



HAL
open science

Dynamique de l'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé (nord-ouest bénin) : de l'analyse diachronique à une modélisation prospective

Bidossèssi Thierry Agbanou

► **To cite this version:**

Bidossèssi Thierry Agbanou. Dynamique de l'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé (nord-ouest bénin) : de l'analyse diachronique à une modélisation prospective. Géographie. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II; Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 2018. Français. NNT : 2018TOU20076 . tel-02476241

HAL Id: tel-02476241

<https://theses.hal.science/tel-02476241>

Submitted on 12 Feb 2020

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 Fédérale



Toulouse Midi-Pyrénées

THÈSE



En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse - Jean Jaurès

Cotutelle internationale avec l'Université d'Abomey-Calavi, Bénin

Présentée et soutenue par :
AGBANOU Bidossèssi Thierry

le mardi 16 octobre 2018

Titre :

Dynamique de l'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé (nord-ouest Bénin) : De l'analyse diachronique à une modélisation prospective

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED TESC : Géographie et aménagement

Unité de recherche :

Géographie de l'Environnement (GEODE) UMR 5602 CNRS

Directeur/trice(s) de Thèse :

PAEGELOW Martin (Professeur, GEODE, Université Toulouse Jean Jaurès, France)
TENTE A. H. Brice (Professeur, LABEE, Université d'Abomey-Calavi, Bénin)

Jury :

Rapporteurs

KOLA Edinam (Professeur, FSHS, Université de Lomé, TOGO)

SOKEMAWU Koudzo (Professeur, FSHS, Université de Lomé, TOGO)

Autres membres du jury

DOSSOU-GUEDEGBE Odile (Professeur, DGAT, UAC, Bénin)

TOKO IMOROU Ismaïla (Maître de Conférences, HDR- DGAT, UAC, Bénin)

TENTE A. H. Brice (Professeur, DGAT, UAC, Bénin)

PAEGELOW Martin (Professeur, DGA, UT2J, France)

« L'avenir ne se prévoit pas, il se prépare. »

M. Blondel

Fondée sur des valeurs humanistes, la prospective territoriale a pour ambition d'explorer et d'interroger collectivement le futur des territoires. Elle ne cherche pas à prédire l'avenir mais à le préparer, en offrant une place, des marques et des responsabilités à ceux qui habitent un territoire.

SOMMAIRE

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	4
REMERCIEMENTS	7
RESUME.....	9
INTRODUCTION GENERALE.....	11
PREMIERE PARTIE : CADRE THEORIQUE, GEOGRAPHIQUE ET DEMARCHE METHODOLOGIQUE	14
Chapitre I : Cadre théorique et géographique	15
Chapitre II : Démarche méthodologique	45
DEUXIEME PARTIE : ANALYSE DE L'EMPRISE SPATIALE A TRAVERS LE SUIVI DE L'OCCUPATION DU SOL	81
Chapitre III : Cartographie de la dynamique paysagère du milieu entre 1987 et 2016.....	82
Chapitre IV : Principaux facteurs de changements spatiaux.....	131
TROISIEME PARTIE : SIMULATION PROSPECTIVE DE L'OCCUPATION DU SOL	165
Chapitre V : Modélisation prospective de l'occupation du sol avec le modèle Perceptron multicouche : Land Change Modeler (LCM)	166
Chapitre VI : Scénarios prospectifs, discussion et limites de l'étude	190
CONCLUSION GENERALE	218
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	221
ANNEXES.....	244
LISTE DES TABLEAUX	260
LISTE DES FIGURES.....	261
LISTE DES PHOTOS.....	265

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

ABE :	Agence Béninoise pour l'Environnement
AC :	Automate Cellulaire
ASECNA :	Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar
BAU :	Business As-Usual
CARDER :	Centre d'Action Régionale pour le Développement Rural ex CeRPA
CER :	Croissance Economique Rapide
CeRPA :	Centre Régional pour la Promotion Agricole
CENATEL :	Centre National de Télédétection et de Suivi Ecologique
CLUE :	Conversion of Land Use and its Effects
CNES :	Centre National d'Etude Spatiale
DEC :	Durabilité Environnementale Coordinnée
ETM+ :	Enhanced Thematic Mapper Plus
ETP :	Evapotranspiration Potentielle
FAO :	Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)
FIT:	Front Inter-tropical
GLCF:	Global Land Cover Facility
GPS :	Global Positioning System
IGB :	Institut Géographique du Burkina-Faso
IGN :	Institut Géographique National
INRAB :	Institut National de la Recherche Agricole au Bénin
INSAE :	Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique
IRD :	Institut de Recherche pour le Développement
ISP :	Indice Standardisé des Précipitations
LABEE :	Laboratoire de Biogéographie et Expertise Environnementale
LCM :	Land Change Modeler
LUCC :	Land-Use and Land-Cover Change
MAEP :	Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche
MLP :	Multi-Layer Perceptron
MNT :	Modèle Numérique de Terrain
MODIS :	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NDVI :	Indices Différentiels Normalisés de Végétation

NTV : Non Tree Vegetation
 NV : Non Vegetation
 OBIA : Object-Based Image Analysis (Approche Orientée Objet)
 ODD : Objectifs de Développement Durable
 OMM : Organisation Mondiale de la Météorologie
 ONG : Organisation Non Gouvernemental
 PGTRN : Programme de Gestion des Terroirs et des Ressources Naturelles
 PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement
 RFU : Réserve Facilement Utilisable
 RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitation
 RNIE : Route Nationale Inter Etat
 ROC : Relative Operating Characteristics
 SIG : Système d'Information Géographique
 SMA : Système multi-agent
 SPSS : Statistical Package for the Social Sciences
 SRTM : Modèle Digitale d'Elévation
 TC : Tree Cover
 TM : Thématic Mapper
 UNESCO : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture)
 USGS : US Géological Survey
 VCF : Vegetation Continuous Fields
 ZCIT : Zone de Convergence Intertropicale

DEDICACE

A tous mes parents

à mon épouse Lucrece Sylviane YOLOU

à mes enfants Exhaussé et Miguel

REMERCIEMENTS

Cette thèse n'aurait pu aboutir sans la contribution scientifique de nombreuses personnes dans les Universités d'Abomey-Calavi au Bénin et de Toulouse en France. La liste n'est pas exhaustive.

Tout d'abord, je tiens à remercier nos encadreurs, TENTE Brice, Professeur Titulaire de Géographie de l'Université d'Abomey-Calavi du Bénin et PAEGELOW Martin, Professeur Titulaire de Géographie à l'Université de Toulouse Jean Jaurès en France pour avoir accepté d'encadrer cette thèse. La rigueur au travail qu'ils m'ont imposé et leur sympathie tout au long de cette thèse a été indispensable pour obtenir à ces résultats ici compilés.

J'adresse mes vifs remerciements au Professeur TOKO IMOROU Ismaïla du département de Géographie (Université d'Abomey-Calavi) et au Professeur SHEEREN David de l'INP-ENSAT et du Laboratoire DYNAFOR de l'Université Paul Sabatier de Toulouse pour avoir suivi particulièrement cette thèse. Leur disponibilité et leur conseils ne m'ont jamais fait défaut à toutes les étapes de cette thèse.

Profonds remerciements aux Professeurs BOKO Michel (Ex-Directeur de l'Ecole Doctorale Pluridisciplinaire de la FLASH) et SINSIN Brice (Ex-Recteur de l'Université d'Abomey-Calavi) qui ont accepté de conclure cette cotutelle de thèse grâce aux capacités managériales du Professeur TENTE Brice.

Merci aux enseignants du Département de Géographie et Aménagement du Territoire (DGAT) de l'Université d'Abomey-Calavi pour ma formation. Sincère reconnaissance au chef du Département le Docteur GIBIGAYE Moussa et son adjoint le Docteur Toussaint VIGNINOÛ pour leur soutien tout au long de cette thèse.

Que Monsieur GALOP Didier, Directeur du laboratoire GEODE (UMR 5602 du CNRS) de l'Université Toulouse Jean Jaurès trouve ici, toutes mes sincères reconnaissances pour m'avoir accueillie pour mes jours doctoraux dans ce laboratoire, un environnement propice au travail de recherche.

Je ne suis pas en droit d'oublier la disponibilité du Docteur MAESTRIPIERI Nicolas qui m'a aidé par ces orientations pour la réussite de la partie modélisation de ce document.

Merci à SAQALLI Mehdi et SELLERON Gilles, chargés de recherche au CNRS pour leurs nombreux conseils et orientations scientifiques.

Un sincère merci à BARCET Hugues, Ingénieur d'étude CNRS, pour ses aides techniques, pour ses talents de cuisinier et d'humour. Merci à BUSCAINO Sandrine et GIL Emilie pour leur amitié, leur bonne humeur et le café de tous les jours.

Merci aux Professeur OREKAN Vincent et au Dr ABDOULAYE Djafarou pour leur soutien de tout gens. Merci aux camarades de laboratoire de l'UAC, ALLAGBE Simon et CHABI Roméo.

Bien évidemment, je n'oublierai pas les camarades thésard(e)s et post-doc du laboratoire GEODE de Toulouse : BLANPIED Johann, FOUEDJEU F. Léonel, JANTZI Hugo, MOUSSA Yayé, MEJEAN Romain, GROPARU Tiberiu, DAVID Mélodie et DE MENDOZA Guillermo. Merci pour l'ambiance et la convivialité qui a toujours régné en notre sein.

Profonde reconnaissance à mon épouse YOLOU Lucrèce Sylviane et mes enfants Exhaussé et Miguel AGBANOU qui ont accepté tous les sacrifices et désagréments que mes absences répétées chaque année ont causé.

Je tiens à exprimer mon amitié à ma famille d'accueil à Toulouse, notamment SEDJRO Audrey et son épouse pour leurs aides et leur sens de fraternité.

Sincère merci à la Mission de l'Ambassade de France au Bénin et, en particulier, Monsieur le Conseiller de Coopération et d'Action Culturelle qui a soutenu financièrement notre travail, notre formation et nos séjours à Toulouse.

Merci enfin à mes parents pour la confiance qu'ils m'ont toujours accordée, pour leurs encouragements et soutien de tous ordres.

RESUME

Au Bénin, les forêts et les savanes sont les types d'occupation du sol prédominants et constituent des systèmes dynamiques dont l'évolution dépend de plusieurs facteurs environnementaux et anthropiques. Dans le secteur Natitingou-Boukombé (Nord-Ouest-Bénin), la plupart de ces écosystèmes sont en dégradation du fait des activités anthropiques accrues. L'objectif de cette étude est de quantifier la dynamique paysagère et d'explorer les futurs possibles de l'occupation du sol à partir des outils de télédétection, de SIG et de la modélisation spatio-temporelle. Les données utilisées sont essentiellement des images satellitaires Landsat TM de 1987, ETM+ de 2000, OLIR TIRS de 2016, des séries d'images Modis VCF et NDVI de 2000 à 2016. Une classification multi-date a permis de quantifier les changements d'occupation du sol dans ce secteur d'étude.

Il ressort des résultats qu'entre 1987 et 2016, le paysage initialement dominé par les forêts claires et savanes boisées (38,81 %) et les savanes arborées et arbustives (25,82 %) en 1987 a été remplacé par des catégories d'occupation du sol dont les plus importantes sont les savanes arborées et arbustives (40,53 %) et les mosaïques de cultures et jachères (50,61 %) en 2016. Les activités anthropiques et les perturbations climatiques sont les principaux déterminants de cette dynamique de l'occupation du sol. Ces facteurs explicatifs combinés à l'analyse prospective a permis d'explorer trois scénarios prospectifs possibles à l'horizon 2031.

Le scénario Business-As-Usual (BAU), extrapolant les tendances actuelles, montre qu'à l'horizon 2031 le paysage de ce secteur d'étude serait dominé par les mosaïques de cultures et jachères (69,64 %), les savanes arborées et arbustives (21,93 %), les savanes saxicoles (3,6 %) et les agglomérations (2,66 %). Dans le scénario Croissance Economique Rapide (CER) qui met l'accent seulement sur l'accroissement des productions agricoles, le paysage sera composé essentiellement de mosaïques de cultures et jachères (73,72 %), les savanes arborées et arbustives (17,35 %), les savanes saxicoles (3,7 %) et les agglomérations (3,06 %). Le scénario Durabilité Environnementale Coordinée (DEC) qui intègre la préservation de l'environnement, présente un paysage essentiellement composé de mosaïques de cultures et jachères (67,97 %), de savanes arborées et arbustives (22,6 %), de savanes saxicoles (3,7 %), d'agglomérations (2,3 %), de forêts claires et savanes boisées (1,7 %) et de plantations (1,05 %). Il y a donc dans ce dernier scénario un effort de restauration des savanes arborées et arbustives, des forêts claires et savanes boisées et des plantations.

Ce paysage dont dépend la survie des populations évolue dans le sens de sa dégradation. Et sans inversion de la tendance actuelle, la situation s'aggraverait d'ici à 2031. Cependant les résultats obtenus avec le scénario Durabilité Environnementale Coordinée (DEC) montrent que l'espoir est permis si les autorités en charge de la gestion du territoire et de l'environnement intègrent le volet préservation de l'environnement dans leurs prises de décisions.

Mots clés : Cartographie, dynamique de l'occupation du sol, facteurs explicatifs, modélisation, Bénin

Abstract:***“LAND USE DYNAMICS IN THE NATITINGOU-BOUKOMBÉ SECTOR: FROM DIACHRONIC ANALYSIS TO PROSPECTIVE MODELLING”***

In Benin, forests and savannahs are the predominant types of land use and constitute dynamic systems whose evolution depends on several environmental and anthropogenic factors. In the Natitingou-Boukombé sector (Northwestern Benin), most of these ecosystems are in degradation due to increased anthropogenic activities. The objective of this study is to quantify the landscape dynamics and explore all possible future land use using remote sensing tools. The data used are mainly Landsat TM satellite images from 1987, ETM+ from 2000, OLIR TIRS from 2016, Modis VCF and NDVI series from 2000 to 2016. A multi-date classification was used to quantify land use changes in this study area.

The results show that between 1987 and 2016, the landscape initially dominated by clear forests and wooded savannahs (38,81%) and wooded savannahs and shrubs (25,82%) in 1987 was replaced by land use categories, the most important of which were wooded savannahs and shrubs (40,53%) and cropland and fallow mosaics (50,61%) in 2016. Human activities and climatic disturbances are the main determinants of this land use dynamics. These explanatory factors, combined with the prospective analysis, made it possible to explore three possible future-oriented scenarios by 2031.

The Business-As-Usual scenario (BAU) extrapolating current trends shows that by 2031 the landscape of this study area will be dominated by mosaics of crops and fallow land (69,64%), tree and shrub savannahs (21,93%), saxicultural savannahs (3,6%) and agglomerations (2,66%). In the Rapid Economic Growth (REC) scenario, which focuses solely on increasing agricultural production, the landscape will consist mainly of mosaics of crops and fallow land (73,72%), wooded savannahs and shrubs (17,35%), saxicultural savannahs (3,7%) and agglomerations (3,06%). The Coordinated Environmental Sustainability (CED) scenario, which incorporates environmental preservation, presents a landscape essentially composed of mosaics of crops and fallows (67,97%), wooded savannahs and shrubs (22,6%), saxicultural savannahs (3,7%), agglomerations (2,3%), clear forests and wooded savannahs (1,7%) and plantations (1,05%). In the latter scenario, there is therefore an effort to restore wooded savannahs and shrubs, clear forests and wooded savannahs and plantations.

This landscape, on which the survival of populations depends, is evolving in the sense of its degradation. And it will get worse by 2031 if nothing is done. But the results obtained in the Coordinated Environmental Sustainability (CED) scenario show that hope is possible if the authorities in charge of land management and the environment integrate the stolen environmental preservation into their decision-making.

Key words: Cartography, Land-Use and Land-Cover Change, explanatory factors, modelling, Benin.

INTRODUCTION GENERALE

La sauvegarde de l'environnement exige une intégration de ses ressources naturelles dans l'aménagement du territoire. De nos jours, ces dernières subissent une exploitation accrue. L'agriculture reste le principal facteur de pression sur l'environnement (Jacquin, 2010). Elle constitue un secteur essentiel dans l'économie de plusieurs pays en développement. En effet, dans la recherche de l'amélioration de leur économie, ces pays notamment subsahariens ont adopté depuis des décennies des politiques orientées vers un accroissement de la production agricole à travers l'augmentation des superficies cultivées. En parallèle, l'explosion démographique a entraîné l'usage de pratiques agricoles non appropriées impactant la qualité environnementale comme une surexploitation des sols et des ressources hydriques ainsi que le surpâturage (Hountondji *et al.*, 2004).

Depuis quelques décennies, le Bénin à l'instar de la plupart des pays en développement, a une économie basée sur l'agriculture. Cette activité agricole occupe de nos jours près de 60 % de la population active, contribue pour 39 % à la constitution du Produit Intérieur Brut (PIB) et procure 90 % des recettes d'exportation du pays (MAEP, 2014). Selon la FAO (2016), le Bénin a connu entre 2000 et 2010 une perte nette de 19 821 ha de forêt contre un gain net de 31 190 ha de superficie agricole. Ceci montre la place prépondérante qu'occupe l'agriculture dans l'économie du Bénin. Mais du fait de cette activité, l'environnement subit de profondes modifications. Malgré le climat favorable, les activités anthropiques freinent le développement du couvert végétal, et donc des ressources naturelles. Ces facteurs exposent de façon permanente les ressources naturelles à des risques de dégradation.

Les Communes de Natitingou et de Boukombé au nord-ouest du Bénin, représentatives de ce phénomène, connaissent un accroissement démographique sensible et une dynamique de l'occupation du sol remarquable, se traduisant par l'emblavure de grandes superficies de terres au détriment de vastes zones de végétation pérenne. Les mutations démographiques engendrent donc de fortes pressions sur les formations naturelles qui se dégradent profondément (Bouko *et al.*, 2007).

L'observation de l'évolution de l'occupation du sol est de plus en plus indispensable, à la fois pour la connaissance d'un territoire et pour son aménagement. Le développement des techniques de la télédétection et du système d'information géographique (SIG) permet une approche de plus en plus précise (El Hage Hassan, 2011). En effet, ce sont les moyens les plus appropriés permettant la connaissance des terrains difficiles d'accès, à observer ou dangereux. Cette méthode permet d'observer l'évolution de l'occupation du sol à partir de l'imagerie

spatiale. Cette technique apporte depuis quelques décennies, une contribution non négligeable à l'étude des mutations spatiales. Grâce à leur large couverture spatiale et leur répétitivité élevée comparativement à des photographies aériennes, les images satellitaires constituent des données privilégiées pour identifier les différences d'état d'une zone en l'observant à des dates différentes (Inglada, 2001). L'exploitation des données satellitaires pour cartographier les changements d'occupation du sol est désormais largement répandue (Girard & Girard, 1999 ; Ulbricht & Heckenford, 1998).

La mise en œuvre d'un développement durable oblige à penser de façon plus approfondie aux devenirs possibles d'un territoire. Pour cela l'approche modélisation est de plus en plus utilisée pour prédire la dynamique des catégories d'occupation du sol dans le temps et dans l'espace. Pour y arriver, les informations collectées à l'échelle de quelques hectares doivent être interpolées à l'échelle de temps et d'espace pour répondre aux problématiques de l'écologie moderne (Chave, 2000). Cette technique permet aux aménagistes d'intégrer dans la gestion des territoires de nouvelles dispositions pour une gestion durable des ressources naturelles.

L'occupation du sol, assez complexe et très dynamique dépend à la fois de facteurs physiques et socio-économiques. Dès lors, la connaissance des caractéristiques des écosystèmes du secteur Natitingou-Boukombé, leur évolution dans le temps et dans l'espace s'avère indispensable pour un aménagement du territoire et une gestion durable des ressources. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce sujet de recherche intitulé « **Dynamique de l'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé (nord-ouest Bénin) : De l'analyse diachronique à une modélisation prospective** ».

Conduite dans une région représentative du domaine soudanien, l'intérêt de cette recherche est de caractériser le paysage actuel et d'évaluer l'état des écosystèmes du secteur Natitingou-Boukombé en apportant quelques précisions relatives à la perception, la représentation et la modélisation du paysage. Pour y arriver, les images satellitaires à haute résolution (SPOT et LANDSAT) seront combinées aux données de terrain (enquêtes socio-économiques).

Cette recherche est structurée en quatre temps (étapes) qui définissent au préalable l'objet d'étude pour ensuite analyser les données, expliquer les résultats obtenus et proposer, éventuellement, de nouveaux modes de gestion. Ces quatre étapes sont ici décomposées en six chapitres regroupés en trois parties qui se présentent comme suit :

La première partie est décomposée en deux chapitres :

- le chapitre premier met en exergue le cadre théorique, physique et humain du milieu d'étude ;

- le deuxième chapitre aborde l’approche méthodologique utilisée pour conduire la présente étude.

La deuxième partie de ce document est subdivisée en trois chapitres que sont :

- le troisième chapitre qui présente la cartographie de la dynamique paysagère du milieu.
- le quatrième chapitre qui présente les principaux facteurs de changements spatiaux observé dans ce milieu.

La troisième partie qui présente la simulation de l’occupation du sol et la discussion est subdivisé en deux chapitres que sont :

- le cinquième chapitre qui présente la simulation et la modélisation la modélisation prospective avec le module Land Change Modeler du logiciel Terrset.
- le sixième et dernier chapitre est consacré à la discussion qui a consisté à analyser et comparer les résultats obtenus avec ceux d’autres auteurs.

La figure 1 présente les différentes étapes de la réalisation de cette recherche.

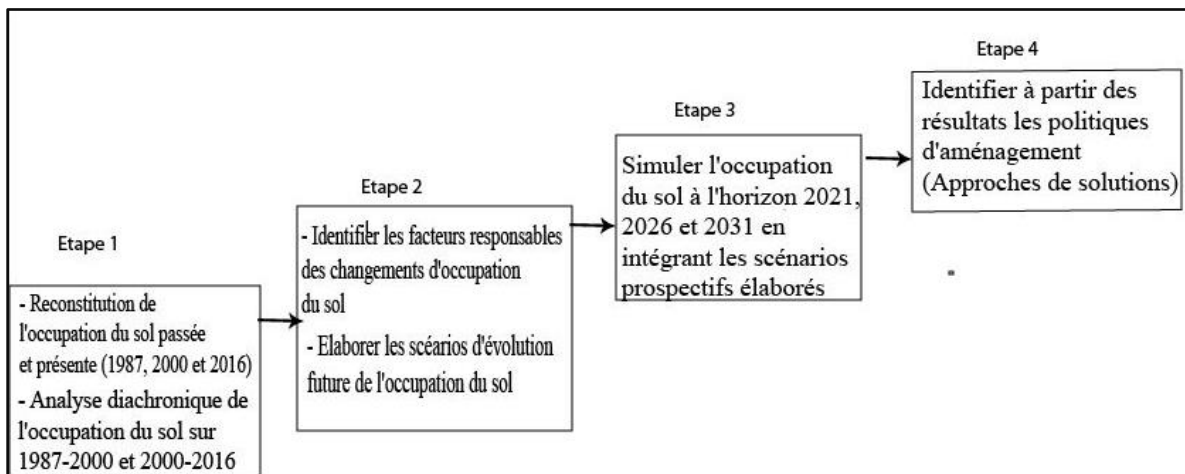


Figure 1 : Organigramme de la démarche générale de la thèse

Il ressort de la figure un que la première étape de cette recherche est l’étude diachronique du paysage sur deux périodes (1987-2000) et (2000-2016). La seconde étape a consisté à l’identifications des facteurs explicatifs de la dynamique de l’occupation du sol. S’en est suivi la simulation de l’occupation du sol à l’horizon 2031 et enfin la mise en place des outils d’aides à la décision à travers la conception de plusieurs scénarios prospectifs possibles.

**PREMIERE PARTIE : CADRE THEORIQUE,
GEOGRAPHIQUE ET DEMARCHE METHODOLOGIQUE**

Chapitre I : Cadre théorique et géographique

Introduction partielle

Ce chapitre présente les raisons qui motivent le choix du présent sujet de recherche. Il présente dans un premier temps la problématique, les hypothèses de travail, les objectifs de recherche et la clarification de quelques concepts. Dans un second temps, il présente les réalités physiques et socio-économiques du secteur Natitingou-Boukombé. Il décrit la localisation géographique, les caractéristiques climatiques, topographiques, géologiques, pédologiques, hydrographique, floristiques ainsi que les caractéristiques démographiques et socio-économiques du milieu d'étude. Ceci a permis de comprendre les facteurs naturels et humains déterminant la dynamique de l'occupation du sol.

1.1. Cadre théorique et géographique

1.1.1. Problématique

Les terres dans le monde connaissent de profondes mutations spatiales. En Afrique de l'ouest et particulièrement au Bénin ces mutations spatiales qui se traduisent par la dégradation du couvert végétal s'accroissent de jour en jour. En effet, les forêts et savanes sont les plus importantes catégories d'occupation du sol au Bénin (FAO, 2016). Elles sont des écosystèmes fragiles reposant sur la coexistence entre une strate herbacée et une strate ligneuse (Jacquin, 2010). Selon le même auteur, elles constituent des systèmes dynamiques dont l'évolution dépend de l'intensité des facteurs environnementaux comme la sécheresse, les feux, l'agriculture et l'élevage. Elles ont fait l'objet de nombreuses études (Walker & Noy-Meir, 1982 ; Gignoux *et al.*, 1997 ; Jeltsch *et al.*, 2000 ; Fotsing *et al.*, 2009 ; Jacquin, 2010, Zakari, 2015) qui ont montré que la plupart d'elles sont maintenues dans un état de régression du fait des activités anthropiques accrues.

Avec un taux d'accroissement intercensitaire de l'ordre de 3,5 % (RGPH 4, 2013) et ses corollaires d'augmentation en besoin de tout genre à satisfaire (Carr *et al.*, 2005), le Bénin a des ressources naturelles qui sont sous la pression de plus en plus galopante de l'agriculture, du surpâturage, de l'exploitation forestière et de l'urbanisation (FAO, 2010). Ceci entraîne une diminution constante de ces ressources naturelles depuis plusieurs décennies. Ces différentes activités anthropiques perturbent le fonctionnement des écosystèmes. L'extension accrue des aires de cultures et des agglomérations engendre une réduction progressive de l'étendue des surfaces boisées et une déstabilisation de la structure des sols (Akognongbé *et al.*, 2014). La rotation de culture et la jachère ont aussi des perturbations majeures sur les systèmes

écologiques (Faye *et al.*, 2002). La structure spatiale très hétérogène et complexe de ce milieu est également influencée par les caractéristiques du sol. La répartition des formations végétales est non seulement liée aux facteurs climatiques, mais également à la nature des sols et à la topographie (Oloukoi *et al.*, 2006). Les changements d'usage du sol sont donc aussi dus aux activités humaines (Djohy *et al.*, 2016). Ces dernières ont des répercussions directes sur l'occupation du sol, sur la configuration du paysage (Bamba *et al.*, 2008) et sur la diversité biologique. Elles entraînent un changement des catégories d'occupation du sol selon l'intensité et/ ou la durée des facteurs de pression. Ainsi, la végétation est particulièrement sensible aux variations climatiques et aux dynamiques de la composante anthropique, notamment les activités liées à l'agriculture, au déboisement et à l'urbanisation croissante (Bigot *et al.*, 2005). Selon la FAO (2010), la superficie de forêt détruite au Bénin entre 1990 et 2000 est estimée à 70.000 ha et à plus de 50.000 ha à partir de 2000. Selon cette même institution, le taux de régression des forêts denses entre 1990 et 2010 est de 20,82 % alors que les formations agricoles y compris les jachères occupent 31,22 % du territoire national. Plus que les phénomènes naturels, ce sont donc de plus en plus les activités anthropiques qui conditionnent l'évolution de l'environnement (Marage, 2013). Le concept d'anthroposystème a pu prendre le pas sur celui d'écosystèmes naturel (Levêque, 2000).

La région du massif montagneux (la chaîne de l'atacora) correspond à un district phytogéographique écologiquement, géomorphologiquement et floristiquement distinct dans la région soudanienne. C'est une zone de savane et de galeries forestières où on trouve de nombreuses espèces endémiques parmi lesquelles on peut citer *Antropogon gayanus*, *Terminalia spp*, *Combretum spp* et *Adansonia digitata*. Elle abrite également une très grande diversité faunique. La végétation de cette chaîne de montagne est clairsemée sur les flancs et au sommet, mais devient dense dans les zones de chute d'eau et de suintement (Ballouche *et al.*, 2000). Ce milieu est convoité par les exploitants de bois, les braconniers, les exploitants de pierres ornementales (quartzite), les agriculteurs et les éleveurs d'origines diverses à cause des particularités et de la fertilité des terres (Tente, 2009). La commercialisation du bois par des exploitants forestiers contribue à la destruction du couvert végétal. Malgré la présence des services des forestiers, et l'interdiction de cette activité, le phénomène d'abattage des bois d'œuvre se poursuit surtout pour le lingué (*Azelia africana*) et le caïlcédrat (*Khaya senegalensis*). Ces différentes activités ci-dessus citées contribuent à la régression non seulement du couvert végétal, mais aussi de diversité biologique (disparition de plusieurs espèces endémiques).

L'extension des superficies agricoles, les feux de végétation et l'activité de pâturage ont une influence sur la diversité biologique (Toko, 2008). Cette dynamique de la diversité biologique se traduit par plusieurs types de changements. Il s'agit de la variation dans la composition des espèces (végétales et animales), la modification du taux de couvert végétal et /ou de biomasse verte produite annuellement (Kennedy *et al.*, 2007) et la disparition de certaines espèces animales. Les impacts des activités anthropiques sur les ressources naturelles évoluent sans doute dans le temps et dans l'espace.

Le secteur Natitingou-Boukombé, une partie de cette chaîne de montagne, d'une superficie de 2 481 km² a une densité de 45,86 hab/km² (INSAE, 2016). Malgré cette faible densité, ce secteur connaît une très forte dynamique de sa population. Ceci a pour conséquence une extension des terres agricoles et des l'habitations (Natta, 2015). En effet, il y a accroissement des superficies des cultures vivrières (sorgho, petit mil, maïs, etc.), céréalières et du coton dans ce milieu (Idiéti, 2012). Les diverses techniques culturales, principalement l'agriculture itinérante sur brûlis, l'élevage (surpâturage), l'exploitation incontrôlée du gravier, des pierres ornementales, des ressources ligneuses, et la faible vitesse de croissance des essences sur ces sols rocheux perturbent ces écosystèmes fragiles en équilibre précaire (Tente, 2005) et impriment une dynamique à l'occupation du sol. Cette dynamique est d'autant plus importante car la dégradation des formations végétales naturelles de ce milieu augmente avec la même vitesse. Elle pourra être irréversible et une grande partie des espèces végétales surtout ligneuses disparaîtra. Ce milieu est donc confronté à des difficultés majeures liées pour l'essentiel à l'explosion démographique, à la dégradation du couvert végétal au profit des l'habitations, à la surcharge animale et à l'intensification des systèmes de production agricole. Ainsi, les facteurs physiques (environnementaux et climatiques) combinés aux facteurs anthropiques ont été pendant longtemps considérés comme principaux facteurs de changement de l'occupation du sol. Mais aujourd'hui les facteurs anthropiques prennent de plus en plus de l'importance dans cette région du nord-ouest du Bénin. Du coup, plusieurs études scientifiques s'y intéressent particulièrement (Lambin *et al.*, 2001 ; Steffen *et al.*, 2004). Dans le secteur Natitingou-Boukombé, les changements d'occupation du sol sont de nature et d'ampleur très diverses, avec des causes et des impacts variables en intensité, dans le temps et dans l'espace. Cette complexité explique qu'ils échappent encore partiellement aux tentatives de théorisation (Lambin et Geist, 2006) et de modélisation (Turner *et al.*, 2007).

Face à ces constats, la question principale qui se pose est : Comment se présentera le paysage du secteur Natitingou-Boukombé dans le futur dans ce contexte de changements socio-environnementaux ?

Cette question principale de recherche se décline en quatre questions spécifiques que sont :

- comment se présente la dynamique de l'occupation du sol dans ce secteur ?
- quels sont les facteurs déterminants de la dynamique de l'occupation du sol dans ce secteur ?
- quelles sont les tendances évolutives possibles de cette dynamique de l'occupation du sol dans ce secteur ?
- quelle sont les stratégies de gestion spatiale conciliant les activités humaines, notamment agricoles et la conservation de la végétation pour une gestion spatiale durable ?

L'originalité de cette recherche réside d'une part dans le fait qu'elle apporte un éclairage sur les enjeux spatiaux et environnementaux qui sous-tendent l'occupation du sol et d'autre part la modélisation de l'occupation du sol permettra de suivre la tendance évolutive du paysage et de trouver des règles acceptables pour préserver les ressources naturelles de ce milieu. Le choix de cette région d'étude est motivé par un constat. En effet, le secteur Natitingou-Boukombé a un couvert végétal en dégradation de plus en plus accrue. Ceci facilite donc la désertification (sahélisation) observée dans cette région.

1.1.2. Hypothèses de recherche

L'hypothèse principale de recherche est : Les activités anthropiques notamment agricoles sont les principaux facteurs de mutation spatiale du secteur Natitingou-Boukombé.

Cette hypothèse principale se décline en quatre hypothèses spécifiques suivantes :

- les formations naturelles sont en régression à une vitesse très rapide au profit de celles anthropiques dans le secteur Natitingou-Boukombé.
- l'agriculture itinérante sur brûlis est le principal déterminant des changements d'usage du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé.
- la tendance régressive du couvert végétal semble continuer dans le futur avec les pratiques actuelles d'utilisation des terres.
- il existe des stratégies de gestion spatiale conciliant les activités humaines, notamment agricoles et la conservation de la végétation.

1.1.3. Objectifs

1.1.3.1. Objectif global

L'objectif global de cette étude est de modéliser les changements d'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé dans un contexte de changements socio-environnementaux.

1.1.3.2. Objectifs spécifiques

Cette étude vise de façon spécifique à :

- cartographier la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé ;
- déterminer les facteurs explicatifs de la dynamique de l'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé ;
- projeter l'évolution de l'occupation du sol à l'horizon 2031 dans le secteur Natitingou-Boukombé ;
- proposer des outils d'aide à la décision à partir de plusieurs scénarios prospectifs possibles pour une meilleure gestion du territoire.

Cette recherche qui concerne l'évolution et la gestion des terres dans un secteur du nord-ouest du Bénin donnant lieu à une agriculture itinérante sur brûlis et le surpâturage vise à contribuer au changement de comportement des populations agricoles par l'adoption de nouvelles techniques culturales respectant les normes environnementales. Les résultats obtenus, serviront d'aide à la décision non seulement pour le monde agricole, mais aussi aux acteurs de l'aménagement et de la gestion de l'espace.

1.1.4. Revue de la littérature

Pour mieux cerner les contours de ce travail de recherche une revue de la littérature a été faite. Le choix des ouvrages parcourus ici a tenu compte de la thématique abordée, des méthodes d'étude utilisées et des résultats obtenus. Cette revue de littérature s'articule autour des axes suivants :

- dynamique de l'occupation du sol ;
- causes et conséquences de la dégradation du couvert végétal ;
- échelle d'analyse de la dynamique du paysage ;
- modélisation de l'occupation du sol.

✓ **Dynamique de l'occupation du sol**

Plusieurs travaux de recherche ont été menés sur la question de la dynamique de l'occupation du sol tant à l'échelle mondiale, régionale que nationale.

Au Bénin Tchibozo (1981) a étudié la dynamique de l'occupation du sol en se basant sur les données socio-économiques collectées. Les résultats de ses recherches montrent qu'il y a dynamique de la typologie des unités de paysage du versant oriental de la chaîne Atacorienne. Cette dynamique est influencée par la ville de Natitingou. Codjia et Gnagna (1993) ont étudié l'impact de la pression humaine sur la dynamique des paysages végétaux de la forêt classée de Toui-Kilibo (centre Bénin) et ont constaté que la superficie des formations denses diminue au profit des jachères et espaces cultivés. Borgui et Leffi (1992) ont analysé les différentes causes et les processus de dégradation de l'environnement sur le versant ouest de l'Okpara. Tenté (2000) dans une approche qui intègre l'analyse diachronique et la diversité floristique, a étudié la dynamique de l'occupation du sol dans le massif de l'Atacora. Il a abouti à une description des formations végétales dans leur état actuel, tout en évoquant la dégradation des formations ligneuses. Il a en effet abouti à des résultats selon laquelle les formations végétales surtout celles ligneuses sont en dégradation. Selon le même auteur, si la dégradation de ces formations augmente avec la même vitesse, elle pourra être irréversible et une grande partie des espèces disparaîtra.

Oloukoï *et al.* (2006), Orékan (2007), Sounon (2011), Arouna (2012), ont étudié la dynamique de l'occupation du sol au Bénin et s'accordent tous que les formations végétales naturelles régressent au profit des champs et des jachères. Ceci du fait de la croissance démographique importante que connaît le pays.

Pour Oloukoï *et al.* (2006) dans le département des collines, l'analyse de la dynamique de l'occupation du sol révèle, de façon générale, une tendance à l'expansion des agglomérations. Corrélativement, on constate une réduction des catégories des forêts galeries, des forêts claires et des savanes boisées, des savanes à emprise agricole de même que des savanes arborées et arbustives. En effet, entre 1978 et 1998, le taux de régression moyen annuel des forêts galeries est estimé à 4 %, celui des forêts claires et savanes boisées régresse est de 9 %, celui des savanes à emprise agricole a régressé de 73 %, pendant que le taux d'évolution moyen annuel des agglomérations a été évalué à 2,5 %.

L'analyse de la dynamique de l'occupation du sol entre 1978 et 2010 dans le bassin versant de l'ouémé à l'exutoire de Bétérou (Bénin) par Akognongbé *et al.* (2014) a révélé que les formations anthropiques croissent au détriment de celles naturelles. Selon cette étude, les

formations naturelles dans ce sous-bassin sont passées de 945215 à 337704 hectares, soit une régression de 9,23 %, tandis que les formations anthropiques ont connu une augmentation de leur superficie passant de 64858 à 672369 hectares soit 52,26 % d'accroissement. On note ainsi, un recul généralisé des forêts et des savanes sur l'ensemble du sous-bassin et une forte progression des champs et jachères.

Leroux (2012) a constaté qu'entre 1973 et 2012 dans le bassin supérieur de l'ouémé (Bénin) notamment dans la commune de Djougou une progression des espaces de cultures et urbains au détriment des espaces de forêt et de savane. Cette progression est particulièrement prononcée dans la partie Sud-Est de la commune en relation avec l'axe routier qui relie Djougou à Bétérou. Cet auteur relève la présence d'un véritable front de déforestation et identifie trois types de dynamiques d'occupation du sol dans ce milieu. Il s'agit de la modification au sein de la végétation naturelle ou au sein des espaces anthropisés, de la conversion, c'est-à-dire changement d'une catégorie d'occupation du sol à une autre et du non changement, c'est-à-dire des classes non affectées par des modifications ou des conversions entre deux dates. La dynamique des différentes catégories d'occupation du sol au Bénin affecte beaucoup plus le couvert végétal.

✓ Causes et conséquences de la dégradation du couvert végétal

Selon Sinsin et Kampmann (2010) plusieurs facteurs concourent à la dégradation des formations végétales. Il s'agit des facteurs anthropiques (agriculture, exploitation du bois, artisanat, exploitation médicale, feux de végétation) et naturels (climat). Oloukoï *et al.* (2006), Orékan (2007), Tente (2009), Leroux (2012), Arouna (2012), Akognongbé *et al.* (2014), Abdoulaye (2015) et bien d'autres qui ont mené des recherches sur l'occupation du sol au Bénin sont tous unanimes que l'homme à travers ces activités est le premier facteur de la dégradation des formations naturelles. L'accroissement démographique, le surpâturage et les feux de végétation rendent vulnérable les écosystèmes naturels (Bidou *et al.*, 2013). Au terme des recherches, Tente (2005) conclut que les formations boisées du secteur ont connu une régression de 35 % entre 1975 et 2003. Il montre également dans ces différents travaux que le secteur d'implantation de la ville de Natitingou est vulnérable à cause du relief, du poids de la population et des activités qui s'y mènent. Les activités anthropiques restent donc les facteurs de la dégradation des formations boisées.

En somme, pour plusieurs scientifiques, les facteurs déterminants du changement d'usage et d'occupation du sol sont d'ordres biophysiques et socio-économiques. Ainsi, les déterminants biophysiques comprennent les caractéristiques et processus de l'environnement naturel (climat

et ses variations, forme du terrain, topographie et processus géomorphologiques, éruptions volcaniques, succession des plantes, types et processus du sol, modèles de drainage, disponibilité des ressources naturelles). Les déterminants socioéconomiques comprennent les facteurs et processus démographique, social, économique, politique et institutionnel (population et changement de population, structure industrielle et changement, technologie et changement technologique, famille, marché, corps variés du secteur public et règles et politiques liées, valeurs, organisation de communauté et normes, régime de propriété).

✓ **Echelle d'analyse de la dynamique du paysage**

Plusieurs travaux ont montré que dans plusieurs domaines, les processus qui s'opèrent dans le paysage sont le résultat des interactions entre systèmes sociaux et environnementaux et surviennent à des échelles bien précises. Ainsi, le fonctionnement et la gestion des écosystèmes terrestres doivent être actuellement considérés à des échelles spatiales et temporelles assez larges. L'identification des niveaux d'observation et d'analyse appropriés aux processus étudiés et le développement d'approches multi-échelles sont de plus en plus déterminants dans les études sur les écosystèmes naturels. Le choix d'un modèle de simulation dépend principalement de l'étendue spatiale de la zone d'étude mais également de la problématique étudiée, des objectifs visés, de son aptitude à simuler des processus ou des schémas spatiaux particuliers (*process-based* ou *pattern-based*) et à intégrer les interactions entre les ressources et les acteurs (Houet, 2015). Pour Vacquié (2015). La modélisation spatiale d'un système complexe peut se faire sur plusieurs échelles : micro-locales, locales, régionale, nationale et internationale. Selon le même auteur, aux échelles spatiales fines (micro-locales et locales), les approches de simulations font exclusivement appel aux modèles multi-agents car ils se présentent comme plus adaptés à la modélisation de dynamiques environnementales liées à des processus individuels. La majorité des changements d'occupation et d'usage du sol sont calculées à partir d'approches empiriques ou d'analyses expertes (Peringer *et al.*, 2013). Une des méthodes les plus employées pour l'étude des dynamiques d'occupation et d'usage du sol sont les perceptrons multicouches intégrés dans plusieurs outils de modélisation tel que Land Change Modeler (LCM) sous Idrisi (Maestriperi, 2015).

Pour plus de clarté et de compréhension de ce travail, nous ferons toutes nos analyses à l'échelle du paysage. Ceci nous permettra de mieux caractériser la diversité des systèmes d'utilisation de l'espace, d'analyser les changements en cours afin de déboucher sur des scénarios d'évolution de ces espaces.

✓ **Modélisation de l'occupation du sol**

Depuis les années 1970, une variété de modèles ont été développés pour simuler les changements futurs de l'occupation du sol. Il s'agit de des modèles SIG et des modèles Statistiques. Parmi ces modèles on peut citer les modèles CA_MARKOV sur IDRISI (Eastman, 2009), CLUE-S (Verburg *et al.*, 2002 ; Verburg et Overmars, 2009), DINAMICA (Soares-Filho *et al.*, 2002), Land Change Modeler (LCM) sous IDRISI et comme extension de ArcGis (Eastman, 2009), SpaCelle (Langlois, 2001) et le modèle de réseaux des neurones (Paegelow, 2004). Bien que certains modèles aient été largement utilisés, il existe peu d'études d'évaluation et de comparaison de modèles visant à la compréhension des avantages et des limites de leurs outils (Paegelow et Camacho Olmedo, 2005, 2008 ; Pontius *et al.*, 2008 ; Camacho Olmedo *et al.*, 2010 ; Mas *et al.*, 2014 ; Munsiri *et al.*, 2012).

Certains modèles sont développés pour simuler et explorer l'occupation actuelle des terres, alors que d'autres s'intéressent aux changements possibles dans le futur. Le modèle CLUE-S (Conversion of Land Use and its Effects), qui est un modèle de simuler des changements d'occupation du sol utilisé au Costa Rica est une référence (Veldkamp et Fresco, 1996). Il a été utilisé par Orékan (2007) et Boko (2012) pour modéliser l'occupation du sol respectivement dans le centre du Bénin et dans le bassin versant de l'Alibori. L'utilisation de ce modèle a permis à Orékan (2007) dans ses recherches de constater que dans la région de savane du Centre Bénin, l'agriculture itinérante sur-brûlis, l'exploitation incontrôlée des forêts et les feux de végétation feront que d'ici l'horizon 2020 toutes les forêts de cette zone d'étude disparaîtront si rien n'est fait. L'utilisation du modèle CLUE-S lui a permis de montrer que les changements spatiaux s'opèrent davantage le long de la voie principale Oubérou-Kikélé où la majorité des migrants s'installent d'année en année.

Oloukoï *et al.*, (2006 et 2013) et Abdoulaye (2015) ont utilisé le modèle Automate Cellulaire (SpaCell) pour modéliser l'occupation du sol respectivement dans le centre du Bénin et dans le bassin de l'Alibori. L'analyse des projections faites par ces chercheurs avec ce modèle révèle, qu'à l'horizon 2020 et 2025, les formations anthropisées (agglomérations, les champs et les jachères) s'étendront au détriment des formations naturelles (forêts galeries, claires, savanes boisées, arborées et arbustives).

Paegelow (2004) a utilisé les réseaux de neurones pour modéliser l'occupation du sol dans les montagnes méditerranéennes (en France). Il a travaillé avec une classe particulière de réseaux de neurones, les réseaux multicouches encore appelés perceptrons. Ce modèle a récemment connu une grande popularité et a très favorablement concurrencé les méthodes statistiques

classiques. Il a par ailleurs comparé les résultats obtenus en tournant ce modèle avec ceux obtenus en tournant les modèles SIG et paramétriques. Au terme de cette étude il a donc constaté une concordance relative des résultats des trois approches. Les taux de prédiction globale des trois méthodes sont très proches : 72.8 % (SIG), 74.3 % (réseaux neuronaux) et 72.8 % (modèle paramétrique).

1.1.5. Définitions opératoires et clarification des concepts

La clarification de certains concepts est indispensable pour une bonne compréhension de ce document scientifique.

- **Ressources naturelles** : Les ressources naturelles sont des éléments biotiques et abiotiques de la terre, ainsi que les diverses formes d'énergies reçues (énergies solaires) ou produites sans intervention humaine (marée, vent). Autrement dit, les ressources naturelles englobent la faune, la flore, les eaux du sous-sol, les pluies, l'insolation, le vent, les roches, etc. (ABE).
- **Désertification** : La désertification est définie par la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification comme étant «la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines». La dégradation des terres est à son tour définie comme étant la réduction ou la disparition de la productivité biologique ou économique des zones sèches. Ce rapport évalue l'état actuel de la désertification dans les zones sèches, y compris les zones hyper-arides, en posant des questions ciblées.
- **Paysage** : Il existe plusieurs définitions du terme « paysage ». Cette définition varie en fonction de la discipline. En écologie par exemple, le paysage est défini comme un espace hétérogène composé d'une mosaïque d'écosystèmes en interaction qui interagissent et se répètent de façon similaire dans l'espace. Par conséquent, le paysage est un niveau d'organisation des systèmes écologiques situé au-dessus de l'écosystème (Burel & Baudry, 2000). Par contre, une définition culturelle du paysage intègre la composante humaine. Le paysage est un ensemble d'éléments dont l'organisation spatiale est fortement liée à l'utilisation ancienne et actuelle du milieu (Burel & Baudry, 2000 ; McGarigal *et al.*, 2002 ; Casado, 2007). Cette dernière définition se rapproche de celle de la Convention Européenne du Paysage pour qui le paysage désigne une partie de territoire telle que perçue par les populations, dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et/ou humains et de leurs interrelations (Casado, 2007).

Pour Forman & Godron (1986), le paysage est un espace complexe et hétérogène composé par un regroupement d'écosystèmes en interaction. Il est formé par l'interaction des divers

éléments qui le constituent et il évolue avec le temps (Simard, 1995). Girard & Girard (1999) considèrent le paysage comme une étendue de pays que l'on observe à la verticale, dont le sujet principal est le milieu naturel.

Dans le cadre de cette étude, le paysage est une portion de terrain, une mosaïque qui résulte d'une association de différents éléments physiques et humains qui interagissent les uns avec les autres et dont la dynamique évolue dans le temps et dans l'espace.

- **Détection des changements :** La détection des changements est la mise en œuvre des techniques ayant pour but de repérer, de mettre en évidence et de quantifier l'évolution temporelle ou le changement d'état des unités d'occupation du sol à partir d'une image satellite multitemporale (Arouna, 2012). Les facteurs limitant cette détection des changements sont les différences de conditions atmosphériques, de géométrie d'acquisition et de condition au sol (Chavez et Mackinnon, 1994). Les domaines d'application de la détection des changements sont nombreux (déforestation, changements d'occupation des sols). La détection des changements dans le cadre de ce travail scientifique a le même sens que celle considérée par Arouna (2012).
- **Dynamique de l'occupation du sol :** La dynamique de l'occupation du sol est l'évolution dans le temps et dans l'espace des catégories de cette occupation, soit vers un stade d'extrême dégradation ou soit vers un état d'équilibre plus ou moins stable (Adjinda et Hounton, 1997).
Selon Lambin *et al.*, (2003), Turner *et al.*, (1995) et Oloukoï (2013), la dynamique de l'occupation du sol est vue sous deux aspects : la conversion et la modification. La conversion est le changement observé d'un type d'occupation du sol à un autre. La modification implique l'altération de la structure ou de la fonction sans qu'il y ait changement d'un type d'occupation du sol à un autre, mais cela peut impliquer des changements de la productivité, de la biomasse ou de la phénologie (Skole *et al.*, 1994 ; Stéphane et Lambin, 2001). Est considéré comme dynamique de l'occupation du sol dans cette étude, l'ensemble des changements spatio-temporels qui interviennent dans l'utilisation du sol sous l'impulsion des facteurs climatiques et humains.
- **Changements d'occupation et d'utilisation des sols :** Plusieurs recherches scientifiques ont abouti au constat d'un changement global d'usage du sol dans le monde. Ces changements d'usage et d'utilisation du sol sont le produit de la combinaison de plusieurs interactions entre l'homme et son milieu. Les principaux facteurs et les principaux impacts des changements d'occupation du sol à l'échelle globale sont aujourd'hui identifiés

grâce aux données satellitaires et aux méthodes éprouvées pour produire une information homogène et exploitable, décrivant des changements affectant de vastes superficies.

Désigné par le terme « Land Change Science » dans la littérature anglo-saxonne (Turner *et al.*, 2007) et en français « occupation du sol et utilisation (usage) du sol », cette notion renvoie à deux aspects différents de la couverture des sols. Il fait souvent référence à la couverture physique et à la description socio-économique des surfaces terrestres. De manière générale, l'occupation du sol distingue plusieurs catégories biophysiques : les zones de végétation (arbres, buissons, herbe), les sols nus, les surfaces dures (roches, surfaces bâties), les surfaces humides, et les plans d'eau (Hubert-Moy, 2004). L'utilisation du sol est souvent plus difficile à déterminer, car elle dépend de l'usage socio-économique qui est fait des terres (Turner *et al.*, 1995). L'utilisation du sol influence l'occupation du sol et l'environnement. La figure montre aussi que l'occupation du sol détermine l'usage du sol et les facteurs environnementaux et anthropiques déterminent l'utilisation des sols. Dans cette étude, les aspects socioéconomiques liés à l'utilisation des sols n'ont pas été très approfondis. C'est pour cela que la terminologie occupation du sol est beaucoup plus utilisée.

Il existe quatre types de changements d'occupation et d'utilisation du sol : la déforestation intertropicale, les modifications des steppes et prairies naturelles, l'intensification de l'agriculture et l'urbanisation au détriment des zones rurales (Lambin *et al.*, 2001). L'ampleur de ces changements est fonction de l'intensité des facteurs explicatifs. Les principaux facteurs explicatifs énumérés dans le cadre de cette étude sont : la pression démographique, la pauvreté, et le changement climatique.

1.2. Cadre géographique et humain

1.2.1. Milieu physique

1.2.1.1. Situation géographique

Le secteur Natitingou-Boukombé est situé entre les parallèles 10° 00' et 10° 40' latitude nord et les méridiens 1° 09' et 1° 46' longitude est. Sa limite sud est située à une distance d'environ 600 km de la capitale économique (Cotonou) et à 641 km de la capitale politique (Porto-Novo) de la République du Bénin. Il fait partie de la chaîne de l'Atacora, le massif montagneux le plus important du Bénin. Cette chaîne qui couvre 6 % du territoire national est orienté nord-nord-est/ sud-sud-ouest. Elle s'étend d'Est en Ouest sur 46 km de large et culmine à à 675 m au niveau des Monts Saragbarô, au Togo (Tchibozo, 1981).

D'une superficie de 2.481 km², le secteur Natitingou-Boukombé est limité au nord par les Communes de Toucountouna, Cobly et Tanguiéta, au sud-est par la Commune de Kouandé, au sud-ouest par la Commune de Copargo et à l'ouest par la République du Togo (figure 2).

Sur le plan administratif, ce secteur couvre deux Communes : la Commune de Natitingou (3.045 km²) et celle de Boukombé (1.036 km²). Il regroupe seize (16) arrondissements subdivisés en cent quarante-deux (142) villages et quartiers de villes.

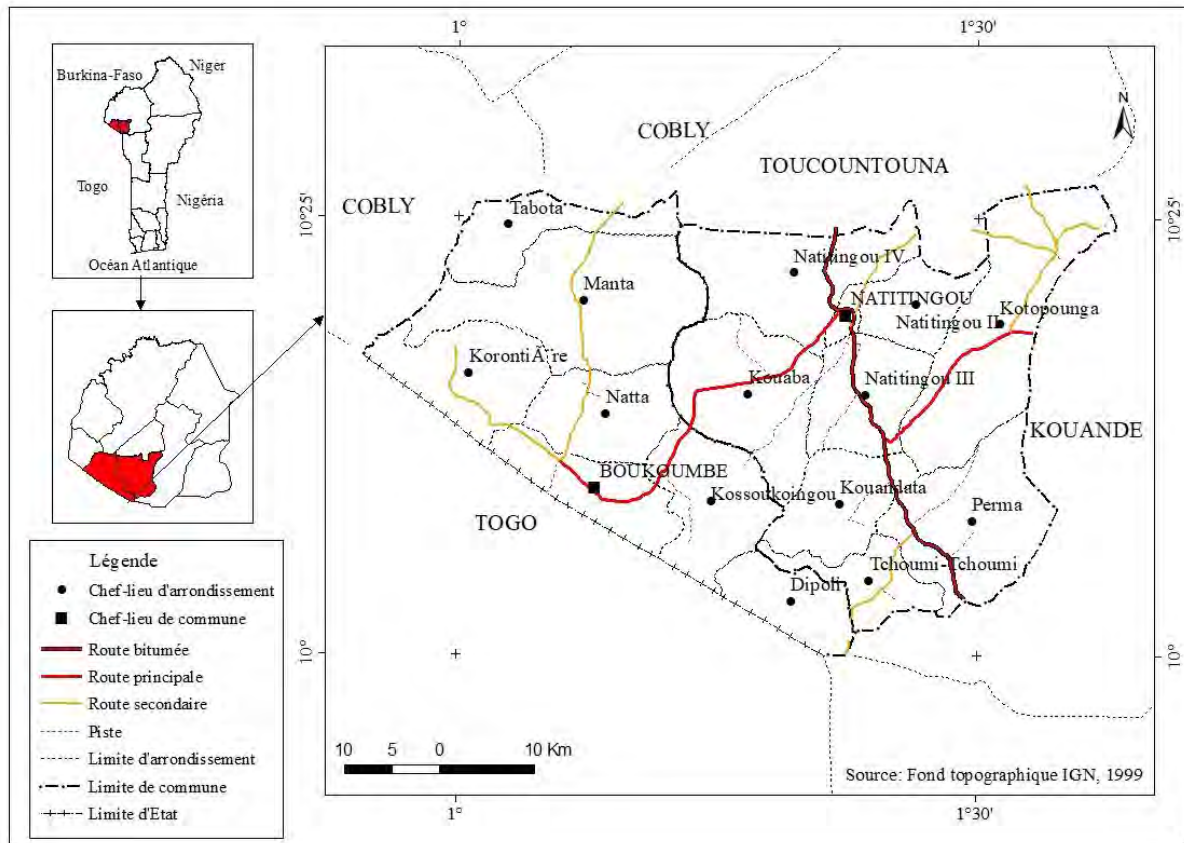


Figure 2 : Situation géographique et administrative du secteur Natitingou-Boukombé

Le secteur Natitingou-Boukombé est situé au nord-ouest du Bénin et traversé par la route Nationale Interétat numéro 2 (RNIE 2) qui relie la capitale économique du Bénin à Ouagadougou (Burkina Faso).

1.2.1.2. Climat de la zone d'étude

Les facteurs climatiques qui influent sur la dynamique de l'occupation des sols sont le vent, la pluviométrie, l'évapotranspiration et la température.

1.2.1.2.1 Vent

Un peu comme dans toute l'Afrique, deux masses d'air (mousson et alizé continental) constituent les éléments fondamentaux de la circulation zonale du secteur d'étude. Le dynamisme de ces deux masses d'air provoque la migration du Front Inter Tropical (FIT) au cours de l'année (Houssou, 1998).

Ainsi, compte tenu de la vigueur de l'un de ces flux en rapport avec le développement de son centre d'action, le FIT se déplace du nord au sud ou du sud au nord. Lorsqu'il se trouve en dessous de 10° de latitude nord, souffle un vent sec et froid : l'harmattan (Houssou, 1998). Cette particularité climatique est due au balancement du front intertropical (FIT) qui détermine le début et la fin de la saison pluvieuse dans la région (figure 3).

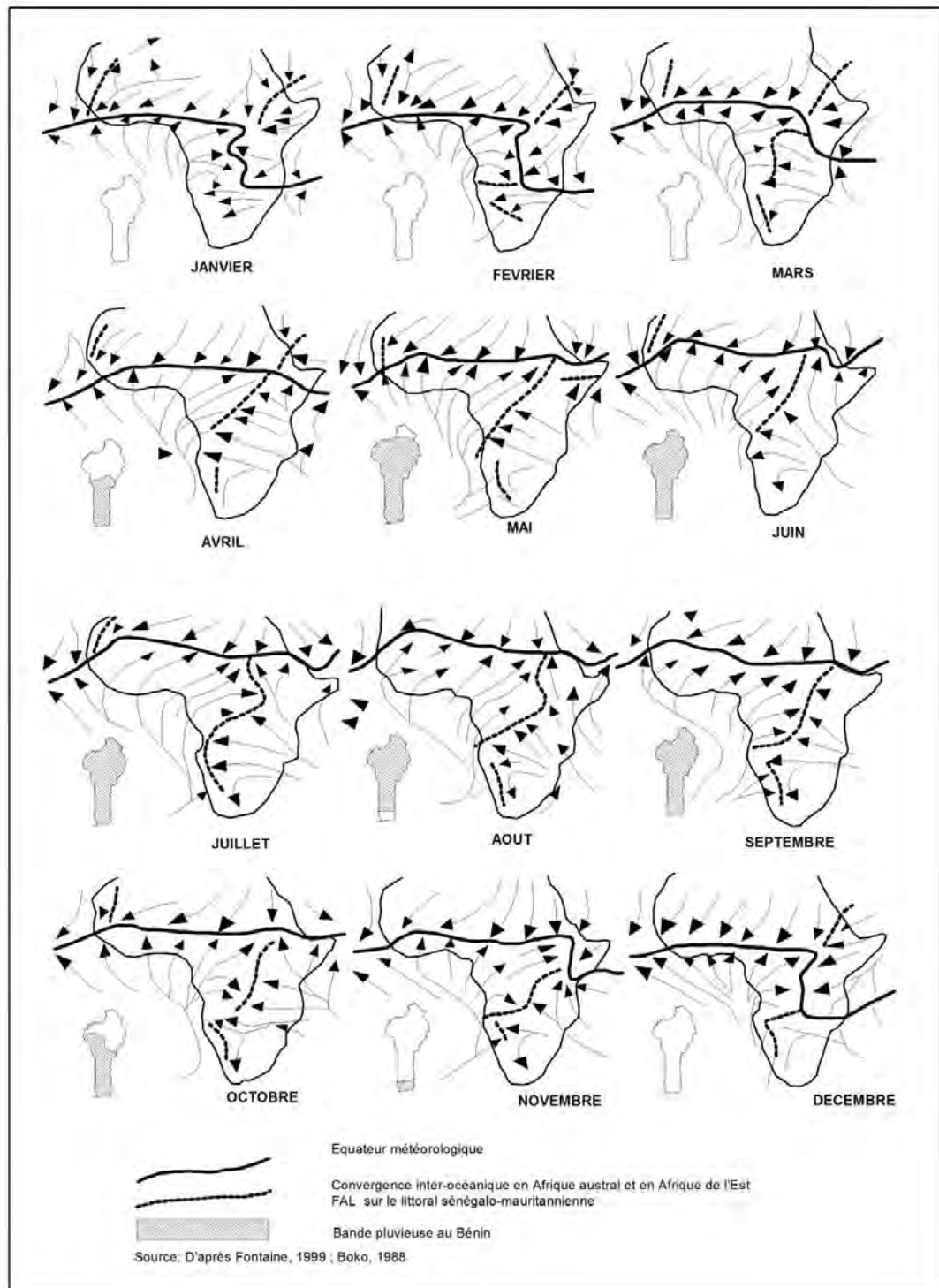


Figure 3 : Mouvement oscillatoire annuel du FIT sur l'Afrique

Source : Fontaine (1988) et Boko (1988)

Comme l'indique la figure 3, les phénomènes météo-géographiques de la région sont les mêmes que ceux connus dans la répartition zonale générale. Les climats sont liés à divers mouvements anticycloniques de l'hémisphère nord (Açores et Sahara), et puis à la cellule anticyclonique de Sainte-Hélène dans l'hémisphère sud. C'est le balancement du front (FIT) issu de la rencontre

de ces masses d'air appelée alizés du sud et du nord qui détermine la répartition des saisons de l'année.

Lorsque les anticyclones des Açores et du Sahara sont assez puissants pour pousser le FIT vers le sud du pays, il détermine la saison sèche, avec un flux d'air de trajectoire continental, sec et poussiéreux appelé harmattan. Par contre, quand l'anticyclone de Sainte-Hélène qui génère une importante masse d'air maritime très humide, parvient à pousser le FIT vers le nord, la saison pluvieuse s'installe.

Le climat qualifié de type atacorien (Houssou, 1998) a donc ces deux grandes saisons bien tranchées (Tchibozo, 1981) ; une saison de pluie de 5 à 6 mois (avril à octobre) et une saison sèche comprenant deux périodes : la période d'harmattan (novembre -février) et celle de forte chaleur (mars-avril) desséchant et accélérant le dépérissement de la végétation. La chaîne de l'Atacora joue un rôle important sur les paramètres climatiques du secteur d'étude. Par les ascendances forcées d'air humide dues à l'élévation du relief, elle favorise l'augmentation des pluies de type orageux (Tente, 2005). Les deux saisons de ce milieu rythment la vie et les activités humaines.

Les vents jouent en général, un rôle essentiel dans la régénération naturelle des plantes (Sokpon, 1995). Deux types de vents dominants soufflent sur toute la région : l'alizé maritime et l'alizé continental (harmattan). Le premier, (de direction sud-ouest, nord-est) souffle d'avril à novembre. Le second (de direction nord-est sud-ouest) est un vent sec qui souffle de novembre à mars. C'est ce dernier qui accentue le déficit hygrométrique de l'air et les conditions d'aridité de la saison sèche (Tenté, 2005). Ces vents favorisent la propagation des feux de végétation destructeur du couvert végétal.

1.2.1.2.2. Pluviométrie et Evapotranspiration Potentielle (ETP)

La pluviométrie dans le secteur Natitingou-Boukombé se caractérise par les totaux pluviométriques et les variations interannuelles. A cause des influences orographiques, le secteur est très arrosé et on enregistre entre 1000 et 1400 millimètres d'eau par an réparties en 90 jours (Adam et Boko, 1993 ; Tenté, 2005). Les plus fortes quantités d'eau sont enregistrées au cours des mois d'août et de septembre dans l'année. Les pluies orageuses représentent 70 % des précipitations de la région (Boko, 1988). Les mois les plus humides ici sont ceux d'août et de septembre sur la période d'observation.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) et les précipitations sont deux paramètres qui influencent la durée et les caractéristiques de la période de végétation. L'ETP permet d'estimer

la quantité d'eau disponible au niveau des racines des plantes (Sokpon, 1995). La combinaison de ces deux paramètres permet d'identifier les périodes humides et sèche de l'année (figure 4).

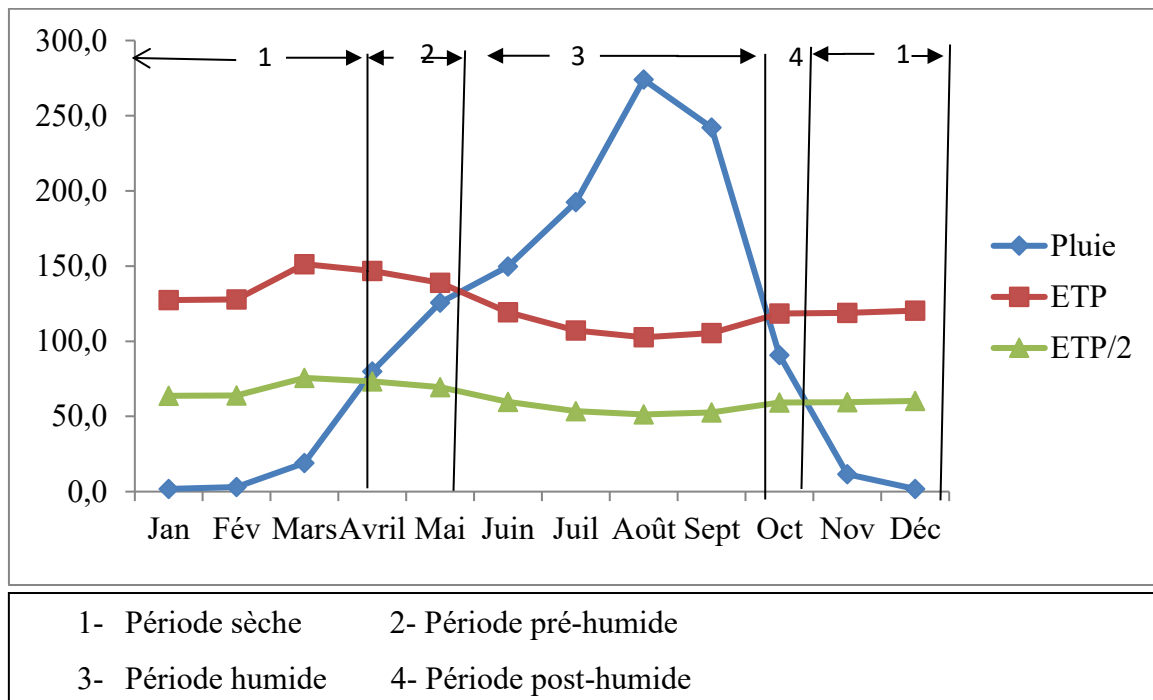


Figure 4 : Diagramme climatique (1981 à 2016), Station de Natitingou et ses environs

Source : Données ASECNA, 2014

Le diagramme climatique représenté sur la figure 4, permet de scinder l'année en des périodes, en des événements bioclimatiques successifs. L'ensemble des intersections entre la courbe de pluviométrie et celle de l'ETP, déterminent la position d'événements climatiques.

La période durant laquelle la pluviométrie est supérieure ou égale à la moitié de l'ETP (période pré-humide, période humide et période post-humide) correspond à la période active de la végétation. Elle couvre environ sept mois d'avril à octobre. Durant cette période, la réserve en eau du sol est supérieure à celle du point de flétrissement permanent. Les forêts, les plantations et les jachères peuvent alors assurer de façon continue, leur alimentation hydrique et minérale. Lorsque la quantité d'eau disponible dans le sol sous sa forme accessible pour les plantes est insignifiante dans cette région, ces dernières sont en état de stress hydrique et donc ne se développent pas.

1.2.1.2.3. Température

La température est importante pour la végétation puisqu'elle agit sur la respiration et la photosynthèse de la plante (Ozenda, 1982). Le régime moyen de la température maximale mensuelle suit un rythme bimodal, avec deux pics. Le premier en mars-avril (36 °C) et le second en novembre (35 °C). Les deux pics sont dus à la forte radiation directe et à la faible nébulosité.

Les plus faibles températures sont enregistrées en juillet-août. Le régime moyen de la température minimale suit un régime quasiment uni modal avec un pic dans le mois d'avril (24 °C) et un autre pic à peine perceptible dans le mois d'octobre (20 °C). Les minima sont enregistrés en novembre (18 °C), décembre (18 °C) et janvier (19 °C) (figure 5). Ces variations thermiques sont liées à la durée de l'insolation.

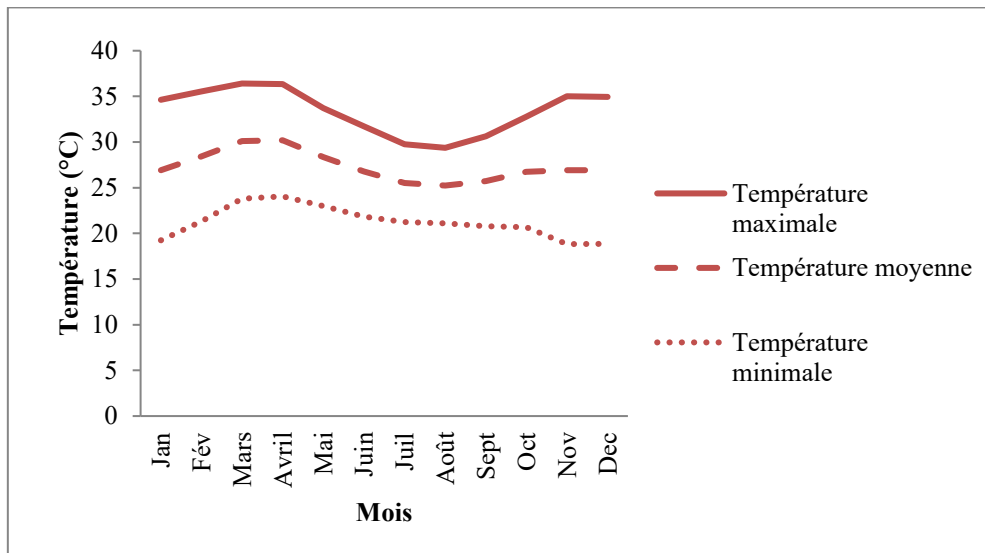


Figure 5 : Evolution des températures maximales et minimales à Natitingou (1981-2010)

Source : ASECNA, 2014

Contrairement aux températures maximales, celles moyennes et minimales évoluent à la baisse au cours de l'année. Mais les mois les plus chauds sont les mois de novembre, décembre, février et mars.

1.2.1.3. Relief

Selon Tchibozo (1981), Les formes de relief les plus complexes sont rencontrées dans cette partie du pays. Ce relief est mis en place avec le soulèvement général du continent africain au Paléocène et des plissements qui s'en sont suivis. L'ensemble des couches de la chaîne de l'Atacora constitue le Voltaïen datant du Primaire. Avec l'érosion, il en a résulté une chaîne de trois à quatre bandes plus ou moins continues dont la plus importante passe par Natitingou. C'est ce qui lui donne la forme d'une chaîne de plateaux. Ce relief présente l'aspect d'un haut plateau formé par un plissement. Elle part du Niger, traverse le Bénin (au niveau de Natitingou) se prolonge au Togo par « *les monts Togo* » et au Ghana par « *Akwapim Range* ». Encore appelée "massif de l'Atacora", elle est un plateau façonné au sommet d'un anticlinorium formé au Primaire par la collision de deux crassons. Elle est orientée sud-sud-ouest et nord-nord-est avec des altitudes moyennes de 400 à 600 m. Elle culmine à 640 m au-dessus de la plaine de

Gourma du côté ouest (Idiéti, 2012) et à 675 m au niveau des Monts Saragbarao, au Togo (Tchibozo, 1981). Précisons que la région traversée par cette chaîne dépasse largement le nord-ouest du Bénin. La chaîne de l'Atacora prend naissance à la confluence des frontières du Burkina Faso, du Niger et du Bénin, traverse le nord-ouest du Bénin en écharpe, se prolonge au Togo où elle prend le nom de « Monts Togo » et s'abaisse vers la côte de l'Océan Atlantique au sud-est du Ghana où elle est connue sous le nom de « Akwapim Range » (Adam et Boko, 1983, Idiéti, 2012). Le secteur Natitingou-Boukombé est bordé à l'Est par le dernier maillon de la chaîne de l'Atacora qui génère un relief escarpé et explique l'enclavement de la région. L'orographie est responsable de la faible disponibilité en eau et de l'exiguïté des sols cultivables doublée de leur très forte dégradation (Natta, 2015).

Le relief dans ce milieu est très accidenté, composé surtout de la chaîne de l'Atacora, de plateaux, de pénéplaines et de petites collines d'au plus 400 m d'altitude dont les vallées (figure 6) se présentent souvent en pente forte (Natta, 2005, Idiéti, 2012). Ces plateaux constituent les milieux favorables au développement de la végétation. Cette dernière est fréquemment rencontrée sur les terrains plats, sur les bas de glacis mais peu fréquent sur les hauts de glacis. Les terres cultivables sont insuffisantes et se dégradent par l'érosion. La figure 6 présente une vue en trois dimensions de ce milieu.

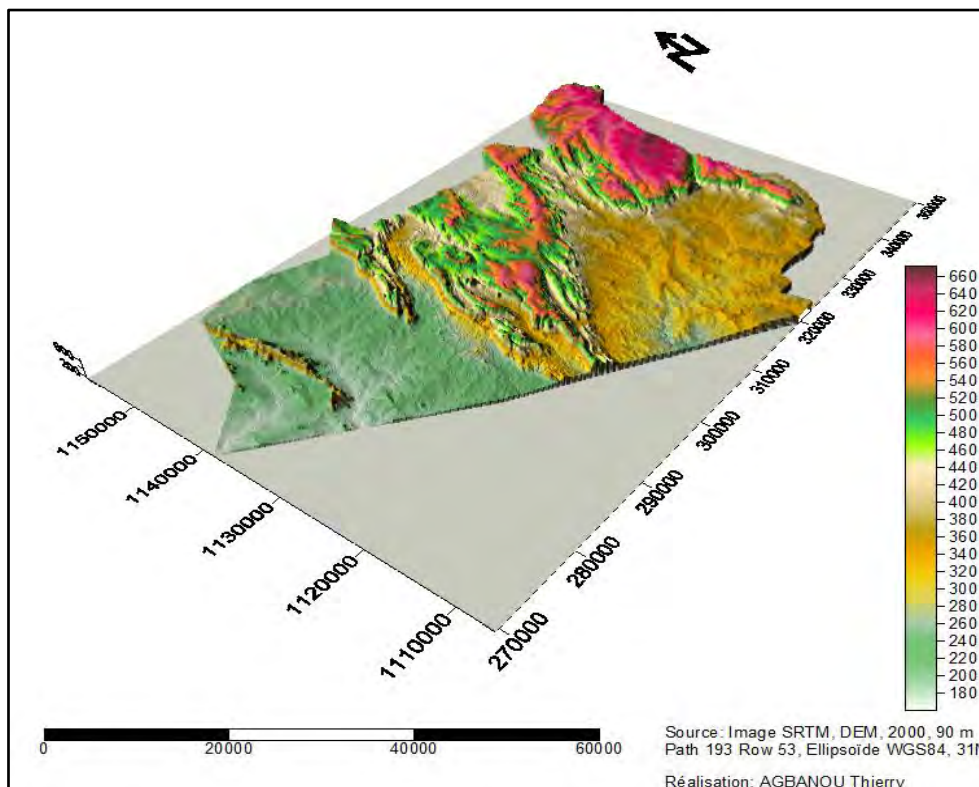


Figure 6 : Carte des altitudes (en mètres) en trois dimensions du secteur Natitingou- Boukombé

Les versants oriental et occidental de la chaîne de l'Atacora sont marqués par des accidents topographiques comme les failles et gorges d'origine tectonique, les brutales ruptures de pente et les topographies en escaliers (Tente, 2005). La morphologie du milieu obtenue à partir du Modèle Digitale d'Elevation (SRTM) des images radar a permis d'extraire les indices de pente global (figure 7).

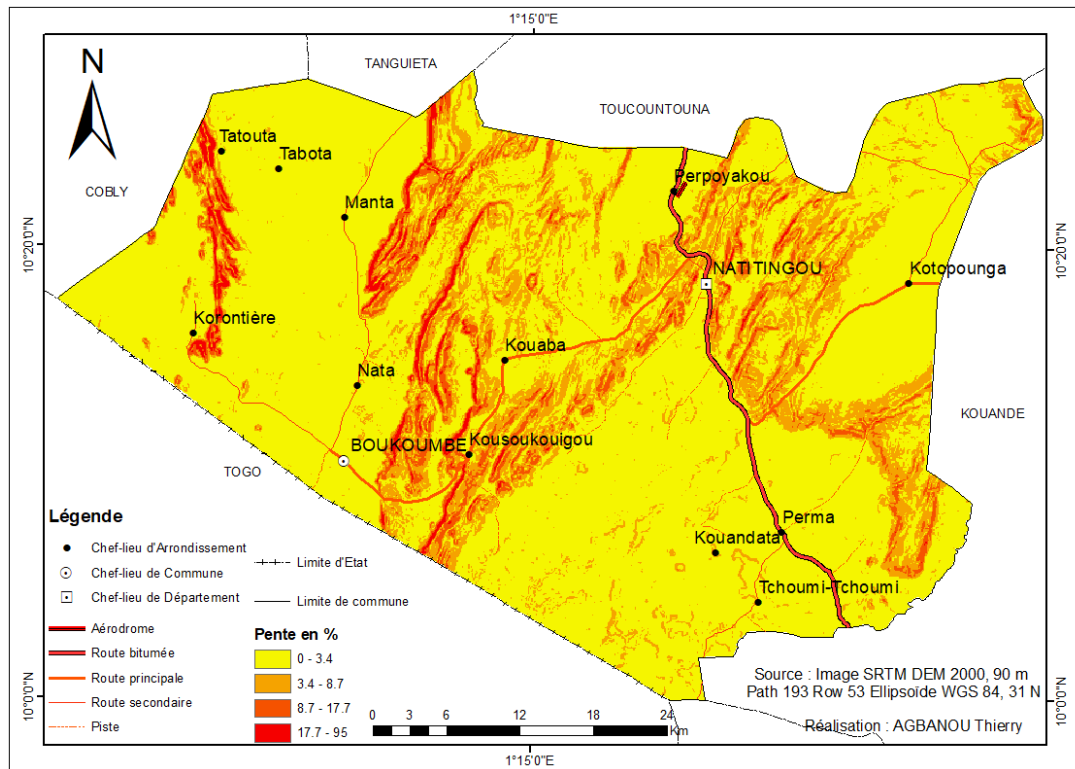


Figure 7 : Carte des pentes du secteur Natitingou-Boukombé

L'examen de la figure 7 permet de classer le relief de ce milieu à partir des pentes en quatre catégories : les zones à faible relief avec des pentes comprises entre 0 et 3,4 %, les zones à relief modéré avec des pentes comprises entre 3,4 et 8,7 %, les zones à relief fort avec des pentes comprises entre 8,7 et 17,7 % et les zones à relief très fort avec des pentes comprises entre 17,7 et 95 %.

L'orientation générale du sens des pentes change ponctuellement et permet aux populations de construire leurs habitations sur les versants des chaînons et le long des lignes de crête, en particulier des vallées sur et de part et d'autre de la Route Nationale Inter Etats 3 (RNIE3).

L'analyse de la formation de la chaîne de l'Atacora, de l'élévation du relief et des pentes montre bien les contraintes naturelles à l'installation humaine dans ce secteur. Mais ceci n'a guère empêché l'homme de façonner ce milieu pour pouvoir y vivre. A l'exception des zones

inaccessibles, toutes les zones à relief accidenté sont fortement exposées aux agressions humaines et donc connaissent une dégradation de leur couvert végétal.

1.2.1.4. Géologie et sols

La géologie du secteur Natitingou-Boukombé se repose essentiellement sur celle de la chaîne de l'Atacora. Les recherches de Affaton (1987) et de Adam et Boko (1983) sur cette unité structurale qu'est la chaîne de l'Atacora ont révélé que sa géologie comporte des formations de l'Archéen, du protérozoïque supérieur et du crétacé supérieur. Se sont développées aussi des croûtes d'altération du Cénozoïque et des dépôts du Quaternaire (figure 8). Les différentes unités géologiques représentées dans cette portion sont classées en six séries qui se présentent comme suit :

- la série de Kandé-Boukombé constituée en général des schistes quartzeux, de grès et de conglomérats. Les dépôts de cette série se sont développés à l'Est et au Nord de Boukombé où ils affleurent dans des blocs tectoniques isolés. Les roches de la série affleurent dans le bassin versant du cours inférieur de la rivière Sarga et près de l'embouchure de la rivière Kounmé ;
- la série de l'Atacorien correspondant à la chaîne de l'Atacora proprement dite se prolongeant au Togo et au Ghana d'une part et au Niger de d'autre part. Elle est issue des évènements tecto-métamorphiques survenus sur la bordure Est du craton ouest-africain au cours du précambrien inférieur ou paléo-protérozoïque. La série est formée de quartzites, de schistes, de micaschistes.
- la série de Podiéga regroupant des grès, des quartzites fins et moyens constituant la plupart des collines qui émergent dans la plaine à l'Ouest de la chaîne de l'Atacora ; des jaspes rouges et violets qui forment le squelette de quelques-unes des collines du Parc National de la Pendjari ; des siltites et des schistes argileux un peu partout dans l'Ouest de l'Atacora ;
- la série de la Pendjari est faite des silts, d'argilites et de grès fins verts très compétents, parfois massifs, ou rubanés. Les grès s'alternent avec les lithotypes moins compétents et plus érodables (siltites et argilites), qui affleurent rarement. On les retrouve en affleurement continu dans les basses collines au Nord de la piste mare Bali ; les siltites et argilites qui affleurent le long de la piste qui longe le cours principal de la Pendjari à proximité de Porga ;
- les dépôts de la série de Buem sont développés dans les parties sud-ouest du bassin versant de la Pendjari. Initialement divisés en deux groupes distincts par le degré de

métamorphisme (groupes de Korontière et le groupe de Manta), un affleurement isolé des roches du groupe de Manta est observé dans un bloc tectonique au Nord de la chaîne de l'Atacora ;

- les dépôts quaternaires occupent une vaste superficie correspondant à la plupart des domaines de la réserve de la biosphère de la Pendjari sur une plaine uniforme sans affleurements faiblement incisée par le drainage des eaux pluviales. Par ailleurs, au Sud de la formation de l'Atacora on trouve les premiers affleurements du socle dahoméyen, ou bénino-togolais formé de roches éruptives très anciennes telles que le gneiss, l'orthogneis à muscovite avec des passées d'amphibolites, le micaschiste, le quartzite, les formations granitiques entièrement cristallinisées d'extension assez importante de pegmatite et de mylonites.

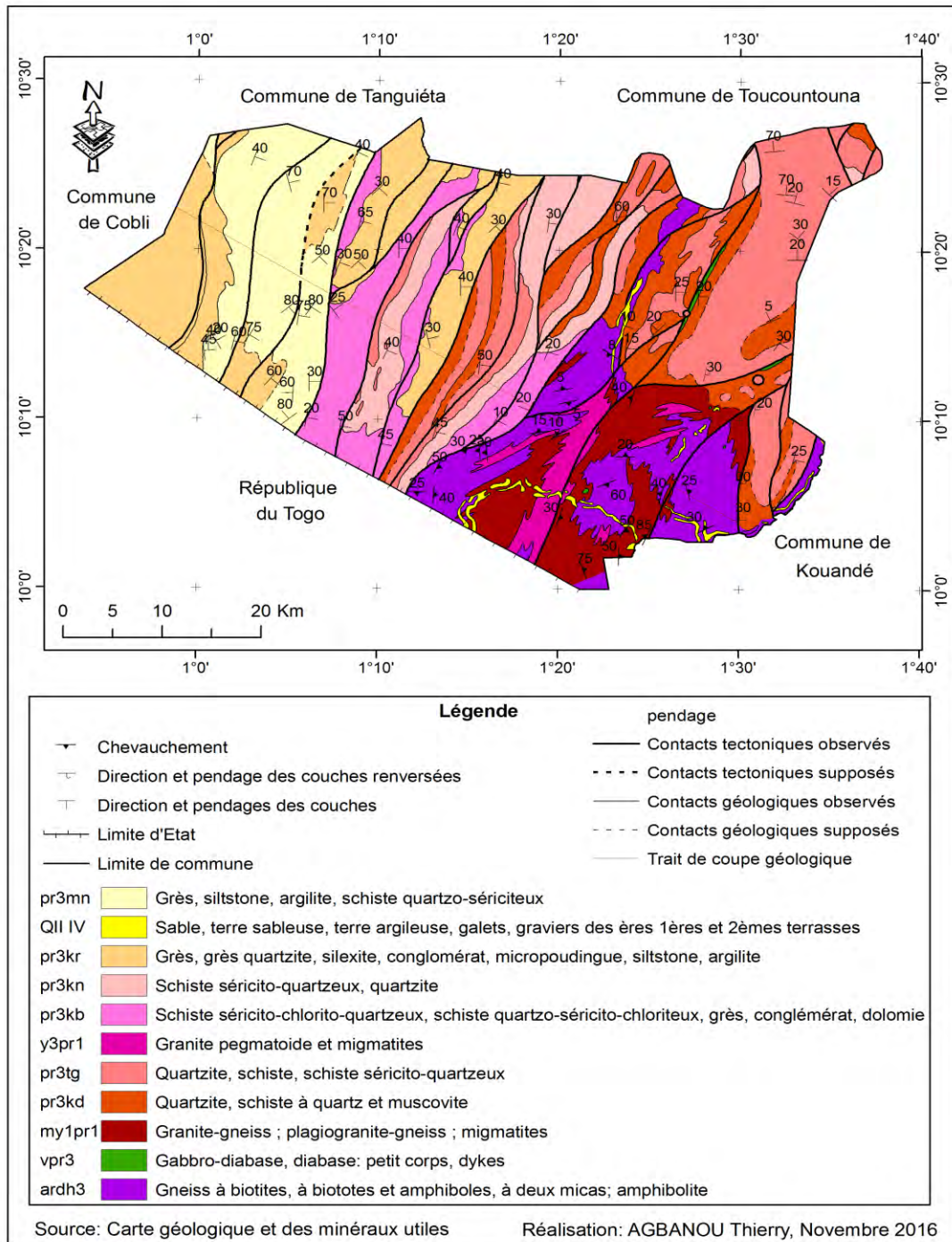


Figure 8 : Carte géologique du secteur Natitingou- Boukombé

La structure rocheuse de Natitingou comprend une armature quartzitique supportant un ensemble schisteux à semelle conglomératique et le tout fortement écaillé. On y observe les trois (3) groupes de faciès suivants (Affaton, 1987) :

- des quartzites micacés, rarement ferrugineux ou feldspathiques, fins à moyens, parfois grossiers et saccharoïdes ;

- des micaschistes quartzeux et des quartzomicaschistes dont les caractéristiques microstructurales et pétrographiques sont peu différentes de celles des quartzites. Des études ont signalé des intercalations d'itabirites et de schistes ferrugineux ;
- des amphibolites schisteuses à grains fins, vert clair à noirâtres, à lentilles de quartz et généralement intercalées dans les micaschistes avec lesquels elles ont subi les différentes phases tectoniques.

La dégradation de ces roches donne des sols relativement riches mais fragiles à cause de la nature des pluies, des pentes et des techniques culturales (Natta, 2015).

Le développement de la vie végétative dépend de la nature et de la capacité de la plante à s'adapter aux sols. Plusieurs types de sols sont rencontrés dans ce secteur, mais les plus importants sont les sols ferrugineux tropicaux.

Selon Tenté (2005), les principaux types de sol rencontrés dans cette région sont :

- les sols peu évolués d'origine lithique sur quartzites et micaschistes atacoriens ;
- les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés en argile, lessivés en sesquioxydes sur gneiss à muscovite et de grosses muscovites sur quartzite et micaschiste atacoriens ou sur roches basiques ;
- les sols ferrugineux tropicaux lessivés concrétionnés sur matériaux kaoliniques issus de quartzites et micaschistes atacoriens ;
- les sols ferriques faiblement désaturés sur roches basiques à gneiss ou à muscovites ;
- les sols limono- argileux à tendance hydromorphe doivent leur nature à la rivière Pendjari qui traverse le territoire.

Ces sols latéritiques, gravillonnaires, caillouteux, sableux, argileux (figure 9) pour la plupart lessivés sont en forte dégradation à cause de la faible capacité de gestion des eaux et des mauvaises techniques culturales. La capacité de rétention en eau et la capacité des plantes à s'adapter aux sols de cette région ont une forte influence sur leur épanouissement.

