



HAL
open science

Etudes des dynamiques spatiales d'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols dans la fenêtre lacustre camerounaise du lac Tchad et son arrière-pays à partir des grandes sécheresses sahéliennes de 1970.

Paul Gérard Gbetkom

► To cite this version:

Paul Gérard Gbetkom. Etudes des dynamiques spatiales d'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols dans la fenêtre lacustre camerounaise du lac Tchad et son arrière-pays à partir des grandes sécheresses sahéliennes de 1970.. Environnement et Société. Aix Marseille University, 2020. Français. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-03130824⟩

HAL Id: tel-03130824

<https://hal.science/tel-03130824v1>

Submitted on 3 Feb 2021

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.



HAL Authorization

UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE
ED 355 – ESPACES, CULTURES, SOCIETES
CNRS ESPACE UMR 7300

Thèse présentée pour obtenir le grade universitaire de docteur

Discipline : Géographie

UNIVERSITE MOHAMMED V DE RABAT
CENTRE D'ETUDES DOCTORALES EN SCIENCES ET
TECHNOLOGIES

Centre de Recherche Biotechnologique, Végétale et Microbienne,
Biodiversité et Environnement.

Thèse présentée pour obtenir le grade universitaire de docteur

Discipline : Biologie

Paul Gérard GBETKOM

Etudes des dynamiques spatiales d'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols dans la fenêtre lacustre camerounaise du lac Tchad et son arrière-pays à partir des grandes sécheresses sahéliennes de 1970.

Soutenue le 23/10/2020 devant le jury :

Laila RHAZI	Université Mohammed V, Rabat	Présidente
Sébastien GADAL	Aix Marseille Université	Directeur de thèse
Ahmed EL-ABOUDI	Université Mohammed V, Rabat	Codirecteur de thèse
Julien ANDRIEU	Université de Nice côte d'azur	Rapporteur
Mohamed CHIKHAOUI	Institut Agronomique Vétérinaire Hassan II, Rabat	Rapporteur
Jean-François CRETAUX	Centre National des Etudes Spatiales, Toulouse	Examineur

Résumé

Le contexte environnemental dans le Sahel à partir des années 1970 est marqué par les grandes sécheresses sahéliennes qui ont succédé aux périodes humides des années 1950-1970, et précédé le retour d'humidité observé au début de la décennie 2000, entraînant de profondes modifications des écosystèmes et leurs utilisations. L'objectif de cette thèse est dès lors d'étudier à partir d'une analyse multi-échelle, multi-capteurs et multi-temporelle de l'occupation et l'utilisation des sols, les conséquences de ces changements environnementaux sur les écosystèmes sahéliens, en prenant pour objet d'étude la fenêtre lacustre camerounaise du lac Tchad et son arrière-pays. Les séries temporelles d'images MODIS MOD13Q1 disponibles à partir de 2000, sont alors utilisées pour cartographier les principales classes de végétation, analyser l'état de la couverture végétale et déterminer ses dynamiques spatiales d'évolutions. Les images Landsat, Sentinel 2 et SPOT 6 disponibles depuis 1972 (pour ce qui est de Landsat), sont exploitées pour établir la diachronie de l'occupation et de l'utilisation des sols en fonction des évolutions climatiques et environnementales sahéliennes, dans le but d'identifier et mettre en évidence les effets de ces changements sur les modes d'utilisation et de valorisation des ressources. L'exploitation de ces données permet de constater qu'après l'aridification des écosystèmes lors des grandes sécheresses, une dynamique de reverdissement du milieu d'étude s'installe à partir des années 2000, à travers le couvert végétal annuel qui recolonise progressivement les sols nus. Le reverdissement observé améliore d'une part la disponibilité des pâturages, et favorise d'autre part l'accentuation des pressions anthropiques sur les ressources du milieu par l'augmentation des superficies agricoles et des surfaces bâties. La modélisation de l'occupation et de l'utilisation des surfaces de sols en fonctions des facteurs géographiques de changements et selon la structure morphologique et les caractéristiques fonctionnelles des éléments de surface montre alors qu'il est possible de déterminer de grands ensembles territoriaux présents dans la zone d'étude.

Mots clés : Télédétection, Grandes sécheresses, Couvert végétal, Occupation et utilisation des sols, Dynamiques d'évolutions, Facteurs géographiques, Modélisation, Sahel.

