke, P. 1989. L’aide multicritère à la décision. Éditions de l’Université de Bruxelles, Bruxelles, 178 p.

Vollesen, K. 1992. Trichaulax (Acanthaceae: Justicieae), a new genus from East Africa. Kew Bull. 47: 613-618.

- Welcomme, R.L., 1979a. The inland fisheries of Africa. CIFA Occ. Pap. (7): 77 p
- Weng, Q. 2002. Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling. *Journal of Environmental Management*, 64(3), 273-284.
- White, F., 1983 The vegetation of Africa. A descriptive memoir to accompany the UNESCO/AETFAT/UNSO vegetation map of Africa. *Natural Resources Research XX*. Unesco Paris. 356 pp
- World Bank., 2009. Environmental Crisis or Sustainable Development Opportunity. Transforming the Charcoal Sector in Tanzania. Policy Note. Environment and Natural Resources Unit for the Africa Region
- Yager R.R., 1988: On Ordered Weighted Averaging aggregation operators in multicriteria decision making. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.*, 8(1); p.183-190
- Yeh A.G., Li X., 2001: A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS. *Environment and Planning B*, 28; p.733-753.
- YOUNOS, Tamim et GRADY, Caitlin A., 2014. *Climate Change and Water Resources*. S.I. : Springer. ISBN 978-3-642-37586-6.
- Yue, S. and Pilon P., (2004) A comparison of the power of the t test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend detection, *Hydrol. Sci. J.*, 49 (1), 21–37.
- Zadeh L.A., 1965: Fuzzy sets. *Inf. Control*, 8; p. 338-353.
- Zadeh L.A., 1978: Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility . *Fuzzy Sets and Systems* 1; p. 3-28.
- Zhang, R., et al. 2011. Using Markov chains to analyze changes in wetland trends in arid Yinchuan Plain, China. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3–4), 924-930.
- Zhang, Y. J., 1997, Evaluation and comparison of different segmentation algorithms, *Pattern Recognition Letters* 18:963-974.
- Zhang, Y. J., 2006, Chapter 1: An overview of image and video segmentation in the last 40 years, in *Advances in image and video segmentation*. IRM Press, Hershey, PA, pp. 1-15.
- ZORITA, E et TILYA, F, 2002. Rainfall variability in Northern Tanzania in the March-May season (long rains) and its links to large-scale climate forcing. In : *Climate Research*. 2002. Vol. 20, p. 31-40. DOI 10.3354/cr020031.

Liste des photographies

<i>Photographie 1: Vente de charbon de bois dans le village de Vigama (gauche), transport du charbon par motos pour la vente dans la ville de Dar Es Salaam (droite). Clichés : Boussougou, 2015.....</i>	<i>28</i>
<i>Photographie 2: 2a : un poste de contrôle détruit au Sud-ouest de la réserve de Kazimzumbwi ; 2b : les traces d'un incendie volontaire au Nord de la réserve de Pugu. Clichés : Boussougou, 2015</i>	<i>30</i>
<i>Photographie 3: Limite des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi (à gauche dans la partie nord-est de Pugu et à droite dans la partie sud-est de Kazimzumbwi). Clichés : Boussougou, 2015.....</i>	<i>30</i>
<i>Photographie 4: Exemples de quelques avantages directs des réserves forestières. Clichés : Boussougou, 2015</i>	<i>32</i>
<i>Photographie 5: Forêt dense : Clichés: Boussougou, 2015.....</i>	<i>98</i>
<i>Photographie 6: Forêt dégradée. Clichés: Boussougou, 2015</i>	<i>99</i>
<i>Photographie 7: Végétation arbustive. Clichés: Boussougou, 2015.....</i>	<i>99</i>
<i>Photographie 8: Savane. Clichés: Boussougou, 2015</i>	<i>99</i>
<i>Photographie 9: Cultures. Clichés: Boussougou, 2015</i>	<i>100</i>
<i>Photographie 10: Brousses. Clichés: Boussougou, 2015.....</i>	<i>100</i>
<i>Photographie 11: Sol nu. Clichés: Boussougou, 2015.....</i>	<i>100</i>
<i>Photographie 12: Surface artificialisée. Clichés: Boussougou, 2015.....</i>	<i>101</i>
<i>Photographie 13: Surface en eau. Cliché: Boussougou, 2015.....</i>	<i>101</i>

Liste des figures

Figure 1: Evolution de la population Tanzanienne depuis 1961 et projections jusqu'en 2050 (source : FAOSTAT, 2013)	12
Figure 3: Anomalies des températures mensuelles moyennes à l'échelle de la Tanzanie sur la période 1950 à 2013 calculée à partir des données mises par Berkeley Earth (http://berkeleyearth.lbl.gov/regions/Tanzania) ..	13
Figure 2: Anomalies des températures mensuelles moyennes à l'échelle de l'Afrique de l'est sur la période 1950 à 2013 calculée à partir des données mises par Berkeley Earth (http://berkeleyearth.lbl.gov/regions/Tanzania) 13	
Figure 4: Vulnérabilité des principaux biomes africains qui changeront sous l'influence du changement climatique entre la période historique 1901-2002 et la période projetée 2071-2100, et incertitude des simulations se basant sur la synthèse des 9 principaux scénarios (Niang et al, 2014)	15
Figure 5: Localisation et altitudes (SRTM, 90 m) de la Tanzanie.....	18
Figure 6: Répartition des zones agro-écologiques de Tanzanie.....	20
Figure 7: Carte des types de végétation en Tanzanie, mettant en évidence (en noir massif) les montagnes de l'arc oriental. Sources (Polhil (1968) et Burgess et al. (2002)).....	21
Figure 8: Carte de localisation des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi et les villages périphériques. Quelques paysages observés sur le terrain en 2015 (Source : Boussougou, 2017. Clichés : Boussougou, 2015) 25	
Figure 9: Les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi (limite en noir), localisation des villages (triangle noir), le réseau routier (linéaire gris), le chemin de fer (linéaire noir avec barre), le réseau hydraulique (linéaire bleu). Le fond de carte est l'image SPOT 6 2015 et en blanc le masque nuage (Source : Boussougou, 2017)	27
Figure 10: Limites anciennes (digitalisé sur la carte topographique (United Republic of Tanzania, 1978)) et nouvelles (fournis par le département Géographie de l'Université de Dar Es Salaam) des réserves forestières. 29	
Figure 11: Exemple de la cartographie planétaire de NDVI de novembre 2007 issue des données MODIS (MOD13Q1) (Source : http://www.space-awareness.org)	36
Figure 12: Exemple de cartographie du cumul pluie mensuel (mm) de TRMM 3B43 à 0.5° de résolution entre octobre 2005 et novembre 2005 (source : https://disc.gsfc.nasa.gov/services/opendap/TRMM/07_07_other_Data_Source_3B_43)	37
Figure 13: Etat de surface de la Tanzanie en 2005.....	40
Figure 14: Localisation des stations pluviométriques (point en rouge) retenues pour l'étude. Le fond de carte est une image TRMM 2012 en composition colorée de trois bandes (Source : Boussougou, 2017).....	41
Figure 15: Répartition des relevés GPS établis lors deux missions terrain réalisée en 2015 et 2016. Fond de carte : Image SPOT 6 en composition colorée fausse couleur. En rouge foncé, on retrouve la forêt dense ; en rouge clair la végétation dégradée et végétation arbustive ; en cyan la zone urbaine, en gris les sols nus, en blanc le masque nuage (Source : Boussougou, 2017).....	42
Figure 16: Etape de la création de la série temporelle NDVI sur la période 2011-2013. A gauche le téléchargement d'une image NDVI MODIS via le site de la NASA par dalle (une portion du sud et de l'ouest manque à l'image finale), à droite le téléchargement effectué à partir de R qui englobe toute la Tanzanie. L'image finale est constituée de 276 bandes, chaque bande représente une image composite de 16 jours de NDVI (Source : Boussougou, 2017)	45
Figure 17: Etape de la création de la série temporelle de précipitation TRMM. Etape de téléchargement via le site de la NASA, puis une rotation et projection au système de coordonnées de la Tanzanie ; ensuite une extraction de la Tanzanie et enfin une compilation des images. L'image finale comporte 144 bandes (soit une image chaque mois sur la période 2001-2013) (Source : Boussougou, 2017).....	45
Figure 18: Exemple d'extraction de profil temporel de NDVI MODIS d'un type de végétation (prairie) à partir de la série d'image NDVI MODIS. La courbe en vert représente le signal du NDVI de prairie au nord-est de Tanzanie sur la période 2001-2013 (Source : Boussougou, 2017).....	46
Figure 19: Paramètres évalués sur le logiciel TIMESAT avec en (a) et (b) le début et la fin de saison végétative, en (c) et (d) le niveau 80% de la saison, en (e) la valeur maximale, en (f) l'amplitude de la saison, en (g) sa longueur et en (h) et (i) la surface représentant l'intégrale de la saison végétative sur la courbe. Source: Jönsson et Eklundh (2004).....	48

Figure 20: Espace dans l'évaluation multicritère: source Eastman, 2003.....	53
Figure 21 : Principe de la commande flou. Source Gadrat, 2004	54
Figure 22: Architecture d'un réseau à une couche cachée (Source : Mas, 2004).....	57
Figure 23: Nuages de points et droites de régressions linéaires entre les données des stations pluviométriques et les données TRMM.....	63
Figure 24: Précipitations annuelles moyennes pour la Tanzanie (source : Kovar, 1996).....	65
Figure 25: Spatialisation des précipitations annuelles moyennes calculées à partir des données TRMM (mm) sur la période 2011-2013 (Source : Boussougou, 2017)	65
Figure 26: Précipitations moyennes mensuelles estimée par TRMM (Source : Boussougou, 2017)	66
Figure 27 : Cartographie des précipitations interannuelles sur la période 2001-2013 à partir des données TRMM (Source : Boussougou, 2017).....	68
Figure 28: Identification des années sèches et des années humides sur la période 2001-2013, obtenues à partir des données TRMM (Source : Boussougou, 2017).....	69
Figure 29: Résultat d'une ACP sans rotation sur les totaux pluviométriques mensuels bruts (janvier 2001 à décembre 2013) : à gauche les composantes temporelles et à droite les composantes spatiales (Source : Boussougou, 2017).....	70
Figure 30: cartographie des régimes moyens obtenus à partir des résultats de l'ACP sur les précipitations mensuelles TRMM en Tanzanie (janvier 2001 à décembre 2013) (Source : Boussougou, 2017).....	71
Figure 31: cycle saisonnier des régimes de précipitation en Tanzanie (Source : Boussougou, 2017).....	72
Figure 32: Régimes des précipitations utilisés par l'agence météorologique de Tanzanie à partir des données in situ (Source: www.meteo.go.tz.TMA© 1999)	74
Figure 33: Carte moyenne annuelle de NDVI-MODIS de 2001 à 2013(Source : Boussougou, 2017)	75
Figure 34: Variation inter annuelle du NDVI sur la période 2001 à 2013 en Tanzanie (Source : Boussougou, 2017)	76
Figure 35: Variabilité interannuelle de la dynamique de la productivité végétale à partir du coefficient de variation. En 2007, les faibles valeurs au sud de la Tanzanie sont causées dues aux artefacts (Source : Boussougou, 2017).....	77
Figure 36: Cartographie des classes de végétations (Source : Boussougou, 2017)	78
Figure 37: Evolution interannuelle de NDVI des classes d'occupation de sol (Source : Boussougou, 2017)	79
Figure 38: Carte d'occupation du sol de Tanzanie en 2005 (rappel).....	80
Figure 39: Fluctuation interannuelle de NDVI des classes de végétations (Source : Boussougou, 2017)	81
Figure 40: Estimation de la phénologie saisonnière moyenne du NDVI-MODIS sur la période 2001 à 2013 pour classe X (Source : Boussougou, 2017)	82
Figure 41: Figure : Dates de débuts et fins de saison végétative des classes de NDVI (Source : Boussougou, 2017)	83
Figure 42: Variation de la durée de saison végétative par classe (Source : Boussougou, 2017).....	84
Figure 43: Variations cycles saisonniers de NDVI par classe (Source : Boussougou, 2017)	85
Figure 44: classes de NDVI (gauche) et précipitation moyenne annuelle (droite) (Source : Boussougou, 2017)	87
Figure 45: comparaison entre les variations saisonnières de NDVI et les pluies mensuelles sur la période 2001-2013(Source : Boussougou, 2017)	88
Figure 46: NDVI MODIS, pluie TRMM, occupation de sol en Tanzanie (Source : Boussougou, 2017).....	89
Figure 47: Corrélations pluie/NDVI pixel par pixel et décalage temporel de 0, 1, 2 et 3 mois (Source : Boussougou, 2017).....	90
Figure 48: corrélation mensuelle pluie TRMM/NDVI MODIS sur la période 2001-2013(Source : Boussougou, 2017)	92
Figure 49: 8a : Station SEAS-OI (cliché: Boussougou, 2017) ; 8b : Zone d'acquisition de la station (source : http://www.seas-oi.org)	96
Figure 50: Visualisation des images SPOT et LANDSAT extraites de la zone d'étude (Source : Boussougou, 2017)	97
Figure 51: Répartition des relevés GPS des principales classes d'occupation du sol dans les réserves forestières et leurs périphéries (Source : Boussougou, 2017).....	102
Figure 52: Méthodologie générale des traitements des images SPOT et LANDSAT (Source : Boussougou, 2017)	103