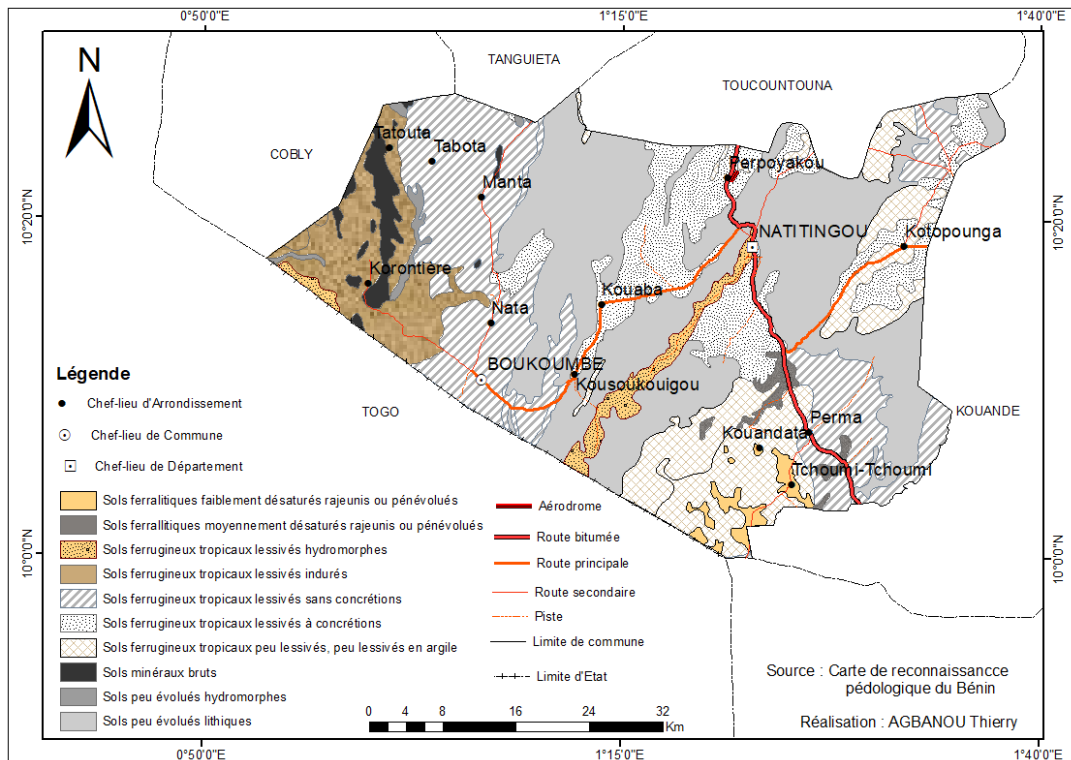


Figure 9 : Carte pédologique du secteur Natitingou-Boukombé

Les différents types de sols observés sur la figure 9 ont des aptitudes culturales qui varient. Ils sont donc favorables aux activités agricoles qui sont les principaux facteurs de dégradation du couvert végétal.

1.2.1.5. Réseau hydrographique

Les principaux cours d'eau dans le secteur Natitingou-Boukombé sont : Perma, Koumongou, Sinaïssiré, Wémou, Kouniti (figure 10). A ces cours d'eau principaux s'ajoutent d'autres secondaires (retenues et plans d'eau). La plupart de ces cours d'eau tarissent en saison sèche. Ils sont donc saisonniers et tributaires du climat et du relief. L'humidité de ce milieu favorise le développement de la végétation et des activités agricoles. Mais l'absence d'importants cours d'eau permanant favorise la dynamique du couvert végétal observé dans ce milieu.

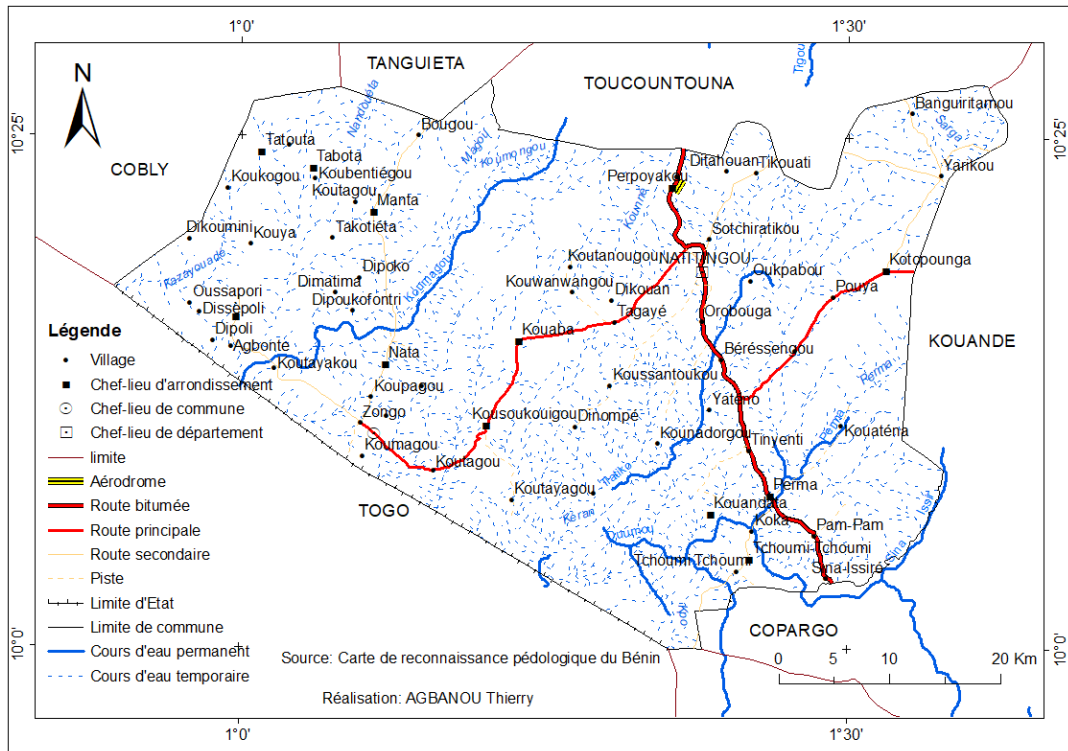


Figure 10 : Réseau hydrographique du secteur Naitigou-Boukombé

1.2.1.6. Végétation

Des travaux réalisés par les Eaux et Forêts en 1982 ont permis d'élaborer une carte des « zones éco-floristiques du nord-ouest béninois ». Cette étude s'est basée sur les images Landsat de 1973 et 1976. Le secteur Natitingou-Boukombé regorge de plusieurs types de formations végétales. Il s'agit des galeries forestières, des forêts denses sèches, des forêts claires, des savanes boisées, des savanes arborées et arbustives, des savanes saxicoles des savanes arborées et arbustives à emprise agricole, des mosaïques de cultures, des jachères et des plantations (Tente, 2005). Tente (2005) a apprécié toute la flore de ce secteur en utilisant les types phytogéographiques et les modes de dissémination des diaspores. Cet auteur a inventorié et classé par ordre d'importance soixante-six familles de végétaux dont les plus importantes sont: Fabaceae (14,2 %), Poaceae (12,6 %), Rubiaceae (7,3 %), Caesalpinaceae (4,9 %), Combretaceae (4,9 %), Euphorbiaceae (4,5 %). Ces formations végétales ont été déboisées par abus d'exploitation, ce qui entraîne une manifestation de sahélisation parce qu'elles sont clairsemées avec la présence seulement de quelques essences ligneuses à importance nutritionnelle (alimentaire) comme *Parkia biglobosa* (néré), *Vitellaria paradoxa* (karité), *Adansonia digitata* (baobab), *Khaya grandifoliola* (faux cajou), *Tamarindus indica* (tamarinier), *Khaya senegalensis* (caïlcédrat) et *Borassus aethiopum* (rônier).

Les forêts tropicales de ce milieu sont malheureusement aujourd'hui exposées à une dégradation très poussée du fait de la pression anthropique. Néanmoins il existe quelques bosquets qui abritent les fétiches ou qui sont des sanctuaires conservés (photo 1), et des forêts galeries en voie de disparition (photo 2). Les actions anthropiques et les feux de végétation ont un impact négatif sur la flore de ce secteur tant au niveau de la densité que de la répartition des essences.



Photo 1 : Forêt relique abritant un fétiche à Manta

Prise de vue : AGBANOU, mars 2016



Photo 2 : Galerie forestière sur les berges d'un affluent de perma dans le village de Kotopounga

Prise de vue : AGBANOU, mars 2016

La photo 1 présente une petite réserve forestière en forme circulaire et abritant une divinité. Cet espace à l'intérieur duquel se font des cérémonies traditionnelles annuelles est protégé et gardé par les gardiens de la tradition. Sur la photo 2, on observe une forêt galerie traversée par un cours d'eau temporaire. Sa végétation est touffue en saison des pluies et déchassée en saison sèche où le cours d'eau tari complètement.

1.2.2. Population et types d'habitats

1.2.2.1. Population

Sur le plan sociodémographique, le premier Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 1979 a dénombré 86 138 habitants dans le secteur Natitingou-Boukombé. En 1992, cette population était de 115 349 habitants avec une densité de 28,26 habitants au kilomètre carré. Au troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH 3) de février 2002, 136 188 habitants avec une densité de 33,37 habitants au kilomètre carré ont été dénombrés. En 2013 (RGPH 4), cette population à plus de 60 % rurale est estimée à 187 157 habitants avec un taux d'accroissement beaucoup plus importants à Natitingou (figure 11).

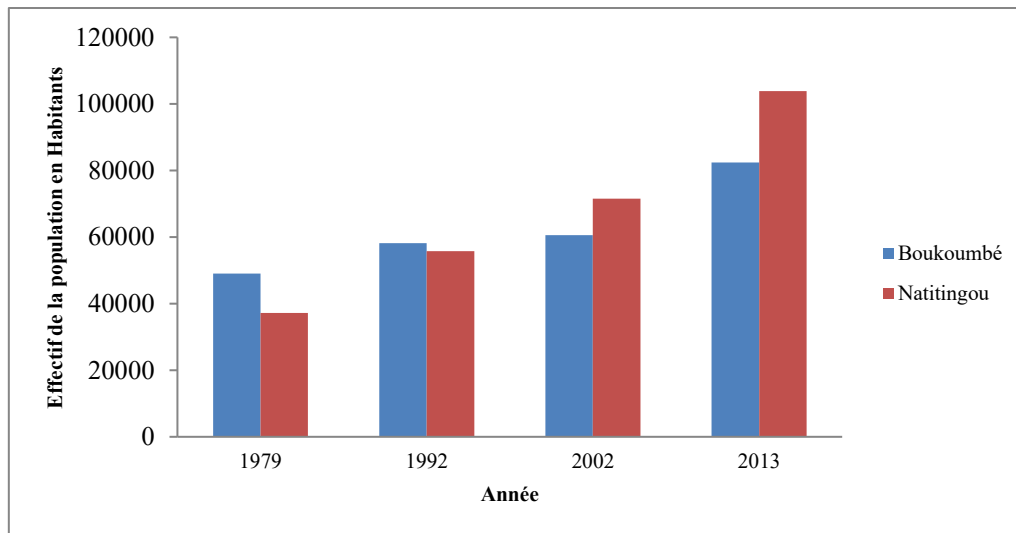


Figure 11 : Evolution de la population du secteur Natitingou-Boukoubé entre 1979 et 2013

Source : RGPH 1, 2, 3 et 4

Les phénomènes migratoires et surtout la natalité peuvent expliquer cette évolution démographique constatée. Cette évolution démographique a un impact remarquable sur l'exploitation des ressources naturelles du milieu. En effet, la vie des populations est fortement dépendante des activités agricoles, forestières et pastorales.

La population du secteur Natitingou-Boukoubé selon les résultats du quatrième Recensement Général de la Population et de l'Habitation de décembre 2013 est composée essentiellement de six groupes socioculturels : les Otamari et apparentés, les Fon et apparentés, les Bariba et apparentés, les Yoa, Lokpa et apparentés, les Yoruba et apparentés et les Peulhs qui sont dispersés sur l'étendue du territoire bien qu'étant en petit nombre. Mais les Otamari restent majoritaire dans ce milieu.

1.2.2.2. Types d'habitats

La diversité des groupes socioculturels imprime une variation notable du type d'habitat dans ce secteur d'étude. En effet, à part les centres urbains, l'habitat est dispersé dans les deux Communes de Natitingou et de Boukoubé. L'habitation de ce peuple est communément appelée « Tata somba » (photo 3). On y rencontre également les campements, type d'habitat des Peulh (Photo 4). Ces deux types d'habitats sont souvent construits en matériaux précaires. C'est-à-dire que les populations se servent des espèces végétales collectées sur place. Les graminées (*Schizachyrium sanguineum*, *Loudetia togoensis* et *Loudetia simplex*) sous forme de paille, sont surtout utilisées dans la confection des toitures. Les ligneux (*Azelia africana*, *Crossopteryx febrifuga*, *Daniellia oliveri*, *Erythrophleum africanum*, etc.) servent de poutres dans l'agencement des charpentes (Tente, 2005).



Photo 3 : Tata somba à Kousoucoingou
(Boukombé)

Prise de vue : AGBANOU, mars 2016



Photo 4 : Campement peulh à Kotopounga
(Natitingou)

Prise de vue : AGBANOU, mars 2016

La photo 3 montre au premier plan un champ de case et au second plan, l'habitation à deux niveaux. Le rez-de-chaussée est réservé aux animaux et pour la cuisine alors que le niveau supérieur (l'étage) c'est à l'espace de vie de la famille et de grenier. Autour de ce type d'habitat vie une petite communauté organisée à l'intérieur et autour du château. Les « tatas somba » (forme architecturale singulière) encore appelés « châteaux forts en miniatures » sont classées comme patrimoine mondial de l'UNESCO. Mercier (1968) indique que les Betammaribe ont créé un type d'habitation à étage qui est un des traits les plus frappants de leur originalité. La beauté de ces habitations fait qu'ils retiennent les touristes et les passants qui ont du plaisir à les visiter et y dormir parfois.

Sur la photo 4, c'est l'habitat typique des peulhs souvent construit à l'écart du village. Il est souvent entouré d'un espace pour parquer les animaux en saison sèche et pour la culture en saison pluvieuse pour profiter de l'enrichissement biologique du sol. Dans les centres urbains on retrouve les habitats groupés construits souvent en semi-dur ou en dur, c'est-à-dire en matériaux définitifs.

Les types d'habitats cumulés aux richesses fauniques et à la diversité du paysage font du secteur d'étude, l'une des zones les plus touristiques du Bénin. La croissance de la population combinée au phénomène d'urbanisation qui en découle sont des sources de pression sur les ressources naturelles du milieu et sur l'occupation du sol.

Conclusion partielle

Le phénomène d'utilisation et de changement d'usage du sol dans le monde, en Afrique et au Bénin a été abordé par plusieurs auteurs. C'est une préoccupation importante et actuelle à cause de l'explosion démographique galopante et l'importance des activités anthropiques. L'influence de ce phénomène sur les ressources naturelles est le fondement même de cette étude prospective entreprise. La prépondérance du relief dans la structuration du secteur d'étude constitue le facteur particulier qui en fait un intérêt scientifique.

Les caractéristiques physiques et socio-économiques du secteur Natitingou-Boukombé ont une influence sur l'état du paysage de ce milieu. Le contexte socio-environnemental actuel de ce milieu favorise la destruction du couvert végétal. L'intensité des activités agricoles, le surpâturage et l'exploitation du bois s'explique par la forte croissance démographique observée ces dernières décennies. Cette dernière favorise l'expansion urbaine et la forte pression exercée sur les ressources naturelles. Les pressions exercées sur ce milieu contribuent à la variabilité pluviométrique, l'augmentation des températures et la dégradation du sol. Ces facteurs naturels et humains peuvent donc être considérés comme responsable de la dynamique de l'occupation et de l'utilisation du sol dans ce milieu.

Chapitre II : Démarche méthodologique

Introduction partielle

Au vue des objectifs fixés dans cette étude, l'adoption d'une méthodologie claire est indispensable pour l'obtention de résultats fiables. Ainsi, dans le cadre de ce travail, des recherches documentaires, la collecte des données planimétriques, des enquêtes de terrain auprès des populations ont été effectuées. Le choix des outils de traitement et des outils nécessaires pour l'utilistion du modèle de simulation choisi ont été également opérés. L'idée de la recherche est de rendre les données et les résultats compréhensibles au plus grand nombre d'acteurs (décideurs, développeurs, etc.).

La recherche documentaire a permis d'appréhender et de délimiter les grands ensembles du milieu physique et d'acquérir des connaissances de base sur l'état de l'occupation des sols.

Elle a consisté à mener des recherches à travers plusieurs bibliothèques et centres de documentation. Il s'agit notamment des bibliothèques de la Faculté des Lettres Arts et Sciences Humaines, de la Faculté d'Agronomie, du Centre de documentation du Département de Géographie et Aménagement du Territoire (DGAT) et du Laboratoire de Biogéographie et Expertise Environnementale (LABEE) et du centre de documentation du Campus Numérique Francophone et la bibliothèque Centrale de l'Université d'Abomey-Calavi. Cette étape a permis de collecter les données démographiques à l'Institut Nationale de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE). Les données climaologiques ont été collectées dans les archives de l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA) et les données agricoles au Ministère de l'Agriculture de l'Elevage et de la Pêche (MAEP). En plus de ces centres, des articles en ligne ont été consultés sur les sites web (www.google.com; www.scholargoogle.com; <http://archipel.univ-toulouse.fr>).

2.1. Méthodologie relative à l'objectif 1 : *Cartographier la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé*

La connaissance de la dynamique récente de l'occupation du sol est indispensable pour appréhender l'évolution future et sa modélisation. La présente étude a utilisé les techniques d'observation, de cartographie et surtout les données de télédétection qui ont permis de par leurs capacités (répétition, vue synoptique, précision, cartographie, etc.) de suivre l'évolution des catégories d'occupation du sol dans le temps et dans l'espace. La collecte des images satellitaires est indispensable pour l'appréciation de la dynamique du paysage, car elles seules fournissent des informations spatialisées sur l'occupation du sol passée et actuelle afin de

prédire le futur ou, pour le moins, élaborer des scénarii plausibles. La figure 12 ci-dessous présente la synthèse des différentes étapes de traitement des données satellitaires.

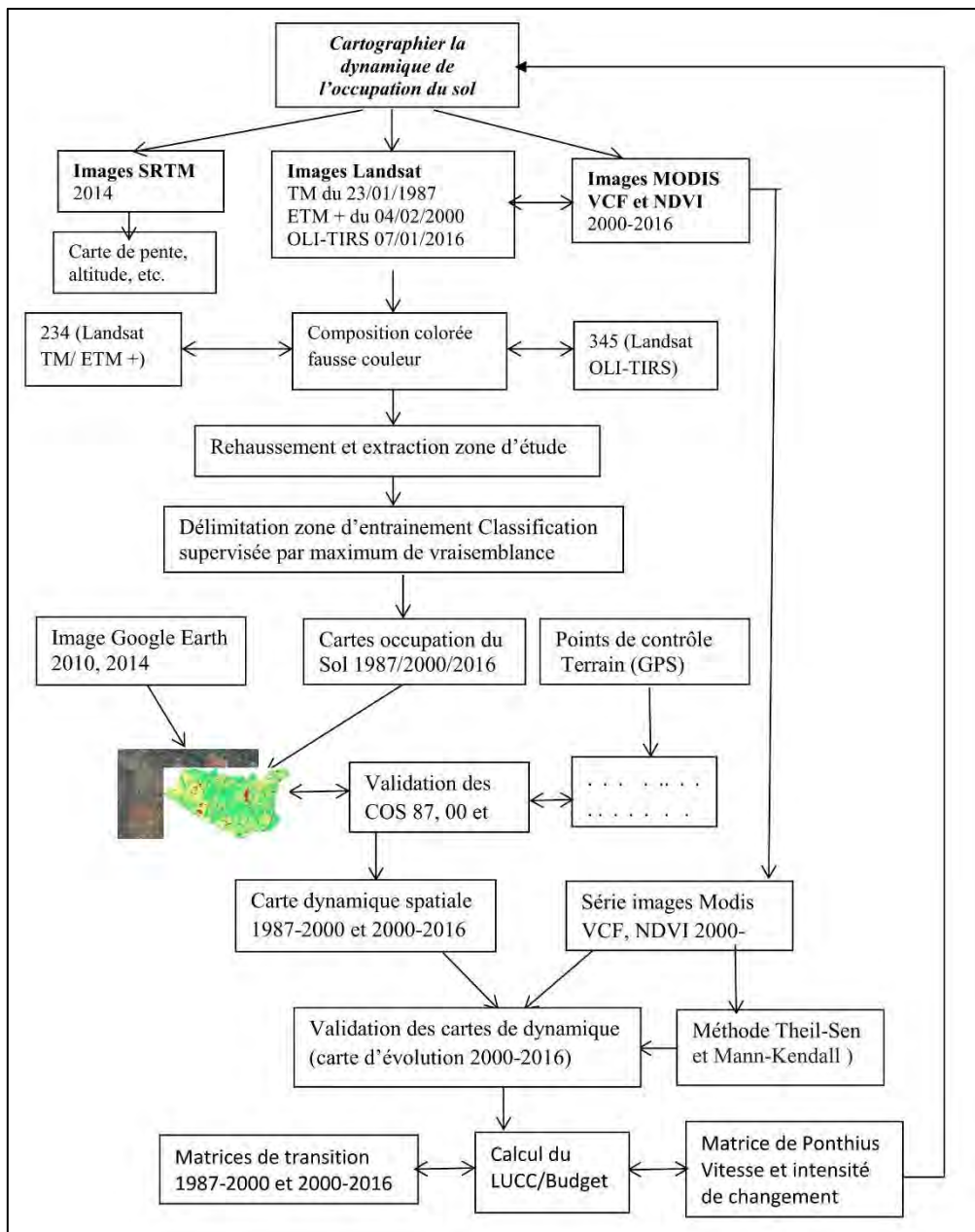


Figure 12 : Diagramme présentant la méthode de traitement des images satellitaires

La figure 12 résume les différentes étapes de pré-classification, de la classification et de post-classification des images satellitaires. La méthode de validation des cartes et d'évaluation de la dynamique de l'occupation du sol y est également présentée.

2.1.1. Matériel ou outils de collecte

Pour une meilleure connaissance de la dynamique passée et actuelle de l'occupation du sol ainsi que des facteurs environnementaux explicatifs, une base de données géoréférencées a été mise en place. Pour la collecte des informations, les données planimétriques suivantes ont été utilisées :

- Images Landsat TM (Thematic Mapper) du 23 janvier 1987 (résolution, 30 m) ;
- Images Landsat ETM+ (Enhance Thematic Mapper) du 04 février 2000 (résolution, 30 m) ;
- Images Landsat OLI- TIRS du 07 janvier 2016 (résolution, 30 m) ;
- Série d'images Modis VCF de 2000 à 2015 (résolution, 500 m) ;
- Série d'images Modis NDVI de 2000 à 2016 (résolution, 250 m) ;
- Image SRTM de 2000 (résolution 90 m) pour la réalisation des Modèles Numériques de Terrain ;
- Photographie aérienne de la mission IGB (Institut Géographique du Burkina-Faso) 94136BZ1 du 15 novembre 1994 au 1/20.000 obtenu au Centre National de Télédétection et de suivi écologique (CENATEL/Bénin) ;
- Carte topographique au 1/200.000 (feuille de Natitingou) réalisée par l'Institut Géographique National (IGN) ;
- Carte de végétation du Bénin (1998), à l'échelle du 1/100.000, élaborée par le CENATEL pour le Programme de Gestion des Terroirs et des Ressources Naturelles (PGTRN) sur la base de données satellitaires Spot et Landsat ;

Les outils suivants ont été utilisés :

- GPS (Global Positioning System) de marque GARMIN pour localiser la position des différents points d'échantillonnage (point de contrôle terrain) ;
- Appareil photographique numérique pour illustrer les catégories d'occupation du sol ;
- Fiche de questionnaire et guide d'entretien pour l'enquête socio-économique.
- Le tableur Excel
- Les logiciels Idrisi (Terrset) et ArcGIS 10.4

2.1.2. Méthode et technique de collecte des données

2.1.2.1. Collecte des images satellitaires

Le suivi de la dynamique de l'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé a été mis en place à partir d'images LANDSAT téléchargées sur le site *earthexplorer.usgs.gov* au format GEOTIFF (Path 193 et Row 53). En effet, le capteur LANDSAT permet de disposer d'un large corpus de données depuis le début des années 80 et permet d'avoir un suivi régulier

sur les 30 dernières années. Pour mener à bien cette étude, des images issues de 2 capteurs de la série Landsat : TM/ETM+ pour les années 1987 et 2000 et OLI-TIRS pour 2016 ont été utilisées. Les images Landsat et SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) ont été téléchargées gratuitement sur le site internet GLCF des USA.

Toutes ces images ont été acquises dans la période sèche (Janvier- Février), période optimale pour la meilleure perception des communautés végétales dans la zone d'étude. Jensen (1983) affirme que les images prises pendant les périodes ensoleillées présentent un très bon contraste entre les différents détails, en particulier entre ceux de l'urbain et du non urbain. Le même auteur suggère d'utiliser des images acquises dans la même période de l'année pour la détection du changement et ce, afin de réduire les problèmes dus aux différences des angles solaires, aux changements phénologiques de la végétation et aux différences dans l'humidité des sols. Ainsi, les caractéristiques des images satellitaires utilisées sont résumées dans le Tableau I ci-dessous.

La série d'images Modis VCF (2000 à 2015) et Modis NDVI ont été téléchargées gratuitement sur le site <http://usgs.gov>.

Tableau I : Caractéristiques techniques des images LANDSAT utilisée

	Type	Format	Résolution	Date	Source	Utilité
1	Image Landsat TM	Tiff	30 m	23/01/1987	USGS	Carte d'occupation du sol de 1987
2	Image Landsat ETM+	Tiff	30 m	04/02/2000	USGS	Carte d'occupation du sol de 2000
3	Image Landsat OLI-TIRS	Tiff	30 m	07/01/2016	USGS	Carte d'occupation du sol de 2016
4	Série d'images Modis VCF	HDF	500 m	2000 à 2015	USGS	Suivi d'évolution de la végétation
5	Série d'image Modis NDVI	HDF	250 m	2000 à 2016	USGS	Suivi d'évolution du NDVI
6	Image SRTM	Tiff	90 m	2014	GLCF	MNT

Capteur
TM/ETM+

Bande	Bande spectrale	Résolution	Utilisation
1	0,45 - 0,515 µm (bleu)	30 m x 30 m	Différenciation sol / végétaux, zones côtières
2	0,525 - 0,605 (vert)	30 m x 30 m	Végétation
3	0,63 - 0,69 µm (rouge)	30 m x 30 m	Différenciation des espèces végétales
4	0,75 - 0,90 µm (proche IR)	30 m x 30 m	Biomasse
5	1,55 - 1,75 µm (SWIR)	30 m x 30 m	Différenciation neige/nuage
6	10,4 - 12,5 µm (TIR)	60 m x 60 m	Thermique
7	2,09 - 2,35 µm (SWIR)	30 m x 30 m	Lithologie

Capteur TIRS	OLI-		
Bande	Bande spectrale	Résolution	Domaine
1	0,43 - 0,45 μm	30 m x 30 m	Visible
2	0,45 - 0,51	30 m x 30 m	Visible
3	0,53 - 0,59 μm	30 m x 30 m	Visible
4	0,64 - 0,67 μm	30 m x 30 m	Rouge
5	0,85 - 0,88 μm	30 m x 30 m	Proche Infrarouge (PIR)
6	1,57 - 1,65 μm	30 m x 30 m	SWIR
7	2,11 - 2,29 μm	30 m x 30 m	SWIR2
PAN	0,50 - 0,68 μm	15 m x 15 m	Panchromatique
Cirrus	1,36 - 1,38 μm	30m x 30 m	

Source : <http://eoedu.belspo.be/fr/satellites/landsat.htm>

La haute résolution spatiale de ces données a permis de caractériser sans grande difficulté les éléments paysagers au sol.

Pour améliorer la discrimination des éléments paysagers, notamment pour les dates les plus anciennes, des photographies aériennes de la mission IGB (Institut Géographique du Burkina-Faso) 94136 BZ1 du 15 novembre 1994 ont été utilisées. Quatre d'entre elles couvrent une partie de la zone d'étude (Boukombé) et ont aidé à la validation des classifications de l'occupation du sol.

2.1.2.2. Justification du choix des images satellitaires

Les images utilisées sont des images LANDSAT de résolution 30 m. Compte tenu de leur qualité, ces images utilisées ont été prises durant les mois secs (Janvier et février). En effet, l'utilisation d'images acquises pendant la période sèche permet d'avoir des images dont la nébulosité est fortement réduite et de limiter ainsi les biais atmosphériques (Hountondji, 2008 ; Oszwald *et al.*, 2010, Leroux, 2012).

Ces images ont permis d'étudier le processus de changement d'affectation et de dégradation des terres à moyen et à long terme. Ces images multitudes ont été choisies de façon à réduire au maximum l'expression des variables telles que la qualité de la lumière, la géométrie de l'observation et surtout les différences de comportement des communautés végétales au cours de l'année (Meneses-Tovar, 2011).

La série d'images Modis VCF (2000 – 2015) a permis de comparer l'évolution des différentes catégories d'occupation du sol (tree cover, non tree vegetation et non vegetation) avec celles issues des images satellitaires.

La série d'images Modis NDVI (2000-2016) a permis de faire une étude comparative de l'évolution des NDVI entre les catégories d'occupation du sol, par type de transition d'occupation du sol et par arrondissement.

2.1.2.3. Relevés de points terrain pour la classification supervisée

La région d'étude est caractérisée par des paysages assez hétérogènes et dont les transitions se font graduellement au travers de mosaïques. La détection des différentes catégories d'occupation du sol à partir des seules images satellites reste difficile. C'est pourquoi il est nécessaire de s'appuyer sur des données terrain (Sarr, 2009). Deux missions de terrain ont été menées, une en période sèche (du 20 février au 19 mars 2015) et l'autre en période humide (mai 2016). Celles-ci avaient pour but de reconnaître, de décrire les éléments paysagers du secteur d'étude et d'effectuer des relevés de points GPS (afin d'avoir une estimation précise de la position géographique de quelques catégories d'occupation du sol) représentatifs de l'ensemble des classes d'occupation du sol précédemment définies.

En tout, 90 points GPS (cf. annexe 1) à raison de 30 par transect ont été relevés afin de renseigner la structure des espaces de transitions entre les différents types d'éléments paysagers (Oszwald *et al.*, 2010). Ces trois transects ont été identifiés en fonction de la couverture végétale du milieu d'étude. Il s'agit du secteur à végétation très dégradée, du secteur à végétation moyennement dégradée et celui à végétation peu dégradée.

2.1.3. Méthode de traitement des données

2.1.3.1. Réalisation des cartes d'occupation du sol

L'occupation du sol constitue l'une des données principales pour l'analyse paysagère et pour le calcul des indicateurs d'écologie du paysage (Toro Balbontin, 2014).

A la suite de la campagne de terrain, les fiches ainsi obtenues ont été rassemblées dépouillées, transcrites en pyramide de végétation afin d'analyser leur degré de ressemblance et de définir une nomenclature (Girard & Girard, 1999). Ensuite, ces points d'entraînement ont été recalés et superposés à l'image satellite. Une correction géométrique a donc été réalisée grâce à des points GPS remarquables identifiés au sol lors de la mission sur le terrain (ponts, croisements de chemin, bord de rivière...).

Trois cartes d'occupation du sol ont été réalisées à partir des images satellitaires de 1987, 2000 et 2016. Ces images satellitaires ont été traitées avec le logiciel Idrisi 32 Andes (Terrset). Le traitement s'est fait en plusieurs étapes :

- composition colorée fausse couleur ;
- amélioration du contraste ;
- extraction (subsetting) de la zone d'étude ;
- interprétation visuelle ;
- classification supervisée ;
- validation de la classification.

✓ ***Composition colorée en fausse couleur***

L'observation de la végétation sur des images satellite peut s'effectuer depuis une bande unique d'un capteur ou encore plus efficacement, depuis trois bandes spectrales en même temps. Dans le cadre de cette étude trois bandes sont combinées, chacune associée à une des trois couleurs primaires (le rouge, le vert et le bleu : RVB). L'interprétation vise habituellement à identifier les secteurs comportant une certaine homogénéité et qui diffèrent des autres sur l'image, sur un territoire dont on a une parfaite connaissance. Parmi les compositions colorées pour l'interprétation visuelle, des combinaisons de bandes dans lesquelles s'arrangent les canaux visibles avec des canaux infrarouges dans une séquence de couleurs RVB sont souvent utilisées. Par exemple, une combinaison largement utilisée pour l'analyse de la végétation est la combinaison en "infrarouge fausse couleur", où le canal du proche infrarouge est coloré de rouge, le canal rouge de vert et le canal vert de bleu. Cette combinaison est utile pour discriminer la végétation saine, différents types d'espèces ou de communautés végétales, ainsi que pour identifier les zones qui comportent une dégradation de leur végétation ou simplement des aires dépourvues de végétation (Toro-Balbotin, 2014). Sur une image contenant cette combinaison, la couleur rouge (le proche infrarouge) correspond à une végétation saine en raison de la haute réflexion du proche infrarouge. On utilise le même principe exposé ci-dessus sur la réponse spectrale de la végétation : une réflectivité réduite dans le visible et une réflectivité élevée dans le PIR.

Ici les bandes radiométriques à même de fournir des informations sur le couvert végétal ont été superposées par synthèse additive des couleurs primaires. Ainsi la composition colorée en fausse couleurs avec la combinaison des bandes 234 pour les images TM/ETM+ et 345 pour l'image OLI TIRS a été utilisée. L'image obtenue est utile pour l'extraction d'information qu'on ne peut obtenir dans le seul spectre visible. Ici les différentes teintes rouges représentées

sur une image analysée correspondent à la végétation, mais le rouge peut varier en fonction des espèces ou du niveau de santé. Par exemple, il est fréquent que la forêt saine et dense apparaisse en rouge vif. L'eau – qui absorbe la plupart des longueurs d'onde apparaît ici très foncée et parfois noire (elle n'est pas trop visible dans cette étude), les sols nus (et de nombreuses surfaces minérales) apparaissent très clairs, généralement rose clair.

✓ *Amélioration de contraste*

L'amélioration (rehaussement) de contraste est généralement indispensable pour une bonne visualisation de l'image. C'est une technique très simple utilisée pour faciliter l'interprétation des images. Elle a consisté à appliquer une transformation, linéaire ou non, à l'amplitude du signal de chacun des pixels de l'image pour que l'ensemble des amplitudes occupe plus efficacement l'échelle des gris disponibles.

Le regroupement des bandes ou l'opération de « stacking » est indispensable car il permet de regrouper les bandes afin de mieux faire les opérations ultérieures. Après cette amélioration le redimensionnement de la taille des pixels des images a été faite pour que toutes les images soient superposables.

✓ *Extraction (subsetting) du secteur d'étude*

Le fichier obtenu après le redimensionnement de la taille des pixels a été découpé. Cette opération a été réalisée sous Terrset et a consisté à sélectionner et à extraire la portion de l'image couvrant uniquement le secteur d'étude en superposant le vecteur du secteur d'étude à l'image de la scène prétraitée (figure 13).

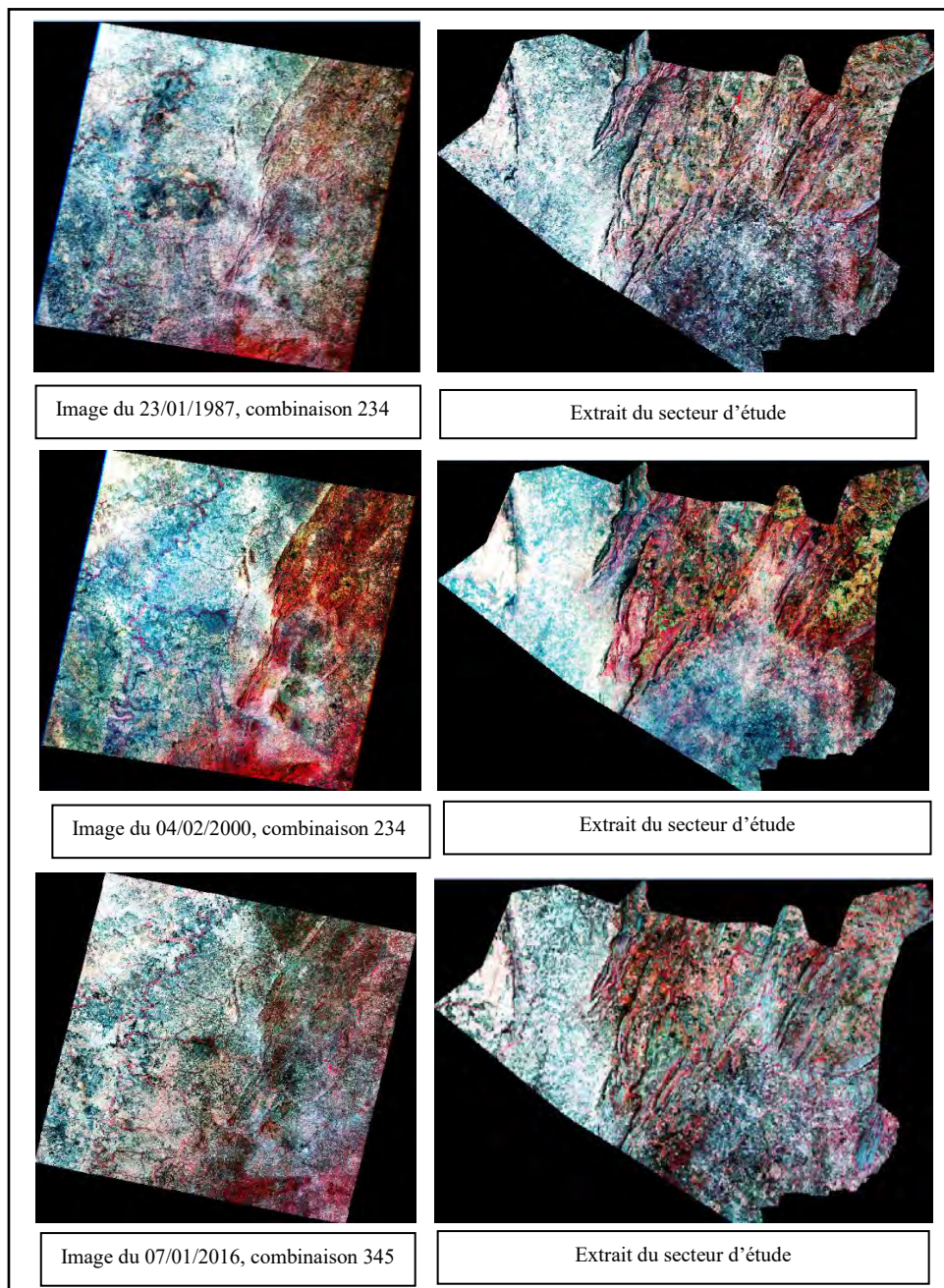


Figure 13 : Compositions colorées fausses couleurs

✓ *Interprétation visuelle et identification des catégories d'occupation du sol*

L'approche pixel a été utilisée pour l'interprétation et la classification des images. Cette approche est basée sur la reconnaissance d'objets par un photo-interprète qui identifie des zones homogènes, en utilisant simultanément différents critères (Teinte, texture, structure, taux de recouvrement, hauteur...), les zones analogues, et en validant l'identification ou l'interprétation des zones homogènes à partir de connaissances et de données de référence. La technique d'interprétation visuelle a été basée sur la connaissance des détails de quelques objets

géographiques. Sur la base de l'analyse des images des images satellitaires, deux grands groupes d'éléments paysagers ont été identifiés : des éléments linéaires et des taches. Le premier groupe intègre les galeries forestières, les routes, les chaînons de montagne. Le deuxième groupe englobe les espaces destinés aux activités agroforestières (fermes, champs, plantations, etc.), les espaces couverts de végétation, les espaces de transition et les espaces occupés par des habitats. En gros, la classification robuste utilisée s'est basée dans un premier temps sur la radiométrie des images. Et compte tenu de la complexité du milieu, la seconde étape de la classification s'est basée sur la taille, la forme et la texture pour identifier les différentes catégories d'occupation du sol.

Les clés d'interprétation telles que la forme, la taille, la texture et essentiellement la couleur ont permis de dégager huit (08) catégories d'occupation du sol entre 1987 et 2016. Ces catégories d'occupation du sol sont : forêt galerie (FG), forêt dense (FD), forêt claire et savane boisée (FCSB), savanes arborée et arbustive (SAA), savanes saxicoles (SS), mosaïque de champs et jachères (MCJ), plantation (PT) et agglomération (AGG). La clé d'interprétation des images utilisées pour l'identification des catégories d'occupation du sol se présente comme suit (tableau II) :

Tableau II : Clé d'interprétation composition colorée 234 et 345 (TM /ETM+/OLI-TIRS)

Unités d'occupation du sol	Couleur
Forêt galerie	Rouge très foncé
Forêt dense	Rouge très foncé
Forêt claire /savane boisée	Rouge foncé
Savane arborée /arbustive	Rouge claire
Savane saxicole	Noir
Plantation	Rouge foncé
Mosaïque culture et jachère	Blanc et vert
Agglomération	Cyan

✓ *Classification supervisée et réalisation des cartes d'occupation du sol*

Pour la classification, le choix des sites d'entraînement (ROI) représentatives des thèmes recherchés, l'apprentissage de l'algorithme pour une généralisation sur toutes les pixels de l'image ont été fait sous le logiciel Terrset. La méthode de classification supervisée selon l'algorithme du maximum de vraisemblance a été utilisée car il est le plus communément utilisé pour les classifications supervisées d'images multispectrales et pour le suivi des LUCC (Land-Use and Land-Cover Change) (Rogan & Chen, 2004).

Les sites d'entraînement ont été délimitées loin des zones de transition afin d'éviter d'inclure des pixels mixtes. La taille du site d'entraînement doit être supérieure à l'erreur de localisation et inférieure à l'objet à détecter (Kioko & Okello, 2010). Elle a été estimée par la formule suivante :

$$A = P(1 + 2L)$$

avec A = la superficie du site d'entraînement ; P = dimension du pixel en mètre ; L = précision de la localisation en mètre

Les points GPS collectés sur le terrain ont été superposés aux pixels pour faciliter l'identification des catégories d'occupation. L'analyse de graphiques des zones d'entraînement a permis de mettre en évidence l'homogénéité de celles-ci. Le choix des classes thématiques constitue une étape cruciale dans cette opération. Les classes doivent, à la fois, être bien discriminées entre elles et Communes aux trois images. La classification établie ainsi que les couleurs de représentation de chaque catégorie d'occupation du sol ont été adaptées de la nomenclature Corine Land Cover (CLC) et résumé dans le tableau III.

Tableau III : Description des catégories d'occupation du sol identifiées dans le secteur d'étude.

Classes	Sous-classes	Description
Formations « naturelles »	Forêt dense	Végétation très dense, peuplement continu d'arbres à caractère sempervirent de près de 10 m (white, 1983)
	Forêts claires et savanes boisées	Végétation composée principalement d'arbres, avec des sous-bois peu développés avec un recouvrement des cimes de 40% au plus (white, 1983). Les arbres sont souvent à feuilles caduques avec un indice de végétation faible en saison sèche. Noter la présence de brûlis
	Savanes arborées et arbustives	Végétation relativement dense mais avec des arbres de taille inférieure à 10 m, sous-bois arbustif. Noter la présence de brûlis
	Savane saxicole	Végétation constituée d'herbes, d'arbres et arbustes qu'on retrouve sur les flancs de montagne.
Formations anthropiques	Forêts galeries	
	Plantations	Couverture boisée composée d'espèces de sylviculture. Cette classe à une forme régulière. Elle regroupe généralement les arbres comme l'anacardier, le manguier, le teck, l'eucalyptus, le caïcédra, le moringa, le mélina, etc.
	Mosaïques de culture et jachère	Surfaces anciennement ou actuellement cultivées, d'étendues variables situées à proximité des centres urbains ou le long des routes. Ces parcelles sont souvent à nu pendant la période sèche. Sur les parties cultivées on note des débris de cultures récoltés et sur les jachères il y a des impacts de feu de brousse. Il peut y avoir confusion avec la classe de savane arbustive.
Habitats	Agglomérations	Comprend les centres abrités, les routes, et les pistes. Zone où la végétation naturelle a été éliminée sur de larges étendues (White, 1983).

Source : Mars, 2016 adapté de Diry et Mignon, 2000, Djafarou 2015 et travaux de terrain

Après la composition colorée, l'extraction du secteur d'étude et la classification, les cartes d'occupation du sol ont été réalisées. Ces cartes fournissent les données de base pour l'analyse et la quantification du paysage.

Les superficies des différentes catégories d'occupation du sol ont été calculées et des diagrammes de comparaison établis. Les approches descriptive et diachronique ont été utilisées pour l'analyse.

2.1.3.2. Validation de la classification

Pour la validation des cartes d'occupation du sol, plusieurs méthodes ont été utilisées :

✓ *Matrice de confusion, erreur d'omission et de commission*

La matrice de confusion a permis d'appréhender la qualité des résultats de la classification. La saisie d'un jeu de polygone, appelé sites de validation a permis d'extraire la matrice de confusion. Cette dernière a permis de dégager le pourcentage d'un thème bien classé dans sa catégorie, les erreurs d'omission et les erreurs de commission. Les erreurs d'omission (en colonne) ont été obtenues en faisant le rapport entre le nombre de pixels bien classés dans chaque catégorie et le nombre total de pixels de ladite catégorie. Les erreurs de commission (en ligne) ont été obtenues par la même méthode, mais ici au niveau des lignes. La matrice de confusion a également permis de calculer l'indice d'exactitude I des cartes d'occupation du sol.

$$I = \sum x_d / N$$

avec x_d = les observations de la diagonale ; N = le nombre total des observations.

Si $I \geq 0,9$ alors l'interprétation est correcte.

✓ *Evaluation de la qualité de la classification et vectorisation (indice de Kappa)*

Bien que l'indice de Kappa de Cohen soit fortement contesté aujourd'hui (Pontius & Millones, 2011), aucun indice n'a pu encore le remplacer valablement en matière d'évaluation et de validation des résultats obtenus suite à la classification supervisée des différentes unités d'occupations du sol. Cet indice est donc utilisé pour évaluer les similarités entre les résultats obtenus et ceux prévus. Il est calculé en utilisant un tableau de contingence (ou tableau de confusion) qui décrit la distribution des classes de la carte de référence par rapport à la carte des résultats. Le tableau de confusion est un tableau à double entrées où les classes des cartes de végétation se trouvent en lignes et les données du contrôle-terrain en colonnes. Sur la diagonale de ce tableau se trouvent les unités de végétation bien identifiées et de part et d'autre

de cette diagonale les erreurs d'omission et de confusion. L'indice de Kappa de Cohen est obtenu par la formule suivante :

$$\kappa = \frac{P(A) - P(E)}{1 - P(E)}$$

Où P(A) est la correspondance observée entre les classes et P(E) la probabilité hypothétique de correspondance.

Lorsque l'indice de Kappa est supérieur à 75 %, la classification adoptée est valable et les résultats peuvent être judicieusement utilisés pour l'élaboration des cartes d'occupation du sol (Pontius, 2000).

✓ *Superposition des cartes aux images Google Earth*

Les différentes cartes d'occupation du sol réalisées ont été vectorisées et importées pour être superposées aux images de haute résolution obtenues à partir de Google Earth. Mais compte tenu de la couverture temporelle des images de haute résolution proposées par Google Earth sur la zone d'étude (28/03/2003 au 26/12/2009), seule la classification de 2016 a été soumise à une validation.

✓ *Comparaison des cartes aux images Modis VCF*

La série d'images Modis (2000 à 2015) du secteur d'étude (dalle H18 V07) a été téléchargée gratuitement sur le site USGS (US Geological Survey) (<http://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT/MOD44B.051/>). Ces images Modis VCF (Vegetation Continuous Fields) sont des images (500 m de résolution) déjà traitées et qui renseignent sur l'évolution des trois indicateurs que sont : « tree cover » (TC), « non tree cover » (NTC) et « non vegetation » (NV). Conçues pour représenter continuellement la surface terrestre de la terre en fonction de la couverture végétale de base, ces images fournissent trois types de composantes de la couverture du sol : pourcentage de couverture d'arbre, pourcentage de couverture non arborescente et pourcentage des parties non végétalisées. Les produits VCF fournissent une représentation quantitative continue du revêtement de la surface du sol avec des détails spatiaux améliorés et sont donc largement utilisés dans les applications de modélisation et de surveillance de l'environnement.

La méthode Theil-Sen (median trend) disponible dans TerrSet (Series Trend Analysis / Earth Trends Modeler) a été appliquée sur le stack des images 2000-2015 (pour chacun des indicateurs VCF). Ceci a permis de voir la tendance d'évolution par pixel significative de

chacun des trois indicateurs (TC, NTC, NV) pour chaque type de transition observée sur la période 2000 – 2015 avec les images Landsat. Ici plus les pentes sont faibles, plus l'indicateur considéré est en régression. Cet exercice a permis de déceler les éventuelles erreurs et de valider la classification des images Landsat.

✓ *Comparaison des NDVI obtenues à partir des images Modis pour les différentes catégories d'occupation du sol*

Pour la validation des classifications des images Landsat, les valeurs des NDVI de chacune des catégories d'occupation des sols (2000 et 2016) et celles de la carte d'évolution de 2000-2016 ont été extraites. Ces NDVI ont été extraites de la série d'images Modis NDVI (2000-2016) de 250 m de résolution (dalle h18 V07) téléchargée gratuitement sur le site internet USGS. Une étude comparative de l'évolution de ces NDVI a été faite par catégories d'occupation du sol, par type de transition et par arrondissement. Une validation visuelle a été faite en superposant les zones d'entraînement de chacune des catégories d'occupation du sol aux images Modis NDVI afin de comparer les valeurs des NDVI entre catégories d'occupation du sol.

2.1.3.3. Analyse statistique des changements d'état des catégories d'occupation du sol

L'étude diachronique a permis de comparer les cartes réalisées (1987, 2000 et 2016) afin de faire ressortir la dynamique de chaque catégorie d'occupation du sol. Les cartes réalisées ont été superposées deux à deux, 1987-2000 ; 2000-2016 et un tableau de synthèse récapitulant l'évolution ou la régression des différentes catégories d'occupation du sol a été établi.

✓ *Carte d'évolution et matrice de transition*

La fonction CROSSTAB de Terrset a permis de croiser les cartes d'occupation du sol afin de détecter les différents changements, de calculer la matrice de transition et d'établir la carte des changements entre catégories d'occupation du sol. Elle a également permis de calculer le LUCC budget (Land Use / Cover Change) entre 1987 et 2000 et entre 2000 et 2016.

La matrice de transition est une méthode qui permet de décrire de manière condensée, sous forme de matrice carrée, les changements d'état des éléments d'un système durant une période donnée. Elle permet de caractériser la diminution ainsi que l'augmentation des catégories d'occupation du sol entre deux périodes. Ainsi, dans le cadre de cette étude, les matrices de transition renseignant sur l'évolution de la classification de chacune des images ont été établies. Un tableau de synthèse ci-dessous illustre une matrice de transition entre les temps (T1 et T2)

correspondant aux catégories i et j d'occupation du sol respectivement pendant t1 et t2 (Tableau IV).

Tableau IV : Matrice générale de transition de deux différentes cartes de LUCC

T2									Total (T1)	Perte
T1	COS 1	COS2	COS 3	COS 4	COS 5	COS6	COS7	COS8		
COS 1	S _{1,1}	S _{1,2}	S _{1,3}	S _{1,4}	S _{1,5}	S _{1,6}	S _{1,7}	S _{1,8}	S _{1,1} + ... + S _{1,8}	S ₁₊ - S _{1,1}
COS 2	S _{2,1}	S _{2,2}	S _{2,3}	S _{2,4}	S _{2,5}	S _{2,6}	S _{2,7}	S _{2,8}	S _{2,1} + ... + S _{2,8}	S ₂₊ - S _{2,2}
COS 3	S _{3,1}	S _{3,2}	S _{3,3}	S _{3,4}	S _{3,5}	S _{3,6}	S _{3,7}	S _{3,8}	S _{3,1} + ... + S _{3,8}	S ₃₊ - S _{3,3}
COS 4	S _{4,1}	S _{4,2}	S _{4,3}	S _{4,4}	S _{4,5}	S _{4,6}	S _{4,7}	S _{4,8}	S _{4,1} + ... + S _{4,8}	S ₄₊ - S _{4,4}
COS 5	S _{5,1}	S _{5,2}	S _{5,3}	S _{5,4}	S _{5,5}	S _{5,6}	S _{5,7}	S _{5,8}	S _{5,1} + ... + S _{5,8}	S ₅₊ - S _{5,5}
COS 6	S _{6,1}	S _{6,2}	S _{6,3}	S _{6,4}	S _{6,5}	S _{6,6}	S _{6,7}	S _{6,8}	S _{6,1} + ... + S _{6,8}	S ₆₊ - S _{6,6}
COS 7	S _{7,1}	S _{7,2}	S _{7,3}	S _{7,4}	S _{7,5}	S _{7,6}	S _{7,7}	S _{7,8}	S _{7,1} + ... + S _{7,8}	S ₇₊ - S _{7,7}
COS 8	S _{8,1}	S _{8,2}	S _{8,3}	S _{8,4}	S _{8,5}	S _{8,6}	S _{8,7}	S _{8,8}	S _{8,1} + ... + S _{8,8}	S ₈₊ - S _{8,8}
Total (T2)	S _{1,1} + ... + S _{8,1}	S _{1,2} + ... + S _{8,2}	S _{1,3} + ... + S _{8,3}	S _{1,4} + ... + S _{8,4}	S _{1,5} + ... + S _{8,5}	S _{1,6} + ... + S _{8,6}	S _{1,7} + ... + S _{8,7}	S _{1,8} + ... + S _{8,8}		
Gain	S ₊₁ - S _{1,1}	S ₊₂ - S _{2,2}	S ₊₃ - S _{3,3}	S ₊₄ - S _{4,4}	S ₊₅ - S _{5,5}	S ₊₆ - S _{6,6}	S ₊₇ - S _{7,7}	S ₊₈ - S _{8,8}		

Source : Modifié de Pontius *et al.*, 2004b, p.252

S = superficie des catégories d'occupation du sol i convertie en j. Si,j = une catégorie i d'occupation du sol au temps T1 convertie en une catégorie j au temps T2. Les changements de catégories se font de la ligne i vers la colonne j. Les S1,1, S2, 2, S3,3, S4,4, S5,5 représentent les superficies des catégories d'occupation du sol qui n'ont pas changé. Les autres valeurs correspondent aux superficies de catégories modifiées entre les deux périodes.

✓ Interprétation de la matrice générale de transition

La notation S_{ij} représente la surface du paysage qui subit une transition de la catégorie i à la catégorie j, où le nombre de catégories est j.

Les entrées sur la diagonale indiquent la persistance, donc S_{ij} désigne la proportion du paysage qui persiste dans la catégorie j.

Les valeurs en dehors de la diagonale indiquent une transition depuis la catégorie i à une différente catégorie j.

Dans la ligne Total, la notation S_{1,1} désigne la superficie du paysage dans la catégorie 1 au temps 1, qui est la somme sur tous les j S_{ij}.

Dans la colonne Total, la notation S_{+j} désigne la proportion du paysage dans la catégorie j au temps 2, qui est la somme de tous les S_{ij}.

✓ Calcul du LUCC budget

La matrice permet de faire le bilan des gains, des pertes et des persistances en terme de superficie des catégories d'occupation du sol entre deux dates. Le gain brut pour chaque catégorie est calculé en soustrayant la persistance du total de la ligne, tandis que la perte brute est calculée en soustrayant la persistance du total de la colonne.

L'équation (1) et (2) donne la méthode de calcul du gain (G) et de la perte (L) observé au niveau de chaque catégorie d'occupation du sol entre deux dates.

$$G_j = \frac{\{(\sum_{i=1}^j S_{jj}) - S_{jj}\} \times 100}{\sum_{i=1}^j S_{ij}} \quad \text{OU} \quad G_j = (\sum_{i=1}^j S_{jj}) - S_{jj} \quad (1)$$

$$L_i = \frac{\{(\sum_{j=1}^j S_{ij}) - S_{ii}\} \times 100}{\sum_{j=1}^j S_{ij}} \quad \text{ou} \quad L_i = (\sum_{j=1}^j S_{ii}) - S_{ii} \quad (2)$$

G_j = Gain de superficie (ou en proportion) d'une catégorie d'occupation du sol j

L_i = Perte de superficie (ou en proportion) d'une catégorie d'occupation du sol i

S_{ii} = Superficie stable d'une catégorie d'occupation i entre deux dates

S_{jj} = Superficie stable d'une catégorie d'occupation j entre deux dates

S_{ij} = Superficie d'une catégorie d'occupation i transformée en j entre deux dates.

S_{ji} = Superficie d'une catégorie d'occupation j transformée en i entre deux dates

L'équation (3) exprime le changement total. La superficie totale changée TC est calculée en additionnant toutes les entrées de la matrice puis en soustrayant les persistances.

$$\text{Total Change} = TC = \frac{\sum_{j=1}^j \{(\sum_{i=1}^j S_{ij}) - S_{jj}\}}{\sum_{j=1}^j \sum_{i=1}^j S_{ij}} \quad (3)$$

L'équation (4) explique comment calculer le changement net pour une catégorie j en ajoutant les transitions dans lesquelles la catégorie j gagne, c'est-à-dire C_{ij} , puis en soustrayant la transitions dans lesquelles la catégorie j perd, c'est-à-dire C_{ji} . La fonction MAXIMUM sélectionne les catégories dont le changement net est positif, puis la somme sur j accumule les variations nettes positives. Lorsqu'une catégorie gagne, une autre catégorie perd, de sorte que le gain net total de toutes les catégories est égal à la perte nette totale des catégories. Autrement dit, pour une catégorie donnée, dans la matrice elle correspond à la différence entre le gain brut et la perte brute.

$$\text{Net Change} = \frac{\sum_{j=1}^j \{ \text{MAXIMUM} [0, \sum_{i=1}^j (S_{ij} - S_{ji})] \}}{\sum_{j=1}^j \sum_{i=1}^j S_{ij}} \quad (4)$$

L'équation (5) calcule la balance (en anglais Swap) est la différence entre le total change et le net change. Cette variable exprime un changement de lieu sans changement de quantité. Pontius *et al.* (2008) l'expliquent comme un ajustement qui pourrait être résolu en réorganisant les pixels d'une carte pour s'adapter autant que possible avec l'autre carte.

$$\text{Swap} = \text{Total Change} - \text{Net Change} \quad (5)$$

✓ *Calcul du taux d'évolution*

La dynamique de chaque catégorie d'occupation sera appréciée en calculant le taux d'évolution $E_{(i, k)}$ des superficies d'occupation du sol de la façon suivante :

Soit S_i la superficie d'une catégorie d'occupation du sol de l'année i et S_k , celle d'une catégorie d'occupation du sol de l'année k , avec $k > i$. $E_{(i, k)}$ sera égale à :

$$E_{(i, k)} = \frac{S_k - S_i}{S_i} \times 100$$

Si $E_{(i, k)} = 0$, on conclut qu'il y a stabilité de cette catégorie d'occupation du sol ;

Si $E_{(i, k)} < 0$, on conclut qu'il y a régression de cette catégorie ;

Si $E_{(i, k)} > 0$, il y a extension ou évolution de cette catégorie.

Cet indice est calculé pour toutes les catégories d'occupation du sol. Il permet d'apprécier l'évolution des différentes catégories d'occupation du sol entre deux périodes.

✓ *Calcul des Taux moyens annuels d'expansion spatiale (T)*

Le taux moyen annuel d'expansion spatiale exprime la proportion de chaque catégorie d'occupation du sol qui change annuellement. A partir de la superficie de ces catégories, ce taux a été calculé grâce à la formule de Bernier (1992) :

$$T = [(\ln S_2 - \ln S_1) / ((t_2 - t_1) \times \ln e)] \times 100$$

S_1 et S_2 : Superficie d'une unité paysagère à la date t_1 et t_2 respectivement ; $t_2 - t_1$: Nombre d'année d'évolution ; \ln : Logarithme népérien ; e : Base du logarithme népérien ($e = 2,71828$).

✓ *Calcul de la vitesse d'évolution des catégories d'occupation du sol*

Afin de connaître la vitesse de variation des catégories d'occupation du sol identifiées, la formule suivante a été utilisée :

$$\Delta_s = \frac{S_{P2} - S_{P1}}{t_2 - t_1}$$

Où : Δ_s = Vitesse de variation (extension ou régression en ha/an) ; S_{P1} = Superficie occupée par la catégorie d'occupation considérée au cours de l'année 1 (ha) ; S_{P2} = Superficie occupée par la catégorie d'occupation considérée au cours de l'année 2 (ha) ; t_1 = année 1 ; t_2 = année 2.

✓ *Analyse de l'intensité et de la vitesse des changements*

Dans la présente étude deux programmes d'analyse (Pontius Matrix 22 et intensity analysis 02.xlms) de Aldwailk et Pontius (2012), ont permis de mesurer (%) les intensités des changements selon les intervalles de temps, les catégories et les transitions entre catégorie d'occupation du sol.

Le premier programme s'est basé sur les matrices de transition obtenues pour les intervalles de temps 1987-2000 et 2000-2016 pour générer des graphiques montrant lesdites intensités selon les intervalles de temps. Les graphiques présentent l'intensité et la vitesse de changement des unités d'occupation du sol entre 1987-2000 et 2000-2016. A ce niveau, l'état de rapidité des changements est déterminé grâce à la ligne verticale en tiret bleu, appelée ligne de zone uniforme. Si le graphique est à gauche de cette ligne ou les changements devraient s'arrêter si les perturbations ne continuaient plus, le changement est dit lent (ou dormant). Mais si celle-ci est à droite de cette ligne, le changement est rapide (ou actif).

Le second programme, grâce à la matrice de transition, a aussi permis de générer les statistiques pour les changements selon les intervalles de temps, entre chaque catégorie d'occupation du sol et les autres. Il est de même pour les pertes et gains survenus lors des transitions entre unités.

✓ *Indices de reconnaissance de la dégradation de la végétation*

L'indice le plus utilisé est l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (en anglais *Normalized Difference Vegetation Index* : NDVI). Il permet d'apprécier la qualité de la végétation, la production de biomasse verte et l'évaluation de la couverture et de la dynamique de la végétation ainsi que pour les études d'incendies forestiers (Diof et Lambin, 2001, Paegelow et al., 2012). Cet indice permet donc de donner une estimation de l'activité chlorophyllienne de la végétation à différents stades phénologiques (Djoufack, 2011). Son expression est la suivante (Bacour et al., 2006) :

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

Avec ρ_{PIR} = réflectance dans la bande Proche Infra-Rouge et ρ_R = réflectance dans la bande rouge.

Le NDVI est un indice normalisé (Davranche, 2008), de ce fait les valeurs s'échelonnent de -1 à 1 où : $[0,+1[$ = végétation avec une forte activité chlorophyllienne ; $[-1, 0[$ = espace en eau, fortement humide ; 0 = sol nu

2.2. Méthodologie relative à l'objectif 2 : Déterminer des facteurs explicatifs de la dynamique de l'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé.

Pour mieux comprendre le rapport entre environnement et populations et appréhender la perception de ces dernières sur les facteurs d'évolution de l'occupation du sol, des données socioéconomiques ont été collectées sur le terrain.

2.2.1. Matériel et outils de collecte

Les données collectées pour atteindre cet objectif se résument aux :

- différents types de facteurs explicatifs des changements d'occupation du sol.
- statistiques climatiques de 1961 à 2010 relatives à la station de Natitingou et des stations environnantes (16 stations au total). Il s'agit ici des données de hauteur de pluie, l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'humidité et température.
- statistiques agricoles de 2005 à 2014 (10 ans) notamment la production, le rendement et les superficies emblavées par cultures.
- statistiques démographiques de 1979 à 2013 : effectif de la population, taux d'accroissement, densité de population.
- données socio-économiques.

Le matériel et les outils utilisés sur le terrain sont :

- quatre questionnaires adressés aux exploitants agricoles, aux exploitants de bois, aux exploitants miniers et aux éleveurs pour recueillir leur avis sur les différents usages du sol et des ressources végétales notamment les ligneuses ;
- fiches de collecte conçues pour la collecte des données démographiques et pluviométriques ;
- guide d'entretien pour les réunions participatives (focus group).

2.2.2. Méthode et technique de collecte des données

2.2.2.1. Facteurs explicatifs des changements d'occupation du sol

✓ *Approche bibliographique de l'identification des facteurs explicatifs*

Cette approche est basée sur la recherche documentaire dans les centres de documentation et bibliothèques universitaires et en ligne (sur internet). Elle a permis d'avoir une idée sur les

différents facteurs ou déterminants qui pourraient expliquer les changements d'usage ou d'utilisation des sols dans un milieu soudanien en général et dans le nord-ouest du Bénin en particulier. Ainsi une analyse systémique a permis d'appréhender la complexité de ce milieu et aussi son fonctionnement global. Cette approche a permis de mettre en place un cadre conceptuel pour synthétiser de façon claire la relation entre l'occupation du sol et les facteurs naturels et anthropiques qui l'influencent.

✓ *Approche participative de l'identification des facteurs explicatifs*

Cette approche a été utilisée aussi bien à l'université que sur le terrain. En effet, des discussions (échanges) ont été menées avec des acteurs du monde scientifique ayant mené des recherches dans ce secteur d'étude ou sur des thématiques similaires pour bénéficier de leur expertise sur les types d'occupation du sol et les facteurs explicatifs.

Outres les acteurs du monde scientifique, des focus group ont été réalisés avec les différents acteurs supposés participés aux changements d'usage des sols. Il s'agit surtout des exploitants de bois, des agriculteurs, des éleveurs.

Ces formes de discussion a permis d'identifier et de valider les facteurs explicatifs des changements d'occupation et d'usage du sol et aussi de présenter et de valider la démarche générale de modélisation adoptée.

2.2.2.2. Données démographiques et agricoles

La collecte des données démographiques de 1979 à 2013 (Recensements Généraux de la Population et de l'Habitation) s'est faite à l'Institut de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE) à Cotonou.

Les données agricoles de 2004 à 2016 ont été obtenues à l'Institut National de la Recherche Agricole au Bénin (INRAB) et au Centre d'Action Régionale et du Développement Rural (CARDER) Atacora-Donga.

2.2.2.3. Données climatologiques

Les données pluviométriques (1961-2016) relatives à la station de Natitingou et de 15 autres stations environnantes ont été collectées à l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA) à Cotonou. Elles ont aidé à interpréter la dynamique de la couverture végétale.

Les données brutes obtenues sur le climat sont des séries climatologiques mensuelles de précipitations, de température, d'évapotranspiration potentielle (ETP), d'humidité, d'insolation et de débit de sortie du bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga (bassin dans lequel

se retrouve le secteur d'étude). La période de 1961 à 2010 est celle couverte par chacune de ces données brutes. Les données pluviométriques mensuelles (1961 à 2016) des stations de Tanguiéta, Natitingou, Kouandé, Banikoara, Kandi, Djougou, Bembèrèkè, Ina, N'Dali, Bassila du Bénin et Blitta, Sokodé, Alédjo, Niamtougou, Pagouda, Kara-ville du Togo voisin ont été utilisées. Celles des températures et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) sont celles de la station de Natitingou. Au total les données de seize (16) stations ont été utilisées dans le cadre de cette recherche.

2.2.2.4. Données socio-économiques

La collecte des données socio-économiques a été faite à l'aide des questionnaires. Ces questionnaires (cf. annexe 2) ont été administrés aux différents acteurs de l'exploitation et de l'utilisation du sol. Il s'agit des cultivateurs, des éleveurs, des exploitants de bois, des exploitants des pierres ornementales.

Le mode d'interview utilisé est l'interview par enquêteur, c'est à dire le face-à-face car il permet d'atteindre le plus fort taux de réponses au plus grand nombre de questions.

Pour mieux élaborer ces questionnaires, la méthode de Diagnostic Rapide ou le Rapid Rural Appraisal (RRA) a été utilisée. Elle a consisté à effectuer des visites exploratoires dans les localités choisies pour la collecte des informations. Elle a permis d'identifier les faits porteurs et les tendances lourdes en rapport avec les différentes activités socio-économiques dans les deux Communes. Les différents axes d'intérêt des questionnaires élaborés sont :

- Les différents facteurs responsables des changements d'occupation du sol.
- La perception des populations sur les activités qui dégradent le couvert végétal ;
- Les modes d'acquisition et de mise en valeur des terres.

Aussi, des entretiens individuels, des discussions groupés (focus group de 6 à 8 personnes) ont été réalisés. Au total, huit (08) focus group ont été réalisés à raison de quatre (04) par Communes.

✓ *Echantillonnage*

Dans le cadre de ce travail, la méthode d'échantillonnage par choix raisonné a été utilisée pour identifier les villages dans lesquels les enquêtes se sont déroulées. Pour les villages, le critère d'importance (nombre) des changements d'occupation du sol a été utilisé. En se basant sur les données du quatrième Recensement Général de la Population et de l'Habitation de 2013 (RGPH 4) et les statistiques issues des cartes d'occupation du sol (2000 et 2016), les deux villages

comptant plus de changements dans l'occupation du sol ont vu certains de leurs ménages enquêtés.

La détermination de la taille de l'échantillon par village s'est basée sur le nombre de ménages agricoles des deux Communes. A cet effet, la taille de l'échantillon a été déterminée par la méthode probabiliste de Schwartz (1995) qui s'exprime par la formule :

$$X = \frac{Z\alpha^2 \times P(1 - P)}{i^2}$$

X = la taille de l'échantillon ;

Z α = écart réduit correspondant à un taux de sondage de 95 %. Cette valeur est de 1,96 ;

P= n/N avec P = proportion des ménages agricoles des deux Communes considérées avec n= nombre total de ménages agricoles des villages échantillonnés et N= nombre total de ménages des deux Communes ;

i = précision désirée égale à 5 %.

✓ *Calcul de la taille de l'échantillon*

La méthode de calcul de cet l'échantillon des agriculteurs enquêtés se présente comme suit :

$$P = \frac{7057}{17001} = 0,41 ; 1 - P = 1 - 0,41 = 0,59 ; X = \frac{(1,96)^2 \times 0,41 \times 0,59}{(0,05)^2} = 371,71$$

Ainsi, 372 producteurs agricoles (tableau V) ont été aléatoirement échantillonnés et enquêtés dans 32 villages au sein des seize (16) arrondissements que comptent les deux (02) Communes.

Tableau V : Répartition des des catégories socioprofessionnelles importantes enquêtées par village.

Commune	Arrondissement	Ménages		Exploitants		
		agricoles	enquêtés	Agriculteurs	Eleveurs	de bois
Boukombé	Dipoli	525	27	16	03	08
	Korontière	585	30	18	03	09
	Koussoucingou	183	10	06	01	03
	Manta	410	30	18	03	09
	Natta	441	22	13	03	06
	Tabota	473	24	14	03	07
	Boukounbé centre	769	40	24	04	12
Natitingou	Kotopounga	667	35	21	04	10
	Kouaba	441	23	13	03	07
	Kouandata	361	18	10	03	05
	Perma	483	24	14	03	07
	Tchoumi- tchoum	460	23	13	03	07
	Natitingou 1	144	8	05	00	03
	Natitingou 2	241	13	07	02	04
	Natitingou 3	414	21	12	03	06
Natitingou 4	460	24	14	03	07	
Total		7057	372	218	44	110

Source : RGPH 4

En plus de cet échantillon, 05 exploitants miniers, 02 agents des eaux et forêts, 02 agents du CARDER et 06 responsables d'ONG ont été enquêtés.

Au total 387 personnes ont donc été enquêtées dans la cadre de cette étude. Cet effectif est réparti comme suit :

- 218 agriculteurs, soit 56,33 % de l'échantillon ;
- 110 exploitants de bois, soit 28,42 % de l'échantillon ;
- 44 éleveurs, soit 11,36 % de l'échantillon.
- 05 exploitant miniers, soit 1,29 % de l'échantillon ;
- 06 responsables d'ONG, soit 1,55 % de l'échantillon ;
- 02 agents du CARDER, soit 0,51 % de l'échantillon ;
- 02 agents des eaux et forêts, soit 0,51 % de l'échantillon.

Le choix des ménages pratiquant l'agriculture (culture de produits vivriers et céréales) s'est fait de façon aléatoire à l'intérieur des villages.

La méthode de l'itinéraire a été utilisée pour la sélection des éleveurs et exploitants de bois, c'est-à-dire que les acteurs rencontrés le long de trois transects choisis (secteur à végétation très dégradée, secteur à végétation moyennement dégradée, secteur à végétation peu dégradée), ont été systématiquement enquêtés, tout en respectant la taille de l'échantillon.

2.2.3. Méthodes de traitement des données et d'analyse des résultats

Après le dépouillement manuel des questionnaires, les données collectées ont été compilées et traitées sous le logiciel Sphinx et des indices pluviométriques et d'importance des déterminants ont été calculés. Aussi les différents indices et déterminants ont-ils été spatialisés.

2.2.3.1. Identification de la tendance et de la rupture de stationnarité dans la série climatique

La rupture selon Lubès *et al.* (1994) est un changement dans la loi de probabilité d'une série chronologique à un moment donné le plus souvent inconnu. Une telle rupture marque une modification du régime pluviométrique ou hydrologique. Les outils souvent utilisés pour détecter la rupture dans une série chronologique sont : le test de Pettitt, la statistique de Buishand, la segmentation de Hubert ou la procédure bayésienne de Lee et Heghinian. Dans le cadre de cette étude, le test de Pettitt, l'autocorrélogramme et la statistique de Buishand ont été utilisés. Le logiciel Khronostat de l'Institut de Recherche et de Développement (IRD) a été utilisé pour le traitement statistique des données pluviométriques.

➤ **Test de Pettitt (1979)**

Le test non paramétrique de Pettitt (1979) a permis de déterminer à partir du logiciel Khronostat les ruptures de stationnarité sur la série 1961-2010. C'est un test souvent utilisé par plusieurs chercheurs (Hubert *et al.*, 1989 ; Paturol *et al.*, 1997 ; Ouédraogo, 2001 ; Vissin, 2007 ; Yabi, 2008 ; Atchadé, 2014 ; Zakari, 2015) pour détecter les « ruptures » dans l'étude des variables hydrométéorologiques en Afrique de l'Ouest. L'absence de rupture dans une série (X_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle H_0 . La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N , les séries chronologiques $x_i, i=1, t$ et $x_j, j=t+1, N$ appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$, N définie par :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij}$$

Avec $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$ avec $\text{sgn}(x) = 1$ si $x > 0$, 0 si $x = 0$ et -1 si $x < 0$

Selon la théorie des rangs, si K désigne la valeur KN prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur K est exprimée approximativement par :

$$\text{Prob}(KN > K) \approx 2 \exp(-6K^2 / (N^3 + N^2))$$

H_0 est rejetée pour un risque α de première espèce donnée, si la probabilité de dépassement estimée est inférieure à α . La série comporte alors une rupture localisée au moment où est observé $\max |U_{t,N}|$ avec $t=1, N-1$.

Les années de rupture ont été utilisées pour caractériser la variation hydroclimatique marquée soit par une séquence humide, soit par une séquence sèche. Les points de rupture ont été utilisés comme année pivot pour calculer les variations moyennes de la pluviométrie.

➤ **Statistique U de Buishand (1982, 1984)**

En supposant une distribution à priori uniforme pour la position du point de rupture m , la statistique U de Buishand est définie par la formule :

$$U = [N(N + 1)]^{-1} \sum_{k=1}^{N-1} (S_k / D_x)^2$$

$$S_k = \sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X}) \text{ pour } k = 1, \dots, N \text{ avec } S_0 = 0$$

\bar{X} est la moyenne des valeurs X_1, X_2, \dots, X_N

Des valeurs critiques de la statistique U sont données par Buishand (1982) à partir d'une méthode de Monte Carlo.

La statistique U est un test robuste qui permet de déceler tout changement de moyenne survenant au milieu de la série.

➤ **Autocorrélogramme (WMO, 1996 ; Chatfield, 1989)**

Il permet de mesurer le caractère aléatoire d'une série chronologique à partir d'un coefficient d'autocorrélation d'ordre 1. En effet, on suppose qu'il existe des dépendances significatives entre les termes successifs d'une série non aléatoire. Le coefficient d'autocorrélation d'ordre K est donné par l'expression :

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x}_1)(x_{t+k} - \bar{x}_2)}{\sqrt{\left[\sum_{t=1}^{N-k} (x_t - \bar{x}_1)^2 \sum_{t=1}^{N-k} (x_{t+k} - \bar{x}_2)^2 \right]}}$$

Avec \bar{x}_1 moyenne des observations (X_i) , $i = 1, N-K$, et \bar{x}_2 moyenne des observations (X_j) , $i = K+1, N$.

D'après Chatfield (1989), si une série chronologique est aléatoire, alors pour N grand, $r_k \approx 0$ pour toute valeur K non nulle. En fait pour une série chronologique aléatoire, et pour N grand, le coefficient d'autocorrélation suit approximativement une distribution normale de moyenne nulle et de variance $1/N$. Une région de confiance (seuil de confiance) est généralement définie sous l'hypothèse nulle.

2.2.3.2. Indice standardisé des précipitations

Pour mieux analyser les périodes ou cycles humides et secs, l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI) a été calculé. Cet indice Standardisé des Précipitations (en anglais Standardized Precipitation Index ; SPI) créé par McKee *et al.* (1993) répond à la formule suivante :

- **Moyenne arithmétique** $X_m = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
- **Paramètres de dispersion** : $\sigma(x) = \sqrt{V}$ où V est la variance
- **Coefficient de variation** : $Cv = \frac{\sigma(x)}{\bar{x}} \times 100$ $\sigma(x)$ = écart-type de la série X_m = moyenne de la série

$$SPI = \frac{(X_i - X_m)}{S_i}$$

où X_i est le cumul de la pluie pour une année i ; X_m et S_i , sont respectivement la moyenne et l'écart type des pluies annuelles observées pour une série donnée.

Cet indice définit la sévérité de la sécheresse en différentes classes (tableau VI) (Bergaoui et Alouini, 2001 ; Ardoin-Bardin *et al.*, 2004 ; Ali et Lebel, 2009). Les valeurs annuelles

négatives indiquent une sécheresse par rapport à la période de référence choisie et les positives une situation humide. Cet indice a été utilisé par de nombreux auteurs sur diverses régions du globe (Giddings *et al.*, 2005 ; Wu *et al.*, 2005 ; Vissin, 2007 ; Amoussou, 2010 ; Kodja, 2011 ; Bodian, 2014) et s'est révélé très efficace pour la détection des périodes de sécheresse.

Tableau VI : Classification de la sécheresse en rapport avec la valeur de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI).

Classe du SPI	Degré de sécheresse
SPI > 2	Humidité extrême
1 < SPI < 2	Humidité forte
0 < SPI < 1	Humidité relative
-1 < SPI < 0	Sécheresse modérée
-2 < SPI < -1	Sécheresse forte
SPI < -2	Sécheresse extrême

Source : Mckee *et al.* (1993)

➤ Calcul de l'Evapotranspiration Réelle (ETR) et de l'excédent (Exc.)

Pour Soro *et al.* (2011) deux cas de figures se présentent souvent lors du calcul de l'ETR et de l'excédent :

1^{er} cas : Pluie mensuelle supérieure à l'Evapotranspiration Potentielle (P > ETP)

Soit RFU, la réserve en eau facilement utilisable par les plantes. Pour Bokonon Ganta (1987), la RFU varie de 22 mm (sols sableux argileux) à 360 mm (sols alluviaux des grandes vallées). Pour Remenieras, (1976) et Afouda (1990) pour toute l'Afrique sans distinction de sols la valeur de RFU peut être de 100 mm. Dans le cadre de cette étude donc RFU = 100 mm.

Soit R_i la réserve effective à la fin du mois considéré (en mm) ; R_{i-1} , la réserve effective à la fin du mois précédent (en mm) ; $dRFU$, la variation de la réserve au cours du mois considéré et Exc. l'excédent des précipitations par rapport à la mise en réserve possible (en mm).

$$ETR = ETP$$

- Si $(P-ETR) + R_{i-1} < RFU$ alors $R_i = (P-ETR) + R_{i-1}$ et l'excédent (Exc.) = 0
- Si $(P-ETR) + R_{i-1} \geq RFU$ alors $R_i = RFU$ et l'excédent (Exc.) = $(P-ETR) + R_{i-1} - RFU$

2^e cas : Pluie mensuelle P inférieure à l'Evapotranspiration Potentielle (P < ETP)

Si $R_{i-1} \geq ETP-P$ alors $ETR = ETP$ et $R_i = R_{i-1} + (P-ETR)$ et l'excédent (Exc.) = 0

Si $R_{i-1} < ETP-P$ alors $ETR = P + R_{i-1}$ et $R_i = 0$ et l'excédent (Exc.) = 0

Dans les deux cas $dRFU = R_i - R_{i-1}$

Le bilan hydrique simplifié du milieu d'étude se caractérise par une durée de RFU de quatre mois qui s'étend d'août à novembre. La RFU est saturée durant trois mois et s'épuise saisonnièrement pendant huit mois, de décembre à juillet.

2.2.3.4. Détermination du coefficient d'Allan (L)

Pour mieux apprécier la pression qu'exercent les exploitants agricoles sur les terres et la fertilité de ces dernières, le coefficient d'Allan (1995) a été calculé dans chacune des deux Communes du secteur d'étude. Ce coefficient (L) permet de caractériser le niveau de perturbation (niveau de dégradation) des sols. Il est obtenu à partir de la formule suivante :

$$L = \frac{(C+J)}{c} \text{ avec}$$

C : Nombre moyen d'années de mise en culture ;

J : Nombre moyen d'année de mise en jachère ou de repos.

Si $L \geq 5$, alors la terre est bien exploitée et ne subit aucune pression ;

Si $L < 5$, alors la terre est surexploitée.

2.2.3.5. Indices d'importance des déterminants de dégradation du couvert végétal

Pour apprécier l'importance des facteurs de dégradation du couvert végétal dans le secteur d'étude, quelques indices importants ont été calculés. Il s'agit de :

- Valeur d'importance des déterminants de dégradation de la végétation ;
- Valeur de diversité de l'enquête ;
- Valeur d'équitabilité de l'enquête ;

❖ Valeur d'importance des déterminants de dégradation de la végétation

La valeur d'importance (IV) des déterminants (Byg & Balslev, 2001) est la proportion d'enquêtés qui considèrent une activité comme un déterminant de dégradation de la végétation.

Elle varie de 0 à 1. Elle est calculée par la formule suivante :

$$IV = \frac{n}{N}$$

avec n le nombre d'enquêtés qui considèrent une activité ou un facteur comme un déterminant de dégradation de la végétation et N le nombre total d'enquêtés.

❖ Valeur de diversité de l'enquête

La valeur de diversité (DV) de l'enquête (Byg & Balslev, 2001) mesure le nombre d'enquêtés qui ont choisi des activités ou des facteurs comme des déterminants de dégradation de la végétation et comment cette connaissance est répartie entre les enquêtés. Elle varie entre 0 et le

nombre de déterminants choisi par les enquêtés. Elle est faible si très peu de personnes connaissent et citent ce facteur et forte lorsque beaucoup de personnes la connaissent et l'utilisent. Elle est exprimée par la formule suivante :

$$DV = \frac{1}{\sum Pi^2}$$

avec P_i la contribution de chaque enquêté i à la connaissance du déterminant ;

$P_i = n_i/n_s$; n_i est le nombre de déterminants choisis par l'enquêté i et n_s le nombre total de déterminants cités par les enquêtés.

❖ *Valeur d'équitabilité de l'enquête*

La valeur d'équitabilité de l'enquête permet de mesurer le degré d'homogénéité des connaissances des enquêtés. Elle est calculée par la formule :

$$EV = \frac{DVs}{DVs_{max}}$$

avec DVs la valeur de diversité de l'enquêté et DVs_{max} la valeur maximale de diversité de l'enquêté obtenue.

La valeur d'équitabilité est comprise entre 0 et 1. Si $EV < 0,5$ la diversité des connaissances des enquêtés n'est pas homogène mais si $EV \geq 0,5$ cette diversité est homogène. Cela signifie que très peu de personnes connaissent beaucoup d'usages de l'espèce. Une minorité utilise beaucoup l'espèce.

Pour mieux analyser les déterminants socio-économiques du changement d'usage des sols, une analyse selon différents acteurs a été faite. Une analyse factorielle des correspondances (AFC) a été effectuée sous SPSS. Cette technique d'analyse multivariée a permis de faire une lecture croisée de la perception des déterminants du changement d'usage des sols selon les catégories socio-professionnelles. Cela a permis de d'établir des liens entre les variables collectées.

2.3. Méthodologie relative à l'objectif 3 : *Modéliser l'évolution de l'occupation du sol à l'horizon 2031 dans le secteur Natitingou-Boukombé*

Pour le développement harmonieux d'une région, l'espace doit être aménagé, contrôlé et planifié. C'est donc pour aider les autorités dans les prises de décisions et d'anticiper l'occupation du sol que s'inscrit les simulations et la prospection de l'occupation dans ce secteur d'étude. Des projections ont été faites pour voir comment évoluera l'occupation du sol dans 5 ans, 10 ans et 15 ans. Il s'agit ici de scénarii introduisant plusieurs hypothèses socio-économiques possibles afin de décrire des futures plausibles et donner aux gestionnaires et aménageurs de l'espace un outil d'aide à la décision.

L’outil utilisé pour faire la simulation dans le cadre de cette étude est le module LCM d’IDRISI développé par le Clark Lab de l’Université de Worcester aux Etats-Unis. Ce modèle prédictif a été mis en place en utilisant la base de données cartographique et socio-économique.

2.3.1. Matériel et outils de collecte

Les données d’entrée (*input*) utilisées dans ce modèle sont : les cartes d’occupation du sol de 2000 et 2016, les données spatialisées relatives aux facteurs explicatifs des changements d’occupation du sol (pente, altitude, pédologie, route et densité) et enfin des cartes de contrainte (aptitude cultural des sols, les zones inaccessibles). Le module Land Change Modeler (LCM) implémenté logiciel Idrisi 32 (Terrset) a été utilisé.

2.3.2. Méthode et technique de collecte des données

Les principaux inputs qui ont été pris en compte pour la modélisation sont les données issues des cartes d’occupation du sol de 2000 et 2016 (modes d’occupation et d’usage du sol) et les variables dépendantes exogènes (facteurs explicatifs). Les variables les plus couramment utilisés sont la pente, la distance aux voies de communication et aux agglomérations, les types de sols (Pontius *et al.*, 2008). Ainsi, a été utilisé dans le cadre de cette étude les données compilées dans le tableau VII.

Tableau VII : Variables utilisées pour la modélisation et leurs sources

Catégories des données	Variables	Source des données
Topographie	Pente Altitude	MNT ASTER GDEM
Pédologie	Types de sols	Carte pédologique du Bénin. Feuille de Natitingou
Démographie	Densité de population	INSAE
Distance	Distance aux routes Distance aux agglomérations Distance aux plantations Distance aux champs	Carte d’occupation du sol
Occupation du sol	Catégories d’occupation du sol	Images Lansat ETM+/ OLI

2.3.3. Méthodes de traitement des données et d'analyse des résultats

2.3.3.1. Cadre conceptuel du modèle

Le modèle prédictif Land Change Modeler (LCM) de l'occupation du sol a été utilisé sous le logiciel IDRISI (Terrset). Ce modèle a été développé afin d'étudier les LUCC, de projeter leur dynamique dans le futur et d'en évaluer l'impact sur la biodiversité (Eastman, 2006). Les différentes étapes de la procédure de modélisation sont illustrées par la figure 14.

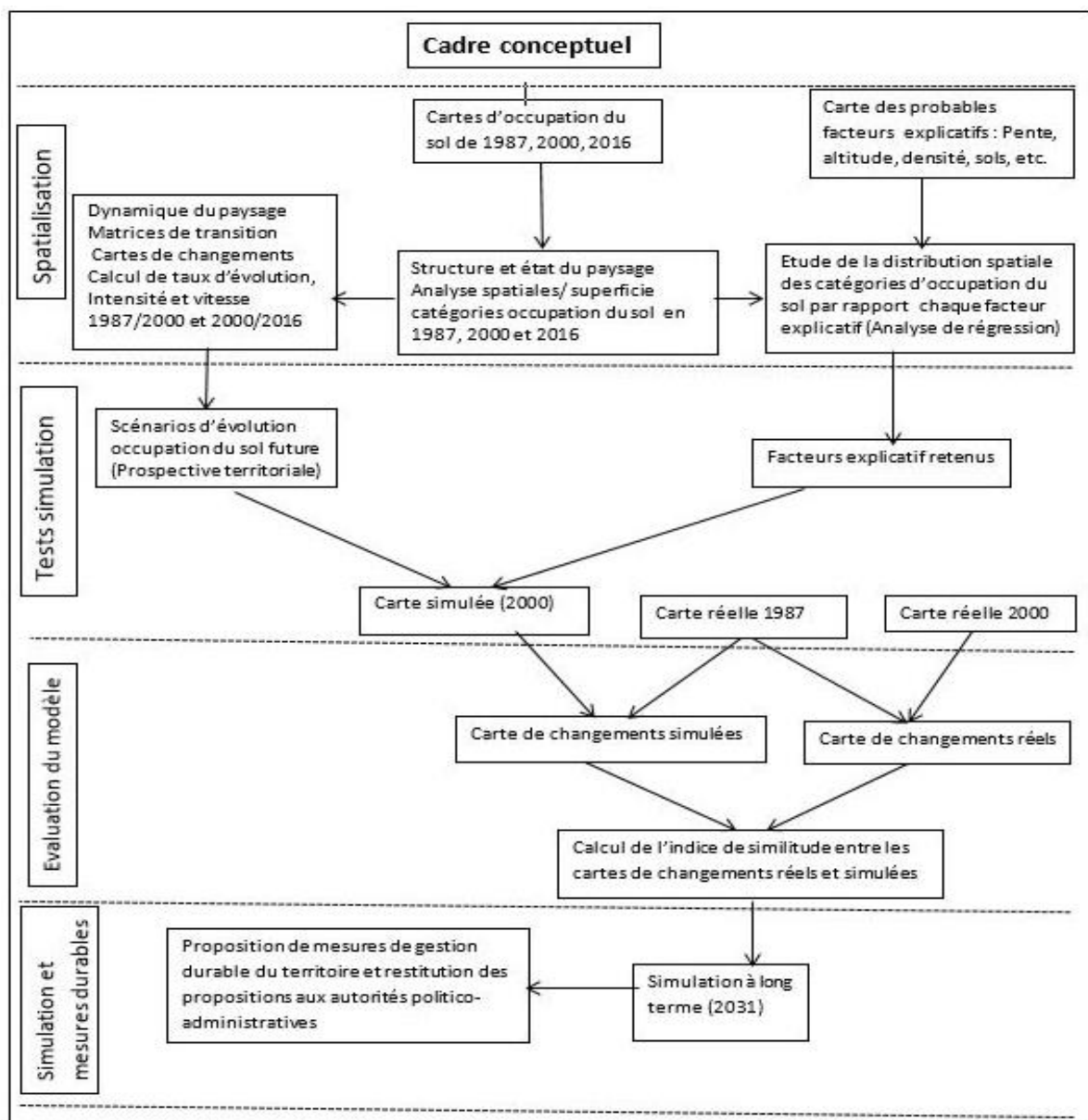


Figure 14 : Cadre conceptuel de la modélisation de l'occupation du sol

Il ressort de la figure 14 que le processus de modélisation se fait en quatre (04) étapes. Après l'étape de spatialisation des facteurs explicatifs (mise en place des drivers), viennent ensuite les

tests de simulation, l'évaluation du modèle et la simulation et proposition de mesures de gestion durable.