Abstract

The environmental context in the Sahelian region, from the 1970s is marked by the Sahelian great droughts which followed the wet periods of the 1950-1970 decades, and preceded the return of humidity observed at the beginning of the 2000s. These environmental changes have brought out important modifications in the ecosystems and their uses. The aim of this doctoral thesis is therefore to study, from a multi-scale, multi-sensor and multi-temporal analysis of land use and land cover, the consequences of these environmental changes on the Sahelian ecosystems, through the Cameroonian shores of Lake Chad and its hinterland. The MODIS MOD13Q1 time series images available from 2000 are then used to map the main vegetation classes, analyze the state of the vegetation cover and determine its spatial and temporal evolution trends. The Landsat, Sentinel 2 and SPOT 6 images available since 1972 (for Landsat), are used for a diachronic study of land use and land cover changes of the study area according to Sahelian climatic and environmental changes, with the aim of to identify and highlight the effects of these changes on the use of natural resources. The results shows that after the aridification of land cover during the great droughts, a dynamic of re-greening of the study area takes hold from the 2000s, through the annual vegetation cover which gradually grows on the bare soils. The re-greening observed increases the availability of the pastures, and improves the accentuation of anthropic pressures on the natural's resources by the increase of agricultural areas and built-up surfaces. The modeling of the land use and land cover according to the geographical factors of changes and according to the morphological structure and the functional characteristics of the elements of surface, shows then that it is possible to determine large territorial units present in the study area.

Keywords: Remote sensing, Great droughts, Vegetation cover, Land Use and Land Cover, Spatial dynamics, Geographical factors, Modelization, Sahel.

Dédicace

A ma famille

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de vos nombreux sacrifices consentis.

Remerciements

Ce travail marque la fin de quatre années de formation. Il n'aurait pas pu se réaliser sans l'aide de plusieurs personnes. Aussi, au moment où je l'achève, il m'est particulièrement agréable de faire part de ma profonde gratitude et reconnaissance envers tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à sa réalisation.

Il me sera très difficile de remercier tout le monde car c'est avec la participation de nombreuses personnes que j'ai pu mener cette thèse à son terme.

Il m'est ainsi agréable d'exprimer ma profonde reconnaissance à mes deux directeurs de thèse, le Pr Ahmed EL ABOUDI de l'Université Mohammed V de Rabat, et le Pr Sébastien GADAL de l'Université d'Aix Marseille. Merci pour avoir accepté d'encadrer ce travail de recherche, de m'avoir fait confiance, accueilli et soutenu durant ces quatre années. J'ai eu le privilège de travailler avec vous et d'apprécier vos qualités et vos valeurs. Votre sérieux, votre compétence et votre sens de la rigueur m'ont énormément marqués. Veuillez trouver ici l'expression de ma respectueuse considération et de ma profonde admiration pour toutes vos qualités scientifiques et humaines.

Je souhaite remercier très sincèrement M. Julien ANDRIEU, Maître de Conférence à l'Université de Nice. Votre intervention durant ces travaux de recherche a été décisive. Travailler avec vous m'a permis d'acquérir de nouvelles compétences.

J'exprime également toute ma reconnaissance à Mme Laila RHAZI pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de cette thèse. Je tiens à remercier M. Mohamed CHIKHAOUI et M. Julien ANDRIEU qui ont accepté d'être rapporteurs, et je dis également merci à M. Jean-Francois CRETAUX qui a participé à ce jury en tant qu'examineur.

Mes remerciements vont également à l'endroit de toute l'équipe du laboratoire CNRS ESPACE UMR 7300 à Aix-en-Provence avec qui j'ai passé trois ans, et à tous les membres du laboratoire de Botanique Mycologie et Environnement à Rabat où j'ai effectué ma première année de thèse. Merci pour votre accueil, votre sympathie, votre soutien, les précieux conseils prodigués au cours de ces années, et tous les moments partagés autour d'un verre, d'un repas, ou au détour d'un couloir.

A mes camarades de thèse Dr Barkawi MANSOUR et Dr Prune KOMBA, merci pour vos encouragements et tous les moments passés ensemble.

A mes parents M. et Mme NCHOUTNSU, aucun mot ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement, le respect et la profonde considération que j'ai toujours eu pour vous.