Figure 53: Schéma de géoréférencement des images LANDSAT (Source : Boussougou, 2017).....	104
Figure 54: Modèle de correction atmosphérique des images SPOT (Source : Kergomard, 2000)	105
Figure 55: Comparaison entre l'approche orientée objet et l'interprétation visuelle : application à un milieu forestier (source : Tormos, 2011)	106
Figure 56: Schéma méthodologique des traitements des images SPOT et LANDSAT (Source : Boussougou, 2017)	108
Figure 57: Carte d'occupation de sol de la zone d'étude à partir de l'image SPOT 6 2015 (Source : Guy Boussougou, 2017).....	111
Figure 58: Répartition des surfaces (en %) de chaque classe d'occupation du sol de la zone d'étude (Source : Boussougou, 2017).....	112
Figure 59: Carte d'occupation du sol de chaque réserve forestière et répartition des surfaces (en %) de chacune de classes (Source : Boussougou, 2017).....	113
Figure 60: Répartition des surfaces (en %) de chaque classe d'occupation du sol à l'extérieur des deux réserves dans une zone de 2 Km. (Source : Boussougou, 2017)	114
Figure 61: Répartition des surfaces (en %) de chaque classe d'occupation du sol à l'intérieur des deux réserves forestière de Pugu et Kazimzumbwi. (Source : Boussougou, 2017).....	114
Figure 62: Carte d'occupation du sol : 1995, 2009, 2014 (Source : Boussougou, 2017).....	119
Figure 63: Carte de dégradation des milieux forestiers réalisée à partir de la classification orientée objet : images LANDSAT du 09/06/1995 et du 01/09/2009 et des images LANDSAT du 01/09/2009 et du 13/06/2014	121
Figure 64: Méthodologie de l'analyse multicritère (Source : Boussougou, 2017)	123
Figure 65: Proximité du réseau routier (Source : Boussougou, 2017)	124
Figure 66: Proximité aux chemins de fer (Source : Boussougou, 2017).....	125
Figure 67: Proximité au cours d'eau (Source : Boussougou, 2017).....	126
Figure 68: Proximité aux habitations (bâties) (Source : Boussougou, 2017).....	127
Figure 69: Proximité aux centres urbains (Source : Boussougou, 2017).....	128
Figure 70: Pente. Les points blancs sont des artefacts du SRTM (Source : Boussougou, 2017)	129
Figure 71: Altitude (Source : Boussougou, 2017).....	130
Figure 72: Contrainte (Source : Boussougou, 2017)	131
Figure 73: Carte de pression exercée par la population autour des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi (Source : Boussougou, 2017)	134
Figure 74: Diagramme des étapes du modèle LCM de l'étude (Source : Boussougou, 2017).....	139
Figure 75 : visualisation des variables explicatives : a) Distance par rapport aux routes ; b) distance par rapport aux surfaces artificialisées, c) Distance par rapport aux centres urbains ; e) Distance par rapport aux cours d'eau ; f) Pentas ; g) Altitudes ; h, i, j) Cartes d'occupations du sol de 1995, 2014 et 2016 (Source : Boussougou, 2017).....	142
Figure 76: (a) Le potentiel de transition de la végétation herbeuse vers les surfaces artificialisées. (b) Le potentiel de transition des brousses vers la végétation herbeuse. (c) Le potentiel de transition de la forêt vers la végétation herbeuse (Source : Boussougou, 2017)	147
Figure 77: cartes d'occupation du sol observée 2016 (validée à partir des données de terrain de 2015) et prédite par le modèle LCM pour l'année 2016 (Source : Boussougou, 2017).....	148
Figure 78: Carte d'occupation du sol simulée pour l'année 2050 et celle observée en 2014 (Source : Boussougou, 2017).....	152
Figure 79: Evolution d'occupation du sol entre 1995 et 2014 et projection en 2050 (Source : Boussougou, 2017)	155

Liste des équations

Équation 1: Formule du NDVI.....	35
Équation 2: Indice de Nicholson.....	49
Équation 3: Coefficient de corrélation.....	50
Équation 4: Formule de l'indice Kappa.....	52
Équation 5: Couche cachée du réseau neuronal.....	58
Équation 6: Formule matrice de transition P	59
Équation 7: Equation de pondération.....	132
Équation 8: Formule du calcul de l'erreur de commission.....	144
Équation 9: Formule du calcul de l'erreur d'omission.....	144

Liste des tableaux

Tableau 1: Comparaison entre les évolutions thermiques (en °C par siècle) observées en Tanzanie (échelle nationale) et celles observées à des échelles géographiques régionale et continentale de 1910 à 2000 (les évolutions en Tanzanie sont calculées à partir de 19 stations nationales fournis par le Berkeley Earth)	14
Tableau 2 : Saison pluvieuse, sèche et direction du vent en Tanzanie.....	19
Tableau 3: Répartition des forêts de Tanzanie par type, usage, et statut juridique (source : Chamshama, 2011)	22
Tableau 4: Taux de croissance démographique dans les villages périphériques des réserves de Pugu et kazimzumbwi (Source : Shishira et al, 1998 ; Lupala , 2015).....	27
Tableau 5: Caractéristiques des images LANDSAT ETM+ (Source : https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites).....	38
Tableau 6: Caractéristiques des images SPOT 6	39
Tableau 7: Récapitulatif des images satellites de l'étude.....	39
Tableau 8: Répartition des villages entre districts et coordonnées géographique (Source : Boussougou, 2017)	41
Tableau 9: Exemple de matrice de confusion entre classification et vérité de terrain	52
Tableau 10: Opérateurs de la logique floue et degré de vérité (fonction d'appartenance): source: EIAJ, 2004..	54
Tableau 11: Résultats statistiques de la validation des données TRMM 3B42 par rapport aux données des stations au sol	62
Tableau 12: Test de Mann-Kendall avec saisonnalité appliquée aux classes	80
Tableau 13: Corrélation entre classe de NDVI et pluie correspondant (Source : Boussougou, 2017)	88
Tableau 14: Images SPOT et LANDSAT retenues pour l'étude et principales caractéristiques radiométriques .	97
Tableau 15: Matrice de confusion entre la classification à partir de l'image SPOT 6 2015 et les points réalité de terrain des classes d'occupation du sol pour cette même date (voir Tableau 9 du chapitre 1).....	109
Tableau 16: Matrice de confusion classification image LANDSAT 1995	115
Tableau 17: Matrice de confusion classification image LANDSAT 2009	115
Tableau 18: Matrice de confusion classification image LANDSAT 2014	115
Tableau 19: Occupation du sol et taux d'évolution entre 1995 et 2009 sur la zone d'étude (Source : Boussougou, 2017)	116
Tableau 20: Occupation du sol et taux d'évolution entre 2009 et 2014 sur la zone d'étude (Source : Boussougou, 2017)	117
Tableau 21: Taux d'évolution des classes d'occupation du sol de la réserve forestière de Pugu pour la période 1995-2014 (Source : Boussougou, 2017)	120
Tableau 22: Taux d'évolution des classes d'occupation du sol de la réserve forestière de Kazimzumbwi pour la période 1995-2014 (Source : Boussougou, 2017)	120
Tableau 23: Matrice de pondération des critères pour l'analyse multicritères	132
Tableau 24: Valeurs de poids pour chaque facteur à l'aide de l'indice global de cohérence (Source : Boussougou, 2017).....	133
Tableau 25: Paramètres d'entrée du modèle (Source : Boussougou, 2017)	141
Tableau 26: coefficient V de Cramer (relation entre changement de couverture terrestre et variables explicatives). Les valeurs $\geq 0,15$ sont en surbrillance en gras (Source : Boussougou, 2017)	145
Tableau 27: Résumé des indices Kappa	149
Tableau 28: Analyse par matrice d'erreurs de la carte d'occupation du sol observée 2016 (Colonne) contre la carte d'occupation du sol simulée en 2016 (ligne) à partir des potentiels de transition. Les valeurs sont exprimées en hectares (ha) et l'erreur de commission et d'omission est exprimée en% et en gras (Source : Boussougou, 2017).....	150
Tableau 29: Probabilité de transition des classes d'occupation du sol entre 2014 et 2050(Source : Boussougou, 2017)	150
Tableau 30: Evolution possible des surfaces d'occupation du sol entre 2014 et 2050(Source : Boussougou, 2017)	

Annexes

<i>A) Liste des néo canaux formés à partir des bandes spectrales SPOT 6 et LANDSAT</i>	<i>187</i>
<i>B) Test de significativité des corrélations entre pixel de NDVI MODIS et pixel de TRMM.....</i>	<i>190</i>
<i>C) Visualisation de l'image LANDSAT 2016 et matrice de confusion 2016</i>	<i>190</i>
<i>D) Article publié dans les Actes de la conférence SAGEO'2015-Spatial Analysis and GEomatics</i>	<i>192</i>
<i>E) Présentation poster à la conférence internationale en France : SAGEO'2016 - Spatial Analysis and GEomatics (7-9 décembre, Nice)</i>	<i>202</i>
<i>F) Présentation poster au colloque internationale de l'ESA en République tchèque : Living Planet Symposium 2016 (9-13 mai, Prague).....</i>	<i>207</i>

A) Liste des néo canaux formés à partir des bandes spectrales SPOT 6 et LANDSAT

- DVI : Indice différentiel de végétation - *Difference Vegetation Index* (Bacour et al., 2006)

$$DVI = \rho_{PIR} - \rho_R$$

Où

ρ_{PIR} : Réflectance dans la bande du PIR

ρ_R : Réflectance dans la bande du Rouge

- RVI : Indice de végétation par quotient - *Ratio Vegetation Index* (Krieger et al., 1969 ; Jordan, 1969).

$$RVI = \frac{\rho_{PIR}}{\rho_R}$$

Où

ρ_{PIR} : Réflectance dans la bande du PIR

ρ_R : Réflectance dans la bande du Rouge

- NDVI : Indice de végétation par différence normalisé - *Normalized Difference Vegetation Index* (Rouse et Haas, 1973 ; Tucker, 1979)

Le NDVI est le plus utilisé pour l'étude de la végétation par télédétection. La normalisation des bandes permet de réduire les effets liés à l'éclairement. Il permet de mettre en évidence les secteurs des plus ou moins végétaux.

$$NDVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R}$$

Où

ρ_{PIR} : Réflectance dans la bande du PIR

ρ_R : Réflectance dans la bande du Rouge

- PVI : Indice perpendiculaire de végétation - *Perpendicular Vegetation Index* (Richardson et Wiegand, 1977)

$$PVI = \frac{1}{\sqrt{a^2 + 1}} (\rho_{PIR} - a\rho_R - b)$$

Où

a : Pente de la droite des sols dans l'espace (R,PIR)

b : Ordonnée à l'origine de la droite des sols

- SAVI : Indice de végétation ajusté pour le sol - *Soil-Adjusted Vegetation index* (Huete, 1988)

$$SAVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R + L} (1 + L)$$

Où

L : Constante égale à 0.5

- TSAVI : Indice transformé de végétation ajusté pour le sol - *Transformed Soil-Adjusted Vegetation index* (Baret F et Guyot G, 1991)

$$TSAVI = \frac{a(\rho_{PIR} - a\rho_R - b)}{\rho_R + a(\rho_{PIR} - b) + 0.08(1 + a^2)}$$

Où

a : Pente de la droite des sols dans l'espace (R,PIR)

b : Ordonnée à l'origine de la droite des sols

- MSAVI : Indice modifié de végétation ajusté pour le sol - *Modified Soil-Adjusted Vegetation index* (Qi et al., 1994)

$$MSAVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R + L} (1 + L)$$

Avec $L = 1 - 2aNDVI.WDVI$

Où

a : Pente de la droite des sols dans l'espace (R,PIR)

$$WDVI = \rho_{PIR} - a\rho_R$$

- SI : Indice d'ombres – Shadow Index (Rikimaru et Miyatake, 1997 et Roy, Miyatake et Rikimaru, 1997)