2.3.3.2. Apprentissage du modèle et validation des drivers

L'estimation des changements (pertes, gains, changements nets, constance) réalisée par la création de graphiques et de cartes de changements à partir des cartes d'occupation du sol de 2000 et 2016 a permis la mise en place de sous-modèles de transition entre plusieurs catégories d'occupation du sol. La constitution des sous-modèles repose sur le principe de regrouper toutes les transitions dont on pense qu'elles dépendent des mêmes facteurs. Ainsi, le sous-modèle agglomération regroupe toutes les transitions vers la catégorie d'occupation du sol « agglomération » peu importe la catégorie d'origine.

Pour la mise en place des "drivers", un entraînement du modèle a été réalisé avec chaque sous-modèle et les probables facteurs explicatifs des changements observés. Ainsi, à chaque sous-modèle, est rattaché des variables explicatives (drivers). Chaque groupe de transition (sous-modèle) est ensuite modéliser par un réseau de neurone artificiels multicouches (Multi-Layer Perceptron, MLP). Cette technique permet de voir la capacité du modèle à identifier la meilleure combinaison de variables et leur poids respectif : on parle d'auto-apprentissage du modèle. En effet, à partir d'un échantillon aléatoirement choisi de 50 % des pixels de la variable à expliquer, le modèle cherche la meilleure combinaison possible de variables explicatives, qu'il compare ensuite au 50 % restant pour calculer l'*Accuracy Rate* (AR, en %). Cet indicateur « AR » témoigne ainsi de la capacité d'apprentissage du réseau neuronal à expliquer la localisation des changements observés. Il permet d'apprécier globalement la contribution des facteurs explicatifs considérés à la dynamique spatiale observée au niveau de chaque sous-modèle. La combinaison de facteurs explicatifs se fait de manière empirique et heuristique, en testant les variables plausibles et leurs combinaisons jusqu'à obtenir des modèles dont la valeur de l'*Accuracy Rate* soit supérieure à 70 % pour que la capacité des facteurs à expliquer ces transitions soit admise. Le résultat en sortie est une carte de potentiel de transition pour chacune des transitions du sous-modèle considérés. Ces cartes sont alors le premier rendu utilisable fourni par le modèle. Chacune des cartes de potentiel de transition assortie a été évaluée en calculant le ROC (Relative Operating Characteristics). Il a permis de valider ces cartes et de voir à quel degré elles coïncident avec la dynamique observée (en terme de localisation) en partant sur la base des cartes d'occupation du sol de 2000. Ainsi, plus la probabilité / aptitude (AUC) est élevée, plus l'observation devrait tendre vers la présence de la catégorie considérée.

Mais avant l'entraînement du modèle, le calcul de l'indice V de Cramer pour chaque facteur explicatif a permis de retenir ceux qui influencent ou qui contribuent le mieux à la mise en place de chaque catégorie d'occupation du sol. Cet indice calcule un coefficient de corrélation entre une variable explicative et la variable à expliquer et varie entre 0 et 1. Plus la corrélation est forte et plus le coefficient se rapproche de 1 et vis versa. Selon Eastman (2004), la variable est considérée comme acceptable si son coefficient est supérieur ou égal à 0,1. Il est très important de retenir qu'une forte corrélation ne tient pas compte de la complexité des relations entre les variables. Ainsi, Chen et Pontius (2010) avertissent que « les coefficients peuvent être statistiquement significatifs, mais pas de grande importance pour des fins pratiques. »

Les variables explicatives utilisées ici sont de deux types : dynamiques et statiques. Les variables statiques (altitude, pente, pédologie) traduisent l'aptitude pour chaque transition prise en considération et restent stables au cours du temps. Les variables dynamiques (proximité aux routes, proximité aux types d'occupation du sol déjà existants) sont recalculées à chaque pas durant le processus de prédiction.

2.3.3.3. Simulation du modèle

La simulation à l'horizon 2031 avec des cartes de prédiction intermédiaires au pas de temps de 5 ans et une vidéo illustrant sous forme de carte animée a été faite à partir de la carte d'occupation de 2016, des cartes de potentiel de transition et la matrice de transition, qui donne le rythme associé aux différentes transitions.

La combinaison de ces différents outils, a permis de générer deux types de carte : une carte de simulation dite « hard », qui alloue à chaque pixel de la carte un type d'occupation du sol et un seul, et un résultat de simulation dit « soft », qui associe à chaque pixel une valeur d'intensité de changement au cours du temps, une sorte de propension générale au changement d'occupation du sol quelle qu'en soit la nature. Cette propension est calculée par cumul des probabilités de changement à chaque pas de la simulation.

Le modèle est réalisé sur la base de la période d'entraînement 2000-2016. La figure 15 résume l'ensemble des démarches suivies pour la prédiction de l'occupation du sol.

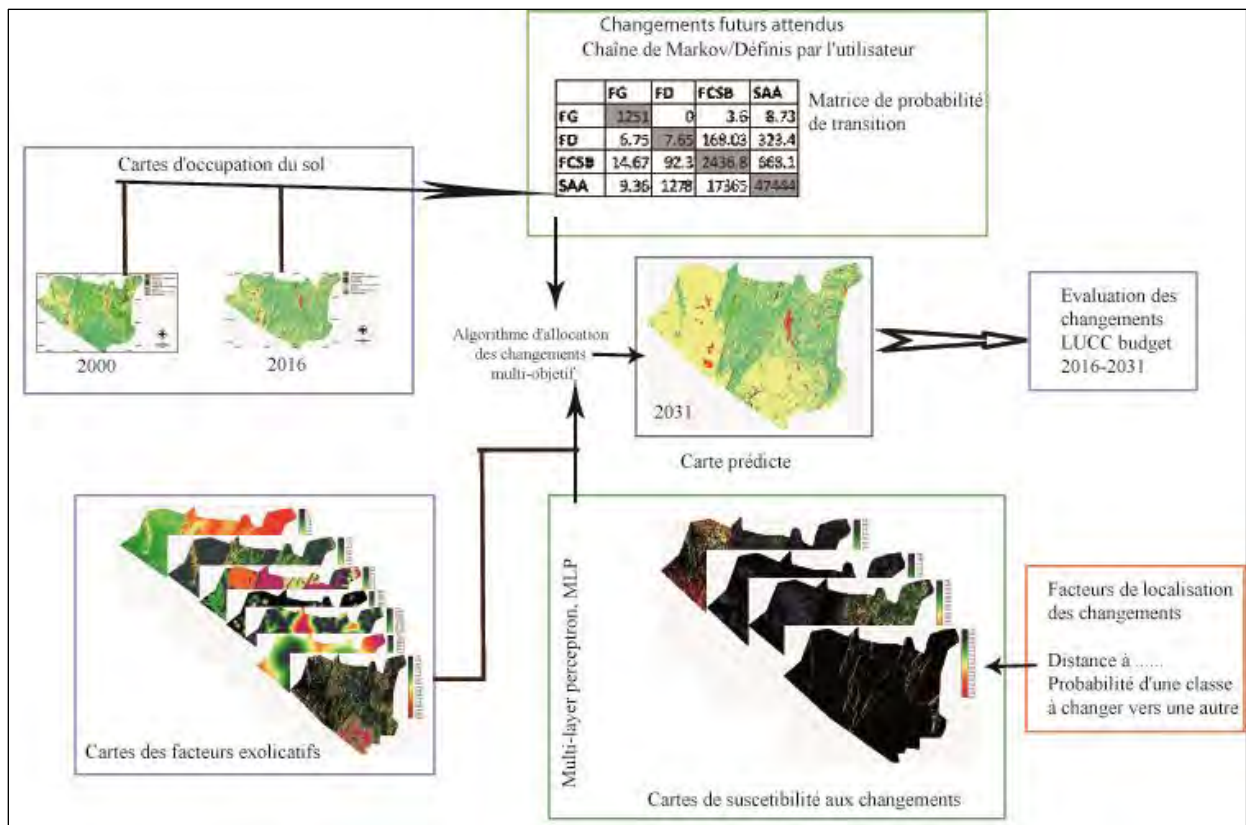


Figure 15 : Fonctionnement du modèle LCM

Source : Modifié de Houet (2008)

La figure 15 montre que pour obtenir la carte de prédiction à l'horizon 2031, les cartes d'occupation du sol de 2000 et 2016, les facteurs explicatifs et les carte de susceptibilité aux changement ont été introduits dans le modèle.

2.3.3.4. Validation du modèle

Pour la validation des résultats, deux approches ont été utilisées. Dans un premier temps, une approche expert et participative a été utilisée. L'approche experte a consisté à échanger avec des personnes avisées et ayant une bonne maîtrise du milieu d'étude sur la concordance de ces cartes prédites. L'approche participative a consisté à aller vers les populations, notamment les leader d'opinion du milieu d'étude pour leur présenter les résultats des futurs possibles de leur milieu et les conséquences qui en découleront si aucune disposition n'est prise. Ceci a été fait à travers des réunions de travail avec les acteurs agricoles locaux, les exploitants de bois et quelques autorités locales. Dans un second temps la méthode ROC (*Relative Operating Characteristics*) (Pontius, 2000 ; Pontius et Schneider, 2001) et l'indice Kappa qu'offre IDRISI ont été utilisés pour évaluer et valider les résultats de la simulation.

2.4. Méthodologie relative à l'objectif 4 : *Proposer des outils d'aide à la décision à partir de plusieurs scénarios prospectifs possibles pour une meilleure gestion du territoire.*

2.4.1. Matériel et outils de collecte

Les données d'entrée (*input*) utilisées dans les différents scénarios prospectifs sont : les cartes d'occupation du sol de 2000 et 2016, les données spatialisées relatives aux facteurs explicatifs des changements d'occupation du sol (pente, altitude, pédologie, route et densité). A ces différentes données s'ajoutent les cartes de potentiel de transition et la matrice de probabilité de transition modifiée ou adaptée de chaque scénario prospectif. Land Change Modeler (LCM) implémenté logiciel Idrisi 32 (Terrset) a été utilisé.

2.4.2. Méthode et technique de collecte des données

Les données utilisées pour les différents scénarios sont celles générées par le modèle dans le scénario tendanciel "Business As Usual (BAU)". La donnée qui a été modifiée et adaptée à chacun des deux scénarios Durabilité Environnementale Coordonnée (DEC) « Alafia 2031 » et Croissance Economique Rapide (CER) « Wahala 2031 » est la matrice de probabilité de changement.

2.4.3. Méthode de traitement des données

Les scénarios ont été élaborés pour prédire les tendances actuelles de changement et d'utilisation des sols afin de faciliter les prises de décisions aux cadres et responsables en charge la gestion territoriale. Les probabilités de certains changements ont été modifiées dans la matrice en se basant sur le ou les hypothèse(s) de base.

De façon pratique, pour la mise en œuvre des différents scénarios, les différents paramètres suivant sont modifiés :

- La matrice de transition, qui donne le rythme associé aux différentes transitions ;
- Les cartes de transition potentielle, qui peuvent elles aussi être modifiées de manière à changer la localisation des transitions, si l'on pense que le mode de répartition spatiale des transitions a évolué par rapport au passé.
- Des zonages de contrainte/incitation, qui peuvent freiner ou accélérer une transition en fonction des règlements de la planification ou d'autres effets.

✓ ***Scénario 1 : Absence de facteurs influençant l'occupation du sol***

C'est un scénario dans lequel tous les facteurs explicatifs sont ignorés (valeur 0). Il permet de ne pas altérer les matrices de transition issues de l'analyse historique.

✓ ***Scénario 2 : Business As Usual (BAU) extrapolant les tendances actuelles en 2031***

Le scénario BAU part de l'hypothèse de l'absence de nouvelles politiques économiques ou environnementales. C'est un scénario dans lequel les futures distributions d'utilisation des terres suivent les tendances passées déterminées. Il se base sur les données socio-économiques passées et récentes (2000-2016), par exemple, la croissance économique et démographique.

✓ ***Scénario 3 : Durabilité Environnementale Coordonnée (DEC) « Alafia 2031 »***

Le principal objectif du scénario DEC est de protéger le reste des ressources végétales encore en place en encourageant la pratique d'une agriculture durable. C'est un scénario dans lequel la législation et les subventions gouvernementales encouragent l'émergence de la sylviculture (multiplication des plantations et de l'agroforesterie) et la protection des ressources ligneuses en subventionnant le prix du gaz pour qu'il soit accessible à tous les ménages. Ainsi, la coupe de bois énergie va diminuer, les activités agricoles vont s'accélérer avec une forte demande en terre à cultiver et de nouvelles pratiques agricoles respectueuses de l'environnement, la croissance économique et démographique ainsi que l'urbanisation vont évoluer normalement. C'est le concept d'agriculture durable qui est ainsi mise en œuvre pour cadrer avec les objectifs de Développement Durable.

✓ ***Scénario 4 : Croissance Economique Rapide (CER) « Wahala 2031 »***

Dans le scénario CER, la croissance démographique et économique sera très élevée. Il y aura des subventions gouvernementales pour la production agricole (culture du coton et de produits vivriers) conduisant à une augmentation des superficies des champs. Mais aucune disposition n'est prise pour protéger les ressources naturelles du milieu. Du coup, elles sont en constante dégradation.

Conclusion partielle

L'approche méthodologique adoptée a permis de combiner les travaux de terrain notamment les données socio-économiques avec les travaux de laboratoire, c'est-à-dire le traitement des données spatiales, les tests statistiques et les simulations.

L'utilisation à la fois des images Landsat, Modis VCF et Modis NDVI de différentes résolutions (spatiale et temporelle) a pour objectif de mieux apprécier l'évolution du couvert végétal dans ce milieu très complexe. Le choix de l'utilisation de plusieurs images se justifie par la complexité de la cartographie des changements d'occupation et d'usage des sols dans ce milieu à agriculture majoritairement artisanale de subsistance.

Cette démarche méthodologique adoptée a permis d'aboutir aux résultats présentés dans la suite du document.

**DEUXIEME PARTIE : ANALYSE DE L'EMPRISE
SPATIALE A TRAVERS LE SUIVI DE L'OCCUPATION
DU SOL**

Chapitre III : Cartographie de la dynamique paysagère du milieu entre 1987 et 2016

Introduction partielle

Ce chapitre présente d'une part, les images Modis VCF et Modis NDVI utilisées pour suivre l'évolution du couvert végétal dans le secteur d'étude. Les résultats obtenus ont été comparés aux changements observés à partir des images Landsat. Les images Modis étant de grande résolution temporelle mais de faible résolution spatiale ont permis de suivre dans le temps l'évolution des formations ligneuses (Tree Cover, TC), non ligneuses (Non Tree Vegetation, NTV) et les non végétations (Non Vegetation, NV). Ceci a permis d'améliorer la qualité des cartes d'occupation du sol issue des images Landsat. Cette utilisation de plusieurs sources d'images satellites a permis d'apprécier la qualité des classifications obtenues et la vraisemblance des évolutions spatio-temporelles qui en découlent.

D'autre part, ce chapitre est consacré à la description de la physionomie du paysage en 1987, 2000 et 2016. Il est aussi appréhendé ici la dynamique de l'occupation du sol observée au cours des périodes 1987-2000 et 2000-2016 dans ce milieu d'étude. Le calcul du LUCC budget et l'intensité de changement des catégories d'occupation du sol viendra boucler ce chapitre.

3.1. Evaluation de la précision des cartes d'occupation du sol

3.1.1. Matrice de confusion et indice de Kappa

Bien que l'indice de Kappa de Cohen soit fortement contesté aujourd'hui (Pontius et Millones, 2011), aucun indice n'a pu encore le remplacer valablement en matière d'évaluation et de validation des résultats obtenus suite à la classification supervisée d'images pour réaliser les cartes d'occupation du sol. Cet indice est donc utilisé pour évaluer les similarités entre les résultats obtenus et ceux prévus. Il est calculé en utilisant un tableau de contingence ou tableau de confusion (tableaux VIII, IX et X) qui décrit la distribution des classes de la carte de référence par rapport à la carte des résultats.

Tableau VIII : Matrice de confusion de la classification de l'image TM 1987

	FG	FD	FCSB	SAA	SS	PT	MCJ	AGG	Total	ErrorC
FG	1820	43	11	0	0	0	0	0	11030	0,002
FD	42	11231	0	0	0	0	0	0	2492	0,071
FCSB	68	23	2311	75	0	3	12	0	11273	0,004
SAA	0	0	0	9012	108	0	78	0	1874	0,029
SS	0	0	0	1	1246	0	0	0	1160	0,128
PT	0	10	2	0	0	122	0	0	134	0,090
MCJ	32	0	0	102	0	0	1012	14	9198	0,020
AGG	0	0	0	19	0	0	0	11011	1247	0,001
Total	1962	11307	2324	9209	1354	125	1102	11025	38408	
ErrorO	0,072	0,007	0,006	0,021	0,080	0,024	0,082	0,001		
Indice Kappa									0,85	
Indice d'exactitude									0,98	

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations
ErrorO : Erreur d'omission ; ErrorC : Erreur de commission

Il ressort du tableau VIII que des confusions sont observées entre :

- Forêts galeries, forêts denses et forêts claires et savanes boisées
- Savanes arborées et arbustives et mosaïques de cultures et jachères.
- Savanes saxicoles et savanes arborées et arbustives.

Seule la catégorie agglomération semble la mieux classifier car présente des erreurs de commission et d'omission très faibles (inférieurs à 0,3 %). Alors que les mosaïques de cultures et jachères présentent les erreurs de commission et d'omission les plus élevés (variant entre 0,8 % et 12,8 %). La confusion observée entre ces classes est certainement liée à la période de prise de l'image (saison sèche). Malgré les confusions entre les différentes catégories d'occupation du sol, l'indice de kappa est de 85 % (seuil supérieur recommandé qui est 0,75) et l'indice d'exactitude de 0,98 (supérieur à la valeur recommandée qui est 0,91). Ce qui montre que le niveau de fiabilité de cette classification est acceptable. Signalons tout de même que la relative facilité à identifier les différentes catégories d'occupation du sol sur cette image TM de 1987 est due au fait que ce milieu était encore apparemment stable (relativement naturel).

Tableau IX : Matrice de confusion de la classification de l'image ETM+ 2000

	FG	FD	FCSB	SAA	SS	PT	MCJ	AGG	Total	ErrorC
FG	1792	81	27	81	0	24	0	0	2005	0,106
FD	1	5757	0	69	80	0	0	0	5907	0,025
FCSB	75	54	2694	20	0	1	0	0	2844	0,053
SAA	2	0	97	8900	0	0	55	10	8999	0,018
SS	0	0	0	1	897	0	0	0	898	0,001
PT	27	36	7	1	0	316	12	0	399	0,208
MCJ	0	0	0	62	0	0	9384	0	9384	0,007
AGG	0	0	0	150	0	0	56	1173	1379	0,149
Total	1897	5928	2825	9284	977	341	9507	1183	31815	
Error0	0,055	0,029	0,046	0,035	0,082	0,073	0,013	0,008		
Indice Kappa									0,89	
Indice d'exactitude									0,97	

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations
ErrorO : Erreur d'omission ; ErrorC : Erreur de commission

De l'examen du tableau IX, il ressort que l'indice de Kappa est égal à 0,89 et l'indice d'exactitude de la classification est de 0,97 (supérieur à 0,91). Aussi les savanes arborées et arbustives se confondent-elles à plusieurs catégories d'occupation du sol, notamment aux agglomérations, aux forêts galeries et aux plantations avec une erreur de commission variant entre 10 et 20 %. La confusion entre savanes arborées et agglomération peut s'expliquer par la dispersion de de l'habitat. Ici les mosaïques de cultures et jachères sont les mieux classifiées avec seulement 1,3 % d'erreur d'omission et 0,7 % d'erreur de commission. De tout ce qui précède, on peut conclure que cette classification est acceptable.

Tableau X : Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat OLI TIR 2016

	FG	FD	FCSB	SAA	SS	PT	MCJ	AGG	Total	ErrorC
FG	1497	125	104	421	0	84	0	0	2231	0,273
FD	33	917	1	1396	24	0	0	0	2371	0,014
FCSB	151	0	4305	73	0	8	0	0	4537	0,051
SAA	30	0	1	10845	55	0	451	107	11489	0,041
SS	83	0	7	378	971	0	40	0	1479	0,316
PT	318	0	32	90	0	1306	0	0	1746	0,252
MCJ	1	0	0	236	0	2	5475	2	5716	0,042
AGG	2	0	0	2072	0	0	0	1340	3414	0,607
Total	2115	1042	4450	15511	1050	1400	5966	1449	32983	
Error0	0,292	0,120	0,033	0,301	0,023	0,067	0,082	0,148		
Indice Kappa									0,82	
Indice d'exactitude									0,91	

Légende : FG : Forêt galerie ; FD : Forêt dense ; FCSB : Forêt claire et savane boisée ; SAA : Savanes arborée et arbustive ; SS : Savane saxicole ; PT : Plantation ; MCJ : Mosaïque de Champs et jachères ; AGG : Agglomération
ErrorO : Erreur d'omission ; ErrorC : Erreur de commission

La matrice de confusion de l'image Landsat OLI 2016 montre qu'il y a confusion entre plusieurs catégories d'occupation du sol. Ceci explique la complexité du paysage de ce milieu en 2016. En effet, on observe une confusion entre :

- Agglomérations et savanes arborées et arbustives ;
- Forêt claire et savane boisée et forêt galerie ;
- Forêt galerie et forêt claire et savane boisé ;
- Forêt galerie et plantation ;
- Mosaïque de culture et jachère et savane arborée et arbustive ;
- Savane arborée et arbustive et toutes les autres catégories d'occupation du sol.

La confusion entre mosaïque de culture et jachère et savane arborée et arbustive est due au fait que les jachères et les savanes arbustives présentent les mêmes signatures spectrales.

Les agglomérations et savanes saxicoles présentent les erreurs de commission les plus élevés (respectivement de 60,7 % et 31,6 %). Alors que les savanes arborées et arbustives et les forêts galeries présentent les erreurs d'omission les plus élevés (respectivement de 30,1 % et 29,2 %). Globalement les forêts claires et savanes boisées, les mosaïques de cultures et jachères et les forêts denses sont les mieux classifiées avec des erreurs d'omissions faibles (comprises entre 3 et 12 %) et des erreurs de commission faibles (comprises entre 1,4 et 5,1 %). L'indice de Kappa qui est de 0,82 et l'indice d'exactitude de 0,91 permettent de dire que cette classification est acceptable.

Dans cette étude l'indice de Kappa est supérieur à 75 %, pour toutes les classifications réalisées. Les classifications sont donc valables et les résultats peuvent être judicieusement utilisés pour l'élaboration des cartes d'occupation du sol (Pontius, 2000).

3.1.2. Validation qualitative par Google Earth et à dire d'expert

La superposition des différentes cartes d'occupation du sol réalisées, notamment celle de 2016 aux images de haute résolution disponibles sur Google Earth a été une étape complémentaire et indispensable de la validation des classifications. Elle a permis de corriger les classifications et de les rapprocher de la réalité du terrain. Plus concrètement, ces images ont permis d'amender les classifications par l'observation, l'interprétation et la digitalisation sur l'écran des catégories d'occupation du sol comme les plantations qui se confondent radiométriquement avec les forêts claires et les savanes boisées (figure 16).

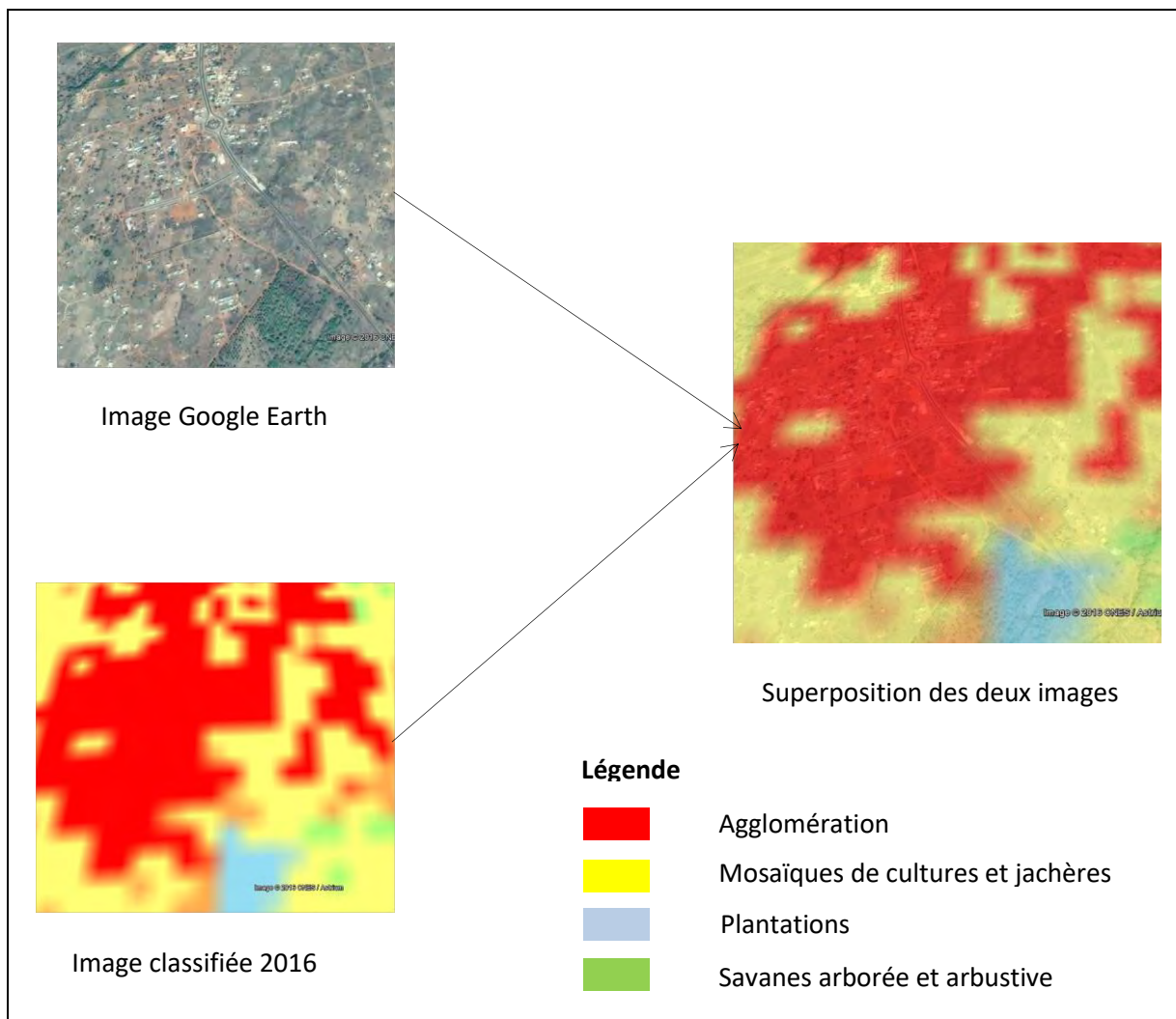


Figure 16 : Capture d'écran de l'image classifiée 2016 superposée à l'image Google Earth

L'autre étape de la validation qualitative des classifications a consisté à les soumettre à l'attention des experts qui ont une bonne maîtrise du milieu. Ainsi, plusieurs enseignants des universités et des acteurs du monde professionnel qui ont réalisé des études sur cette région du pays ont apprécié et émis leurs observations par rapport à la qualité des cartes et la dispersion des catégories d'occupation du sol dans le milieu. Ces observations ont été prise en compte pour améliorer la qualité des cartes d'occupation du sol.

3.1.3. Evolution des indicateurs de la série d'images Modis VCF (2000 – 2015)

Dans le but de vérifier l'évolutions des catégories d'occupation du sol constatées dans le milieu d'étude par classification des images Landsat, ces dernières ont été comparées à celles des images Modis VCF (en considérant les indicateurs Tree Cover, Non Tree Vegetation, NTV et Non Vegetation, NV), disponibles à intervalle annuel pour la période 2000 à 2015. Ceci en

calculant l'indicateur de tendance Theil Sen tout en étant conscient des limites de l'exercice étant donnée la résolution spatiale très inégale des deux produits (pixel de 30 mètres de côté pour Landsat, 500 m pour Modis VCF). La figure 47 montre la pente de la tendance Theil Sen et le résultat du test de significativité Mann-Kendall pour les trois indicateurs : TC, NTC, NV.

Afin de faciliter la comparaison de l'évolution des indicateurs TC, NTC et NV avec l'évolution de l'occupation du sol résultant des classifications, on a procédé à des regroupements de transitions. Les figures 17 et 18 montrent l'évolution des différents indicateurs par type de transition d'occupation du sol.

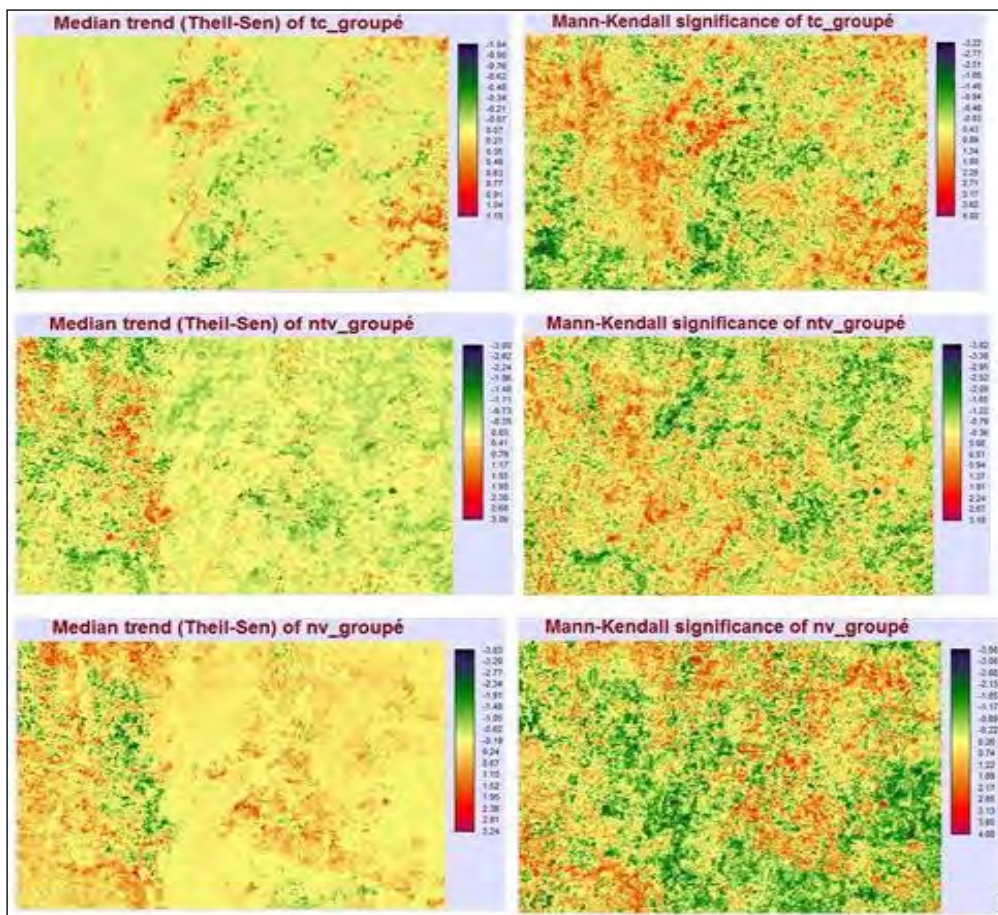


Figure 17 : Tendence médiane (colonne de gauche) et test de significativité de Mann-Kendall (colonne de droite) pour les catégories couvert arboré (TC, en haut), couvert végétal non arboré (NTV, ligne du milieu) et sans couvert végétal (NV, ligne du bas).

Légende : TC : Tree Cover ; NTV : Non Tree Vegetation ; NV : Non Vegetation

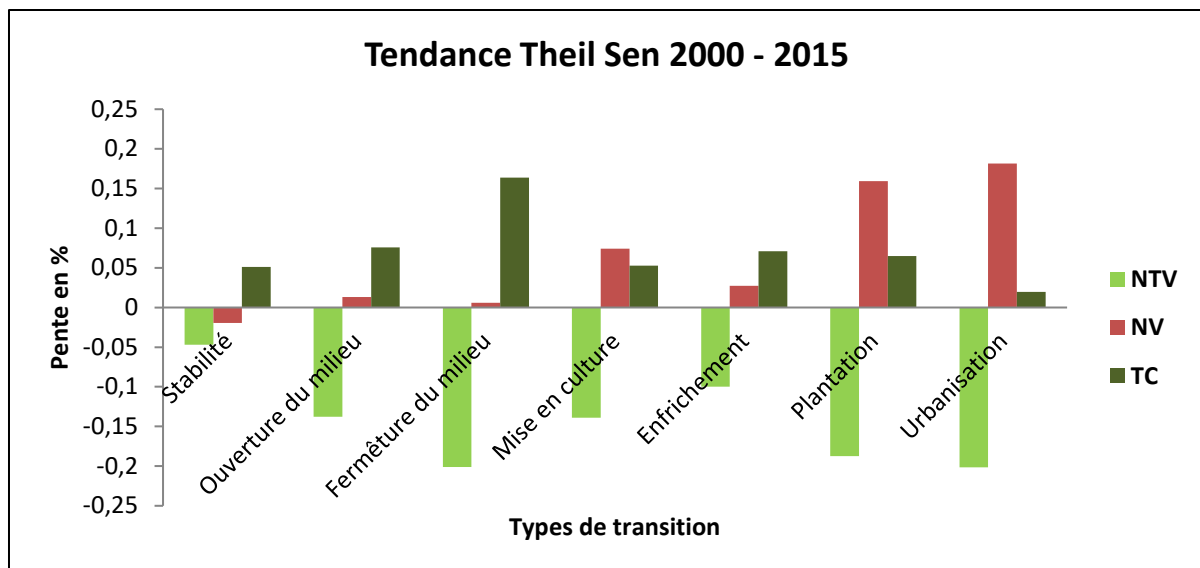


Figure 18 : Evolution des différents indicateurs des images Modis (2000 – 2015) en fonction des types de transition identifiés

Légende : TC : Tree Cover ; NTV : Non Tree Vegetation ; NV : Non Vegetation

De l'examen des figures 17 et 18, il ressort de façon globale que la tendance d'évolution (la pente) est modérée. On note une baisse générale des surfaces dénudées de végétation (NV) et de la végétation non arborée (NTV) et une stabilité relative des surfaces arborées (TC).

De façon spécifique on note au niveau des milieux fermés, des secteurs en enfrichement et des plantations qui représentent dans leur ensemble 15,16 % (37602,27 ha) de la superficie totale du secteur d'étude une progression significative du couvert arboré (TC) au seuil de 5 % (+/- 1,96). Quant aux autres transitions (milieux ouverts, mise en culture et urbanisation), l'évolution n'est pas significative au seuil de probabilité de 95 %.

Au niveau du couvert végétal non arboré (NTV), la tendance à la baisse est très significative au seuil de 5 % au niveau de toutes les transitions ($-1,96 \leq z\text{-score} \leq 1,96$). Les tendances les plus faibles sont enregistrées au niveau des savanes arborées et arbustives transformées en agglomérations (- 0,32 %) et celles transformées en plantations (- 0,28 %) et celle la plus élevée est notée au niveau des forêts galeries changées en mosaïques de cultures et jachères (0,02 %). Ceci traduit qu'il y a une pression générale qui s'exerce sur le couvert végétal non arboré (NTV) dans ce milieu.

En ce qui concerne les surfaces sans végétation (NV), les milieux ouverts, mise en culture, urbanisation et plantation qui représentent environ 35 % (86763,06 ha) du milieu ont une progression significative au seuil de 5 %. Les progressions les plus importantes s'observent au niveau des transitions urbanisation (0,85 %, soit 2095,92 ha), plantation (0,42 %, soit 1039,86

ha) et mise en culture (32,37 %, soit 80298,81 ha). La progression des milieux ouverts et des enrichissements n'est pas significative au seuil de 5 %.

3.1.4. Evolution des transitions significatives par indicateur (2000 – 2015)

Pour mieux affiner l'intensité des transitions observées, les pixels qui ont une évolution significative au niveau de chaque indicateur Modis ont été extraits. La figure 19 ci-dessous présente l'évolution des pentes au niveau de chaque type de transition.

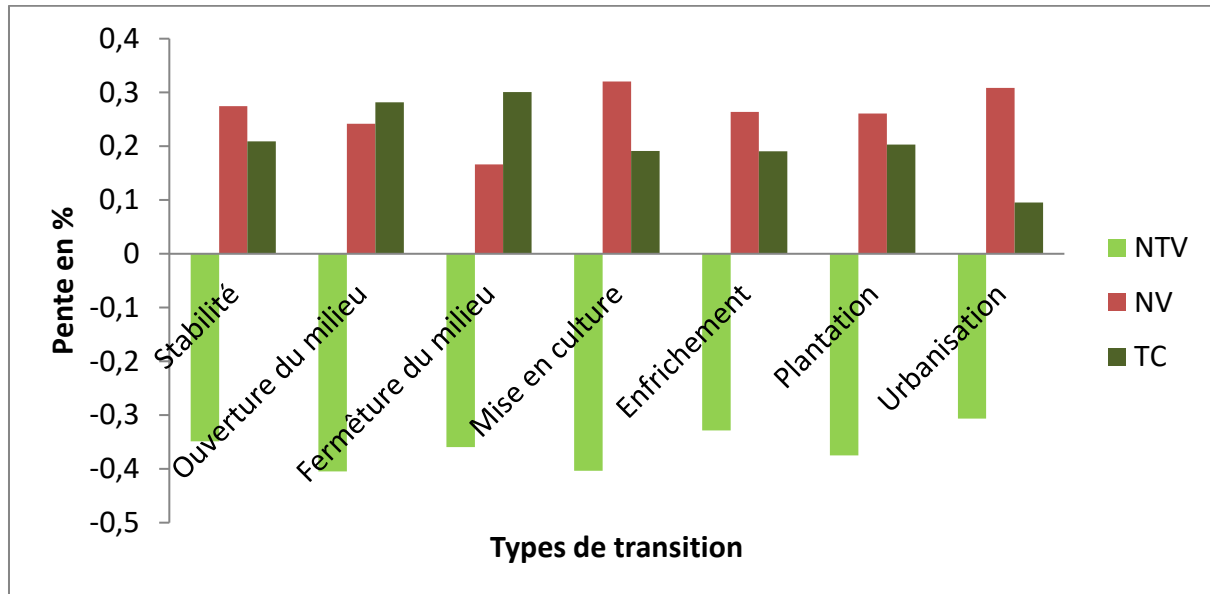


Figure 19 : Evolution des pentes des pixels significatifs (2000-2015) par type de transition

Légende : TC : Tree Cover ; NTV : Non Tree Vegetation ; NV : Non Vegetation

Il ressort de l'examen de la figure 19 que les surfaces avec couvert arboré (TC) ont connu une tendance significative à la hausse au niveau des milieux stables et surtout ouverts. On note au niveau des milieux mise en culture et des milieux urbanisés une pente moins importante. Les surfaces dénudées de végétation (NV) ont une tendance significative à la hausse au niveau de tous les types de transition. Alors que celles caractérisées comme portant un couvert végétal non arboré (NTV) connaissent une tendance régressive particulièrement marquée au niveau de toutes les transitions.

Les figures 20, et 21 présentent les cartes d'évolution (2000-2015) par catégorie d'indicateur (Tree Cover - TC, Non Tree Vegetation - NTV et Non Vegetation – NV) exclusivement pour les pixels ayant une évolution significative.

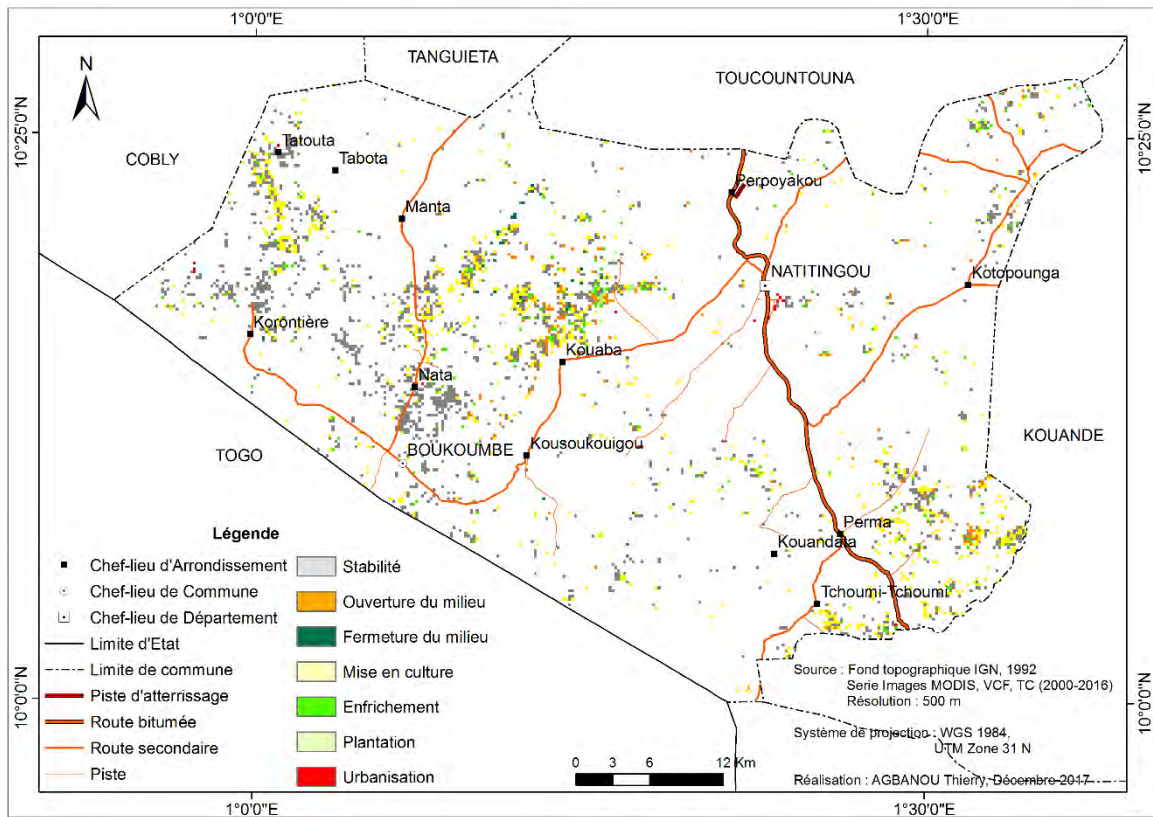


Figure 20 : Evolution (2000 – 2015) des surfaces à couvert forestier (TC) ayant une tendance significative par type de transition

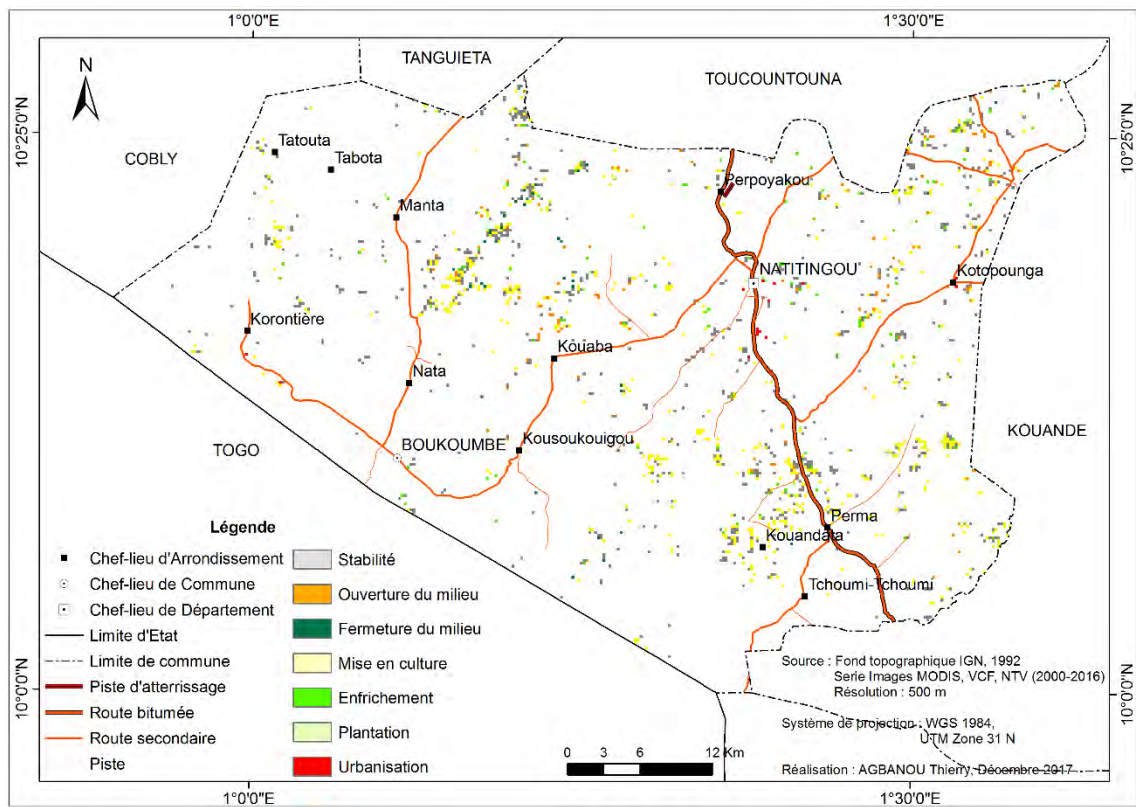


Figure 21 : Evolution (2000 – 2015) des surfaces à couvert végétal non arboré (NTV) ayant une tendance significative par type de transition

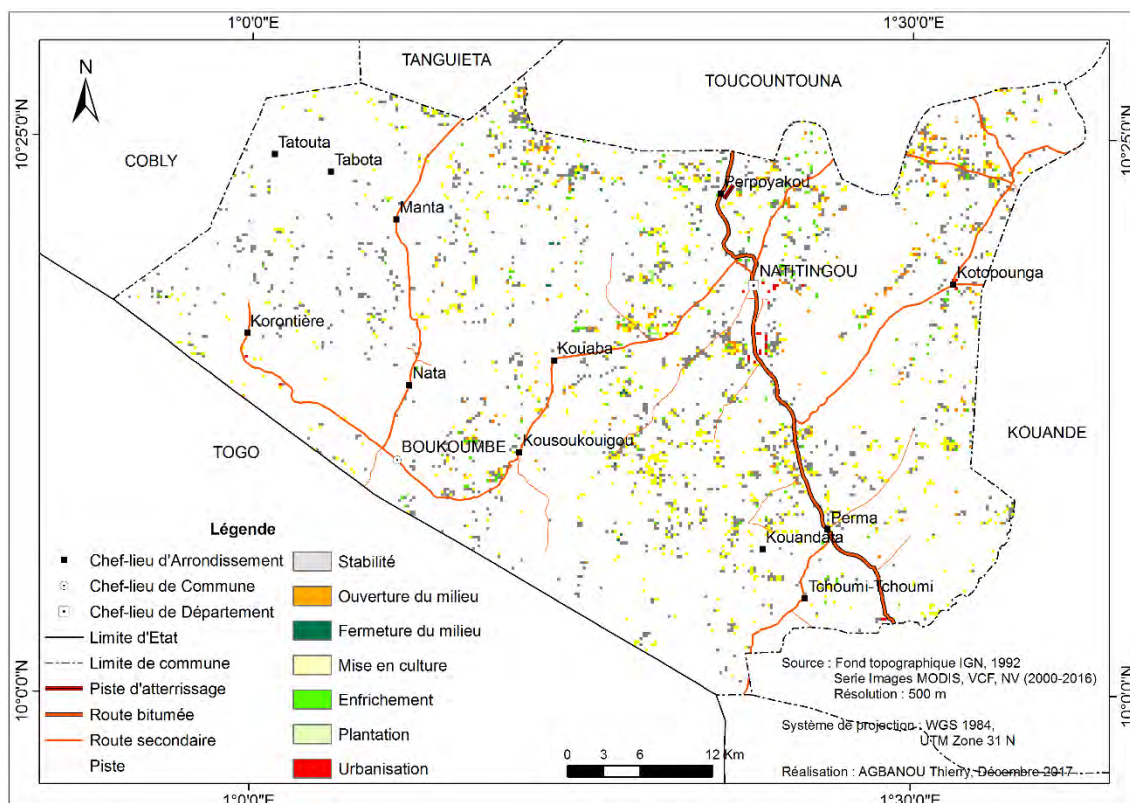


Figure 22 : Evolution (2000 – 2015) des surfaces sans végétation (NV) ayant une tendance significative par type de transition

De ces trois cartes d'évolution précédentes (figures 26, 27 et 28) sont extraites les statistiques du tableau XI ci-dessous.

Tableau XI : Superficies des surfaces à tendance significative (TC, NV, NTV) par type de transition

Types de transition	Superficie initiale (ha)	TC (ha)	NV (ha)	NTV (ha)	Total TC, NV, NTV (ha)	(%)
Stabilité	131006,61	9469,87	9083,80	4252,34	22806,01	17,40
Ouverture du milieu	18399,15	1097,55	1196,83	656,32	2950,70	16,03
Fermeture du milieu	1773,54	198,55	148,91	187,52	534,98	30,16
Mise en culture	80298,81	5024,49	6199,26	3138,24	14361,99	17,88
Enfrichement	13420,98	976,21	1169,25	546,02	2691,48	20,05
Plantation	1039,86	137,88	143,39	71,69	352,96	33,594
Urbanisation	2095,92	126,85	220,61	126,85	474,32	22,63
Total	248034,87	17031,44	18162,05	8979,00	44172,49	17,80

Légende : TC : Tree Cover ; NTV : Non Tree Vegetation ; NV : Non Vegetation

En termes de superficie, les types de transition qui ont connu d'importantes mutations significatives sont : les milieux stables (22806 ha), les milieux mis en culture (14362 ha), les milieux ouverts (2951 ha) et l'enfrichement (2691 ha). Les autres types de transition ont connu une transition significative sur des superficies inférieures à 550 ha.

L'analyse combiné des statistiques issues des algorithmes Theil-Sen et Mann-Kendall traduit bien de façon globale les changements d'occupation/ d'utilisation du sol. Les valeurs des pentes de tendance de ces différents indicateurs traduisent la pression dont fait l'objet ce milieu de la part de l'homme et confirment les tendances d'évolution observées à partir des images Landsat. En effet, ce milieu soudanien est actuellement dépourvu de forêts (denses ou claires) à cause des pratiques agricoles (agriculture itinérante sur brûlis) et de l'exploitation du bois comme source d'énergie domestique (bois de chauffe et charbon de bois ou d'œuvre) et subit une forte pression anthropique.

3.1.5. Evaluation des classifications à partir des Images Modis NDVI

3.1.5.1. Evolution du NDVI par catégories d'occupation du sol identifiées en 2000 et en 2016

L'évolution du NDVI varie en fonction de l'occupation du sol. Les figures 23A et 23B présentent l'évolution du NDVI entre 2000 et 2016 (résolution 250 m) par catégorie d'occupation du sol identifiée respectivement en 2000 et 2016 (résolution 30 m).

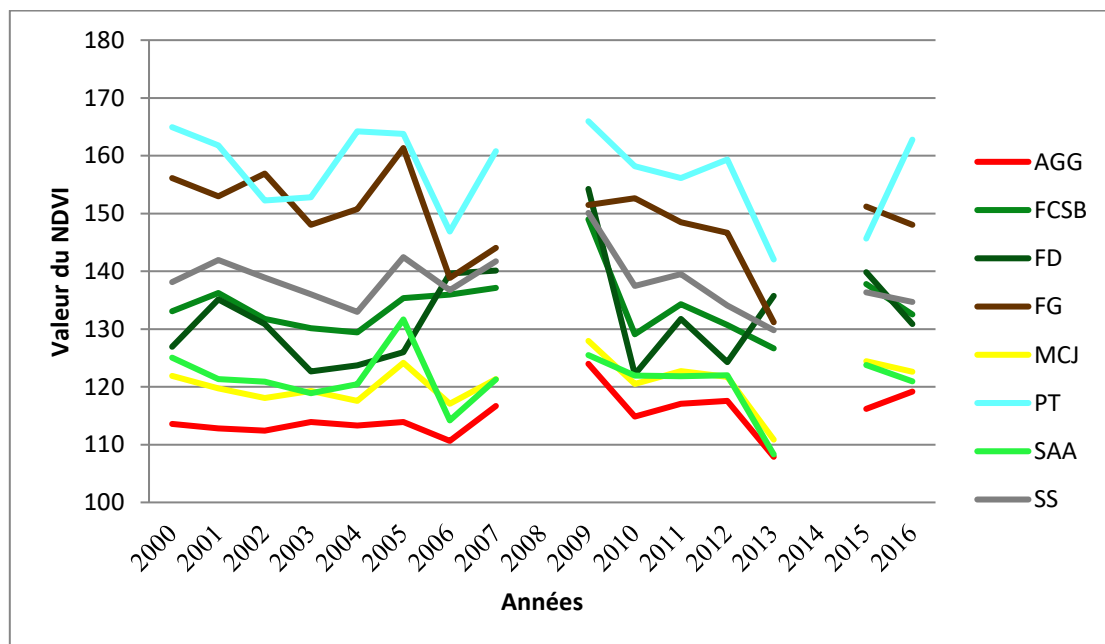


Figure 23A : Evolution du NDVI en fonction des catégories d'occupation du sol en 2000

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

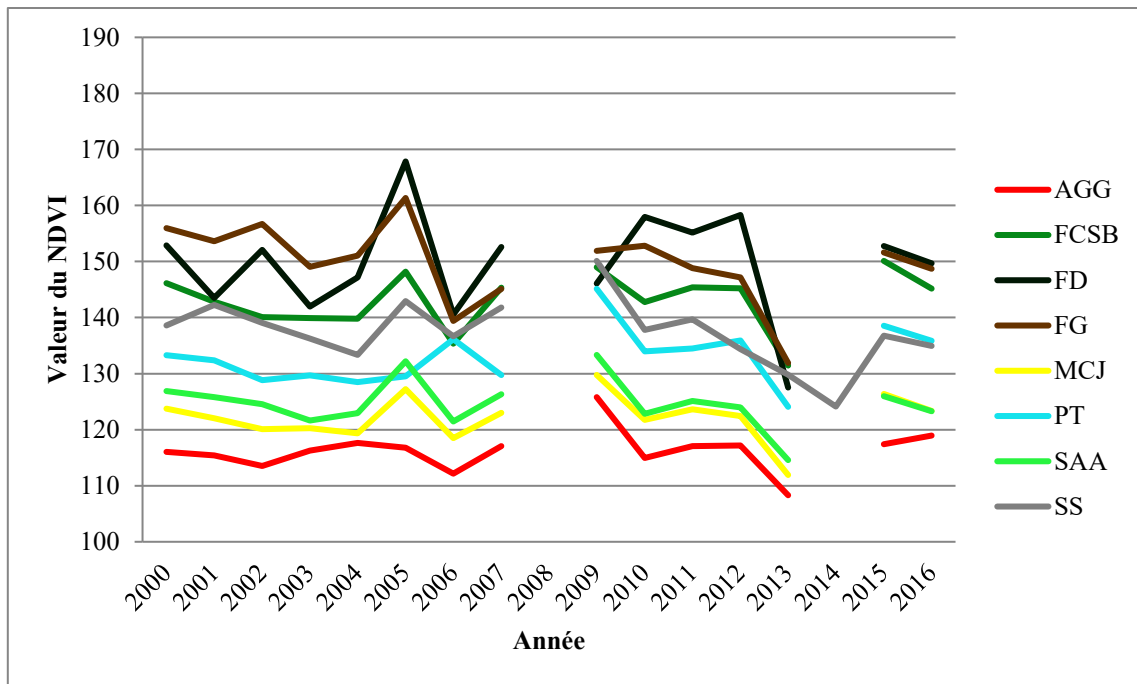


Figure 23B : Evolution du NDVI en fonction des catégories d'occupation du sol en 2016

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

L'examen des figures 23A et 23B montre une rupture des courbes entre les périodes 2007-2009 et 2013-2015. Ceci s'explique par les lacunes observées au niveau des données NDVI des années 2008 et 2014.

De l'examen de la figure 23A, il ressort que les plantations avaient le niveau NDVI le plus élevé. Il est à noter qu'en 2000, il n'y avait qu'une seule plantation d'une superficie de 143,28 ha représentant 25 pixels MODIS. On note le niveau NDVI élevé des forêts galeries, des forêts claires et savanes boisées et des forêts denses ; catégories plus représentatives en surface. Les mosaïques et cultures et jachères et les agglomérations ont les NDVI les plus faibles. Le haut niveau de NDVI des forêts se confirme en 2016 (figure 23B) alors que les plantations, ayant gagné en surface et regroupant des situations très diverses (sols nus, jeunes plantations, plantations adultes) ont un NDVI moyen. A l'instar de ce qui été observé pour 2000, les agglomérations et mosaïques de cultures et jachères ont les valeurs les plus faibles. La tendance du NDVI est à la baisse au niveau de toutes les catégories d'occupation du sol identifiées aussi bien en 2000 qu'en 2016. Ceci autorise plusieurs hypothèses : pression anthropique sur le milieu s'intensifiant ou conséquences d'une sécheresse prolongée.

3.1.5.2. Superposition des zones d'entraînement de classification Landsat 2000 et 2016 aux images NDVI

Une approche complémentaire pour valider les classifications des images Landsat TM consiste à superposer les zones d'entraînement utilisées pour la classification des images de 2000 et 2016 aux images NDVI respectives (figures 24A, B, C et D). Les images Landsat et Modis considérées sont des images du même mois et de la même année.

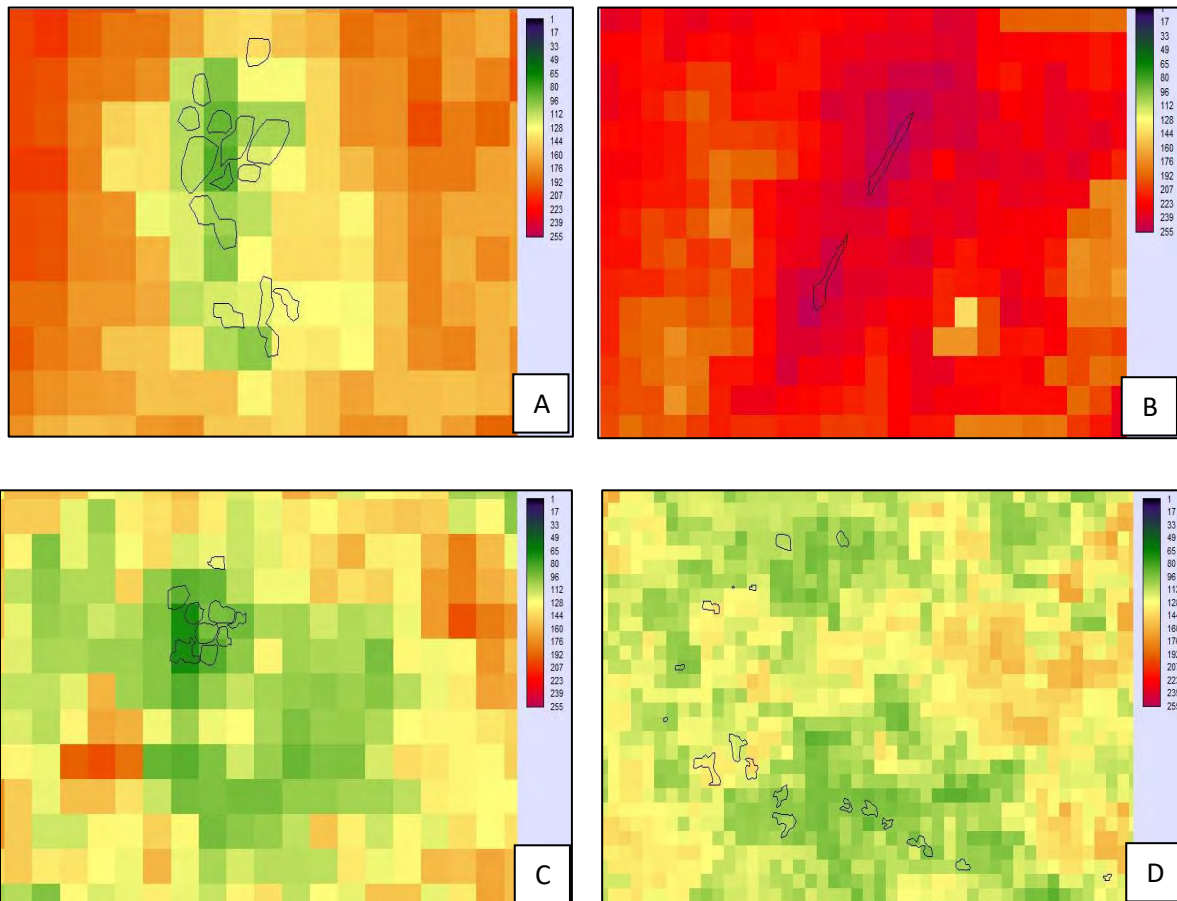


Figure 24 : Zones d'entraînement des classifications 2000 et 2016 superposées aux images Modis NDVI

Légende :

- A : Image de zone d'entraînement de la catégorie agglomération de Landsat 2000 superposée à l'image Modis NDVI de la même année.
- B : Image de zone d'entraînement de la catégorie forêt galerie de Landsat 2000 superposée à l'image Modis NDVI de la même année
- C : Image de zone d'entraînement de la catégorie agglomération de Landsat 2016 superposée à l'image Modis NDVI de la même année
- D : Image zone d'entraînement de la catégorie Mosaïque de culture et jachères de Landsat 2016 superposée à l'image Modis NDVI de la même année

L'analyse comparée des figures 24A et 24C montre que les agglomérations (en 2000 et 2016) ont des valeurs de NDVI parmi les plus faibles (49 à 96). Et le nombre de pixels de valeurs faibles (ici en vert) est plus important en 2016 qu'en 2000. Ceci montre bien qu'il y a eu une extension des agglomérations entre 2000 et 2016. Au niveau de la figure 24B, la zone d'entraînement présente des NDVI élevés (239 à 255), ce qui montre bien que la végétation est

plus importante et en bon état. Quant à la figure 24D qui met en relief les zones d'entraînement des mosaïques de cultures et jachères, le NDVI a des valeurs faibles (49 à 96) et traduit bien l'état de dégradation du couvert végétal. Ces résultats montrent qu'il y a moins d'activité chlorophyllienne au niveau des milieux fortement anthropisés (agglomération et mosaïque de champs). Le même exercice fait au niveau des autres catégories d'occupation du sol (plantations, forêts denses, forêts claires et savanes boisées, savanes arborées et arbustives et savanes saxicoles) a également montré que les valeurs du NDVI collent bien avec l'état végétatif supposé. Cette concordance entre valeurs du NDVI et état végétatif des catégories d'occupation confirme bien les classifications des images Landsat 2000 et 2016.

3.1.5.3. Evolution du NDVI par types de transition entre 2000 et 2016

Le suivi du NDVI sur la période 2000 à 2016 montre que l'activité chlorophyllienne évolue en fonction de l'état végétatif de la transition considérée (figure 25).

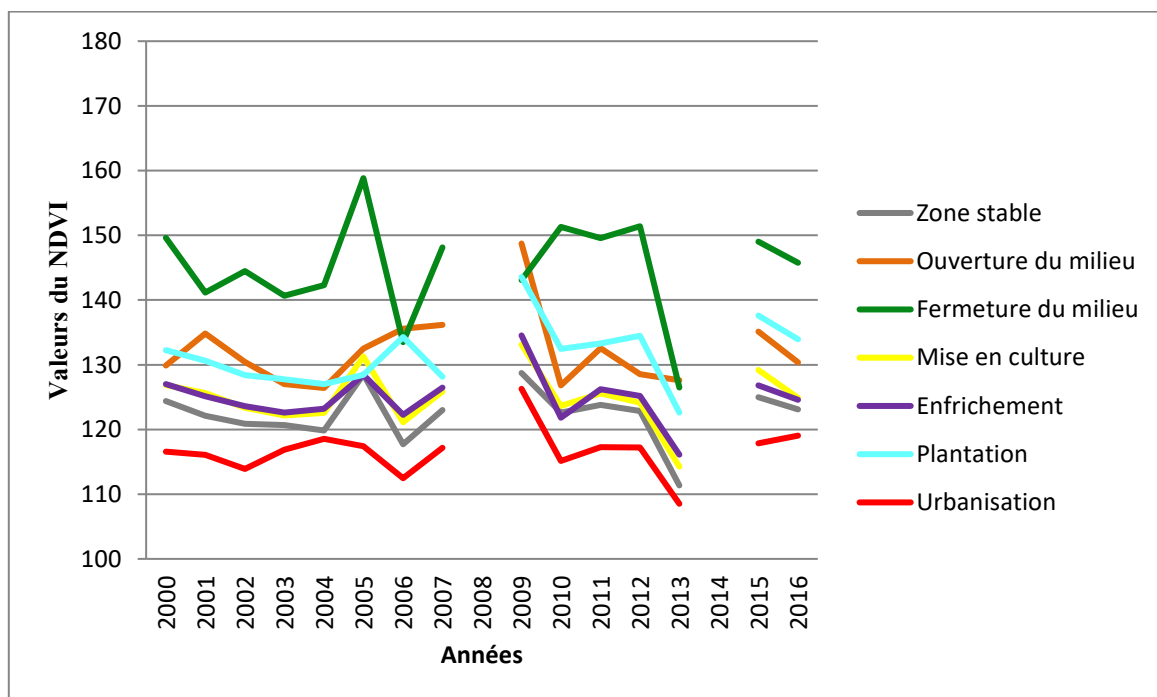


Figure 25 : Evolution du NDVI en fonction des changements d'occupation du sol entre 2000 et 2016

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

Les lacunes observées au niveau des données NDVI des années 2008 et 2014 expliquent la rupture des courbes de la figure 25 entre les périodes 2007-2009 et 2013-2015.

Il ressort de l'examen de la figure 25 que les valeurs de NDVI les plus élevées tout le long de la période 2000 à 2016 sont enregistrées au niveau de la transition "fermeture du milieu" et varient entre 127 et 173. Cela signifie que l'activité chlorophyllienne au niveau de cette

transition est plus importante qu'au niveau des autres transitions : la végétation est donc plus abondante. On note aussi une activité chlorophyllienne importante au niveau des plantations avec des NDVI variant entre 120 et 147 et au niveau des milieux ouverts avec des NDVI variant entre 120 et 139. L'activité chlorophyllienne la moins importante est observée au niveau de la transition vers l'urbanisation, avec des valeurs de NDVI oscillant entre 107 et 129. Ceci se justifie par la réduction du couvert végétal au profit des habitats dans cette catégorie. Les valeurs les plus élevées de NDVI sont enregistrées au cours des années 2005, 2008 et 2015 pour tous les types de transition. Ces années ont été des années plus ou moins pluvieuses selon les données de précipitations collectées. Ceci a favorisé le développement du couvert végétal et donc la montée de l'activité chlorophyllienne de la végétation.

Cette évolution du NDVI entre 2000 et 2016 concorde bien avec l'évolution des différentes catégories identifiées sur la carte d'évolution 2000 – 2016 et confirme aussi les classifications d'images de 2000 et 2016.

La figure 26 ci-dessous montre les surfaces dont l'évolution NDVI est significative (niveau 95 %) et affiche sur ces endroits en fonction des types de transition.

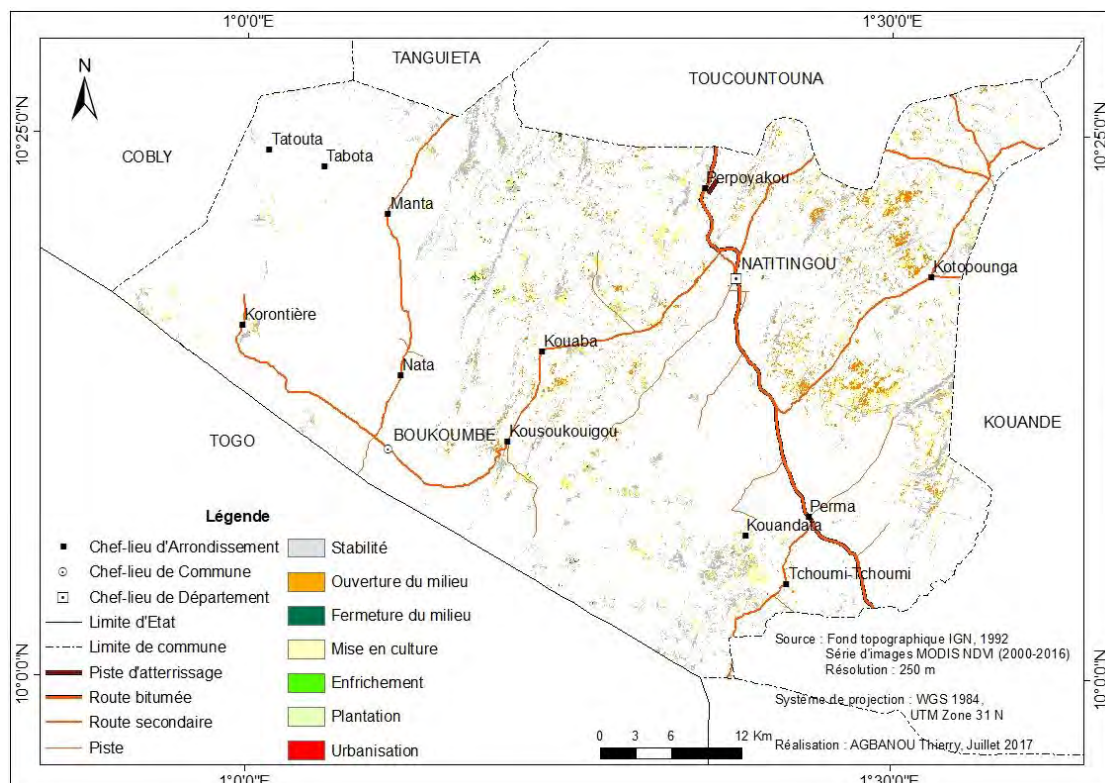


Figure 26 : Evolution (2000 – 2016) des NDVI significatifs par type de transition

De cette carte de répartition spatiale des NDVI qui ont évolué de façon significative en fonction des types de transition (2000-2016) sont extraites les statistiques du tableau XII ci-dessous.

Tableau XII : Superficie des pixels NDVI ayant significativement évolué

Types de transition	Superficie surface (ha)	Superficie NDVI surface significative (ha)	%
Zone stable	131006,61	10694,29	8,16
Ouverture du milieu	18399,15	1207,86	6,56
Fermeture du milieu	1773,54	126,85	7,15
Mise en culture	80298,81	6116,54	7,62
Enfrichement	13420,98	981,73	7,31
Plantation	1039,86	115,82	11,14
Urbanisation	2095,92	297,83	14,21
Total	248034,87	19540,92	7,88

Il ressort du tableau XII que pour tous les types de transition, la surface significative ($-1,96 \leq z\text{-score} \leq 1,96$) n'est comprise qu'entre 6 et 14 %. En outre, ce cumul de surface est spatialement dispersé. Il s'agit donc de petites étendues par rapport à la taille des pixels MODIS compliquant l'interprétation des résultats, notamment pour certains types de transition très limitées en surface : les milieux en voie de fermeture (126,85 ha), les milieux urbanisés (297,83 ha) et les plantations (115,82 ha). Les zones de mise en culture (6116,54 ha), les zones en « ouverture » (1207,86 ha) et en voie d'enfrichement (981,73 ha), totalisent un cumul surfacique laissant envisager une interprétation possible des résultats.

3.1.5.4. Evolution du NDVI dans les grandes zones de changements homogènes entre 2000 et 2016

Afin de comparer les carroyages fort différents (pixels de 30 x 30 m pour Landsat TM, 235 x 235 m pour MODIS NDVI après reprojexion en UTM), nous nous limitons dans l'analyse comparative aux zones contiguës de transitions de même type. Nous avons extrait ces zones par un filtre de richesse relative de taille 7 x 7. Appliquée à la carte des transitions à la résolution de 30m, nous n'avons retenu que les pixels dont le voisinage 7 x 7 (210 x 210 m ; le filtre le plus grand disponible sous TerrSet) est parfaitement homogène.

L'extraction des pixels à voisinage homogène sont présentés à la figure 27 ci-dessous.

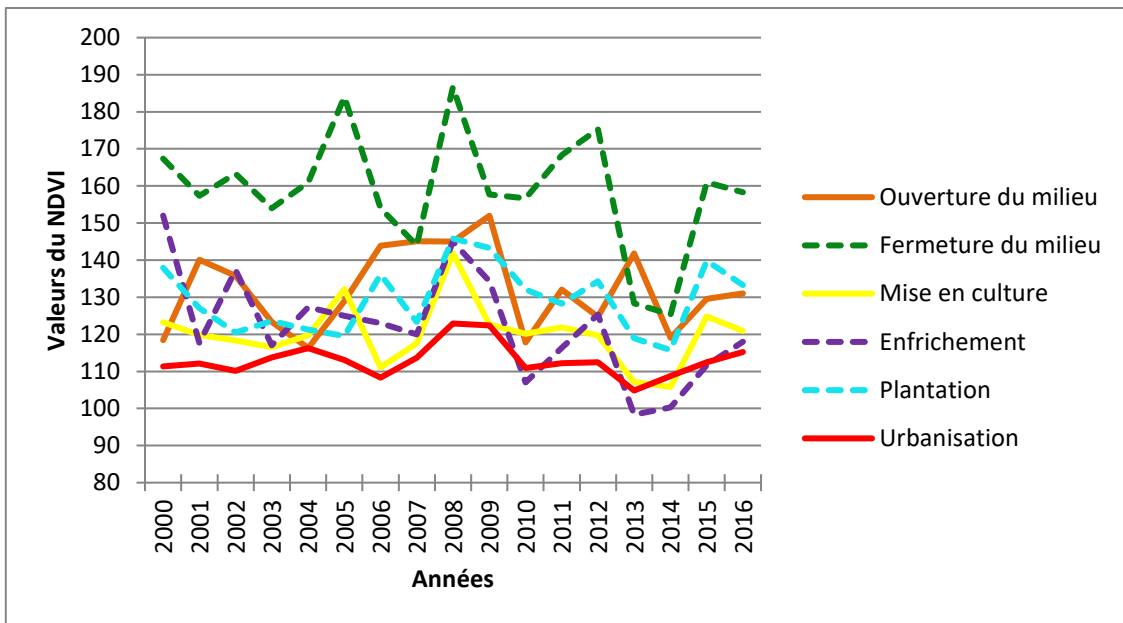


Figure 27 : Evolution du NDVI dans les grandes zones homogènes de changement en fonction des transitions d'occupation du sol entre 2000 et 2016

Les lignes représentées en pointillé sur cette figure 27 représentent les types de transition dont le nombre de pixels à voisinage 7 x 7 homogène est très restreint (< 12 pixels). Il ressort de la lecture de cette figure 27 que les années 2007, 2010 et 2014 ont été marquées par des NDVI très faibles alors que les années 2008 et 2012 sont marquées par des NDVI de valeurs très élevées au niveau de tous les types de transition. Mais la tendance évolutive du NDVI est à la baisse au niveau de toutes les catégories de transition. Cette tendance baissière s'explique par la pression que subit ce milieu. Ceci dit, la figure 27 confirme le niveau NDVI bas des pixels devenus urbanisés ou des cultures. Contrairement au graphique établi sur l'ensemble de la carte (cf. fig. 25), les quelques plantations de taille compatibles avec la résolution MODIS NDVI montrent un niveau NDVI faible.

La figure 28 présente la superposition des zones de changements homogènes du NDVI observés sur les images Modis (en violet) aux zones de changement observées sur la carte d'évolution Landsat (en polygones noirs). Les zones prise en compte ici sont uniquement les zones qui ont connu de changement entre 2000 et 2016. Les zones stables ne sont pas concernées. Cette figure 28 montre les limites de la comparaison dans un milieu complexe.



Figure 28 : Capture d'écran de zones de grands changements du NDVI sur les images Modis (en violet) superposées aux zones de changement observées sur la carte d'évolution Landsat (polygone avec contour en noir)

La figure 28 montre la diversité des situations résultant de la comparaison de résolutions peu compatibles. En effet, les zones de changements continus du NDVI sur la carte d'évolution Landsat sont estimées à 3116,96 ha alors que celle observée au niveau de l'image Modis NDVI est de 3019,96 ha, soit 2,45 ha de moins (tableau XIII). Il ne reste donc qu'entre 0.12 et 16 %, c'est-à-dire entre 3 et 442 pixels par type de transition qui permettent une comparaison.

Tableau XIII : Superficie des pixels des NDVI ayant significativement évolués dans les zones de changement continu

Type de changement	Superficie totale (ha)	Superficie significative (Modis NDVI) (ha)	Proportion (%)	Nombre de pixels significatifs
Ouverture du milieu	18818,42	143,40	0,76	26
Fermeture du milieu	1720,79	16,55	0,96	03
Mise en culture	80132,72	2437,79	3,04	442
Enfrichement	13523,67	16,55	0,12	03
Plantation	1025,86	66,18	6,45	12
Urbanisation	2035,17	336,44	16,53	61
Total	117256,63	3016,90		547

L'analyse des chiffres du tableau XIII permet de constater qu'entre 0,12 % et 16 % (3 à 422 pixels) des types de transitions ont vu leurs NDVI significativement évolués. Les milieux urbanisés et ceux mises en culture sont ceux dont les NDVI ont plus évolués, soit

respectivement 61 pixels (336,44 ha) et 442 pixels (2437,79 ha). Cette évolution peut s'expliquer par l'expansion de ces types de transitions entre 2000 et 2016 au détriment des autres dont seulement 03 à 26 pixels ont vu leurs NDVI évoluer. Les milieux en friche et ceux fermés sont particulièrement affectés (les NDVI de 03 pixels seulement ont évolué). Ceci traduit bien la pression que subit le couvert végétal dans ces milieux.

3.1.5.5. Evolution du NDVI par catégories d'occupation du sol restées stables entre 2000 et 2016

L'évolution du NDVI pour chaque catégorie d'occupation du sol restée stable dans le milieu d'étude entre 2000 et 2016 a été également appréciée. Les résultats obtenus sont traduits sous forme de graphique (figure 29).

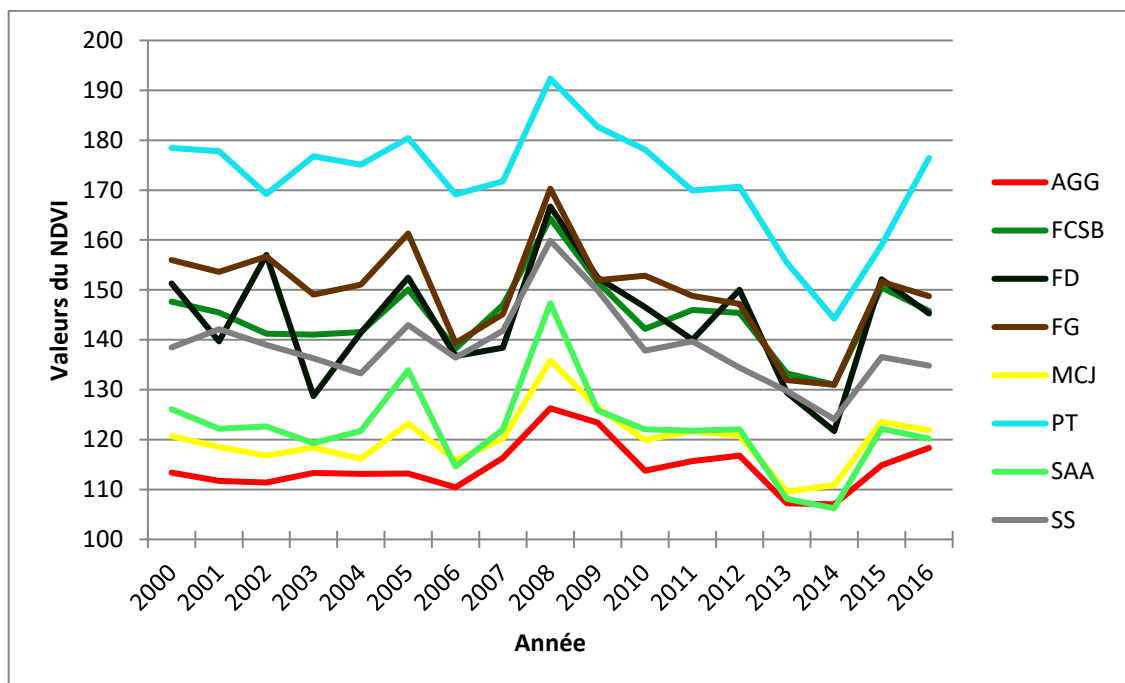


Figure 29 : Evolution du NDVI par catégories d'occupation du sol en zones stables entre 2000 et 2016

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

De l'examen de cette figure 29, il ressort que les plantations (NDVI variant entre 145 et 195) sont les catégories qui ont les NDVI les plus élevées suivies des forêts galeries (NDVI variant entre 130 et 170) et forêts denses (NDVI variant entre 125 et 165). Les agglomérations (NDVI variant entre 107 et 125) et mosaïques de cultures et jachères (NDVI variant entre 135 et 106) sont celles qui ont les NDVI les plus basses. Les formations végétales ont donc des NDVI plus élevées que les milieux anthropisés comme les agglomérations et mosaïques de cultures et jachères. Mais la tendance évolutive générale du NDVI entre 2000 et 2016 pour toutes les

catégories d'occupation du sol restées stables entre 2000 et 2016 est à la baisse. Ceci montre que la stabilité de cette portion du milieu n'est qu'apparente. En absence de toute influence naturelle et humaine, les NDVI dans ce milieu devraient rester stables (linéaires) sur toute la période 2000 – 2016. Cette variation du NDVI peut donc s'expliquer par la variabilité climatique et/ou l'influence des actions anthropiques au cours de la série d'années 2000-2016.

3.1.5.6. Evolution du NDVI dans les grandes zones de stabilité continue (homogène) entre 2000 et 2016

Dans les zones qui sont restées stables de façon significative ($- 1,96 \leq z\text{-score} \leq 1,96$) entre 2000 et 2016, certaines ont connu une évolution de leurs NDVI et d'autres près que pas.

Les carroyages fort différents (pixels de 30 x 30 m pour Landsat TM, 235 x 235 m pour MODIS NDVI après reprojexion en UTM), ont été pris en compte dans l'analyse comparative. Et donc seules les zones contiguës de transitions de même type ont été considérées. Ainsi un filtre de richesse relative de taille 7 x 7 a été extrait et appliqué à la carte des transitions à la résolution de 30 m. Les pixels dont le voisinage 7 x 7 (210 x 210 m ; le filtre le plus grand disponible sous TerrSet) est parfaitement homogène ont été retenus pour la comparaison. La figure 30 ci-dessous présente l'évolution du NDVI de ces pixels à voisinage homogène.

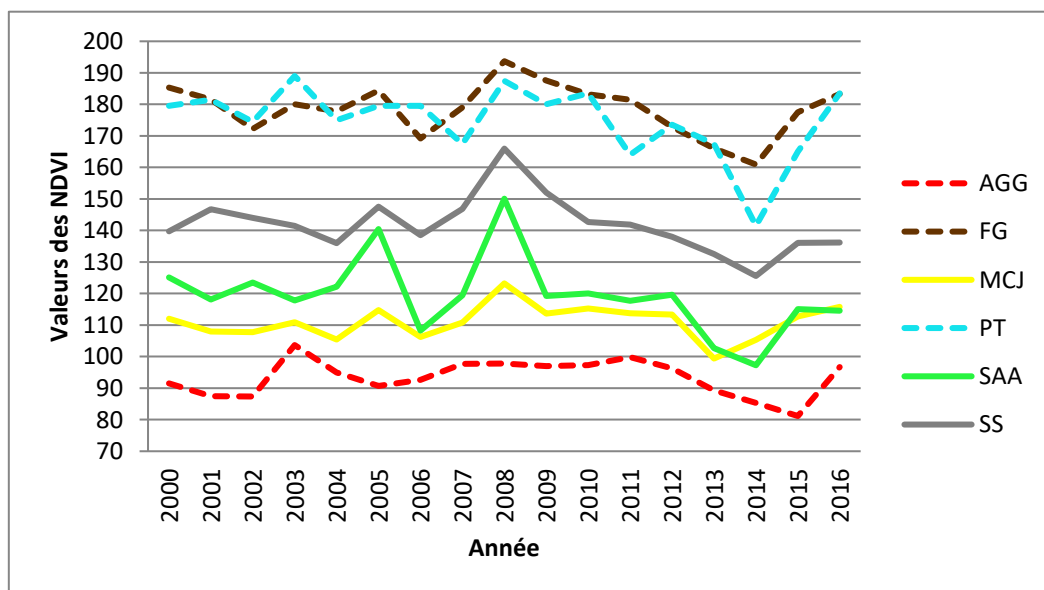


Figure 30 : Evolution du NDVI dans les grandes zones de stabilité homogène en fonction des transitions d'occupation du sol entre 2000 et 2016

Légende : FG : Forêts galeries ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

Les lignes représentées en pointillé sur cette figure 30 représentent les types de transition dont le nombre de pixels à voisinage 7 x 7 homogène est très restreint (< 13 pixels). Il ressort de

cette figure 30 que contrairement à la 29, ici les galeries forestières et plantations présentent des NDVI très élevés (entre 145 et 195) et les agglomérations ont des NDVI encore plus bas (entre 80 et 100). Seulement très peu de pixels (< 13) ont évolué de façon significative au niveau de ces catégories restés stables. Elles traduisent donc bien le caractère de stabilité conféré à cette zone. Quant aux mosaïques de cultures et jachères, savanes arborées et arbustives et savanes saxicoles, ils présentent des NDVI qui oscillent entre 100 et 165 avec des valeurs plus importantes pour les savanes saxicoles. La tendance évolutive générale est à la baisse, ceci qui montre la stabilité de cette zone n'est qu'apparente.

Le tableau XIV ci-dessous montre les superficies et pixels qui ont évolués de façon significative dans les zones de stabilité continue.

Tableau XIV : Superficie des pixels des NDVI ayant significativement évolués dans les zones de stabilité continue ou homogène

Catégorie d'occupation du sol	Superficie totale (ha)	Superficie significative (Modis NDVI) (ha)	Proportion (%)	Nombre de pixels significatifs
Agglomération	333,9	33,09	09,91	06
Forêt claire et savane boisée	3040,56	0	0	0
Forêt dense	12,15	0	0	0
Forêt galerie	1268,64	71,69	05,65	13
Mosaïque de culture et jachère	80897,58	16606,76	20,52	3011
Plantation	49,23	11,03	22,40	02
Savane arborée et arbustive	36103,32	1676,67	04,64	304
Savane saxicole	8876,79	1489,14	16,77	270
Total	130582,17	19888,40		3606

Sources : Interprétation de série d'images Modis NDVI (2000 – 2016)

Il ressort de l'analyse de la figure 30 et tableau XIV que 04 à 22 %, soit 02 à 3011 pixels sont restés stables de façon continue par catégories d'occupation du sol. Seules les mosaïques de cultures et jachères (3011 pixels, soit 20,52 %), les savanes arborées et arbustives (304 pixels, soit 04,64 %) et les savanes saxicoles (270 pixels, soit 16,77 %) ont des NDVI qui ont évolués de façon continue (significative). Les autres catégories qui ont très peu de pixels dont les NDVI ont évolués de façon continue sont représentés en tiret. Il s'agit des galeries forestières (05,65 %), des plantations (22,40 %) et des agglomérations (09,91 %). Quant aux forêts denses, forêts claires et savanes arborées, elles ne présentent aucun pixel dont les NDVI ont évolués de façon continue (significative) dans le temps, c'est pour cette raison qu'elles ne sont pas représentées sur la figure 31 ci-dessus. Les figures 31A et 31B montrent un aperçu de la superposition des

zones de grande stabilité du NDVI observées sur les images Modis (en rouge bleu, gris et jaune) aux zones de stabilité observées sur la carte d'évolution Landsat (polygone avec contour noir).