A mes frères et sœurs Ze Olivier, MAKOUET Isabelle, MOMA Didier Camille et MEWOOU Annie pour leur soutien et leur encadrement. En témoignage de l'attachement, et de l'affection que je porte pour vous, je vous exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour. Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.

A mon « grand frère », « mentor », « parrain » NGANDAM MFONDOUM Alfred Homère, pour ton inestimable participation dans l'élaboration de ce travail, je saisis cette occasion pour t'exprimer ma profonde gratitude tout en te témoignant mon immense respect.

A NKAKENE MOUAMFON Hanifa, tes encouragements inlassables, ton amabilité, et ta gentillesse méritent toute admiration. Trouve dans ce travail l'expression de ma profonde reconnaissance.

A tous mes ami(e)s de l'Association des Etudiants Camerounais d'Aix Marseille, en témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Enfin que tous ceux qui m'ont assisté et dont j'ai préféré taire les noms soient vivement remerciés.

Sigles et Acronymes

ACP : Analyse en composante principale
AFIGEO: Association Française pour l'Information Géographique
ARZOTU: Arid zones of Tunisia
ASECNA: Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar
ASTER GDEM: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM)
CBLT: Commission du Bassin du Lac Tchad
CEREMA : Centre d'études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
CHIRPS: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station
CINES : Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur
CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CLUE: Conversion of Land Use and its Effects
CNES : Centre National des Etudes Spatiales
CNRS: Centre National de la Recherche Scientifique
CP: Composante Principale
CRU : Climatic Research Unit
MERRA2 ERA1: Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications (MERRA) Environmentally Responsible Aviation (ERA)
DGMN : Direction Générale de la Météorologie Nationale
DVI: Differenced Vegetation Index
ESA: European Space Agency
ETM: Enhanced Thematic Mapper
ETM+: (Enhanced Thematic Mapper Plus)
ETP : Evapotranspiration Potentielle
EVI : Enhanced Vegetation Index
FIT : Front Inter Tropical)
GIZ : Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
GAEZ: Global Agroecological Zones
GPCP: Global Precipitation Climatology Project
GSI: Topsoil Grain Size Index
IGBP Programme Intergouvernemental de Géosphère-Biosphère
IGN : Institut National de l'Information Géographique et Forestière
IHDP Programme International de la Dimension Humaine
IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
IQC : Indice de la qualité du climat
IQS : Indice de la qualité de sol
IQSA : Indice de la qualité de système d'aménagement des terres
IQV : Indice de la qualité de la végétation
IRAD : Institut de Recherche Agronomique pour le Développement Cameroun
IRD : Institut de Recherche pour le Développement

IRSTEA : Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

ISD : Indice de Sensibilité à la Désertification

OSS : Observatoire du Sahara et du Sahel

LAI: Leaf Area Index

LP DAAC: Land Processes Distributed Active Archive Center

MEDALUS: Mediterranean Desertification and Land Use

MNF : Minimum Noise Fraction

MNT (Modèle Numérique de Terrain)

MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MSAVI: Modified Soil-adjusted Vegetation Index

MSS: Multi Spectral Scanner

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NDBSI: Normalized Difference Bare Soil Index

NDGI: Normalized Difference Greenness Index

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

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

OLI : Operational Land Imager

ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

PERSIANN-CDR: Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks Climate Data Record