Le Shadow Index a été développé pour d'examiner les caractéristiques des ombres de la canopée afin de déterminer sa densité. Il est formulé de la manière suivante pour l'imagerie LANDSAT :

$$SI_{LANDSAT} = \sqrt[3]{(256 - B_{bleue})(256 - B_{verte})(256 - B_{rouge})}$$

Où

B: Valeurs de bande spectrale

- SBI : Indice de brillance des sols – *Soil Brightness Index*

$$SBI = \frac{\sqrt{\rho_B^2 + \rho_V^2 + \rho_R^2 + \rho_{PIR}^2}}{4}$$

Où

ρ_B : Réflectance dans la bande du Bleu

ρ_V : Réflectance dans la bande du Vert

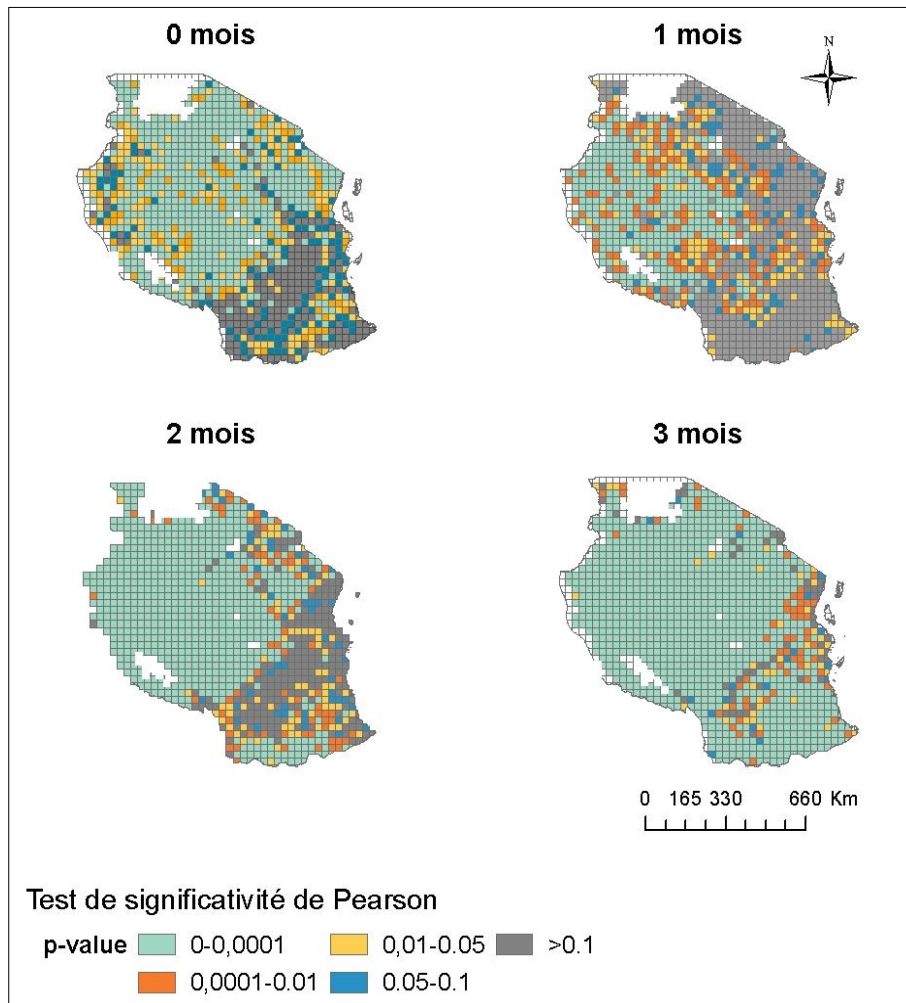
ρ_R : Réflectance dans la bande du Rouge

ρ_{PIR} : Réflectance dans la bande du Proche Infrarouge

- NDWI : Indice d'eau par différence normalisé – *Normalized Difference water Index* (McFeeters, 1996)

$$NDWI = \frac{\rho_V - \rho_{PIR}}{\rho_V + \rho_{PIR}}$$

B) Test de significativité des corrélations entre pixel de NDVI MODIS et pixel de TRMM



La p-Value est une donnée statistique introduite par Gibbons et Pratt³ en 1975. Il propose une mesure qui calcule la plus petite valeur de α de rejet de l'hypothèse nulle.

On compare donc la p-Value au risque α que nous avons choisi (généralement 1 ou 5%), et on l'interprète de la manière suivante :

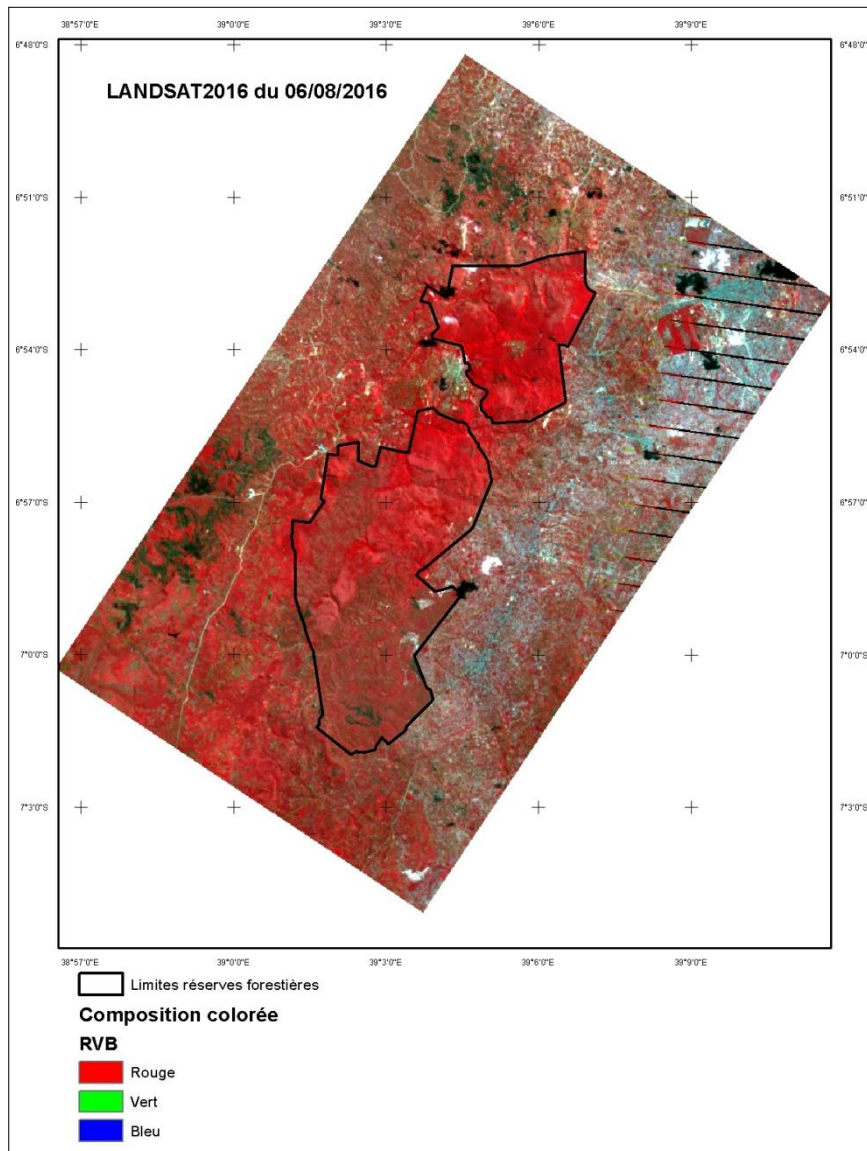
- **p-Value** < α : on peut conclure qu'au niveau de risque p-Value%, de rejeter l'hypothèse nulle H_0 en faveur de l'hypothèse alternative H_1 .
- **p-Value** > α : on retient l'hypothèse nulle H_0 .

Néanmoins, si p-Value > α cela ne signifie pas forcément qu'il n'y a pas de différence entre les groupes. Cela peut aussi être dû à un échantillonnage trop petit pour prouver une différence.

C) Visualisation de l'image LANDSAT 2016 et

³ J. D. Gibbons, J. W. Pratt (1975) – P-values : interpretation and methodology

matrice de confusion 2016



Classes	arbustive	brousse	forêt	herbeuse	Sol-urbain	Totale
arbustive	302	45	9	7	0	363
brousse	72	440	18	28	8	566
forêt	21	0	150	3	0	174
herbeuse	16	76	0	1168	164	1424
Sol-urbain	10	20	0	65	1505	1600
Totale	421	581	177	1271	1677	2274
Kappa	0.86					
Précision globale	81 %					

Changements de la couverture forestière dans l'île d'Anjouan entre 1995 et 2014

G.B. Boussougou¹, Y.T.Brou^{1,2}, I. Mohamed³

1. UMR ESPACE-DEV / SEAS-OI, Université de La Réunion,
40, Avenue de Soweto (IUT), 97410 Saint Pierre
guyboussougou@yahoo.fr
2. UMR ESPACE-DEV (IRD, UM2, UAG, UR)
3. Université des Comores

Résumé : La production agricole liée à la croissance démographique est l'un des principaux moteurs de dégradation forestière dans le monde. Dans l'union des Comores la déforestation est particulièrement attribuée à l'agriculture sur brûlis mais aussi aux cultures sous forêts et aux autres usages de la forêt comme la production de bois d'œuvre. Sur la période récente, il existe très peu d'informations statistiques et cartographiques sur l'évolution spatio-temporelle des forêts comoriennes. L'objectif de cette étude est donc de mettre en évidence, sur la période 1995-2014, les changements de la couverture forestière à partir d'images satellites hautes résolutions spatiales sur l'île d'Anjouan, la plus touchée par le phénomène de la déforestation des îles de l'union des Comores. L'analyse des résultats montre que de 1995 à 2014, les forêts denses d'Anjouan ont diminuées de 7311 hectares à un rythme de 8% par an. La mise en relation des facteurs d'origines anthropiques avec les cartes d'occupation du sol indique que la dynamique de l'occupation des sols dans cette île est due à des multiples facteurs dont la croissance rapide de la population. Les pressions sur les terres deviennent en effet de plus en plus importantes à cause de l'augmentation de la demande en produits agricole.

Mots-clés : Ile d'Anjouan, Télédétection, occupation des sols, Pression agricole.

Abstract: Agriculture production linked to population growth is one of the main motors of forest degradation in the World. In the Union of the Comoros, deforestation is particularly attributed to slash-and-burn farming as well as cultures in the forest and other uses of the forest such as charcoal production. In recent times, very few statistic and cartographic information is known concerning the spatiotemporal evolution of Comorian forests. The aim of this study is to highlight the changes in the forest cover by the use of high resolution spatial satellite images, on the period of 1995 to 2014, on the Isle of Anjouan: the most affected by the deforestation phenomena. The analysis of the results showed that from 1995 to 2014, the dense forests of Anjouan diminished by 7311 hectares at a rate of 8% per year. Linking the original anthropogenic factors and land-use maps show that the dynamics of the land-use are due to multiple factors like the rapid growth of the population. More and more pressure is applied on the lands due to the increased demands of agricultural products.

Keywords: Island of Anjouan, remote sensing, land use, agricultural pressure.

1. Introduction

L'extension des zones agricoles liée à la croissance démographique est l'un des principaux moteurs de dégradation de la couverture forestière dans le monde. Cette situation est particulièrement visible dans les pays en voie de développement où les espaces forestiers subissent de nombreuses pressions à cause d'une faible gestion de ressources naturelles. D'après la FAO en 1980, 45 % du déboisement dans les zones de forêts denses et humides est due à l'agriculture itinérante (avec rotation de cultures) (FAO, 2007). En Afrique tropicale humide, l'expansion de différentes formes d'agriculture (et de l'élevage) aurait contribué à 85% de déforestation (Lanly, 2003). La déforestation est accentuée par d'autres pratiques comme la surexploitation du bois lié à la coupe de bois énergie (charbon de bois) et l'expansion urbaine.

A l'instar des pays tropicaux en voie de développement, l'Union des Comores est un pays où les ressources naturelles se détériorent de plus en plus sous l'action conjuguée des hommes (pressions anthropiques) et des phénomènes naturels (érosion des sols, cyclones, éruptions volcaniques...). La plupart des forêts comoriennes appartiennent au domaine de l'État. Cependant le manque de ressources humaine et financières de l'Union, amène les communautés villageoises périphériques à gérer les forêts se trouvant dans leur terroir comme étant un lieu où elles exercent des droits d'usage coutumiers, reconnus ou non par la loi. Ce qui a pour conséquence une exploitation non contrôlée des ressources forestières et donc une perte importante de la faune et la flore. Des nombreuses études montrent que la grande partie de dégradation forestière dans l'Union des Comores est attribuée aux différents types d'agricultures pratiquées (agriculture sur brûlis, agriculture sous forêts avec des cultures de rentes ou vivriers). L'étude des photographies aériennes datant de 1949, 1974 et 1984 (AGRAR, 1987) a montré que les forêts naturelles disparaissent au rythme de quelques 438 ha par an au détriment des espaces agricoles. Pendant ces années on a constaté une régression de 110 hectares environ par an des plantations forestières dû au défrichement au profit de l'agriculture vivrière. Moulaert (1998) a également montré, que la superficie forestière intacte d'altitude à Mohéli a diminuée de 26% en 13 ans de 1983 à 1996, au profit des cultures. La Grande Comores quant à elle a perdu 53% de sa superficie forestière pendant cette même période.