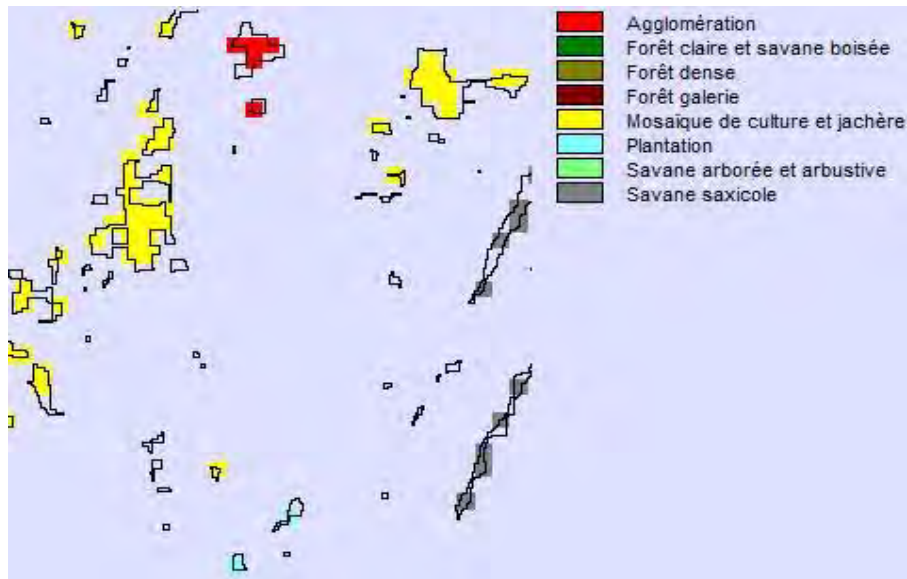


Figure 31A : Capture d'écran de zones de grande stabilité du NDVI sur les images Modis (en rouge bleuâtre, gris et jaune) superposées aux zones de stabilité observées sur la carte d'évolution Landsat (en polygone avec contour en noir)

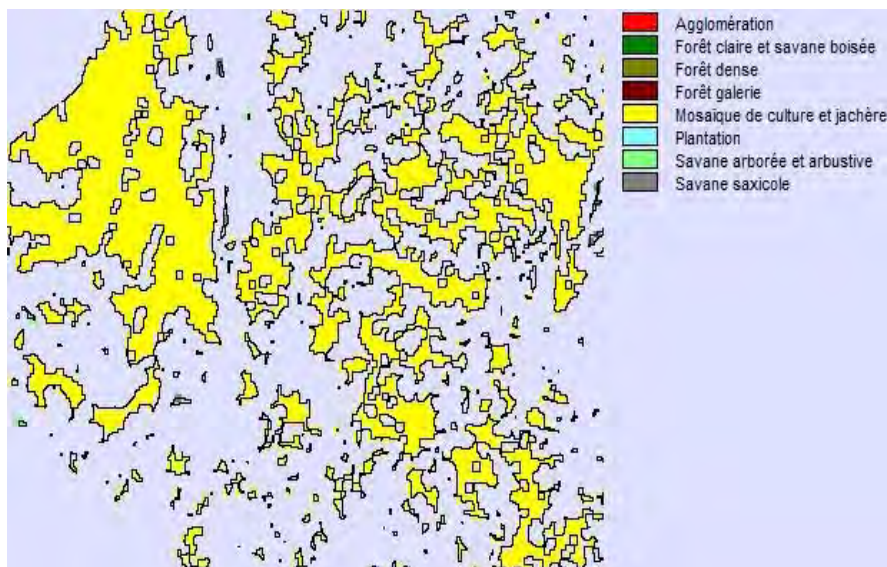


Figure 31B : Capture d'écran de zones de grande stabilité du NDVI dans les mosaïques de cultures et jachères sur les images Modis (en jaune) superposées aux zones de stabilité observées sur la carte d'évolution Landsat (en polygone avec contour en noir)

L'observation des figures 31A et 31B permet de constater que sur l'image Modis, seuls les mosaïques de cultures et jachères (en jaune) présentent d'importantes superficies qui emboîtent parfaitement avec les zones de stabilité homogène (en polygone avec contour noir) de la carte d'évolution Landsat. Les autres catégories que sont les savanes saxicoles (en gris), les

plantations (en bleuâtre), les agglomérations (en rouge) et les savanes arborées et arbustives (en vert) présentent des emboîtements partiels. Ce constat permet d'affirmer que la stabilité détectée au niveau de la carte d'évolution n'est qu'apparente. Les zones de couvert végétal ne peuvent en réalité rester stable. Par contre, on peut admettre la stabilité des zones relativement dépourvues de couvert végétal comme les mosaïques de cultures et jachères. Ces constats confirment bien les classifications des images Landsat.

3.1.6. Limites des images Modis VCF et Modis NDVI utilisées

L'utilisation des images Modis VCF et Modis NDVI pour valider les classifications Landsat n'est pas sans difficultés.

3.1.6.1. Faible résolution spatiale des images

En effet, les images Modis n'ont pas les mêmes résolutions que les images Landsat TM. Les images Modis VCF ont une résolution de 500 m soit environ 277 fois plus petite qu'un pixel d'une image Landsat TM alors que les images Modis NDVI de 250 m ont une résolution environ 69 plus petite que celles des images Landsat TM (figure 32).

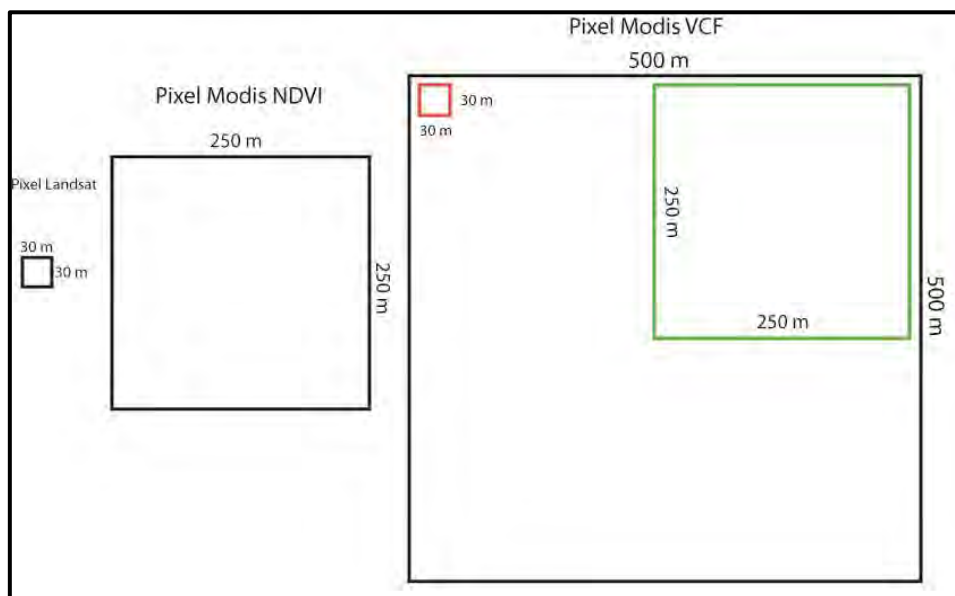


Figure 32 : Schéma comparatif de la taille des pixels Landsat TM, Modis VCF et NDVI

La faible résolution des images Modis (surtout les Modis VCF), ne facilite pas la détection de certains changements d'état du couvert végétal. Toutefois, ces images donnent les grandes tendances évolutives des catégories d'occupation du sol et permettent de valider les classifications faites.

3.1.6.2. Manque de précision sur la période exacte de l'année où les changements sont observés

Certes les séries d'images Modis VCF et NDVI présentent des variations des TC, NTV, NV et NDVI au fil des années avec une tendance généralement à la baisse et parfois en dents de scie, mais l'on ne sait pas avec exactitude quand ces changements se sont opérés.

3.1.6.3. Complexité du milieu d'étude

Le milieu d'étude contrairement à d'autres milieux est très complexe et ne présente pas de façon continue les catégories d'occupation du sol. Dans ce milieu d'étude, les catégories d'occupation du sol sont très fragmentées et s'entremêlent entre elles (surtout les formations végétales et les champs) (photo 5 et 6).



Photo 5 : Capture d'écran d'image Google Earth montrant les mosaïques de cultures et jachères entremêlées d'habitations dans l'arrondissement de Manta (Boukombé)

La photo 5 ci-dessus montre une mosaïque de culture et jachères parsemée d'habitations et de galerie forestière. On voit bien sur cette image, que l'habitat est dispersé, le couvert végétal ne présente pas une répartition continue.



Photo 6 : Capture d'écran d'image Google Earth montrant quelques catégories d'occupation du sol à Natitingou

Cette figure 6 montre plusieurs catégories d'occupation du sol entremêlées entre elles. Il s'agit notamment d'une plantation dans la partie sud de la photo, les mosaïques de cultures et jachères, et l'habitat qui sont dispersés sur toute l'étendue que présente la photo et les galeries forestières à l'est et au nord-ouest sur la photo.

Ces deux photos ci-dessus qui montrent bien que ce milieu est très complexe (difficile à discriminer) et que la classification à partir d'images de type Modis (250 et 500 m de résolution) et même Landsat ne comblera forcément pas les attentes.

3.1.6.4. Influences d'autres variables sur la variabilité des NDVI

Les autres facteurs qui influencent l'évolution du couvert végétal ici étudié à travers les images Modis sont :

- La variabilité spatio-temporelle des précipitations qui a une influence sur la réserve en eau facilement utilisable par la plante surtout en saison sèche.
- L'apport en énergie solaire qui est un facteur très important qui peut varier d'un mois à un autre et d'une année à une autre.
- Les feux de végétation souvent provoqués par les populations en période de sécheresse sont des facteurs qui peuvent influencer l'état du couvert végétal dans le mois considéré pour cette étude.

Par ailleurs, sur les images Landsat, des valeurs anormales comme 0 et 255 sont enregistrées sur certains pixels des images de 2000 et 2016. Ces valeurs qui sont peu ordinaires sont des biais pour le suivi de l'évolution du NDVI.

3.2. Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol

3.2.1. Distribution spatiale et quantification des catégories d'occupation du sol

Les superficies des catégories d'occupation du sol varient ne sont pas les même en 1987, 2000 et 2016. Elles se présentent pour ces différentes années comme suit :

3.2.1.1 Occupation du sol en 1987

Le paysage du secteur Natitingou-Boukombé en 1987 était occupé par plusieurs unités. La végétation savanicole occupait une place importante (figure 33). Elle couvrait 185105,7 ha soit 74,63 % de la superficie totale du secteur d'étude.

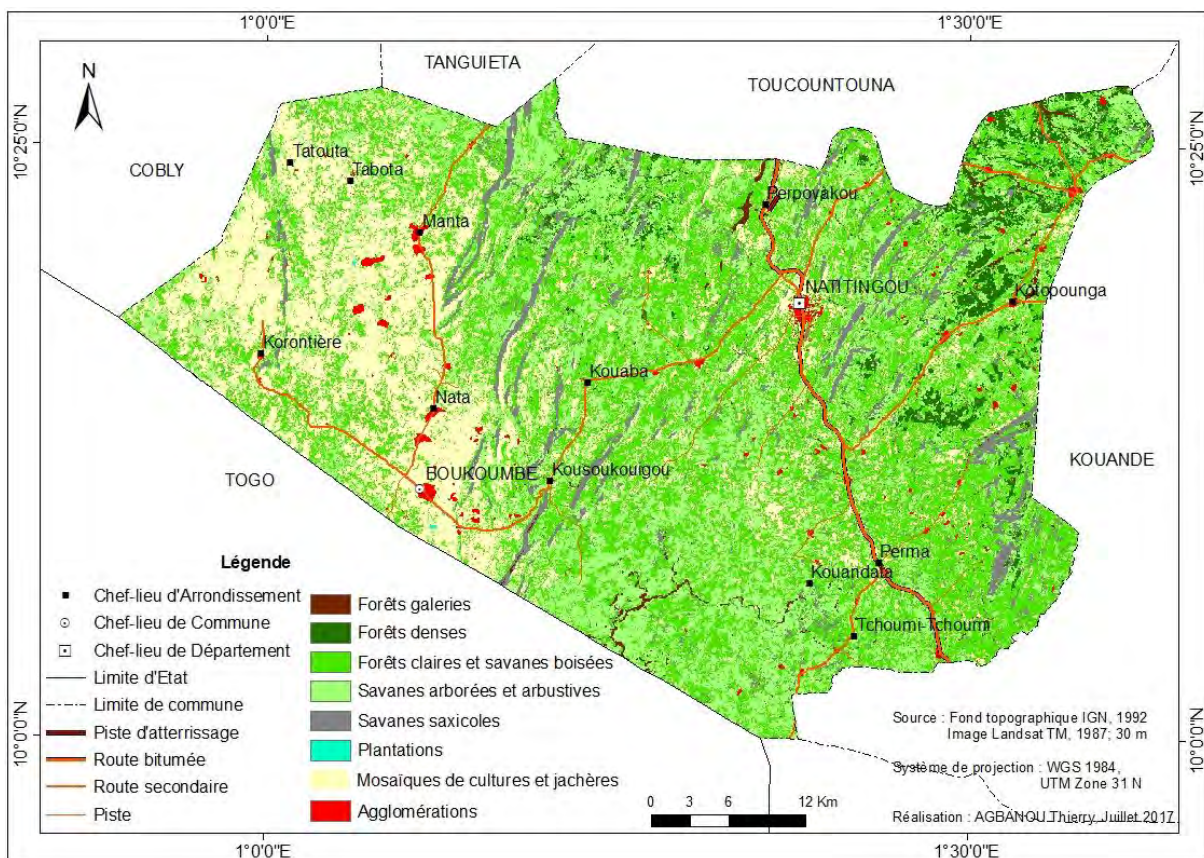


Figure 33 : Occupation du sol en 1987

Source : Image Landsat TM de 1987, résolution 30 m, Path 193 - Row 53

Huit catégories d'occupation du sol s'observent sur la figure 33. Il s'agit des : forêts galeries, forêts denses, forêts claires et savanes boisées, savanes arborées et arbustives, savanes saxicoles, plantations, mosaïques de Champs et jachères et enfin agglomérations. Les superficies de ces différentes catégories d'occupation du sol se présentent comme suit (tableau XV) :

Tableau XV : Catégories d'occupation du sol et leurs superficies en 1987

N°	Catégorie d'occupation du sol	Superficie (ha)	%
1	Forêts galeries	2404,35	0,97
2	Forêts denses	7723,98	03,11
3	Forêts claires et savanes boisées	96253,56	38,81
4	Savanes arborées et arbustives	64047,51	25,82
5	Savanes saxicoles	14628,42	05,90
6	Plantations	47,88	0,02
7	Mosaïques de cultures et jachères	60346,26	24,33
8	Agglomérations	2556,36	01,03
Total		248008,32	100,00

Source : Interprétation image Landsat TM de 1987

L'examen de la figure 33 et du tableau XVI permet de comprendre que la physionomie de ce milieu en 1987 est largement dominée par les forêts claires et savanes boisées qui couvrent 96253,56 ha (38,81 %), les savanes arborées et arbustives de 64047,51 (25,82 %) et les mosaïques de cultures et jachères qui couvrent 60346,26 ha (24,33 %). Les autres catégories d'occupation du sol ne sont pas très remarquables et sont en proportion inférieure à 6 %.

3.2.1.2. Occupation du sol en 2000

L'occupation du sol en 2000 (figure 34) est sensiblement différente de celle en 1987 du point de vue quantitatif. Sinon que nous avons le même nombre de catégories d'occupation du sol qu'en 1987.

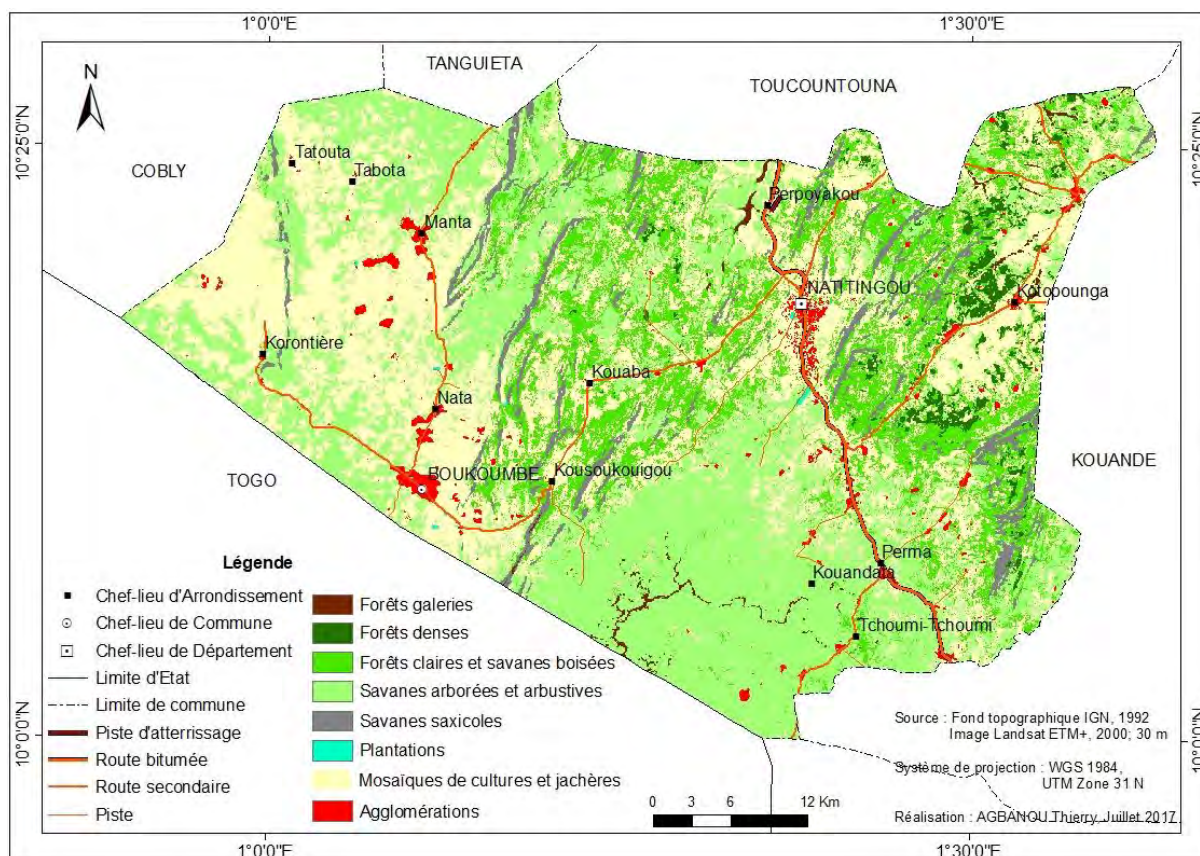


Figure 34 : Occupation du sol en 2000

Source : Image Landsat ETM + de 2000, résolution 30 m, Path 193 - Row 53

On constate à l'examen de la figure 34 une prédominance des mosaïques de cultures et jachères dans la partie ouest du secteur d'étude. Les superficies des différentes catégories d'occupation du sol se présentent comme suit (tableau XVI) :

Tableau XVI : Catégories d'occupation du sol et leurs superficies en 2000

N°	Catégorie d'occupation du sol	Superficie (ha)	%
1	Forêts galeries	1393,92	0,56
2	Forêts denses	4167,54	01,68
3	Forêts claires et savanes boisées	42422,76	17,11
4	Savanes arborées et arbustives	91117,17	36,74
5	Savanes saxicoles	9442,8	03,81
6	Plantations	183,69	0,07
7	Mosaïque de culture et jachère	94702,68	38,19
8	Agglomération	4577,76	01,85
Total		248008,32	100,00

Source : Interprétation image Landsat ETM+ de 2000

De la lecture de la figure 34 et du tableau XVI, il ressort qu'en 2000 la superficie totale du couvert végétal était d'environ 148727,88 ha soit 59,96 % de la superficie totale du milieu. Les

mosaïques de cultures et jachères sont les catégories d'occupation du sol les plus importantes avec 94702,68 ha (38,19 %). Viennent ensuite successivement dans l'ordre croissant (en terme de superficie) les savanes arborées et arbustives avec 91117,17 ha (36,74 %), les forêts claires et savanes boisées avec 42422,76 ha (17,11 %), les savanes saxicoles (03,81 %), les agglomérations (01,85 %), les forêts denses (01,68 %), les forêts galeries (0,56 %), et les plantations (0,07 %).

3.2.1.3. Occupation du sol en 2016

A l'instar des autres années, en 2016, on note une nouvelle variation des surfaces des catégories d'occupation du sol (figure 35).

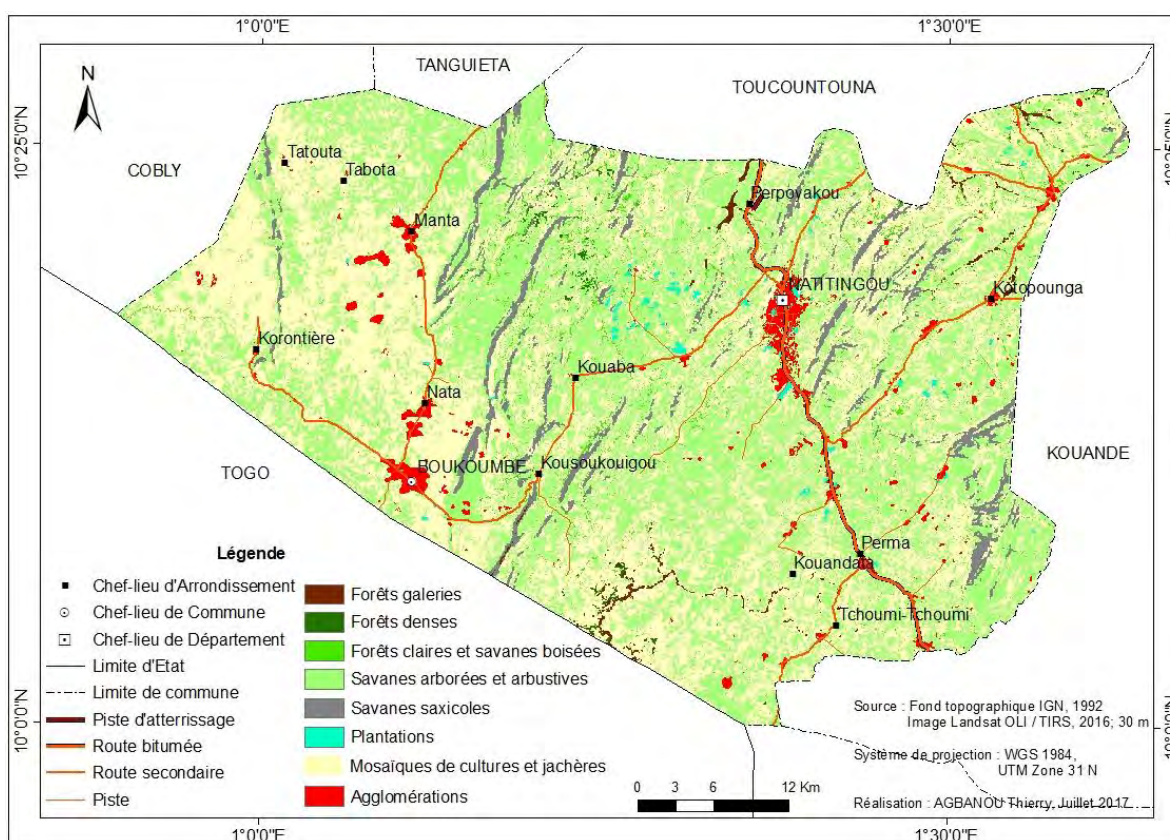


Figure 35 : Occupation du sol en 2016

Source : Image Landsat OLI TIR de 2016, résolution 30 m, Path 193 - Row 53

La figure 35 montre une densification des mosaïques de cultures et jachères dans la partie ouest du secteur d'étude et leur dispersion dans les autres parties du milieu. Les superficies des différentes catégories d'occupation du sol identifiées se présentent comme suit (tableau XVII) :

Tableau XVII : Catégories d'occupation du sol et leurs superficies en 2016

N°	Catégorie d'occupation du sol	Superficie (ha)	%
1	Forêts galeries	1268,19	0,51
2	Forêts denses	579,51	0,23
3	Forêts claires et savanes boisées	4114,58	01,66
4	Savanes arborées et arbustives	100514,88	40,53
5	Savanes saxicoles	9515,34	03,84
6	Plantations	1067,76	0,43
7	Mosaïques de cultures et jachères	125522,19	50,61
8	Agglomérations	5426,37	2,19
Total		248008,32	100,00

Source : Interprétation image Landsat OLI de 2016

Il ressort de l'analyse de la figure 35 et du tableau XVII que l'occupation du sol est largement dominée par les mosaïques de cultures et jachères qui couvrent 125522,19 ha (50,61 %). Viennent ensuite les savanes arborées et arbustives qui couvrent 100514,88 ha (40,53 %), les savanes saxicoles qui couvrent 9515,34 ha (03,84 %), les agglomérations qui couvrent 5426,36 ha (2,19 %). Les autres catégories d'occupation du sol occupent moins de 1 %. Le développement spectaculaire des mosaïques de cultures et jachères observées sur cette carte d'occupation du sol de 2016 peut s'expliquer par la croissance démographique observée ces dernières années dans le secteur d'études.

3.2.2. Cartographie de la dynamique de l'occupation du sol entre 1987 et 2000

Pour mieux apprécier la dynamique de l'occupation du sol, les cartes de changement d'état de toutes les catégories d'occupation du sol ont été réalisées sur les périodes 1987 - 2000. Ainsi les taux d'évolution de chaque catégorie d'occupation, les matrices de transition, le LUCC budget et le calcul de l'intensité et la vitesse de changement de chaque catégorie ont permis de mieux apprécier cette dynamique.

3.2.2.1. Détection des changements spatio-temporels entre 1987 et 2000

L'écart entre les superficies de chaque catégorie d'occupation du sol entre deux dates donne une indication globale du changement intervenu. Ainsi, entre 1987 et 2000 les superficies des catégories d'occupation du sol ont évolué (tableau XVIII).

Tableau XVIII : Evolution des superficies en ha entre 1987 et 2000

Catégorie	Superficie (ha) en 1987	Superficie (ha) en 2000	Taux évolution (%)	Taux moyen annuel d'expansion (%)
FG	2404,35	1393,92	- 42,03	-03,2
FD	7723,98	4167,54	- 46,04	-03,5
FCSB	96253,56	42422,76	- 55,93	-04,3
SAA	64047,51	91117,17	42,26	03,2
SS	14628,42	9442,8	- 35,45	-02,7
PT	47,88	183,69	283,65	21,8
MCJ	60346,26	94702,68	56,93	04,3
AGG	2556,36	4577,76	79,07	06,08
Total	248008,32	248008,32		

Source : Interprétation image Landsat TM de 1987 et ETM+ de 2000

Légende : FG : Forêt galerie ; FD : Forêt dense ; FCSB : Forêt claire et savane boisée ; SAA : Savanes arborée et arbustive ; SS : Savane saxicole ; PT : Plantation ; MCJ : Mosaïque de Champs et jachères ; AGG : Agglomération

Il ressort de l'examen du tableau XVIII que les plantations, les agglomérations, les mosaïques de cultures et jachères et les savanes arborées et arbustives ont connu une progression avec un taux d'expansion moyen annuel respectivement de 21,8 %, 06,08 %, 04,3 % et 03,2 %. Par contre les forêts claires et savanes boisées, les forêts denses sèches, les forêts galeries et les savanes saxicoles ont connu une régression avec un taux d'expansion moyen annuel respectivement de - 04,30 %, - 03,5 %, - 03,2 % et - 02,7 %.

3.2.2.2. Matrice de transition entre 1987 et 2000

La matrice des changements générée par le croisement des cartes d'occupation du sol de 1987 et 2000 du secteur d'étude montre les différents changements opérés au niveau de chaque catégorie d'occupation du sol (tableau XIX).

Tableau XIX : Matrice de transition entre 1987 et 2000 en ha

	FG	FD	FCSB	SAA	SS	PT	MCJ	AGG	Total 1987	Perte
FG	2271,78	0	0	0	0	2,07	130,5	0	2404,35	132,57
FD	0	4219,38	1332,36	714,24	0	0	1458	0	7723,98	3504,6
FCSB	0	0	22052,52	37183,32	0	35,64	36246,33	735,75	96253,56	74201,04
SAA	0	0	14171,31	36436,32	0	18,9	13343,58	77,4	64047,51	27611,19
SS	0	0	0	0	13200,39	06,21	1383,57	38,25	14628,12	1428,03
PT	0	0	0	0	0	47,61	0	0,27	47,88	0,27
MCJ	2,7	0	2961,54	13928,94	62,64	61,38	42010,47	1318,59	60346,26	18335,79
AGG	0	0	1,71	48,87	0,27	11,88	130,23	2363,4	2556,36	192,96
Total 2000	2274,48	4219,38	40519,44	88311,69	13263,3	183,69	94702,68	4533,66	248008,32	
Gain	0	0	18466,92	51875,37	62,91	136,08	52692,21	2170,26		

Source : Interprétation images Landsat TM de 1987 et ETM+ de 2000

Légende : FG : Forêt galerie ; FD : Forêt dense ; FCSB : Forêt claire et savane boisée ; SAA : Savanes arborée et arbustive ; SS : Savane saxicole ; PT : Plantation ; MCJ : Mosaïque de Champs et jachères ; AGG : Agglomération

L'analyse du tableau XIX permet de constater qu'entre 1987 et 2000 les zones de végétation naturelle se sont transformées en zones d'activité agricole ou en urbain. De façon globale, trois types de changement sont observé : la progression, la régression et la stabilité. Entre 1987 et 2000, 1332,36 ha de forêt dense se sont transformés en forêt claire et savane boisée, 714,24 ha en savane arborée et arbustive et 1458 ha en mosaïque de culture et jachère. Quant aux Forêt claire et savane boisée 37183,32 ha de sont transformés en savane arborée et arbustive et 36246,33 ha en mosaïque de culture et jachère, 35,64 ha en plantation et 735,75 ha en agglomération. 14171,31 ha de savane arborée et arbustive se sont transformés en forêts claire et savane boisée, 13343,58 ha en mosaïque de culture et jachère et 77,40 ha en agglomération. 1383,57 ha de savane saxicole se sont transformés en mosaïque de culture et jachère ; 38,25 ha en habitation et 06,21 ha en plantation. Les mosaïques de culture et jachère ont vu 13928,94 ha de leurs superficies se transformer en savane arborée et arbustive, 2961,54 ha en forêt claire et savane boisée, 1318,59 ha en agglomération et seulement 61,38 ha en plantation.

Les différents changements de catégories d'occupation de sol observés entre 1987 et 2000 ont été cartographiés (figure 36).

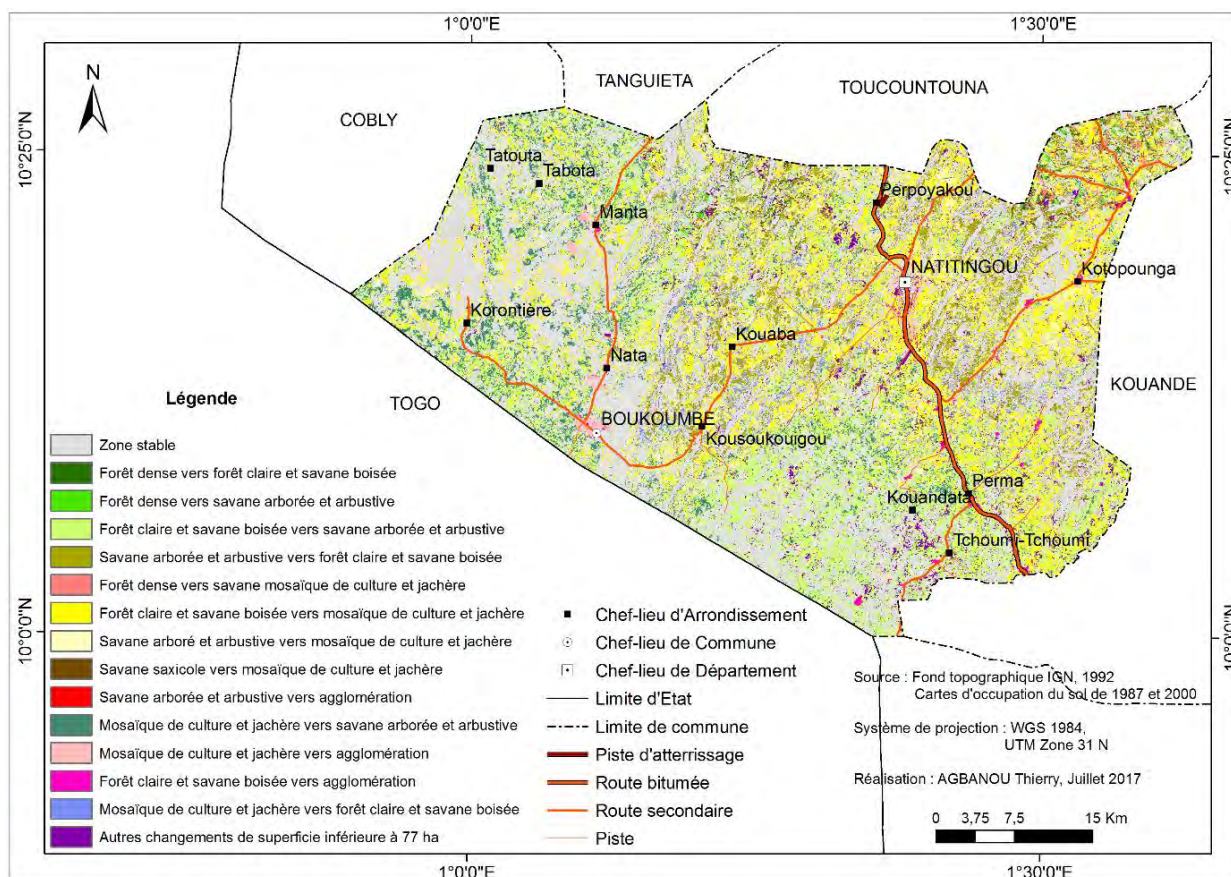


Figure 36 : Carte des changements d'occupation du sol entre 1987-2000

La figure 36 présente les différents changements d'état observés entre 1987 et 2000. Elle montre quatorze (14) grands types de transition (changements de catégories) majeurs. Au cours de cette période une grande partie du milieu est restée apparemment stable, environ 122601,87 ha (47 %). Tous les changements mineurs (superficie inférieure à 77 ha) d'occupation du sol sont groupés dans une catégorie 'autres changements'. Trois ordres de régression ont été identifiés dans les changements d'occupation du sol (tableau XX) contre deux ordres de progression seulement.

Tableau XX : Ordres de régression des changements d'occupation du sol (1987- 2000)

Ordre de régression	Type de changement	Superficie (ha)	Proportion (%)
1	Forêts denses vers forêts claires et savanes boisées	1332,36	0,53
	Forêts claires et savanes boisées vers savanes arborées et arbustives	37183,32	15
	Savanes arborées et arbustives vers mosaïques de cultures et jachères	13343,58	05,38
	Savanes saxicoles vers mosaïques de cultures et jachères	1383,57	0,55
	Savanes arborées et arbustives vers agglomérations	77,4	0,01
	Mosaïques de cultures et jachères vers agglomérations	1318,59	0,53
Sous-total 1		54638,82	22,03
2	Forêts denses vers savanes arborées et arbustives	714,24	0,28
	Forêts claires et savanes boisées vers mosaïques de cultures et jachères	36246,33	14,61
	Forêts claires et savanes boisées vers agglomérations	735,75	0,3
Sous-total 2		37696,32	15,19
3	Forêts denses vers mosaïques de cultures et jachères	1458	0,58
Sous-total 3		1458	0,58
Total		93793,14	37,81

Source : Interprétation images Landsat TM de 1987 et ETM+ de 2000

Il ressort du tableau XX que 54638,82 ha (22,03 %) de ce milieu ont connu une régression d'ordre 1. Ensuite 37696,32 ha (15,19 %) ont connu une régression d'ordre 2 et 1458 ha (0,58 %) une régression d'ordre 3. Ces régressions sont essentiellement liées au passage du couvert végétal dense ou naturel vers le couvert végétal moins dense ou anthropique. Ces différents ordres de régression témoignent de l'agressivité que connaît ce milieu de la part de l'homme. La progression d'ordre un (1) est la transformation de 14171,31 ha (5,71 %) de savanes arborées et arbustives en forêts claires et savanes boisées et la transformation de 13928,94 ha (05,61 %) de mosaïques de cultures et jachères en savanes arborées et arbustives. Quant à la progression d'ordre deux (2), elle n'est rien d'autre que la transformation de 2961,54 ha (1,2 %) de mosaïques de cultures et jachères en forêts claires et savanes boisées. Cette progression traduit la reconstitution timide du couvert végétal de ce milieu malgré les activités anthropiques accrues.

Ces différentes transitions observées ont été synthétisées sous forme cartographique (figure 37) pour faciliter la lecture et l'analyse.

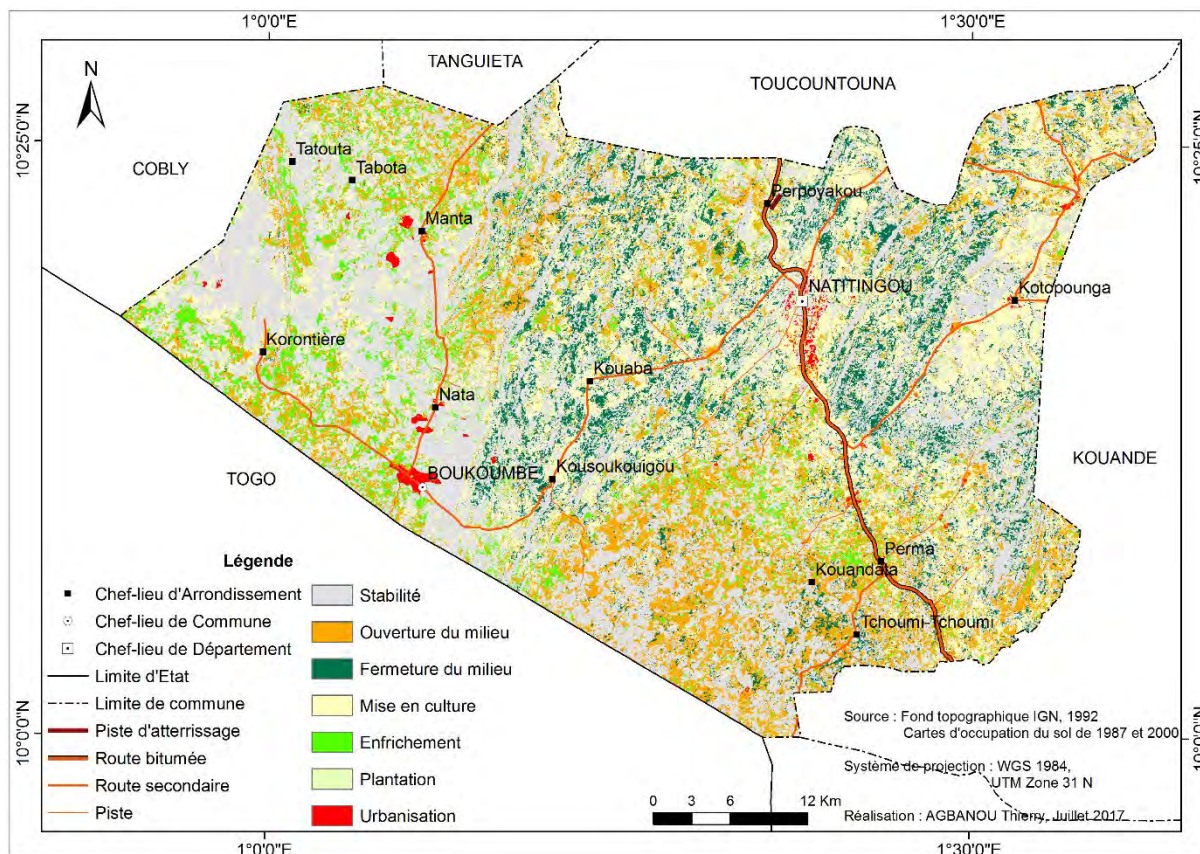


Figure 37 : Carte des changements d'occupation du sol entre 1987-2000

Les statistiques issues de cette figure 38 ont permis de présenter les proportions de chaque type de changement entre 1987 et 2000 (figure 38).

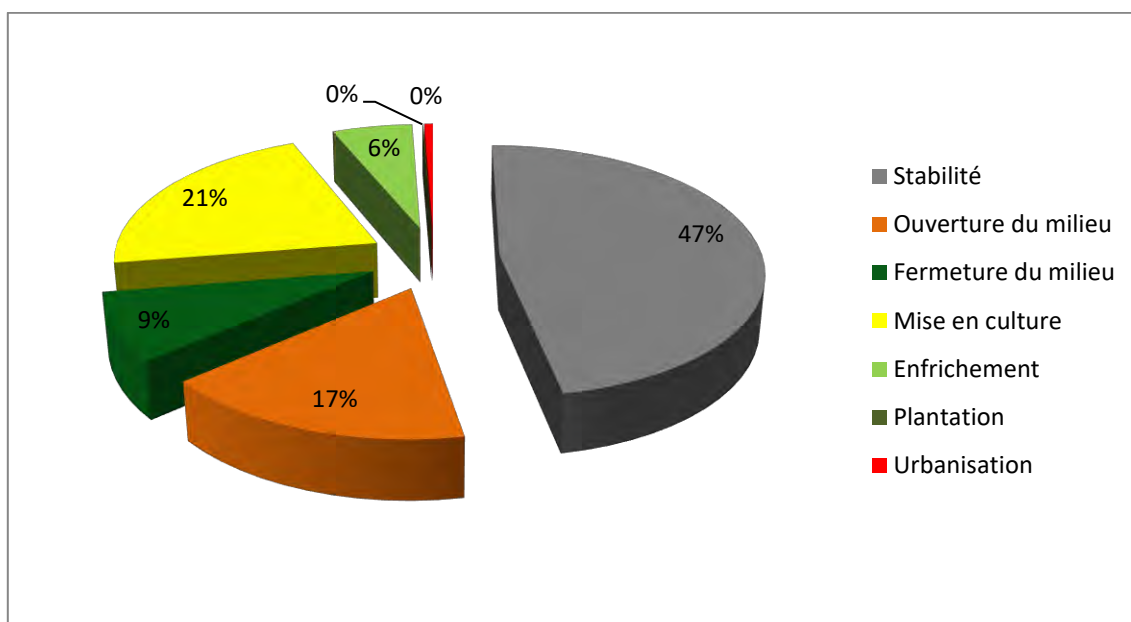


Figure 38 : Statistiques des grandes tendances d'évolution entre 1987 et 2000

De l'observation de la figure 38, il ressort que 47 % (122601,87 ha) de la superficie de ce milieu est resté stable entre 1987 et 2000. Par contre, 21565 ha, soit 8,69 % de la végétation de ce

milieu se sont reconstituées. De même 13991,58 ha, soit 5,64 % de terres sont passées du stade de champs et jachères vers une reconstitution légère du couvert végétal. 52692,21 ha, soit 21,24 % de la superficie de ce milieu sont passés de milieux fortement végétalisés vers un stade de végétation dégradée. 1478,61 ha, soit 0,60 % du milieu sont devenus des agglomérations et 136,08 ha, soit 0,05 % de ce milieu sont devenus des plantations.

3.2.2.3. LUCC budget et intensité de changements (perte, gain, changement net)

Le bilan quantitatif effectué au niveau des changements observés entre 1987 et 2000 montre d'importantes pertes de superficie du couvert végétal au profit des autres catégories d'occupation du sol (Tableau XXI).

Tableau XXI : Pertes et gains (1987 – 2000)

Catégorie	Gain	Perte	Total Change	Swap	Absolute value of net change
FG	0	95,49	95,49	0	95,49
FD	0	1,17	1,17	0	1,17
FCSB	73564,38	20533,95	94098,33	41067,9	53030,43
SAA	30081,6	57192,57	87274,17	60163,2	27110,97
SS	1421,82	533,25	1955,07	1066,5	888,57
PT	100	36,08	136,08	72,16	63,92
MCJ	23809,4	52830,46	76639,86	47618,8	29021,06
AGG	2331	85,23	2416,23	170,46	2245,77

Source : Interprétation images Landsat TM de 1987 et ETM+ de 2000

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

Il ressort du LUCC budget (1987-2000) que les formations végétales naturelles comme les savanes arborées et arbustives, les forêts denses, forêts claires et savanes boisées ont perdu des superficies au profit des mosaïques de cultures et jachères, des plantations et des agglomérations. On observe en outre, que pertes et gains des savanes arborées et arbustives s'équilibrent. Bien qu'elle ait gagné 27110,9 ha, l'essentiel de la dynamique spatio-temporelle (60163,2 ha) consiste en un changement de localisation des savanes arborées et arbustives. Ce qu'elles ont perdu à un endroit, elles l'ont gagné ailleurs. Il en va de même pour les mosaïques de cultures et de jachères. Au-delà d'une extension de 29021,06 ha, on remarque aussi une relocalisation importante (52830,46 ha). Au niveau des forêts claires et savanes boisées, elles perdent 20533,95 ha et gagnent en retour 73564,38 ha, des changements de localisation estimées à 53030,43 ha.

Les statistiques du tableau XXI ci-dessus ont permis de calculer l'intensité de changement des catégories d'occupation du sol entre 1987 et 2000 présenté dans la figure 39.

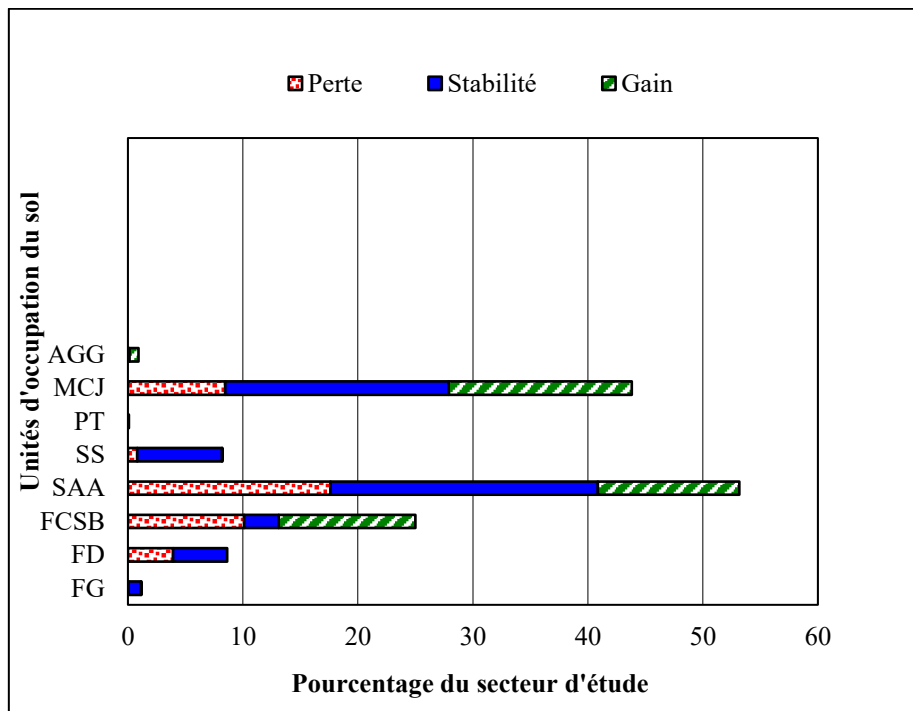


Figure 39 : Intensité des changements d'occupation du sol entre 1987 et 2000

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

L'examen du tableau XXI et de la figure 39 révèle que les catégories d'occupation du sol n'ont pas évolué de la même façon. Chaque catégorie a connu une perte, un gain et une zone de persistance ou de stabilité apparente. 40,87 % (96137,73 ha) des savanes arborées et arbustives ont connu d'importants changements, c'est-à-dire 17,62 % (43235,73 ha) de perte contre 12,30 % (52902 ha) de gain. La zone de stabilité est de 23,25 % (36436,32 ha). Les mosaïques de cultures et jachères ont également connu d'importants changements, c'est-à-dire 24,39 % (104126,22 ha) dont 08,47 % (36608,22 ha) de perte contre 15,92 % (67518 ha) de gain. La zone apparemment stable est de 42010,47 ha, soit 19,41 %.

Suivent ensuite les forêts claires et savanes boisées avec 10,10 % (39430,17 ha) de perte, 11,90 % (1646,55 ha) de gain et 03 % (22052,52 ha) de stabilité. Quant aux forêts denses elles ont connu 03,92 % (4154,85 ha) de perte et 04,72 % (4219,38 ha) de stabilité. Toutes les autres catégories d'occupation du sol ont connu des dynamiques pas très importantes. Toutefois, les galeries forestières et les forêts denses n'ont pas connu de gain, mais uniquement que de perte et de stabilité. Ces formations se sont dégradées au profit des autres. Les pertes (très mineures

constatées au niveau des agglomérations peuvent s'expliquer par la présence dans ce milieu des peulh qui sont par nature des nomades.

3.2.2.4. Intensités et vitesses des changements d'occupation du sol entre 1987 et 2000

L'intensité et la vitesse de chaque catégorie d'occupation du sol varient que ce soit en termes de gain qu'en termes de perte de superficie (figure 40).

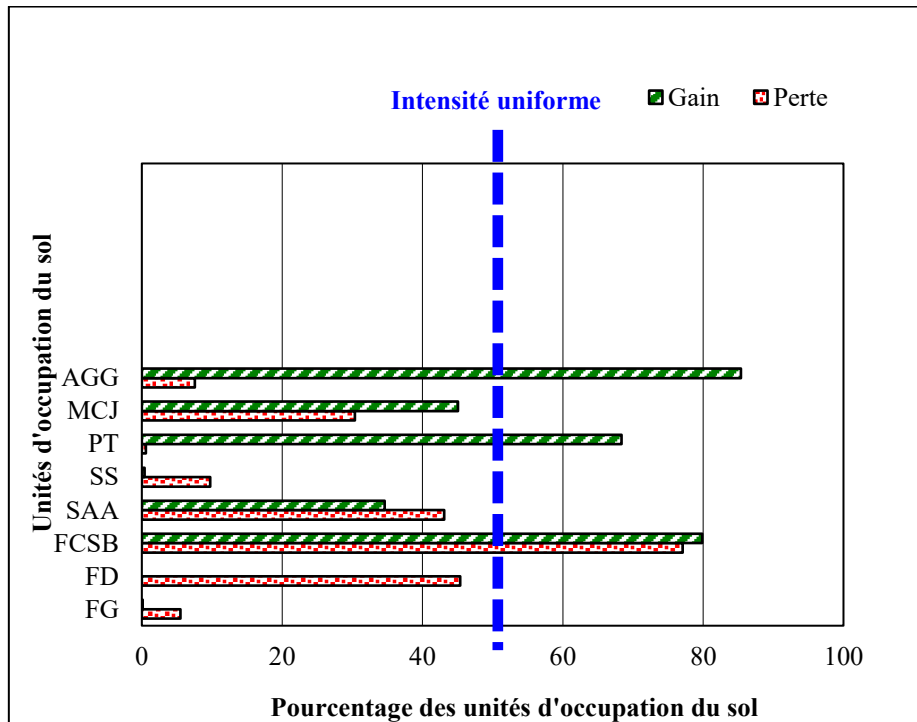


Figure 40 : Intensités et vitesses des changements d'occupation du sol entre 1987 et 2000

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

Cette figure 40 confirme que toutes les catégories d'occupation du sol ont connu des changements sous forme de pertes et de gains. La ligne verticale bleue, représentée en tireté, est le seuil où les changements restent uniformes si les perturbations anthropiques s'arrêtent dans le milieu d'étude. Ce seuil ici est de 50,57 %. Tous les changements qui apparaissent à gauche de cette ligne sont qualifiés de dormants ou lents tandis que ceux qui se retrouvent à droite de la ligne droite sont qualifiés de changements actifs ou rapides.

Ainsi, toutes les catégories d'occupation du sol à l'exception des forêts claires et savanes boisées ont une vitesse de perte lentes (inférieure à 50,57 %). Quant aux gains, les forêts claires et savanes boisées, les agglomérations et les plantations ont une vitesse très rapide (supérieure

à 50,57 %). Les forêts galeries et savanes saxicoles ont une vitesse de perte et de gain très lente. Cette dynamique observée traduit la forte anthropisation de ce milieu.

3.2.3. Cartographie de la dynamique de l'occupation du sol entre 2000 et 2016

La dynamique de l'occupation du sol 2000 et 2016 a été appréciée par analyse diachronique. Ainsi les taux d'évolution de chaque catégorie d'occupation, les matrices de transition, le LUCC budget, l'intensité et la vitesse de changement de chaque catégorie ont été calculées.

3.2.3.1. Détection des changements spatio-temporels entre 2000 et 2016

Entre 2000 et 2016 les superficies des catégories d'occupation du sol ont évolué. Elles ont régressé pour certaines et augmenté pour d'autres (tableau XXII). Ceci traduit la dynamique qu'a connu ce milieu entre ces deux dates.

Tableau XXII : Evolution des superficies en ha entre 2000 et 2016

Catégorie	Superficie (ha) en 2000	Superficie (ha) en 2016	Taux évolution (%)	Taux moyen annuel d'expansion (%)
FG	1393,92	1268,19	- 09,02	- 0,5
FD	4167,54	579,51	- 86,09	-5,3
FCSB	42422,76	4114,58	- 90,30	-05,6
SAA	91117,17	100514,88	10,31	0,1
SS	9442,8	9515,34	0,77	0,05
PT	183,69	1067,76	481,28	30
MCJ	94702,68	125522,19	32,54	02
AGG	4577,76	5426,37	18,54	01,1
Total	248008,32	248008,32		

Source : Interprétation image Landsat ETM+ de 2000 et OLI TIRS 2016

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

Il ressort de la lecture de ce tableau XXII que la superficie des plantations, des mosaïques de cultures et jachères, des agglomérations et des savanes arborées et arbustives a beaucoup augmenté entre ces deux dates avec respectivement un taux d'évolution de 481,21 %, 32,54 %, 18,54 et 10,31 % et un taux annuel d'expansion respectif de 30 %, 02 %, 01,1 % et 0,1 %. Alors que les forêts claires et savanes boisées, les forêts denses et forêts galeries ont vu leurs superficies régressées avec un taux d'évolution respectif de - 90, 30 %, - 86,09 % et - 09,02 % et un taux moyen annuel d'expansion respectivement de - 05,6 %, - 05,3 % et - 0,5 %. Les savanes saxicoles entre ces deux périodes sont restées relativement stable.

La superposition des cartes de 2000 et de 2016 a permis d'obtenir une matrice de transition, de calculer le LUCC budget et d'établir une carte des changements de catégories d'occupation du sol.

3.2.3.2. Matrice de transition entre 2000 et 2016

La superposition des cartes d'occupation du sol de 2000 et de 2016 a permis d'obtenir la matrice de transition (tableau XXIII). La matrice des changements générée montre les différents changements opérés au niveau de chaque catégorie d'occupation du sol.

Tableau XXIII : Matrice de transition entre 2000 et 2016 en ha

	FG	FD	FCSB	SAA	SS	PT	MCJ	AGG	Total 2000	Perte
FG	1270,17	0	0	0	0	0	123,75	0	1393,92	123,75
FD	0	12,69	92,25	1277,73	0	0	2784,6	0,27	4167,54	4154,85
FCSB	0	0	2992,59	17364,6	0	314,82	21711,69	39,06	42422,76	39430,17
SAA	0	0	668,07	47881,44	0	77,22	42387,03	103,41	91117,17	43235,73
SS	0	0	0	0	9057,42	0,27	383,04	02,07	9442,8	385,38
PT	0	0	0	0	0	178,92	01,44	03,33	183,69	04,77
MCJ	0	0	886,23	34177,77	140,4	482,4	58094,46	921,42	94702,68	36608,22
AGG	0	0	0	81,9	0	10,98	126,45	4358,43	4577,76	219,33
Total 2016	1270,17	12,69	4639,14	100783,44	9197,82	1064,61	125612,46	5427,99	248008,32	
Gain	0,00	0,00	1646,55	52902	140,4	885,69	67518	1069,56		

Source : Interprétation images Landsat ETM+ de 2000 et OLI TIRS 2016

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

Il ressort de l'analyse du tableau XXIII qu'entre 2000 et 2016, plus de 92,25 ha de forêts denses se sont transformés en forêts claires et savanes boisées, 1277,73 ha en savanes arborées et arbustives et 2784,6 ha en mosaïques de cultures et jachères. Quant aux Forêts claires et savanes boisées 17364,6 ha se sont transformés en savanes arborées et arbustives et 21711,69 ha en mosaïques de cultures et jachères, 314,82 ha en plantations et 39,06 ha en agglomérations. 668,07 ha de savanes arborées et arbustives se sont transformés en forêts claires et savanes boisées, 42387,03 ha en mosaïques de cultures et jachères et 103,41 ha en agglomérations. En ce qui concerne les savanes saxicoles, 383,04 se sont transformés en mosaïques de cultures et jachères et 02,07 ha en habitation. 34177,77 ha de mosaïques de cultures et jachères se sont transformés en savanes arborées et arbustives, 921,42 ha en agglomérations, 886,23 ha en forêts claires et savanes boisées et 482,4 ha en plantations.

On peut retenir que les mosaïques de cultures et jachères et les savanes arborés et arbustives sont les catégories d'occupation du sol les plus importantes en 2016. Pour la mise en place des

mosaïques de cultures et jachères en 2016, en plus de la persistance de 46,24 % (58094,46 ha), les savanes arborés et arbustives y ont contribué à 33,74 % (42387 ha) et les forêts claires et savanes boisées à 17,28 % (21711,69 ha). Quant aux savanes arborées et arbustives, en plus de la persistance de 46,24 % (58094,46 ha), 33,91 % (34177,77 ha) de mosaïques de cultures et jachères et 17,22 % (17364,6 ha) de forêts claires et savanes boisées ont contribué à sa mise en place en 2016. La tendance d'évolution est donc à la régression (dégradation) du couvert végétal.

La figure 41 résume les différents changements observés entre 2000 et 2016.

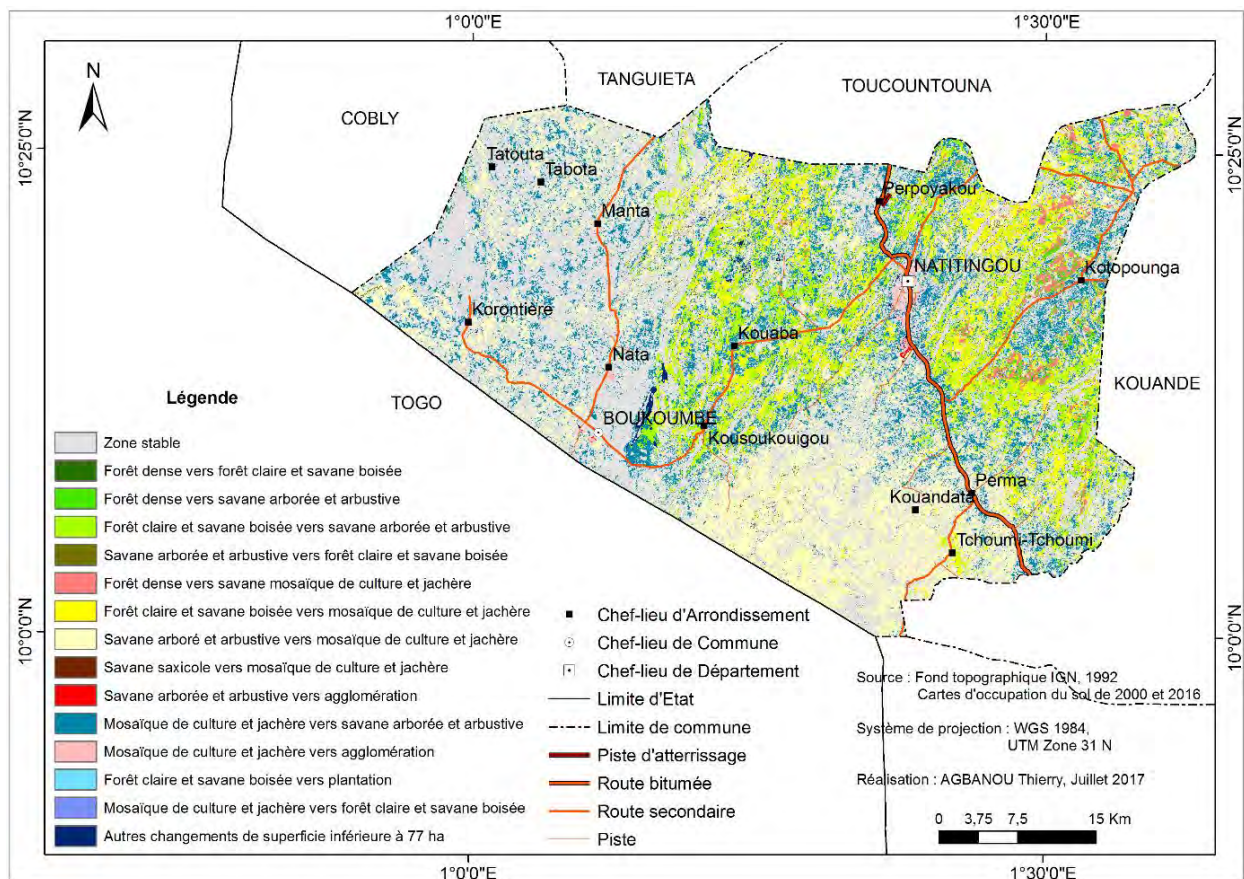


Figure 41 : Carte des changements d'occupation du sol entre 2000 et 2016

A l'instar de la période 1987 – 2000, la carte d'évolution de la période 2000-2016 révèle seize (16) grandes transitions et une zone stable de 131161,05 ha (52,82 %). Les différentes transitions sont les régressions et progressions. Trois ordres de régression ont été identifiés dans ces changements (tableau XXIV) et deux ordres de progression.

Tableau XXIV : Ordres de régression des changements d'occupation du sol (2000- 2016)

Ordre de régression	Type de changement	Superficie (ha)	Proportion (%)
1	Forêts denses vers forêt claires et savanes boisées	92,25	0,03
	Forêts claires et savanes boisées vers savanes arborées et arbustives	17364,6	07
	Savanes arborées et arbustives vers mosaïques de cultures et jachères	42387,03	17,09
	Savanes saxicoles vers mosaïques de cultures et jachères	383,04	0,15
	Savanes arborées et arbustives vers agglomérations	103,41	0,04
	Mosaïques de cultures et jachères vers agglomérations	921,42	0,37
	Sous-total 1		61251,75
2	Forêts denses vers savanes arborées et arbustives	1277,73	0,51
	Forêts claires et savanes boisées vers mosaïques de cultures et jachères	21711,69	08,75
	Forêts claires et savanes boisées vers plantations	314,82	0,12
	Sous-total 2		23304,24
3	Forêts denses vers mosaïques de cultures et jachères	2784,6	01,12
	Sous-total 3		2784,6
Total		87340,59	35,21

Source : Interprétation images Landsat ETM+ de 2000 et OLI-TIRS de 2016

En ce qui concerne le contenu de ce tableau XXIV, il ressort que 70891,74 ha (28,58 %) de ce milieu ont connu une régression d'ordre 1, ensuite 27040,41 ha (10,90 %) une régression d'ordre 2 et seulement 56,52 ha (0,02 %) une régression d'ordre 3.

Deux ordres de progression sont identifiés. L'ordre de progression 1 observée concerne 35328,24 ha (14,24 %) dont 668,07 ha (0,26 %) de savanes arborées et arbustives transformées en forêts claires et savanes boisées, 34177,77 ha (13,78 %) de mosaïques de cultures et jachères transformées en savanes arborées et arbustives et 482,4 ha (0,20 %) en plantations. L'ordre de progression 2 concerne 886,23 ha (0,35 %) de mosaïques de cultures et jachères transformés en forêts claires et savanes boisées.

Ces résultats montrent que les formations végétales de ce milieu connaissent une grande agressivité parce qu'elles disparaissent au profit des formations anthropiques. Ceci est dû à l'ampleur du développement des activités telles que l'agriculture itinérante sur brûlis et l'exploitation du bois (bois d'œuvre, et bois énergie) destructrices de l'environnement.

La synthèse des différentes transitions observées est présentée sur la figure 42.

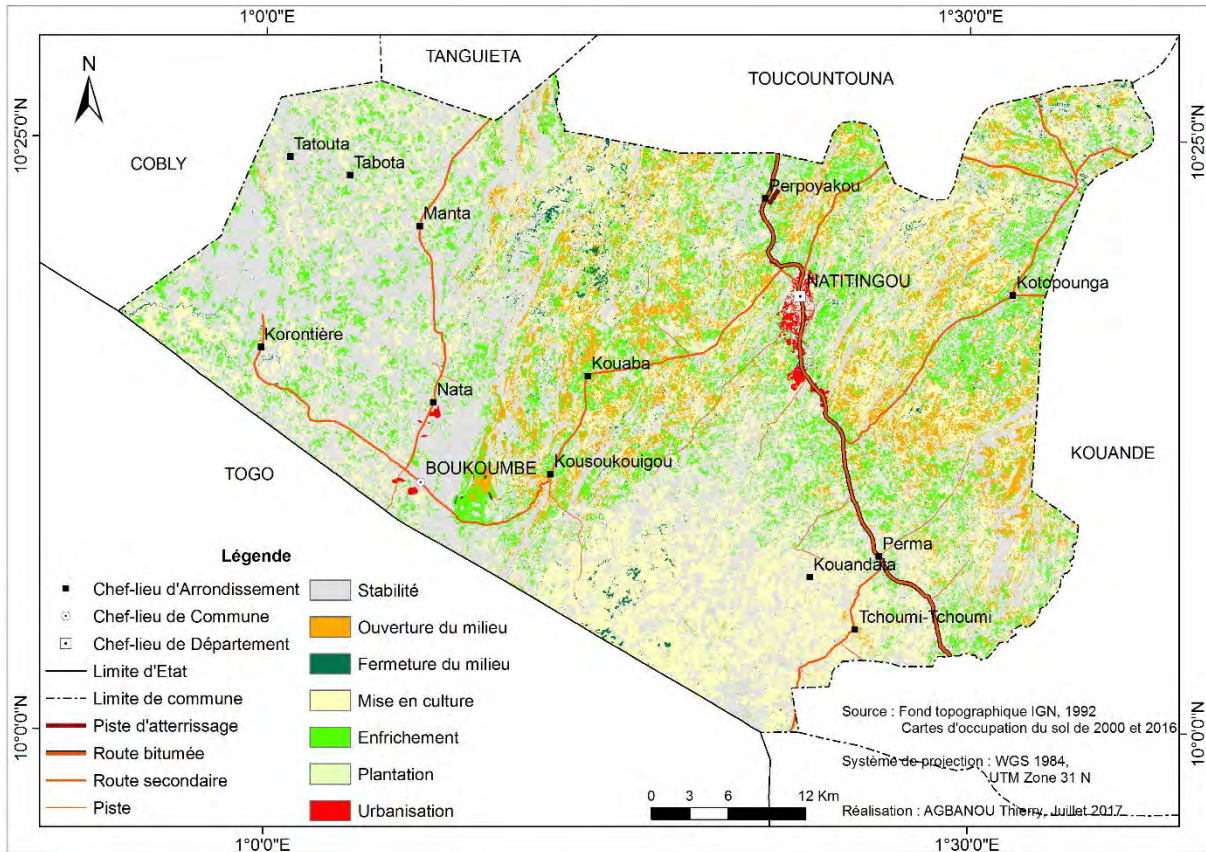


Figure 42 : Carte des changements d'occupation du sol 2000-2016

Les statistiques extraites de cette figure 42 ont permis de réaliser la figure 43 ci-dessous.

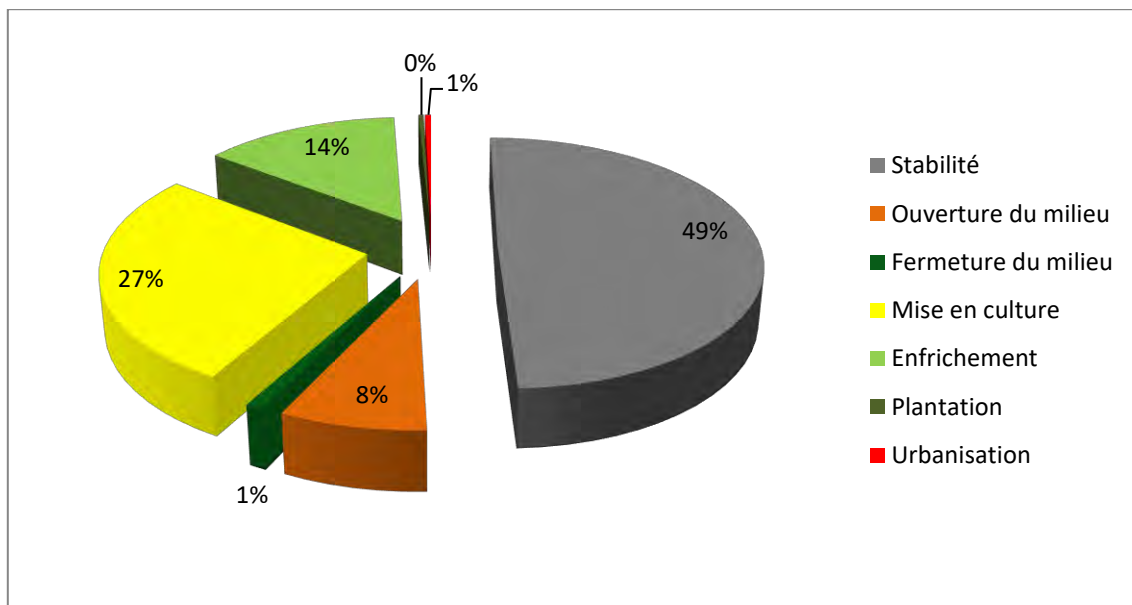


Figure 43 : Statistiques des grandes tendances d'évolution entre 2000 et 2016

L'examen de la figure 43 révèle qu'environ 49,42 % (122573,34 ha) de la superficie de ce milieu est restée relativement stable entre 2000 et 2016. Près de 34,97 % (86763,06 ha) dont

7,76 % (19259,82 ha) de milieu ouvert et 27,21 % (67503,24 ha) de mise en culture sont des territoires qui ont connu une dégradation du couvert végétal. Par contre 15,16 % (37602,27 ha) dont 13,83 % (34318,17 ha) d'enfrichement, 0,96 % (2393,73 ha) de milieu fermé et 0,35 % (890,37 ha) de plantation sont des milieux qui ont favorisé la reconstitution du couvert végétal. La zone de changement en milieu urbain fait 0,43 % (1069,65 ha).

3.2.3.3. LUCC budget et intensité de changements (perte, gain, changement net)

De façon globale le LUCC budget établi montre pour les périodes 2000 et 2016 montre trois types de changements : les pertes, les gains et comment gains et pertes s'équilibrent ou non (swap ou solde) (Tableau XXV).

Tableau XXV : Pertes et gains en ha

Catégorie	Gain	Perte	Total Change	Swap	Absolute value of net change
FG	0	123,75	123,75	0	123,75
FD	0	4154,85	4154,85	0	4154,85
FCSB	1646,55	39430,17	41076,72	3293,1	37783,62
SAA	52902	43235,73	96137,73	86471,46	9666,27
SS	140,4	385,38	525,78	280,8	244,98
PT	885,69	04,77	890,46	09,54	880,92
MCJ	67518	36608,22	104126,22	73216,44	30909,78
AGG	1069,56	219,33	1288,89	438,66	850,23

Source : Interprétation images Landsat ETM+ de 2000 et OLI TIRS 2016

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

Il ressort du LUCC budget (2000-2016) que les formations végétales naturelles comme les savanes arborées et arbustives, les forêts denses, les forêts claires et les savanes boisées et les savanes saxicole ont perdu des superficies au profit des milieux fortement anthropisés.

A l'instar de ce qui a été observé pour la période 1987 – 2000, les catégories dont le swap est le plus élevé sont les savanes arborées de arbustives et les mosaïques de cultures et de jachères. On observe ici aussi que pertes et gains des savanes arborées et arbustives s'équilibrent pour l'essentiel. Bien qu'elle a gagné 9666,27 ha, l'essentiel de la dynamique spatio-temporelle (86471,46 ha) consiste en un changement de localisation des savanes arborées et arbustives. Ce qu'elles ont perdu à un endroit, elles l'ont gagné ailleurs. Les mosaïques de cultures et jachères ont connu à part l'extension de 30909,78 ha, une relocalisation importante (36608,22 ha, cf.

fig. 43). Au niveau des forêts claires et savanes boisées, elles perdent 39430,17 ha et gagne en retour 1646,55 ha, des changements de localisation estimées à 37783,62 ha.

La figure 44 montre l'intensité de chaque catégorie d'occupation du sol entre 2000 et 2016.

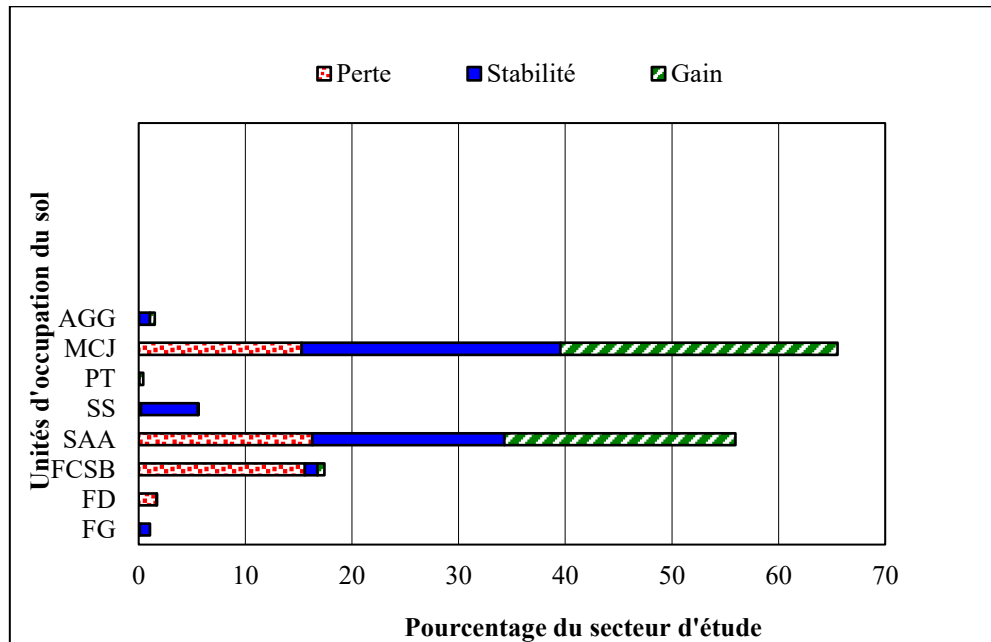


Figure 44 : Intensité des changements d'occupation du sol entre 2000 et 2016

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

De l'analyse de la figure 44, il ressort que seules les mosaïques de cultures et champs, les savanes arborées et arbustives et les forêts claires et savanes boisées ont connu un changement significatif. On observe ainsi pour les mosaïques de cultures et jachères des changements sur 65,53 % (162220,68 ha) dont seulement 15,28 % (36608,22 ha) de perte contre 26 % (67518 ha) de gain et 24,25 % (58094,46 ha) de stabilité. Pour les savanes arborées et arbustives sur les 55,95 % (144019,17 ha) de changement, on observe 16,27 % (43235,73 ha) de perte, 21,66 % (52902 ha) de gain et 18,02 % (47881,44 ha) de stabilité. Les forêts claires et savanes boisées ont connu 17,41 % (44069,31 ha) de changement, soit 15,57 % (39430,17 ha) de perte, 0,66 % (1646,55 ha) de gain et 01,18 % (2992,59 ha) de stabilité. Les agglomérations et les plantations ont connu respectivement des changements de 1,51 % (56473,3 ha) et 0,42 % (1069,38 ha) dont essentiellement des gains et stabilités. Quant aux forêts denses et forêts galeries, elles ont eu des changements sur respectivement 1,68 % (4167,54 ha) et 1,06 % (1393,92 ha) dont essentiellement des pertes et stabilités. Ces deux dernières catégories n'ont rien gagné en terme de superficie au cours de cette période (2000 à 2016).

3.2.3.4. Intensités et vitesses des changements d'occupation du sol entre 2000 et 2016

A partir de la matrice de transition la vitesse d'évolution de chaque catégorie d'occupation a été calculée grâce au programme "PontiusMatrix22" (figure 45).

L'état de rapidité des changements est déterminé grâce à la ligne verticale bleue en tireté appelée ligne de zone uniforme. Si le graphe est à gauche de cette ligne, le changement est lent ou dormant. Si celui-ci est à droite de cette ligne, le changement est dit rapide ou actif.

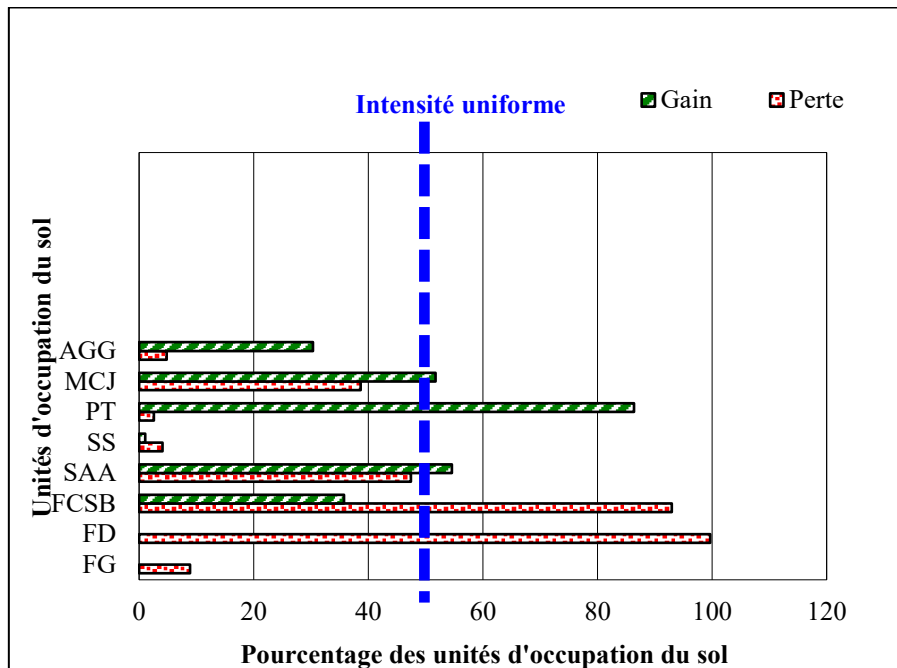


Figure 45 : Intensités et vitesses des changements d'occupation du sol entre 2000 et 2016

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

La figure 45 permet de constater que seules les plantations et savanes arborées et arbustives ont une vitesse rapide (supérieure à 50,06 %, l'intensité uniforme) en terme de gain. Concernant les pertes, les forêts denses et les forêts claires et savanes boisées ont une vitesse très rapide (supérieure à 50,06 %). On peut conclure que les forêts denses, les forêts claires et savanes boisées et les mosaïques de cultures et jachères se dégradent à une vitesse très grande.

3.2.4. Bilan de l'évolution de l'occupation du sol (1987 – 2016)

3.2.4.1. Variation des superficies des catégories d'occupation du sol

De façon globale on note de 1987 à 2016, une régression considérable des formations végétales et une augmentation des superficies des formations anthropisées. Entre 1987 et 2000, les transformations ont été plus nombreuses et profondes qu'entre 2000 et 2016. Ces changements se font de façon différentielle au niveau de chaque catégorie d'occupation du sol (figure 46).

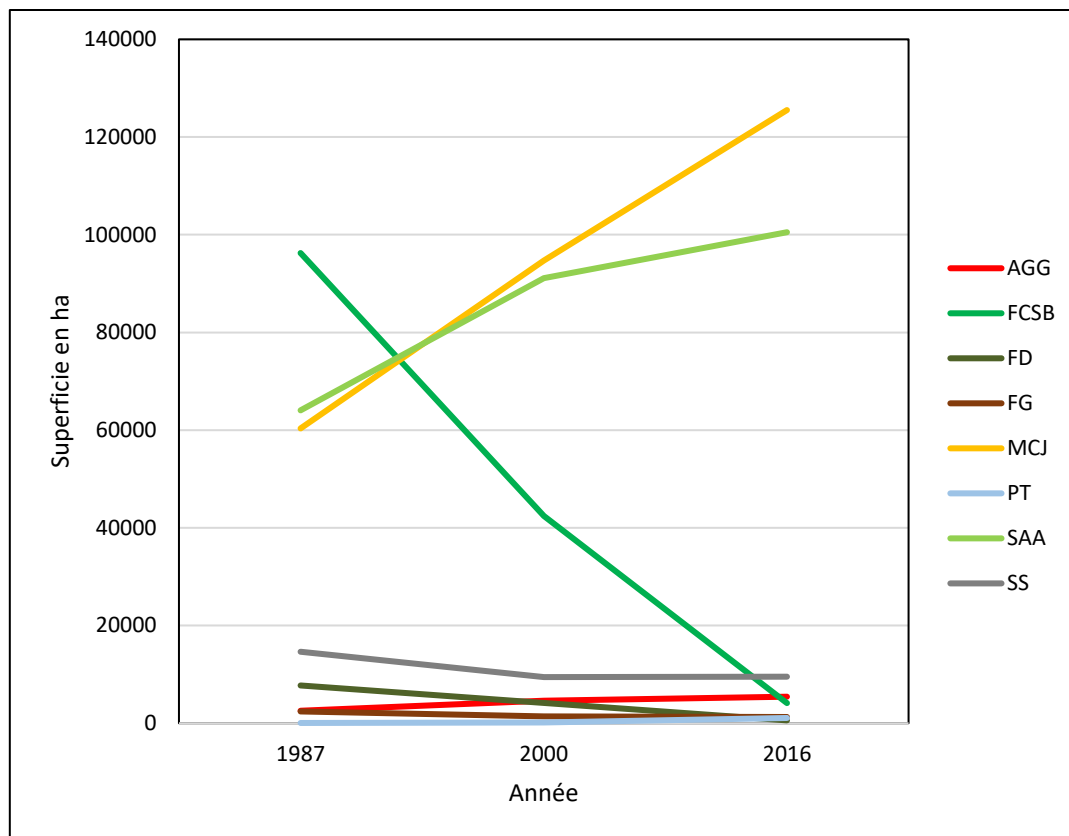


Figure 46 : Evolution des catégories d’occupation du sol entre 1987 et 2016

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCH : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

La figure 46 montre la tendance générale d’évolution des catégories d’occupation du sol entre 1987 et 2016. De l’observation de cette figure, il ressort que les mosaïques de cultures et jachères sont les seules catégories qui ont augmenté de superficie de façon considérable et régulière. Entre 1987 et 2000, elles ont gagné 34356,42 ha et 30819,51 ha entre 2000 et 2016. Ces superficies gagnées sont issues de toutes les autres catégories d’occupation du sol. Il en est de même pour les agglomérations qui ont gagné une superficie totale de 870,01 ha entre 1987 et 2000, les plantations qui ont augmenté de 1019,88 ha au cours de la même période.

3.2.4.2. Variation du taux moyen annuel d’expansion de 1987 à 2016

Le calcul des taux annuels d’expansion des catégories d’occupation du sol au cours des périodes 1987 – 2000 et 2000 – 2016 a permis d’analyser et de rechercher les raisons de la variation de ces taux d’une période à une autre. Le tableau XXVI présente ces taux par catégories d’occupation du sol et par période.

Tableau XXVI : Evolution des taux d'expansion des catégories d'occupation du sol pour les périodes 1987 – 2000 et 2000 – 2016

Catégorie	Superficie (ha) en 1987	Superficie (ha) en 2000	Superficie (ha) en 2016	Taux (%) évolution 1987 - 2000	Taux (%) évolution 2000 - 2016	Taux (%) annuel d'expansion 1987 - 2000	Taux (%) annuel d'expansion 2000 - 2016
FG	2404,35	1393,92	1268,19	- 42,03	- 09,02	- 4,19	- 0,59
FD	7723,98	4167,54	579,51	- 46,04	- 86,09	- 4,75	- 12,33
FCSB	96253,56	42422,76	4114,58	- 55,93	- 90,30	- 6,30	- 14,58
SAA	64047,51	91117,17	100514,88	42,26	10,31	2,71	0,61
SS	14628,42	9442,8	9515,34	- 35,45	0,77	- 3,37	0,05
PT	47,88	183,69	1067,76	283,65	481,28	10,24	11,00
MCJ	60346,26	94702,68	125522,19	56,93	32,54	3,47	1,76
AGG	2556,36	4577,76	5426,37	79,07	18,54	4,48	1,06
Total	248008,32	248008,32	248008,32				

Source : Interprétation images Landsat ETM (1987), ETM+ (2000), OLI TIRS (2016)

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

L'examen du tableau XXVI permet de constater pour les forêts denses et forêts claires et savanes boisées qui ont connu une régression au cours des deux périodes, le taux de régression annuelle est moins élevé au cours de la période 2000 – 2016 qu'au cours de la période 1987 – 2000. Ainsi, ces formations végétales ont régressé annuellement respectivement de – 04,75 % et – 06,30 % au cours de la période 1987 – 2000 et de – 12,33 % et – 14,58 % au cours de la période 2000 – 2016. Quant aux forêts galeries et savanes saxicoles le taux de régression annuel est moins important au cours de la période 1987 – 2000 qu'au cours de la période 2000 – 2016. Les mosaïques de cultures et jachères et les agglomérations ont connu un taux d'évolution annuel moins important au cours de la période 2000 – 2016 (respectivement de 01,76 % et 01,06 %) qu'au cours de la période 1987 – 2000 (respectivement de 03,47 % et 04,48 %).

Globalement seules les plantations ont connu une progression linéaire de 1987 à 2016 avec un taux d'expansion annuel de 10,24 % en 1987 – 2000 et de 11 % en 2000 – 2016. Les forêts denses et forêts claires et savanes boisées ont connu une régression plus prononcée au cours de la période 2000 – 2016 qu'au cours de la période 1987 – 2000. Quant aux mosaïques de cultures et jachères et les agglomérations, ils ont connu une progression plus importante au cours de la période 2000 – 2016 qu'au cours de la période 1987 – 2000.

En conclusion de 1987 à 2016, les formations végétales naturelles (forêts denses, forêts claires et savanes boisées) ont régressé au profit des formations anthropiques (champs, agglomérations, plantations).

Conclusion partielle

Il ressort de cette étape importante d'utilisation croisée des images Modis et Landsat que le couvert végétal de ce milieu se dégrade au fil des années entre 2000 et 2016. Les images Modis ont permis de constater que les cartes d'occupation du sol de 2000 et 2016 et la carte de changement comportent quelques lacunes. Ces lacunes détectées et corrigées peuvent être liées à la faible résolution temporelle des images Landsat, à la faible résolution spatiale des images Modis utilisées et aussi à la complexité du milieu. Mais ces limites ne sont pas de nature à entacher la suite du processus.

Le secteur d'étude a connu une mutation spatiale importante entre 1987 et 2016. Les changements observés s'opèrent de façon différente au cours des périodes 1987-2000 et 2000-2016. La dégradation du couvert végétal est plus accentuée au cours de la période 2000-2016 qu'au cours de la période 1987-2000. Ceci pourrait s'expliquer par la croissance démographique que connaît ce milieu ces dernières années. Mais de façon globale, ce milieu a vu ces formations végétales naturelles notamment les forêts denses, les forêts claires et savanes boisées se réduire au profit des formations anthropiques comme les mosaïques de cultures et jachères, les plantations et les agglomérations. Cette dynamique spatiale du paysage peut s'expliquer aussi bien par les facteurs naturels qu'humains.

Chapitre IV : Principaux facteurs de changements spatiaux

Introduction partielle

Plusieurs facteurs expliquent la dynamique de l'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé. Ces facteurs sont aussi bien naturels qu'anthropiques. Ce chapitre se focalise donc sur l'identification des différents facteurs potentiellement explicatifs des changements d'occupation du sol observés en tenant compte des facteurs socio-économiques du milieu. Ce processus comporte trois phases. La première est l'identification des variables via des études de cas (un balayage bibliographique). La deuxième est la collecte de la perception des paysans (agriculteurs, éleveurs et exploitants de bois) sur les facteurs probables de mutation du milieu. Enfin, dans le cadre de la modélisation prospective, une classification exhaustive des facteurs et contraintes issus du milieu physique a été entreprise.

Dans le cadre de cette recherche, trois types de facteurs explicatifs ont été identifiés : les facteurs environnementaux (naturels), les facteurs socio-économiques (anthropiques) et les contraintes. Seules les variables disponibles, spatialisables et qui ont une influence sur la localisation et les changements des catégories d'occupation des sols ont été prises en compte.

Les facteurs qui relèvent de l'environnement sont essentiellement des facteurs physiques : l'occupation du sol en 2016 qui est une variable dépendante, la pente, le relief, les types de sols, les précipitations, et dans une certaine mesure l'hydrographie.

Les facteurs relevant de la socio-économie sont : la densité de population, le réseau routier, l'étalement urbain (agglomérations), le type de propriété foncier, la taille des parcelles (champs). Le développement de certaines activités économiques contribue aux changements d'usage des sols. Il s'agit de l'exploitation du bois-énergie, du bois d'œuvre et de service, l'expansion des terres agricoles et des exploitations agroforestières, le surpâturage, les feux de végétation et la pauvreté. La distance joue un rôle clé sur l'ensemble des interactions spatiales de même que sur la localisation des entités géographiques. Il faut souligner la difficulté de spatialiser tous ces différents facteurs socio-économiques. Les critères contraignants qui ont une influence sur les changements d'occupation des sols sont intégrés et évalués dans le modèle. Il s'agit des zones urbaines, des feux de végétation (en saison sèche), des réglementations forestières et protection de l'environnement.

4.1. Analyse des facteurs explicatifs de la dynamique de l'occupation du sol

4.1.1. Perturbations climatiques

4.1.1.1. Variabilité interannuelle des pluies

Depuis trois décennies le secteur Nord-Ouest du Bénin à l'instar de toute l'Afrique de l'ouest occidentale connaît une migration importante de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) vers le nord. Ce phénomène a une influence sur la pluviométrie marquée par une variabilité importante. Les indices pluviométriques calculés illustrent l'instabilité au niveau de l'offre pluviométrique (figure 47). On observe que la tendance générale d'évolution de la pluviométrie annuelle moyenne est à la baisse (figure 48).

Les anomalies positives traduisent des excédents et celles négatives, des déficits pluviométriques.

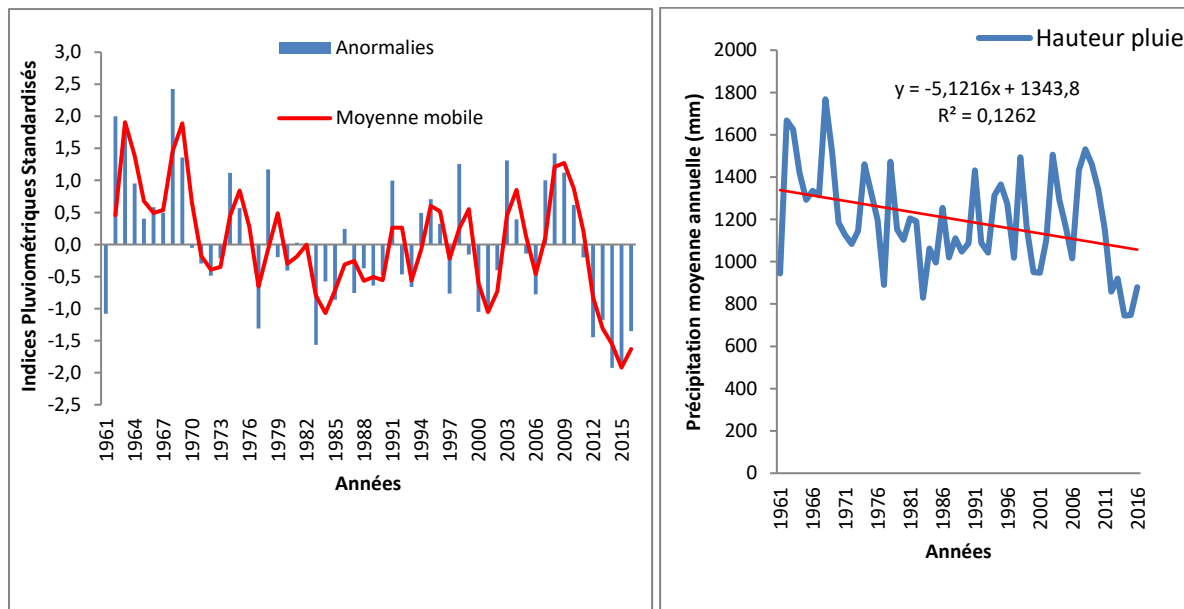


Figure 47 : Indices pluviométriques sur la période 1961-2016 du secteur d'étude

Figure 48 : Evolution des précipitations interannuelles entre 1961 et 2016

L'examen de la figure 47 montre sur la période 1981-2016 une variabilité des indices pluviométriques sur deux grandes périodes : la période allant de 1961 à 1970 est caractérisée globalement par des anomalies positives, ce qui traduit une période globalement humide. Alors que la période de 1971 à 2016 est caractérisée par des anomalies globalement négatives (période globalement sèche). Ce constat permet de dire que ce milieu est marqué par des périodes humides et des périodes sèches.

La figure 48 montre une régression linéaire de la pluviométrie annuelle avec une période de grande pluviométrie (1960) et une période de pluviométrie moindre que la première (après 1970).

Le calcul de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI) a permis de classer les années de sécheresse observées dans ce milieu (tableau XXVII).

Tableau XXVII : Classification de la sécheresse en rapport avec la valeur de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI)

Classe des SPI	Indicateurs	Année
SPI > 2	Humidité extrême	1962, 1968
1 < SPI < 2	Humidité forte	1963, 1964, 1969, 1974, 1978, 1991, 1998, 2003, 2007, 2008, 2009
0 < SPI < 1	Humidité modérée	1965, 1966, 1967, 1975, 1976, 1981, 1982, 1986, 1994, 1995, 1996, 2004, 2010
-1 < SPI < 0	Sécheresse modérée	1970, 1971, 1972, 1973, 1979, 1980, 1984, 1985, 1987, 1988, 1989, 1990, 1992, 1993, 1997, 1999, 2000, 2002, 2005, 2006, 2011
-2 < SPI < -1	Sécheresse forte	1961, 1977, 1983, 2001, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016
SPI < -2	Sécheresse extrême	Néant

Source : Mckee *et al.* (1993) et adapté

Il ressort de l'examen du tableau XXVII que globalement la période des années 1960 est humide. Mais la période de 1970 jusqu'à 2016 est globalement de sécheresse modérée ou forte. Toutefois, il y a quelques nuances avec certaines années d'humidité forte ou modérée. Pour mieux apprécier cette situation, une analyse de la rupture de stationnarité a été faite.

4.1.1.2. Tendances et rupture de stationnarité

L'analyse statistique par le test de corrélation sur le rang ne met en évidence aucune tendance dans la chronique des précipitations annuelles.

Les figures 49A et 49B présentent respectivement les résultats de l'application des tests de Buishand et de Pettitt sur des séries des précipitations annuelles.

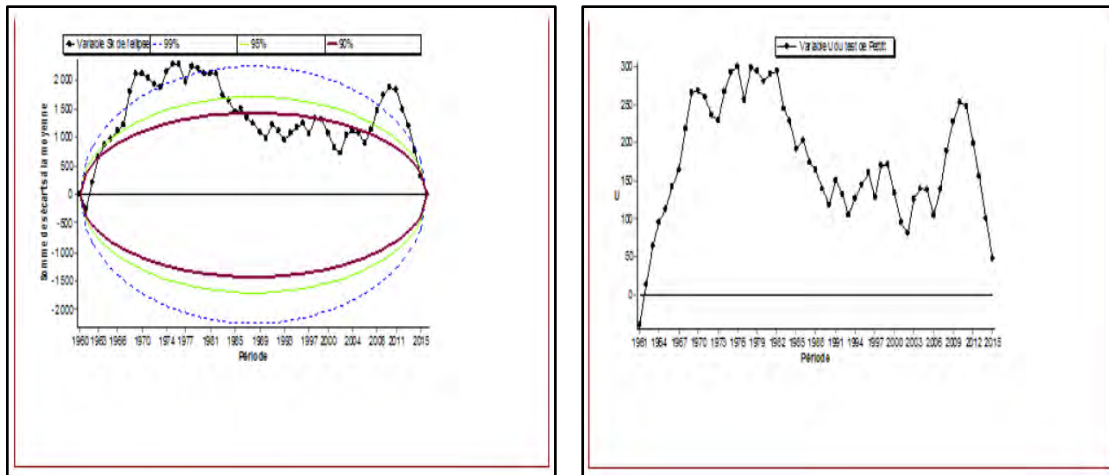


Figure 49 : Résultats des tests de Buishand (A) et de Pettitt (B)

L'analyse des figures 49A et 49B permet de constater que les tests de Buishand et de Pettitt identifient les années 1969 et 2011 comme années de la rupture de stationnarité. Ces ruptures sont significatives au seuil de 99 %. Il se dégage donc trois sous-séries : la série de 1961-1969, celle de 1970 à 2011 et celle de 2012 à 2016 (tableau XXVIII).

Tableau XXVIII : Segmentation de Hubert (Niveau de significativité de Scheffé 1 %)

Début	Fin	Moyenne	Ecart type
1961	1969	1431,88	248,58
1970	2011	1189,23	178,15
2012	2016	830,40	79,86

Au regard de ces deux tests, il est remarqué que les moyennes des sous-séries avant et après la première rupture sont respectivement de $1431,88 \pm 248,58$ mm et de $1189,23 \pm 178,15$ mm, soit un déficit pluviométrique de 16,94 % après la rupture. La sous-période 1961 à 1969 est donc plus humide que la sous période 1970 à 2010. La moyenne pluviométrique annuelle de la troisième sous-série est de $830,40 \pm 79,86$ mm avec un déficit pluviométrique de 30,17 % par rapport à la deuxième sous série.

Si l'amplitude du phénomène (rupture), apparue aux alentours des années 1970 et 2011, n'est pas uniforme, toutes les saisons (sèche et pluvieuse) ont subi une diminution des précipitations (figure 50).

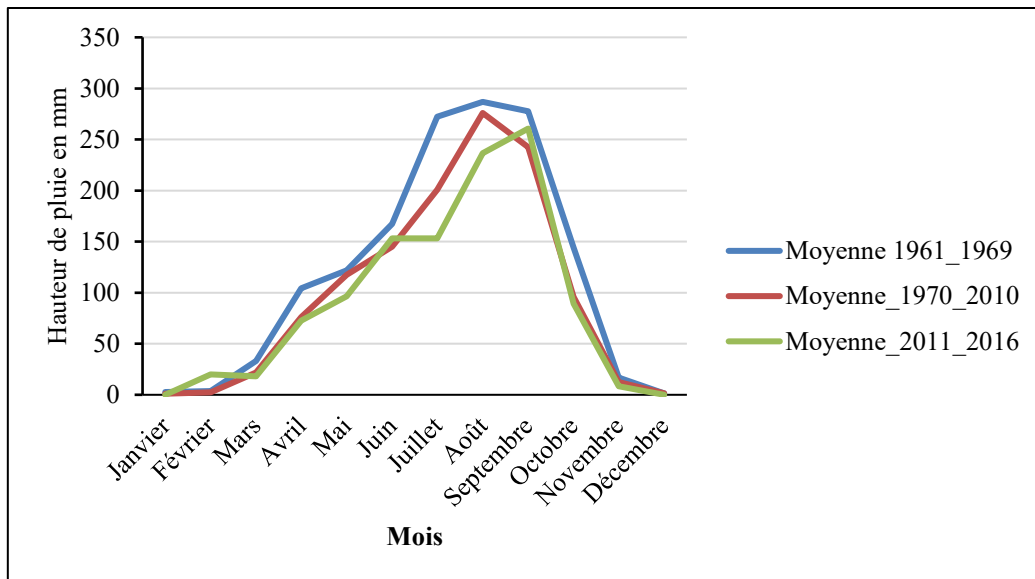
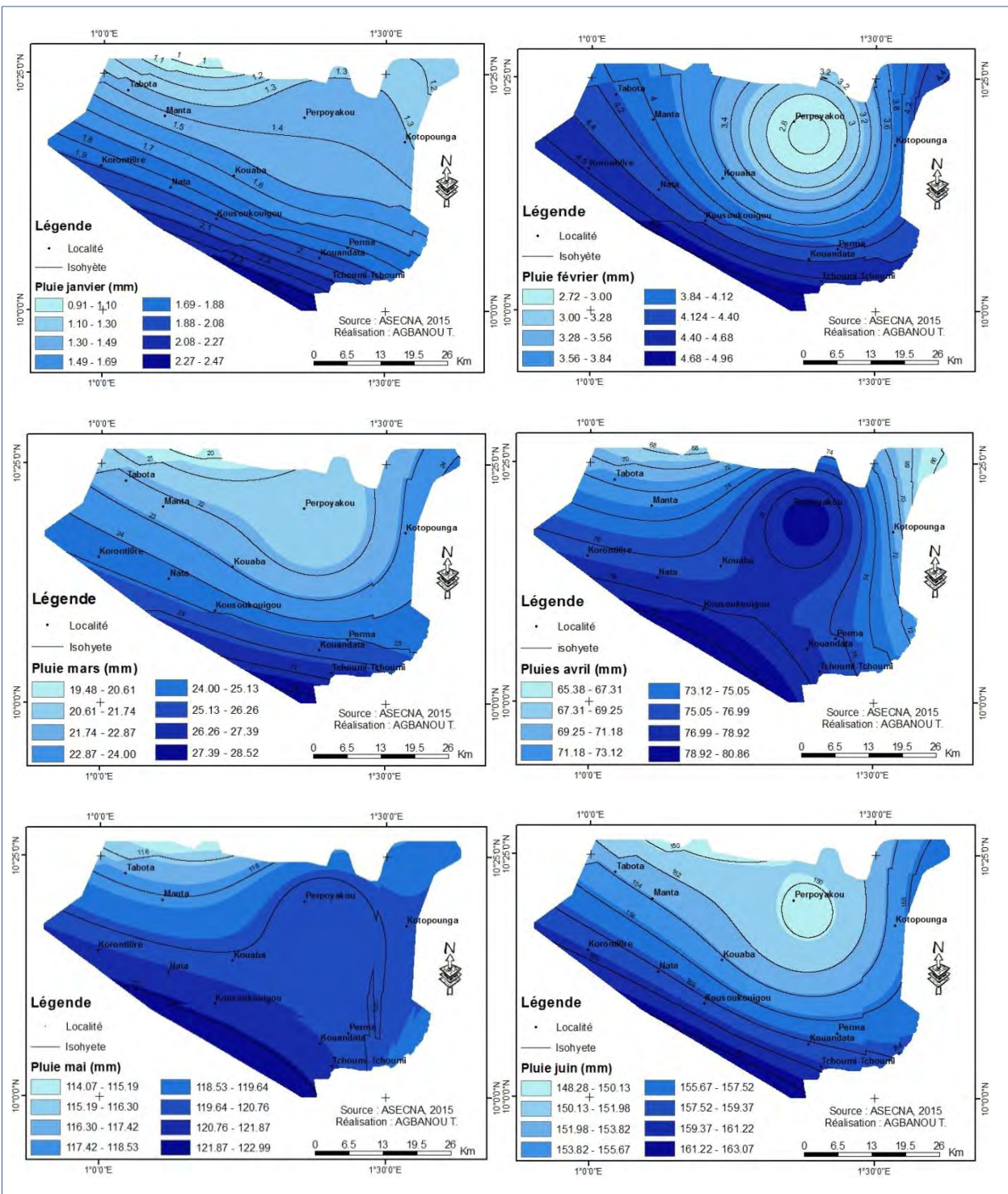


Figure 50 : Variation des pluies moyennes mensuelles par sous - périodes dans le secteur d'étude

La figure 50 présente la variation saisonnière des précipitations moyennes mensuelles et montre que les précipitations moyennes mensuelles étaient plus importantes au cours de la sous-période 1961-1969 qu'au niveau de la sous-période 1970-2010. Ces hauteurs de pluie sont plus importantes au cours de la période 1970-2010 qu'au cours de la période 2011-2016. Cette hausse est remarquable aussi bien au niveau des mois les plus humides (juin, juillet et août) qu'au niveau des mois les plus secs (décembre, janvier, février). Plus le temps passe, moins sont importantes les hauteurs moyennes mensuels de pluie. Ceci peut donc expliquer la régression du couvert végétal observée dans ce milieu.

4.1.1.3. Variabilité spatio-temporelle des précipitations

La série de données pluviométriques de 1961 – 2016 des 16 stations a permis de spatialiser les précipitations sur l'ensemble de la zone d'étude. Il en ressort que la répartition spatiale des pluies dans ce secteur d'étude est inégale (figure 51).



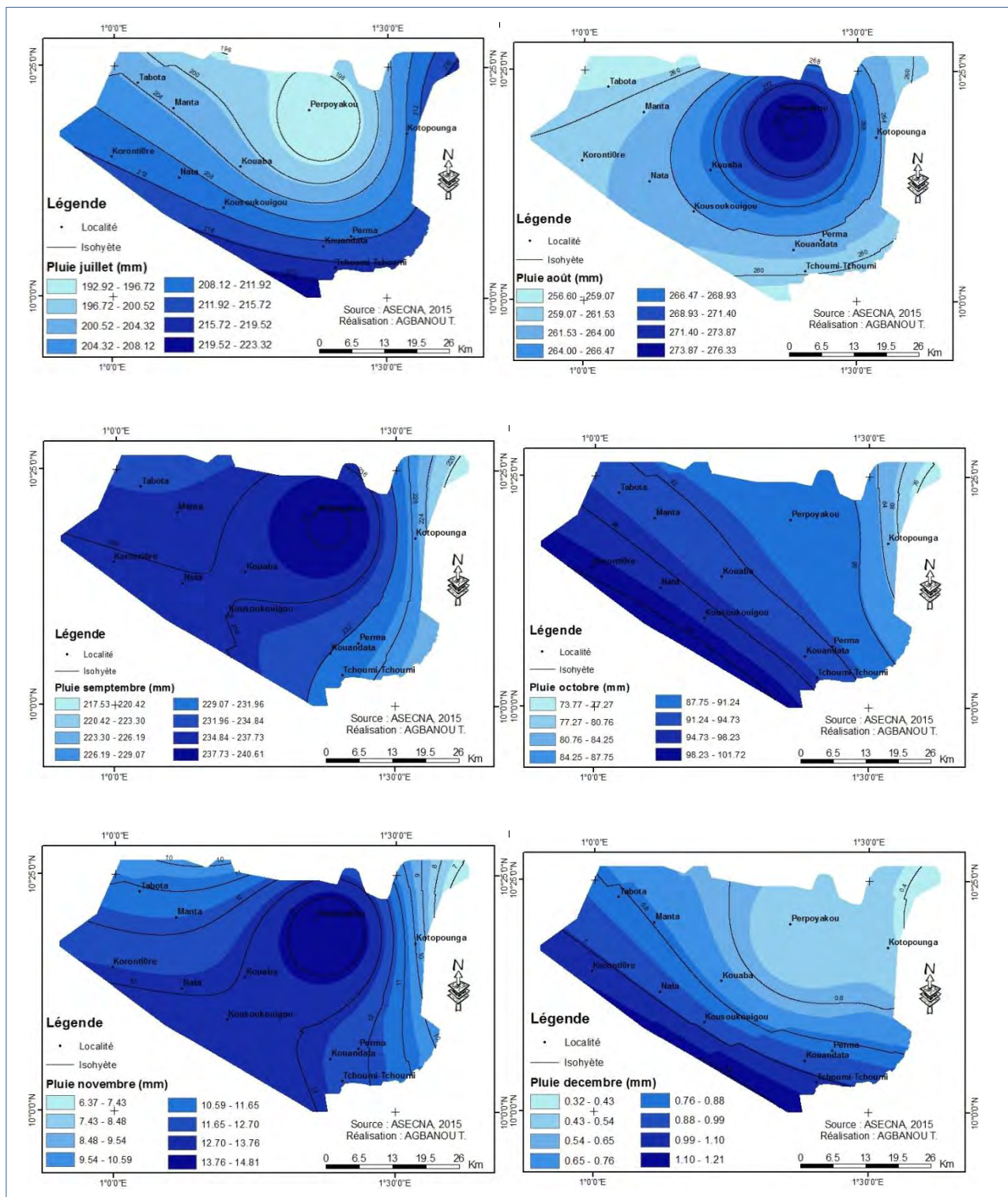


Figure 51 : Répartition des moyennes mensuelles de pluie durant la période 1961- 2016

De l'examen de la figure 51, il ressort que le gradient des précipitations évolue dans l'ensemble du nord vers le sud. La pluviométrie dans ce secteur augmente progressivement du nord-est vers le sud-ouest. On note une évolution particulière du gradient pluviométrique au mois août. En effet, ce mois se révèle très pluvieux et le gradient pluviométrique évolue du sud-ouest vers

le nord-est (inverse donc aux autres mois). Il se dégage de la lecture de ces cartes deux grandes saisons : une saison humide d'avril à octobre (moyenne mensuelle variant entre 65,38 à 276,33 mm) et une saison sèche de novembre à mars (moyenne mensuelle variant entre 0,32 à 28,52 mm). La mauvaise répartition et l'arrêt précoce des pluies dans ce milieu ont une influence sur le développement et la répartition spatiale du couvert végétal.

4.1.1.4. Bilan hydrique

Le bilan hydrique du secteur d'étude a été fait à partir de 1965, date à laquelle les données d'évapotranspiration potentielle (ETP) sont disponibles. Pour mieux apprécier l'impact de la variabilité climatique le bilan hydrique sur deux périodes a été établi : la période avant la rupture dans la série pluviométrique (1965 – 1969) et la période après la rupture (1970 – 2011) (figure XXIX).

Tableau XXIX : Bilan hydrique sur la période 1965 à 2010

Période	1965 - 1969 (avant rupture)	1970 - 2011 (après rupture)
P (mm)	1446	1192
ETR (mm)	746	731
Excédent (mm)	699	461

P = précipitation annuelles moyennes ; ETR = évapotranspiration réelle annuelle moyenne ; Excédent = P – ETR.

L'examen du tableau XXIX permet de constater que les hauteurs annuelles moyennes des précipitations avant et après la rupture sont respectivement de 1446 et 1192 mm. Pour l'évapotranspiration réelle, elles sont de 746 et 731 mm, tandis que pour l'excédent ou infiltration efficace, elles sont de 699 et 461 mm. Ces chiffres montrent une baisse significative des pluies et donc du bilan hydrique entre les deux périodes. Cette baisse du bilan hydrique augmente le risque de déficit hydrique des plantes de ce milieu.

L'année de rupture observée (1969), les déficits pluviométriques (16,71 %) et la chute du bilan hydrique observés s'inscrivent dans la tendance globale constatée en Afrique de l'ouest et centrale par plusieurs chercheurs et qui affecte la production de biomasse par le couvert végétal.

4.1.1.5. Variabilité interannuelle des températures

Les températures maximales et minimales dans le nord-ouest du Bénin connaissent une variation interannuelle importante entre 1981 et 2010 (figure 52).

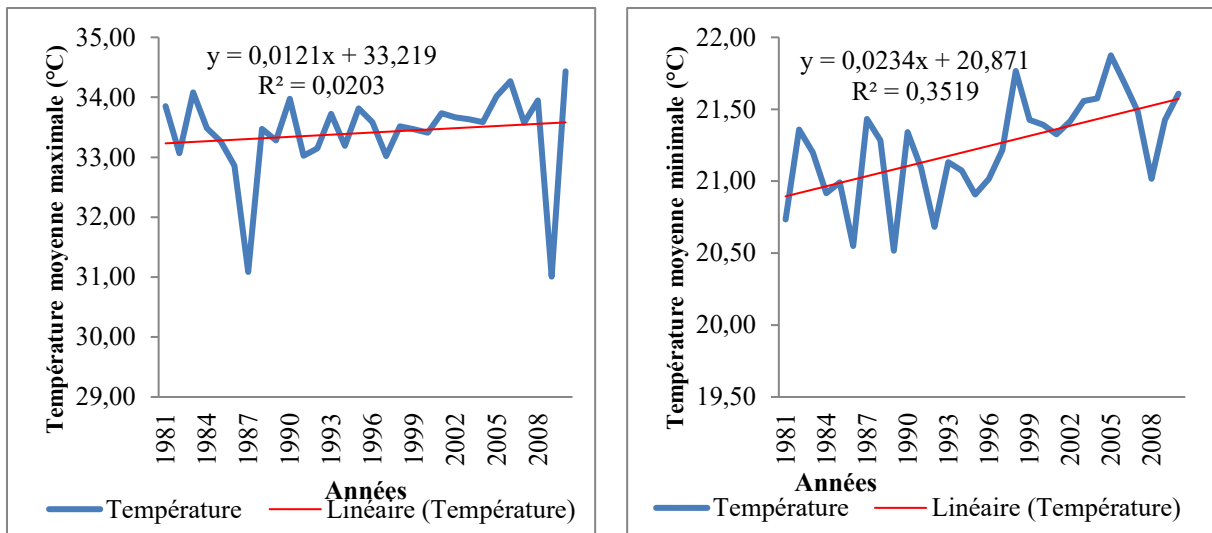


Figure 52 : Evolution des températures annuelles (maximum et minimum) dans le secteur d'étude entre 1981- 2010

De l'analyse de la figure 52, il ressort que les températures interannuelles (maximales et minimales) évoluent en dents de scie entre 1981 à 2010 avec une tendance générale à la hausse pour le moins des températures minimales. Les années 1987 et 2009 ont connu une chute de leurs températures et sont donc considérés comme des années particulièrement froides. Les températures les plus fortes de la série ont été enregistrées en 2010. L'évolution à la hausse des températures traduit le réchauffement climatique de ce secteur d'étude.

4.1.1.6. Variabilité interannuelle de l'humidité relative

La figure 53 présente l'évolution interannuelle de l'humidité relative dans le secteur d'étude.

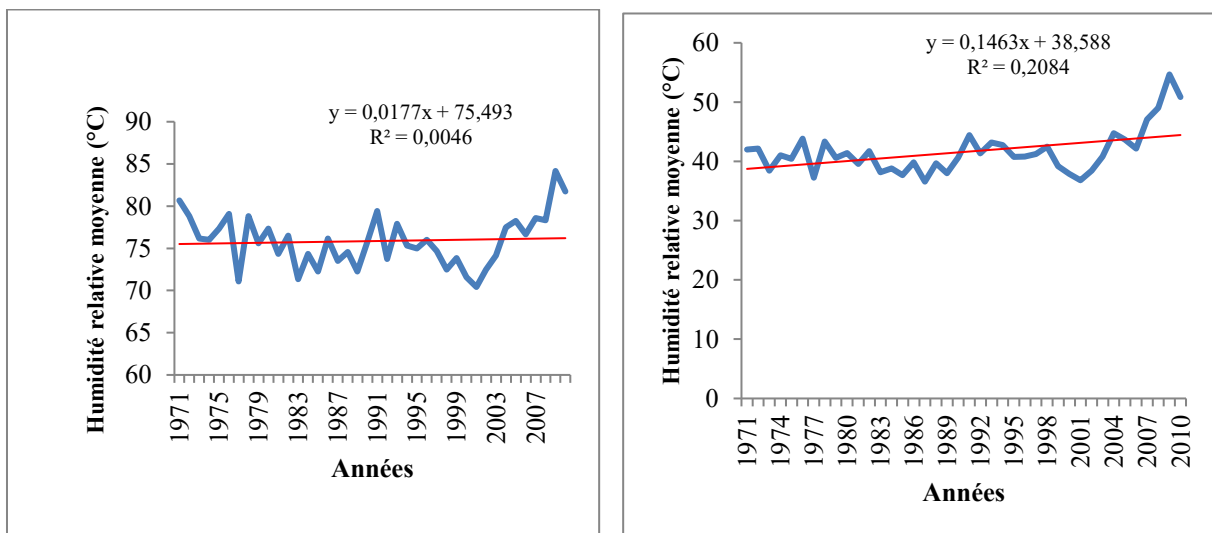


Figure 53 : Evolution de l'humidité relative entre 1971 et 2010 dans le secteur d'étude

L'analyse de la figure 53 montre que l'humidité relative annuelle moyenne a baissé régulièrement de 1971 à 2000 dans le secteur d'étude. Elle s'est traduite par l'assèchement du

climat dans la zone. Cette diminution de l'humidité relative de l'air est liée à la péjoration climatique observée sur la période 1971-2000 et à la récession pluviométrique observée au cours de ces décennies. Cette tendance à la baisse de l'humidité change à partir de 2001. En effet, on observe une tendance à la hausse au cours de cette dernière décennie certainement due à la reprise pluviométrique.

On peut retenir que globalement la variabilité pluviométrique, la persistance des anomalies, la hausse des températures moyennes, caractérisent le climat du secteur d'étude depuis les années 1961. Cette région subit des déficits pluviométriques avec une généralisation de la sécheresse, une mauvaise répartition spatio-temporelle des pluies et la tendance à la hausse de la température. Ces différents facteurs climatiques influencent l'épanouissement du couvert végétal.

4.1.2. Variables de distance

Il s'agit ici des variables de distance relatives à la distance à un type d'occupation ou d'usage du sol, et celles relatives à des entités statiques telles que les routes. Les variables relatives à la distance à des types d'occupation ou d'usage du sol sont : distance aux agglomérations qui explique la présence des espaces urbanisés, distance aux champs et distance aux plantations. L'utilisation des sols est évidemment influencée par les caractéristiques physiques du milieu comme l'altitude, les pentes, la pédologie.

4.1.3. Facteurs socioéconomiques des changements d'usage du sol

4.1.3.1. Pression démographique

Depuis 1979 ce milieu connaît une augmentation de l'effectif de la population et donc de sa densité (figures 54). La densité de la population a régulièrement augmenté dans ce milieu. Elle a triplé en 35 ans en passant de 15 habitants au km² en 1979 à 46 habitants au km² en 2013. Cette croissance démographique se fait de façon inégale d'un arrondissement à un autre.

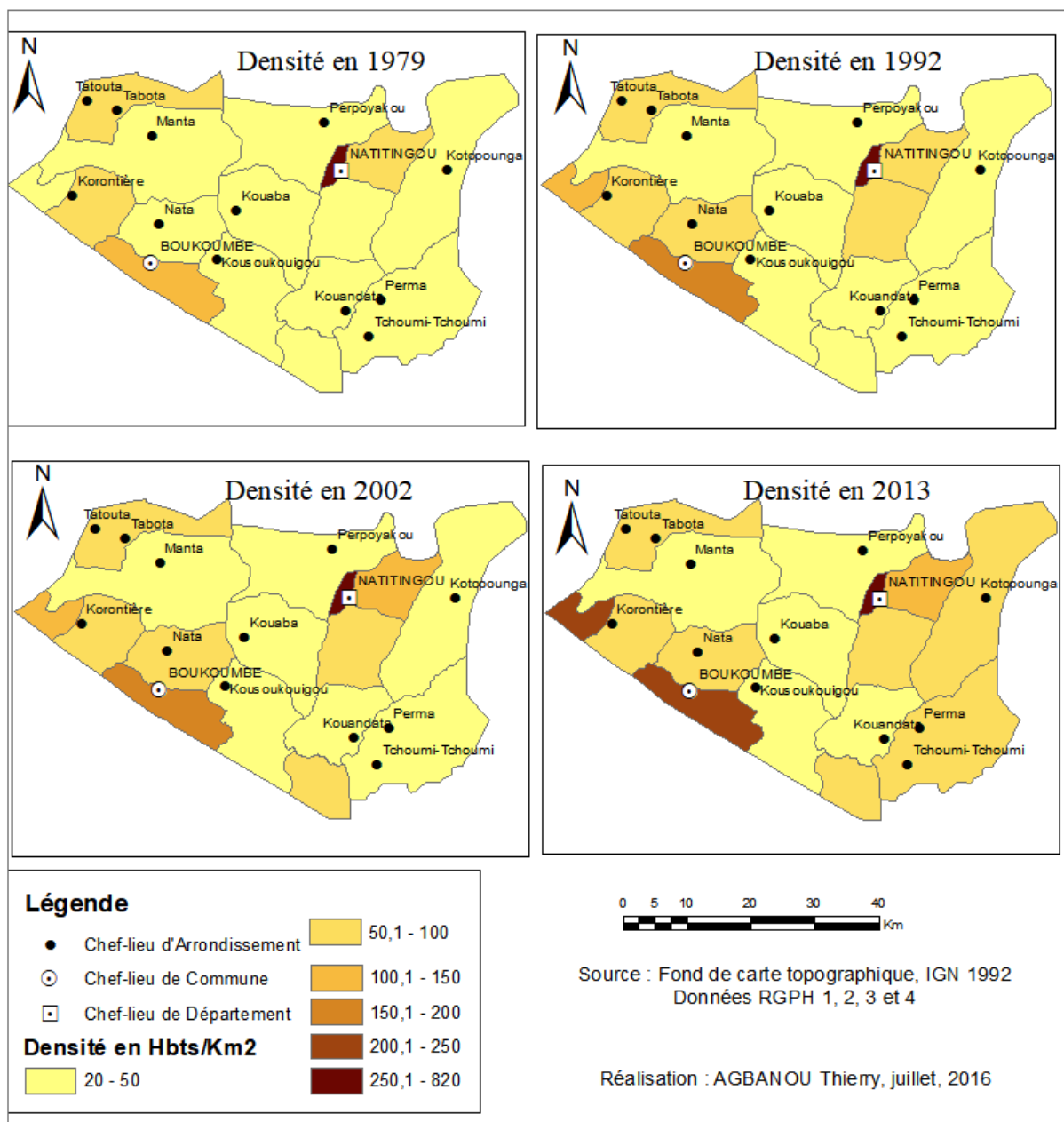


Figure 54 : Cartographie de la densité de la population (hab/km²) par arrondissement en 1979, 1992, 2002 et 2013

Il ressort de l'analyse de la figure 54 qu'entre 1979 et 2013, on note une tendance à la hausse de la densité dans la plupart des arrondissements. Particulièrement les densités de Dipoli (Commune de Boukombé) et celle de Natitingou 1 ont plus que doublé. Ainsi la densité de ces deux arrondissements est passée respectivement de 48 habitants/km² à 223 habitants/km² et de 359 habitants/km² à 820 habitants/km². De façon globale, au cours de cette période, la densité dans tous les arrondissements a augmenté. Seulement dans l'arrondissement de Koussoucoingou (Commune de Boukombé), on note une stagnation de la densité de la population.

Aussi, selon les calculs faits à partir des données des différents Recensements Généraux de la Population et de l'Habitation, l'effectif moyen annuel de population qui augmente chaque année dans le milieu d'étude est passé de 2.605 habitants au cours de la période 1987 – 2000 à 4.634 habitants au cours de la période 2000 – 2016.

En résumé, l'évolution rapide de la population et de la densité explique la dynamique que connaît l'usage du sol (développement spectaculaire du front agricole observe sur la carte d'occupation du sol de 2016) et la pression que subissent les ressources végétales dans ce secteur.

4.1.3.2. Disponibilité des terres cultivables

Parmi les facteurs de production, la terre représente un caractère primordial. Les sols de ce milieu sont très diversifiés à l'image de la végétation qui leur sert d'écran. Les sols sont ferrugineux avec des propriétés physiques et chimiques convenables aux plantes à enracinement profond telle l'igname ou le manioc. Dans la partie est, prédominent les sols ferrugineux tropicaux peu ou pas lessivés qui sur le plan agronomique ont un potentiel très élevé malgré leur faible capacité de rétention d'eau. A l'ouest prédominent les sols ferrugineux lessivés concrétionnés ou non. Ces sols ont un faible taux de matière organique qui nécessite un entretien pour maintenir leur aptitude à l'agriculture. Ces sols sont exposés de façon régulière à l'érosion aussi bien éolienne qu'hydrique. En saison sèche, les sols s'assèchent et s'érodent sous l'action du vent, surtout dans les localités à faible couverture végétale comme Boukombé. Le caractère accidenté du relief et de l'effet de battance des averses brutales provoque une intense érosion hydrique des sols. Les actions anthropiques comme les feux de brousse, le déboisement intensif à des fins agricole, énergétique et purement économique accentuent ce phénomène d'érosion des sols. Malgré ces facteurs limitant, Ces sols restent productifs et permettent le développement de plusieurs cultures (céréales, légumineux, cultures de rente, racine et tubercule, etc.) (figure 55).

Selon les enquêtes de terrain (février, 2016), 65,75 % des terres appartiennent aux collectivités (familles) et 34,25 % aux individus. Aucune terre agricole n'appartient à l'Etat si ce n'est les domaines réservés pour construire plus tard des infrastructures socio-communautaires.

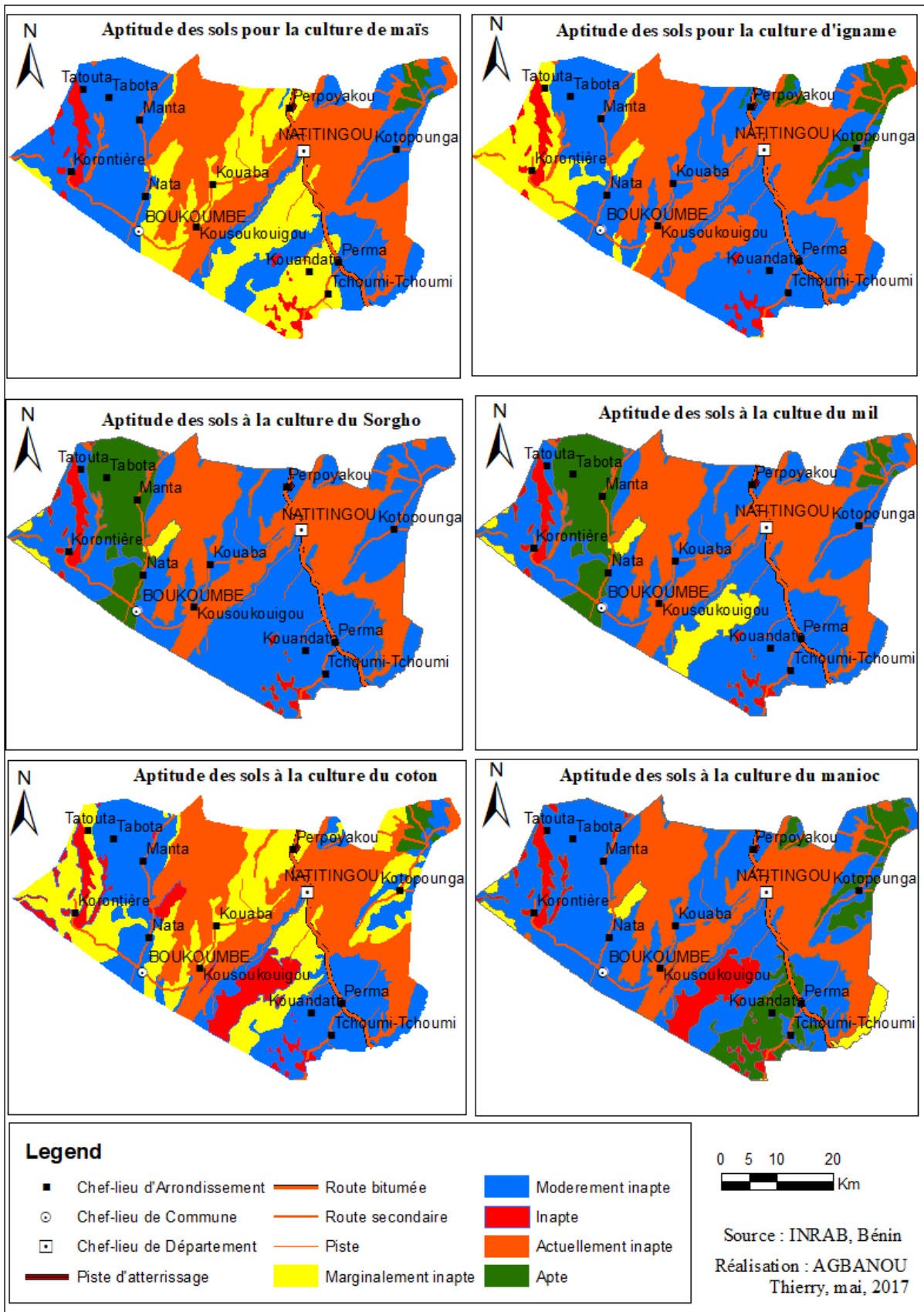


Figure 55 : Aptitude culturelle des sols du secteur Natitingou-Boukombé

Il ressort de l'observation de la figure 55 que plus de la moitié des superficies de ce secteur Natitingou-Boukombé est cultivable. Mais seulement une infime partie de ces superficies cultivables est effectivement emblavée. Le reste est laissé en jachère ou subit l'effet de la sahélisation surtout la partie nord-ouest (Boukombé).

4.1.3.3. Modes de faire-valoir des terres

Dans le secteur Natitingou-Boukombé, selon les enquêtes de terrain (Février 2016), le principal mode de faire-valoir des terres est l'héritage. L'accès à la terre est donc principalement fondé sur les liens de parenté. La figure 56 présente les modes d'accès aux terres.

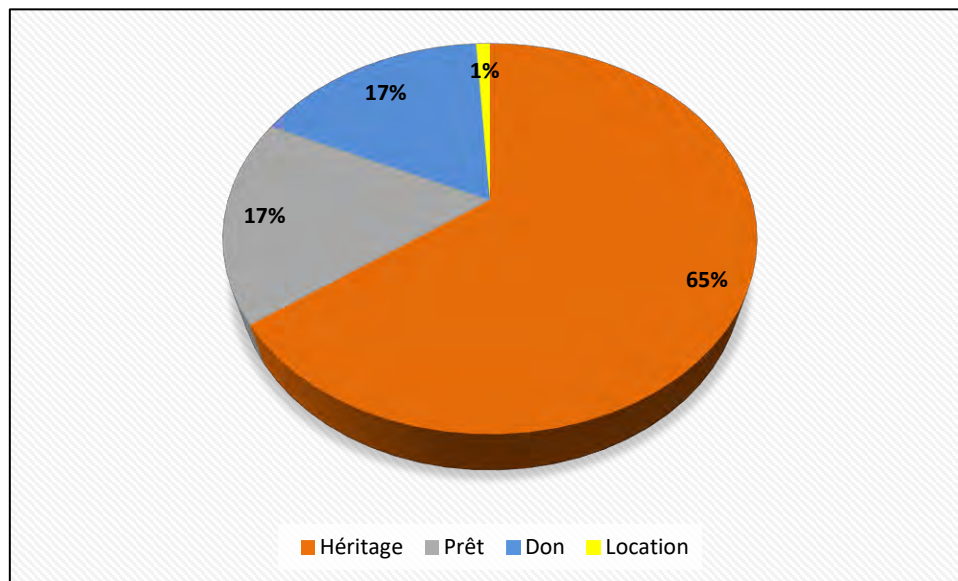


Figure 56 : Mode d'accès aux terres agricoles dans le secteur d'étude

Source : Enquête de terrain, mars 2016

Il ressort de l'examen de la figure 56 que 65 % des terres agricoles mises en valeur par la population sont héritées, 17 % sont des dons, 17 % sont prêtées et seulement 1% sont louées. Pour ces populations la terre est un bien inaliénable. Elle appartient aux aïeux et ne sauraient être vendue. Toutefois, dans les centres urbains (Boukombé et Natitingou centre) les terres sont vendues. Ce sont des terres généralement destinées aux constructions. La terre n'est pas un facteur limitant de l'agriculture, elle est disponible et les producteurs, surtout les autochtones peuvent y accéder facilement. Il y a une disparition (en terme de proportion de populations) dans le mode d'accès aux terres par arrondissement (figure 57).

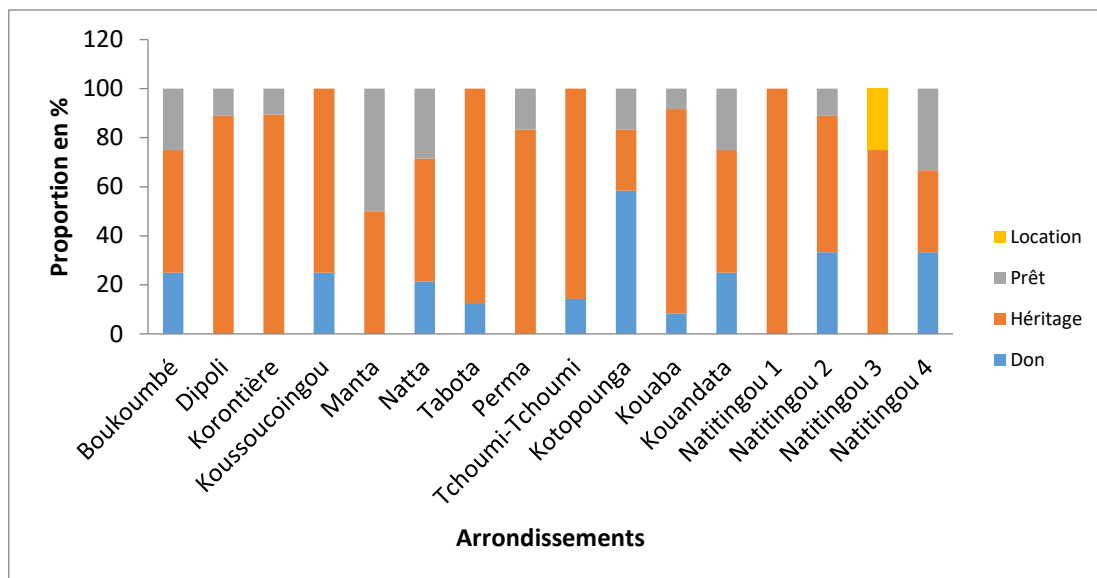


Figure 57 : Modes d'accès aux terres agricoles par arrondissement dans le secteur d'étude

Source : Enquête de terrain, mars 2016

L'examen de la figure 57 permet de constater que dans les arrondissements de Dipoli, Korontière, Tchoumi-Tchoumi, Perma, Kouaba, Tabota, Natitingou 1 et 3, le principal mode de faire valoir est l'héritage. Le prêt de terre se fait dans les arrondissements de Manta, Natitingou 4 et Boukoubé centre. Quant à la location, elle se fait seulement dans l'arrondissement de Natitingou 3.

✓ Champs et jachères

Les champs sont situés principalement sur des glacis sableux (photo 7), dans les marécages et sur les plateaux. On y retrouve différents types de champs : « champs de case » autour des cases (photo 8) ou « soles principales » en bordure des principales rues du village (2 à 5 km de rayon) et des « champs de brousse » cultivés (situés un peu loin du village) ou laissés en jachère.



Photo 7 : Culture du mil sur un flanc de colline à Koussoucoingou (Boukombé)

Prise de vue : AGBANOU T., mars 2016



Photo 8 : Exemple de champ de case à Manta (Boukombé)

Prise de vue : AGBANOU T., mars 2016

La photo 7 présente un champ de mil sur un flanc de montagne alors que la photo 8 présente en premier plan un champ de sorgho et en arrière-plan des concessions (maisons). En effet, les propriétaires de ces maisons ont choisi de faire leur champ autour de leurs maisons pour éviter d'emprunter des terres. Cette pratique est très répandue dans l'ensemble du milieu d'étude. Le choix des cultures à pratiquer autour des cases ou maisons est fonction de la qualité du sol. Ces terres situées autour des cases sont rarement laissées en jachère pour éviter la pousse des mauvaises herbes.

Selon les enquêtes de terrain la durée moyenne des jachères est très variable s'étalant d'un à plus de dix ans (figure 58).

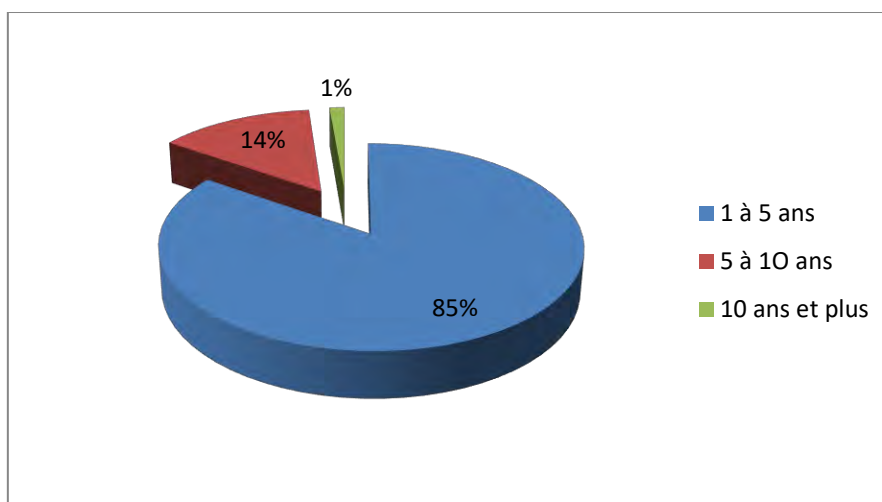


Figure 58 : Durée des terres laissées en jachère dans le milieu d'étude

Source : Enquête de terrain, mars 2016

Pour la majorité des enquêtés la durée de la jachère est de 1 à 5 ans. Pour nombre d'entre eux les terres sont rarement laissées au repos parce qu'elles ne sont pas suffisamment disponibles. Aussi même si les sols s'épuisent, il y a certaines cultures qu'on peut mettre pour faciliter leur reconstitution.

En ce qui concerne les terres mises en cultures, elles ont évolué en superficie entre 1996 et 2016. En effet, l'évolution démographique dans ce milieu nécessite l'emblavure d'importantes superficies de terres. Ceci pour faire face aux besoins alimentaire de la population. Cette évolution des superficies se fait de façon inégale d'un arrondissement à un autre (figure 59).

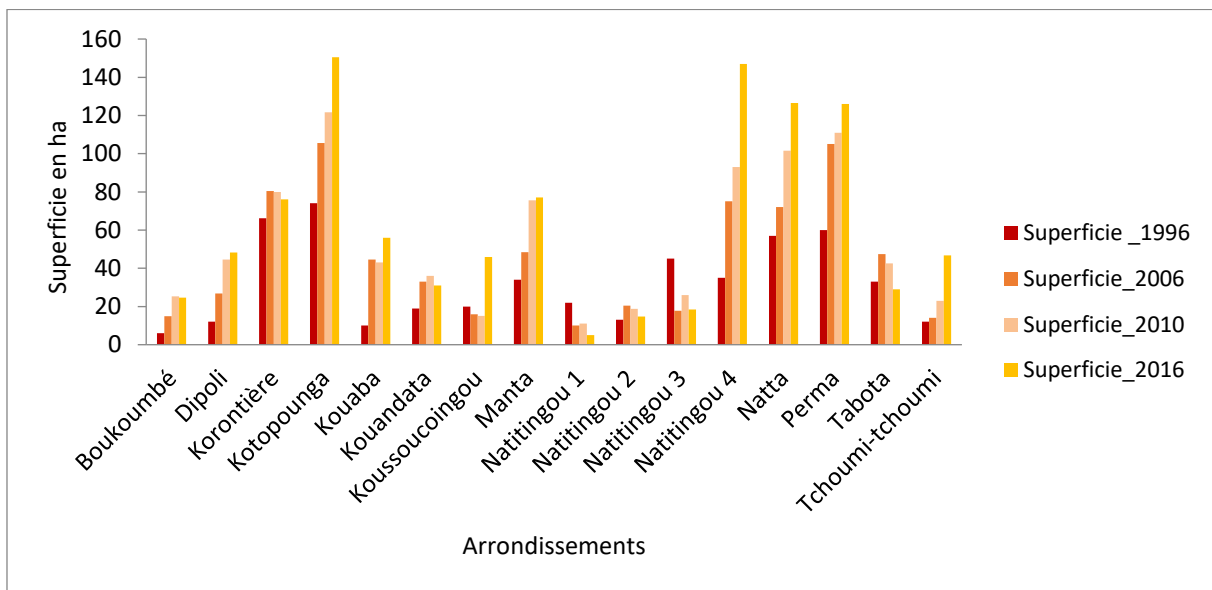


Figure 59 : Superficies des champs en ha par arrondissement en 1996, 2006, 2010 et 2016

Source : Enquête de terrain, mars 2016

Ces superficies ont été spatialisées pour mieux apprécier leurs évolutions dans le temps et dans l'espace (figure 60).

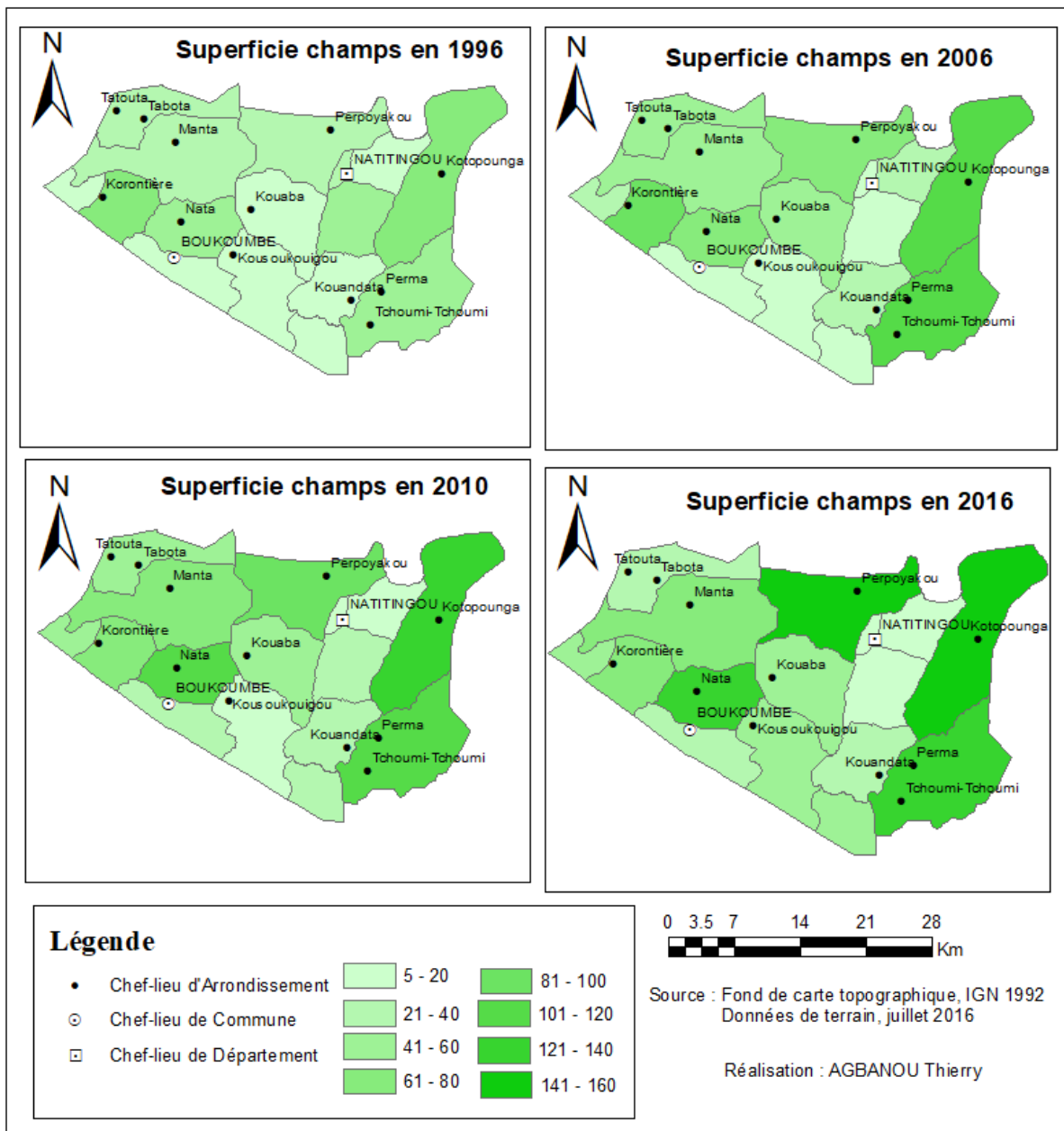


Figure 60 : Superficies agricoles moyennes en ha en 1996, 2006, 2010 et 2016

Il ressort de l'examen des figures 59 et 60 que trois tendances s'observent entre l'évolution de la densité et celle des superficies des champs.

1^{ère} tendance : Plus la densité augmente, plus les superficies de champs augmentent. Cette tendance s'observe dans les arrondissements de Dipoli, Kotopounga, Kouaba, Kouandata, Kousoucouingou, Manta, Natta, Natitingou 4, Perma et Tchoumi-tchoumi.

2^{ème} tendance : Plus la densité de population augmente, moins les superficies des champs sont importantes. Les arrondissements dans lesquels on observe ce phénomène sont : Boukombé, Natitingou 1, Natitingou 2 et Natitingou 3. En effet, c'est dans ces arrondissements que se

trouvent les plus grandes agglomérations, marchés et infrastructures politico-administratives du milieu d'étude. Il se développe donc dans ces arrondissements plus d'activités économiques. Ceci réduit le nombre de personnes attachées aux activités agricoles. Les terres agricoles ici ne sont pas aussi extensibles parce que toutes les terres sont morcellées et vendus.

3^{ème} tendance : Ici l'évolution de la densité et des superficies des champs se présentent en dent de scie (pas de tendance nette). Ceci peut s'expliquer par leur position géographique (arrondissements frontaliers au Togo).

En résumé, les arrondissements où le nombre d'habitants / km² augmente fortement connaissent pas ou seulement une légère augmentation de la surface moyenne des champs. C'est le cas de : Boukoubé, Dipoli, Natitingou 2 et 3. Au contraire, les arrondissements où la surface moyenne des champs a augmenté fortement, connaissent une moindre pression démographique : Perma, Kotopounga et Natitingou 4. La proportion des champs en terme de superficie a évolué de façon différente d'un arrondissement à l'autre entre 1996 et 2016 (figures 61 et 62).

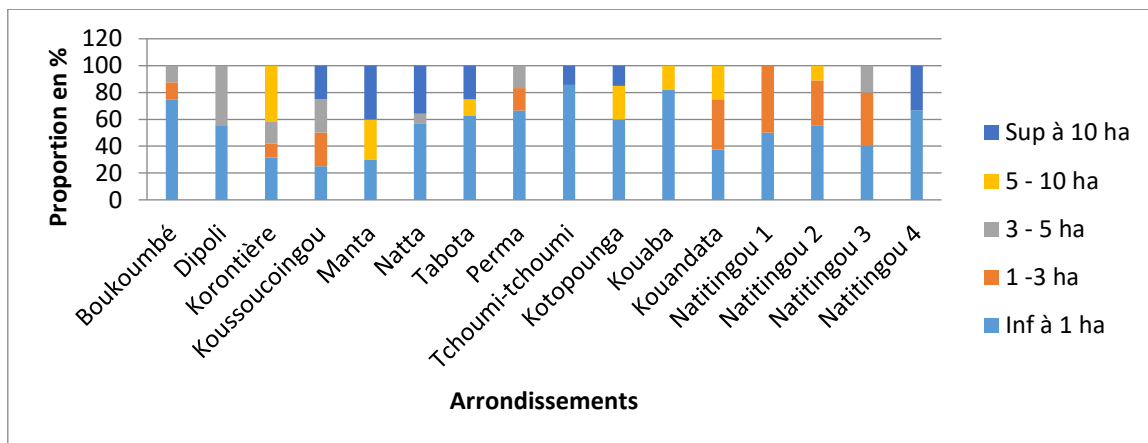


Figure 61 : Répartition des superficies de champs par arrondissement en 1996

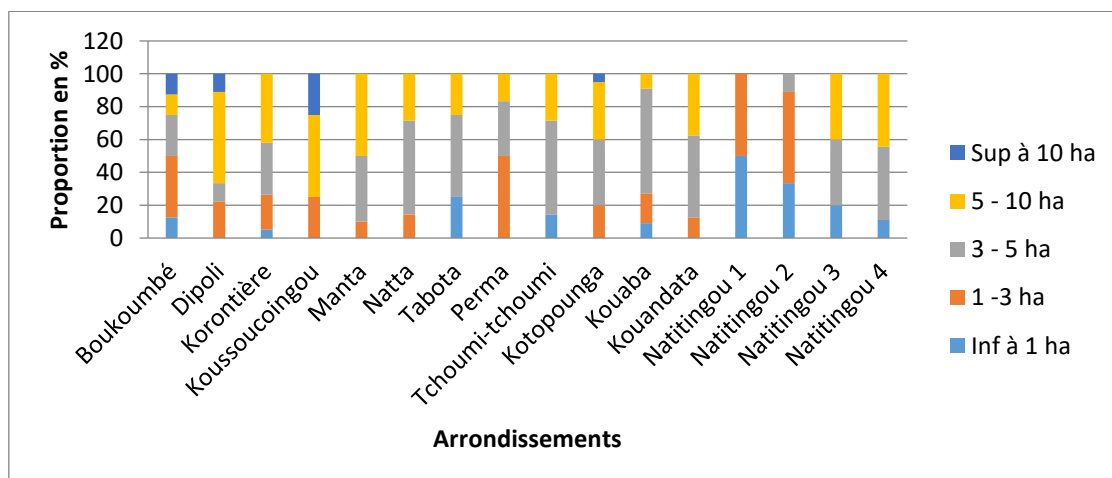


Figure 62 : Répartition des superficies de champs par arrondissement en 2016

Source : Enquête de terrain, mars 2016

Il se dégage des figures 61 et 62 que de 1996 à 2016 les champs de superficies inférieures à 3 ha ont diminué au profit des champs de superficies supérieures à 3 ha dans tous les arrondissements. Les arrondissements les plus marqués par cette évolution sont : Dipoli, Korontière, Kousoucouingou, Manta, Natta, Tabota, Tchoumi-Tchoumi, Kotopounga, Kouaba, Kouandata, Natitingou et Natitingou 4. Ces arrondissements ont connu une augmentation de leurs densités entre 1979 et 2016. Ceci montre qu’au cours de ces dernières années, les populations emblavent de grandes superficies de terres pour faire face à la forte demande de produits vivriers liée à l’augmentation de la population.

✓ Evolution des superficies des cultures annuelles

Les différentes cultures annuelles pratiquées dans ce milieu sont : les céréales, les légumineux, les cultures de rente, les tubercules et racines et les produits maraîchers. Elles nécessitent l’emblavure d’importantes superficies. Ces dernières évoluent dans le temps et dans l’espace (figure 63).

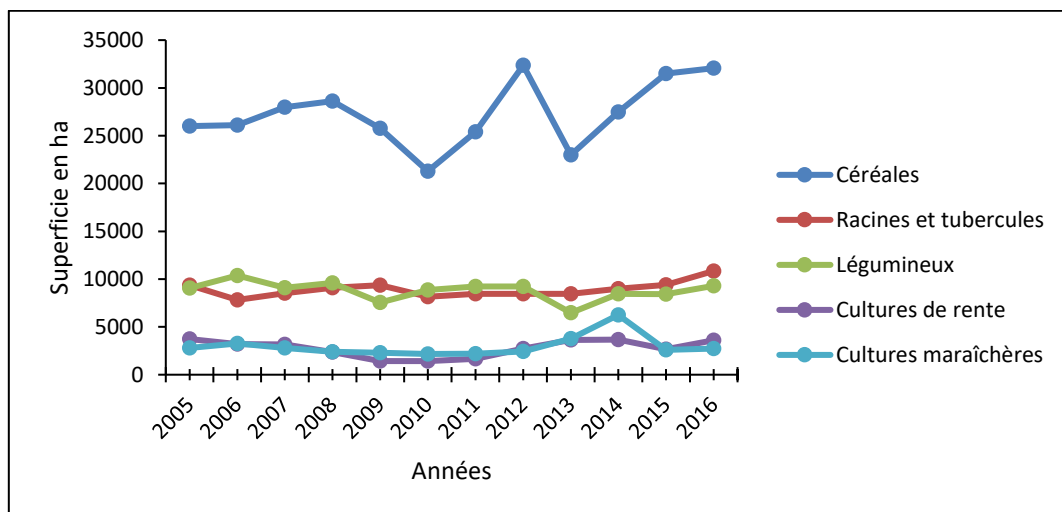


Figure 63 : Evolution des superficies emblavées entre 2005 et 2016

Sources : Enquête de terrain, Juin 2018.

Il ressort de l’examen de la figure 63 que les céréales sont les cultures pour lesquelles d’importantes superficies sont emblavées. Les cultures maraîchères et de rentes sont celles qui ont des emblavures moins importantes alors que les céréales restent les cultures qui nécessitent d’importantes emblavures. Les superficies des céréales ont évolué en dent de scie de 25997 ha en 2004 à 32017 ha en 2016 avec un pic en 2012 (32359 ha). Dans l’ensemble les superficies ont une tendance à la hausse. L’emblavure de ces superficies importantes est due essentiellement à un système agricole extensif avec des techniques peu recommandées. Il s’agit

essentiellement des techniques de défrichages et de brûlis. Ces pratiques nécessitent la destruction d'importantes superficies de végétation et l'appauvrissement des sols.

✓ Cultures pérennes (sylviculture)

C'est une activité qui n'est pas très développée dans le secteur d'étude. En plus des forêts reliques et sacrées qui couvrent cette partie du pays, des programmes de reboisement d'immenses zones dans toutes les Communes pour lutter contre l'avancée du désert sont en cours d'exécution. Il s'agit des plantations de manguiers (*Mangifera indica*), d'anacardiers (*Anacardium occidentale*), de teck (*Tectona grandis*), d'eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis*), de caïcédrot (*Khaya senegalensis*), de gméline (*Gmelina arborea*) et de moringa (*Moringa oleifera*). La plupart des plantations du milieu sont mises en place il y a plus de 5 ans (photo 9). Le paysage sylvicole est dominé par la présence de quelques arbres isolés, présent dans les champs comme *Vitellaria paradoxa* (karité), ce qui rend difficile leur dénombrement. Ces plantations ne sont pas toujours bien protégées et sont en saison sèche exposées au feu de végétation tardive qui ravage les jeunes plants. Aussi les scieurs détruisent-ils sérieusement les arbres pour les besoins en bois d'œuvre et de service. Ceci accentue la déforestation et la désertification de ce milieu.



Photo 9 : Plantation de caïcédrot (*Khaya senegalensis*) à Kouaba

Prise de vue : AGBANOU T., mars 2016

Cette photo 9 présente une plantation bien entretenue de caïcédrot d'environ un hectare. Elle aurait été mise en place il y a plus de 10 ans par une Organisation Non-Gouvernementale qui œuvre pour la protection de l'environnement. Ceci témoigne la volonté des uns et des autres à vouloir reconstituer le couvert végétal même si parfois c'est à des fins commerciaux.

4.1.3.4. Dégradation des terres

La dégradation des terres agricoles est un processus d'évolution associé à une perte d'équilibre d'un sol antérieurement stable. La structure et la texture de ces sols, les techniques culturales, la durée de jachère et l'utilisation abusive des intrants entraînent la baisse de fertilité des sols. Le calcul du coefficient d'Allan (L) dans le secteur Natitingou-Boukombé en 2016 traduit une surexploitation des terres agricoles (tableau XXX).

Tableau XXX : Coefficient d'Allan de 2016 dans le secteur Natitingou-Boukombé

Commune	Durée moyenne d'exploitation (C en année)	Durée moyenne de jachère (J en année)	C+J	Coefficient d'Allan (L)
Natitingou	5	7	12	2,4
Boukombé	8	3	11	1,37
Tout le secteur	6,5	5	11,5	1,76

Source : Enquête de terrain, mars 2016

Il ressort de l'examen du tableau XXX que le coefficient d'Allan aussi bien dans les Communes prises individuellement que dans l'ensemble du secteur d'étude est inférieur à 5. Les terres cultivables dans cette zone d'étude subissent donc une forte pression. Ces dernières sont surexploitées, d'où leur rapide épuisement. Plusieurs facteurs peuvent justifier cet épuisement des terres agricoles. La technique de culture itinérante sur brûlis par exemple est très répandue dans ce milieu. 79 % des exploitants agricoles enquêtés pratiquent cette technique. Ils affirment qu'elle est utilisée pour faciliter les tâches liées au défrichement des terres emblavées qui deviennent d'année en année plus importantes à cause de la croissance démographique et des aléas climatiques. Les terres agricoles de ce secteur sont donc très dégradées et ont une influence sur la production agricole.

4.1.3.5. Elevage et transhumance

Dans le secteur Natitingou-Boukombé, l'élevage occupe la seconde position après l'agriculture. Il est pratiqué de façon traditionnelle dans tous les ménages. Il porte notamment sur les bovins, les caprins, les porcins, les porcins et la volaille. Excepté cette dernière pour laquelle on note quelques élevages semi-intensifs, l'élevage dans ce secteur est principalement extensif (CeRPA Atacora, 2015). L'élevage de bovins revêt deux caractères : un élevage local concernant une race rustique très résistante appelée « race somba » ; et un élevage transhumant (Ouassa-Kouaro, 2008) pratiqué par les populations peulhs locales et celles venues des pays limitrophes

(photo 10). Les peulh dont le principal mode de conduite est la transhumance, pratique l'élevage des bovins. Le secteur Natitingou-Boukombé est une zone très vaste, dotée d'importants atouts fourragers. Il est donc pris systématiquement d'assaut à chaque saison sèche entre novembre et décembre par les transhumants peulh en provenance des Communes voisines de Kouandé, Péhunco, Kérou, des départements du Borgou ou même du Burkina Faso et du Niger voisins. Ce phénomène donne lieu souvent à des conflits entre éleveurs et agriculteurs car la période d'arrivée des transhumants correspond à celle des récoltes des produits vivriers. La destruction du couvert végétal, surtout par le surpâturage et l'élagage sauvage et souvent total des arbres dont en tête *Khaya senegalensis* (caïlcédrat) constitue l'un des problèmes liés à l'élevage. La transhumance étant un phénomène social, l'on ne saurait prétendre l'enrayer. Cependant, on peut mettre en place des stratégies ou projets pour réduire ses effets néfastes.



Photo 10 : Troupeau de bovins à Dipoli (Commune de Boukombé)

Prise de vue : AGBANOU T., mars 2016

Cette photo 10 présente des bœufs en pâturage pendant la saison sèche. Ils sont conduits par des nomades peulhs qui sont propriétaires ou ayant en charge l'élevage de ces bœufs. En effet, ces bêtes sont parfois tous ou en partie confiés par des citoyens riches aux peulh pour entretien. Au bout d'un certains nombres d'années, ces bêtes pourront être vendus et les bénéfices partagés entre propriétaire et éleveur.

4.1.3.6. Exploitation forestière et production d'énergie biomasse

L'exploitation forestière est scindée en deux : il s'agit de l'exploitation du bois d'œuvre et la production d'énergie biomasse.

✓ **Exploitation du bois d'œuvre**

Elle est réglementée dans ce milieu. En effet, cette activité n'est possible que dans la Commune de Natitingou car Boukombé est déclaré 'zone rouge' car cette dernière subit de plus en plus le phénomène de désertification à cause de sa proximité avec la zone sahélienne (le Burkina-Faso et le Niger). L'exploitation de bois dans la Commune de Natitingou est subordonnée à une demande d'autorisation (permis de coupe) auprès des services des eaux et forêts. Toutefois, il y existe dans les deux Communes de la zone d'étude des exploitants clandestins. Les différentes espèces ligneuses exploitées dans ce milieu sont : teck (*Tectona grandis*), eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis*), caïlcédrat (*Khaya senegalensis*), gméline (*Gmelina arborea*), veine (*Pterocarpus erinaneus*), afzélia (*Afzelia africana*), ébène (*Diospiros mespiliformis*) et moringa (*Moringa oleifera*). Cette exploitation anarchique et clandestine malgré la présence des services des eaux et forêts sur le territoire constitue l'un des facteurs de dégradation de l'environnement.

✓ **Production d'énergie**

L'exploitation du bois (surtout le bois d'œuvre) dans ce milieu est réglementée.

Dans ce milieu, à cause du niveau de vie des populations et surtout du coût élevé du gaz domestique, tous les ménages utilisent le bois énergie (soit le bois de chauffe ou le charbon de bois). En effet, à cause du pouvoir calorifique très élevé de certaines espèces, leurs arbres sont émondés ou simplement coupés pour fabrication de charbon de bois (photo 11) ou pour servir de bois de chauffe (photo 12).



Photo 11 : Charbon de bois à Kouaba



Photo 12 : Bois de chauffe à Yétapo

Prises de vue : AGBANOU T., mars 2016

4.1.3.7. Exploitation minière

Le substratum géologique en place dans le secteur d'étude est très exploité à des fins commerciales. L'exploitation de gravier dans le milieu est très ancienne et se fait sous deux formes (photos 13) à savoir :

- Le concassage des gros galets en gravillons. Ce type d'activité concerne surtout les femmes d'un âge avancé. Cette étape de concassage fait suite à celle du déterrement des gros blocs de pierre.
- Le tamisage de la terre y compris les conglomérats. Cette forme d'exploitation donne la meilleure qualité de gravier bien appréciée par les acheteurs pour les travaux de pavage et de construction.

Les blocs de roche de cette partie de la chaîne de l'Atacora sont taillés en des formes régulières (circulaire ou rectangulaire) par les exploitants miniers. Pour cela, de vastes superficies de végétation sont détruites (photo 14). Ce qui dénude le sol et l'expose à l'érosion. Ces pierres taillées servent ou remplacent non seulement les carreaux des planchers mais surtout sont utilisées pour embellir les constructions et sont par conséquent demandées sur de nombreux chantiers de construction d'habitations dans les grands centres urbains comme Natitingou, Cotonou, Porto-Novo et Parakou. Soulignons que cette activité est récente.



Photo 13 : Blocs de pierres concassés sous forme de gravier à Ouroubona



Photo 14 : Site d'exploitation de pierre ornementale exploité à Kota

Prises de vue : AGBANOU T., mars 2016

La photo 13 présente les pierres concassées en graviers. Alors que la photo 14 présente une carrière de pierres ornementales en cours d'exploitation. Les outils utilisés dans cette activité

sont purement artisanaux. A ces formes d'exploitation minière s'ajoute l'exploitation clandestine de l'or dans les arrondissements de Perma et de Kotopounga.

4.2. Catégories d'occupation des sols affectés par chaque facteur explicatif

Les différents facteurs explicatifs des changements d'occupation des sols identifiés ci-dessus sont présentés et commentés dans le tableau XXXI ci-dessous avec les différentes catégories d'occupation du sol qu'ils affectent. L'analyse de la distribution des changements des types d'occupation a été faite en fonction de chaque variable.

Tableau XXXI : Facteurs explicatifs des changements d'occupation des sols

N°	Facteurs	Catégories d'occupation du sol affectées	Commentaires
Démographie			
1	Densité	Toutes les catégories d'occupation du sol	L'évolution démographique continue constatée dans ce milieu favorise une augmentation des emblavures et donc une destruction du couvert végétal.
Milieu physique			
2	Pente	Mosaïques de cultures et jachères	L'importance des pentes constitue ici un facteur limitant pour le développement des champs. Les flancs de collines à forte pente restent des zones plus ou moins stables. Car seuls les feux de végétation et les péjorations climatiques ont une influence sur le couvert végétal.
3	Relief	Mosaïques de cultures et jachères	Plus le relief est accidenté, moins il y a de champs surtout quand on se retrouve dans des zones rocheuses.
4	Types de sols	Mosaïques de cultures et jachères	La qualité des sols (peu évolués et moins profonds) influence les rendements et oblige les agriculteurs à emblaver de vastes superficies.
5	Précipitations	Toutes les catégories d'occupation du sol	La mauvaise répartition spatiale et temporelle des pluies a une influence sur le bilan hydrologique du milieu et sur le développement de la production végétale.
6	Hydrographie	Forêts galeries, marécages,	Leur existence dépend de la proximité aux cours et surfaces d'eau
Foncier			
7	Propriété foncière	Agglomération, mosaïques de cultures et jachères	Le mode d'accès à la terre surtout en milieu rural est un catalyseur de la destruction du couvert végétal. En effet, le principal mode d'accès est l'héritage.
8	Taille des parcelles	Agglomération, mosaïques de cultures et jachères	Les techniques agricoles pratiquées (agriculture extensive sur brûlis) favorisent l'appauvrissement des sols, d'où la nécessité d'emblavure plus importante de surface. Par ricoché une destruction massive du couvert végétal.
Accessibilité			
9	Réseau routier	Agglomération et toutes les formations végétales	La densification du réseau routier favorise l'urbanisation et surtout l'accès aux ressources végétales par les populations
Réglementations			
10	Réglementations forestières et protection de l'environnement	Formations végétales	Absence d'application rigoureuse des textes juridiques sur la protection des ressources végétales (surtout ligneuses).
Economie			

11	Activités agricoles	Toutes les catégories d'occupation du sol	La diversité des cultures pratiquées (céréales, racines et tubercules, légumineux, cultures de rente) et la forte demande en aliments induisent l'emblavure de vastes superficies. Une politique agricole en inadéquation avec la gestion durable des ressources naturelles.
12	Arboriculture	Plantations	Il y a dans ce milieu plusieurs plantations de teck, de caïlcédrat, de gmelina, etc. L'augmentation des superficies des plantations est favorisée par le développement de l'agroforesterie (grandes fermes de mangues, d'acajou, etc.).
13	Exploitation du bois - énergie	Forêts claires, Savanes arborées et arbustives	La biomasse (bois de chauffage et charbon de bois) reste la principale source d'énergie dans les ménages
14	Surpâturage	Savanes arborées et arbustives	L'absence de zones de pâturage et de couloir de transhumances favorise la divagation des bêtes des transhumants qui détruisent le couvert végétal sur leur passage. L'absence de contrôle et de suivi de la transhumance transfrontalière.
15	Exploitation frauduleuse de bois d'œuvre et de service	Forêts denses, forêts claires et savanes boisées, savanes arborées et arbustives	L'exploitation clandestine du bois favorise la régression de la couverture ligneuse.
16	Exploitation de graviers et pierres ornementales	Savanes saxicoles	La multiplication des sites d'extraction de pierres ornementales (utilisées comme carreau dans les constructions) et des pierres concassées (graviers) sur les flancs de collines et sur les sols rocheux favorise la destruction du couvert végétal et la dégradation des sols.
17	Activités touristiques	Agglomérations	La présence de plusieurs sites touristiques (chute de Kota, Tata somba, sites pittoresques, ...) augmente la demande en logements et entraîne l'augmentation de la pression foncière et les prix de l'immobilier.
Social			
18	Bosquet de forêts sacrées	Forêts denses, claires et Savanes boisées	Prolifération des dieux (divinités endogènes) dans ce milieu favorise au moins la conservation de quelques portions de forêts claires et savanes boisées dans ce milieu. Certains de ces dieux sont installés dans ces réserves avec des totems d'interdictions de coupe des arbres. Ceci permet de sauver une petite partie du couvert végétal même si avec l'avènement des religions monothéistes tous ces totems ne sont plus respectés.
19	Feux de végétation	Formations végétales	A chaque saison sèche (novembre - mars) on assiste aux feux de végétation qui détruisent tout sur leur passage. Ce phénomène ne favorise par l'épanouissement du couvert végétal.

Il ressort de l'examen du tableau XXXI que les facteurs explicatifs des changements d'occupation du sol dans ce milieu sont aussi des facteurs qualitatifs que des facteurs quantitatifs. De façon synthétique, les facteurs explicatifs spatialisables pris en compte dans ce travail sont la densité, la pente, le relief, les types de sols, les distances aux champs, aux routes, aux agglomérations et aux plantations (tableau XXXII).

Tableau XXXII : Variables spatialisées explicatives des changements d'occupation des sols

Facteurs	Description	Source	Périodes (dates)
Densité de la population	Nombre d'habitants au km ²	INSAE	1979, 1992, 2002 et 2013
Pente	Pente (en degré)	MNT	2014
Relief	Altitude (en mètre)	MNT	2014
Types de sols	Différents types de sols	Fond pédologique (Bénin)	1996
Distances aux champs	Distances aux champs les plus proches	SIG	2016
Distances aux routes	Distances aux routes (routes inter-Etat, primaires, secondaires, pistes)	SIG	2014
Distances aux agglomérations	Distances aux habitations les plus proches	SIG	2016
Distances aux plantations	Distances aux plantations les plus proches	SIG	2016

4.3. Interrelation entre les différents facteurs explicatifs des changements d'occupation du sol

Les différents facteurs explicatifs agissent simultanément sur l'occupation. Une analyse systémique a donc permis d'établir les relations entre ces différents facteurs (figure 64).

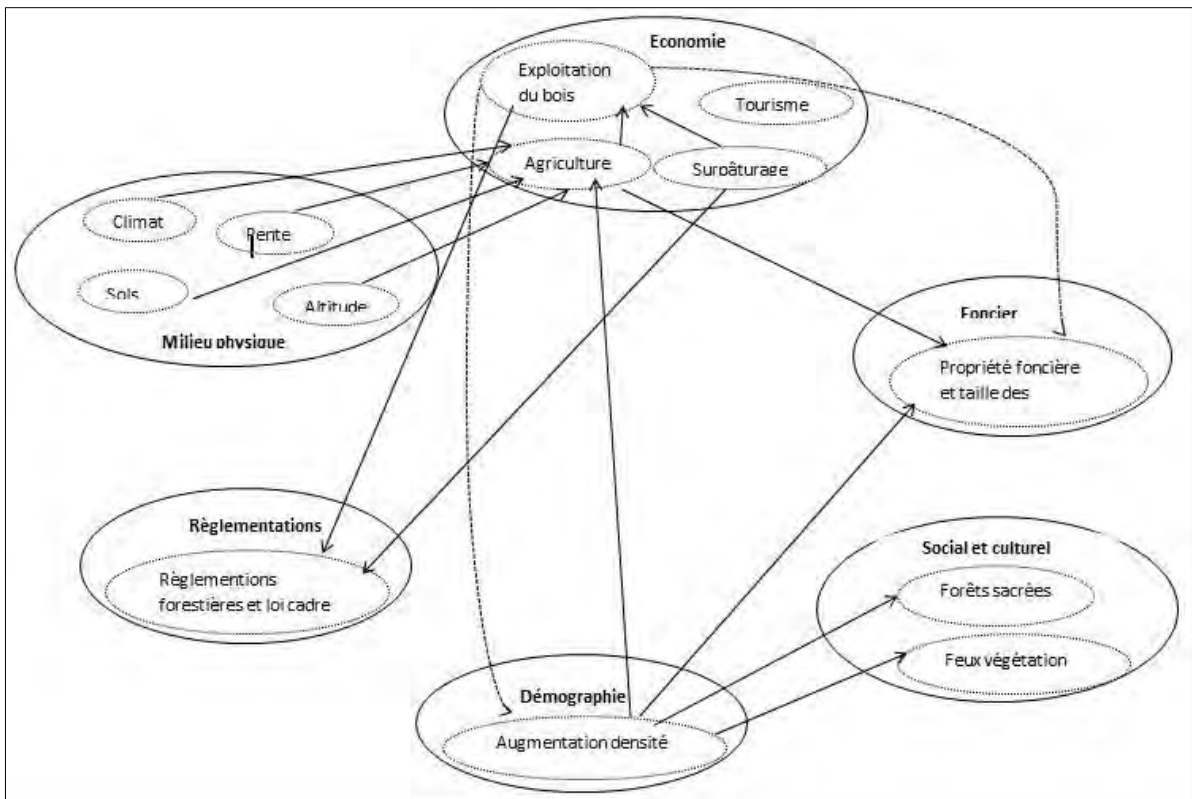


Figure 64 : Relations et interrelations entre les différents facteurs explicatifs des changements d'occupation des sols

Il ressort de l'analyse de cette figure 64 que les caractéristiques physiques du milieu d'étude (climat, sols, pente et altitude) et les modes d'accès aux terres favorisent le développement des activités agricoles. L'intensification de ces activités est liée à l'explosion démographique. Cette dernière reste un facteur déterminant de l'exploitation anarchique du bois au mépris des réglementations en vigueur (régaliennes et religieuses) dans le pays.

4.4. Perception des populations des facteurs de changement d'usage du sol

4.4.1. Valeurs de diversité et d'équitabilité des déterminants de changement d'usage des sols

Afin d'apprécier les connaissances des populations locales sur les déterminants de changement d'usage des sols, les valeurs de diversité et d'équitabilité des déterminants de changement d'usage du sol ont été calculés (tableau XXXIII).

Tableau XXXIII : Paramètres quantitatifs du choix des déterminants de changement d'usage du sol

Acteurs	Valeur de diversité de l'enquête (DV)	Valeur d'équitabilité de l'enquête
Agriculteurs	0,02	0,01
Exploitants forestiers	0,04	0,02
Eleveurs	0,31	0,03
Moyenne ± Ecart-type	0,12 ± 0,12	0,02 ± 0,1

Source : Enquête de terrain, février 2016

Les valeurs moyennes de diversité et d'équitabilité des enquêtés par rapport aux déterminants de changement d'usage des sols sont respectivement de 0,12 et de 0,02. Ces valeurs qui sont relativement faibles ($< 0,5$) montrent que la connaissance des populations locales sur les déterminants n'est pas homogène (est inégalement répartie). C'est donc une infirme partie de la population qui détient la majeure partie des connaissances sur ces déterminants. Il n'est donc pas facile pour les populations locales d'établir des relations de causalité entre les déterminants de changement d'usage des sols.

4.4.2. Déterminants de changement d'usage du sol

Selon les enquêtes de terrain, plusieurs facteurs contribuent aux changements d'usage du sol dans ce milieu. Pour identifier les principaux facteurs, les indices d'importance des déterminants capables d'imprimer des changements d'usage aux sols ont été calculés (figure 65).

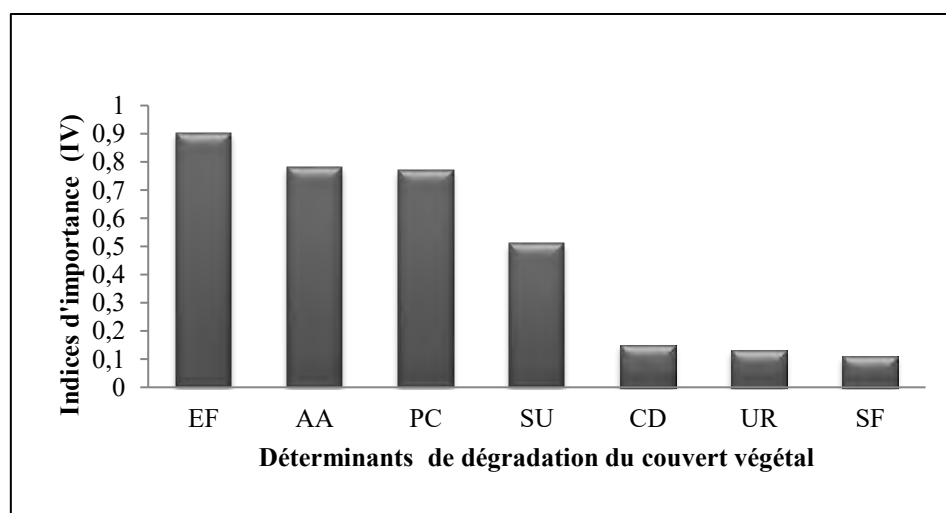


Figure 65 : Indice d'importance des déterminants de dégradation du couvert végétal

Source : Enquête de terrain, février 2016

Légende : EF : Exploitation forestière ; AA : Activités agricoles ; PC : Perturbations climatiques ; SU : Surpâturage ; CD : Croissance démographique ; UR : Urbanisation ; SF : Spéculation foncière.

L'examen de la figure 65 montre que l'exploitation forestière, les activités agricoles (expansion des terres, pauvreté des sols, expansion de l'agroforesterie), les perturbations climatiques (variabilité climatique) et le surpâturage sont selon les populations les facteurs déterminants qui contribuent beaucoup au changement d'usage des sols.

Les facteurs intervenant dans les changements d'utilisation des sols dans ce milieu sont donc purement anthropiques. Il s'ensuit une nécessité de détecter et de suivre ces changements. Les méthodes utilisées pour le faire sont nombreuses.

4.4.3. Lecture croisée de la perception des déterminants de changement d'usage du sol des différents acteurs

L'analyse factorielle de correspondances a été faite sur les données d'occurrence des différents facteurs responsables de la dégradation des formations végétales selon les populations. La projection des différents déterminants et des différentes catégories socio-professionnelles dans le système d'axes factoriels a permis d'obtenir une lecture croisée de leurs perceptions.

Les figures 66 et 67 présentent la lecture croisée de la perception des populations sur respectivement le premier et le deuxième facteur qui favorisent les changements d'occupation du sol.

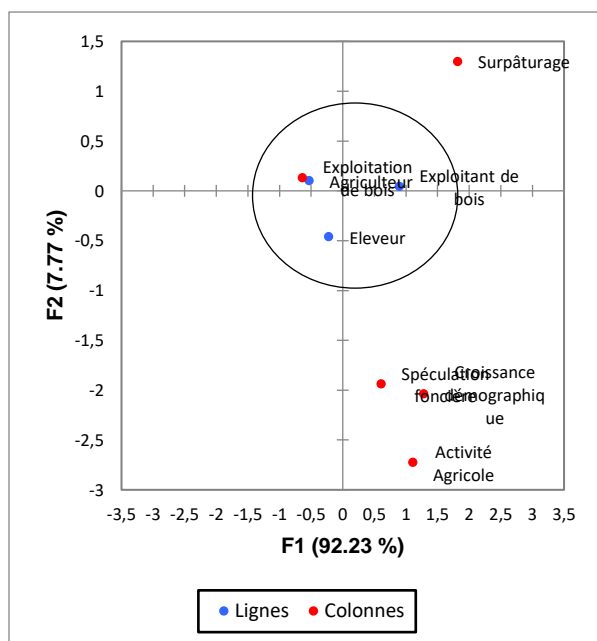


Figure 66 : Perception des acteurs sur le premier facteur déterminant des changements d'occupation du sol

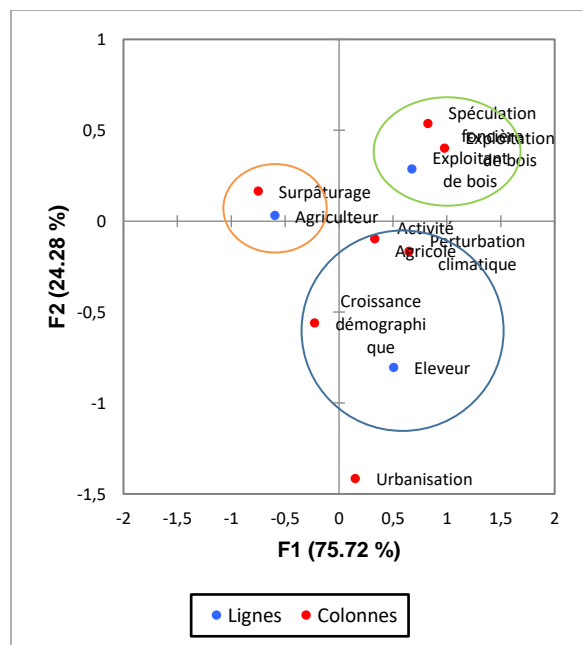


Figure 67 : Perception des acteurs sur le deuxième facteur déterminant des changements d'occupation du sol

Il ressort de l'examen de la figure 66 que la majorité des acteurs (agriculteurs, éleveurs et exploitant de bois) s'accordent que l'exploitation du bois est le premier facteur responsable des changements d'occupation du sol.

En effet, l'exploitation du bois énergie (bois de chauffage et charbon de bois) et du bois de service et d'œuvre est très répandue dans ce milieu. Cette activité pratiquée à des fins commerciales et domestiques continue clandestinement malgré les nombreux textes et lois mis en vigueur par les autorités politico-administratives du pays pour protéger les ressources végétales. Pour les éleveurs, les activités agricoles, la croissance démographique et la spéculation foncière sont des facteurs déterminants de la dynamique de l'occupation des sols. La lecture de la figure 67 indique que le surpâturage constitue pour les agriculteurs le deuxième facteur déterminant des changements d'occupation du sol. Cette perception s'oppose à celle des éleveurs pour qui les activités agricoles, les perturbations climatiques et la croissance démographique constituent des facteurs déterminants. Quant aux exploitants de bois, la spéculation foncière et l'exploitation de bois constituent des facteurs très déterminants des changements d'occupation du sol observé.

Les figures 68 et 69 présentent la lecture croisée de la perception des populations sur le troisième et le quatrième facteur qui favorisent les changements d'occupation des sols.