Parmi les trois îles que compte l'Union des Comores, l'île d'Anjouan reste la plus touchée par le phénomène de déforestation. Les forêts de l'île abritent de nombreuses espèces endémiques des Comores. Ces espèces se trouvent aujourd'hui très menacées à cause des pressions humaines sur les forêts (ECDD, 2014).

C'est dans ce contexte de dégradation forestière que le gouvernement comorien a adressé à la ⁴FAO en 2008 une requête demandant l'appui à la formulation d'un projet. Ce projet devrait permettre le développement d'une politique de gestion rationnelle des forêts et la préparation de l'Inventaire Forestier National (IFN). Or très peu d'informations existent sur l'état actuel de l'occupation des sols et la dynamique récente des forêts sur les îles Comoriennes.

L'objectif de cette étude est donc de mettre en évidence les changements de couverture forestière au cours des 20 dernières années (1995-2014) et d'analyser les causes de leurs évolutions. L'étude s'articulera de la manière suivante : Premièrement une présentation des données et méthodes utilisées dans ce travail, deuxièmement les résultats obtenus qui feront par la suite l'objet d'une discussion pour tenter d'expliquer les dynamiques forestières observées pendant l'étude.

⁴ Food and Agriculture Organization of the United Nations

2. Données et méthodes

Présentation de la zone d'étude

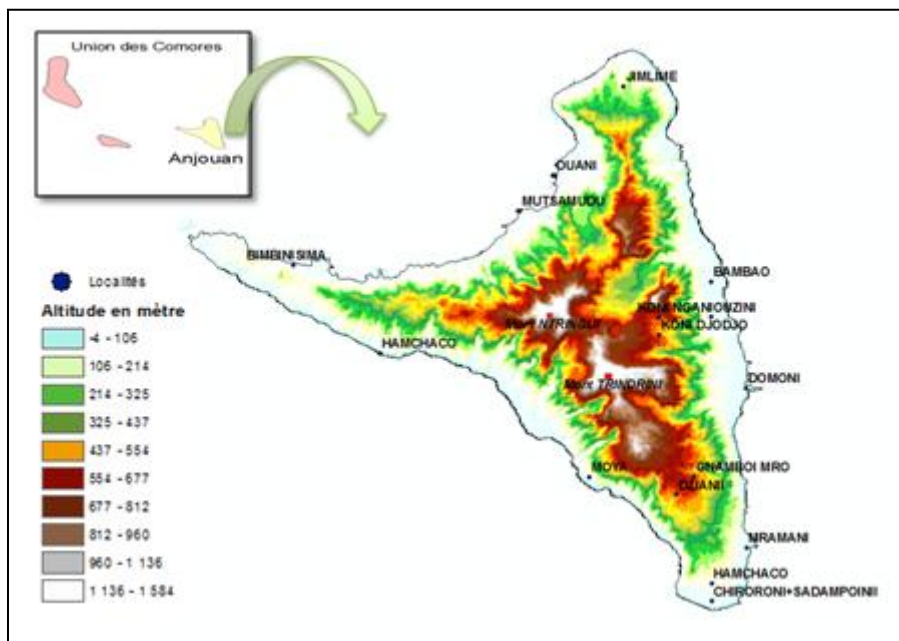


Figure 1 : carte de localisation de la zone d'étude

L'île d'Anjouan est la deuxième plus grande île de l'Union des Comores, elle se situe entre 12°00'-12°28'S et 44°07'-44°38'E dans le canal du Mozambique. Elle est à 82 km à l'Est de la Grande-Comore et à 42 km à l'Est de Mohéli. Les deux sommets principaux culminent à 1595 mètres pour le mont Ntringui et à 1474 mètres pour le mont Trindrini. Le climat est du type tropical humide avec deux saisons : *une saison chaude et humide, de décembre à avril et une saison fraîche et sèche, de mai à novembre. Il pleut en moyenne 1500 mm par an.*

2.2. Données

Les Comores, comme plusieurs pays sous-développés, disposent de très peu d'image satellite haute résolution ancienne. Le manque de moyen, mais surtout des techniciens qualifiés pour le traitement de ses données, justifie ce constat. Le choix des données de télédétection dans ce travail, a été donc fait, en fonction de leurs disponibilités et qualités.

L'ensemble de données utilisées dans cette étude sont : des données satellites de type SPOT, une carte topographique, des points de relevé GPS, un modèle numérique de terrain (MNT) et des données démographiques. Les images satellites SPOT (3 et 5) ont été acquises respectivement en 1995 et 2014 et contiennent très peu de nuages. L'image SPOT5 a été obtenue auprès de la station ⁵SEAS-OI et l'image SPOT3 au département SIG des Comores du ministère de l'environnement. Le MNT (SRTM) de 90 m de résolution a été téléchargé sur le site de la NASA. La carte topographique IGN datant de 1995 et les données démographiques (le recensement complet le plus ancien datant seulement de 2003) ont été fournies par le ministère de l'environnement des Comores. Les points GPS proviennent de relevés terrain effectués au cours d'une mission de terrain en 2014 (mois de janvier).

⁵ Surveillance de l'Environnement Assistée par Satellite dans l'Océan Indien, opérationnel depuis 2012.

Tableau 1 : Caractéristiques des images satellites SPOT de l'étude

Capteurs	Résolution	Date d'acquisition	Saison
SPOT 3	20 m, en ms	22/05/1995	sèche
SPOT 5	10 m, en ms	14/09/2014	sèche

2.3. Méthodes

Prétraitements des images satellites :

Les images satellites SPOT 3 et 5, ont été dans un premier orthorectifiées à partir du MNT à 90 mètres. Ensuite dans un second temps ils ont subies un géo référencement par rapport à la carte IGN datant de 1995, par la méthode du plus proche voisin. Le RMS (Root Mean Square) obtenu est inférieur à 0.5 mètres. Le système de coordonnées de référence choisi est le WGS84/UTM, zone 38 S. Afin de rendre les deux images SPOT comparables, l'image SPOT 5 (10 m de résolution en ms) a été ré-échantillonnée à la résolution de l'image SPOT 3 de 20 mètres. Les masques mer et nuages ont été créés pour accélérer la durée des traitements et pour éviter toutes interférences avec les classes d'occupations du sol.

Traitements des images satellites :

Disposant, des coordonnées géographiques GPS qui renseignent sur le type d'occupation de sol, récolté sur terrain en 2014 et une carte topographique IGN de 1995 qui donne l'état de la couverture terrestre en cette année, une classification supervisée par la méthode du maximum de vraisemblance (Ronald,1922) est privilégiée. Cette méthode de classification suppose que les statistiques pour chaque classe dans chaque bande de l'image sont normalement distribuées et calcule la probabilité qu'un pixel donné appartienne à une classe spécifique (Richards, 1999). Les zones d'entraînements pour les classifications sont basées sur ces relevés de terrain.

La définition des classes thématiques s'est, par ailleurs, appuyée sur les travaux d'AGRAR(1987), Amir(2010), Nourdine(2014) ainsi que sur la carte topographique de l'IGN. Sept classes d'occupation des sols ont été identifiées : la forêt dense ; la forêt dégradée, l'agroforesterie (mélange de cultures vivrières et de cultures de rentes comme le girongle, ylanglang, coco), les terres agricoles (tous types d'agriculture), les zones construites (route bitumées, bâtis), les surfaces en eaux douces (eaux continentales) et les sols nu (sol, sables, roches volcanique).

Évaluation des classifications dirigées :

La pertinence et la précision des classifications sont évaluées à l'aide des matrices de confusion entre les données de vérité-terrain et celles des traitements des images satellitaires, par le calcul d'un certain nombre d'indices à partir de la matrice de confusion. La matrice de confusion est une matrice carrée de taille égale au nombre de classes.

Dans cette étude, les différents indices qui ont servis à évaluer les classifications sont : 1) Précision globale : elle correspond au nombre de pixels correctement classifiés par rapport au nombre total de pixels d'entraînement. Elle s'est effectuée par le calcul du coefficient kappa (Kenny et al, 2006) ;2) Précision de l'utilisateur : C'est le pourcentage des pixels d'un groupe issu de la classification, correctement classés vis-à-vis de la référence (vérités terrain) ;3) Précision réalisateur : Correspond au pourcentage de pixels d'une classe de référence correctement classés par télédétection ; 4) l'erreur de déficit : elle correspond au pourcentage de pixels d'une classe de référence affectés à d'autres classes par la classification.

⁶ Institut géographique national

Analyse des changements forestiers et mise en relation avec les données exogènes :

La mise en relation des cartes d'occupation des sols avec les données démographique et altimétrique permet de mettre en évidence le contexte des pressions humaines sur les terres forestières :

-L'analyse des changements de la couverture forestière est basée sur le croisement des cartes d'occupation des sols de 1995 et de 2014. Le taux de déforestation (proportion de forêt qui disparaît chaque année) est calculé selon la formule de Calos (Calos et al, 2001) : $T = (1 - (S2/S1)^{1/n}) * 100$ (1)

(Où t = taux de déforestation ; $S1$ = superficie forestière à la date 1 ; $S2$ superficie forestière à la date 2 ; n = nombre d'année entre les deux dates).

-La densité de la population de l'île d'Anjouan en 1995 et 2014, est calculée par la formule : Densité = population/superficie (2) et interpolée par la méthode « Kriging » (Isaaks ,1989) sur une grille de 1km par 1km.

-Le lien entre forêts et l'altitude, s'est effectué par la superposition et le croisement des couches de classes d'altitude avec la couche forêt, pour montrer la variation de la superficie d'espaces forestières en fonction de l'altitude.

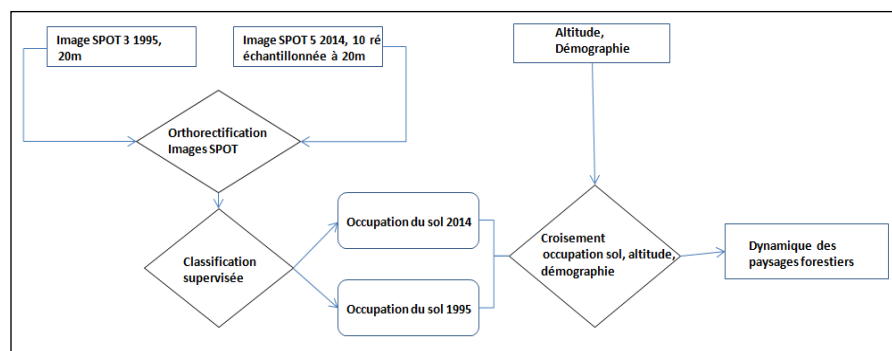


Figure 2 : Schéma simplifié de la méthodologie de l'étude

3. Résultats et discussions

3.1. Validation des classifications

Les classifications ont été évaluées à l'aide des matrices de confusions (Godard, 2005) établie grâce de la comparaison entre les données de vérité-terrain et les données issues des classifications des images satellitaires. L'indice de Kappa a permis d'avoir la précision totale des classifications (tableaux 3 et 4). La précision globale obtenue à l'issue de la classification est de 92,90% pour l'image de 1995 et de 91,85% pour l'image de 2014. Ce qui signifie que plus de 90% des pixels des images ont été correctement classés conformément aux données de vérité-terrain.

Tableau 2 : Matrice de confusion de la classification 1995

	TC	AF	BA	FD	EA	FDE	SL	TO	PU%	EE%	PR%	ED%
TC	8	2	1	0	0	0	0	11	73	23	57	43
AF	2	32	2	0	0	0	0	40	80	20	84	16
BA	1	2	21	0	0	0	0	24	87	13	87	13
FD	0	0	0	56	0	0	0	56	100	0	100	0
EA	0	0	0	0	35	0	0	35	100	0	100	0
FDE	0	0	0	4	0	96	0	100	96	4	96	4
SL	0	0	0	0	0	0	63	63	100	0	100	0
TO	11	40	21	64	35	96	63	330				
PU%	73	80	100	88	100	100	100					
EE%	23	20	0	12	0	0	0					

Kappa=92,90%

Tableau 3 : Matrice de confusion de la classification 2014

Classes	TC	AF	BA	FD	EA	FDE	SL	TO	PR %	ED %
TC	17	0	0	0	0	0		17	100	0
AF	3	38	0	8	0	6	0	55	69	31
BA	8	8	39	0	0	0	0	47	83	17
FD	0	6	0	76	0	0	0	82	93	8
EA	0	0	0	0	80	0	0	80	100	0
FD	0	0	0	0	0	114	0	114	100	0
FDE	3	0	0	0	0	0	105	108	97	3
TO	31	44	39	84	80	120	105	503		
PU %	55	86	100	90	100	95	100			
EE%	45	14	0	10	0	5	0			

Kappa=91,85%

TC= terres cultivée, AF=agroforesterie, BA=batis, FD=forêt dégradée, FDE=forêt dense, EA=eau, SL=sol, PR=précision réalisateur, PU=précision utilisateur, ER=erreur déficit, EE=erreur excédent, ED=excédent déficit, TO=total

3.2. Dynamique d'occupation du sol entre 1995 et 2013

Les classifications dirigées des images SPOT 3 et 5 respectivement de 1995, et 2014 ont permis d'obtenir les cartes d'occupations des sols représentées dans la figure 3. Cette figure montre les différentes situations d'occupation des sols dans l'île d'Anjouan entre 1995 et 2014. On note une disparition importante des forêts denses au profit des zones d'agriculture, ainsi qu'une densification des zones d'habitations.