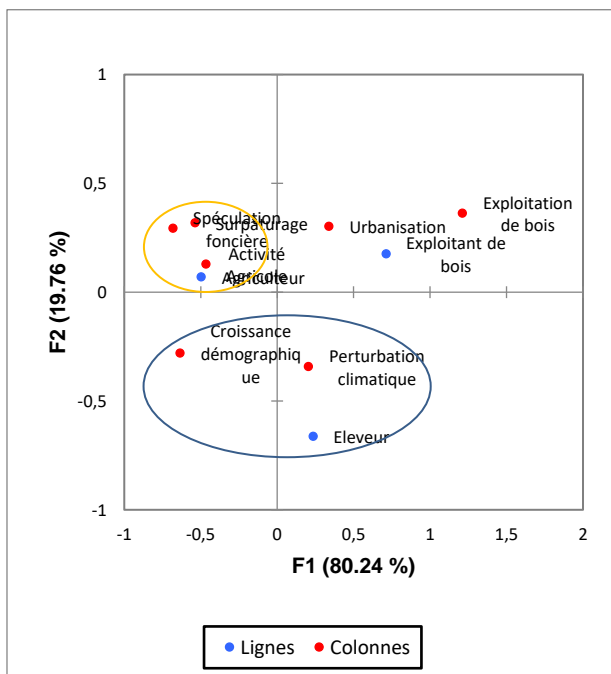


Figure 68 : Perception des acteurs sur le troisième facteur déterminant des changements d'occupation du sol

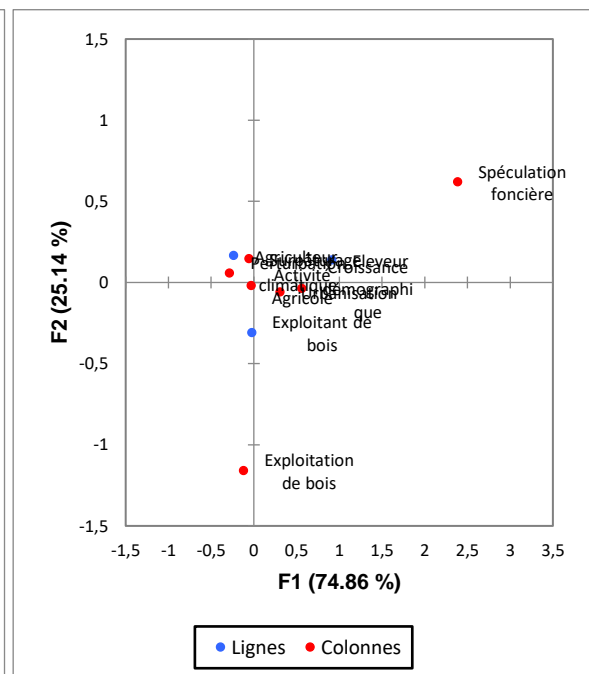


Figure 69 : Perception des acteurs sur le quatrième facteur déterminant des changements d'occupation du sol

Il ressort de la lecture de la figure 68 en considérant l'axe 1 qu'il y a une opposition d'opinions entre les agriculteurs et ceux des éleveurs. En effet, pour les agriculteurs, le surpâturage, la spéculation foncière et les activités agricoles constituent les principaux facteurs déterminants des changements d'occupation du sol. Alors que pour les éleveurs, c'est la croissance démographique et les perturbations climatiques qui influencent les changements d'occupation du sol. Les oppositions d'avis entre agriculteurs et éleveurs soulignent l'éternel conflit entre ces deux acteurs en milieu rural. Quant aux exploitants de bois, l'urbanisation et l'exploitation de bois constituent les facteurs importants influençant la dynamique d'occupation du sol.

Les activités agricoles étant intimement liées au régime pluviométrique, les agriculteurs pensent que les perturbations climatiques ont des effets négatifs sur les plantes cultivées et sur le couvert végétal naturel. Les perturbations climatiques considérées ici sont surtout la régression et la mauvaise répartition spatio-temporelle de la pluviosité dans cette région. Ceci a pour conséquence la régression des formations végétales.

En ce qui concerne le régime foncier, le caractère individuel et collectif des titres de propriété avec une quasi absence des règles d'affectation des terres selon leurs aptitudes est la cause de l'exploitation abusive des ressources végétales. Aussi, les migrants à qui les terres sont-elles prêtées ne font pas d'investissement dans le sens d'amélioration de la fertilité du sol à long terme. Ils privilégient des stratégies de gestion du sol qui maximisent la production à court terme au détriment du couvert végétal et de la fertilité du sol.

Sur la figure 69, il n'y a pas une discrimination tranchée des opinions des différents acteurs sur le quatrième facteur responsable des changements d'occupation du sol. Mais les facteurs les plus cités sont : les perturbations climatiques, le surpâturage, la croissance démographique, les activités agricoles et l'urbanisation.

Conclusion partielle

Au terme de ce chapitre, on retient que plusieurs facteurs influencent le choix d'usage des terres dans le Nord-Ouest du Bénin. Si pour la majorité des acteurs, l'unanimité se fait autour de certains facteurs responsables de la dynamique de l'occupation du sol, pour d'autres, il y a une opposition d'opinion. C'est le cas entre agriculteurs et éleveurs qui se jettent le tort mutuellement. Ceci justifie l'éternel conflit qui existe entre agriculteurs et éleveurs. Tous ces facteurs devront être intégrés dans le modèle prospectif afin d'obtenir une prédiction réaliste de la dynamique future des terres.

**TROISIEME PARTIE : SIMULATION PROSPECTIVE DE
L'OCCUPATION DU SOL**

Chapitre V : Modélisation prospective de l'occupation du sol avec le modèle Perceptron multicouche : Land Change Modeler (LCM)

Introduction partielle

Au cours de cette dernière décennie plusieurs modèles ou applications peu utilisés auparavant ont été développés. Le modèle prospectif a pour but d'imaginer les futurs possibles de l'occupation du sol future suivant divers scénarios définis par l'utilisateur. Les applications et modèles prospectifs sont aujourd'hui des outils de planification et de gestion territoriale. Le fait de pouvoir représenter l'organisation paysagère et planifier les évolutions possibles permet de détecter où peuvent survenir les changements, caractériser ces derniers de manière qualitative et quantitative. Une vision future permet une meilleure planification territoriale. Habituellement dans la modélisation scientifique, l'objet ou le phénomène à modéliser est conçu et interprété comme un système : « *La modélisation sous-entend presque toujours la notion de système* » (Langlois 2010, p.30), où le modèle joue le rôle d'un substitut pour le système. De même pour les études de modélisation LUCC, la vision de l'objet à modéliser comme un système est dominante, ainsi par exemple Veldkamp *et al.*, (2001, p.111) en étudiant la modélisation spatialement explicite du changement d'occupation/utilisation des sols, parlent du « *système d'utilisation du sol* » qui opère dans l'interface des « *systèmes social et naturel* ». Le fait de pouvoir représenter l'organisation paysagère et planifier les évolutions possibles permet de détecter où peuvent survenir les changements, caractériser ces derniers de manière qualitative (quelles transitions vont s'opérer ? qu'est ce qui ne changera pas ?) et quantitative (quelle surface peut être concernée par telle ou telle transition ?). Une vision future permet une meilleure planification territoriale.

Il existe trois types de modélisation des changements d'occupation et d'utilisation des sols : la représentation spatiale des états successifs (modélisation analytique), la modélisation systémique et la modélisation dynamique (Houet, 2006). Dans le cadre de cette étude c'est la modélisation dynamique qui nous intéresse.

Pour la modélisation des changements d'occupation et d'utilisation des sols, plusieurs modèles ou applications sont généralement utilisés.

5.1. Présentation de quelques modèles de simulation : approche comparative

5.1.1. CA-Markov

CA-Markov est une procédure de prédiction de changements d'occupation et d'utilisation des sols combinant chaînes de Markov (quantité), évaluation multicritère (EMC) (localisation) et filtrage, une procédure qualifiée par les éditeurs du logiciel d'Automate Cellulaire (AC) (Eastman, 2006).

Les chaînes markoviennes analysent deux images d'occupation du sol correspondant à deux dates différentes et produisent, pour une date future choisie deux matrices de transition (probabilité et surface concernée en pixels pour la persistance et la transition), et un ensemble d'images de probabilité conditionnelle (Eastman, 2006). Elles permettent « *de calculer un état futur à partir de l'état présent connu, en se basant sur l'observation des évolutions passées et leur probabilité* » (Antoni, 2006, p. 6). Les limites de l'analyse markovienne caractérisées par la non-allocation spatiale de ces transitions, peuvent être corrigées en ayant recours à une évaluation multicritère (Paegelow & Camacho Olmedo, 2005).

5.1.2. Land Change Modeler (LCM)

Land Change Modeler a été développé afin d'étudier les changements d'occupation et d'utilisation des sols, de projeter leur dynamique dans le futur et d'en évaluer l'impact sur la biodiversité (Eastman, 2006). Ce modèle utilise les chaînes de Markov pour estimer les quantités de changement et le modélisateur doit intégrer les quantités (en pixels) de changements pour chaque année de simulation. Ce modèle se base sur la mise en place de sous-modèle et l'identification de variables explicatives préalablement testées.

Il met en œuvre des méthodes et techniques classiques pour la modélisation (chaînes de Markov, analyse statistique et réseau de neurones multicouches, automates cellulaires et allocation multi-objectifs) (Dodane *et al.*, 2011). Le principe général de LCM est d'utiliser l'observation des changements de types d'occupation du sol passés, appelés transitions d'un état à un autre, pour construire un modèle de répartition de l'occupation du sol dans le futur sur le territoire, en fonction de facteurs déterminés (physiques, géographiques, etc.).

Pour modéliser les changements d'occupation et d'utilisation des sols, LCM utilise soit la technique des réseaux neuronaux artificiels multicouches (*Multi-Layer Perceptron* ou MLP), soit une régression logistique.

5.1.3. Automate Cellulaire (AC)

L'Automate Cellulaire (AC) est une autre forme de modèles stochastiques qui discrétisent un espace continu en une série de cellules. La littérature scientifique faisant usage des AC est abondante. 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. L'AC est né de la convergence d'idées de Von Neumann qui cherchait à résoudre le problème de l'auto-production du vivant et d'Ulam qui travaillait sur les objets géométriques récurrents. Il peut se définir comme un outil informatique représentant un espace discret et défini à une, à deux, voire trois dimensions composées par juxtaposition immédiate de « cellules » triangulaires, carrées ou hexagonales ayant un ensemble d'états discrets et finis. Il est régi par un ensemble d'états, un ensemble de règles de transition des états et un mécanisme d'évolution temporelle gérant les transitions d'états des cellules. Il est constitué de cellules vivantes et mortes. La durée de vie des cellules (individus) est régie par une fonction aléatoire gaussienne définie par une espérance de vie et un écart-type qui est propre à sa classe. Chaque individu possède une durée maximale de vie (*AgeMax*) qui lui est donnée à sa naissance, en fonction de l'espérance et de l'écart-type de sa classe. Si les conditions d'environnement sont défavorables, il peut mourir prématurément. A chaque instant, un individu possède une force de vie. Lorsque la force de vie d'un individu est épuisée, celui-ci meurt et se transforme dans un autre état qui est propre à sa classe.

Les chaînes de Markov sont utilisées en couplage avec ce modèle pour obtenir des probabilités de transition pour les différents états de l'occupation des sols jusqu'à une date $t+n$, à l'aide des changements observés entre $t-n$ et t (Paegelow and Calmacho Olmedo, 2008).

On distingue trois types d'interaction : présence dans le voisinage, absence dans le voisinage et l'accessibilité. Ce caractère spatialement explicite des automates cellulaires provient donc de la prise en compte de son voisinage dans le choix d'évolution (attributaires) au cours du temps. Chaque automate possède un comportement défini. Le fonctionnement de l'ensemble permet de produire des phénomènes spatiaux d'autoreproduction, de diffusion ou encore de ségrégation.

L'évaluation des modèles est basée sur la comparaison entre la carte simulée et une carte de la situation réelle observée (carte réelle). L'évaluation peut concerner la ou les carte(s) de probabilité de changement ou les cartes des futures occupations et utilisations des sols. Dans le premier cas, la carte des probabilités de changement est comparée avec la carte de la situation réelle. Dans le second cas, les cartes simulée et réelle sont comparées. Toutefois, la dynamique

du système repose sur des interactions locales entre les entités spatiales, ce qui implique une homogénéité des comportements individuels et qui, d'après Bonnefoy (2001) met en évidence la difficile prise en compte des interactions sociales entre les entités d'un système (Houet, 2006).

5.1.4. Les réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones ont été les premiers à connaître un essor important. Leur création est issue des premières tentatives de modélisation des principes de base régissant le fonctionnement du cerveau même si leur champ d'application s'est, depuis, considérablement élargi, notamment au traitement de données statistiques.

Un neurone est une cellule qui concentre des signaux, qui les traite et qui les traduit en une réponse (Wira, 2009). Pour Koffi *et al.* (2014) et Ammar (2007), un réseau de neurones est défini comme un assemblage d'éléments de structure identique appelés cellules (ou neurones) interconnectées à l'instar des cellules du système nerveux des vertébrés. Ces neurones opèrent en parallèle et sont connectés entre eux par des poids. C'est un système d'opérateurs non linéaires interconnectés, recevant des signaux de l'extérieur par ses entrées, et délivrant des signaux de sortie, qui sont les activités de certains neurones.

Selon Koffi *et al.* (2014) et Coulibaly *et al.* (1999), le réseau de neurones est défini comme un assemblage d'éléments de structure identique appelés cellules ou neurones interconnectées à l'instar des cellules du système nerveux des vertébrés. Plusieurs auteurs se sont inspirés des neurones biologiques pour mettre au point les neurones formels ou artificiels. Comme dans la nature, le fonctionnement du réseau (de neurones) est fortement influencé par la connexion des éléments entre eux. On peut entraîner un réseau de neurones pour une tâche spécifique (reconnaissance de caractères par exemple) en ajustant les valeurs des connections (ou poids) entre les éléments (neurones). Des similitudes ont donc été établies entre les éléments des neurones biologiques et les composantes des Neurones Formels ou Artificiels (Figure 70).

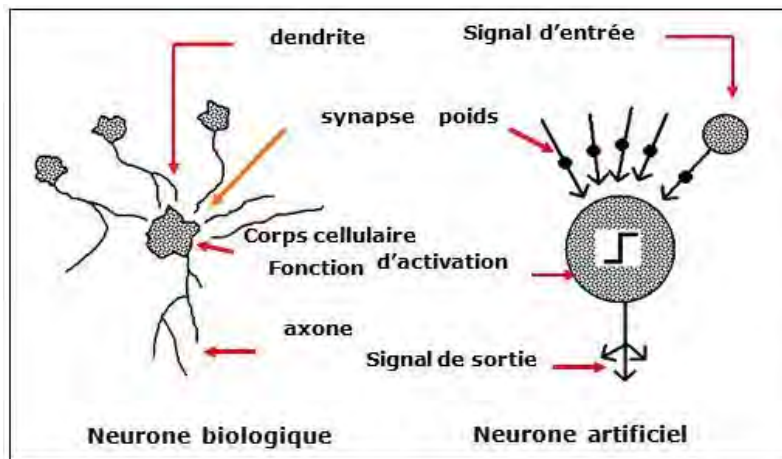


Figure 70 : Analogie entre neurone biologique et neurone formel

Source : Koffi *et al.* (2014) et Bamba *et al.* (2008)

Plusieurs architectures de réseaux de neurones existent (Bamba *et al.*, 2008). Mais, le Perceptron Multicouches, qui est une extension du Perceptron Monocouche, avec une ou plusieurs couches cachées est souvent utilisé. Au niveau de cette architecture, chaque neurone dans une couche est connecté à tous les neurones de la couche précédente et de la couche suivante (excepté pour les couches d'entrée et de sortie) et il n'y a pas de connexions entre les cellules d'une même couche.

Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones en amont ou des capteurs composant la machine dont il fait partie. A chacune de ses entrées est associé un poids représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones en aval. A chaque connexion est associé un poids.

Mis à part les couches d'entrée et de sortie, il faut décider du nombre de couches intermédiaires ou cachées. Sans couche cachée, le réseau n'offre que de faibles possibilités d'adaptation. Néanmoins, il a été démontré qu'un Perceptron Multicouches avec une seule couche cachée pourvue d'un nombre suffisant de neurones, peut approximer n'importe quelle fonction avec la précision souhaitée (Ammar, 2007 ; Hornik, 1991).

Après le développement du réseau de neurones, des tests s'imposent afin de vérifier la qualité des prévisions du modèle neuronal. Une validation rigoureuse du modèle développé se traduit par une proportion importante de prédictions exactes sur l'ensemble de la validation. Lorsque les performances du réseau sont satisfaisantes, le modèle est appliqué pour la prédiction définitive de l'occupation du sol du secteur d'étude.

5.1.5. Système multi-agent (SMA)

Les modèles multi-agents (ou Systèmes Multi-Agents – SMA) sont les modèles à base d'intelligence artificielle souvent utilisés (Bonney *et al.*, 2000 ; Parker *et al.*, 2003 ; Daudé, 2004). Ils permettent d'appréhender et de représenter des systèmes complexes et dynamiques en modélisant directement les individus, leurs comportements et leurs interactions.

“ Un agent est une entité réelle ou virtuelle évoluant dans un environnement, capable de le percevoir, qui peut communiquer avec d'autres agents, qui exhibe un comportement autonome, lequel peut être vu comme la conséquence de ses connaissances, de ses interactions avec d'autres agents et des buts qu'il poursuit”.

Dans ce modèle, il y a deux types d'agents : les agents réactifs et les agents cognitifs. Les premiers se limitent à réagir à des stimuli externes pour mettre en œuvre une action et les seconds ont une capacité à mémoriser des connaissances sur l'environnement et les autres agents et à avoir une représentation du milieu dans lequel ils évoluent.

A l'inverse des automates cellulaires, les SMA sont fondés sur le principe d'interaction soit entre les agents par le biais des messages, soit entre l'agent et son environnement par l'intermédiaire de signaux. Ici l'interaction n'est plus limitée à un voisinage, ni même à une relation spatiale. Dans ce modèle, chaque agent a des informations ou des capacités de résolution de problèmes limitées, ainsi chaque agent a un point de vue partiel. Il n'y a aucun contrôle global (données décentralisées et calcul asynchrone).

5.1.6. Dinamica – EGO

Dinamica– EGO n'est pas un modèle à proprement parler. C'est un langage de programmation visuel ou logiciel qui met à disposition de l'utilisateur une série d'outils permettant de concevoir un modèle. Parmi ces outils et à l'image d'un langage de programmation, on retrouve : des structures de contrôle : boucles de recherche, boucles systématiques, conditions ; des outils de gestion de données : lecture et écriture d'un fichier, conversion ; des variables de type entiers, décimaux, tuples, tables, cartes, etc. ; des contrôleurs pouvant s'apparenter à des fonctions : outils d'algèbre de cartes, calcul de distances, etc. ; des conteneurs spécifiques au logiciel : conteneurs de sous-régions, conteneurs de dossier de travail ; et enfin des contrôleurs plus complexes adaptés à la modélisation : automates cellulaires, outils de gestion des quantités de changement, outils de calcul de cartes de probabilités.

Dinamica-EGO produit des scripts dans un langage de programmation qui lui est propre, l'EGO. Dinamica-EGO en fait une solution logicielle performante pour qui veut concevoir des modèles

spécifiques et personnalisés tout en bénéficiant d'outils propres à la modélisation des changements d'occupation des sols. Depuis les premières versions de Dinamica-EGO au début des années 2000, de nombreux travaux de simulation ont été réalisés grâce à ce logiciel. A l'origine il était utilisé par les initiateurs pour modéliser les zones de forêt au Brésil. Mais aujourd'hui, cet outil est de plus en plus utilisé, y compris pour simuler des changements dans le cadre de thématiques différentes, comme l'urbanisation (Maria de Almeida *et al.*, 2003). La souplesse du logiciel le rend attractif auprès des utilisateurs relevant du cadre de la démarche prospective. Dans la littérature, de nombreux travaux rendent compte de résultats de simulations scénaristiques par le biais de l'ajustement des matrices de transitions (Soares-Filho *et al.*, 2004, 2010) ou de l'altération des cartes de probabilités ou des poids d'évidences (Teixeira *et al.*, 2009), notamment afin de modéliser des restrictions légales comme des zones protégées (Soares-Filho *et al.*, 2010). De plus, des améliorations ont été apportées pour offrir aux utilisateurs finaux une interface claire et compréhensible pour le choix des différents paramètres d'entrées avant l'exécution du modèle. Ces efforts achèvent de placer la plate-forme Dinamica-EGO comme une solution pertinente pour tout projet relevant d'une approche prospective et participative : une souplesse de développement pour des modèles complexes et personnalisés, mais une application finale « user-friendly » pour en encourager l'usage par les acteurs concernés. Depuis les débuts du logiciel, des fonctionnalités avancées ont été développées et imaginées par les utilisateurs - dont certaines sont aujourd'hui implémentées dans Dinamica EGO. Des initiatives ont été menées pour simuler l'influence de l'industrie du papier sur la conservation de la biodiversité en Amazonie (Merry *et al.*, 2009).

Plusieurs travaux de recherche mettent à profit la souplesse de la plate-forme de ce logiciel pour mettre en œuvre des contraintes déterministes dans les modèles de transition. DINAMICA EGO utilisent les chaînes de Markov pour estimer les quantités de changement, le modélisateur doit intégrer les quantités (en pixels) de changements pour chaque année de simulation.

De tous ces programmes, ceux qui offrent plus de flexibilité pour développer des modèles personnalisés sont CA_Markov, DINAMICA et LCM. Alors que SpaCelle et les réseaux de neurones ont une structure rigide qui définit un flux constant de procédures. Ce qui est avantageux pour les nouveaux utilisateurs, la programmation est facile, même pour les utilisateurs sans expérience en programmation, grâce à une interface graphique conviviale (Mas *et al.*, 2011). Le tableau XXXIV ci-dessous présente une étude comparée de quelques modèles présentés plus haut.

Tableau XXXIV : Analyse comparatives de quelques méthodes de simulation d'occupation du sol

Outil de modélisation	Quantité de changement	Probabilité de changement	Allocation spatiale	Dépendance des données	Probabilité de personnalisation	Difficulté de prise en main	
CA_Markov	Matrice de transition markovienne, Algorithme d'ajustement selon des données sous Terrset	Evaluation multi-critères supervisée	Automate cellulaire	Faible	Faible	Moyenne	
CLUE-S	Renseignées par l'utilisateur	Régression logistique multi-variée	Pas d'automates cellulaires Procédure d'allocation itérative	Moyenne	Elevée (interfaçage avec d'autres outils + personnalisation du modèle)	Moyenne ou forte selon le degré de personnalisation	
Land Change Modeler	Matrice de transition markovienne, Algorithme d'ajustement selon des données sous Terrset	Régression logistique, Réseau neuronal (perceptron multi-couches)	Automate cellulaire	Elevée si utilisation de la régression logique Très élevée si utilisation du réseau neuronal	Faible (mais présence de modules applicatifs, notamment dans le domaine de l'écologie)	Faible	
Dinamica-EGO	Matrice de transition markovienne	Poids d'évidence Algorithme génétique	Automate cellulaire Patcher + Expander	Elevée si utilisation des poids d'évidence bruts Moyenne si ajustement des poids d'évidence Très élevé si utilisation des algorithmes génétiques	Elevée (interfaçage avec d'autres outils + nombreux outils de conception et de développement)	Moyenne ou forte selon le degré de personnalisation	

Source : Mas et al., 2011 ; Abdoulaye, 2015

5.1.7. Justification du choix du modèle LCM dans cette étude

Dans le cadre de cette recherche, le choix est porté sur le modèle Land Change Modeler (LCM) incorporé dans le logiciel Terrset (Idrisi auparavant). C'est un logiciel Système d'Informations Géographiques (SIG) et de traitement d'image très complet qui a un mode d'assistance qui facilite le travail et permet à un non spécialiste de le mettre en œuvre.

Ce modèle a été choisi parce qu'il est dynamique (actualise les données à chaque pas de temps) et permet de choisir les transitions à modéliser. De plus, tous les traitements d'images ont été réalisés sur ce logiciel. Et ce modèle LCM permet de calculer certaines métriques de paysagères comme *Net change* et de *Swap*, composantes du LUCC-budget.

Pour Dodane *et al.*, (2011) ce modèle comprend trois éléments :

- Un modèle temporel fondé sur des chaînes de Markov qui pilote la probabilité générale de changement de l'utilisation du sol. Ce modèle est tiré de l'observation du rythme des changements passés.
- Un modèle spatial d'allocation de probabilité de transition fondé sur un calcul statistique de type réseau de neurones (Perceptron multicouche), à partir de variables bien corrélées à l'utilisation du sol. Ce modèle produit une série de cartes indiquant les endroits où la probabilité d'un changement d'utilisation du sol est la plus forte.
- Un algorithme d'allocation multi-objectif stochastique qui pilote la simulation, en calculant les changements d'utilisation du sol à chaque pas de temps, à partir des différentes probabilités qu'un changement se produise. Il alloue les nouvelles utilisations du sol en fonction des probabilités respectives et du rythme global de changement de chacune des transitions.

Les techniques de modélisation avec ce modèle diffèrent en fonction des objectifs et du cadre de l'étude. Mais de façon générale elle comporte trois étapes : le calibrage, la simulation et l'évaluation ou la validation (figure 71).

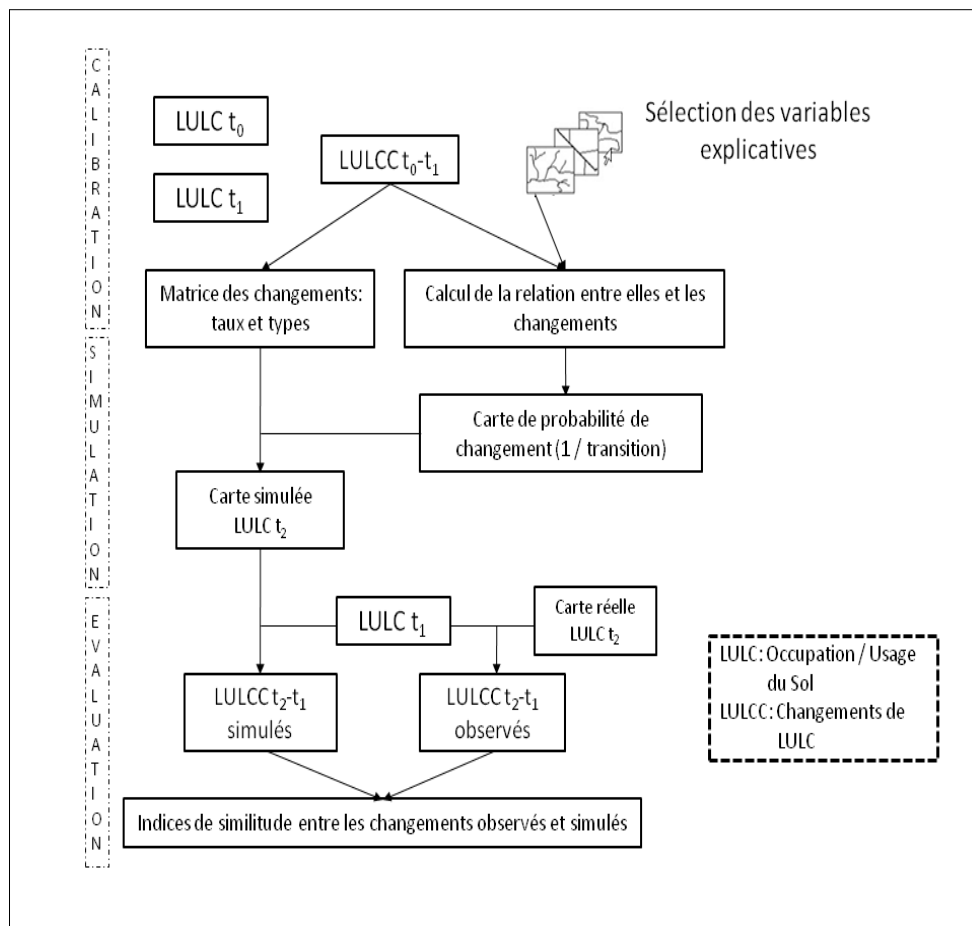


Figure 71 : Démarche générale de modélisation et de simulation des LULCC

Source : Mas *et al.* (2011)

5.2. Simulation de l'occupation du sol avec le modèle Perceptron multicouche : Land Change Modeler (LCM)

5.2.1. Variation du taux annuel d'expansion entre les deux périodes

Le calcul des taux annuels d'évolution des catégories d'occupation du sol au cours des deux périodes 1987-2000 et 2000-2016 a permis d'analyser et de rechercher les raisons de la variation de ces taux d'une période à une autre. Le tableau XXXV présente ces taux par catégories d'occupation du sol et par période.

Tableau XXXV : Evolution des taux d'expansion des catégories d'occupation du sol pour les périodes 1987 – 2000 et 2000 – 2016

Catégorie	Superficie (ha) en 1987	Superficie (ha) en 2000	Superficie (ha) en 2016	Taux (%) évolution 1987 - 2000	Taux (%) évolution 2000 - 2016	Taux (%) annuel d'expansion 1987 - 2000	Taux (%) annuel d'expansion 2000 - 2016
FG	2404,35	1393,92	1268,19	- 42,03	- 09,02	-3,2	- 0,5
FD	7723,98	4167,54	579,51	- 46,04	- 86,09	-3,5	-5,3
FCSB	96253,56	42422,76	4114,58	- 55,93	- 90,30	-4,3	-5,6
SAA	64047,51	91117,17	100514,88	42,26	10,31	3,2	0,1
SS	14628,42	9442,8	9515,34	- 35,45	0,77	-2,7	0,05
PT	47,88	183,69	1067,76	283,65	481,28	21,8	30
MCJ	60346,26	94702,68	125522,19	56,93	32,54	4,3	2
AGG	2556,36	4577,76	5426,37	79,07	18,54	6,08	1,1
Total	248008,32	248008,32	248008,32				

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

L'examen du tableau XXXV permet de constater que les catégories d'occupation du sol n'ont pas évolué au cours des deux périodes 1987-2000 et 2000-2016 au même rythme. Ainsi, pour les forêts denses et forêts claires et savanes boisées qui ont connues une régression au cours des deux périodes, le taux de régression annuel est moins élevé au cours de la période 1987-2000 qu'au cours de la période 2000-2016. Ces formations végétales ont régressé respectivement de 3,5 % et 4,3 % par an au cours de la période 1987 – 2000 et de 5,3 % et 5,6 % au cours de la période 2000 – 2016. Quant aux forêts galeries et savanes saxicoles le taux de régression annuel est moins important au cours de la période 2000-2016 qu'au cours de la période 1987-2000. Les mosaïques de cultures et jachères et les agglomérations, eux ont connu un taux de progression annuelle moins important au cours de la période 2000-2016 (respectivement de 2 % et 1,1 %) qu'au cours de la période 1987-2000 (respectivement de 4,3 % et 6,08 %).

Globalement on peut retenir que de 1987 à 2016, les formations végétales naturelles (forêts denses, forêts claires et savanes boisées) ont régressé au profit des formations anthropiques (mosaïques de cultures et jachères, agglomérations, plantations).

Ces mutations spatiales qui s'expliquent par plusieurs raisons dont l'évolution démographique ne sont pas de nature à faciliter les simulations. En effet, on observe une dynamique très différente entre les deux périodes, pour le moins en ce qui concerne leur intensité. Partant de ce constat, on prend appui sur la période la plus récente (effets de saturation, nouvelles stratégies comme plantations etc. pour la simulation). Du coup, le choix de la période 1987-2000 pour le calibrage du modèle paraît irréaliste. Se basant sur la tendance évolutive à la hausse de la population de 1979 à nos jours avec son corolaire de forte demande de terres cultivables, la

période la plus récente (2000-2016) a été retenue pour l'entraînement du modèle et la simulation.

5.2.2. Justification de la période choisie pour l'entraînement du modèle

Les critères de choix de la période d'entraînement du modèle sont les suivantes :

- Période la plus récente possible ;
- Période ayant connu le taux d'accroissement démographique le plus élevé ;
- Période au cours de laquelle les formations végétales naturelles (forêts denses, forêts claires et savanes boisées) ont connu un taux de régression très élevé, supérieur à 80 %.

La période 2000-2016 remplit le mieux ces critères ci-dessus énumérés. Du coup, une simulation de 2000-2016 à l'horizon 2031 a été réalisée avec un pas intermédiaire de 5 ans. Toutes les transitions et sous-modèles à simuler ont été mises en place sur cette période 2000-2016 qui est la période d'entraînement du modèle.

5.2.3. Choix des transitions et sous-modèle

Compte tenu du nombre important des transitions observées entre 2000 et 2016, elles ne seront pas toutes modélisées. Seules les transitions vers les catégories d'occupation du sol anthropiques et dont les taux d'évolution sont positifs et les plus élevés entre 2000 et 2016 ont été retenues. Ainsi, trois grands sous-modèles ont été identifiés. Il s'agit des sous-modèles :

- Mise en culture qui regroupe toutes les transitions vers les mosaïques de cultures et jachères ;
- Agglomération qui regroupe toutes les transitions vers agglomérations ;
- Plantation qui regroupe toutes les transitions vers plantations.

Les transitions mises ensemble dans chacun de ces sous-modèles dépendent des mêmes facteurs explicatifs. Un filtre spatial de 300 hectares a été appliqué afin d'extraire les transitions majeures qui constituent chacun de ces sous-modèles. Toutes les autres transitions dont la surface cumulée est inférieure à ce seuil seront ignorées dans le modèle. Ainsi les sous-modèles retenus regroupent les transitions suivantes (tableau XXXVI) :

Tableau XXXVI : Sous-modèles et leurs transitions retenus

N°	Sous-modèles	Transitions considérées
1	Mosaïques de cultures et jachères	Savanes arborées et arbustives vers mosaïques de cultures et jachères Forêts claires et savanes boisées vers mosaïques de cultures et jachères Forêts denses vers mosaïques de cultures et jachères Savanes saxicoles vers mosaïques de cultures et jachères
2	Plantations	Mosaïques de culture et jachères vers plantations Forêts claires et savanes boisées vers plantations
3	Agglomérations	Mosaïques de cultures et jachères vers agglomérations

5.2.4. Variables explicatives de chaque sous-modèle de transition

Plusieurs variables ont une influence sur le changement de l'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé. Les variables dont le coefficient V de Cramer calculé est supérieur à 0,1 sont celles retenues pour tourner le modèle.

Les tableaux XXXVII (a et b) et XXXVIII présentent, successivement les variables spatialement explicites et les taux de précision obtenus par le perceptron multi-couches (MLP) lors de l'entraînement du modèle pour les sous-modèles retenus. Pour rendre le modèle de simulation dynamique en trois (03) pas d'intervalle de 5 ans (2021, 2026 et 2031), certains drivers ont été rendus dynamiques.

Tableaux XXXVII-a : Variables spatialement explicites pour les transitions vers agglomérations

Variable	Role	Basis layer type	Operation	Cramer V
Pente	Static	-----	-----	0,17
Densité	Dynamic	-----	-----	0,14
Agglomérations_2000	Dynamic	Land cover	Distance	0,10
Champs_2000	Dynamic	Land cover	Distance	0,10
Route	Static	-----	Distance	0,10

Tableaux XXXVII-b : Variables spatialement explicites pour les transitions vers plantations et mosaïques de cultures et jachères

Variable	Role	Basis layer type	Operation	Cramer V
Altitude	Static	-----	-----	0,25
Pente	Static	-----	-----	0,17
Pédologie	Static	-----	-----	0,22
Densité	Dynamic	-----	-----	0,14
Agglomérations_2000	Dynamic	Land cover	Distance	0,10
Champs_2000	Dynamic	Land cover	Distance	0,10
Route	Static	-----	Distance	0,10
Plantations en 2000	Dynamic	Land cover	Distance	0,11

De l'analyse du tableau XXXVII (a et b), on note deux types de variables utilisées pour modéliser l'occupation du sol dans ce secteur d'étude. On indique à chaque fois en ajoutant les variables à LCM, si elles sont statiques ou dynamiques. Les variables statiques ne changent pas au fil du temps. Par contre, celles dynamiques sont temporellement dépendantes et sont recalculées à chaque itération au cours de l'entraînement et de la simulation. Pour la modélisation ici, ont été considérées comme dynamiques uniquement les variables de distances aux agglomérations, aux champs et aux plantations et la densité. Les variables statiques sont : la pente, l'altitude, la pédologie et la route. La distance aux routes est considérée comme statique, parce que le réseau routier n'a pas connu de grands changements au cours de ces dernières années. L'ensemble des facteurs utilisés pour la modélisation de l'occupation du sol sont présentés ci-dessous (figure 72).

Tableau XXXVIII : Taux de précision obtenus par le perceptron multi-couches pour chaque transition par rapport aux facteurs explicatifs retenus

N°	Sous-modèles	Accuracy rate (%)
1	Mosaïques de cultures et jachères	48.21
2	Plantations	59.77
3	Agglomérations	93.55

Le tableau XXXVIII, il présente le taux de précision de l'*Accuracy Rate* obtenu pour chaque type de sous-modèle lors de l'apprentissage ; il est supérieur à 47 %. En effet, l'*Accuracy Rate* est la quantité expliquée par le réseau de neurone pendant l'apprentissage. Ainsi, pour le sous modèle agglomération, la localisation d'au moins 9 pixels sur 10 ayant subi un changement d'une occupation du sol vers une autre, peut être expliquée par les facteurs retenus. En ce qui

concerne le sous-modèle plantation, 6 pixels sur 10 ayant subi un changement d'une occupation du sol vers une autre, peuvent être expliqués par les facteurs retenus. C'est seulement au niveau du sous-modèle mosaïques de cultures et jachères, que seulement 40 % ayant connu un changement d'une occupation du sol vers une autre s'explique par les facteurs retenus. Donc pour ce sous-modèle mosaïques de cultures et jachères (MCJ), le réseau de neurone n'est capable d'expliquer la moitié du changement spatio-temporel. Aussi: MCJ est une catégorie concernée par un swap important et tous les modèles ont du mal à prévoir ce phénomène de "vases communicantes"

La part de changement inexplicé peut être due soit à l'absence d'un facteur significatif (par exemple, profondeur, PH de sols, etc. dont les données ne sont pas disponibles), soit au caractère aléatoire des changements sur la base du jeu de facteurs introduit.

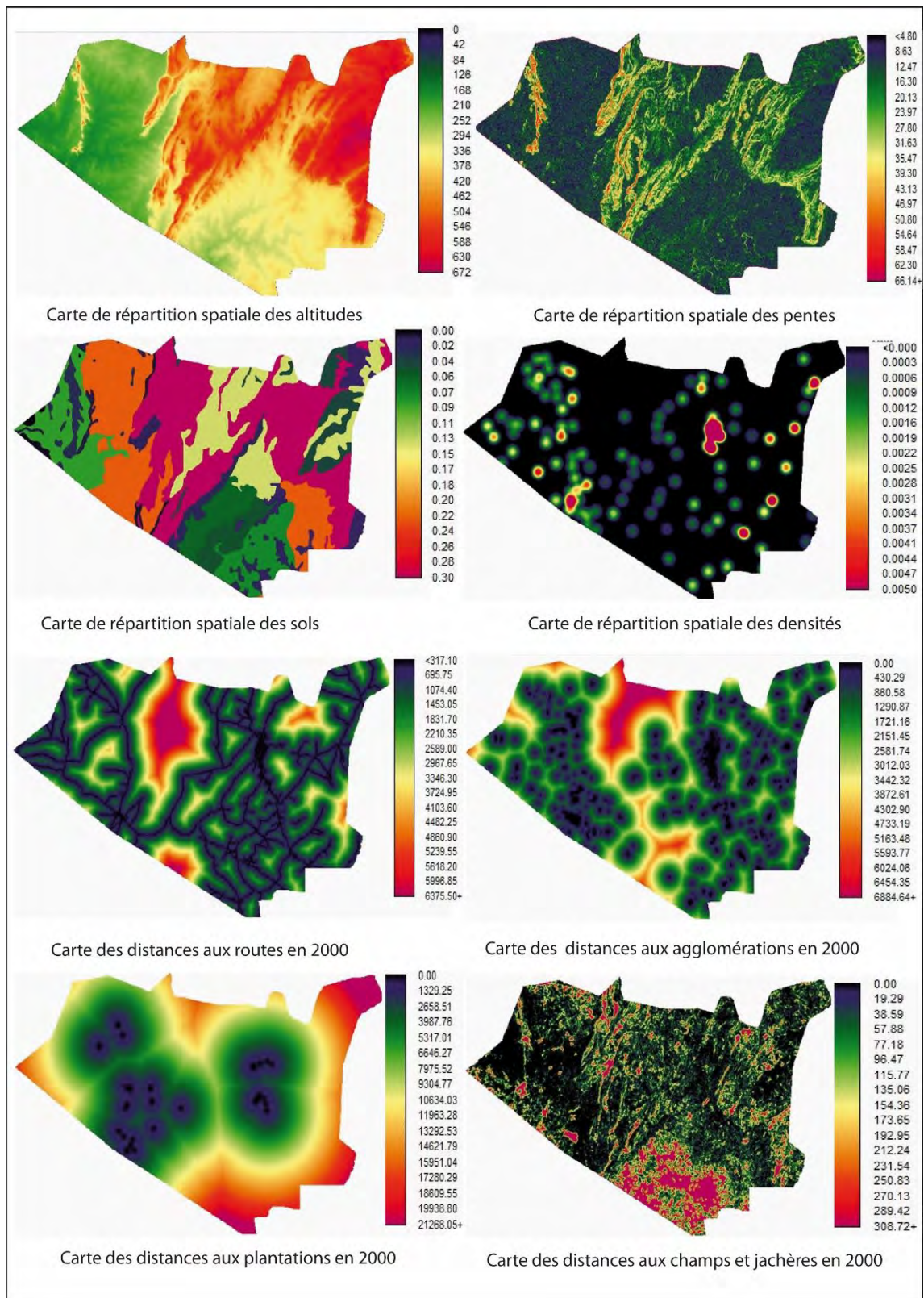


Figure 72 : Ensemble des cartes des facteurs explicatifs utilisés pour modéliser l'occupation du sol

5.2.5. Apprentissage du modèle

Cette phase importante permet l'entraînement du réseau perceptron multicouche (*Multi-Layer Perceptron*, MLP). Il s'agit d'un modèle semi-automatique dans la mesure où l'entraînement

optimise la détection des changements spatio-temporels des couvertures du sol et que l'utilisateur n'a qu'à fixer les paramètres de cet apprentissage. Grâce à la combinaison de la carte de transition (2000-2016) avec les variables explicatives de ces changements, des cartes de potentiel de transition sont générées (figure 73). Le réseau neuronal MLP est composé de trois couches : la couche d'entrée avec autant de nœuds qu'il y a de variables sélectionnées, la couche cachée avec le même nombre de nœuds, et la couche de sortie avec autant de nœuds qu'il y a de cartes de transition. A ce stade « le MLP fonctionne en mode automatique, ce qui lui permet de prendre ses propres décisions en choisissant les paramètres à utiliser et comment ils doivent être modifiés pour mieux modéliser les données ».

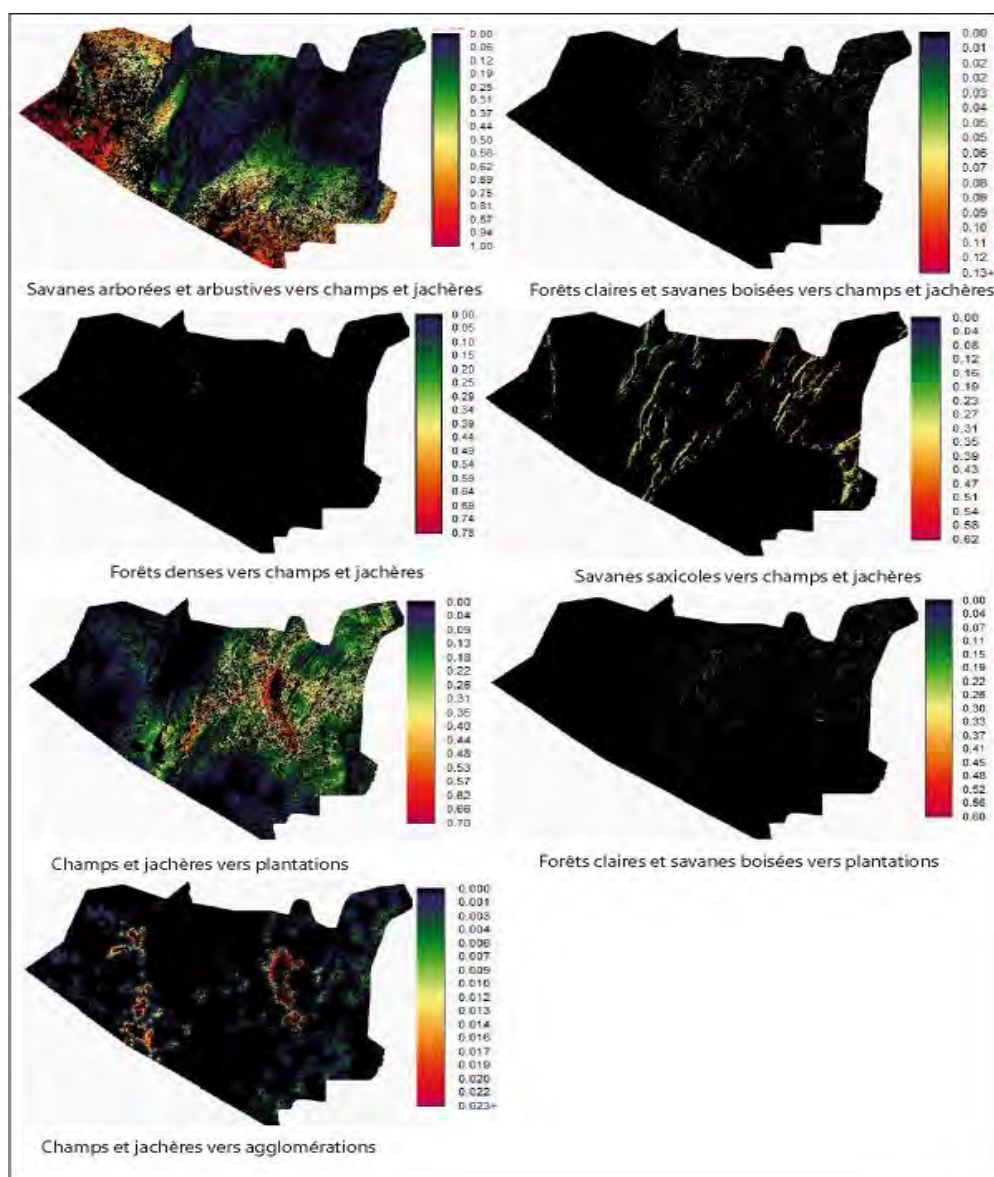


Figure 73 : Potentiels de transition vers l'agglomération, la plantation et les mosaïques de culture obtenus avec LCM

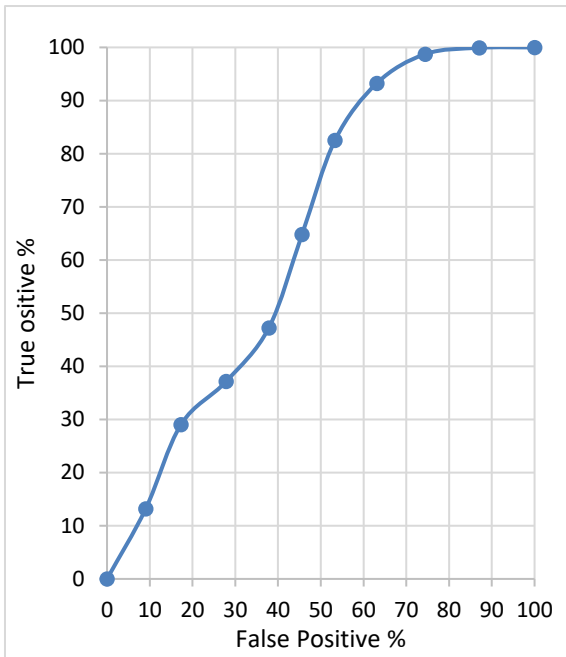
Ces différentes cartes de potentiel de transition correspondent à chacune des transitions retenues plus haut (tableau XXXVIII) en exprimant, pour chaque pixel, leur probabilité graduelle d'occurrence sur une échelle continue de 0 à 1. Seulement ces cartes mettent en exergue les zones potentiellement soumises à des changements. Elles expriment donc une probabilité pour chaque type de changement modélisé.

Chacune de ces cartes de potentiel de transition a été évaluée en calculant le ROC (Relative Operating Characteristics). Il a permis de valider ces cartes et de voir à quel degré elles coïncident avec la dynamique observée (en terme de localisation) en partant sur la base des cartes d'occupation de 2000 (tableau XXXIX).

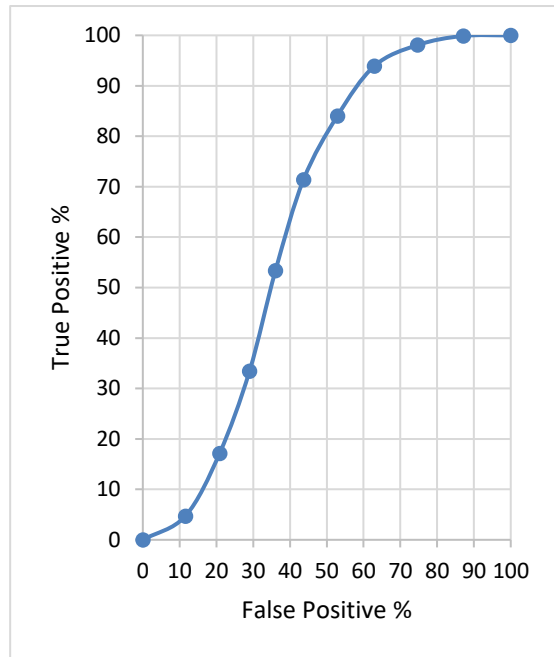
Tableau XXXIX : Taux du ROC pour les cartes de potentiel de transition pour chaque type de transition par sous-modèle

N°	Sous-modèles	Potentiel de transitions considérées	AUC (ROC) en %
1	Mosaïques de cultures et jachères	Savanes arborées et arbustives vers mosaïques de cultures et jachères	65.03
		Forêts claires et savanes boisées vers mosaïques de cultures et jachères	63.72
		Forêts denses vers mosaïques de cultures et jachères	63.86
		Savanes saxicoles vers mosaïques de cultures et jachères	62.53
2	Plantations	Mosaïques de cultures et jachères vers plantations	38.63
		Forêts claires et savanes boisées vers plantations	54.24
3	Agglomérations	Mosaïques de cultures et jachères vers agglomérations	52.69

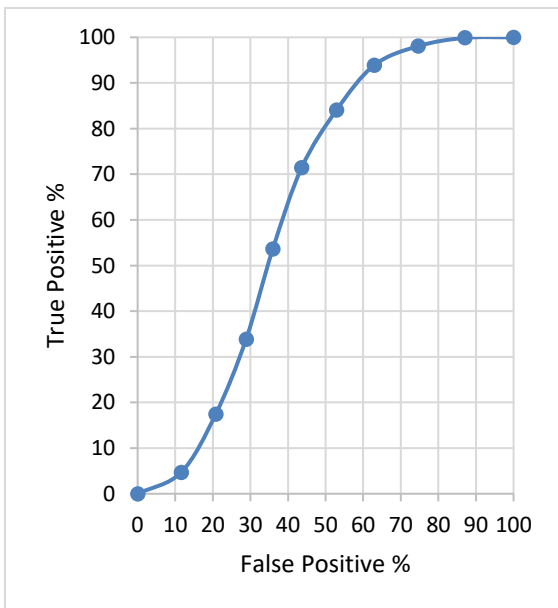
Ainsi, plus la probabilité / aptitude (AUC) est élevée, plus l'observation devrait tendre vers la présence de la catégorie considérée. La figure 74 ci-dessous présente les courbes ROC de chacune de ces transitions énumérées ci-dessus.



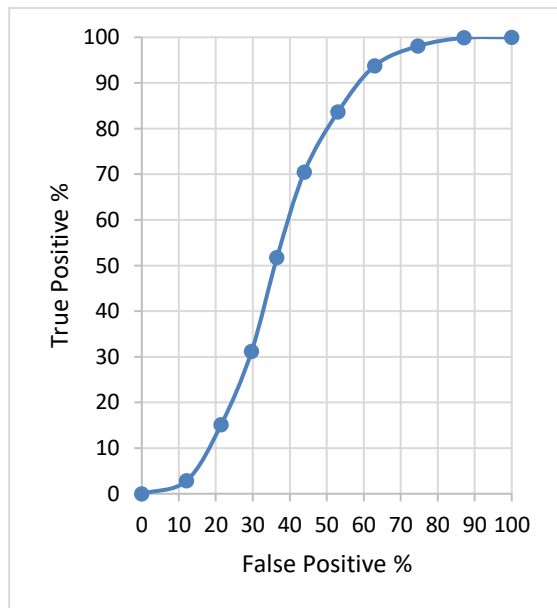
Courbe ROC des savannes arborées et arbustives vers les mosaïques de cultures et jachères



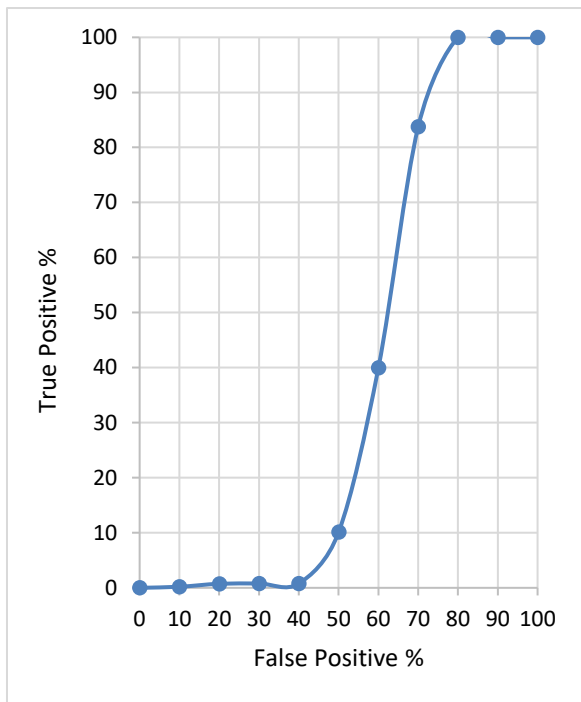
Courbe ROC des forêts claires et savannes boisées vers les mosaïques de cultures et jachères



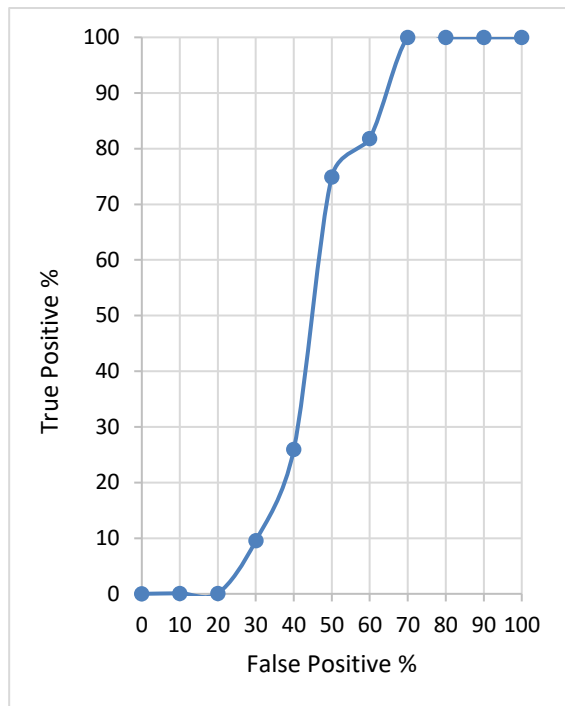
Courbe ROC des forêts denses vers les mosaïques de cultures et jachères



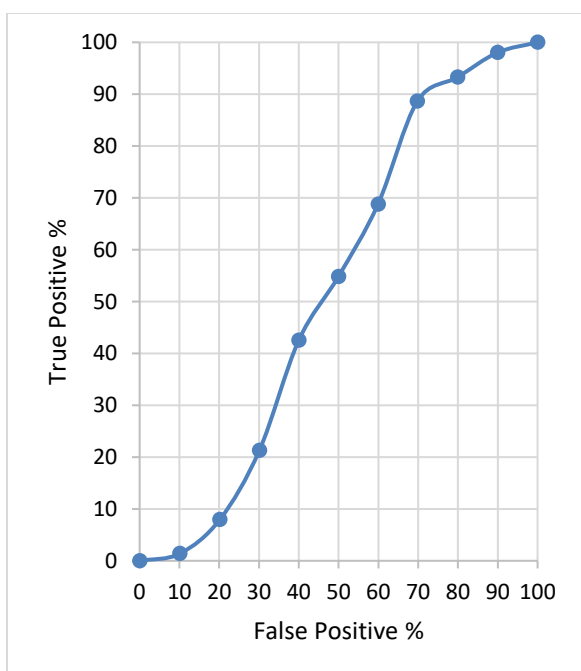
Courbe ROC des savannes saxicoles vers les mosaïques de cultures et jachères



Courbe ROC des mosaïques de cultures et jachères vers les plantations



Courbe ROC des forêts claires et savanes boisées vers les plantations



Courbe ROC des mosaïques de cultures et jachères vers les agglomérations

Figure 74 : Courbe ROC des différentes transitions à modéliser

5.2.6. Probabilité de transition de 2016 à 2031

La carte de prédiction a été élaborée par le réseau de neurones multicouche à partir des cartes de transition potentielle et des variables explicatives. Ceux-ci assignent à chaque pixel une catégorie de détérioration à l'aide du processus de décision multi-objectif (MOLA). Pour attribuer la quantité de changement, l'algorithme s'appuie sur la matrice de probabilité de transition 2016-2031 (Tableau XL).

Tableau XL : Matrice markovienne de probabilité de transition de 2016 à 2031

		Probabilité de 2031							
		FG	FD	FCSB	SAA	SS	PT	MCJ	AGG
Probabilité de 2016	FG	0,9254	0	0	0	0	0	0,0746	0
	FD	0	0,0097	0,0233	0,2969	0	0	0,6771	0
	FCSB	0	0	0,0795	0,4079	0	0,0072	0,5093	0,0006
	SAA	0	0	0	0,5485	0	0,0007	0,4589	0,0008
	SS	0	0	0	0	0,9464	0	0,0385	0,0002
	PT	0	0	0,001	0	0	0,9678	0,0073	0,017
	MCJ	0,0005	0,0007	0,0094	0,356	0,0014	0,0049	0,6183	0,0093
	AGG	0	0	0,0003	0,0167	0,0001	0,0022	0,0261	0,9546

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

Il ressort de l'examen du tableau XL qu'entre 2016 et 2031 dans l'ensemble, la stabilité apparaît comme le principal comportement car toutes les catégories d'occupation du sol ont conservé plus de 50 % de leurs superficies sauf les forêts denses qui n'ont conservées qu'environ 1 % de leurs superficies. Les forêts galeries, savanes saxicoles, plantations et agglomérations sont restées stables à plus de 90 %. La matrice montre qu'environ 35,6 % (44685,9 ha) de mosaïques de cultures et jachères seront perdus au profit des savanes arborée et arbustives. En terme de perte, on constate que 29,69 % (172,02 ha) de forêts denses et 49,79 % (1678,14 ha) de forêts claires et savanes boisées se transformeront en savanes arborées.

Quant aux mosaïques de cultures et jachères, elles gagneront 67,71 % (362,4 ha) de forêts denses, 50,93 % (2095,29 ha) de forêts claires et savanes boisées et 45,89 % (46126,26 ha) de savanes arborées et arbustives. Lorsqu'on compare les transitions des matrices de 2000-2016 et 2016-2031, on constate globalement que les changements de la période 2000-2016 sont plus élevés que ceux de la période 2016-2031 et que les persistances sont inférieures. Ceci traduit que le milieu sera apparemment moins perturbé entre 2016 et 2031 qu'entre 2000 et 2016.

5.2.7. Carte prédictive et tendance évolutive de l'occupation du sol à l'horizon 2031

A partir de la matrice de transition (matrice de probabilité) des variables explicatives et des cartes de probabilités de transition, le processus de décision multi-objectif (MOLA) va attribuer la distribution idéale pour chaque type d'occupation du sol. La quantification des changements se fait grâce aux chaînes markoviennes qui prennent en compte les dynamiques passées et les probabilités de transition entre chaque type d'occupation du sol. La figure 75 présente la carte de prédiction pour 2031 obtenue du réseau de neurones MLP.

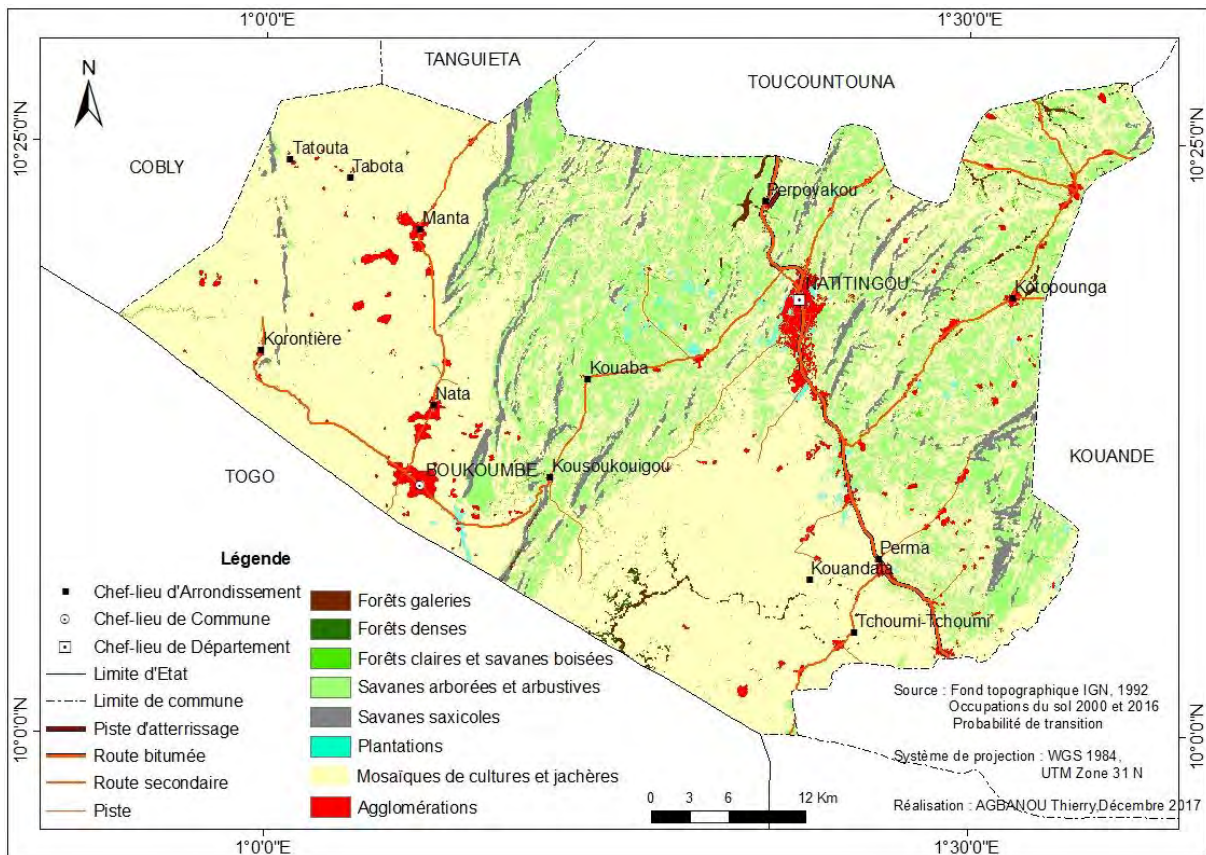


Figure 75 : Carte prédictive de l'occupation du sol à l'horizon 2031 dans le secteur Natitingou-Boukombé

Les statistiques issues de la carte de prédiction à l'horizon 2031 du secteur d'étude ont permis de réaliser la figure 76 pour mieux apprécier l'étendue des différentes catégories d'occupation du sol.

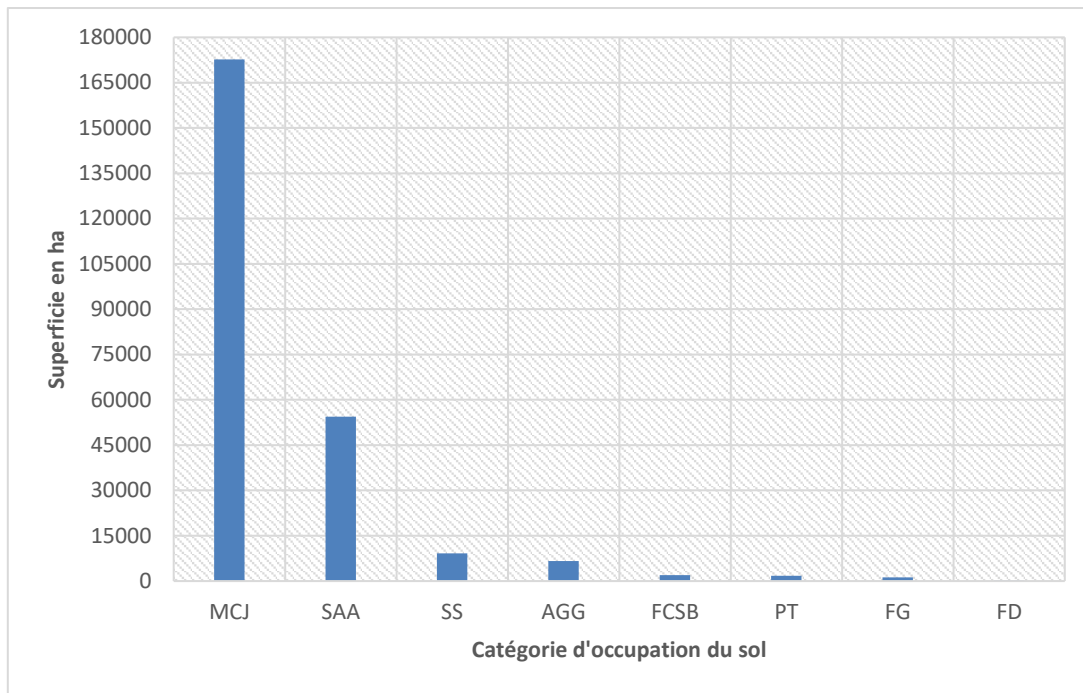


Figure 76 : Superficie des catégories d’occupation du sol à l’horizon 2031 dans le secteur Natitingou-Boukombé

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

L’examen de la figure 76 permet de constater que les mosaïques de cultures et jachères constituent la catégorie la plus importante avec 172719,81 ha (69,64 %). Suivent les savanes arborées et arbustives avec 54388,62 ha (21,93 %) alors que, les savanes saxicoles et les agglomérations occupent respectivement 9149,22 ha (3,69 %) et 6593,58 ha (2,66 %). Toutes les autres catégories sont quasi-absentes et occupent moins de 1 % de la zone d’étude. Ceci montre clairement la forte progression des formations anthropiques au détriment des formations végétales naturelles.

Conclusion partielle

La liste des modèles de simulation n’est pas exhaustive. N’est présenté ici que quelques-uns. Tous ces modèles de simulation ont leurs avantages et leurs limites. Certains requiert une bonne maîtrise de l’outil informatique, d’autres pas. Certains modèles comme Land Change Modeler (LCM) sont implémentés dans des logiciels de Système d’Information Géographique (SIG) et de Géomatiques. Le choix du modèle ou programme de simulation dépend des données disponibles et des objectifs de travail. Le modèle retenu ici (LCM) reste un modèle dynamique et très utilisé de nos jours.

Les résultats issus du modèle utilisé (LCM) de prédiction, de la phase de calibrage jusqu'aux résultats obtenus. Cette étude a permis d'avoir une meilleure connaissance de l'occupation actuelle du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé, de connaître la tendance évolutive des différentes catégories d'occupation du sol et de prédire le futur. Ceci permettra aux autorités compétentes de définir des formes d'aménagement et de gestion territoriale durable. Pour la prédiction, plusieurs scénarios sont simulés afin de contribuer à la mise en place des outils de prise de décision.

Chapitre VI : Scénarios prospectifs, discussion et limites de l'étude

Introduction partielle

Ce chapitre est subdivisé en deux grandes parties. La première partie expose quatre scénarios prospectifs dont deux contrastés. Ces scénarios exposent et spatialisent plusieurs futurs possibles selon les hypothèses retenues. Ici les influences possibles de différentes variables et contextes socio-économiques sur les changements d'occupation du sol futur, et plus spécifiquement sur les dynamiques de mise en culture et de reforestation ont été prises en compte dans la formulation des hypothèses. Le principal objectif ici est d'offrir aux institutions politico-administratives et aux acteurs de la transformation du territoire quelques idées sur les futurs possibles de ce milieu afin de les aider à la prise de décision. Les quatre scénarios exposés ici décrivent le cheminement des événements conduisant à l'horizon de l'année 2031. Deux d'entre eux sont des scénarios tendanciels et deux autres des scénarios contrastés. Pour chaque scénario un ensemble de situations et d'évènements constituent des hypothèses concernant l'évolution des variables qui pourraient influencer la dynamique d'occupation du sol jusqu'à une situation future.

La deuxième partie de ce chapitre est essentiellement consacré à l'interprétation des résultats liés à la dynamique de l'occupation et surtout à leur comparaison avec les résultats d'autres chercheurs qui ont fait des travaux similaires au Bénin et ailleurs. Plusieurs études effectuées concourent à ce que les activités humaines restent les principaux facteurs responsables de la dynamique et de la dégradation des milieux naturels. L'étude de changements d'occupation du sol et l'identification des facteurs responsables de ces changements a permis d'aboutir aux mêmes résultats. La compréhension des futurs possibles du paysage de ce milieu facilitera les prises de décisions. Elle permettra de définir des politiques ou stratégies pouvant concilier les activités agricoles avec la protection du couvert végétal. En somme la discussion autour des différentes hypothèses de simulation est destinée à orienter les gestionnaires de l'environnement et les autorités territoriales locales dans leur choix en matière de gestion et d'aménagement du territoire.

6.1. Scénarios prospectifs

6.1.1. Scénario 1 : Scénario dans lequel tous les facteurs explicatifs sont ignorés

6.1.1.1. Description du scénario et cartes de sortie

C'est un scénario dans lequel aucun facteur explicatif n'est utilisé. C'est un scénario tendanciel sans recours à des facteurs explicatifs basés sur les seules quantités et spatialisations connues

par le modèle (cartes de 1987 et de 2016). Il permet de ne pas altérer les matrices de transition issues de l'analyse historique. Le module CA_MARKOV du logiciel IDRISI Selva est utilisé ; il s'agit plus précisément d'une procédure de prédiction qui combine les automates cellulaires avec les chaînes de Markov. L'application de l'algorithme d'automate cellulaire pour mesurer la contiguïté locale au sein du module CA_MARKOV est effectuée avec un filtre moyen booléen de 5x5. Les cartes d'aptitude requises sont celles générées par la fonction MARKOV. Il s'agit d'une projection purement stochastique (sans driver) basée sur les cartes d'occupation du sol de 2000 et de 2016. La carte de prédiction obtenue est présentée sur la figure 77 ci-dessous :

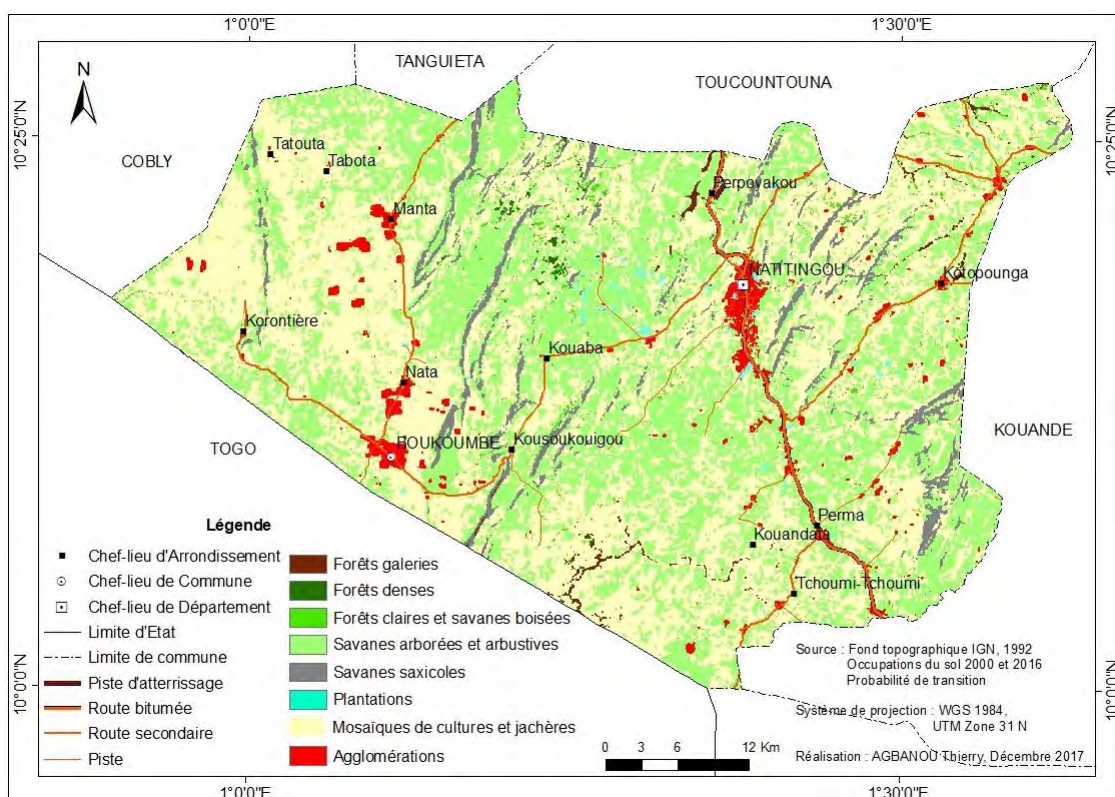


Figure 77 : Occupation du sol simulée avec un scénario dans lequel tous les facteurs explicatifs sont ignorés (CA Markov)

6.1.1.2. LUCC Budget et intensité de changement (2016- 2031)

Dans ce scénario, on constate qu'à l'horizon 2031 il n'y a pas de changement majeur au niveau des catégories d'occupation du sol (tableau XLI).

Tableau XLI : Taux d'évolution des catégories d'occupation du sol entre 2016 et 2031 scénario zéro facteur explicatif

	Superficie (ha) en 2016		Superficie (ha) en 2031		Taux d'évolution (%)
		%		%	
.30	1268,19	0,51	1155,78	0,47	-08,86
FD	579,51	0,23	479,61	0,19	-17,24
FCSB	4114,58	01,66	2230,74	0,90	-45,78
SAA	100514,88	40,53	99904,68	40,28	-0,61
SS	9515,34	03,84	9280,89	03,74	-02,46
PT	1067,76	0,43	1060,47	0,43	-0,68
MCJ	125522,19	50,61	127598,31	51,45	01,65
AGG	5426,37	02,19	6297,84	02,54	16,06
Total	248008,32	100	248008,32	100	

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

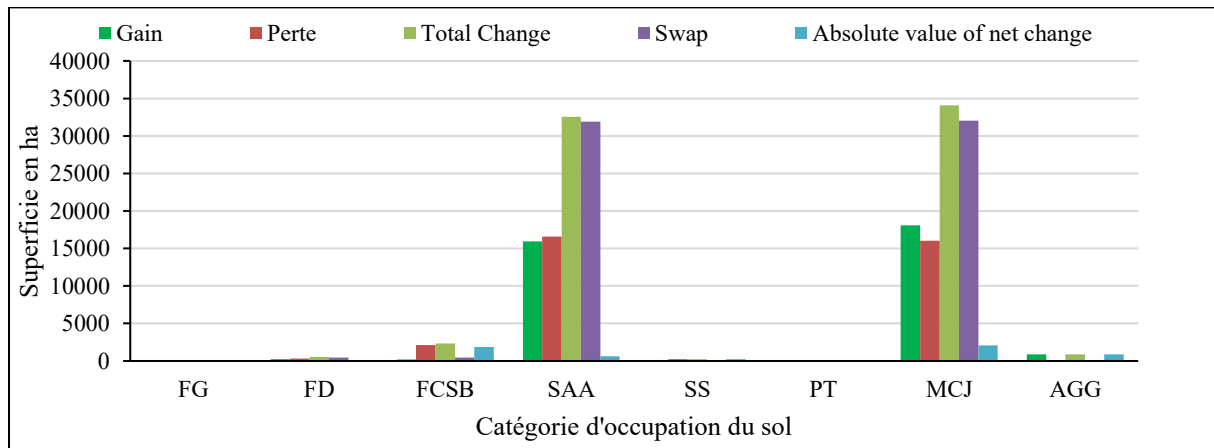
Il ressort de l'observation du tableau XLI que seules les mosaïques de cultures et jachères ont connu une progression entre 2016 et 2031 (environ 1,65 %). Toutes les autres catégories ont régressé. Les forêts claires et savanes boisées, les forêts denses et les agglomérations ont connu un taux de régression majeures (respectivement de 45,78 % ; 17,27 % et 16,06 %) entre 2016 et 2031. On peut donc conclure que ce scénario prévoit une régression des formations végétales au profit des formations anthropiques notamment les agglomérations et les mosaïques de cultures et jachères. Toutes les transitions prédites entre 2016 et 2031 sont résumées dans la matrice de transition ci-dessous (tableau XLII).

Tableau XLII : Matrice de transition (2016-2031)

	FG	FD	FCSB	SAA	SS	PT	MCJ	AGG	Total 2016 (ha)	Perte
FG	1155,78	06,39	13,41	0,54	0	0	92,07	0	1268,19	112,41
FD	0	257,31	05,49	14,85	0	0	301,86	0	579,51	322,2
FCSB	0	23,22	2013,93	911,88	03,51	0,18	1161,36	0	4114,08	2100,15
SAA	0	190,53	41,85	83943,36	0	0	16338,96	0,18	100514,88	16571,52
SS	0	0	0,09	41,49	9277,38	0	196,38	0	9515,34	237,96
PT	0	0	0	0,36	0	1060,29	0,45	06,66	1067,76	07,47
MCJ	0	02,16	155,97	14992,2	0	0	109507,23	864,63	125522,19	16014,96
AGG	0	0	0	0	0	0	0	5426,37	5426,37	0
Total 2031 (ha)	1155,78	479,61	2230,74	99904,68	9280,89	1060,47	127598,31	6297,84	248008,32	
Gain	0	222,3	216,81	15961,32	03,51	0,18	18091,08	871,47		

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

L'examen du tableau XLII permet de constater que 85,74 % des superficies sont restées apparemment stables. Les plus importants transferts ont été observés entre les savanes arborées et arbustives et les mosaïques de cultures et jachères. On note particulièrement qu'entre 2016 et 2031 seules les mosaïques de cultures et jachères (864,63 ha) se sont transformées en agglomération. Le calcul du LUCC budget a permis de réaliser la figure 78.



Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

Figure 78 : LUCC budget (2016-2031) en ha

On constate aisément à partir de la figure 78 que les pertes et les gains sont pratiquement équitables entre les savanes arborées et arbustives et les mosaïques de cultures et jachères. Par contre les forêts claires et savanes boisées en 2031 ont perdu 51,04 % (2100,15 ha) et gagné seulement 5,27 % de leurs superficies de 2016. Quant aux forêts denses elles ont perdu 55,6 % et gagné 38,35 % de leurs superficies de 2016 en 2031. En ce qui concerne les agglomérations, elles n'ont connu aucune perte en 2031 mais ont gagné 16,05 % (871,47 ha) de leurs superficies de 2016. Le LUCC budget (2016-2031) pour ce scénario confirme que les formations naturelles régressent au profit des formations anthropiques.

6.1.2. Scénario 2 : Business As Usual (BAU) extrapolant les tendances actuelles en 2031

6.1.2.1. Description du scénario et cartes de sortie

Le scénario BAU est un scénario tendanciel qui part de l'hypothèse de l'absence de nouvelles politiques économiques ou environnementales. C'est un scénario dans lequel les futures distributions d'utilisation des terres suivent les tendances observées dans le passé. Il se base sur les données socio-économiques passées et récentes (2000-2016), par exemple, la croissance

économique et démographique. Il s'agit ici de la mise en œuvre standard du modèle tel que décrit et simulé au chapitre précédent.

Par conséquent, on suppose que l'évolution démographique restera similaire avec le même taux d'accroissement. Le secteur n'attire pas l'arrivée de nouveaux habitants qui pourraient éventuellement perturber le système en place. Du coup, la demande en superficie à emblaver et la demande en bois de chauffage resteront dans une dynamique similaire à celle observée au cours de la période 2000-2016. En effet, la facilité d'exploitation et le coût très négligeable du bois de chauffage rendent improbable son remplacement par d'autres sources d'énergie comme le gaz. Toutes les couches de la société ont accès à cette ressource sans aucune formalité administrative. Il restera donc la principale source d'énergie pour les populations de ce secteur d'étude jusqu'en 2031. Quant aux terres agricoles, à part les zones difficile d'accès, toutes les terres sont potentiellement exploitables. Le mode d'accès aux terres (65 % par héritage), et les techniques culturales (agriculture itinérante sur brûlis) favorisent l'emblavure chaque année d'importantes superficies. Du coup, la même tendance d'évolution des terres agricoles sera observée (figure 79).

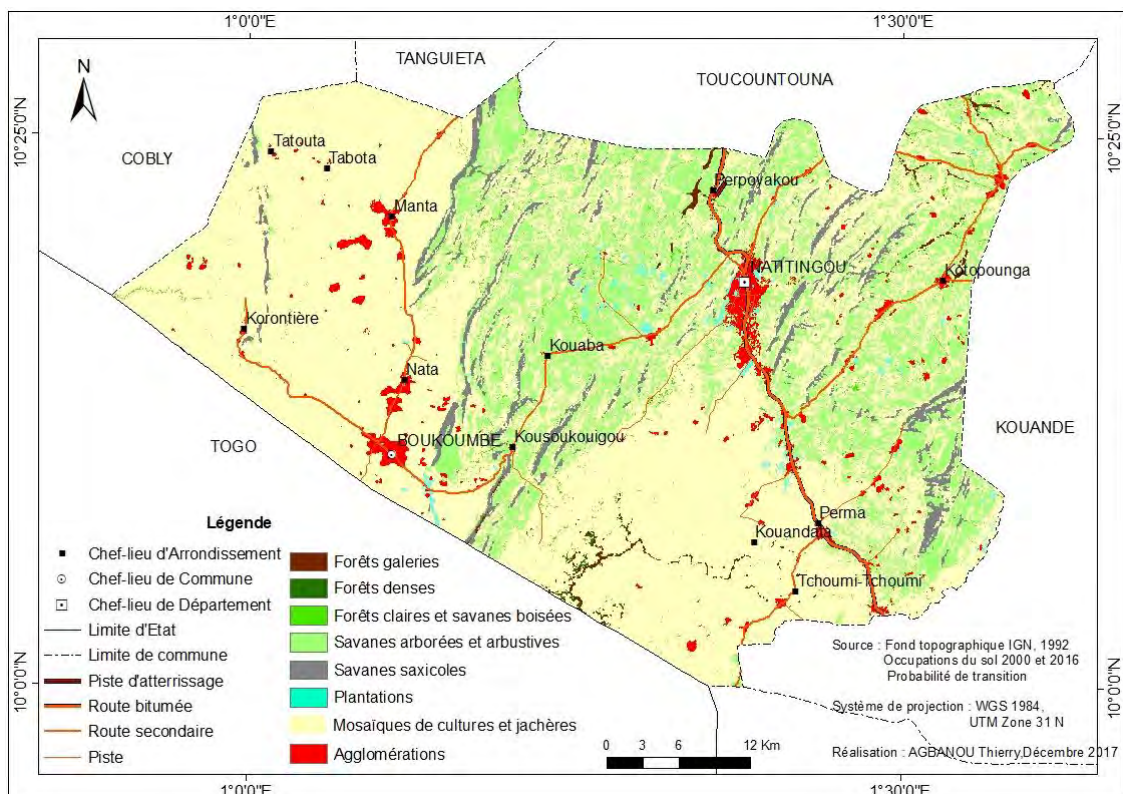


Figure 79 : Occupation du sol simulée à l'horizon 2031 avec le scénario Business As Usual (BAU)

6.1.2.2. LUCC Budget (2016- 2031)

De la carte issue du scénario tendanciel Business As Usual, les statistiques ci-dessous ont été extraites (tableau XLIII). Ces statistiques ont permis d'apprécier le taux d'évolution de chaque catégorie d'occupation du sol entre 2016 et 2031.

Tableau XLIII : Taux d'évolution des catégories d'occupation du sol entre 2016 et 2031 pour le scénario BAU

	Superficie (ha) en 2016		Superficie (ha) en 2031		Taux d'évolution (%)
		%		%	
FG	1268,19	0,51	1268,19	0,51	0
FD	579,51	0,23	187,2	0,08	-67,70
FCSB	4114,58	01,66	1989,45	0,80	-51,65
SAA	100514,88	40,53	54388,62	21,93	-45,89
SS	9515,34	03,84	9149,22	03,69	-03,85
PT	1067,76	0,43	1712,25	0,69	60,36
MCJ	125522,19	50,61	172719,81	69,64	37,60
AGG	5426,37	02,19	6593,58	02,66	21,51
Total	248008,32	100	248008,32	100	

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

Le calcul du taux d'évolution entre 2016 et la carte simulée à l'horizon 2031 permettent de constater que les mosaïques de cultures et jachères restent la catégorie d'occupation la plus importante (69,64 %) en 2031. Les plantations représentent moins de 01 % de la superficie totale, mais sont celles qui ont connu le taux d'évolution le plus important (60,64 %). Les forêts denses, forêts claires et savanes boisées et les savanes arborées et arbustives sont les catégories qui ont connu le taux de régression le plus important, respectivement 67,7 %, 51,65 % et 45,89 %.

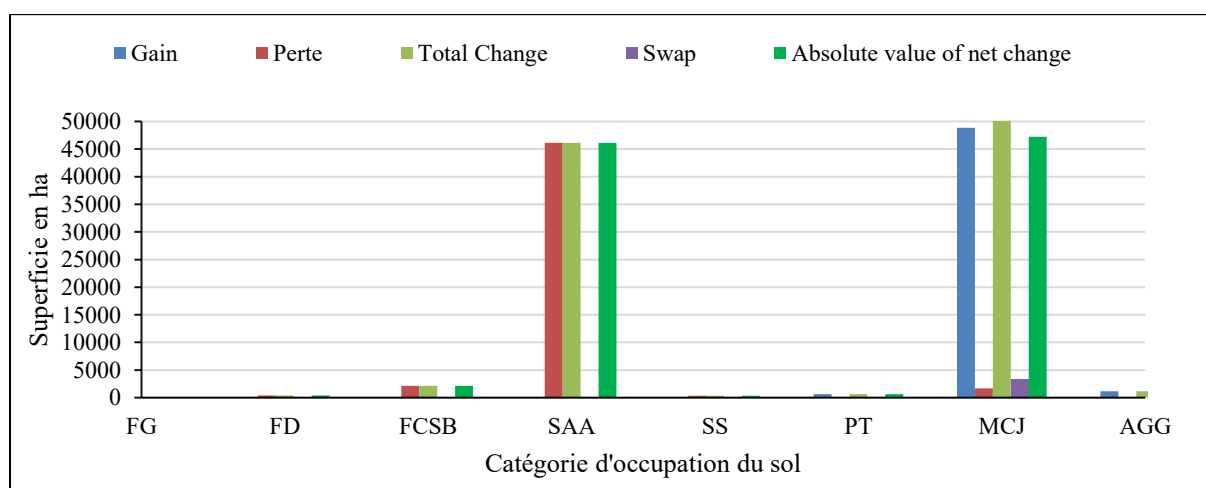
Globalement les formations naturelles ont régressé au profit des formations anthropiques. La matrice de transition (tableau XLIV) a permis de faire le LUCC budget entre 2016 et 2031 (figure 80).

Tableau XLIV : Matrice de transition 2016-2031 pour le scénario BAU

	FG	FD	FCSB	SAA	SS	PT	MCJ	AGG	Total 2016 (ha)	Perte
FG	1268,19	0	0	0	0	0	0	0	1268,19	0
FD	0	187,2	0	0	0	0	392,31	0	579,51	392,31
FCSB	0	0	1989,45	0	0	30,33	2094,3	0	4114,08	2124,63
SAA	0	0	0	54388,62	0	105,39	46020,87	0	100514,88	46126,26
SS	0	0	0	0	9149,22	0	366,12	0	9515,34	366,12
PT	0	0	0	0	0	1067,76	0	0	1067,76	0
MCJ	0	0	0	0	0	508,77	123846,21	1167,21	125522,19	1675,98
AGG	0	0	0	0	0	0	0	5426,37	5426,37	0
Total 2031 (ha)	1268,19	187,2	1989,45	54388,62	9149,22	1712,25	172719,81	6593,58	248008,32	
Gain	0	0	0	0	0	644,49	48873,6	1167,21		

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

L'examen du tableau XLIV permet de constater que les forêts denses (392,31 ha), les forêts claires et savanes boisées (2094,3 ha), les savanes boisées et arbustives (46020,87 ha) et les savanes saxicoles (366,12 ha) se sont converties en mosaïques de cultures et jachères en 2031. Les mosaïques de cultures et jachères (508,77 ha) et les savanes arborées et arbustives (105,39 ha) se sont transformées en plantations. Seules les terres occupées par des mosaïques de cultures et jachères (1167,21 ha) se sont transformées en agglomérations en 2031.



Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

Figure 80 : LUCC budget (2016-2031) en ha pour le scénario BAU

On constate à l'examen du tableau XLIV et de la figure 80 qu'aucune des formations végétales naturelles n'a gagné de superficie en 2031 mais ont soit stagné, soit perdu en superficie. En

effet, les forêts denses, les forêts claires et les savanes boisées, savanes boisées et arbustives et les savanes saxicoles ont perdu en 2031 respectivement 67,69 % (392,31 ha), 51,61 % (2124,63 ha), 45,88 % (46126,26 ha) et 03,84 % (366,12 ha) de leurs superficies de 2016. Les plantations et agglomérations n'ont connu que des gains. Les plantations ont gagné entre 2016 et 2031, 60,35 % (644,49 ha) et les agglomérations 21,50 % (1167,21 ha) de leurs superficies. Quant aux mosaïques de cultures et jachères, elles ont aussi bien perdu que gagné de superficie en 2031. Elles ont perdu 01,33 % (1675,98 ha) contre un gain de 38,93 % (48873,6 ha) de leurs superficies de 2016. Soit un changement net de 37,60 % (47197,62 ha) de leurs superficies de 2016. Les galeries forestières sont restées presque stables. On note clairement dans ce scénario une dégradation continue des formations végétales naturelles au profit des formations anthropiques.

6.1.3. Scénario 3 : Durabilité Environnementale Coordonnée (DEC) « Alafia 2031 »

6.1.3.1. Description du scénario et cartes de sortie

Le principal objectif du scénario DEC est de protéger le reste des ressources végétales encore en place. Dans ce scénario, le gouvernement s'efforce d'accroître la foresterie. C'est un scénario dans lequel la législation et les subventions gouvernementales encouragent l'émergence de la sylviculture durable (multiplication des plantations pour le bois d'œuvre et de feu). La protection des ressources ligneuses pourrait être renforcée en subventionnant le prix du gaz pour qu'il soit accessible à tous les ménages ou en créant des plantations pour bois de feu à exploiter par les populations. Du coup, l'exploitation anarchique du bois de chauffage sera considérablement réduite, voire interdite. Les quelques bosquets qui existent encore dans ce milieu seront protégées. Les lois et décrets qui réglementent l'exploitation du bois dans le pays seront renforcés, vulgarisés et appliqués. Les services en charge de la surveillance et de la préservation des ressources ligneuses (les argents des eaux et forêts) seront dotés de plus de moyens et la répression sera forte. Mais les activités agricoles vont continuer à s'accroître, la croissance économique et démographique ainsi que l'urbanisation vont évoluer normalement. Dans ce scénario, la satisfaction des besoins de la population, notamment le profit des services écologiques doit être compatible avec la conservation des ressources naturelles : c'est l'atteinte des objectifs de développement durable (ODD) qui est ainsi visée. Bien plus incertain que le scénario précédent, il n'est pas pour autant irréaliste. C'est un modèle de développement dans lequel les agriculteurs et les exploitants de bois sont engagés dans un processus de

développement durable sur un territoire dont l'organisation de l'espace est construite de manière participative. Les agriculteurs n'entendent pas rester en marge car ils sont tous conscients que leurs pratiques agricoles sont destructrices de l'environnement. Aussi, l'un des exploitants clandestins de bois de ce milieu déclarait sur le terrain :

« Nous sommes conscients que nous faisons partie des principaux destructeurs du couvert végétal de ce milieu, mais nous n'avons pas d'autre choix que la commercialisation du bois et du charbon de bois tant qu'il n'existe pas d'autres sources d'énergie à coût accessible à tous ».

Quant aux plantations, elles devront s'étendre considérablement. Dans ce milieu où l'agroforesterie individuelle est très répandue, avec l'aide de l'Etat on assistera au développement des plantations (exotiques) d'entreprises. L'Etat favorisera l'exploitation et l'exportation des produits sylvicoles comme l'acajou, les fruitiers (surtout les mangues), l'eucalyptus, le teck, etc. Du coup, les plantations des petits producteurs pourraient augmenter de façon plus significative (en superficie et en nombre) que ce qu'on observe aujourd'hui.

Dans ce scénario, les probabilités pour les savanes arborées et arbustives à se transformer en mosaïques de cultures en 2031 ont été modifiées à la hausse dans la matrice de transition. Tandis que celles des forêts denses, forêts claires et savanes boisées à se transformer en catégories plus dégradées (pauvres en ressources ligneuses) en 2031 ont été réduites de façon à protéger (à favoriser la persistance) le couvert végétal arboré et arbustif encore présent. Aussi, les probabilités de transformation des savanes arborées et arbustives et des mosaïques de cultures et jachères à se transformer en plantations en 2031 ont-elles été augmentées de façon à favoriser la sylviculture et le développement de l'agroforesterie. Ces différentes modifications de la matrice de transition ont permis d'obtenir les cartes de prédiction dont celle de 2031 se présente ci-dessous (figure 81) :

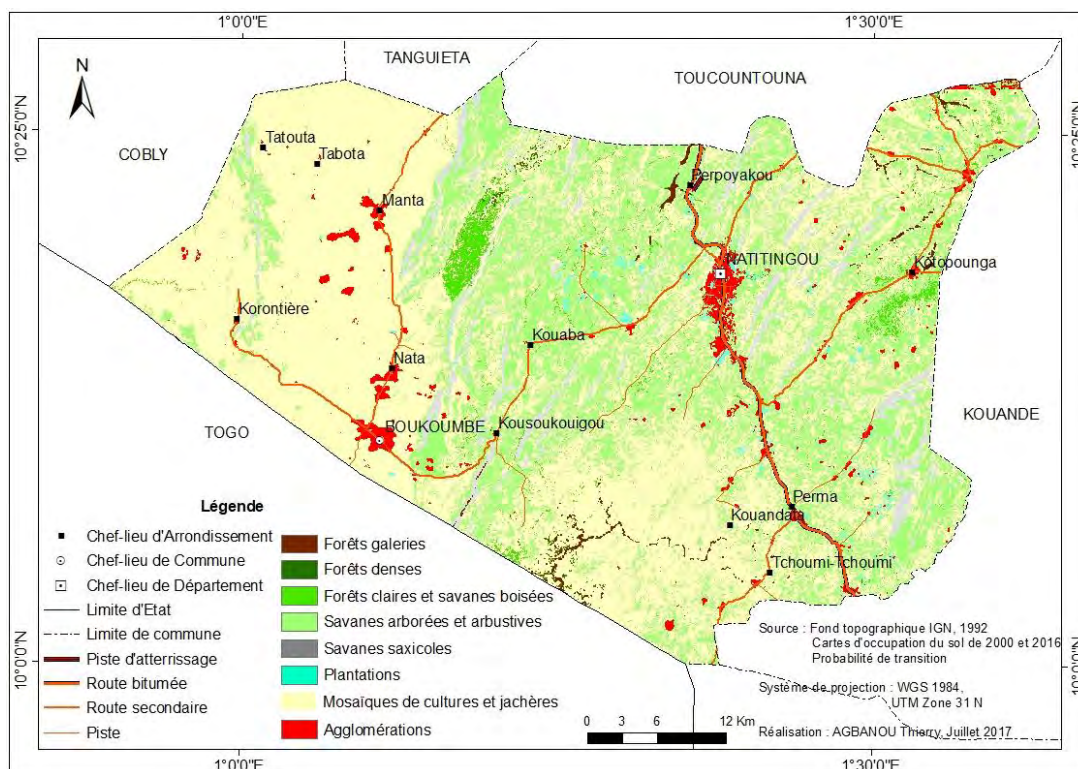


Figure 81 : Occupation du sol simulée à l’horizon 2031 selon le scénario Durabilité Environnementale Coordonnée (DEC) « Alafia 2031 »

6.1.3.2. LUCC Budget et intensité de changement (2016- 2031)

A l’issu de ce scénario qui se veut conservatrice des ressources végétales naturelles, les statistiques ont été extraites des données cartographiques pour en faire une analyse (Tableau XLV).

Tableau XLV : Taux d’évolution des catégories d’occupation du sol entre 2016 et 2031 pour le scénario DEC

	Superficie (ha) en 2016		Superficie (ha) en 2031		Taux d’évolution (%)
		%		%	
FG	1268,19	0,51	1268,19	0,51	0
FD	579,51	0,23	387	0,16	-33,22
FCSB	4114,58	01,66	4223,7	01,70	02,65
SAA	100514,88	40,53	56061,81	22,60	-44,23
SS	9515,34	03,84	9186,21	03,70	-03,46
PT	1067,76	0,43	2615,94	01,05	144,99
MCJ	125522,19	50,61	168575,58	67,97	34,30
AGG	5426,37	02,19	5689,89	02,29	04,86
Total	248008,32	100	248008,32	100	

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

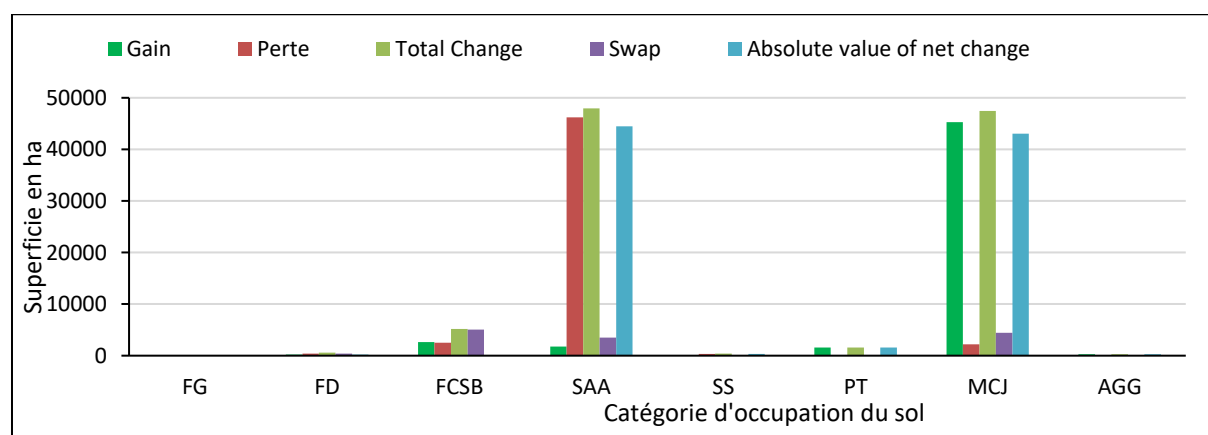
Il ressort de la comparaison des statistiques de 2016 et 2031 que seules les formations anthropiques en plus des forêts claires et savanes boisées ont un taux d'évolution positif (progression). Un effort donc de conservation des forêts claires et savanes boisées est donc constaté. Le croisement de la carte réelle de 2016 et de celle simulée de 2031 (tableau XLVI) a permis de mieux détecter les différents changements de catégories observées au cours de la période.

Tableau XLVI : Matrice de transition 2016-2031

	FG	FD	FCSB	SAA	SS	PT	MCJ	AGG	Total 2016 (ha)	Perte
FG	1268,19	0	0	0	0	0	0	0	1268,19	0
FD	0	199,08	0	104,13	0	0	276,3	0	579,51	380,43
FCSB	0	0	1592,55	1296,27	11,07	10,44	1203,75	0	4114,08	2521,53
SAA	0	187,92	2225,7	54317,43	19,26	347,31	43417,26	0	100514,88	46197,45
SS	0	0	0	0	9155,88	0	359,46	0	9515,34	359,46
PT	0	0	0	0	0	1067,76	0	0	1067,76	0
MCJ	0	0	405,45	343,98	0	1190,43	123318,81	263,52	125522,19	2203,38
AGG	0	0	0	0	0	0	0	5426,37	5426,37	0
Total 2031 (ha)	1268,19	387	4223,7	56061,81	9186,21	2615,94	168575,58	5689,89	248008,32	
Gain	0	187,92	2631,15	1744,38	30,33	1548,18	45256,77	263,52		

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

Il ressort de l'examen du tableau XLVI que les plantations et les agglomérations n'ont perdu de superficie à l'horizon 2031. Quant aux autres catégories, elles ont aussi bien perdu que gagné de superficie. Pour mieux affiner les changements réels, le changement net effectué au niveau de chaque catégorie a été calculé (figure 82).



Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

Figure 82 : LUCC budget (2016-2031) en ha pour le scénario DEC

De l'analyse de la figure 82, il se dégage qu'en 2031 globalement les forêts denses ont perdu 192,51 ha, soit 33,21 % de leurs superficies de 2016, et les savanes saxicoles 329,13 ha, soit 3,45 % de leurs superficies de 2016. Par contre les forêts claires et savanes boisées ont globalement gagné 109,2 ha (2,66 %), les savanes arborées et arbustives ont gagné 44 453,07 ha (44,22 %), les mosaïques de cultures et jachères ont gagné 4 3053 ha (34,3 %), les plantations ont gagné 1 548,18 ha (01,44 %) et les agglomérations ont gagné 263,52 ha (04,85 %). Les superficies gagnées par les forêts claires et savanes boisées proviennent de la dégradation des forêts denses et de l'évolution d'une partie des savanes boisées et arbustives. Quant aux superficies gagnées par les savanes arborées et arbustives, elles proviennent de la dégradation des forêts claires et savanes boisées, mais beaucoup plus des mosaïques de cultures et jachères. Les superficies gagnées par les plantations et les agglomérations proviennent des savanes arborées et arbustives, et des mosaïques de cultures et jachères.

6.1.4. Scénario 4 : Croissance Economique Rapide (CER) « Wahala 2031 »

6.1.4.1. Description du scénario et cartes de sortie

Le scénario Croissance Economique Rapide (CER) est un scénario socio-économique, c'est-à-dire d'accélération de la destruction du couvert végétal arboré et arbustif et d'élargissement des terres agricoles (tendance à la catastrophe). Dans ce scénario CER, la croissance démographique et économique sera très élevée et se soldera par une dégradation accrue de l'environnement. C'est un scénario pessimiste, mais très probable dans ce milieu d'étude où il n'y a actuellement aucune politique de gestion durable des ressources naturelles. Le schéma ici est qu'il y aura des subventions gouvernementales pour la production agricole (culture du coton et de produits vivriers) avec pour corollaire une augmentation des superficies des champs. Mais aucune disposition n'est prise pour préserver les ressources naturelles du milieu en général et les formations végétales naturelles en particulier. Du coup, le développement de plusieurs activités humaines et l'étalement urbain très accéléré vont provoquer une dégradation continue des ressources végétales. C'est un scénario dans lequel seules les superficies des mosaïques de cultures et jachères et les agglomérations ont été augmentées de façon considérable. Du coup, les probabilités de transformation des savanes arborées et arbustives en forêts denses et forêts claires et savanes boisées ont été baissées. Tandis que les probabilités des savanes arborées et arbustives, des forêts denses et forêts claires et savanes boisées à se transformer en mosaïques de cultures et jachères ont été augmentées. La modification de ces statistiques a permis d'obtenir la carte de prédiction ci-dessous (figure 83) :

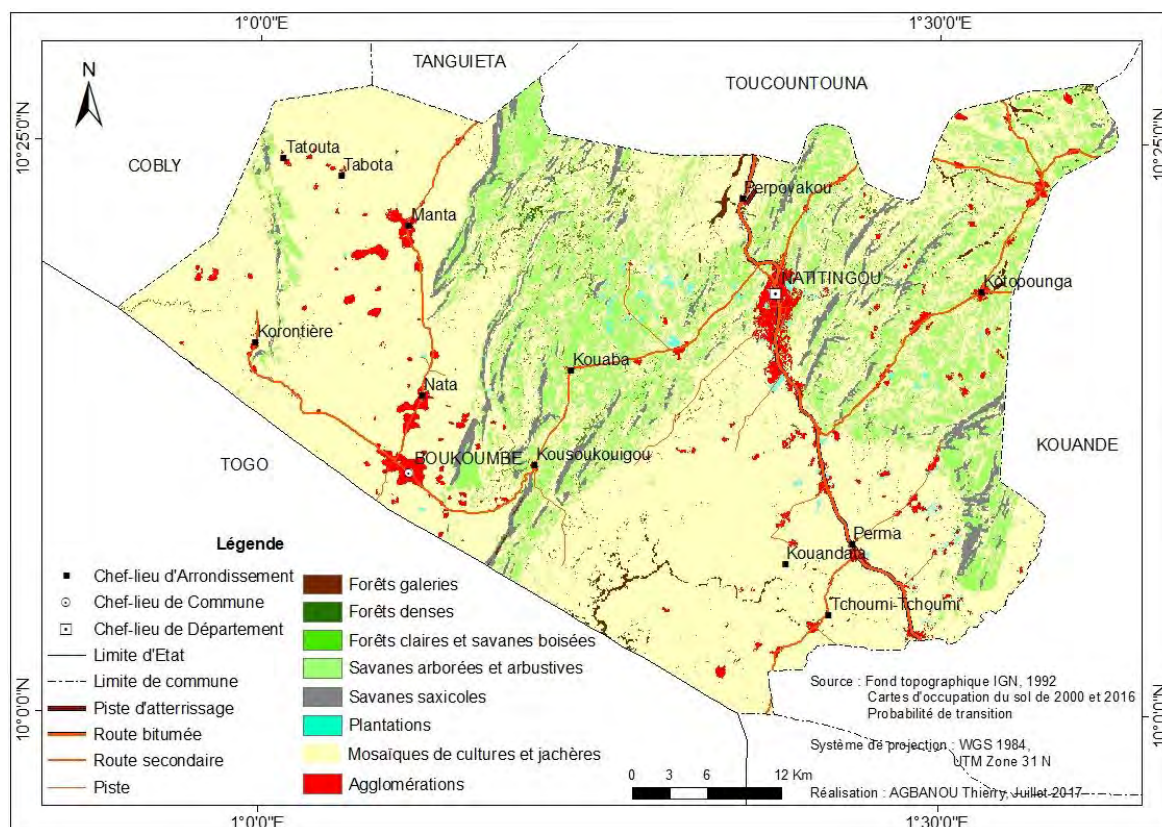


Figure 83 : Occupation du sol simulée à l’horizon 2031 avec le scénario CER

6.1.4.2. LUCC Budget et intensité de changement (2016- 2031)

La mise en œuvre du scénario de croissance économique rapide (CER) ou « Wahala » a permis de constater qu’à l’horizon 2031, toutes les formations végétales naturelles ont considérablement régressées au profit des formations anthropiques (tableau XLVII).

Tableau XLVII : Taux d’évolution des catégories d’occupation du sol entre 2016 et 2031 pour le scénario CER en ha

	Superficie (ha) en 2016	%	Superficie (ha) en 2031	%	Taux d'évolution (%)
FG	1268,19	0,51	1268,19	0,51	0
FD	579,51	0,23	187,2	0,08	-67,70
FCSB	4114,58	01,66	2219,76	0,90	-46,05
SAA	100514,88	40,53	43020,54	17,35	-57,20
SS	9515,34	03,84	9167,04	3,70	-03,66
PT	1067,76	0,43	1709,01	0,69	60,06
MCJ	125522,19	50,61	182838,87	73,72	45,66
AGG	5426,37	02,19	7597,71	03,06	40,01
Total	248008,32	100	248008,32	100	

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

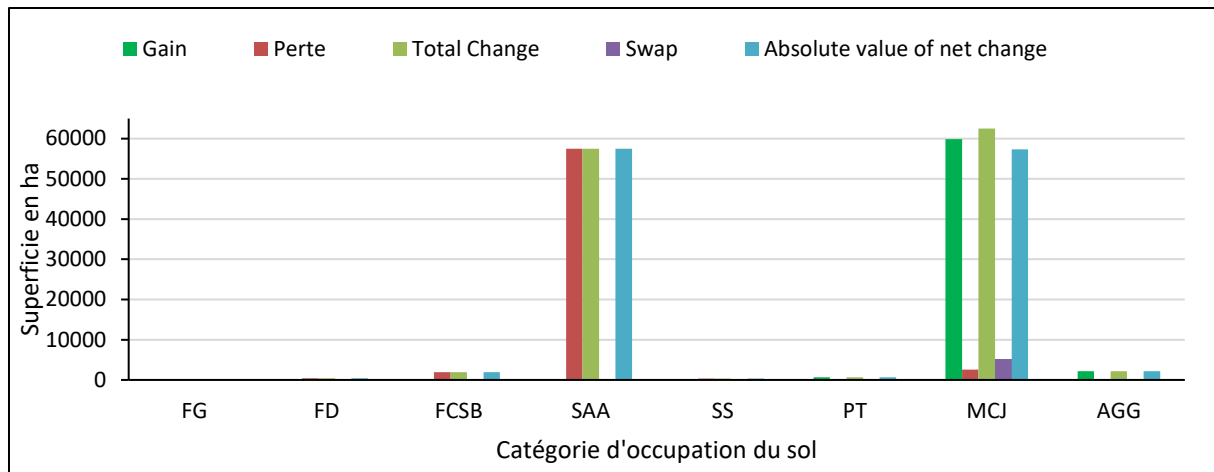
A la lecture du tableau XLVII on constate à l’horizon 2031 une régression de plus de 40 % des forêts denses, des forêts claires et savanes boisées et même des savanes arborées et arbustives. A l’opposé, les plantations, les mosaïques de cultures et jachères et les agglomérations ont progressé de plus de 40 %. La matrice de transition (2016-2031) et le LUCB budget ont permis de mieux apprécier les flux d’échange de catégories d’occupation du sol qui se sont opérés entre 2016 et 2031 (tableau XLVIII et figure 84).

Tableau XLVIII : Matrice de transition 2016-2031 du scénario CER en ha

	FG	FD	FCSB	SAA	SS	PT	MCJ	AGG	Total 2016	Perte
FG	1268,19	0	0	0	0	0	0	0	1268,19	0
FD	0	187,2	0	0	0	0	392,31	0	579,51	392,31
FCSB	0	0	2219,76	0	0	26,19	1868,13	0	4114,08	1894,32
SAA	0	0	0	43020,54	0	198,45	57295,89	0	100514,88	57494,34
SS	0	0	0	0	9167,04	0	348,3	0	9515,34	348,3
PT	0	0	0	0	0	1067,76	0	0	1067,76	0
MCJ	0	0	0	0	0	416,61	122934,24	2171,34	125522,19	2587,95
AGG	0	0	0	0	0	0	0	5426,37	5426,37	0
Total 2031	1268,19	187,2	2219,76	43020,54	9167,04	1709,01	182838,87	7597,71		
Gain	0	0	0	0	0	641,25	59904,63	2171,34		

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

Le tableau XLVIII montre une conversion des forêts denses (392,31 ha), des forêts claires et savanes boisées (1868,13 ha), des savanes boisées et arbustives (57295,89 ha) et des savanes saxicoles (348,3 ha) en mosaïques de cultures et jachères en 2031. Une partie des mosaïques de cultures et jachères (416,61 ha) et des savanes arborées et arbustives (198,45 ha) se sont transformés en plantations. Seules les mosaïques de cultures et jachères (2171,34 ha) se sont transformés en agglomérations en 2031.



Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

Figure 84 : LUCC budget (2016-2031) en ha pour le scénario CER

On constate de l'examen du tableau XLVIII et de la figure 84 qu'aucune des formations végétales naturelles n'a gagné de superficie en 2031 mais ont plutôt perdu de superficie. En effet, les forêts denses, les forêts claires et savanes boisées, les savanes arborées et arbustives et les savanes saxicoles ont perdu en 2031 respectivement 67,69 % (392,31 ha), 46,03 % (1894,32 ha), 57,19 % (57494,34 ha) et 03,66 % (348,3 ha) de leurs superficies de 2016. Les plantations et les agglomérations n'ont connu que des gains. Les plantations ont gagné 60,05 % (641,25 ha) et les agglomérations 40,01 % (2171,34 ha) de leurs superficies entre 2016 et 2031. Quant aux mosaïques de cultures et jachères, elles ont aussi bien perdu que gagné de superficie en 2031. Elles ont perdu 0,06 % (2587,95 ha) contre un gain de 47,72 % (59 904,63 ha) de leurs superficies de 2016. Soit un changement net de 45,66 % (5 7316,68 ha) de leurs superficies de 2016. Les galeries forestières sont restées apparemment stables. Ce scénario sévère montre donc une dégradation accrue des formations végétales naturelles au profit des formations anthropiques.

6.1.5. Etude comparée des résultats issus des scénarios

6.1.5.1. Comparaison des cartes simulées des trois scénarios BAU, DEC et CER

Le scénario excluant les facteurs explicatifs n'étant pas réaliste, l'étude comparée des scénarios se fera sur les trois scénarios Business-As-Usual (BAU), durabilité environnementale coordonnée (DEC) et croissance économique rapide (CER). Le tableau XLIX présente la synthèse des statistiques issues de ces cartes.

Tableau XLIX : Statistiques des superficies de catégories d'occupation du sol en 2016 et 2031 avec les taux d'expansion

	CA Markov									
	2016 (ha)	%	(ha)	Tx	BAU (ha)	Tx	DEC (ha)	Tx	CER (ha)	Tx
FG	1268,19	0,51	1155,78	-08,86	1268,19	0	1268,19	0	1268,19	0
FD	579,51	0,23	479,61	-17,24	187,2	-67,70	387	-33,22	187,2	-67,7
FCSB	4114,58	01,66	2230,74	-45,78	1989,45	-51,65	4223,7	02,65	2219,76	-46,05
SAA	100514,88	40,53	99904,68	-0,61	54388,62	-45,89	56061,81	-44,23	43020,54	-57,2
SS	9515,34	03,84	9280,89	-02,46	9149,22	03,85	9186,21	-03,46	9167,04	-03,66
PT	1067,76	0,43	1060,47	-0,68	1712,25	60,36	2615,94	145	1709,01	60,06
MCJ	125522,19	50,61	127598,31	01,65	172719,81	37,60	168575,58	34,3	182838,87	45,66
AGG	5426,37	02,19	6297,84	16,06	6593,58	21,51	5689,89	04,86	7597,71	40,01
Total	248008,32	100	248008,32		248008,32		248008,32		248008,32	

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations ; Tx : Taux d'expansion entre 2016 et 2031 en % ; BAU : Business As Usual ; DEC : Durabilité Environnementale Coordonnée ; CER : Croissance Economique Rapide

A la lecture du tableau XLIX, il ressort que selon les résultats du scénario « Business-As-Usual (BAU) » (scénario de référence), les forêts denses, les forêts claires et savanes boisées et les savanes arborées et arbustives vont diminuer respectivement de 67,7 % ; 51,65 % et 45,89 % d'ici à 2031 par rapport à l'année de référence 2016. Les superficies des plantations, des mosaïques de cultures et jachères et des agglomérations vont augmenter respectivement de 60,36 % ; 37,6 % et de 21,51 % dans la période simulée. Les superficies des forêts denses, des forêts claires et savanes boisées et des savanes arborées et arbustives sont considérablement transformées en mosaïques de cultures et jachères. Ainsi, la conversion de ces terres en terres cultivées devrait se produire principalement dans les parties plates (moins accidentées et de basse altitude) au nord-ouest et au sud-est du secteur d'étude. La superficie augmenté au niveau des plantations provient majoritairement des savanes arborée et arbustives et des mosaïques de cultures et jachères. L'augmentation de la zone bâtie (agglomération) proviendra principalement de la conversion des mosaïques de cultures et jachères. Ce n'est qu'une expansion de zone précédemment bâtie concentrée surtout dans les centres urbains.

Dans le scénario de durabilité environnementale coordonnée (DEC) ou « Alafia », l'utilisation du sol est réglementée par une politique de protection de l'environnement depuis 2016 jusqu'en 2031. Les forêts denses et les savanes arborées et arbustives ont régressé respectivement de 33,22 % et de 44,23 %. Quant aux forêts claires et savanes boisées, elles ont connu une expansion de 02,65 %. Les plantations, les mosaïques de cultures et jachères et les agglomérations vont augmenter respectivement de 145 %, 34,3 % et 04,86 %. L'expansion de la superficie de forêts claires et savanes boisées provient principalement des savanes arborées

et arbustives. Comme dans le scénario BAU, la superficie augmentée au niveau des plantations provient majoritairement des savanes arborées et arbustives et des mosaïques de cultures et jachères. L'augmentation des agglomérations provient principalement de la conversion des mosaïques de cultures et jachères.

Dans ce scénario durabilité environnementale coordonnée (DEC), la priorité a été donnée à la protection de l'environnement. Les forêts claires et savanes boisées ont augmenté de manière significative (02,65 %) tandis que le taux de déclin des forêts denses et des savanes arborées et arbustives sera légèrement inférieur à celui des deux autres scénarios (BAU et CER). Ceci traduit l'impact positif de la politique de protection de l'environnement sur la conservation des ressources végétales naturelles. De plus, cette politique a encouragé à la fois l'agriculture et une augmentation de la zone sylvicole. Il est donc possible pour le gouvernement de contrôler la déforestation, la croissance de la population, la production de bois et l'expansion de la zone bâtie.

Dans le scénario de croissance économique rapide (CER) ou « Wahala », les plantations, les mosaïques de cultures et jachères et les agglomérations vont évoluer de façon considérable (exagérée) respectivement de 60 %, 45,66 % et 40 %. La conséquence est une régression plus accentuée que celle observée au niveau des scénarios BAU et DEC des formations végétales naturelles. Ainsi, dans ce scénario, le taux de régression des forêts denses, des savanes arborées et arbustives et des forêts claires et savanes boisées sont respectivement de 67,7 %, 57,7 % et 46 %. L'expansion des zones construites (agglomérations) proviendra principalement des mosaïques de cultures et jachères. Ces dernières doivent leur expansion aux zones de forêts denses, de forêts claires et savanes boisées, de savanes arborées et arbustives et aux savanes saxicoles.

La figure 85 présente la carte de l'étude croisée des trois différents scénarios BAU, DEC et CER.

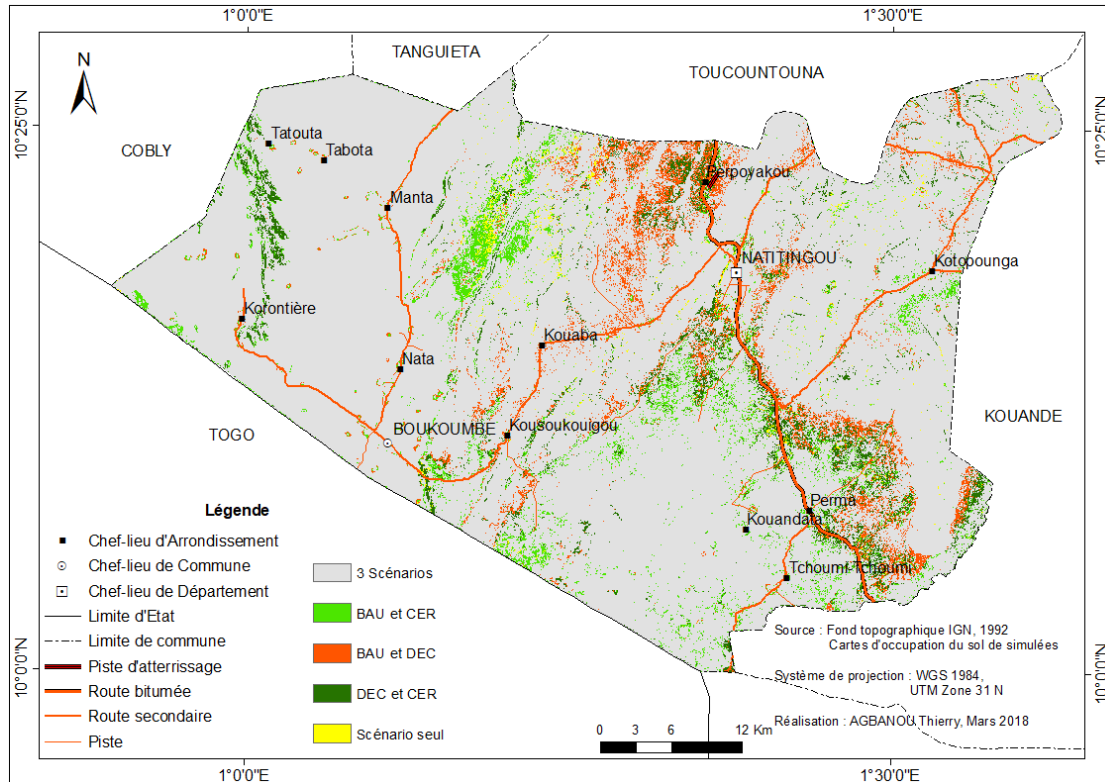


Figure 85 : Comparaison des trois scénarios BAU, DEC et CER

Légende : 3 Scénarios : Superficie Commune aux scénarios BAU, DEC et CER ;
 BAU et DEC : Superficie Commune aux scénarios DEC et CER ;
 BAU et CER : Superficie Commune aux scénarios BAU et CER ;
 DEC et CER : Superficie Commune aux scénarios DEC et CER ;
 Scénario seul : Superficie non Commune aux différents scénarios.

Pour mieux analyser cette figure 85, les statistiques des différentes intersections identifiées entre les trois scénarios BAU, DEC et CER ont été extraites (tableau L).

Tableau L : Proportion des superficies occupées par chaque catégorie d'occupation du sol dans les trois scénarios

	Proportion en % de la superficie totale des 3 scénarii							Total en %
	Intersection des 3 scénarios	Intersection BAU et DEC	Intersection BAU et CER	Intersection DEC et CER	BAU seul	DEC seul	CER seul	
FG	100	0	0	0	0	0	0	100
FD	14,1	16,2		39,8	0	15,8	14,1	100
FCSB	35,2	3,5	2,3	22,1	0,2	11,2	25,6	100
SAA	76,9	15,9	1,7	3,1	0,9	1,4	0,1	100
SS	97,5	0	0,1	2,3	0	0,1	0	100
PT	53,5	0,8	0,1	25	6	8,1	6,6	100
MCJ	91,3	0,5	4,1	3,3	0,5	0,1	0,2	100
AGG	84,7	0	12,7	0,0	0,0	0	2,5	100
Total en %	88,4	3,8	3,6	3,6		0,6		

Légende : FG : Forêts galleries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations ; BAU : Business As Usual ; DEC : Durabilité Environnementale Coordonnée ; CER : Croissance Economique Rapide

De l'examen de la figure 85 et du tableau L, il ressort que 88,43 % de la superficie de la zone d'étude (219319,29 ha) est commune aux trois scénarios de simulation. L'intersection entre BAU et DEC, entre BAU et CER et entre DEC et CER est estimée respectivement à 3,8 % (9425,7 ha), 3,01 % (8987,67 ha) et 3,56 % (8840,61 ha). Les superficies qui diffèrent individuellement selon le scénario considéré ne représentent que 0,59 % (1457,55 ha). Les superficies qui ont le plus variées en fonction du scénario choisi sont les forêts denses et les plantations. Les proportions de ces catégories d'occupation du sol sont plus importantes dans le scénario DEC (entre 8,10 et 15,78 %) que dans les autres scénarios BAU et CER (entre 0 et 14,09 %). Quant aux forêts claires et savanes boisées, 25,58 % de leurs superficies sont retrouvées uniquement dans le scénario CER, alors qu'elles n'occupent que 0,9 % de la superficie du milieu d'étude à l'horizon 2031 dans ce scénario.

Globalement pour les trois scénarios, le scénario CER est plus sévère avec une occupation de plus de 70 % de la zone d'étude par les mosaïques de cultures et jachères. Cette catégorie d'occupation du sol est concentrée beaucoup plus dans le nord-ouest et le sud-est. Ce sont des zones moins accidentées et relativement plat et présentant des aptitudes aux cultures vivrières.

6.1.5.2. Comparaison des cartes simulées des deux scénarios DEC et CER

Une comparaison entre les scénarios DEC (Alafia) et CER (Wahala) permet de constater qu'il y a une amélioration de l'état du couvert végétal au niveau du scénario DEC (figures 86).

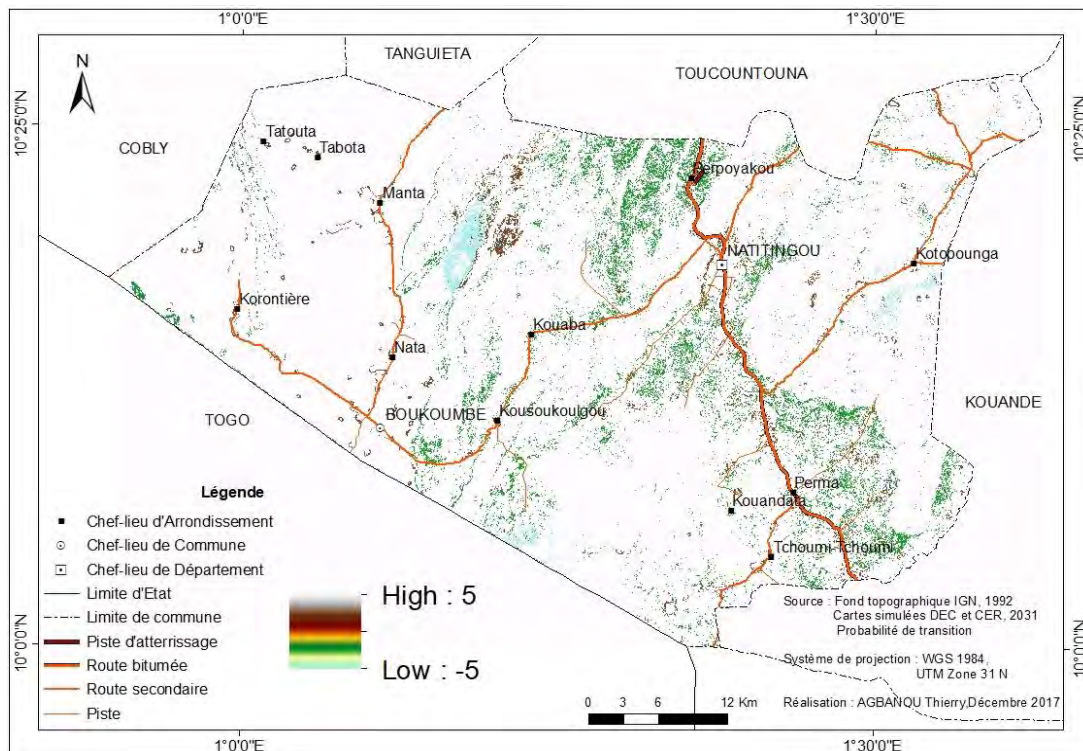


Figure 86 : Cartes de comparaison d'occupation du sol entre les cartes simulées DEC et CER

Légende d'interprétation de la carte :

Un résultat négatif indique une occupation du sol plus "naturelle" dans le scénario DEC comparé au scénario CER

Un résultat positif indique une occupation du sol plus "anthropisée" dans le scénario DEC que CER

Un résultat nul indique une occupation du sol identique dans le scénario DEC que CER

L'extraction des pixels de différentes valeurs (+ /- ou 0) sur la figure 86 a permis d'obtenir le tableau LI ci-dessous.

Tableau LI : Statistiques de comparaison des pixels des deux scénarii DEC et CER

Valeur de la différence	Nombre de pixels	Superficie en ha	%	Signe de la différence	Total %
-5	1787	160,83	0,06	négatif	7,61
-4	21456	1931,04	0,78		
-3	146881	13219,29	5,33		
-2	4307	387,63	0,16		
-1	35263	3173,67	1,28		
0	2535110	228159,90	92,00	nul	92,00
1	9635	867,15	0,35	positif	0,39
2	597	53,73	0,02		
3	592	53,28	0,02		
4	0	0,00	0,00		
5	20	1,80	0,00		
total	2755648	248008,32	100,00		100,00

Il ressort de l'examen de la figure 86 et du tableau LI que les pixels à valeur nulle (0) représentent 92 % du total. C'est-à-dire que 92 % des pixels des deux scénarios DEC et CER se comportent de la même manière. Alors que les pixels de valeurs négatives représentent 7,61 %. Ce qui traduit que 7,61 % des pixels représentent les milieux naturels avec un couvert végétal beaucoup plus en bon état au niveau du scénario DEC que du CER. A l'opposé, seulement 0,39 % de la superficie du scénario DEC présente des surfaces plus anthropisées qu'au niveau du scénario CER. Ceci confirme bien la tendance à la conservation ou restauration du couvert végétal au niveau du scénario DEC. La zone de couverture végétale beaucoup naturelle se trouve plus au nord et sud-est de la zone d'étude.

6.2. Discussion

6.2.1. Validation des classifications

Aujourd'hui pour l'étude de l'impact des activités humaines sur l'environnement, l'imagerie satellitaire multibandes est beaucoup utilisée. La périodicité des prises de vue et des résolutions spatiales de plus en plus performantes facilitent l'identification et le suivi des dynamiques paysagères (Mama, 2013). L'occupation du sol est l'outil de base pour cette étude de la dynamique paysagère. La qualité des images Landsat utilisée dans cette étude n'ont pas facilité

la réalisation des cartes d'occupation du sol parce qu'elles sont parfois bruitées, contiennent un mélange de pixels mixtes, des interactions spatiales entre pixels (Otukey & Blaschke, 2010 ; Mama, 2013). Du coup, on observe dans le processus de classification des erreurs d'assignation surtout au niveau des pixels non homogènes.

La validation des classifications de l'occupation du sol à partir des images multi-sources et multi-dates semble offrir une approche innovante. L'approche descriptive et statistique utilisées offrent un moyen d'analyse des changements pertinents.

La classification de l'occupation du sol dans cette zone d'étude a été faite à partir des images Landsat de 30 m de résolution. La procédure de classification mise en œuvre utilise l'algorithme du Maximum de Vraisemblance (Dymond *et al.*, 2002). Cet algorithme a été préféré à cause de sa robustesse et sa large utilisation dans la cartographie. L'indice de Kappa est l'un des critères de validation des classifications. Plus sa valeur est élevée, plus la classification est meilleure. Dans les différentes classifications réalisées, la valeur de l'Indice de Kappa est toujours supérieure à 80 %. Ce qui permet de conclure que les résultats de ces classifications sont globalement acceptables (Pontius, 2000). La valeur élevée de l'indice d'exactitude (supérieur à 0,91) de toutes les classifications permet de déclarer acceptable l'interprétation des images ayant servi à ces classifications (Mugisha *et al.*, 2010). L'utilisation d'autres images notamment les séries d'images Modis VCF, Modis NVDI et Google Earth a permis d'améliorer et de valider ces classifications d'occupation du sol. Ceci corrobore bien avec les travaux de Cano (2016) et Ali *et al.* (2013) qui ont prouvé que l'utilisation des séries temporelles d'images Modis permettent d'atteindre une précision suffisante pour caractériser les gradients de végétation et de faire une bonne classification. Mais, si ces résultats obtenus sont acceptables, ils ne doivent pas occulter les difficultés rencontrées lors de la classification. En effet, l'analyse de certaines parties de l'image a été difficile à cause de la période de prise d'image. D'ailleurs selon Shao *et al.* (2008), la classification des images satellites n'est jamais complètement précise. Il faut juste qu'elle respecte globalement les normes recommandées par Pontius (Mama et Oloukoi, 2003).

Une analyse *in fine* des statistiques issues des algorithmes Theil-Sen et Mann-Kendall obtenues à partir des différents indicateurs (TC, NTV et NV) des images Modis VCF (données annuelles) traduisent bien de façon globale les changements d'occupation des sols observés à partir des images Landsat entre 2000 et 2016. Les classes difficiles à discriminer visuellement sont celles dont les signatures spectrales sont similaires ; c'est d'ailleurs ce qui expliquerait par exemple que les savanes se confondent aux jachères et les forêts denses se confondent aux forêts galeries.

Mais les valeurs des erreurs de commission enregistrées sont acceptables dans la mesure où aucune de ces erreurs n'est au-dessus de 70 %, souvent considéré comme valeur limite (Pontius, 2000). Toutefois, les incertitudes liées à la résolution des images ont eu une influence sur les résultats de la modélisation (Jain et Yang, 2005; Jung *et al.*, 2009).

6.2.2. Dynamique de l'occupation du sol

La dynamique de l'occupation du sol montre que les formations végétales denses (forêts denses, forêts claires et savanes boisées et forêts galeries), par opposition aux formations ouvertes (savanes arborées et arbustives) et aux formations anthropisées (mosaïques de cultures et jachères, agglomérations), régressent de façon importante. Dans cette étude, globalement le taux de régression des formations naturelles est de 37,32 % entre 1987 et 2016. Ceci est largement en-dessous de la valeur de 60 % obtenu par Tente (2005) sur les chainons du secteur Natitingou-Toucountouna au cours de la période 1975-2003. Le taux annuel de régression constaté au niveau des formations ligneuses est d'environ - 4 % pour la période 1987-2000 et de - 5 % au cours de la période 2000-2016. Pour une étude couvrant l'ensemble des formations forestières du Bénin, ce taux a été évalué à -1,2 % pour la période de 1990 à 1995 (FAO, 1997) et à - 1,8 pour la période 1986-2005 (Hountondji, 2013). Les valeurs obtenues dans le secteur Natitingou - Boukombé montrent donc une diminution plus rapide des zones boisées comparativement à la moyenne nationale. Le rapprochement des variables démographiques et économiques met en évidence un déséquilibre entre les besoins des populations et les ressources disponibles (Onibon, 1998). Cette progression de la superficie des unités anthropisées est liée d'une part à l'augmentation de la population dans le secteur d'étude et à une demande de plus en plus croissante des terres agricoles d'autre part (Amoussou, 2010). En effet, le système de production (agriculture itinérante sur brûlis) appauvrit les sols et accélère la destruction des ressources ligneuses du milieu.

Par contre la dynamique au cours de la période 1987-2000 est assez largement en faveur des zones cultivées évidemment plus importantes sur les fronts pionniers. Le taux moyen annuel d'expansion des mosaïques de cultures et jachères dans cette période est de 4,3 % contre 2 % pour la période 2000-2016. En effet, 38,2 % des superficies de cultures et jachères sont gagnées par défrichement des forêts claires et savanes boisées et 14 % par défrichement des savanes arborées et arbustives. Ceci s'explique par le fait que cette période a été marquée par une croissance démographique importante (Bidou *et al.*, 2013) et une agriculture purement extensive sans utilisation de fertilisants pour le sol.

Après de longue durée de mise en culture des terres issues de la destruction de forêts denses, forêts claires et savanes boisées, elles sont mises en jachères. Mais ces jachères ne reviennent plus souvent à la forêt mais sont réinsérés dans une rotation de champs cultivés ou sont transformées en savanes arborées ou arbustives simplement. Ceci corrobore les résultats obtenus par Bidou *et al.* (2013). Ces mêmes auteurs avaient démontré dans leur étude qu'au nord-ouest du Bénin, les gros hameaux qui se trouvent sur les routes, et leurs marchés jouent un rôle aussi important dans le développement de l'agriculture que la seule croissance démographique.

Le taux d'expansion annuel des plantations qui est passé de 21,8 % au cours de la période 1987-2000 à 30 % au cours de la période 2000-2016 s'explique par un effort de reboisement des services des eaux et forêts, et des Organisations Non Gouvernementales (ONG) qui sont de plus en plus nombreuses dans la lutte pour la protection de l'environnement. Il y a aussi l'investissement de plus en plus des individus dans l'agroforesterie notamment de grandes superficies d'anacardes et de manguiers ont été planté dans le secteur d'étude.

En résumé, la tendance de régression du paysage ligneux au profit de la culture et des espaces urbains observée depuis 1987 à 2016 à une vitesse importante a été aussi observées par plusieurs auteurs dont Tente (2005), Hountondji (2008), Leroux (2012) et Bidou *et al.* (2013) qui ont réalisé des études sur le Bénin et dans la région soudanienne. Celle-ci se fait alors au départ des centres urbains et villageois mais également le long des principaux axes de communication (réseau de routes, réseau de pistes). Ce qui confirme l'hypothèse selon laquelle les formations naturelles dans le secteur Natitingou-Boukombé régresse à une vitesse très rapide. Par ailleurs, ceci se fait au dépend des espaces de végétation dense (forêts denses et claires, forêts galeries, savanes boisées) qui subissent une forte régression (Bidou *et al.*, 2013). L'utilisation de ces espaces déboisés permet de bénéficier de nouvelles terres fertiles et donc d'augmenter les productions agricoles. Du coup, la déforestation entraîne une perte de la biodiversité en raison de la destruction de nombreux habitats naturels (Toko, 2008 ; Arouna, 2012). Au-delà de l'exploitation des ressources ligneuses et de l'expansion des terres agricoles, pour améliorer la sécurité alimentaire, il est indispensable de mettre en place des stratégies de gestion durable des ressources naturelles de ce milieu en particulier et de tout le Bénin en général.

6.2.3. Activités humaines facteurs de dégradation

L'exploitation forestière et les activités agricoles se révèlent comme premières activités destructrices du couvert végétal. Ce résultat concorde avec les travaux de Djohy *et al.*, (2016) qui ont montré que les activités agricoles constituent les causes majeures de dégradation du

couvert végétal dans le nord du Bénin. Ce phénomène a pour corrolaire la rupture de l'équilibre écologique et une perte de la biodiversité. A l'exception de certains arbres plus ou moins protégés à cause de leur importance nutritionnelle (alimentaire) comme *Parkia biglobosa* (néré), *Vitellaria paradoxa* (karité), *Adansonia digitata* (baobab), *Khaya grandifoliola* (faux cajou), *Tamarindus indica* (tamarinier), *Khaya senegalensis* (caïlcédrat) et *Borassus aethiopum* (rônier) indissociables des zones de culture (Pelissier, 1966 ; Tente, 2005 ; Hountondji, 2008 ; Arouna, 2012), la strate ligneuse est très sollicitée. Elle fournit le bois de chauffe, le bois pour la fabrication du charbon et des meubles et pour la construction. La proximité des grandes agglomérations telles que Natitingou et Boukombé incite à l'abattage de nombreux arbres pour la vente. On assiste donc au convoiement d'importantes quantités de bois en direction de ces villes avec des stocks de bois attendant l'acheteur exposés souvent le long de certaines routes. Selon Mbaye (2007) le développement du secteur bois, est le résultat de l'urbanisation accélérée durant les trois dernières décennies. Cette urbanisation a transformé le bois-énergie en marchandise. Aussi, l'importance croissante du revenu lié au bois en milieu rural, en raison d'une forte augmentation de la demande urbaine, s'explique par les nombreux avantages de ce type d'activité. Cette production primaire permet d'obtenir des revenus de façon sûre et rapide, en presque n'importe quelle saison : c'est véritablement une cueillette de rente.

Du coup, les espèces utilisées comme combustibles ou bois d'œuvre (*Azelia africana*, *Kkaya senegalensis*, *Prosopis africana*, *Burkea africana* et *Anogeissus leiocarpas*) deviennent de plus en plus rares (Tente, 2005 ; Akoègninou et Akpagana, 1997) parce que les jeunes pieds de ces espèces n'atteignent plus l'âge adulte avant d'être coupés pour les besoins en combustible.

En ce qui concerne la strate herbacée, elle fournit le chaume nécessaire à la couverture des cases ou à la confection des palissades. Elle est souvent exploitée avant les feux de végétation.

L'élevage reste aussi une activité qui influence la dynamique de l'occupation du sol. En absence de couloir de transhumance, l'utilisation des mêmes aires pastorales pendant plusieurs années conduit à une diminution de la productivité consécutive à l'appauvrissement floristique (Ndiaye, 2007). Ceci contraint parfois les éleveurs pour assurer la survie de leurs bêtes, à ébrancher ou même abattre des arbres et des arbustes.

Le feu est souvent employé sans contrôle nécessaire et réduit en cendres d'importantes surfaces en fonction du combustible, du faible taux d'humidité de la végétation, du vent et des températures (Hountondji, 2013). Malgré que les feux représentent une cause de destruction des milieux forestiers, la majorité des scientifiques admettent qu'ils ne détruisent pas les savanes, mais qu'ils sont au contraire le principal facteur de leur maintien. Cette idée

correspond à la notion d'« incorporation » d'une perturbation récurrente (Allen & Starr, 1982; Fournier, 2001, Hontondji, 2013). Ceci explique bien la persistance observée au niveau des savanes arborées et arbustives qui est de 56,88 % au cours de la période 1987-2000 et de 52,54 % au cours de la période 2000-2016. Du coup, moins il y a de feux de végétation (ou plus de feux précoces), plus les savanes évoluent vers les milieux fermés. La conversion de 22,12 % des savanes arborées et arbustives en forêts claires et savanes boisées pendant la période 1987-2000 contre seulement 0,73 % pendant la période 2000-2016 montre que les savanes arborées et arbustives ont été moins perturbées au cours de la première période que de la deuxième. Il y a certainement eu moins de feux de végétation ou plus de feux de végétation précoces. Cet usage récurrent de feux de végétation utilisé surtout par les agriculteurs pour défricher les espaces à cultiver confirme bien la deuxième hypothèse de cette étude.

A ces activités humaines, s'ajoutent les perturbations climatiques et l'exploitation de pierres ornementales et de pierres concassées. Ces dernières conduisent à la destruction complète de la végétation (Tente, 2005). Selon ce même auteur, la reprise de la végétation après exploitation est très lente. Dans les anciennes carrières, la taille des ligneux ne dépasse pas 1,5 m même 6 ans après l'arrêt de l'exploitation. Il apparaît donc que l'évolution des formations végétales est remise en cause dans ces sites d'exploitation. Il en découle que l'exploitation des pierres affectera la croissance des arbres.

6.2.4. Analyse de l'incertitude spatiale des futurs changements de l'occupation du sol

Les simulations ne cherchent pas à prédire l'avenir avec exactitude mais permettent de localiser et de quantifier les marges de manœuvres existantes (Houet, 2006). La méthode des scénarios prospectifs spatialisés à l'échelle locale constitue un outil puissant d'aide à la décision pour les gestionnaires de l'espace. Les différents scénarios prospectifs conçus ici tiennent compte des différentes activités socio-économiques développées dans le milieu d'étude. De façon globale, la tendance évolutive des formations végétales dans cette étude est régressive et celle des formations anthropiques évoluent de façon progressive. Le scénario BAU tient compte des tendances socioéconomiques passées et présentes. Dans ce scénario, les superficies des mosaïques de cultures et jachères, des agglomérations et des plantations ont augmenté. L'augmentation de ces catégories d'occupations du sol pourrait s'expliquer par l'augmentation de la population et donc de la nourriture et de logement. En compensation à cette forte demande de terres, il y a une réduction des superficies des savanes. Ceci concorde bien avec les travaux de Abdus *et al.* (2017) mené sur Punjab une province du Pakistan et qui explique la forte

demande des terres cultivées et du bâti par l'augmentation de la population. Ces résultats confirment bien l'hypothèse de cette étude selon laquelle la tendance régressive du couvert végétal semble continuer dans le futur avec les pratiques actuelles d'utilisation des terres.

Le scénario catastrophique (CER) prévoit que les formations végétales naturelles passeront de 74,62 % en 1987 à 22,52 % en 2031. Ceci au profit des formations anthropiques notamment des mosaïques de cultures et jachères qui passeront de 25,38 % à 77,48 % en 2031. Ces prévisions sont proches de celles prévues par Mama (2002) à l'horizon 2025 dans les Communes de Savè, Ouèssè et Tchaourou qui stipulent que les formations végétales passeront de 76 % en 1986 à 7 % et qu'à l'inverse les zones de cultures vont s'accroître de 24 % à 76 % pendant la même période. Les résultats de cette étude corroborent aussi ceux de Oloukoï (2013) qui a trouvé que les zones de cultures et jachères verront leurs superficies se stabilisées autour de 79 % entre 2025 et 2034. Ce scénario CER dont les hypothèses sont basées sur une forte croissance démographique et économique aboutissant à une augmentation plus importante des mosaïques de cultures et jachères et du bâti par rapport aux scénarios BAU et DEC.

Dans le scénario durabilité environnementale coordonnée (DEC), un scénario dans lequel les ressources végétales sont préservées tout en laissant libre court aux activités agricoles, on note un ralentissement de l'extension des mosaïques de cultures et jachères (67 %) à l'horizon 2031 avec une légère progression du couvert végétal (environ 33 %). Dans le scénario DEC où la priorité est donnée à la préservation de ressources végétales, les superficies de forêts claires et savanes boisées et des savanes arborées et arbustives sont plus importantes que dans les autres scénarios. Ce scénario qui combine à la fois la préservation du couvert végétal avec les activités agricoles responsabilise l'Etat dans son rôle de contrôle de la déforestation et de subvention du gaz domestique pour remplacer le bois de feu. Ceci est similaire au scénario de densification développé par Lajoie et Hagen-Zanker (2007) qui encourage la préservation des forêts et limite l'étalement urbain dans l'Ile de la Réunion à l'horizon 2031. Les hypothèses de ce scénario viendront corriger si elles se réalisaient les nombreux dommages qu'engendrent les activités formelles et informelles d'exploitation du bois sur l'environnement identifiés par d'autres auteurs comme Assouni (2009), Odjoubéré (2010) et Oloukoï (2012). Aussi cette étude s'est-elle intéressée à la variabilité climatique qui ferait sans doute partie des facteurs de dégradation du couvert végétal de ce milieu. Plusieurs études menées par Feddema *et al.* (2005), Vissin (2007) ont prouvé l'influence de la variabilité climatique sur l'état de surface.

Des scénarios proposés, le scénario DEC est le plus idéal à condition que cette politique environnementale soit strictement mise en œuvre par l'Etat. Il y a un avantage économique et

environnemental. Ce scénario peut donc être une référence pour les décideurs politiques pour l'utilisation future durable du territoire. Même si le scénario CER assure d'une manière ou d'une autre la sécurité alimentaire, elle participe à la dégradation de l'environnement qui, à la longue va compromettre cette sécurité alimentaire.

Cette recherche n'a pas été menée sans difficultés. Les difficultés majeures sont entre autre :

6.3. LIMITES DE L'ETUDE

6.3.1. Difficultés de classification

A cause de la résolution des images Landsat utilisées, il y a des confusions mineures observées entre :

- les savanes arborées et arbustives et les champs et jachères ;
- les galeries forestières et les forêts denses, parfois même avec les plantations ;
- les forêts claires et savanes boisées et les savanes arborées et arbustives ;
- les savanes arborées et arbustives et les forêts galeries.

6.3.2. Validation des classifications

- Difficulté de contrôler certains points sur le terrain à cause de l'inaccessibilité de ces zones.
- La faible résolution spatiale des images Modis (surtout les Modis VCF), n'a pas facilité la détection de certains changements d'état du couvert végétal. Mais la grande résolution temporelle de ces images a quand même facilité le suivi de l'évolution du couvert végétal.
- Certes les séries d'images Modis VCF et NDVI présentent des variations des TC, NTV, NV et NDVI au fil des années avec une tendance généralement à la baisse et parfois en dent de scie, mais l'on ne sait pas avec exactitude quand ces changements se sont opérés.

6.3.3. Mise en place des scénarios et modélisation

- Compte tenu du contraste qu'il y a entre le changement de l'occupation du sol entre la période 1987-2000 et 2000-2016, le modèle a dû être calibré sur la période la plus récente. Du coup, il était impossible de valider ce modèle.
- Une quasi absence de la période d'apprentissage et de validation du modèle à cause de la qualité des données liées surtout à la qualité des images satellitaires utilisées.
- L'absence de plusieurs variables explicatives comme la profondeur et le PH des sols, le PH et les programmes ou projets d'aménagement de routes ou d'infrastructures socio-

économiques, les données d'occurrence de feux de végétation, etc. Toutes ces variables et bien d'autres auront d'une manière ou d'une autre une influence sur les changements d'occupation future du sol dans le milieu d'étude.

- Le taux d'explication des variables environnementales influençant l'occupation du sol est inégal d'une catégorie d'occupation du sol à une autre.

Conclusion partielle

L'approche prospective utilisée dans cette étude a permis de comprendre et de montrer le devenir des territoires (leurs trajectoires à l'horizon 2031). Le modèle dynamique (LCM) utilisé pour la simulation a permis d'observer des changements dans l'occupation du sol en fonction du scénario utilisé. Il est à retenir que, quelque soit le scénario, la superficie des mosaïques de cultures et jachères, les zones bâties et les plantations sont en augmentation. Alors que les superficies des zones de forêts denses, et de savanes arborées et arbustives diminuent. Globalement le scénario DEC (Alafia) est préférable pour la gestion de l'utilisation des terres de façon durable. Ces résultats peuvent ainsi servir de référence pour la planification et la gestion durables de ce territoire en cours de sahélanisation.

La bonne compréhension de la dynamique de l'occupation du sol et des facteurs influençant cette dynamique est déterminante pour la maîtrise et la gestion du territoire. Elle permet également de mieux comprendre la relation entre les hommes et leur environnement de vie. L'exploration des futurs possibles permettra aux décideurs de prévoir les actions futures à mener ou d'ajuster leurs politiques futures en matière de gestion territoriale. La simulation prospective reste à nos jours l'un des meilleurs outils aidant aux prises de décision pour la gestion des territoires. C'est donc à juste titre que cette étude a été entreprise pour explorer l'éventail des futurs possibles de l'occupation du sol afin de prévenir la mauvaise gestion des ressources naturelles du secteur d'étude en particulier et de tout le Bénin en général.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude, a permis de suivre et de comprendre la dynamique du paysage du nord-ouest du Bénin à partir des images de télédétection, des données de terrain et des outils de cartographie numérique. Il ressort de ce suivi, une extension rapide des zones à emprises agricoles au détriment des formations végétales naturelles. Entre 1987 et 2016, de grandes mutations spatiales ont été observées allant dans le sens de la dégradation progressive du couvert végétal. Les réserves de forêts denses et forêts claires sont pratiquement détruites par les exploitants de bois et ne reste que des bosquets qui abritent des divinités. Les savanes qui sont les formations végétales les plus importantes de ce milieu sont en dégradation. En gros, les formations végétales disparaissent au profit des champs et jachères. Ce phénomène est plus accentué dans la partie nord-ouest et sud-est de la zone d'étude. Ces deux parties du milieu d'étude sont des zones moins accidentées avec un sol relativement profond. La partie nord-ouest est particulièrement sous l'influence du sahel à cause de sa proximité avec le Burkina Faso et le Niger. Les principaux facteurs de ces mutations spatiales sont la croissance démographique, les activités humaines et la variabilité pluviométrique qui est d'une manière ou d'une autre tributaire des activités humaines. La forte demande en terre à cultiver et l'exploitation de bois pour la construction et surtout pour l'énergie domestique contribuent fortement aux mutations spatiales de ce milieu et, par conséquent, à la perturbation de cet écosystème d'une stabilité trompeuse. Les dynamiques spatiales observées actuellement sont sans Commune mesure avec la capacité d'auto-régénérescence des formations végétales naturelles. Les projections de la physionomie du paysage de ce secteur d'étude à l'horizon 2031, en prenant en compte tous les scénarios possibles montre que :

- Dans un scénario tendanciel Business As Usual (BAU), près de 70 % de la superficie du milieu d'étude seront occupés par les mosaïques de cultures et jachères au détriment des formations végétales.
- Dans un scénario catastrophique, Croissance Economique Rapide (CER) « wahala 2031 », mettant l'accent uniquement sur les aspects économiques, près de 74 % de la superficie de ce milieu sera occupé par les mosaïques de cultures et jachères avec une disparition totale des forêts denses et seulement de 1 % de forêts claires et savanes boisées, soit 24 % de formations végétales et 3 % de zones urbanisées.
- Dans un scénario plus conservateur de l'environnement tout en favorisant de façon continue les activités agricoles, intitulé scénario Durabilité Environnementale Coordinnée (DEC) « Alafia 2031 », on note environ 68 % de superficie du milieu

d'étude occupée par les mosaïques de cultures et jachères, une conservation ou reconstitution de 31 % de formations végétales (forêts claires et savanes boisées) et 2 % de zones urbanisées.

De ces trois scénarios, on constate une emprise importante des zones de cultures sur les autres catégories d'occupation du sol. Mais le scénario conservateur de l'environnement reste le plus souhaitable. Encore que si toutes les dispositions idoines étaient prises par les autorités compétentes, on pourrait espérer mieux que tous les scénarios explorés. L'évolution de la superficie de la zone de culture observée à l'horizon 2031 s'explique par la forte croissance démographique. La demande forte en espace à emblaver entraîne une pression sur les espaces naturels. Les conséquences de cette dégradation du couvert végétal est la déforestation et surtout la sahélistation de cette zone déjà proche du sahel, le changement climatique et surtout la perte de la biodiversité. Il semble donc urgent de développer une stratégie de gestion intégrée et participative aussi bien à l'échelle locale que régionale pour préserver ses ressources végétales et de garantir pour résilience. C'est justement pour éclairer les décideurs de ce secteur d'étude en particulier et du Bénin en général que cette étude qui à partir des images satellitaires a étudié la dynamique du paysage sur le nord-Bénin et fait des projections sur le futur, a été entreprise. En somme un processus de dégradation et même de désertification de ce milieu est en cours et va s'accroître les années à venir si rien n'est fait pour le freiner. Ces résultats interpellent les différents acteurs ou décideurs en charge de la gestion de ce territoire. Ils doivent de façon urgente développer des stratégies de gestion intégrée et participative aussi bien à l'échelle locale que régionale pour préserver les ressources végétales et en garantir la résilience et définir des stratégies d'agriculture durable. Ces décisions doivent prendre de façon spécifique en compte les zones de basse altitude et d'accès facile qui se retrouvent au nord-ouest et au sud-est du milieu d'étude. Ces zones connaissent plus rapidement des mutations spatiales, notamment une colonisation rapide d'espaces cultivés.

Pour une meilleure gestion de ce milieu, les autorités et décideurs en charge de l'aménagement du territoire en concertation avec les populations devraient définir :

- Des plans d'aménagement prenant en compte les zones de densification urbaine ;
- Des espaces agricoles exploitables ;
- Une politique d'agriculture plus intensive qu'extensive pour limiter l'utilisation de très vastes terres cultivables ;
- Les zones naturelles réservées ou protégées ;
- Les couloirs de transhumance et réaménager ceux existants pour les éleveurs.

- Les zones d'actions prioritaires à reforester (à reboiser).
- Appliquer avec rigueur les textes et lois qui réglementent l'exploitation du bois au Bénin.
- Pour limiter l'exploitation du bois énergie (bois de feu et charbon de bois) qui prend de plus en plus d'ampleur, une politique de subvention du gaz domestique devrait être enclenchée par les gouvernants pour rendre ce combustible accessible à tous les ménages aussi bien urbains que ruraux.

Pour donc cadrer avec les objectifs de développement durable qui veulent qu'en satisfaisant les besoins d'aujourd'hui, que l'on préserve les ressources naturelles pour servir aux générations futures, il est donc nécessaire de développer des modèles clairs et transparents de gestion du territoire conciliant les activités agricoles avec la préservation du couvert végétal en particulier et les ressources naturelles en générales. Ceci nous amène à envisager dans le futur l'approfondissement des recherches sur la conception de modèle de planification et de gestion spatiale pouvant concilier les activités agricoles et la conservation des ressources naturelles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abdoulaye D., 2015. Dynamique de l'occupation des terres et ses incidences sur l'écoulement dans le bassin versant de l'ouémé à l'exutoire de Bétérou (nord-Bénin). Doctorat Unique Université d'Abomey-Calavi, 270 p.

Abdus S., Xiangzheng D., Siqi J. and Dongdong C., 2017. Scenario-Based Simulation on Dynamics of Land-Use-Land-Cover Change in Punjab Province, Pakistan. *Sustainability* 2017, 9, 1285. 17 p.

Abfdelkrim B., Zakaria S., Tahar I. et Said B., 2003. Utilisation de la télédétection et des SIG pour l'aide à la surveillance du risque de dégradation des parcours steppiques. *Télédétection*, 2003, vol.3, n° 5, pp. 387-402.

Adam K. S. et Boko M., 1993. Le Bénin. Paris, Edicef, 2ème édition, 93 p.

Adjinda A.S. et Hounton K.N., 1997. Contribution à l'étude de la dynamique de l'environnement dans une zone d'accueil : cas des sous-préfectures de Savè, Ouèssè et Tchaourou. Mémoire d'ingénieur des travaux, Collège polytechnique universitaire/ Université Nationale du Bénin, Abomey- Calavi, 84 p.

Affaton P., 1987. L'unité structurale de l'Atacora et de la frange occidentale des unités internes des dahomeyides (quatrième partie), in Le bassin des Volta (Afrique de l'ouest) une marge passive, d'âge proterozoïque supérieur, tectonisée au panafricain. Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille III, édition de l'ORSTOM pp. 184-290.

Afouda F., 1990. L'eau et les cultures dans le Bénin central et méridional : étude de la variabilité des bilans de l'eau dans leur relation avec le milieu rural de la savane africaine. Thèse de Doctorat nouveau régime, Paris IV Sorbone, 428 p.

Akoegninou A. & Akpagana K., 1997. Etude cartographique et dynamique de la végétation de l'aire classée de la colline de Savalou (Bénin). *J. Bot. Soc. Bot. Fr.*, 3 : pp. 69-81.

Akognongbé A., Abdoulaye D., Vissin E.W. et Boko M., 2014. Dynamique de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Oueme à l'exutoire de Bétérou (Bénin). *Afrique Science* 10(2) (2014), pp. 228 - 242

Ali A., de Bie C.A.J.M., Skidmore A.K., Scarrott R.G., Hamad A., Venus V. et Lymberakis P., 2013. Mapping land cover gradients through analysis of hyper-temporal NDVI imagery. *International journal of Remote Sensing*. 50 (17), pp. 3529-3539.

Ali A. et Lebel T., 2009. L'indice de précipitations normalisé du Sahel revisité. *Int. J. Climatol*, 29 (12), pp. 1705 - 1714 , doi:[10.1002 / joc.1832](https://doi.org/10.1002/joc.1832).

Allen, T. F. H. et Starr Hierarchy T. B., 1982. Perspectives for ecological complexity. Chicago: University of Chicago Press, 310 p.

Ammar M. Y., 2007. Mise en œuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de cinétiques réactionnelles en vue de la transposition batch/continu. Thèse de Doctorat en Génie des procédés et de l'Environnement, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Tunisie, 194 p.

Amoussou E., 2010. Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 313 p.

Antoni J-Ph., 2006. Modélisation urbaine et calibrage des modèles. Essais et expériences à Belfort. *Cybergeo : Revue européenne de géographie*, N°347, (<http://www.cybergeo.eu>).

Ardoin-Bardin S., 2004. Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, 437 p.

Arouna O., 2012. Cartographie et modélisation prédictive des changements spatio-temporels de la végétation dans la Commune de Djidja au Bénin : implications pour l'aménagement du territoire. Thèse de Doctorat Unique Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 246 p.

Assouni J., 2009. Impact socio-économique et environnementaux de l'exploitation du bois dans la Commune de Tchaourou. Mémoire de DEA, FLASH, UAC, Bénin, 97p.

Atchade G. A., 2014. Impacts de la dynamique du climat et de l'occupation des terres sur les ressources en eau du bassin versant de la rivière zou dans le Bénin méridional. Thèse de doctorat unique de l'Université d'Abomey-Calavi, Bénin. 235p.

Balbontin T.D., 2014. Analyse de la détérioration de la forêt de la Cordillère de la Costa dans le sud chilien : géomatique et modélisation prospective appliquée sur une forêt patrimoniale de la province d'Osorno (41° 15' - 41° 00' latitude Sud). Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, France, 412p.

Ballouche A., Akouègninou A., Neumann K., Salzmann U. et Sowunmi M. A., 2000. Le projet “Dahomey Gap“: une contribution à l’histoire de la végétation du sud Bénin et sud-ouest du Nigéria. *Berichte des sonderforschungsbereichs 268, band 14, Frankfurt a. M. 2000* : pp. 237-251.

Bamba I., Mama A., Neuba D. F. R., Koffi K. J., Traoré D., Visser M., Sinsin B., Lejoly J. et Bogaert J., 2008. Influence des actions anthropiques sur la dynamique spatio-temporelle de l’occupation du sol dans la province du Bas-Congo (R.D. Congo). *Sciences & Nature Vol. 5 N°1* : pp. 49 – 60.

Bangirinama F., Bigendako M. J., Lejoly J., Noret N., DE Cannière C. et Bogaert J., 2010. Définition d’indices successionnels pour la caractérisation du processus de la succession post-culturelle au Burundi. *Bois et Forêts des Tropiques, 305 (3)* : pp. 57-66.

Banque Mondiale, 1992. Rapport mondial sur le développement dans le monde : le développement et l’environnement. BM, Washington, 192p.

Barbalata C. J., 1996. Analyse diachronique de la dynamique des milieux naturels par télédétection satellitaire. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXI, Part B7. Vienna 1996*, pp. 53-58.

Benabadji N., Benmansour D. et Bouazza M., 2007. La flore des monts d’Ain Fezza dans l’ouest algérien, biodiversité et dynamique. *Science & Technologie n° 26, Décembre 2007*, pp. 47-59.

Bergaoui M. et Alouini A., 2001. Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique: Cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. *Sécheresse 12 (2)*: pp. 205-213.

Bidou E. J., Palibrk M., Andrieu J. et Mering C., 2013. Vulnérabilité, dynamique de population et occupation des sols : Réflexion sur les indicateurs de vulnérabilité au Bénin et au Niger. Livrable n°6.4 Février, 28 p.

Bigot S., Zin I. et Diedhiou A., 2005. Apports de données de HRV de SPOT pour l’étude des variations phénologiques dans le bassin de l’Ouémé (Bénin). *Télédétection, Vol 4(4)*, pp. 339-353.

Bishop C., 1995. Neural networks for pattern recognition. Oxford University Press, 504p.

Bodian A., 2014. Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Géographie physique et environnement, (Volume 8)*, pp. 297-312.

Bogaert J., 2010. Dynamique post-culturale de la végétation des jachères dans la partie savane de la réserve naturelle forestière de Kigwena (Burundi). *Plant Ecology and Evolution 143 (2)* : pp. 138-147.

Bogaert J. et Mahamane A., 2005. Ecologie du paysage : cibler la configuration et l'échelle spatiale. *Annales des Sciences Agronomiques du Bénin*, 7: pp. 39-68.

Boko G. J., 2012. Trajectoires des changements dans l'occupation du sol : déterminants et simulation. Cas du bassin versant de l'Alibori (Bénin, Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat, de l'université d'Abomey-Calavi, 291 p.

Boko M., 1988. Climats et communautés rurales du Bénin. Rythmes climatiques et rythmes de développement. Thèse d'Etat, Paris IV, 2 volumes, 608p.

Boko M., 2000. Bioclimatologie humaine, bioclimats et grandes endémies et problèmes de développement en zone intertropicale. Cours de DEA, Cotonou, 54p.

Bokonon-Ganta E. B., 1987. Les climats de la région du Golfe du Bénin. Thèse de Doctorat de 3ème cycle. Institut de Géographie, Université de Paris-Sorbonne, Paris, 248 p.

Bongers L. I, Koot H. M., Ende J. V., Frank C., Verhulst F. C., 2005. Developmental Trajectories of Externalizing Behaviors in Childhood and Adolescence. *Child Development, September/October 2004*, Volume 75, Number 5, pp. 1523 – 1537.

Bonn F. et Rochon G., 1993. Précis de télédétection : principes et méthodes. Presses de l'université du Québec. Ed. Marques, Volume 1, 485 p.

Bonnefoy J-L., Bousquet F. et Rouchier J., 2001. Modélisation d'une interaction individus, espace et société par les systèmes multi-agents : pâture en forêt virtuelle. *Espace Géographique, 1-2001*, pp. 13-25.

Bonnefoy J.L., Le Page Chr., Rouchier J. et Bousquet F., 2000. "Modelling spatial practices and social representations of space using multi-agent systems". International Conference on Computer Simulations and the Social Sciences, Université Panthéon-Assas Paris II, 18-20 Septembre.

- Bonou W., Glèlè Kakaï R., Assongbadjo A. E., Fonton H. N. et Sinsin B., 2009. Characterisation of *Afzelia africana* Sm. habitat in the Lama forest reserve of Benin. *Forest Ecology and Management* 258 (2009), pp. 1084-1092.
- Borgui C. et Leffi S. L. 1992. Aspect actuel de la dynamique de l'environnement dans les versants ouest du cours de l'Okpara. Mémoire de maîtrise, Faculté des lettres, arts et sciences humaines, Université nationale du Bénin, Abomey-Calavi, 95 p.
- Bouko S. B., Sinsin B. et Goura Soulé B., 2007. Effets de la dynamique d'occupation du sol sur la structure et la diversité floristique des forêts claires et savanes du Bénin. *Tropicultura*, 25, 4, pp 221-227.
- Braun-Blanquet J., 1932. Plant sociology - The study of plant communities – translated revised and edited by FULLER G. D. & Conard H. S. 439 p.
- Burel F. et Baudry J., 2003. Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications. *Tec & Doc*, Paris, France, 355 p.
- Burel F., Baudry J. et Thenail C., 2000. Relationships between farming systems. Ed. Mander Ü. And Jongman R.G.H. WIT press, pp. 227-246.
- Byg A. et Balslev H., 2001. Diversity and use of palms in Zahamena, eastern Madagascar. *Biodiversity and Conservation* 10 : pp 951–970.
- Camacho Olmedo M. T., Molero Melgarejo E. et Paegelow M., 2010. Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio. In: Ojeda J., Pita M.F. y Vallejo I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La información geográfica al servicio de los ciudadanos*, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, Sevilla, pp. 658-678.
- Cano E., 2016. Cartographie des formations végétales naturelles à l'échelle régionale par classification de série temporelles d'images satellitaires. Thèse de géographie. Université Rennes 2 (France), 175 p.
- Carr L.D., Suter L. et Barberi A., 2005. Population dynamics and tropical deforestation : state of the debate and conceptual challenges. *Population and Environment* 27(1): pp. 89-113.

- Casado A., 2007. Etude de la structure et de la dynamique des paysages de montagne. Exemple du bassin versant de La Voireuze, affluent de l'Alagnon entre 1948 et 2000. Mémoire de Master 2 en Géographie spécialité Géoenvironnement. Université Blaise Pascal, France, 51 p.
- Chatfield C., 1989. *The Analysis of Time Series : An Introduction*. Edt. Chapman, 241 p.
- Chave J., 2000. Dynamique spatio-temporelle de la forêt tropicale. *Ann. Phys. Fr.* 25, No 6, 2000. 184 p
- Chavez P.S. et Mackinnon D.J., 1994. Automatic detection of vegetation changes in the Southwestern United States using remotely sensed images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60, (5): pp. 571-583.
- Chen H. et Pontius Jr R.G., 2010. "Diagnostic tools to evaluate a spatial land change projection along a gradient of an explanatory variable", *Landscape Ecology*, vol. 25, pp. 1319-1331
- Codjia C. L. et Gnagna P., 1993. Dynamique des paysages des forêts classées de Toui et de Kilibo. Mémoire de Maîtrise de géographie. FLASH, UNB, 96 p.
- Coquillard P. et Hill D., 1997. Modélisation et simulation d'écosystèmes : des modèles déterministes aux simulations à événements discrets. Masson, 2 : 100 124.
- Coulibaly P., Anctil F., et Bobee B., 1999. Prévion hydrologique par réseaux de neurones artificiels : Etat de l'art. *Revue canadienne de génie civil*, Vol. 26, pp. 293-304.
- Daudé E., 2004. Apports de la simulation multi-agents à l'étude des processus de diffusion. *Cybergeo*, n° 255, <http://cybergeo.revues.org/3835>
- Davranche A., 2008. Suivi de la gestion des zones humides camarguaises par télédétection en référence à leur intérêt avifaunistique. Ecole Doctorale Espaces, cultures, sociétés, 235 p.
- Diof A. et Labim E.F., 2001. Monitoring land-cover changes in semi-arid regions : remote sensing data and field observations in the Ferlo, Sénégal. *Journal of Arid Environments*, 48(2), pp. 129-148.
- Djohy G. L., Henri S. Totin Vodounon H. S., Kinzo N., E., 2016. Dynamique de l'occupation du sol et évolution des terres agricoles dans la commune de sinendé au nord-Bénin. *Cahiers du CBRST, N° 9 Juin 2016 Lettres, Sciences Humaines et Sociales ISSN : 1840-703X, Cotonou (Bénin)*, pp. 101-121.

Djoufack-Manetsa V., 2011. Étude multi-échelles des précipitations et du couvert végétal au Cameroun : Analyses spatiales, tendances temporelles, facteurs climatiques et anthropiques de variabilité du NDVI. Thèse pour l'obtention du grade de Docteur en Géographie de l'Université de Bourgogne et de l'Université de Yaoundé, 303p.

Dodane C., Joliveau T. et Honneger A., 2011. Un atelier de géoprospective sur l'évolution de l'occupation du sol dans le bassin versant de l'Yzeron à horizon 2030. *Acte du séminaire Géoprospective : Apports de la dimension spatiale aux recherches prospective*, 4-5 avril, Nice.

Dominik C., 2011. Influence des structures spatiales sur la distribution des oiseaux terrestres dans un paysage fragmenté : cas des marais salants de Guérande. Mémoire de Master 2 en Biodiversité et ÉcoSystèmes Tropicaux. Université de la Réunion. France, 61 p.

Dougherty M., Dymond R. L., Jantz C. A. et Goulet N., 2004. Evaluation of impervious surface estimates in a rapidly urbanizing watershed. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70, pp. 1275-1284.

Dymond C. C., Mladnoff D.J. et Radeloff V. C., 2002. Phenological differences in Tasseled Cap indices improve deciduous forest classification. *Remote Sensing of Environnement*, 80 (3), pp. 460-472.

Eastman J. R., 2004. "The elderly's uses and attitudes towards the Internet", *Journal of Consumer Marketing*, Vol. 21 Issue : 3, pp. 208-220.

Eastman J. R., 2006. IDRISI Andes Guide to GIS and Image Processing. *Clark Labs Clark University*, USA, 328p.

Eastman J. R., 2009. Idrisi Taiga, Guide to GIS and Image Processing. *Manual version 16.02, Clark University*, 210 p.

El Hage Hassan H., 2011. Les apports d'un S.I.G. dans la connaissance des évolutions de l'occupation du sol et de la limitation du risque érosif dans la plaine de la Bekaa (LIBAN). Thèse de doctorat en Géographie. Université d'Orléans, France, 248 p.

Epting J. et Verbyla D., 2005. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+. *Remote sensing of Environment* 96, pp. 328-339.

Fakhr-Eddine K., Cabassud M., Le Lann M.V. et Couderc J.P., 1999. Application des réseaux de neurones à la modélisation des réacteurs de LPCVD : dépôt de silicium dopé in situ au bore. *Chemical Engineering Journal*, 72, pp. 171-182.

FAO, 1997. Africover Land Cover Classification. Environment and Natural Resources Service (SDRN). 76 p.

FAO, 2010. Evaluation des ressources forestières mondiales. Rapport national du Bénin. Département des forêts. Rome (Italie), 54 p.

FAO, 2016. Situation des forêts du monde. Forêts et agriculture : défis et possibilité concernant l'utilisation des terres. Rome (Italie), 137 p.

Faye E., Masse D. et Diatta M., 2002. Dynamique de la régénération ligneuse durant la phase de culture dans un système de culture semi-permanente du sud du Sénégal. *Actes du colloque, mai 2002, Garoua, Cameroun*. Prasac, N'Djamena, Tchad-Cirad, Montpellier, France, pp. 112-128

Feddema, J. J., Oleson, K. W., Bonan, G. B., Mearns, L. O., Buja, L. E. et Meehl, G. A., 2005. The importance of land-cover change in simulating future climates. *Science*, Vol. 310, No 5754, pp. 1674–1678.

Fontaine B., 1985. La variabilité des précipitations en domaine sahélien et ses connexions avec la circulation atmosphérique africaine atlantique. *Cahier de Centre de Recherche de Climatologie*. N° 11, URA 909 CNRS. Université de Bourgogne, Dijon, pp. 85-91.

Forget Y., 2014. Conception d'un modèle prospectif spatialisé pour la simulation de scénarios contrastés en zone de montagne. Mémoire de recherche de Master 2, Géomatique, ENSAT, Toulouse (France), 79 p.

Forman R. T. T. et Godron M., 1986. Landscape ecology. Editions John Wiley & Sons, New York, 619 p.

Fotsing E., Verburg P., de Groot W., Cheylan J-P. et Tchunte M., 2009. Un modèle intégré pour explorer les trajectoires d'utilisation de l'espace en zone de savanes sèches du Cameroun. Actes du colloque « Savanes africaines en développement : innover pour durer ». Garoua, Cameroun, pp. 20-23.

Fournier A., Floret C. et Gnahoua G. M., 2001, Végétation des jachères et succession postculturale en Afrique tropicale. In Ch. Floret Ch, Pontanier R. La jachère en Afrique tropicale. Montrouge, France.

Fournier A., Yoni M. et Zombre A. P., 2002. Les jachères à *Andropogon gayanus* en savane soudanienne dans l'ouest du Burkina Faso : flore, structure, déterminants et fonction dans l'écosystème. *Etudes floristiques et Végétales. Burkina Faso*, 5: 3-32.

Gay M., 1999. Classification des images satellitales. Support de cours. Laboratoire de télédétection et de cartographie numérique. 32 p.

George P., 1984. Dictionnaire de géographie. Puf, Paris, 452 p.

Giddings L., Soto M., Rutherford B. M. et Maarouf A., 2005. Standardized precipitation index zones for Mexico. *Atmósfera*, 18(1), pp. 33-56.

Gignoux J., Menaut J-C., Noble I. R. et Davies I. D., 1997. A spatial model of savanna function and dynamics: model description and preliminary results. *Population and community dynamics in the tropics*. Cambridge (UK), pp. 361-383.

Girard M.-C. et Girard C. M., 1999. Traitement des données de télédétection. Dunod Ed. Paris, 529 p.

Gnanglè P. C., 2005. Parc à karité (*Vitellaria paradoxa*) (Gaertn. C. F.) (Sapotaceae) au Bénin : Importance socio-culturelle, caractérisation morphologique, structurale et régénération naturelle. Mémoire de DEA. UAC/FSA. 113 p.

Gnélé J., 1999. Dynamique de l'environnement et utilisation des bas-fonds dans le Mono-Nord : cas du secteur Dékpo-Lonkly. Mémoire de maîtrise de géographie. FLASH/UAC. 89 p.

Guinochet M. (1973) : Phytosociologie. Masson et Cie, Paris, 227 p

Helder D. L., Malla R., Mettler C. J., Marklan B. L. et Micijevic E., 2011. Landsat 4 Thematic Mapper Calibration Update. *Geoscience and Remote Sensing*, 50: 2400-2408.

Hornik K., 1991. Approximation capabilities of multilayer feedforward networks, *Neural Networks*, vol.4, pp. 251-257.

Houet T., 2006. Modélisation prospective de l'occupation du sol en zone agricole intensive dans la France de l'Ouest. *Norois, Environnement-Aménagement-Société*, n°198, 2006/1, pp. 35-47

Houet T., 2006. Occupation des sols et gestion de l'eau : Modélisation prospective en paysage agricole fragmenté (Application au SAGE du Blavet). Thèse de doctorat de l'Université de Rennes 2-Haute Bretagne. 370 p.

Houet T., 2015. Usages des modèles spatiaux pour la prospective. *Revue Internationale de Géomatique*, 25(1), pp. 123-143.

Hountondji, Y.C., Ozer, P. et Nicolas J., 2004. Mise en évidence des zones touchées par la désertification par télédétection à basse résolution au Niger. *Cybergeo : Revue européenne de géographie*, n° 291, 18 p

Hountondji I. C. H., 2008. Dynamiques environnementales en zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest : Analyse des modifications et évaluation de la dégradation du couvert végétal. Thèse pour obtenir le grade de Docteur en Sciences de l'université de Liège, Belgique. 153 p.

Houssou C., 1998. Les bioclimats humains de l'Atacora (Nord-ouest du Bénin) et leurs implications socio-économiques. Thèse de Doctorat (Thèse unique). Dijon, France, 332 p.

Hubert P., Carbonnel J.P. et Chaouche A., 1989. Segmentation des séries hydrométriques. Application à des séries de précipitations et de débits d'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.* 110, pp. 349-367.

Hubert-Moy, 2004. Occupation du sol et télédétection de la modélisation prédictive. Habilitation à diriger des recherches. Université de Rennes 2 Haute Bretagne, 327 p.

Idiéti M. E. 2012. Les hydro-écorégions du bassin de la Pendjari au Bénin : Analyse des déterminants socio-économiques et environnementaux de la dynamique des écosystèmes naturels. Thèse de Doctorat. Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 230 p.

Inglada J., 2001. État de l'art en détection de changements sur les images de télédétection. Toulouse, CNES, 20 p.

INSAE, 2016. Effectifs de la population des villages et quartiers de ville du Bénin (RGPH-4, 2013), 85 p.

INSAE, 2004. Cahier des villages et quartiers de ville du département de l'Atacora. 27 p.

Jacquin A., 2010. Dynamique de la végétation des savanes en lien avec l'usage des feux à Madagascar. Analyse par séries temporelle d'images de télédétection. Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse. France, 144 p.

Jain A. K. et Xiaojuan Yang X., 2005. Modeling the effects of two different land cover change data sets on the carbon stocks of plants and soils in concert with CO₂ and climate change. *Global Biogeochemical cycles*, VOL. 19, GB2015, doi:10.1029/2004GB002349.

Jansen L. J. M. Bagnoli M. et Focacci M., 2008. "Analysis of land-cover/use change dynamics in Manica Province in Mozambique in a period of transition (1990–2004)". *Forest Ecology and Management*. Vol. 254, n° 2, pp. 308-326.

Jeltsch F., Weder G. E. et Grimm V., 2000. Ecological buffering mechanisms in savannas: a unifying theory of long-term tree-grass coexistence. *Plant Ecology*, 161, pp. 161-171.

Jensen J.R., 1983. Urban / suburban land use analysis. In "Manual of Remote Sensing" 2ed., Colwell, R.N. (ed.), Chapter 30, *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, Falls Church, Virginia, vol. 2: pp. 1571-1666.

Johnson et Kotz, 1970. Distributions in statistics : Continuous Univariate distributions. *John Wiley & sons, New York*. 31 : 46-54 p.

Kennedy R. E., Cohen W. B. et Schroeder T. A., 2007. Trajectory-based change detection for automated characterization of forest disturbance dynamics. *Remote Sensing of environment*. 110, pp. 370-386.

Kodja D. J., 2011. Préviation des crues dans le bassin versant du Zou à Atchérigbé avec le modèle GR2M, Mémoire de Maîtrise, DGAT/FLASH/UAC 104 p

Koffi Y. B., Ahoussi E. K., Kouassi A. M., Kouassi O, Kpangui L. C. et Biemi J., 2014. Application des réseaux de neurones formels pour la préviation des débits mensuels du Bandama blanc à la station de Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire). *Afrique Science* 10(3) 134, pp. 134 – 145.