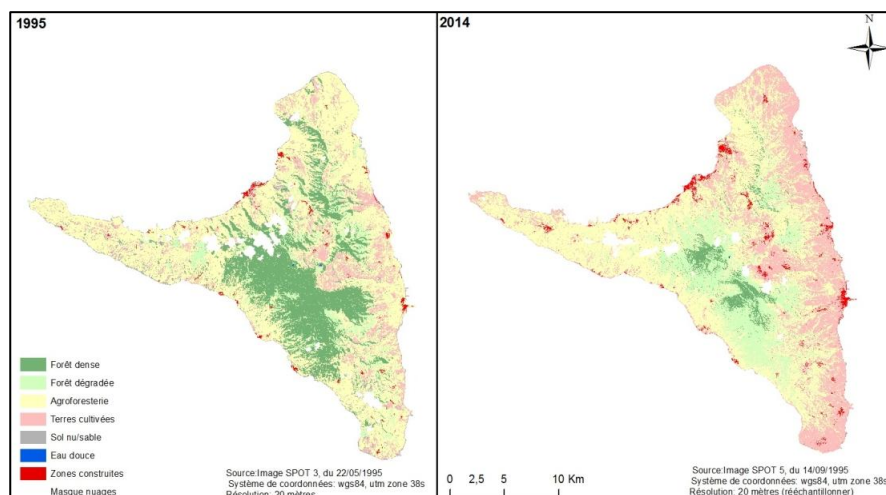


Figure 3 : Carte d'occupation des sols d'Anjouan entre 1995 et 2014

Le tableau 3 montre le changement de couverture de sol et le taux d'évolution entre 1995 et 2014 dans l'île d'Anjouan. La surface de forêt dense qui occupait près de 22 % en 1995 est passée à 4%, soit une diminution de 18 %. Avec un taux de déforestation de 8% par an, la perte de forêt dense a entraînée l'augmentation des forêts dégradées passant ainsi de 8 % en 1995 à 15 % en 2014.

Dans cette même période, on remarque une baisse des surfaces d'agroforesterie particulièrement au sud et au nord-est de l'île. Ces surfaces sont passées de 51% à 41%

En revanche les terres cultivées ont vu leurs surfaces augmentées de 19 % dans cette même période. Ce phénomène est bien visible dans la partie Sud et Est du territoire Anjouanais.

Concernant les surfaces en eaux douces et les sols nus, ceux-ci ont diminué pendant la période d'observation de près de 50 % et de 90 %. Les surfaces en eau douce sont ainsi passées de 5,07 hectares à 2,76 hectares. Les sols nus étant passés quant à eux de 1689 à 126,80 hectares. Les zones d'habitation ont quant à elles connu une augmentation de près de 50 %, passant de 334 hectares en 1995 à 782,7 hectares en 2014.

Tableau 4 : couverture terrestre et taux d'évolution des classes d'occupation du sol

Classes occupation des sols	1995		2014		Ch-C (ha)	Ch-C (%)	Taux-E (%)	Ch / an (%)
	C-T (ha)	C-T (%)	C-T (ha)	C-T (%)	1995-2014	1995-2014	1995-2014	1995-2014
Forêt	9012	21,58	1701	4,08	-7311	-17,50	-4,30	-0,92
Forêt dégradée	3 450	8,26	6337	15,19	2 887	6,93	0,46	0,36
Agroforesterie	21110	50,54	19380	46,44	-1730	-4,10	-0,09	-0,22
Terres cultivées	4788	11,46	12550	30,07	7762	18,61	0,62	0,98
Eau douce	5,07	0,02	2,76	0,01	-2	-0,02	-0,84	0,00
Sol nu	1689	4,04	126,8	0,30	-1562	-3,74	-12,32	-0,20
Zones construites	335	0,8	782,7	1,88	447,9	1,07	0,57	0,06
Masque nuages	1 376	3,29	850,7	2,04	-525	-1,26	-0,62	-0,07
Total	41764	100	41730	100				

C-T= couverture terrestre ; ha=hectare, Ch-C= Changement de couverture ;
Taux-E=Taux d'évolution ; Ch=Changement.

3.3. Facteurs explicatifs de la perte de forêt dense à Anjouan entre 1995 et 2014

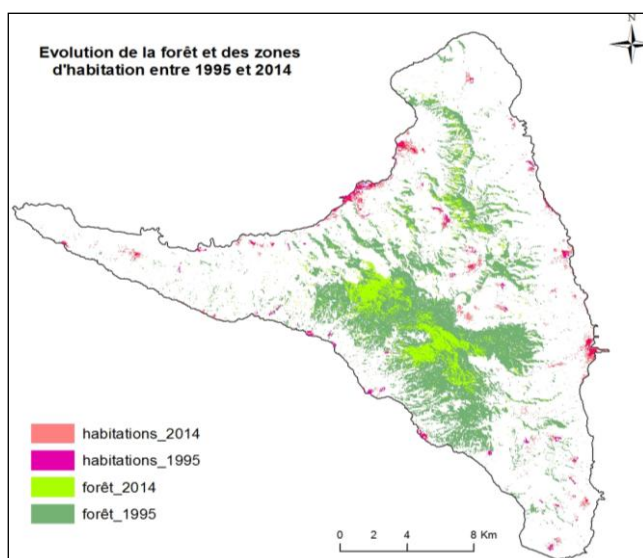


Figure 4 : Carte de forêts denses en 1995 et 2014

La figure 4 montre la situation de la forêt dense d'Anjouan en 1995 et en 2014. Le recul des surfaces forestières est bien visible sur la carte. En effet, en 19 ans la superficie forestière est passée de 9012 hectares à 1701 hectares, soit une perte de près de 80%. Ce recul spectaculaire des surfaces forestières peut être attribué à la croissance rapide des populations, comme certaines études le démontrent (Sibet, 1996 ; PANA, 2006). En effet, l'île est la plus dense (densité au km²) de l'union des Comores, avec une population estimée à 298155 habitants en 2014 (RGPH, 2003). Cette population est inégalement répartie sur le territoire, avec des zones fortement peuplées (Nord-Ouest, Sud) par rapport à d'autres (ouest et Centre) (Figure 5).

La population est passée de 224535 habitants en 2003 à 298155 habitants en 2014 (RGPH, 2003) intensifiant ainsi la pression foncière. La forte croissance démographique a donc été largement compensée par l'extension des surfaces cultivées (Abreu, 2009). Ce qui entraîne une pression sur les terres de telle sorte qu'il devient difficile pour un paysan d'Anjouan d'obtenir une surface à cultiver ; en effet la densité par kilomètre carré cultivable ne cesse d'augmenter depuis les années 1988 (Bastimi, 1984).

La pression foncière sur l'île, due aux densités élevées des populations est illustrée par la figure 5. Un renforcement des densités entre 1995 et 2014 y est observable. Les foyers de peuplements habituellement localisés dans le Sud et le Nord-Ouest d'Anjouan se sont, en effet, fortement densifiés au cours de cette période. Un renforcement des densités s'est produit, par ailleurs, dans des zones habituellement vides. Cette densification se fait des côtes vers les régions intérieures de l'île. Aucune région de l'île n'est épargnée par la densification du milieu. Seuls les massifs montagneux à pentes trop raides et hostiles à l'installation de villages sont préservés de ces pressions (Figures 5 et 6)

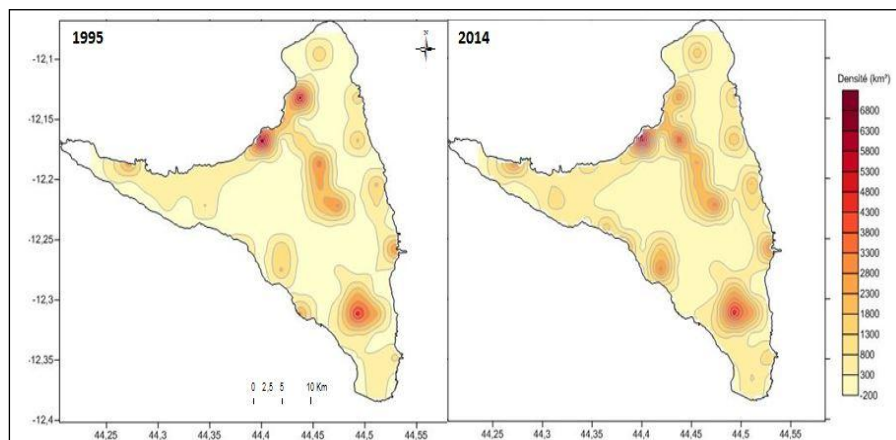


Figure 5 : Répartition des densités au km² à Anjouan en 2003 et 2014

Les fortes densités ont entraîné des pressions sur les terres à tel point que toutes les terres potentiellement arables sont presque utilisées, ce qui signifie que les nouvelles terres agricoles se sont créées au fil de temps au détriment des zones forestières (ECDD, BCSF, Durrell, 2013). La densité de la population très élevée de certaines régions d'Anjouan, entraîne l'érosion des sols et la diminution des terres cultivables comme dans la partie Sud à Nyoumakele (Hassani-El-Barwane, 2010).

La croissance rapide de la population et la densité élevée au km² a donc eu pour conséquence, l'expansion des zones agricoles. Cette expansion agricole tire sous origine du début des années 70. En effet, sous le premier mandat d'Ali Soilih en 1975, l'agriculture était fortement encouragée, avec la possibilité de mettre en cultures des forêts (Héron, 2005). Dès lors la production agricole n'a cessé d'augmenter, particulièrement sur l'île d'Anjouan, qui alimente les deux autres îles en produits agricole. En 2004, le secteur agricole représentait pratiquement trois quarts des emplois et plus de 40 % du PIB de l'Union des Comores (FAO, 2007). D'après cette même étude, 50% de la population de l'Union des Comores vit en dessous du seuil de mal nutrition et l'agriculture assure la plus grande partie des exportations, constituées à plus de 90% de clou de girofle, de vanille et surtout d'huile essentielle d'ylang-ylang dont les Comores assurent 60% de la production mondiale.

À côté de l'impact de l'agriculture sur les forêts, on note les activités non agricoles, comme la coupe des arbres qui constituent une source de revenu pour les paysans. En effet, n'ayant aucun revenu pour subvenir aux besoins de leurs familles, certains paysans non agriculteurs n'ont comme seul autre moyen de subsistance que la coupe de bois, qui est utilisée, soit pour du bois d'œuvre (fabrication des meubles, pirogues...), soit pour de l'énergie (charbon de bois et bois de chauffe). La production de charbon et la culture sur brûlis représentent des menaces majeures, en particulier au regard de la rapidité de la croissance démographique, mesurée au-delà de 2.5 % par an aux Comores (UNESA, 2005).

Les espèces ligneuses sont utilisées dans le secteur domestique (78 % d'énergie du pays), dont c'est la principale source d'énergie, et dans les distilleries d'ylang-ylang. La coupe de bois qui se faisait auparavant manuellement (à la hache), est aujourd'hui automatisée (tronçonneuse) (Abdermane, 2007), intensifiant ainsi la coupe de bois. L'intensification de ces pratiques est inquiétante car elle cause la détérioration des derniers vestiges de végétation naturelle dont des grands arbres, habitat notamment des espèces endémiques d'Anjouan telles que le Roussette de Livingstone et du lémurien de l'espèce de lémurs mongos (Granek, 2000).

Parallèlement, les conditions climatiques observées ces dernières années pourraient accentuer la dégradation des massifs forestiers. Selon le dernier rapport ⁷PANA, les agriculteurs s'accordent à dire que le climat est «

⁷ Programme d'Action National d'Adaptation aux changements climatiques

dérégulé ». Ce caractère anormal du climat est illustré par de nombreuses observations empiriques. Ils observent un décalage des saisons, entraînant ainsi une perturbation du calendrier agricole. L'évolution des conditions climatiques a pour conséquences environnementales le déplacement des périodes de végétation, la précocité de la floraison des arbres, le retard dans la maturation des fruits ainsi que des changements dans les aires de distribution géographique d'un certain nombre d'espèces végétales et animales (PANA, 2006).

Malgré les multiples pressions que subit l'île d'Anjouan, on observe encore de nos jours quelques forêts denses, appelées « forêt galerie » qui abritent les espèces animales et végétales menacées. La sauvegarde de ces forêts est permise grâce au relief très accidenté de l'île.

La figure 6, permet de voir que seules les forêts situées à une altitude très élevée et sur les pentes fortes sont préservées. En comparant les deux situations, on note que, pour les altitudes comprises entre 0 et 600 mètres, le pourcentage de forêt dense est nul pour l'année 2014, alors qu'il était, pour cette même altitude à environ 3% en 1995. L'étalement des zones d'habitations pourrait expliquer ce constat. En effet entre 1995 et 2014, on observe une expansion et une densification de la tache urbaine (Figure 4), réduisant ainsi les distances avec les forêts et facilitant la pénétration des populations dans les zones de forêt pour l'agriculture.

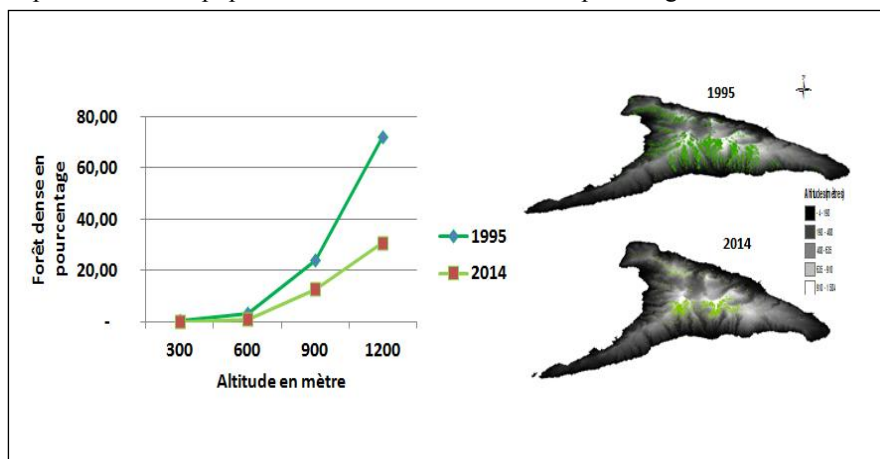


Figure 6 : Variation de la couverture forestière en fonction de l'altitude

On remarque également que le pourcentage des forêts en haute altitude (supérieur à 900 mètres) a considérablement baissé en 2014. En 1995, 45% de forêt étaient situés à plus de 900m. En 2014, il n'en restait plus que 20 %. Ce qui signifie que les paysans s'aventurent de plus en plus sur les massifs montagneux et que seules les pentes élevées bloquent encore leurs progressions.

4. Conclusion

Dans ce pays où très peu d'information spatio-temporelle existe sur l'évolution de la couverture terrestre, le recours de la télédétection a permis dans cette étude, de mettre en évidence les dynamiques d'occupation des sols, par le traitement des images SPOT 3 et 4 de 1995 et 2014.

Les résultats indiquent que les superficies forestières (forêt dense) de l'île d'Anjouan ont diminué de 18 % pendant cette période. Cette diminution des superficies forestières s'est faite au profit des terres agricoles, qui quant à elles, ont subies une augmentation de 19 %.

La forte croissance démographique et les densités élevées de population au km² pourraient expliquer les dynamiques d'occupation des sols observées pendant la période d'étude. En effet, la croissance rapide de la population, entraîne une pression de plus en plus importante sur le domaine forestier du fait de l'augmentation de la demande en produit vivrier.

Les derniers massifs forestiers, et donc des espèces endémiques observable de nos jours, doivent leurs sauvegardes au relief très accidenté de certaine région de l'île.

Il est souhaitable d'étendre cette étude sur les deux autres îles de l'Union des Comores (Grande-Comore et Mohéli), en utilisant des images de résolution spatiale plus fine de type pléiades (0.5 mètres de résolution) et de modéliser l'évolution future des derniers massifs forestiers de ce pays sous l'action de pressions humaines de plus en plus intenses. Ces produits (cartes, tableaux) pourraient ainsi être mis à la disposition des gestionnaires et politiques afin de sensibiliser la population sur le risque de disparition complète des forêts.

Bibliographies

- ABDEREMANE, Andilyat MOHAMED (2007). Etude écologique de la Forêt du Mont Karthala:(Grande-Comore): Ethnobotanique. In : Typologie, Régénération naturelle, Evolution spatio-temporelle et Zonation potentielle en site de conservation, Antananarivo, mémoire de DEA en Biologie et écologie végétale, 139p.
- ABREU FUENTES, Yuselys,(2009). Diagnostic des systèmes d'élevage bovin et des pratiques de fumure animale dans les villages de Kowet et Ouzini, Anjouan, Union des Comores. Montpellier. 21p
- AGRAAR-UND HYDROTECHNIK GMBH (1987). Carte d'occupation des terres aux Comores (Rapport non publié)
- AMIR A. (2010). Contribution de la télédétection et des SIG au suivi de l'environnement et des risques naturels sur les îles Comores. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Information Géographique, Université Paris-Est & Université d'Antananarivo, 131 p.
- BATTISTINI R. & VERIN P (1984). Géographie des Comores. Paris : NATHAN, 142 p.
- Caloz, R. et Collet, C (2001).Précis de Télédétection, vol. 3 : Traitements numériques d'images de télédétection. Presses de l'Université du Québec et Agence universitaire de la Francophonie, Sainte-Foy, 386 p.
- CBD. (2000)- Stratégie nationale et plan d'action pour la conservation de la diversité
- Direction Générale du Recensement (2007). Résultats du recensement général de la population et de l'habitat en 2003, Moroni.
- ECDD, BCSF, DURRELL (2013). Engagement Communautaire pour le Developpement Durable [en ligne]. Union des Comores. Disponible à l'adresse : www.ecddcomoros.org.
- FAO(2007).FAOSTAT, <http://faostat.fao.org/desktopdefault.aspx?pageid=342&lang=es&country=45>
- Granek, Elise F (2000) « Conservation des habitats de Roussettes de Livingstone–Les Massifs Forestiers d'Anjouan et Mohéli, Comores: Utilisation d'Indicateurs sociaux et ecologiques ». http://pdxscholar.library.pdx.edu/esm_fac/13/?utm_source=pdxscholar.library.pdx.edu%2Fesm_fac%2F13&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages.
- Godard V. (2005). Typologie des paysages forestiers du sud du massif de Fontainebleau après la tempête de décembre 1999. Évaluation des dégâts forestiers à l'aide d'un semis de points et d'imagerie satellitale optique. Revue Internationale de Géomatique, p 281-302
- HASSANI-EL-BARWANE, Mouhssini(2010). Le système foncier comorien de 1841 à 1975 [en ligne]. S.l. : Institut d'Optique Graduate School. [Consulté le 11 juin 2015]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01077856/document>.
- HÉRON, Raphaëlle (2005). Etat comorien et le developpement agricole. Union des Comores.
- Isaaks, E. H., and Srivastava, R. M. (1989), *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York, 561 pp.
- John Aldrich, « R.A. Fisher and the making of maximum likelihood 1912-1922 », Statistical Science, vol. 12, no 3, 1997, p. 162-176
- Kenny, D. A., Kashy, D. A. et Cook, W. L.,(2006). *Dyadic data analysis*. New York: Guilford Press.41p
- LANLY, J. P (2003). Les facteurs de déforestation et de dégradation des forêts. In : XII World Foresty Congress. Invited paper. <http://www.fao.org/docrep/article/wfc/xii/ms12a-e.htm>. S.l. : s.n. 2003.
- MAS, J.F (2000). Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. Journal Canadien de Télédétection,vol. 26, n° 4, pp. 349-362.
- Moulaert, Nathalie (1998). "Etude et conservation de la forêt de Mohéli (RFI des Comores), massif menacé par la pression anthropique." Communauté française de Belgique: Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Belgique
- Ministère du Développement Rural, de la Pêche, de l'Artisanat et de l'Environnement- MDRPAE (2006). Programme d'Action National d'Adaptation aux changements climatiques (PANA). Union des Comores
- NOURDDINE, Mirhani (2014). Dynamiques d'évolution des géosystèmes en milieu tropical humide insulaire: Approche par les bassins versants d'Anjouan aux Comores [en ligne]. S.l. : Université d'Angers; Université de Toliara. [Consulté le 7 juin 2015]. Disponible à l'adresse : <http://hal.univ-nantes.fr/tel-01044456/>.
- PNUD (2006). Rapport national sur le développement humain (Union des Comores).http://www.km.undp.org/doc/rndh_06.pdf (consulté le 29/10/2010).

Richards, J.A., 1999, Remote Sensing Digital Image Analysis, Springer-Verlag, Berlin, p. 240.

SAIDO(2005). RAPPORT NATIONAL SUR L'ETAT DES RESSOURCES GENETIQUES ANIMALES. Union des Comores.

SIBELET N., 1995, L'innovation en milieu paysan ou la capacité des acteurs locaux à innover en présence d'intervenants extérieurs, Nouvelles pratiques de fertilisation et mise en bocage dans le Niumakélé (Anjouan, Comores), mémoire de thèse, Institut National Agronomique Paris-Grignon.

United Nations Economic and Social Affairs (2005). "Trends in Total Migrant Stock: The 2005 Revision.

E)Présentation poster à la conférence internationale en France : SAGEO'2016 - Spatial Analysis and GEOmatics (7-9 décembre, Nice)

Analyses des cycles saisonniers de la végétation en lien avec les variations saisonnières des précipitations à partir des données de Télédétection basses résolutions spatiales NDVI (MODIS) et de précipitation (TRMM)

G.B. Boussougou¹, Y.T.Brou^{1,2}, P. Valimba³

^{1,2} UMR ESPACE-DEV (UAG, UM2, UR) / SEAS-OI, Université de La Réunion,

40, Avenue de Soweto (IUT), 97410 Saint Pierre

guyboussougou@yahoo.fr

³. Université de Dar Es Salaam, *College Engineering and Technology (COET)*

RESUME : L'eau est le facteur principal de la croissance de la végétation des régions tropicales. Dans cette étude à partir des données de télédétections basses résolutions, nous nous proposons de montrer les corrélations spatiales entre les pluies et les végétaux en Tanzanie entre 2001 et 2013. Pour cela, on utilise les données satellites d'indice de végétation du capteur MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) et des données pluviométriques obtenues par TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission). Dans un premier, des séries temporelles des NDVI et des précipitations ont été créées. Par la suite les calculs statistiques (moyennes annuelles coefficients de corrélations) ont permis de spatialiser les variations pluies et de la distribution de l'activité végétale. Les forts coefficients de corrélations (supérieur à 0.50) permettent de voir que le centre du pays est la région où se localisent les végétaux les plus sensibles (savanes, prairie) qui ont une réponse précoce aux pluies, contrairement aux zones de forêts du sud qui ont eu, une réponse tardive (plus d'un mois de décalage) faces aux précipitations.

MOTS-CLES : NDVI, précipitation, corrélation, Tanzanie, Télédétection

ABSTRACT: Water is the main factor in the growth vegetation in tropical regions. In this study from remote sensing low resolution data, we intend to show the spatial correlations between seasonal cycles of rainfall and plant in Tanzania between 2001 and 2013. For this, we use satellite data of vegetation index MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) and rainfall data from TRMM (Tropical rainfall Measuring Mission) .In a first time series of NDVI and rainfall have been created. Subsequently statistical calculations (annual, correlation coefficients) allowed spatialize seasonal variations in rainfall. The strong correlation coefficients (greater than 0.50) to see that the center of the country is the region or locate the most susceptible plants (savannah grassland) have an early response to rainfall, unlike the southern forest areas have a late response (more than one month lag) precipitation variations.

KEYWORDS: NDVI, PRECIPITATION, CORRELATION, TANZANIA, REMOTE SENSING

1. Introduction

Les précipitations représentent l'élément prépondérant de la diversification des paysages forestiers tropicaux (Meneses-Tovar, 2011 ; Dupuy et al, 1999 ; Brou et al, 2004). En Afrique, beaucoup d'études sur le lien pluie/végétation restent régionale (Nicholson et al. 1990 ; Fuller et Prince, 1996 ; Richard et Pocard, 1998) et n'ont pas permis de répondre à toutes les questions sur les relations entre ces deux paramètres, à une échelle nationale. Existe-t-il des différenciations spatiales dans la réponse végétale face aux précipitations?