Koné M., Aman A., Adouyao Y. C., Coulibaly L. et N'Guessan K. E., 2007. Suivi diachronique par télédétection spatiale de la couverture ligneuse en milieu des savanes soudanienne en Côte d'Ivoire. *Revue Télédétection*, 2007, Vol. 7, n° 1-2-3-4, pp. 433-446.

Kouassi K. J-L., 2013. Suivi de la dynamique de l'occupation du sol à l'aide de l'imagerie satellitaire et des systèmes d'informations géographiques : cas de la direction régionale des eaux et forêts de amoussoukro (Cote d'Ivoire). Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Agronomie Approfondie (DAA). Yamoussoucro, Côte d'Ivoire, 74 p.

Lajoie, G. et Hagen-Zanker, A., 2007. La simulation de l'étalement urbain à la Réunion. Apport de l'automate cellulaire pour la prospective territoriale. *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques. 15 p.

Lambin, E.F., Geist, H., (Eds.), 2006. Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes, Global Impacts, Global Change. *The IGBP Series*, Berlin, Springer.

Lambin, E.F., Geist, H.J. et Lepers, E., 2003. Dynamics of Land-Use and Land-Cover Change in Tropical Regions. *Annu. Rev. environ. Resour*, Vol. 28, pp. 205-241.

Lambin E.F., Turner B.L., Geist H.J., Agbola S.B., Angelsen A., Bruce. J.W., Coomes O.T., Dirzo R., Fisher G., Folke C., George P.S., Homewood K., Imbernon J., Leemans R., Li X., Moran E.F., Mortimore M., Ramakrishnan P.S., Richards J.F., Skanes H., Steffen W., Stine G.D., Svedin S., Veldkamp T.A., Vogel C. et Xu J., 2001. The causes of land-use and landcover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change* 11, : pp. 261-269.

Langlois P., 2010. Simulation des systèmes complexes en géographie. Fondements théoriques et applications. Hermès-Lavoisier, Paris.

Langlois P., 2001. Le modèle SpaCell. Base de données du Groupe Modèles du GDR Libergéo, pp. 111-125

Leduc, C.; Loireau, M., 1997. Évolution du couvert végétal et de la recharge de la nappe phréatique en zone sahélienne (Niamey, Niger). *Sustainability of water resources under increasing uncertainty*, in: Publ. AISH no 240, pp. 193-200.

Leroux L., 2012. Analyse diachronique de la dynamique paysagère sur le bassin supérieur de l'ouémé (Bénin) à partir l'imagerie Landsat-MODIS- cas d'étude du communal de Djougou. Hydrosciences Montpellier (France), ANR ESCAPE, 62p.

Levêque C., 2000. Les zones ateliers, des dispositifs pour la recherche sur l'environnement et les anthroposystemes. *Natures Sciences Societes*, vol 8, pp. 44-52.

Lubès H., Masson J-M., Raous P., Tapiayu M., 1994. Logiciel de calculs statistiques et d'analyse fréquentielle adapté à l'évaluation du risque en hydrologie. Manuel de calcul. ORSTOM, Paris, 140 p.

Lorenz E. N., 1963. Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the atmospheric sciences*. Volume 20, pp. 130-141.

MAEP, 2009. Annuaire des statistiques agricoles. 98 p.

MAEP, 2014. Annuaire des statistiques agricoles. 114 p.

Maestriperi N., 2012. Dynamiques spatio-temporelles des plantations forestières industrielles dans le sud chilien. De l'analyse diachronique à la modélisation prospective. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, France, 357 p.

Maestriperi N. et Paegelow M., 2013. « Validation spatiale de deux modèles de simulation : l'exemple des plantations industrielles au Chili », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 653, mis en ligne le 12 septembre 2013, consulté le 01 octobre 2015. URL : <http://cybergeo.revues.org/26042> ; DOI : 10.4000/cybergeo.26042.

Mama A., 2013. Anthropisation des paysages au Bénin: dynamique, fragmentation et développement agricole. Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences Agronomiques et Ingénierie biologique. Université libre de Bruxelles, 216 p.

Mama V. J., 2002. An integrated approach for land-use/cover change analysis in a central region of Benin Republic. PhD Thesis, Geography, University of Lagos, Lagos, 221 p.

Mama, V.J. et Oloukoi, J., 2003. Evaluation de la précision des traitements analogiques des images satellitaires dans l'étude de la dynamique de l'occupation du sol, *Téledétection*, Vol. 3, No 5, pp. 429–441.

Marage D., 2013. Déterminisme, dynamique et modélisation spatiale de la diversité floristique dans un contexte de déprise pastorale : application à la gestion durable des espaces montagnards sous influence méditerranéenne. *Acta Botanica Gallica : Botany Letters*, 153:2, pp. 257-264.

Maria de Almeida C., Battyb M., Vieira Monteiro A. M., Camaraa G., Soares-Filhoc B. S., Cerqueirac G. C. et Pennachin C. L., 2003. Stochastic cellular automata modeling of urban land

use dynamics: empirical development and estimation. *Computers, Environment and Urban Systems* 27 (2003) 481–509, pp 481-509.

Mas J-F., Kolb M., Houet T., 2014a. Modelling Land use / cover changes: a comparison of conceptual approaches and softwares. *Environmental Modelling & Software*, 51, pp.94–111.

Mas J-F., Kolb M., Paegelow M., Camacho Olmedo M-T. et Houet T., 2014b. Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. *Environmental Modelling & Software*, 51, pp.94–111.

Mas J-F., Kolb M., Houet T., Paegelow M et 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. *Géomatique et occupation des sols*, 21, pp.405–430.

Mbaye N., 2007. Système de production et mutations des paysages ruraux dans la basse vallée du Ferlo au Sénégal. Thèse de de doctorat en géographie. Université Bordeaux III (France), 317p.

McGarigal K., Cushman S. A., Neel M. C. et Ene E., 2002. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps, Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst, 197p.

McKee T. B., Doesken N. J. et Kleist J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183)*. Boston, MA: American Meteorological Society.).

Meneses-Tovar C.L., 2011. L'indice différentielle normalisé de végétation comme indicateur de la dégradation. *Unasyuva* 238, vol. 62, pp. 39-46

Mercier P., 1968. Tradition, Changement, Histoire. Les "Somba" du Dahomey septentrional. Paris, Anthropos, 1968, 538 pages.

Merry F., Soares-Filho B. S., Nepstad D., Amacher G. et Rodrigues H., 2009. Balancing Conservation and Economic Sustainability : The Future of the Amazon Timber Industry. *Environmental Management, EUA*, 44(3) : pp 395-407.

Munsi M., Areendran G. et Joshi P., 2012. Modeling spatio-temporal change patterns of forest cover: a case study from the Himalayan foothills (India). *Regional Environmental Change*, 12(3), pp.619–632.

- Natta J. k. N., 2005. Etude d'un site urbain contraignant : Impact de l'occupation de l'espace sur l'environnement à Natitingou. Mémoire de DEA, FLASH, UAC, 96 p.
- Natta J. k. N., 2015. Milieu naturel et dynamique urbaine de Natitingou. Thèse de Doctorat Unique. EDP/ FLASH/ UAC, 330 p.
- N'Diaye M., 2007. Système de production et mutations des paysages ruraux dans la vallée de Ferlo au Sénégal. Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux III ? France. 317p.
- Nicholson S. E., 1983. Sub-Sahara rainfall in the year 1976-1980 : Evidence of continued drought. *Montly Weather Review*, vol. 3, 1646-1654.
- Odjoubere J., 2010. Poussée de la carbonisation. Okouta-oss., un village périphérique de la forêt classée des Monts Kouffé: problèmes et perspectives pour une gestion durable des ressources végétales. Mémoire de Master II en Géosciences de l'Environnement et Développement Durable, CIFRED, FLASH, Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 126 p.
- Oloukoi J., 2012. Utilité de la télédétection et des Systèmes d'Information Géographique dans l'étude de la dynamique spatiale de l'occupation des terres au centre du Bénin. Thèse Unique de Doctorat de l'Université d'Abomey-Calavi, 305 p.
- Oloukoi J., 2013. Scénario socio-économique et écologique des changements de l'occupation des terres au Bénin », *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 13 Numéro 1/avril 2013, mis en ligne le 16 avril 2013. URL : <http://vertigo.revues.org/13267> ; DOI : 10.4000/vertigo.13267, consulté le 02 février 2014.
- Oloukoi J., Mama V. J. et Agbo B. F., 2006. Modélisation de la dynamique de l'occupation des terres dans le département des collines au Bénin. *Télédétection*, 2006, vol. 6, n°4, pp. 305-323.
- Onana J., Touffet J., Alexandre D. Y., Yonkeu S., Asongwed- Awa A., Mvondo J. P. et Onibon, P., 1998. Mission d'identification d'un programme de gestion des espaces forestiers et d'aménagement du territoire dans le Nord Bénin. GERAM conseils, Bohicon, 79 p.
- Onibon P., 1998. Mission d'identification d'un programme de gestion des espaces forestiers et d'aménagement du territoire dans le Nord Bénin. GERAM conseils, Bohicon, 79 p.
- Ouédraogo M., Paturel J.E., Mahé G., Servat E., Dezetter, A., Conway D., 2001. Influence de la nature et de l'origine des données sur la modélisation hydrologique de grands bassins versants en Afrique de l'Ouest. *Pub. AIHS*, No. 270, pp. 209–214.

Orékan V. O. A., 2007. Implémentation du modèle CLUE-s aux transformations spatiales dans le centre Bénin aux moyens de données socio-économiques et de télédétection. Thèse de Doctorat de l'université de Bonn. Allemagne, 230 p.

Oszwald J., Lefebvre A., Arnault de Sartre X., Thales M., Gond V., 2010. Analyse des directions de changement des états de surface végétaux pour renseigner la dynamique du front pionnier de maçaranduba (para, Brésil) entre 1997 et 2006. *Revue Télédétection*. Vol 9(2). pp. 97-111.

Ouassa Kouaro M., 2008. Les dimensions socio-économiques de la désertification : Cas des Communes de Matéri et de Tanguiéta en République du Bénin. Mémoire de DEA, UAC/FLASH, 111 p.

Ouedraogo M., 2001. Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante. Normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse de doctorat. Université de Montpellier II, 257 p.

Ozenda P., 1982. Les végétaux dans la biosphère. Edition Doin, Paris. 431 pp.

Paegelow M., Maestriperi N., Sàez N. et Toro D., 2012. Détection des plantations forestières par image satellitaire MODIS dans le Sud du Chili. M@ppmonde, 16 p.

Paegelow M et Camacho Olmedo M.T. (Eds.), 2008. Modelling Environmental Dynamics: Advances in Geomatic Solutions. Springer. 20p

Paegelow M., Villa N., Cornez L., Ferraty F., Ferré L. et Sarda P., 2004. Modélisations prospectives de l'occupation du sol. Le cas d'une montagne méditerranéenne. *Cybergeog : European Journal of Geography*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 295, mis en ligne le 06 décembre 2004. URL : <http://cybergeog.revues.org/2811> ; DOI : 10.4000/cybergeog.2811. Consulté le 04 octobre 2013.

Paegelow M., 2004. Géomatique et géographie de l'environnement. De l'analyse spatiale à la modélisation prospective. Habilitation à diriger des recherches. Tome I, Toulouse (France), 211 p.

- Parker D. C., Manson S. M., Janssen M. A., Hoffmann M-J. et 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*, 93(2), pp.314–337.
- Paturel J.E., Servat E., Lubes-H. et Delattre M.O., 1997 b. Variabilité climatique et analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l’Ouest et centrale non sahélienne. Soumis pour publication à compte rendu de l’Académie des sciences, Institut de France.
- Paturel J.E., Servat E., Kouamé B., Lubes-h fritsch J.M. et Masson M., 1997c. Manifestation d’une variabilité hydrologique en Afrique de l’Ouest et centrale. *Publ IAHS*, n° 240, pp. 152-172.
- Pelissier P., 1966. Les paysans du Sénégal. Saint-Irieix. Imprimerie Fabrège. 939 p.
- Peringer A., Siehoff S., Chételat J., Spiegelberger T., Buttler A. et Gillet F., 2013. Past and future landscape dynamics in pasture-woodlands of the Swiss Jura Mountains under climate change. *Ecology and Society* 18(3): 11. 32 p.
- Pettitt A. N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist*, 28, 2. pp. 126-135.
- Pielou E. C., 1969. An introduction to mathematical ecology. Wiley Interscience. John Wiley & Sons, New York 1969. VIII + 286 S., 32 Abb., Preis 140 s, 220p.
- Pomel S., Pomel-Rigaud F., Schulz E., 1994. Indicateurs anthropogènes de la végétation et des sols de quelques savanes de l’Afrique de l’Ouest. In : Pomel S., Salomon J.N., Enregistreurs et indicateurs de l’évolution de l’environnement en zone tropicale. Bordeaux, P.U.B., pp. 173-200.
- Pontius Jr.R.G et Millones, 2011. Death to Kappa : both of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assesement. *International Journal of Remote sensing* 32 (15), pp. 4407-4429.
- Pontius J. R. G., 2000. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogramm Eng Remote Sensing* 66(8): pp. 1011–1016
- Pontius Jr R.G., Shusas E. et Mceachern M., 2004. Detecting important categorical land change while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101(2-3), pp. 251-268.

Pontius Jr R.G., Boersma W., Castella J.C., Clake K., Nijs T., Dietzel C., Duran Z., Fotsing E., Goldstein N., Kok K., Koomen E., Lippitt C. D., McConnell W., Mohd Sood A., Pijanowski B., Pithadia S., Sweeney S., Trung Ngoc T., Veldkam T. A. et Verburg P. H., 2008. Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. *Annals of Regional Science* 42: pp. 11 – 47.

Pontius R.G. et Schneider L.C., 2001. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed (Massachusetts, USA), *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 85, pp. 239-248.

Pomel S., Pomel-Rigaud F. et Schulz E., 1994. Indicateurs anthropogènes de la végétation et des sols de quelques savanes de l'Afrique de l'Ouest. In : Pomel S., Salomon J.N., Enregistreurs et indicateurs de l'évolution de l'environnement en zone tropicale. Bordeaux, P.U.B., pp. 173-200.

Raunkier C., 1934. The life form of plants and stastical plant geography. Oxford. Clarendron Press, 632 p.

Richard A. J. et Jia X., 2006. Remote sensing-Digital image analysis. Springer, Germany, 4 th Edition, 454 p.

RGPH 3, 2004. Cahier des villages et quartiers de ville du département de l'Atacora. INSAE, Bénin, 24 p.

RGPH 4, 2013. Effectifs de la population des villages et quartiers de ville du Bénin (rgph-4, 2013). INSAE, Bénin, 85 p.

Rogan J. et Chen D., 2004. Remote Sensing Technology for Mapping and Monitoring Land-Cover and Land-Use Change. *Progress in Planning*, 61, pp. 301-325. [http://dx.doi.org/10.1016/S0305-9006\(03\)00066-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0305-9006(03)00066-7)

Rondeux J., 1999. Les mesures des arbres et des peuplements forestiers. Gembloux, Belgique : Les presses agronomiques de gembloux, 522 p.

Sarr M.A., 2009. Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat. *Cybergeo : European Journal of Geography*, Environnement, Nature, Paysage, article 472, mis en ligne le 07 octobre 2009. URL

: <http://cybergeog.revues.org/22707> ; DOI : 10.4000/cybergeog.22707. Consulté le 30 octobre 2012.

Schwartz D., 1995. Méthode statistique à l'usage des médecins et des biologistes. 4^e édition, éditions médicales, Flammarion, Paris, 214 p.

Scouvar M. et Lambin E. F., 2006. Approche systémique des causes de la déforestation en Amazonie brésilienne : syndromes, synergies et rétroactions. *L'Espace Géographique*, 3: pp. 241-254.

Shannon C. E., 1948. A mathematical theory of communications. *Bell Syst Techn. J.*, 27: pp. 623-656.

Skole, D. L., Chomentowski, W.H., Salas, W.A. et Nobre, A.D., 1994. Physical and human dimensions of deforestation in Amazonia. *Bioscience*, Vol. 44, pp. 314-322.

Simard M., 1995. Rapport du comité de l'A.P.G.Q. sur les paysages québécois. *Géographes*, II 7, pp.7-9

Sinsin B. et Kampmann D., 2010. Atlas de la biodiversité de l'Afrique de l'Ouest, tome 1. Bénin. 726 p.

Sinsin B., 1993. Phytosociologie, écologie, valeur pastorale, production et capacité de charge des pâturages naturels du périmètre Nikki – Kalalé au Nord du Bénin. Thèse de doctorat. Université Libre de Bruxelles. 390 p.

Soares-Filho B., Mountinho P., Nepstad D., Anderson A., Rodrigues H., Garcia R., Dietzsch L., Merry F., Bowman M., Hissa L., Silvestrini R. et Maretti C., 2010. Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107 (24): 10821-10826.

Soares-Filho B., Alencar A., Daniel Nepstad, Cerqueira G, Vera Diaz M. C., Rivero S., Solórzano L. et Voll E., 2004. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém–Cuiabá corridor. *Global Change Biology*, vol 10, Issue 5, pp 745-764.

Soares-Filho B. S. Pennachin C. L. et Cerqueira G., 2002. INAMICA –A stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier, *Ecological Modelling*, 154, (3), pp. 217-235.

Sokpon N., 1995. Recherche écologique sur la forêt dense semi-décidue de Pobè au Sud-Est du Bénin : groupements végétaux, structure, régénération et chute de litière. Thèse de Doctorat. Lab Bot Syst et Phyt, Univ Lib de Bruxelles, Belgique, 390 p.

Soro D. T., Soro N., Ogan Y. M-S., Lasm T., Soro G., Ahoussi K. E. et Biemi J., 2011. La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Physio-Géo*, Volume 5 | -1, pp. 55-73.

Sounon Bouko B., 2011. Colonisation agricole et dégradation du couvert végétal dans le secteur Wari-Marou-Igbomakro au Bénin. Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 221 p.

Steffen W., Sanderson A., Tyson P.D., Jage J., Matson P.A., Moore III G., Oldfield F., Richardson K., Schellnhuber H.J. et Wasson R.J., 2004. Global change and the earth system: a planet under pressure, global change. The IGBP Series, GR, Springer-verlag, Berlin, Vol XII, 336 p.

Stéphenne, N. et Lambin E.F., 2001. A dynamic simulation model of land-use changes in Sudano-sahelian countries of Africa (SALU), Elsevier, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol. 85, pp. 145–161.

Tarla F. N., 2003. La végétation herbacée des zones humides du nord-Cameroun : Phytosociologie et utilisation pastorale. *Actes du colloque, mai 2002, Garoua, Cameroun*. Prasac, N'Djamena, Tchad-Cirad, Montpellier, France. 14 p.

Tchibozo H. C. F., 1981. Contribution à l'étude biogéographique de la région de l'Atacora. Etude typologique des unités de paysage du versant oriental de la chaîne de l'Atacora (à la hauteur de Natitingou), Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, Université de Paris 7- Jussieu E.U.R. de Géographie physique ; 326 P.

Tente B., 2009. Dynamique actuelle de l'occupation du sol sur le plateau d'allada : cas de la Commune de tori bossito (sud benin). LACEEDE, *Climat et développement*, 8 : pp. 95- 105.

Tente B., 2005. Recherche sur les facteurs de la diversité floristique des versants du massif de l'Atacora : Secteur Perma-Toucuontouna (Bénin). Thèse de Doctorat unique. EDP/FLASH/UAC, 252 p.

- Tente B., 2000. Dynamique actuelle de l'occupation du sol dans le massif de l'Atacora : Secteur Perma–Toucountouna. Mémoire de DEA/FLASH, Bénin, 83 p.
- Texeira M. A., Soares-Filho B. S., Freitas S. et Metzger J-P. W., 2009. Modeling Landscape dynamics in the Atlantic Rainforest domain : Implications for conservation. *Forest Ecology and Management* 257, pp 1219–1230.
- Toko I. I., 2008. Etude de la variabilité spatiale de la biomasse herbacée, de phénologie et de structure de la végétation le long des toposéquences du bassin supérieur du fleuve de l'Ouémé du Bénin. Thèse de doctorat unique de l'Université d'Abomey-Calavi, Bénin. 241p.
- Toro Balbontin D., 2014. Analyse de la détérioration de la forêt de la cordillère de la Costa dans le sud Chilien : géomatique et modélisation prospective appliquée sur une forêt patrimoniale de la province d'Osorno (41°14'-41°00'latitude sud). Thèse de doctorat. Université Jean Jaurès de Toulouse, France, 406 p.
- Tossa A.Y., Tounouhewa A., 2009. *Profil de l'Ouémé et caractérisation des sites pilotes (Analyse des données)*. Rapport du projet de renforcement des capacités nationales de suivi des ressources en eau, axe sur la gestion de l'eau agricole. 64 p.
- Tran D. T., Skupinski G., 2012. Urbanisation et changement du paysage à Strasbourg entre 1986 et 2006. Rapport final du Programme National de Télédétection Spatiale -PNTS Strasbourg (France), 60p
- Turner B.L., Skole D., Sanderson S., Fischer G. Fresco L.O. et Leemans R., 1995. LUCS Science Research Plan. .IGBP Rep. 35, HDP Rep.7, *Int. Hum. Dimens. Glob. Environ. Chang Program, Stockolm/Geneva*. No. 35 and HDP Report No. 7, 132 p.
- Turner II B.L., Lambin E.F. et Reenberg A., 2007. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104, pp. 20666–20671.
- Ulbricht K.A. & Heckenford W.D., 1998. Satellite images for recognition of landscape and landuse changes. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 53: pp.235-243.
- Vacquié L., 2015. Modélisation prospective et échelles spatiales en montagne. Application aux pyrénées farçaises. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse Jean Jaurès, 308 p.

- Veldkamp, A., Verburg, P.H., Kok, K., de Koning, G.H.J., Priess J. et Bergsma A.R., 2001. The need for scale sensitive approaches in spatially explicit land use change modeling. *Environmental Modeling and Assessment* 6: pp. 111–121.
- Veldkamp A. et Fresco L.O., 1996. CLUE-CR: An integrated multiscale model to simulate use change scenarios in Costa Rica. *Ecological Modeling*, n°91, pp. 231-248.
- Verburg, P. H. et Overmars.K. P., 2009. The CLUE model is a dynamic, spatially explicit, land use and land cover change model. *Arialof Regional Science* 42 (1) : pp. 57-77.
- Verburg, P. H., Soepboer W., Veldkamp A., Limpiada R., Espaldon V., et Sharifah Mastura S. A., 2002. Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: the CLUE-S Modell, *Environmental Management*, Vol. 30, n° 3, pp. 391-405.
- Vissin E.W., 2007. Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 267 p + Annexes.
- Vissin E. W., Amoussou E. et Houssou C.S., 2007. Variabilité de la pluviométrie et des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger. *Climat et Développement*, vol 3, LECREDE, Université d'Abomey-Calavi, pp. 22-32.
- Walker B. H. et Noy-Meir I., 1982. Aspects of the stability and resilience of savanna ecosystems. In Huntley B. J. & Walker B.H. (Eds.), *Ecology of tropical savannas. Ecological studies*42. Berlin: Sptringer Verlag, pp. 556- 590.
- White F., 1983. Vegetation of Africa. UNESCO, *Natural Ressources Research*, 20: 1. 368p.
- Wira P., 2009. Réseau de neurones artificiels : architectures et applications. Laboratoire MIPS (Modélisation, Intelligence, Processus, Systèmes). Université de Haute Alsace, 119 p.
- Wu H., Hayes M. J., Wilhite D. A. et Svoboda M. D., 2005. The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation, *International J. Climat.* 25, pp. 505–520.
- Yabi I., 2008. Etude de l'agroforesterie à base de l'anacardier et des contraintes climatiques à son développement dans le Centre du Bénin. Thèse de Doctorat Unique, Université d'Abomey-Calavi. Ecole Doctorale Pluridisciplinaire. Espace, Cultures et Développement., 239 p.

Zakari S., 2015. Vulnérabilité des parcours naturels aux changements climatiques dans le bassin de la Sota à l'exutoire de Coubéri (Bénin). Thèse présentée pour obtenir le Diplôme de Doctorat Unique de l'Université d'Abomey-Calavi, 203 p.

Zhang X., Friedl M. A., Schaaf C. B. & Strahler A. H., 2005. Monitoring the response of vegetation phenology to precipitation in Africa by coupling MODIS and TRMM instruments. *Journal of Geophysical Research*, 110.

Zhang X., Friedl M. A., Schaaf C. B., Strahler A. H., Hodges J. C. F., Gao F., Reed B. C. et Huete A. R., 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of environment*. 84, pp. 471-475.

Webographie

<http://sis.agr.gc.ca/siscan/taxa/cssc3/chpt18.html>: consulté le 18/01/17 à 23h42 min

https://www.google.fr/search?q=image+de+Granier+et+Breda+sur+bilan+hydrique&rlz=1C1CHZL_frFR723FR723&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=98DfNbqDGmaJEM%253A%252CX0bFnt3l6nysQM%252C_&usg=__HWVEaDEIClyG8ISBJSOXM8Z2sn4%3D&sa=X&ved=0ahUKEwjgiua54NDYAhXB7BQKHepeDkQQ9QEILDAB#imgrc=98DfNbqDGmaJEM.

Consulté le 23 mars 2017 à 17h13min

ANNEXES

Annexe 1 : Liste des communications et publications

Publications dans des revues à comité de lecture (à l'internationale)

European Scientific Journal

- AGBANOU Thierry, PAEGELOW Martin, TOKO IMOROU Ismaïla, TENTE Brice (2018) : Modelisation des changements d'occupation des terres en region soudanienne au nord-ouest du Bénin. *European Scientific Journal April 2018 edition Vol.14, No.12 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.*

Revue Afrique Sciences (Côte d'Ivoire)

- AGBANOU Thierry, ABDOULAYE Djafarou, SABI OROU BOGO Guimmongui Abib, PAEGELOW Martin, TENTE Brice (2018) : Variabilité pluviométrique et son impact sur le couvert végétal dans le secteur Natitingou-Boukombé au nord-ouest du Bénin. *Afrique Science ISSN 1813-548X 14(3) (2018) 182 – 191.*

Revue nationale à comité de lecture

- AGBANOU Bidossessi Thierry, OREKAN A. O. Vincent, ABDOULAYE Dafarou, PAEGELOW Martin, TENTE Brice (2018) : Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol en zone d'agriculture extensive : cas du secteur Natitingou-Boukoumbe au nord-ouest du Bénin. *Mélanges en hommage aux Professeurs HOUSSOU C. S., HOUNDAGBA C. J. et THOMAS O. Vol.3. ISBN : 978-99919-822-6-7, dépôt Légal N°10697 du 13 Septembre 2018 Bibliothèque Nationale du Bénin, 3^{ème} trimestre, pp 22-34.*
- Thierry AGBANOU, Brice TENTE et Rachade DJINADOU (2015) : Cartographie des changements de l'occupation du sol en milieu urbain : cas du 12ème arrondissement de Cotonou. *Cahier du CBRST, Cotonou (Bénin). ISSN : 1840-703X, N°7 juin 2015, Volume 3 : Lettre, Sciences Humaines et Sociales, pp 330- 345.*
- DJINADOU Rachade O. A., KOUCHADE Clément, AGBANOU Thierry et OLADJIDE Azaria (2015) : Approche genre dans la perception des populations holli de la gestion participative des foêts et plantations de la Lama (Bénin). *ISSN : 1870-703X, N°7 juin 2015, Volume 2 : Lettre, Sciences Humaines et Sociales, pp 116- 134.*

Communication par affiche (Poster)

- Thierry AGBANOU, Simon ALLAGBE, Brice TENTE, Vincent OREKAN and Martin PAEGELOW (2016): Analysis of the intrinsic relationship between the spatial radiometry of *Vitellaria paradoxa* (C.F. Gaertn.) and soil in Sudanese zone in northwest Benin. *Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Modelling and Software (iEMSs), July 10-14, 2016, Toulouse (FRANCE), 1309 p.*

Article en cours de finalisation pour publication

- Suivi de la dynamique de l'occupation du sol dans le nord-ouest du Bénin à partir des images satellitaires multi-sources : Landsat, Modis VCF et NDVI.

Communications orales et actes de colloque

- AGBANOU Thierry, ABDOULAYE Djafarou, PAEGELOW Martin, TENTE Brice : Variabilité climatique et son impact sur le couvert végétal dans le secteur Natitingou-Boukombé au nord-ouest du Bénin. Colloque Eau-Société-Climat (ESC-2017). Hammamet (Tunisie), 2-4 octobre 2017.

- AGBANOU Thierry, ALI Rachade, TENTE Brice : Structure spatiale et diamétrique des populations de *Vitellaria paradoxa* (C.F. Gaertn.) dans les savanes de la Commune de Natitingou (Nord-ouest du Bénin). V Colloque international de l'Université d'Abomey-Calavi (Bénin) des Sciences, Cultures et Technologies. Abomey-Calavi (Bénin), 28/09 au 02/10 2015.

- AGBANOU Thierry, TCHIBOZO Eric, TENTE Brice : Cartographie des changements de l'occupation du sol en milieu urbain : cas du 12ème arrondissement de Cotonou. Journées Scientifiques Internationales de Lomé (Togo). 20-25 octobre 2014.

- Thierry AGBANOU : Sensibilité de la densité spatiale de *Vitellaria paradoxa* (C.F. Gaertn.) à la variabilité climatique dans la Commune de Natitingou. 1^{er} colloque scientifique de l'Université de Parakou (Bénin). 27-29 Novembre 2013.

Annexes 2 : Questionnaires de terrain

DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL/ QUESTIONNAIRES EXPLOITANTS AGRICOLES

Février - Mars 2016 - Thèse de doctorat

Ce questionnaire permettra de recueillir toutes les informations relatives à la gestion foncière des exploitants agricoles

IDENTITE DE L'ENQUETE

1. Nom du répondant

2. Profession du répondant

3. Age du répondant

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

4. Sexe du répondant

Masculin Féminin

5. Village de résidence

6. Commune de résidence

REGIME FONCIER

7. A qui appartient les terres que vous exploitez?

Collectivité Individu Etat

8. Quelle est votre principal mode d'accès à la terre?

Héritage Don
 Achat Location
 Libre installation Autres à préciser

EVOLUTION DES PRATIQUES AGRICOLES

9. Depuis combien de d'année pratiquez-vous l'agriculture?

-5 ans 5-10 ans 10-15 ans
 15-20 ans 20 ans et +

10. Où étaient situés vos champs il y a 5 ans ?

Aux alentours de la maison -5 Km 5-10 Km
 +10 Km

11. Quelles étaient les premières cultures que vous aviez pratiquées?

Mil Sorgho Maïs Igname
 Riz Coton

12. Quelles étaient leurs superficies respectives?

Mil..... Sorgho..... Maïs.....
 Igname..... Riz..... Coton.....

13. Où sont situés actuellement vos champs?

Aux alentours de la maison -5 Km 5-10 Km
 10 Km et +

14. Quelles sont les cultures que vous pratiquez actuellement dans vos champs?

Mil Sorgho Maïs Igname
 Riz Coton

15. Quelles sont leurs superficies respectives?

Mil..... Sorgho..... Maïs.....
 Igname..... Riz..... Coton.....

16. Quelle était la superficie total de vos champs il y a 20 ans?

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

17. Quelles était la superficie de vos champs il y a 10 ans?

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

18. Quelles était la superficie de vos champs il y a 5 ans?

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

19. Quelle est la superficie de vos champs cette année?

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

20. Il y a-t-il un regain d'intérêt pour une culture donnée qui nécessite une demande en terre plus élevée?

Oui Non

21. Si oui laquelle?

Mil Sorgho Maïs Igname
 Riz Coton

22. Qu'est-ce qui explique la préférence à cette culture?

Très commercialisé Aliment de base
 autre raison (préciser)

23. La terre est-elle toujours disponible pour de nouveaux champs?

Disponible Rare Très rare

24. Si disponible, où trouve-t-on encore ces nouvelles terres?

Dans le village Hors du village

25. Si rare, ou très rare, expliquer la raison

Terres appauvries Spéculation foncière
 Urbanisation

26. Si rare ou très rare, que pensez-vous de l'avenir des agriculteurs?

Migration Reconversion professionnel

SYSTEME DE CULTURE

27. Quel est l'ordre de succession des cultures pratiquées depuis le premier défrichement?

- Mil Sorgho Maïs Igbame
 Riz Coton

28. Quelle est la durée de mise en culture de cette terre?

29. Quelle est la durée de mise en jachère de cette terre?

ACCESSIBILITE DU CHAMP

30. Quelle est la distance qui sépare votre champ du point d'eau le plus proche?

31. Quelle est la distance qui sépare votre champ de la route principale?

32. Quelles est la distance qui sépare votre champ du marché le plus proche?

33. Quelle est la distance qui sépare votre champ du village?

34. Votre champ est-il facilement accessible en saison pluvieuse?

- Oui Non

35. Si non pourquoi avez vous votre champ dans une zone difficile d'accès?

- Terre riche
 Propriété familiale
 Propriété privée
 Seule zone disponible pour le champ

PERCEPTION SUR LA QUALITE DU SOL ET DE LA VEGETATION

36. Faites-vous les feux de végétation avant de labourer votre champ?

- Oui Non

37. Quel est l'état de vos terres cultivées?

- Pauvres Appauvris Fertiles

38. Si vos terres sont pauvres ou appauvries, quels sont les signes?

- Faible rendement couleur du sol
 Type de végétation qui y pousse

39. Si terres pauvres ou appauvries, quelles disposition envisagez vous?

- Jachère
 Engrais chimique
 Engrais biologique
 Reconversion professionnel
 Rien

40. Comment percevez-vous l'état de la végétation?

- Dégradé amélioré Stable

41. Quel sera l'état du couvert végétal dans 5 ans, 10 ans ou 20 ans?

- Dégradé Amélioré Stable

42. Selon vous quelles sont les activités ou facteurs qui contribuent au changement d'usage du sol (dégradation de la végétation)?

- Exploitation forestière
 Surpâturage
 Croissance démographique
 Spéculation foncière
 Activités agricoles
 Urbanisation
 Perturbations climatiques
 Autres (préciser)

43. Quels sont les impacts du changement d'usage du sol sur le couvert végétal?

- Dégradation de la végétation
 Développement de la végétation
 Aucun impact

IMPACTS DE LA DEGRADATION DE LA VEGETATION ET EFFORTS DE REBOISEMENT

44. Quels sont les impacts de la dégradation du couvert végétal?

- Impacts économiques Impacts environnementaux
 Impact sociaux

45. Avez-vous une plantation ?

- Oui Non

46. Si oui, quelle est l'espèce plantée?

- Teck Eucalyptus
 Caïcédraat Mélina
 Anacarde Autres (préciser)

47. Quelle est la superficie de cette plantation?

48. Avez-vous souvent planté des arbres?

- Oui Non

49. Quels arbres avez-vous souvent planté?

- Teck Eucalyptus
 Caïcédraat Méliné
 Anacarde Autres (préciser)

50. Quelle solution préconisez-vous pour conserver le couvert végétal pendant vos activités agricoles?

DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL/ QUESTIONNAIRE EXPLOITANTS FORESTIERS

Février - Mars 2016 - Thèse de doctorat

Ce questionnaire permettra de recueillir toutes les informations relatives à la disponibilité et à l'exploitation des ressources forestières

IDENTITE DE L'ENQUETE

1. Nom du répondant

2. Profession du répondant

3. Age du répondant

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

4. Sexe du répondant

Masculin Féminin

5. Village de résidence

6. Commune de résidence

REGIME FONCIER ET MODE D'ACCES AUX RESSOURCES FORESTIERES

7. A qui appartient les terres sur lesquelles vous coupez les arbres?

Collectivité Individu Etat

8. Quelle est le mode d'accès aux ressources forestières?

- Accès libre sur nos propres terres
 Accès autorisé par les eaux et forêts
 Accès autorisé par la mairie
 Accès libre sur toutes les terres
 Achat auprès des propriétaires terriens
 Autres à préciser

EVOLUTION DE LA DISPONIBILITE DE RESSOURCES FORESTIERES

9. Où était situé votre zone d'exploitation forestière il y a 5 ans ?

Aux alentours de la maison -5 Km 5-10 Km
 + 10 Km

10. Où se situe actuellement votre zone d'exploitation forestière?

Aux alentours de la maison -5 Km 5-10 Km
 +10 Km

11. Quelles sont les essences de valeur que vous exploitez?

Mélina Teck
 Eucalyptus Karité
 Néré Autres à préciser

12. Comment percevez vous actuellement l'état des ressources forestières?

Dégradée Non dégradée

13. Comment évolution de la disponibilité des ressources forestières dans le temps?

En régression En augmentation Stable

14. Pourquoi cette évolution?

Reboisement
 Pas de reboisement
 Régénérescence naturelle assurée

15. En cas de rareté des ressources forestières quelles dispositions prendriez-vous?

Réduction de la quantité de bois à exploiter
 Reconversion vers d'autres activités
 Recherche du bois dans d'autres communes

ACCESSIBILITE AUX ZONES D'EXPLOITATION FORESTIERE

16. Quelle est la distance qui sépare votre zone d'exploitation de la maison?

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

17. Quelle est la distance qui sépare votre zone d'exploitation du marché d'écoulement du bois?

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

18. Quelle est la distance qui sépare la zone d'exploitation de la route principale?

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

ACTIVITES RESPONSABLES DE LA DEGRADATION DES RESSOURCES FORESTIERES

19. Comment percevez-vous l'état de la végétation?

Dégradé Amélioré Stable

20. Selon vous quelles sont les activités qui contribuent à la dégradation des ressources forestières?

Agriculture Elevage
 Pâturage Chasse
 Exploitation du bois Autre à préciser

21. Selon vous quels sont les facteurs qui contribuent au changement d'usage du sol?

- Croissance démographique
- Surpâturage
- Spéculation foncière
- Activités agricoles
- Exploitation forestière
- Urbanisation
- Perturbations climatiques
- Autres à préciser

22. Quels sont les impacts du changement d'usage du sol sur le couvert végétal?

- Dégradation de la végétation
- Développement de la végétation
- Aucun impact

23. Quel sera l'état du couvert végétal dans 5 ans, 10 ans ou 20 ans?

- Dégradé
- Amélioré
- Stable

IMPACTS DE LA DEGRADATION DES FORMATIONS VEGETALES

24. Quels sont les impacts économiques de la dégradation du couvert végétal?

- Baisse des revenus
- Cherté des produits dérivés du bois
- Autres à préciser

25. Quels sont les impacts environnementaux de la dégradation des formations végétales?

- Rareté des pluies
- Appauvrissement des sols
- Erosion
- Baisse du rendement agricole
- Disparition de certaines espèces végétales
- Eloignement des animaux sauvages
- Autres à préciser

26. Quels sont les impacts sociaux de la dégradation des formations végétales?

- Chômage
- Pauvreté
- Autre à préciser

EFFORTS DE REBOISEMENT

27. Avez-vous une plantation

- Oui
- Non

28. Si oui, quelle est l'espèce plantée?

- Mélina
- Teck
- Eucalyptus
- Moringa
- Autres à préciser

29. Dans l'avenir quelle est votre préférence entre exploitation forestière et la sylviculture (plantation)

- Exploitation forestière
- Sylviculture

30. Quelles solutions préconisez-vous pour conserver les ressources forestières tout en pratiquant l'activité d'exploitation des ressources forestières?

- Reboisement
- Exploitation des plantations
- Autre à préciser

DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL/ QUESTIONNAIRE ELEVEURS DE BOVINS

Février - Mars 2015 - Thèse de doctorat

Ce questionnaire permettra de recueillir toutes les informations relatives à la disponibilité et à l'exploitation des pâturages

IDENTITE DE L'ENQUETE

1. Nom du répondant

2. Profession du répondant

3. Age du répondant

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

4. Sexe du répondant

Masculin Féminin

5. Village de résidence

6. Commune de résidence

REGIME FONCIER ET MODE D'ACCES AUX PATURAGES

7. A qui appartient les terres sur lesquelles vous faites le pâturage?

Collectivité Individu Etat

8. Quelle est le mode d'accès aux terres?

- Accès libre sur nos propres terres
- Accès autorisé par les eaux et forêts
- Accès autorisé par la mairie
- Accès libre sur toutes les terres
- Achat auprès des propriétaires terriens
- Autres à préciser

EVOLUTION DES PRINCIPES PASTORALES

9. Où était situé votre zone de pâturage?

Aux alentours de la maison -5 Km 5-10 Km
 + 10 Km

10. Où se situe actuellement votre zone de pâturage?

Aux alentours de la maison -5 Km 5-10 Km
 +10 Km

11. Quelles sont les techniques de pâturage que vous utilisez?

- Conduite des bovins pour la recherche du pâturage herbacé
- Emondage des ligneux pour le pâturage aérien
- Package des animaux et leur alimentation par le reste des récoltes et autres espèces fourragères

12. Quelles sont les espèces ligneuses appréciées par les bovins?

- Mélina Teck
- Moringa Eucalyptus
- Karité Autres (précisez)

13. Entre l'eau et la végétation quel est l'élément prédominant qui justifie le choix de votre lieu de pâturage ?

Eau Végétation

ACCESSIBILITE AUX ZONES DE PATURAGE

14. Quelle est la distance qui sépare votre zone de pâturage de la maison?

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

15. Quelle est la distance qui sépare votre zone de pâturage du marché d'écoulement du bétail?

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

16. Quelle est la distance qui sépare la zone de pâturage de la route principale la plus proche?

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

CONFLITS D'OCCUPATION CONCURRENTE DE L'ESPACE

17. Avec quels autres acteurs vous avez de conflits dans le cadre de vos activités?

- Agriculteurs Exploitant de bois
- Autres (préciser)

PERCEPTION DE L'ETAT DES PATURAGES ET DE LA VEGETATION

18. Quel est l'état de vos pâturages ?

Pauvre Appauvri Riche

19. Si vos pâturages sont pauvres et/ou appauvries, quelles sont les dispositions que vous prenez de prendre ?

- Mise en place de plantations fourragères
- Recherche de nouveaux pâturages
- Reconversion vers d'autres activités

20. Quel sera l'état de vos pâturages en thème de végétation) dans 5 ans, 10 ans ou 20 ans?

- Dégradé Amélioré Stable

ACTIVITES RESPONSABLES DE LA DEGRADATION DES RESSOURCES FORESTIERES

21. Selon vous quelles sont les activités qui contribuent à la dégradation des ressources forestières?

- Agriculture Elevage
 Pâturage Chasse
 Exploitation du bois Autre à préciser

22. Selon vous quelles sont les activités ou facteurs qui contribuent au changement d'usage du sol?

- Croissance démographique
 Spéculation foncière
 Activités agricoles
 Exploitation forestière
 Urbanisation
 Perturbations climatiques
 Autres à préciser

23. Quels sont les impacts du changement d'usage du sol sur le couvert végétal?

- Dégradation de la végétation
 Développement de la végétation
 Aucun impact

IMPACTS DE LA DEGRADATION DES FORMATIONS VEGETALES

24. Comment percevez-vous l'état de la végétation ?

- Dégradée Non dégradée

25. Quels sont les impacts économiques de la dégradation du couvert végétal?

- Baisse des revenus
 Cherté des produits dérivés du bois
 Autres à préciser

26. Quels sont les impacts environnementaux de la dégradation des formations végétales?

- Rareté des pluies
 Appauvrissement des sols
 Erosion
 Baisse du rendement agricole
 Disparition de certaines espèces végétales
 Eloignement des animaux sauvages
 Autres à préciser

27. Quels sont les impacts sociaux de la dégradation des formations végétales?

- Chômage Pauvreté Autre à préciser

EFFORTS DE REBOISEMENT

28. Avez-vous une plantation

- Oui Non

29. Si oui, quelle est l'espèce plantée?

- Mélina Teck
 Eucalyptus Moringa
 Autres à préciser

30. Dans l'avenir quelle est votre préférence entre exploitation forestière et la sylviculture (plantation)

- Exploitation forestière sylviculture

31. Quelles solutions préconisez-vous pour conserver les ressources forestières tout en pratiquant l'activité d'exploitation des ressources forestières?

- Reboisement Exploitation des plantations
 Autre à préciser

Annexe 3 : Matrices markoviennes de probabilité de transition de 2016 à 2031

Matrice Markovienne pour le scénario BAU

		Probabilité de 2031							
		FG	FD	FCSB	SAA	SS	PT	MCJ	AGG
Probabilité de 2016	FG	0,9034	0,0049	0,0105	0,0044	0,0022	0	0,0746	0
	FD	0	0,0019	0,0233	0,2969	0	0,0009	0,6771	0
	FCSB	0,0001	0,0041	0,0618	0,4079	0,009	0,0072	0,5093	0,0006
	SAA	0,0001	0,0037	0,0072	0,5276	0,0011	0,0007	0,4589	0,0008
	SS	0,0003	0	0,0015	0,0153	0,9441	0	0,0385	0,0002
	PT	0	0	0,001	0,0045	0,0023	0,9678	0,0073	0,017
	MCJ	0	0,0007	0,0094	0,356	0,0014	0,0049	0,6183	0,0093
	AGG	0	0	0,0003	0,0167	0,0001	0,0022	0,0261	0,9546

Matrice Markovienne pour le scénario DEC

		Probabilité de 2031							
		FG	FD	FCSB	SAA	SS	PT	MCJ	AGG
Probabilité de 2016	FG	0.9034	0.0049	0.0815	0.0044	0.0022	0.0000	0.0036	0.0000
	FD	0.0000	0.0019	0.0233	0.2969	0.0000	0.0009	0.6770	0.0000
	FCSB	0.0001	0.0274	0.0618	0.8708	0.0090	0.0072	0.0232	0.0006
	SAA	0.0001	0.0037	0.0266	0.5276	0.0011	0.0007	0.4394	0.0008
	SS	0.0003	0.0000	0.0015	0.0153	0.9442	0.0000	0.0385	0.0002
	PT	0.0000	0.0000	0.0010	0.0045	0.0023	0.9679	0.0073	0.0170
	MCJ	0.0000	0.0007	0.0094	0.0080	0.0014	0.0121	0.9663	0.0021
	AGG	0.0000	0.0000	0.0003	0.0167	0.0001	0.0022	0.0261	0.9546

Matrice Markovienne pour le scénario CER

		Probabilité de 2031							
		FG	FD	FCSB	SAA	SS	PT	MCJ	AGG
Probabilité de 2016	FG	0.5092	0.0049	0.0105	0.0044	0.0022	0.0000	0.4688	0.0000
	FD	0.0000	0.0019	0.0233	0.2969	0.0000	0.0009	0.6770	0.0000
	FCSB	0.0001	0.0036	0.0551	0.3637	0.0080	0.0064	0.4541	0.1089
	SAA	0.0001	0.0007	0.0022	0.4123	0.0011	0.0007	0.5720	0.0109
	SS	0.0003	0.0000	0.0014	0.0145	0.8970	0.0000	0.0366	0.0501
	PT	0.0000	0.0000	0.0010	0.0045	0.0023	0.9679	0.0073	0.0170
	MCJ	0.0000	0.0007	0.0014	0.1887	0.0014	0.0049	0.7856	0.0173
	AGG	0.0000	0.0000	0.0003	0.0167	0.0001	0.0022	0.0261	0.9546

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

Annexe 4 : LUCC Budget 2016-2031 en ha des scénario BAU, DEC et CER

LUCC Budget 2016-2031 en ha pour le scénario BAU

	Gain	Perte	Total Change	Swap	Absolute value of net change
FG	0	0	0	0	0
FD	0	392.31	392.31	0	392.31
FCSB	0	2124.63	2124.63	0	2124.63
SAA	0	46126.26	46126.26	0	46126.26
SS	0	366.12	366.12	0	366.12
PT	644.49	0	644.49	0	644.49
MCJ	48873.6	1675.98	50549.58	3351.96	47197.62
AGG	1167.21	0	1167.21	0	1167.21
	50685.3	50685.3	101370.6	3351.96	98018.64

LUCC Budget 2016-2031 en ha pour le scénario DEC

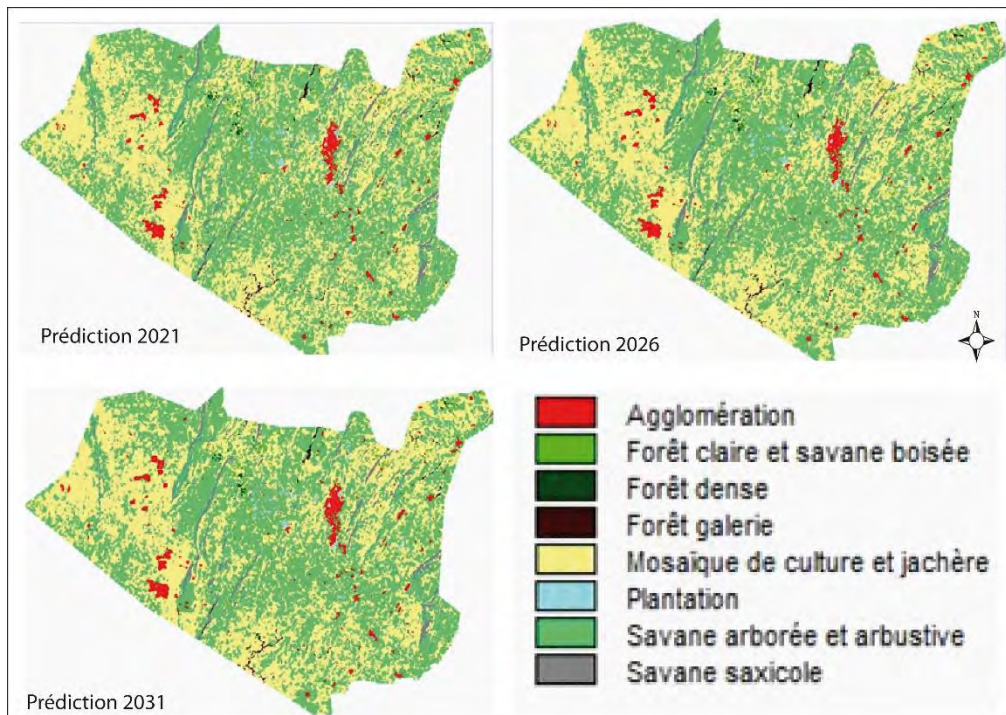
	Gain	Perte	Total Change	Swap	Absolute value of net change
FG	0	0	0	0	0
FD	187,92	380,43	568,35	375,84	192,51
FCSB	2631,15	2521,53	5152,68	5043,06	109,2
SAA	1744,38	46197,45	47941,83	3488,76	44453,07
SS	30,33	359,46	389,79	60,66	329,13
PT	1548,18	0	1548,18	0	1548,18
MCJ	45256,77	2203,38	47460,15	4406,76	43053,39
AGG	263,52	0	263,52	0	263,52
	51662,25	51662,25	103324,5	13375,08	89949,42

LUCC Budget 2016-2031 en ha pour le scénario CER

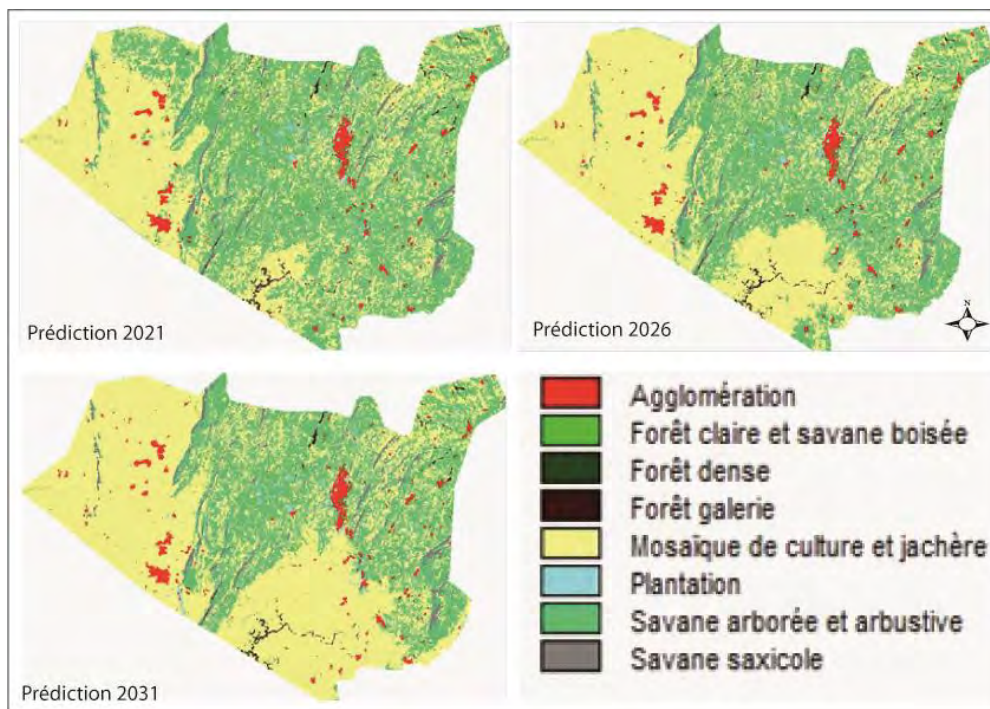
	Gain	Perte	Total Change	Swap	Absolute value of net change
FG	0	0	0	0	0
FD	0	392.31	392.31	0	392.31
FCSB	0	1894.32	1894.32	0	1894.32
SAA	0	57494.34	57494.34	0	57494.34
SS	0	348.3	348.3	0	348.3
PT	641.25	0	641.25	0	641.25
MCJ	59904.63	2587.95	62492.58	5175.9	57316.68
AGG	2171.34	0	2171.34	0	2171.34
	62717.22	62717.22	125434.44	5175.9	120258.54

Légende : FG : Forêts galeries ; FD : Forêts denses ; FCSB : Forêts claires et savanes boisées ; SAA : Savanes arborées et arbustives ; SS : Savanes saxicoles ; PT : Plantations ; MCJ : Mosaïques de Champs et jachères ; AGG : Agglomérations

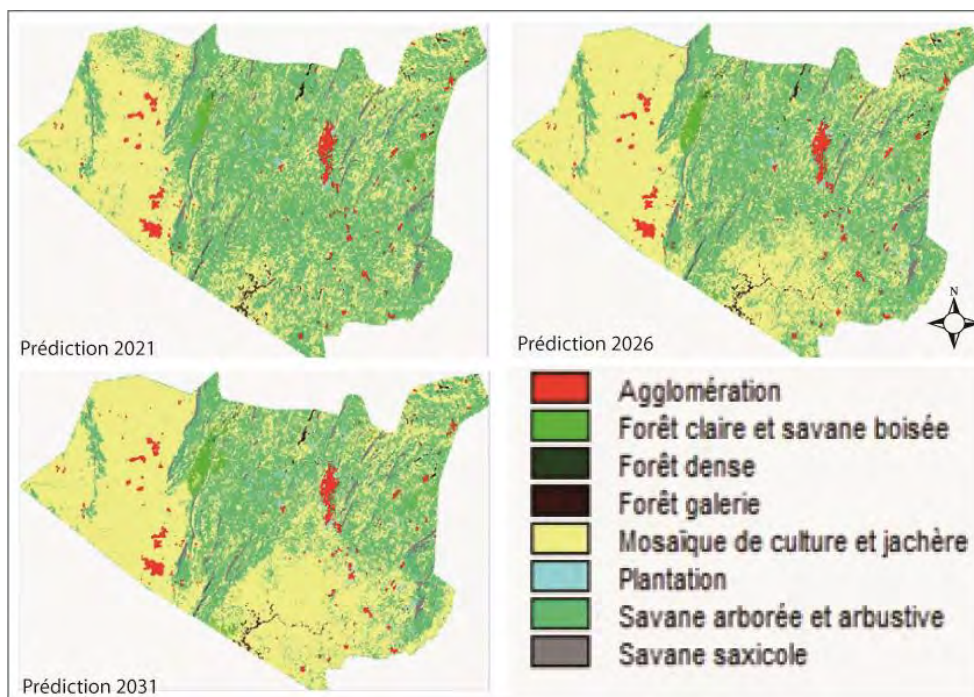
Annexe 5 : Cartes simulées pour les scénarios BAU, DEC et CER



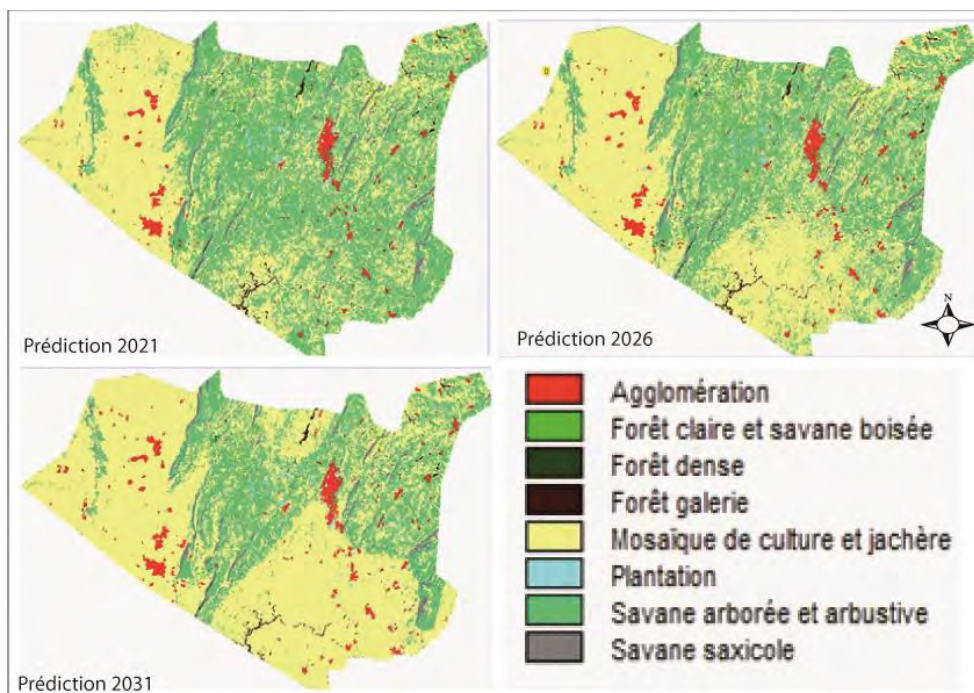
Cartes simulées pour le scénario CA_Markov



Cartes simulées pour le scénario BAU



Cartes simulées pour le scénario DEC



Cartes simulées pour le scénario CER

Superficies en ha occupées par chaque catégorie d'occupation du sol dans les trois scénarios

	Superficie en ha de chaque catégorie d'occupation pour l'ensemble des 3 scénarii							Total
	Intersection des 3 scénarios	Intersection BAU et DEC	Intersection BAU et CER	Intersection DEC et CER	BAU seul	DEC seul	CER seul	
FG	5688,81	0	858,06	1,08	46,71	0	1049,76	1268,19
FD	917,91	90,54	59,4	575,73	921,6	2639,52	666,72	531,72
FCSB	38,43	44,28	0	108,54	104,49	195,75	40,23	5871,42
SAA	1268,19	0	0	0	0	0	0	61680,33
SS	160944,3	895,14	7140,78	5820,57	3739,59	915,57	8933,22	9391,05
PLT	1070,64	16,47	23,22	500,13	624,42	1028,7	137,52	3401,1
MCJ	40446,09	8379,27	895,59	1623,6	4667,67	5612,85	55,26	188389,17
AGG	8944,92	0	10,62	210,96	193,68	30,33	0,54	7644,42
	219319,29	9425,7	8987,67	8840,61	10298,16	10422,72	10883,25	278177,4

Annexe 6 : Points de contrôle terrain

Forêt dense		
Point	Longitude	Latitude
FD1	322051	1131913
FD2	322045	1131923
FD3	322035	1131910
FD4	321986	1131891
FD5	321984	1131916
FD6	321981	1131930
FD7	332556	1134789
FD8	332564	1134826
FD9	332610	1134882
FD10	332634	1134879

Forêt claire savane boisée		
Point	Longitude	Latitude
FCSB1	328865	1130538
FCSB2	329089	1130302
FCSB3	328538	1130149
FCSB4	328604	1129596
FCSB5	302345	1125106
FCSB6	302363	1125081
FCSB7	302301	1125067
FCSB8	320421	1143878
FCSB9	320433	1143887
FCSB10	320472	1143904
FCSB11	320443	1143909

Forêt galerie		
Point	Longitude	Latitude
FG1	332623	1134873
FG2	332589	1134829
FG3	317722	1145858
FG4	317713	1145862
FG5	317696	1145853
FG6	317701	1145847
FG7	317682	1145849
FG8	317684	1145845
FG9	317641	1145827
FG10	324498	1145997
FG11	324505	1145985
FG12	324498	1145981
FG13	324492	1145962
FG14	324493	1145951
FG15	280529	1135492
FG16	281845	1132867
FG17	281852	1132822
FG18	281895	1132854
FG19	295994	1122379
FG20	295982	1122392
FG21	295961	1122406
FG22	295937	1122422
FG23	295933	1122442

Savane arborée savane arbustive		
Point	Longitude	Latitude
SAA1	332404	1134944
SAA2	332556	1134869
SAA3	332513	1134811
SAA4	332249	1134755
SAA5	330115	1131789
SAA6	330072	1131970
SAA7	329876	1131544
SAA8	324712	1146359
SAA9	324670	1146381
SAA10	324684	1146407
SAA11	324721	1146394
SAA12	320099	1142951
SAA13	320069	1143026
SAA14	320022	1143010
SAA15	320041	1142938
SAA16	280367	1136304
SAA17	280405	1136305
SAA18	280444	1136247
SAA19	278998	1136426
SAA20	279001	1136461
SAA21	278976	1136452
SAA22	278960	1136506
SAA23	278977	1136513
SAA24	278966	1136532

SAA25	278943	1136522
-------	--------	---------

Mosaïque de culture et jachère		
Point	Longitude	Latitude
MCJ1	337926	1139210
MCJ2	337480	1138950
MCJ3	337431	1138802
MCJ4	308738	1133230
MCJ5	308845	1133207
MCJ6	308830	1133109
MCJ7	308712	1133165
MCJ8	321794	1131521
MCJ9	338395	1140246
MCJ10	320196	1142860
MCJ11	320232	1142865
MCJ12	320254	1142900
MCJ13	320168	1142918
MCJ14	320077	1144847
MCJ15	320113	1144844
MCJ16	320123	1144891
MCJ17	320089	1144901
MCJ18	317395	1146067
MCJ19	317389	1146085
MCJ20	317417	1146096
MCJ21	317605	1146070
MCJ22	317599	1146097
MCJ23	317561	1146085
MCJ24	317578	1146054
MCJ25	320060	1144808
MCJ26	320014	1144810
MCJ27	319995	1144721
MCJ28	320066	1144737
MCJ29	318183	1145505
MCJ30	318215	1145551
MCJ31	318278	1145531
MCJ32	318255	1145452
MCJ33	317371	1146029
MCJ34	317394	1146063
MCJ35	317376	1146107
MCJ36	319376	1147838
MCJ37	317313	1146125
MCJ38	319074	1148057

Plantation		
Point	Longitude	Latitude
P1	322087	1131904
P2	322431	1132424
P3	323041	1133326
P4	323256	1133220
P5	320473	1144485
P6	320451	1144483
P7	320469	1144683
P8	320451	1144687
P9	318178	1145501
P10	318204	1145538
P11	318130	1145527
P12	280446	1135338
P13	280430	1135336
P14	280439	1135361
P15	280450	1135362
P16	280196	1136535
P17	280215	1136571
P18	280186	1136587
P19	280162	1136553
P20	294380	1123976
P21	294412	1123949
P22	294388	1123916
P23	294752	1123512
P24	294685	1123331
P25	305788	1130634
P26	294788	1123296
P27	305843	1130665
P28	305785	1130735
P29	305754	1130653

MCJ39	317301	1146064
MCJ40	319137	1147870
MCJ41	317640	1146034
MCJ42	324759	1146400
MCJ43	317614	1146060
MCJ44	324733	1146368
MCJ45	317552	1146028
MCJ46	317554	1145977
MCJ47	282012	1132730
MCJ48	286322	1129946
MCJ49	280204	1135920
MCJ50	296463	1122220
MCJ51	296633	1122262
MCJ52	280109	1136287
MCJ53	280325	1136297
MCJ54	280149	1136526
MCJ55	278895	1136287
MCJ56	278918	1136136
MCJ57	283743	1131750

Savane saxicole		
Point	Longitude	Latitude
SS1	302923	1125892
SS2	303052	1125900
SS3	302987	1125735
SS1	321449	1142241
SS2	321510	1142249
SS3	321522	1142294
SS4	321479	1142300
SS5	320315	1143787
SS6	320284	1143818
SS7	320268	1143796
SS8	320288	1143772

Agglomération		
Point	Longitude	Latitude
AG1	280409	1135105
AG2	280528	1136290
AG3	280618	1136300
AG4	280622	1135787
AG5	280654	1135761
AG6	280646	1135604
AG7	280529	1135492

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Caractéristiques techniques des images LANDSAT utilisée.....	48
Tableau II : Clé d'interprétation composition colorée 234 et 345 (TM /ETM+/OLI-TIRS) ...	54
Tableau III : Description des catégories d'occupation du sol identifiées dans le secteur d'étude.....	55
Tableau IV : Matrice générale de transition de deux différentes cartes de LUCC	59
Tableau V : Répartition des des catégories socioprofessionnelles importantes enquêtées par village.....	66
Tableau VI : Classification de la sécheresse en rapport avec la valeur de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI).....	70
Tableau VII : Variables utilisées pour la modélisation et leurs sources	73
Tableau VIII : Matrice de confusion de la classification de l'image TM 1987	83
Tableau IX : Matrice de confusion de la classification de l'image ETM+ 2000	84
Tableau X : Matrice de confusion de la classification de l'image Landsat OLI TIR 2016	84
Tableau XI : Superficies des surfaces à tendance significative (TC, NV, NTV) par type de transition.....	91
Tableau XII : Superficie des pixels NDVI ayant significativement évolué.....	97
Tableau XIII : Superficie des pixels des NDVI ayant significativement évolués dans les zones de changement continu.....	99
Tableau XIV : Superficie des pixels des NDVI ayant significativement évolués dans les zones de stabilité continue ou homogène	102
Tableau XV : Catégories d'occupation du sol et leurs superficies en 1987.....	108
Tableau XVI : Catégories d'occupation du sol et leurs superficies en 2000	109
Tableau XVII : Catégories d'occupation du sol et leurs superficies en 2016	111
Tableau XVIII : Evolution des superficies en ha entre 1987 et 2000	112
Tableau XIX : Matrice de transition entre 1987 et 2000 en ha	113
Tableau XX : Ordres de régression des changements d'occupation du sol (1987- 2000)	115
Tableau XXI : Pertes et gains (1987 – 2000)	117
Tableau XXII : Evolution des superficies en ha entre 2000 et 2016.....	120
Tableau XXIII : Matrice de transition entre 2000 et 2016 en ha	121
Tableau XXIV : Ordres de régression des changements d'occupation du sol (2000- 2016).....	123
Tableau XXV : Pertes et gains en ha.....	125
Tableau XXVI : Evolution des taux d'expansion des catégories d'occupation du sol pour les périodes 1987 – 2000 et 2000 – 2016	129
Tableau XXVII : Classification de la sécheresse en rapport avec la valeur de l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI)	133
Tableau XXVIII : Segmentation de Hubert (Niveau de significativité de Scheffé 1 %).....	134
Tableau XXIX : Bilan hydrique sur la période 1965 à 2010.....	138
Tableau XXX : Coefficient d'Allan de 2016 dans le secteur Natitingou-Boukombé.....	152
Tableau XXXI : Facteurs explicatifs des changements d'occupation des sols	157
Tableau XXXII : Variables spatialisées explicatives des changements d'occupation des sols	159
Tableau XXXIII : Paramètres quantitatifs du choix des déterminants de changement d'usage du sol	161

Tableau XXXIV : Analyse comparatives de quelques méthodes de simulation d'occupation du sol	173
Tableau XXXV : Evolution des taux d'expansion des catégories d'occupation du sol pour les périodes 1987 – 2000 et 2000 – 2016	176
Tableau XXXVI : Sous-modèles et leurs transitions retenus.....	178
Tableaux XXXVII-a : Variables spatialement explicites pour les transitions vers agglomérations	178
Tableaux XXXVII-b : Variables spatialement explicites pour les transitions vers plantations et mosaïques de cultures et jachères.....	179
Tableau XXXVIII : Taux de précision obtenus par le perceptron multi-couches pour chaque transition par rapport aux facteurs explicatifs retenus	179
Tableau XXXIX : Taux du ROC pour les cartes de potentiel de transition pour chaque type de transition par sous-modèle	183
Tableau XL : Matrice markovienne de probabilité de transition de 2016 à 2031	186
Tableau XLI : Taux d'évolution des catégories d'occupation du sol entre 2016 et 2031 scénario zéro facteur explicatif.....	192
Tableau XLII : Matrice de transition (2016-2031).....	192
Tableau XLIII : Taux d'évolution des catégories d'occupation du sol entre 2016 et 2031 pour le scénario BAU	195
Tableau XLIV : Matrice de transition 2016-2031 pour le scénario BAU.....	196
Tableau XLV : Taux d'évolution des catégories d'occupation du sol entre 2016 et 2031 pour le scénario DEC.....	199
Tableau XLVI : Matrice de transition 2016-2031	200
Tableau XLVII : Taux d'évolution des catégories d'occupation du sol entre 2016 et 2031 pour le scénario CER en ha	202
Tableau XLVIII : Matrice de transition 2016-2031 du scénario CER en ha	203
Tableau XLIX : Statistiques des superficies de catégories d'occupation du sol en 2016 et 2031 avec les taux d'expansion.....	205
Tableau L : Proportion des superficies occupées par chaque catégorie d'occupation du sol dans les trois scénarios	207
Tableau LI : Statistiques de comparaison des pixels des deux scénarii DEC et CER	209

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Organigramme de la démarche générale de la thèse.....	13
Figure 2 : Situation géographique et administrative du secteur Natitingou-Boukombé	27
Figure 3 : Mouvement oscillatoire annuel du FIT sur l'Afrique	29
Figure 4 : Diagramme climatique (1981 à 2016), Station de Natitingou et ses environs	31
Figure 5 : Evolution des températures maximales et minimales à Natitingou (1981-2010)....	32
Figure 6 : Carte des altitudes (en mètres) en trois dimensions du secteur Natitingou-Boukombé	33
Figure 7 : Carte des pentes du secteur Natitingou-Boukombé.....	34
Figure 8 : Carte géologique du secteur Natitingou- Boukombé.....	37
Figure 9 : Carte pédologique du secteur Natitingou-Boukombé.....	39

Figure 10 : Réseau hydrographique du secteur Naitigou-Boukombé	40
Figure 11 : Evolution de la population du secteur Natitingou-Boukombé entre 1979 et 2013	42
Figure 12 : Diagramme présentant la méthode de traitement des images satellitaires.....	46
Figure 13 : Compositions colorées fausses couleurs.....	53
Figure 14 : Cadre conceptuel de la modélisation de l'occupation du sol.....	74
Figure 15 : Fonctionnement du modèle LCM	77
Figure 16 : Capture d'écran de l'image classifiée 2016 superposée à l'image Google Earth..	86
Figure 17 : Tendances médiane (colonne de gauche) et test de significativité de Mann-Kendall (colonne de droite) pour les catégories couvert arboré (TC, en haut), couvert végétal non arboré (NTV, ligne du milieu) et sans couvert végétal (NV, ligne du bas).	87
Figure 18 : Evolution des différents indicateurs des images Modis (2000 – 2015) en fonction des types de transition identifiés	88
Figure 19 : Evolution des pentes des pixels significatifs (2000-2015) par type de transition .	89
Figure 20 : Evolution (2000 – 2015) des surfaces à couvert forestier (TC) ayant une tendance significative par type de transition	90
Figure 21 : Evolution (2000 – 2015) des surfaces à couvert végétal non arboré (NTV) ayant une tendance significative par type de transition	90
Figure 22 : Evolution (2000 – 2015) des surfaces sans végétation (NV) ayant une tendance significative par type de transition	91
Figure 23A : Evolution du NDVI en fonction des catégories d'occupation du sol en 2000	92
Figure 23B : Evolution du NDVI en fonction des catégories d'occupation du sol en 2016.....	93
Figure 24 : Zones d'entraînement des classifications 2000 et 2016 superposées aux images Modis NDVI.....	94
Figure 25 : Evolution du NDVI en fonction des changements d'occupation du sol entre 2000 et 2016.....	95
Figure 26 : Evolution (2000 – 2016) des NDVI significatifs par type de transition.....	96
Figure 27 : Evolution du NDVI dans les grandes zones homogènes de changement en fonction des transitions d'occupation du sol entre 2000 et 2016	98
Figure 28 : Capture d'écran de zones de grands changements du NDVI sur les images Modis (en violet) superposées aux zones de changement observées sur la carte d'évolution Landsat (polygone avec contour en noir).....	99
Figure 29 : Evolution du NDVI par catégories d'occupation du sol en zones stables entre 2000 et 2016.....	100
Figure 30 : Evolution du NDVI dans les grandes zones de stabilité homogène en fonction des transitions d'occupation du sol entre 2000 et 2016	101
Figure 31A : Capture d'écran de zones de grande stabilité du NDVI sur les images Modis (en rouge bleuâtre, gris et jaune) superposées aux zones de stabilité observées sur la carte d'évolution Landsat (en polygone avec contour en noir).....	103
Figure 31B : Capture d'écran de zones de grande stabilité du NDVI dans les mosaïques de cultures et jachères sur les images Modis (en jaune) superposées aux zones de stabilité observées sur la carte d'évolution Landsat (en polygone avec contour en noir)	103
Figure 32 : Schéma comparatif de la taille des pixels Landsat TM, Modis VCF et NDVI ...	104
Figure 33 : Occupation du sol en 1987	107
Figure 34 : Occupation du sol en 2000	109

Figure 35 : Occupation du sol en 2016	110
Figure 36 : Carte des changements d'occupation du sol entre 1987-2000.....	114
Figure 37 : Carte des changements d'occupation du sol entre 1987-2000.....	116
Figure 38 : Statistiques des grandes tendances d'évolution entre 1987 et 2000	116
Figure 39 : Intensité des changements d'occupation du sol entre 1987 et 2000.....	118
Figure 40 : Intensités et vitesses des changements d'occupation du sol entre 1987 et 2000 .	119
Figure 41 : Carte des changements d'occupation du sol entre 2000 et 2016	122
Figure 42 : Carte des changements d'occupation du sol 2000-2016.....	124
Figure 43 : Statistiques des grandes tendances d'évolution entre 2000 et 2016	124
Figure 44 : Intensité des changements d'occupation du sol entre 2000 et 2016.....	126
Figure 45 : Intensités et vitesses des changements d'occupation du sol entre 2000 et 2016 .	127
Figure 46 : Evolution des catégories d'occupation du son entre 1987 et 2016.....	128
Figure 47 : Indices pluviométriques sur la période 1961-2016 du secteur d'étude	132
Figure 48 : Evolution des précipitations interannuelles entre 1961 et 2016	132
Figure 49 : Résultats des tests de Buishand (A) et de Pettitt (B)	134
Figure 50 : Variation des pluies moyennes mensuelles par sous - périodes dans le secteur d'étude.....	135
Figure 51 : Répartition des moyennes mensuelles de pluie durant la période 1961- 2016....	137
Figure 52 : Evolution des températures annuelles (maximum et minimum) dans le secteur d'étude entre 1981- 2010.....	139
Figure 53 : Evolution de l'humidité relative entre 1971 et 2010 dans le secteur d'étude.....	139
Figure 54 : Cartographie de la densité de la population (hab/km ²) par arrondissement en 1979, 1992, 2002 et 2013	141
Figure 55 : Aptitude culturale des sols du secteur Natitingou-Boukombé	143
Figure 56 : Mode d'accès aux terres agricoles dans le secteur d'étude	144
Figure 57 : Modes d'accès aux terres agricoles par arrondissement dans le secteur d'étude	145
Figure 58 : Durée des terres laissées en jachère dans le milieu d'étude	146
Figure 59 : Superficies des champs en ha par arrondissement en 1996, 2006, 2010 et 2016	147
Figure 60 : Superficies agricoles moyennes en ha en 1996, 2006, 2010 et 2016	148
Figure 61 : Répartition des superficies de champs par arrondissement en 1996	149
Figure 62 : Répartition des superficies de champs par arrondissement en 2016	149
Figure 63 : Evolution des superficies emblavées entre 2005 et 2016	150
Figure 64 : Relations et interrelations entre les différents facteurs explicatifs des changements d'occupation des sols	160
Figure 65 : Indice d'importance des déterminants de dégradation du couvert végétal	161
Figure 66 : Perception des acteurs sur le premier facteur déterminant des changements d'occupation du sol	162
Figure 67 : Perception des acteurs sur le deuxième facteur déterminant des changements d'occupation du sol	162
Figure 68 : Perception des acteurs sur le troisième facteur déterminant des changements d'occupation du sol	163
Figure 69 : Perception des acteurs sur le quatrième facteur déterminant des changements d'occupation du sol	163
Figure 70 : Analogie entre neurone biologique et neurone formel.....	170

Figure 71 : Démarche générale de modélisation et de simulation des LULCC	175
Figure 72 : Ensemble des cartes des facteurs explicatifs utilisés pour modéliser l'occupation du sol	181
Figure 73 : Potentiels de transition vers l'agglomération, la plantation et les mosaïques de culture obtenues avec LCM.....	182
Figure 74 : Courbe ROC des différentes transitions à modéliser.....	185
Figure 75 : Carte prédictive de l'occupation du sol à l'horizon 2031 dans le secteur Natitingou-Boukombé.....	187
Figure 76 : Superficie des catégories d'occupation du sol à l'horizon 2031 dans le secteur Natitingou-Boukombé.....	188
Figure 77 : Occupation du sol simulée avec un scénario dans lequel tous les facteurs explicatifs sont ignorés (CA Markov).....	191
Figure 78 : LUCC budget (2016-2031) en ha	193
Figure 79 : Occupation du sol simulée à l'horizon 2031 avec le scénario Business As Usual (BAU).....	194
Figure 80 : LUCC budget (2016-2031) en ha pour le scénario BAU	196
Figure 81 : Occupation du sol simulée à l'horizon 2031 selon le scénario Durabilité Environnementale Coordonnée (DEC) « Alafia 2031 »	199
Figure 82 : LUCC budget (2016-2031) en ha pour le scénario DEC.....	200
Figure 83 : Occupation du sol simulée à l'horizon 2031 avec le scénario CER.....	202
Figure 84 : LUCC budget (2016-2031) en ha pour le scénario CER.....	204
Figure 85 : Comparaison des trois scénarios BAU, DEC et CER.....	207
Figure 86 : Cartes de comparaison d'occupation du sol entre les cartes simulées DEC et CER	208

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Forêt relique abritant un fétiche à Manta	41
Photo 2 : Galerie forestière sur les berges d'un affluent de perma dans le village de Kotopounga	41
Photo 3 : Tata somba à Kousoucoingou (Boukombé)	43
Photo 4 : Campement peulh à Kotopounga (Natitingou).....	43
Photo 5 : Capture d'écran d'image Google Earth montrant les mosaïques de cultures et jachères entremêlées d'habitat dans l'arrondissement de Manta (Boukombé).....	105
Photo 6 : Capture d'écran d'image Google Earth montrant quelques catégories d'occupation du sol à Natitingou	106
Photo 7 : Culture du mil sur un flanc de montagne à Koussoucoingou (Boukombé)	146
Photo 8 : Exemple de champ de case à Manta (Boukombé)	146
Photo 9 : Plantation de caïlcadrat (<i>Khaya senegalensis</i>) à Kouaba	151
Photo 10 : Troupeau de bœufs des Peuhls à Dipoli (Commune de Boukombé)	153
Photo 11 : Charbon de bois	154
Photo 12 : Bois de chauffe	154
Photo 13 : Blocs de pierres concassés sous forme de gravier à Ouroubona	155
Photo 14 : Site d'exploitation de pierre ornementale exploité à Kota	155

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE	3
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	4
REMERCIEMENTS	7
RESUME.....	9
INTRODUCTION GENERALE.....	11
PREMIERE PARTIE : CADRE THEORIQUE, GEOGRAPHIQUE ET DEMARCHE METHODOLOGIQUE	14
Chapitre I : Cadre théorique et géographique.....	15
Introduction partielle	15
1.1. Cadre théorique et géographique.....	15
1.1.1. Problématique.....	15
1.1.2. Hypothèses de recherche	18
1.1.3. Objectifs	19
1.1.3.1. Objectif global	19
1.1.3.2. Objectifs spécifiques	19
1.1.4. Revue de la littérature.....	19
1.1.5. Définitions opératoires et clarification des concepts.....	24
1.2. Cadre géographique et humain.....	26
1.2.1. Milieu physique.....	26
1.2.1.1. Situation géographique.....	26
1.2.1.2. Climat de la zone d'étude	27
1.2.1.3. Relief.....	32
1.2.1.4. Géologie et sols	35
1.2.1.5. Réseau hydrographique	39
1.2.1.6. Végétation.....	40
1.2.2. Population et types d'habitats.....	41
1.2.2.1. Population.....	41
1.2.2.2. Types d'habitats.....	42
Conclusion partielle.....	44
Chapitre II : Démarche méthodologique	45
Introduction partielle	45
2.1. Méthodologie relative à l'objectif 1 : <i>Cartographier la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé</i>	45
2.1.1. Matériel ou outils de collecte.....	47

2.1.2. Méthode et technique de collecte des données	47
2.1.3. Méthode de traitement des données.....	50
2.2. Méthodologie relative à l'objectif 2 : <i>Déterminer des facteurs explicatifs de la dynamique de l'occupation du sol dans le secteur Natitingou-Boukombé.</i>	63
2.2.1. Matériel et outils de collecte.....	63
2.2.2. Méthode et technique de collecte des données	63
2.2.3. Méthodes de traitement des données et d'analyse des résultats	67
2.3. Méthodologie relative à l'objectif 3 : <i>Modéliser l'évolution de l'occupation du sol à l'horizon 2031 dans le secteur Natitingou-Boukombé</i>	72
2.3.1. Matériel et outils de collecte.....	73
2.3.2. Méthode et technique de collecte des données	73
2.3.3. Méthodes de traitement des données et d'analyse des résultats	74
2.4. Méthodologie relative à l'objectif 4 : <i>Proposer des outils d'aide à la décision à partir de plusieurs scénarios prospectifs possibles pour une meilleure gestion du territoire.</i>	78
2.4.1. Matériel et outils de collecte.....	78
2.4.2. Méthode et technique de collecte des données	78
2.4.3. Méthode de traitement des données.....	78
Conclusion partielle.....	79
DEUXIEME PARTIE : ANALYSE DE L'EMPRISE SPATIALE A TRAVERS LE SUIVI DE L'OCCUPATION DU SOL	81
Chapitre III : Cartographie de la dynamique paysagère du milieu entre 1987 et 2016.....	82
Introduction partielle	82
3.1. Evaluation de la précision des cartes d'occupation du sol	82
3.1.1. Matrice de confusion et indice de Kappa	82
3.1.2. Validation qualitative par Google Earth et à dire d'expert.....	85
3.1.3. Evolution des indicateurs de la série d'images Modis VCF (2000 – 2015)	86
3.1.4. Evolution des transitions significatives par indicateur (2000 – 2015).....	89
3.1.5. Evaluation des classifications à partir des Images Modis NDVI	92
3.1.5.1. Evolution du NDVI par catégories d'occupation du sol identifiées en 2000 et en 2016.....	92
3.1.5.2. Superposition des zones d'entraînement de classification Landsat 2000 et 2016 aux images NDVI.....	94
3.1.5.3. Evolution du NDVI par types de transition entre 2000 et 2016	95
3.1.5.4. Evolution du NDVI dans les grandes zones de changements homogènes entre 2000 et 2016.....	97
3.1.5.5. Evolution du NDVI par catégories d'occupation du sol restées stables entre 2000 et 2016.....	100

3.1.5.6. Evolution du NDVI dans les grandes zones de stabilité continue (homogène) entre 2000 et 2016.....	101
3.1.6. Limites des images Modis VCF et Modis NDVI utilisées	104
3.1.6.1. Faible résolution spatiale des images	104
3.1.6.2. Manque de précision sur la période exacte de l'année où les changements sont observés	105
3.1.6.3. Complexité du milieu d'étude	105
3.2. Dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol	107
3.2.1. Distribution spatiale et quantification des catégories d'occupation du sol.....	107
3.2.1.1 Occupation du sol en 1987	107
3.2.1.2. Occupation du sol en 2000	108
3.2.1.3. Occupation du sol en 2016	110
3.2.2. Cartographie de la dynamique de l'occupation du sol entre 1987 et 2000.....	111
3.2.2.1. Détection des changements spatio-temporels entre 1987 et 2000.....	111
3.2.2.2. Matrice de transition entre 1987 et 2000.....	112
3.2.2.3. LUCC budget et intensité de changements (perte, gain, changement net).....	117
3.2.2.4. Intensités et vitesses des changements d'occupation du sol entre 1987 et 2000	119
3.2.3. Cartographie de la dynamique de l'occupation du sol entre 2000 et 2016.....	120
3.2.3.1. Détection des changements spatio-temporels entre 2000 et 2016.....	120
3.2.3.2. Matrice de transition entre 2000 et 2016.....	121
3.2.3.3. LUCC budget et intensité de changements (perte, gain, changement net).....	125
3.2.3.4. Intensités et vitesses des changements d'occupation du sol entre 2000 et 2016	127
3.2.4. Bilan de l'évolution de l'occupation du sol (1987 – 2016)	127
3.2.4.1. Variation des superficies des catégories d'occupation du sol	127
3.2.4.2. Variation du taux moyen annuel d'expansion de 1987 à 2016.....	128
Conclusion partielle.....	130
Chapitre IV : Principaux facteurs de changements spatiaux	131
Introduction partielle	131
4.1. Analyse des facteurs explicatifs de la dynamique de l'occupation du sol.....	132
4.1.1. Perturbations climatiques	132
4.1.2. Variables de distance.....	140
4.1.3. Facteurs socioéconomiques des changements d'usage du sol.....	140
4.2. Catégories d'occupation des sols affectés par chaque facteur explicatif.....	156
4.3. Interrelation entre les différents facteurs explicatifs des changements d'occupation du sol....	159
4.4. Perception des populations des facteurs de changement d'usage du sol.....	160
4.4.1. Valeurs de diversité et d'équitabilité des déterminants de changement d'usage des sols	160

4.4.2. Déterminants de changement d'usage du sol	161
4.4.3. Lecture croisée de la perception des déterminants de changement d'usage du sol des différents acteurs	162
Conclusion partielle.....	164
TROISIEME PARTIE : SIMULATION PROSPECTIVE DE L'OCCUPATION DU SOL	165
Chapitre V : Modélisation prospective de l'occupation du sol avec le modèle Perceptron multicouche : Land Change Modeler (LCM).....	166
Introduction partielle	166
5.1. Présentation de quelques modèles de simulation : approche comparative	167
5.1.1. CA-Markov.....	167
5.1.2. Land Change Modeler (LCM).....	167
5.1.3. Automate Cellulaire (AC)	168
5.1.4. Les réseaux de neurones artificiels.....	169
5.1.5. Système multi-agent (SMA).....	171
5.1.6. Dinamica – EGO	171
5.1.7. Justification du choix du modèle LCM dans cette étude.....	174
5.2. Simulation de l'occupation du sol avec le modèle Perceptron multicouche : Land Change Modeler (LCM).....	175
5.2.1. Variation du taux annuel d'expansion entre les deux périodes	175
5.2.2. Justification de la période choisie pour l'entraînement du modèle	177
5.2.3. Choix des transitions et sous-modèle	177
5.2.4. Variables explicatives de chaque sous-modèle de transition.....	178
5.2.5. Apprentissage du modèle	181
5.2.6. Probabilité de transition de 2016 à 2031	186
5.2.7. Carte prédictive et tendance évolutive de l'occupation du sol à l'horizon 2031	187
Conclusion partielle.....	188
Chapitre VI : Scénarios prospectifs, discussion et limites de l'étude.....	190
Introduction partielle	190
6.1. Scénarios prospectifs.....	190
6.1.1. Scénario 1 : Scénario dans lequel tous les facteurs explicatifs sont ignorés	190
6.1.1.1. Description du scénario et cartes de sortie	190
6.1.1.2. LUCC Budget et intensité de changement (2016- 2031).....	191
6.1.2. Scénario 2 : Business As Usual (BAU) extrapolant les tendances actuelles en 2031	193
6.1.2.1. Description du scénario et cartes de sortie	193
6.1.2.2. LUCC Budget (2016- 2031).....	195
6.1.3. Scénario 3 : Durabilité Environnementale Coordinée (DEC) « Alafia 2031 »	197

6.1.3.1. Description du scénario et cartes de sortie	197
6.1.3.2. LUCC Budget et intensité de changement (2016- 2031).....	199
6.1.4. Scénario 4 : Croissance Economique Rapide (CER) « Wahala 2031 »	201
6.1.4.1. Description du scénario et cartes de sortie	201
6.1.4.2. LUCC Budget et intensité de changement (2016- 2031).....	202
6.1.5. Etude comparée des résultats issus des scénarios.....	204
6.1.5.1. Comparaison des cartes simulées des trois scénarios BAU, DEC et CER.....	204
6.1.5.2. Comparaison des cartes simulées des deux scénarios DEC et CER.....	208
6.2. Discussion	209
6.2.1. Validation des classifications	209
6.2.2. Dynamique de l'occupation du sol.....	211
6.2.3. Activités humaines facteurs de dégradation	212
6.2.4. Analyse de l'incertitude spatiale des futurs changements de l'occupation du sol.....	214
6.3. LIMITES DE L'ETUDE	216
6.3.1. Difficultés de classification	216
6.3.2. Validation des classifications	216
6.3.3. Mise en place des scénarios et modélisation	216
Conclusion partielle.....	217
CONCLUSION GENERALE	218
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	221
ANNEXES	244
LISTE DES TABLEAUX	260
LISTE DES FIGURES.....	261
LISTE DES PHOTOS	265