L'objectif de cette étude est donc d'apporter quelques réponses à cette interrogation à l'échelle du territoire Tanzanien (pays d'Afrique de l'Est en bordure de l'océan indien, dans la partie tropical sud).

2. Données et méthodologie

-Les données de l'étude sont :

1) Données d'estimation de pluies par satellite de la Rainfall Monitoring Mission (TRMM), à une résolution spatiale de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, agrégées au pas de temps mensuelle (TRMM 3B43) ; 2) Données de l'indice de végétation normalisé (Normalized Difference Vegetation Index : NDVI) (Tucker, 1979) issus des produits MODIS de résolution spatiale 250m ; 3) La carte d'occupation de sol de Tanzanie à une résolution spatiale de 300m (Globcover, ESA).

-La méthodologie est résumée comme suit :

A) : Archivages des données et création des séries temporelles de NDVI (276 images) et TRMM (156 images) ; B) Ré-échantillonnage des données NDVI à la résolution 0.25° et agrégés mensuellement ; C) calcul de la valeur moyenne de NDVI et pluie sur la période 2001-2013 ; D) calcul du coefficient de corrélation (Goupe, 2001) pixel de NDVI par pixel de pluie TRMM. La moyenne mensuelle de chaque mois de NDVI et pluie sur la période sert pour le calcul de corrélation. La corrélation est estimée entre (i) les valeurs moyenne de NDVI pour tous les mois et (ii) les valeurs correspondantes de précipitations. On décale ensuite, le NDVI de 1, 2 et 3 mois après le mois de précipitations pour observer le temps de réponse de la végétation.

3. Résultats

La cartographie moyenne annuelle des pluies et NDVI (2001-2013) permet de spatialiser les pluies et l'activité végétale. La zone de précipitations élevées (humide) au Nord et au Sud-ouest ($> 1128\text{mm}$) correspond aux valeurs de NDVI > 0.60 ; zone de précipitations modérées (sèche) (entre 772 et 962 mm) au Sud-est et Ouest correspond au NDVI moyen (0.46-0.60); zone de « de précipitations faibles ($< 800\text{mm}$) au centre correspond au NDVI < 0.46 .

Le résultat du calcul des coefficients de corrélations est présenté dans la figure 2. Des

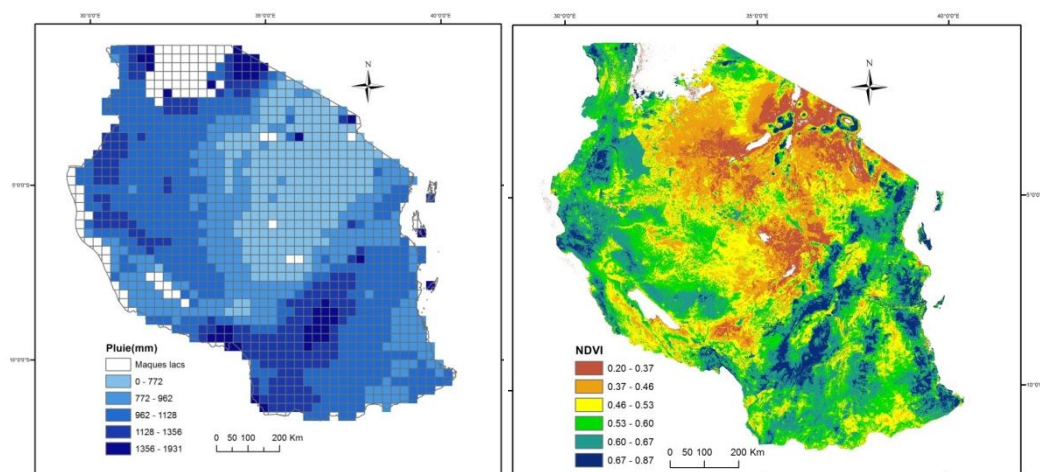


Figure 1: Moyenne annuelle du NDVI (résolution spatiale : 250 m) et pluie (résolution spatiale : 0.25°) sur la période 2001-2013

variations importantes des coefficients sont observées (0.22-0.75) spatialement dans le pays. Les fortes corrélations donnent un seuil de significativité $> 5\%$.

On note, pour 0 mois de décalage, une réponse précoce de la végétation localisée au centre du pays: réaction végétale presque simultanée aux pluies (corrélations > 0.50). A partir de 1 mois de décalage, on observe une réponse tardive à l'Est, Ouest et Sud. Les fortes valeurs de corrélations se déplacent du centre vers le Sud du territoire en fonction du nombre de mois de décalage. On remarque que, les corrélations varient également en fonction du type de végétation (Figure 3, Annexe): La végétation de type 'savane, prairie' aura une réponse rapide (précoce) et la végétation type 'forêt' réagira tardivement aux précipitations. Les valeurs négatives de corrélation signifient un impact négatif des pluies sur cette région du Sud. En effet, dans cette région se trouve l'arc de chaîne de montagne d'Afrique de l'Est qui se prolonge au Sud de Tanzanie. La variation végétale ici, peut être influencée par le relief au profil des précipitations.

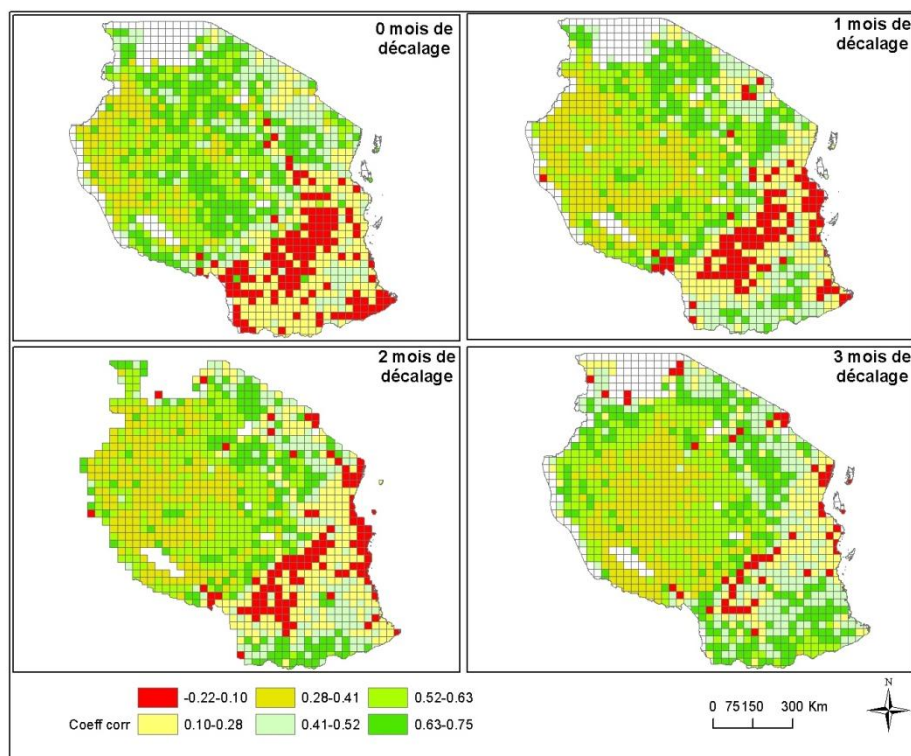


Figure 2: Corrélation Pluie/NDVI et décalage temporel

4. Conclusion

Cette étude a permis de montrer qu'il existe un lien étroit entre la distribution de la végétation et les précipitations à une échelle Nationale (Tanzanie). De même, on a vu qu'il existe un temps de réponse végétale aux pluies qui dépend du nombre de mois de décalage du NDVI, mais aussi du type de végétation. Les savanes et prairies du centre ont une réponse précoce (même mois) tandis que les forêts de l'Ouest, Est et Sud ont une réponse tardive de 1, 2 et 3 mois aux précipitations.

Cette étude peut être améliorée en utilisant l'indice EVI (enhanced vegetation index) à la place du NDVI pour s'affranchir des problèmes de saturation des forêts claires et denses des pays tropicaux.

Bibliographie

- Brou Y. T., Akindès F., Bigot S. (2005). La variabilité climatique en Côte d'Ivoire : entre perceptions sociales et réponses agricoles. Cahiers d'études et de recherches francophones /Agriculture. Vol. 14, no 6, 530-40.
- Dupuy B., Nasi R., Amsallem I., J. Loumeto J., Gérard C., Dupuy B. (1999). Gestion des écosystèmes forestiers denses d'Afrique tropicale humide: 2 : Congo.
- Goupe Chadule (2001): Initiation aux pratiques statistiques en géographie. Collection U, série «Géographie», Edition Armand Colin, pp.103 et 109-110.
- Meneses-Tovar, C. L. 2011. NDVI as indicator of degradation. Unasylva, 8p.
- Nicholson Se, Davenport MI, Malo Ar 1990. A Comparison of the Vegetation Response to Rainfall in the Sahel and East Africa, Using Normalized Difference Vegetation Index from NOAA AVHRR. Climatic Change 17, 209-241.

Richard Y, Pocard I. 1998. NDVI sensitivity to spatial and interannual rainfall variations in southern Africa. International Journal of Remote Sensing, 19, 2907-2920.

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 8, 127-150.

http://www.glcen.org/databases/lc_gc-africa_en.jsp

Annexe:

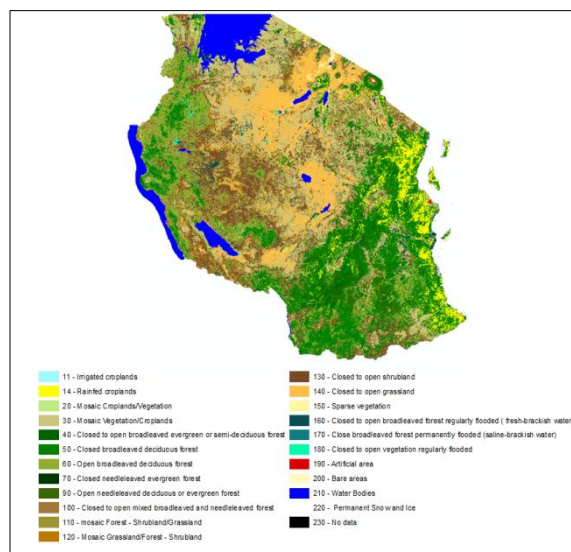


Figure 3 : Carte d'occupation de sol Tanzanie (2005)

F)Présentation poster au colloque internationale de l'ESA en République tchèque : Living Planet Symposium 2016 (9-13 mai, Prague)

Paper 2734 - Session title: Land Posters

LAND-294 - Exploitation des Données NDVI (MODIS) et Pluie (TRMM) pour l'évaluation de la Sensibilité de la Végétation aux Précipitations en Tanzanie

Boussougou, Guy (1); Brou, Téléphore (2); Valimba, Patrick (3) *1: University, Réunion (France); 2: UMR ESPACE-DEV (IRD, UM2, UAG, UR), University, Réunion (France); 3: College of Engineering and Technology, Université de Dar ES Salaam, Tanzania*

Résumé

L'eau est le facteur principal de la croissance de la végétation mondiale. L'absence de cette ressource entraîne le déséquilibre de la phénologie végétale. Dans les pays en voie de développement ou très peu de stations de mesures climatologiques existent, les relations spatio-temporelles entre la variabilité pluviométrique et la dynamique saisonnière et pluriannuelle restent mal connus. Nous explorons dans cette étude, la réponse de la végétation aux précipitations en Tanzanie de 2001 à 2013. Pour cela, on utilise les données satellites d'indice de végétation du capteur MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) et des données pluviométriques obtenues par TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission). Dans un premier temps les données ont été traitées pour constituer des séries d'images temporelles et dans un second temps des calculs statistiques (synthèses, Composantes principales, coefficient de corrélation...) ont été appliqués sur les séries d'images. Les résultats montrent qu'il existe une répartition spatiale des pluies en 9 régions climatiques. Les régions du nord par exemple restent humides toute l'année. La réponse de la végétation aux précipitations dans les différentes zones climatiques indique que l'intérieur du pays est plus sensible aux pluies que l'Est du territoire. Cette sensibilité dépend de la hauteur de pluies tombées, mais surtout du type d'occupation des sols. On obtient une corrélation élevée (0,85) entre la pluviométrie et le NDVI de la végétation de type "savane" prédominant dans les terres centrales, tandis qu'une faible corrélation (0,49) est obtenue dans la partie Est dominée par des "surfaces urbaines". A une échelle plus locale, les corrélations de NDVI et les pluies in situ permettent de confirmer cette relation observée à l'échelle du pays. Elles permettent également de relever l'existence d'un décalage temporel entre le démarrage de la saison végétative et celle des précipitations. En effet, les pluies du mois de janvier déclenchent le début du cycle phénologique de la végétation en zone sèche le même mois (déphasage nul), alors que pour la végétation en zone humide le démarrage de la saison végétative se fait le mois suivant (déphasage d'un mois). L'utilisation des données satellites, nous a permis de montrer qu'il existe une bonne corrélation entre les types de végétation et les précipitations en Tanzanie.

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	2
SOMMAIRE	3
LISTE DES ACRONYMES	5
RESUME.....	6
ABSTRACT	8
INTRODUCTION.....	10
1.1 - Contexte, problématiques et objectifs	11
1.2 - Contexte environnemental en Tanzanie	18
1.2.1 - Situation géographique	18
1.2.2 - La topographie	18
1.2.3 - Cadre climatique	19
1.2.4 - Région agro-écologique de Tanzanie.....	19
1.2.5 - La végétation.....	21
1.3 - Contexte environnemental des réserves forestières au sud-est de Tanzanie : les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi	24
1.3.1 - Pressions anthropiques à la périphérie des réserves forestières	26
1.3.2 - Evolution de la population	26
1.3.3 - Pression foncière.....	28
1.3.4 - Surexploitation du bois	28
1.3.5 - Pression sur les limites des réserves	29
1.3.6 - Importance des réserves forestières pour les villageois périphériques.....	31
CHAPITRE 1 - DONNEES ET METHODES ADOPTEES DANS L'ETUDE	33
1.1 - Les données satellites disponibles	34
1.1.1 - Rappel des principes fondamentaux de la télédétection.....	34
1.1.2 - Les données de végétation	35
1.1.2.1 - Indices de végétation	35
1.1.2.2 - Les données NDVI MODIS	36
1.1.3 - Les données climatiques	36
1.1.3.1 - Données d'estimation des pluies tropicales par satellite (TRMM).....	36
1.1.4 - Les images hautes résolutions spatiales	37
1.1.4.1 - Données LANDSAT	38
1.1.4.2 - Données SPOT	38
1.2 - Autres données	40

1.2.1 - Données d'occupation du sol 2005 de Tanzanie (GLOBCOVER)	40
1.2.2 - Données pluviométriques issues des stations au sol	40
1.2.3 - Les données sur la localisation des villages autour des réserves forestières	41
1.2.4 - Les données de terrain GPS	42
1.3 - Méthodologie générale de l'étude	43
1.3.1 - Prétraitements des données NDVI MODIS et TRMM	44
1.3.1.1 - Création de séries temporelles de NDVI et de TRMM	44
1.3.2 - Traitements des images NDVI MODIS et TRMM	46
1.3.2.1 - L'analyse statistique de la dynamique spatio-temporelle (NDVI, Pluie) : somme, moyenne, coefficient de variation, classification ascendante hiérarchique (CAH)	46
1.3.2.2 - L'analyse statistique de la dynamique spatio-temporelle (NDVI, Pluie)	46
1.3.2.3 - Classification végétale par la méthode de la classification hiérarchique ascendante du NDVI MODIS (CAH)	47
1.3.2.4 - Caractéristique de la végétation : date de début, fin et longueur de saison végétative	47
1.3.2.5 - Les tests de corrélation et de significativité statistiques	48
1.3.2.6 - Analyses en Composante Principale des précipitations TRMM (ACP)	49
1.3.2.7 - Détermination des années sèches et humides : Indice de Nicholson	49
1.3.2.8 - Le coefficient de corrélation (r)	49
1.3.3 - Prétraitements des images LANDSAT et SPOT de l'étude	50
1.3.3.1 - Correction radiométrique	51
1.3.3.2 - Correction géométrique	51
1.3.4 - Traitements des images à haute et très haute résolution spatiale LANDSAT et SPOT	51
1.3.4.1 - La méthode de classification	51
1.3.5 - Modélisation des zones de pression anthropique par l'Evaluation Multicritères (EMC)	53
1.3.5.1 - Facteurs et contraintes	53
1.3.5.2 - La logique floue	54
1.3.6 - Modélisation prospective LCM	55
1.3.6.1 - Justification du choix du modèle LCM	56
1.3.6.2 - Réseau neuronal	57
1.3.6.3 - Chaîne de Markov	58

CHAPITRE 2 - ETUDE DES RELATIONS PLUIE ET COUVERT VEGETAL DE 2001 A 2013 A L'ECHELLE DES GRANDES ZONES BIOCLIMATIQUES DE LA TANZANIE A PARTIR DES IMAGES BASSE RESOLUTION SPATIALE NDVI-MODIS ET TRMM

Introduction	61
---------------------------	-----------

2.1 - Analyse spatio-temporelle des précipitations à l'échelle de la Tanzanie à partir des images basse résolution spatiale NDVI MODIS et TRMM sur la période 2001-2013

2.1.1 - Validation des données d'estimation de pluie par satellite (TRMM)	62
2.1.2 - Spatialisation des précipitations à l'échelle de la Tanzanie sur la période 2001-2013	64
2.1.3 - Variabilité saisonnière des précipitations en Tanzanie	66
2.1.4 - Variation annuelle des précipitations en Tanzanie entre 2001 et 2013	67
2.1.5 - Evolution de l'indice de sécheresse entre 2001 et 2013 en Tanzanie	68
2.1.6 - Analyse de la variabilité des régimes pluviométriques en Tanzanie	69

2.2 - Variabilité de l'activité végétale en Tanzanie.....	75
2.2.1 - Analyse spatio-temporelle de la végétation en Tanzanie	75
2.2.1.1 - Spatialisation de l'activité végétale sur la période 2001-2013 à partir des données NDVI MODIS	75
2.2.1.2 - Variabilité interannuelle du NDVI sur la période d'étude	76
2.2.1.3 - Variation saisonnière de l'activité végétale	76
2.2.1.4 - Suivi du contraste saisonnier végétal.....	76
2.2.2 - Cartographie des classes de NDVI et détermination des profils saisonniers	78
2.2.3 - Détection des ruptures dans les profils des classes de végétation et caractérisation des saisons végétatives.....	80
2.2.3.1 - Tendances des classes de NDVI.....	80
2.2.3.2 - Caractéristiques de la saison végétative : date de début, date de fin et longueur de la saison végétative	82
2.2.3.3 - Analyse des cycles saisonniers de NDVI	84
2.3 - Relation pluie-NDVI.....	87
2.3.1.1 - Corrélation entre classes de NDVI et précipitation	87
2.3.1.2 - Corrélation pluie-NDVI par pixel.....	89
2.4 - Conclusion du chapitre 2.....	93

CHAPITRE 3 - MODIFICATION DE LA COUVERTURE VEGETALE EN RELATION AVEC LES ACTIVITES HUMAINES A L'ECHELLE LOCALE : RESERVES FORESTIERES DE PUGU ET KAZIMZUMBWI 94

Introduction.....	95
3.1 - Données et méthodes d'analyse des modifications dans la couverture forestières des réserves de Pugu et Kazimzumbwi.....	96
3.1.1 - Les données utilisées.....	96
3.1.2 - Typologie des principales formations végétales dans les réserves forestières Pugu et Kazimzumbwi et dans leur périphérie.....	98
3.1.3 - Démarche générale du traitement des images satellitaires utilisées dans l'étude.....	102
3.1.3.1 - Prétraitements des images LANDSAT	103
3.1.3.2 - Traitement des images SPOT et LANDSAT	105
3.2 - Résultat du traitement des images SPOT 6 et LANDSAT	109
3.2.1 - Analyses des résultats des traitements des images satellitaires SPOT et LANDSAT	109
3.2.1.1 - Etat de l'occupation du sol dans les réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi et de leurs périphéries à partir de l'image SPOT 6 de juillet 2015.....	109
3.2.1.2 - Evolution de l'occupation du sol entre 1995 et 2014	114
3.3 - Localisation spatiale des zones à pressions anthropiques à la périphérie des réserves forestières de Pugu et Kazimzumbwi par une analyse multicritères.....	122
3.3.1.1 - Analyses multicritères (AMC) et modélisation des pressions humaines autour des réserves forestières	122
3.3.1.2 - Identification des facteurs et contraintes	123
3.3.1.3 - Évaluation multicritère et pondération	131
3.3.2 - Résultat de l'analyse multicritères	133

3.4 - Conclusion du chapitre 3.....	135
CHAPITRE 4 - MODELISATION PROSPECTIVE DE L'OCCUPATION DU SOL A L'ECHEANCE 2050.....	136
Introduction.....	137
4.1 - Land Change Modeler (LCM).....	138
4.1.1 - Méthodologie	138
4.1.2 - Facteurs explicatifs des changements observés	140
4.1.3 - Validation	143
4.2 - Résultat de la modélisation prospective.....	145
4.2.1 - Analyse de la relation entre les variables explicatives et la carte des changements 1995-2014	145
4.2.1.1 - Transition potentielle	146
4.2.1.2 - Validation du modèle	148
4.2.2 - Carte d'occupation du sol prédite en 2016.....	148
4.2.2.1 - Analyse de l'indice Kappa entre l'occupation du sol simulée et observée en 2016	149
4.2.2.2 - Analyse de la matrice prédiction du modèle.....	149
4.2.3 - Evolution future de l'occupation du sol en 2050	150
4.2.3.1 - Présentation du scénario 2050	150
4.2.4 - Discussion.....	153
4.3 - Conclusion du chapitre 4.....	157
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	158
Synthèse des analyses menées.....	159
Perspectives de recherche	160
BIBLIOGRAPHIE	162
LISTE DES PHOTOGRAPHIES	179
LISTE DES FIGURES.....	180
LISTE DES EQUATIONS.....	183
LISTE DES TABLEAUX	184
ANNEXES.....	186
TABLE DES MATIERES.....	208

LETTRE D'ENGAGEMENT DE NON-PLAGIAT

Je, soussigné(e) Guy BOUSSOUGOU BOUSSOUGOU, en ma qualité de doctorant(e) de l'Université de La Réunion, déclare être conscient(e) que le plagiat est un acte délictueux passible de sanctions disciplinaires. Aussi, dans le respect de la propriété intellectuelle et du droit d'auteur, je m'engage à systématiquement citer mes sources, quelle qu'en soit la forme (textes, images, audiovisuel, internet), dans le cadre de la rédaction de ma thèse et de toute autre production scientifique, sachant que l'établissement est susceptible de soumettre le texte de ma thèse à un logiciel anti-plagiat.

Fait à Saint-Denis le 13/10/2017

Signature :



Extrait du Règlement intérieur de l'Université de La Réunion
(validé par le Conseil d'Administration en date du 11 décembre 2014)

Article 9. Protection de la propriété intellectuelle – Faux et usage de faux, contrefaçon, plagiat

L'utilisation des ressources informatiques de l'Université implique le respect de ses droits de propriété intellectuelle ainsi que ceux de ses partenaires et plus généralement, de tous tiers titulaires de ces droits.

En conséquence, chaque utilisateur doit :

- utiliser les logiciels dans les conditions de licences souscrites ;
- ne pas reproduire, copier, diffuser, modifier ou utiliser des logiciels, bases de données, pages Web, textes, images, photographies ou autres créations protégées par le droit d'auteur ou un droit privatif, sans avoir obtenu préalablement l'autorisation des titulaires de ces droits.

La contrefaçon et le faux

Conformément aux dispositions du code de la propriété intellectuelle, toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle d'une œuvre de l'esprit faite sans le consentement de son auteur est illicite et constitue un délit pénal.

L'article 444-1 du code pénal dispose : « Constitue un faux toute altération frauduleuse de la vérité, de nature à causer un préjudice et accomplie par quelque moyen que ce soit, dans un écrit ou tout autre support d'expression de la pensée qui a pour objet ou qui peut avoir pour effet d'établir la preuve d'un droit ou d'un fait ayant des conséquences juridiques ».

L'article L335_3 du code de la propriété intellectuelle précise que : « Est également un délit de contrefaçon toute reproduction, représentation ou diffusion, par quelque moyen que ce soit, d'une œuvre de l'esprit en violation des droits de l'auteur, tels qu'ils sont définis et réglementés par la loi. Est également un délit de contrefaçon la violation de l'un des droits de l'auteur d'un logiciel (...) ».

Le plagiat est constitué par la copie, totale ou partielle d'un travail réalisé par autrui, lorsque la source empruntée n'est pas citée, quel que soit le moyen utilisé. Le plagiat constitue une violation du droit d'auteur (au sens des articles L 335-2 et L 335-3 du code de la propriété intellectuelle). Il peut être assimilé à un délit de contrefaçon. C'est aussi une faute disciplinaire, susceptible d'entraîner une sanction.

Les sources et les références utilisées dans le cadre des travaux (préparations, devoirs, mémoires, thèses, rapports de stage...) doivent être clairement citées. Des citations intégrales peuvent figurer dans les documents rendus, si elles sont assorties de leur référence (nom d'auteur, publication, date, éditeur...) et identifiées comme telles par des guillemets ou des italiques.

Les délits de contrefaçon, de plagiat et d'usage de faux peuvent donner lieu à une sanction disciplinaire indépendante de la mise en œuvre de poursuites pénales.