PNDP : Programme National de Développement Participatif

PNUE Programme des Nations Unies pour l'Environnement

PVI : Perpendicular Vegetation Index

RGPH : Recensement Général de la Population et de l'Habitat

RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation

RVB : Return Beam Vidicon

SEMRY : Société d'Expansion et de Modernisation de la Riziculture de Yagoua

SIG : Systèmes d'Information Géographique

SPI: Standardized Precipitation Index

SPOT : Satellite Pour l'Observation de la Terre

SVM : Support Vectors Machines en anglais

TM: Thematic Mapper

TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission

TSARVI: Transformed Soil Atmospherically Resistant Vegetation Index

TSAVI: Transformed Soil Adjusted Vegetation Index

UNCCD: United Nations Convention to Combat Desertification

USGS: United States Geological Survey

USLE: Universal Soil Loss Equation

WMO : World Meteorological Organization

ZCIT : Zone de Convergence Inter Tropicale

Table des matières

Résumé	1
Abstract	2
Dédicace	3
Remerciements	5
Sigles et Acronymes	7
Introduction générale	13
Chapitre 1 : Les enjeux de connaissances	21
Introduction	21
1.1. Les questions environnementales des milieux arides sahéliens	22
1.1.1. Le contexte climatique au sahel	23
1.1.2. Mutations des écosystèmes sahéliens : les notions de désertification, de sécheresse et de dégradation des sols	30
1.1.3. La disponibilité et l'utilisation des ressources dans l'espace sahélien	33
1.2. Les dynamiques spatiales, territoriales et sociales autour du lac Tchad	34
1.2.1. Les évolutions contemporaines de l'état du Lac et sa situation actuelle	37
1.2.2. Attractivité et mobilité autour du Lac favorisées par son état récent	41
1.2.3. Les pressions anthropiques sur le milieu	42
1.2.4. Un territoire perturbé par la crise sécuritaire	55
1.3. Les enjeux de connaissances aux rives camerounaises du lac Tchad	56
1.3.1. Territoire d'étude et critère de choix	59
1.3.2. Description et caractérisation du milieu	63
Conclusion	79
Chapitre 2 : Données, méthodes et modèles	81
Introduction	81
2.1. La télédétection au service de l'étude des milieux arides : une lecture critique à travers le temps	83
2.1.1. Les objectifs des études des milieux arides sahéliens par télédétection	83
2.1.2. Evolutions des approches d'études des milieux arides par télédétection	85
2.1.3. Les méthodes de modélisation par imagerie satellitaires appliquées aux régions arides	91
2.2. Les données géographiques : contexte et disponibilité	94
2.2.1. Le choix des données utilisées	99
2.3. Méthodologie de l'étude	115
2.3.1. Cartographie multi-échelle de l'occupation et de l'utilisation des sols	115
2.3.2. Identification et analyse des changements d'occupation et d'utilisation des sols	121
2.3.3. Examen des changements d'occupation et d'utilisation des sols par corrélations multicritères	126
2.3.4. Modélisations spatiales et simulations des dynamiques paysagères	132
Conclusion	140

Chapitre 3 : L'évolution du couvert végétal de la fenêtre lacustre camerounaise du lac Tchad et de son arrière-pays (2000-2018)	143
Introduction	143
3.1. Cartographie des principales classes de végétation	145
3.1.1. Analyses en composantes principales des images MODIS MOD13Q1	146
3.1.2. Fusion des Composantes Principales : Cartographie des principales classes de végétation	163
3.2. Les changements observés dans la répartition du couvert végétal entre 2000 et 2018	169
3.2.1. Analyses des cycles végétatifs annuels et saisonniers des classes de végétation	169
3.2.2. Les tendances d'évolution du couvert végétal entre 2000 et 2018	172
3.3. Influences des facteurs géographiques sur l'évolution du couvert végétal	175
3.3.1. Influences des paramètres climatiques	176
3.3.2. Influences des sols et de la répartition des essences végétales	187
Résumé de l'analyse du couvert végétal	213
Chapitre 4 : Dynamiques spatiales d'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols de la fenêtre lacustre camerounaise du lac Tchad et de son arrière-pays (1973-2018)	215
Introduction	215
4.1. Analyse multi-échelle, multi-capteurs et multi-temporelle de l'occupation et de l'utilisation des sols des rives camerounaises du lac Tchad et de leur arrière-pays entre 1973 et 2018	217
4.1.1. Les étapes de prétraitements et de classifications de nos images multi spectrales	219
4.1.2. Cartographie multi-temporelle et multi-capteur de l'occupation des sols des rives camerounaises du lac TCHAD et de leur arrière-pays entre 1973 et 2018	223
4.1.3. Cartographie multi-temporelle et multi-capteur de l'utilisation des sols des rives camerounaises du lac TCHAD et de leur arrière-pays entre 1984 et 2018	238
4.2. Influence des facteurs géographiques sur l'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols	264
4.2.1. Occupation et utilisation des sols aux berges des fleuves et analyses des dynamiques spatio-temporelles entre 1973 et 2018	265
4.2.2. Occupation et utilisation des sols dans l'arrière-pays sableux et analyses des dynamiques spatio-temporelles entre 1973 et 2018	267
4.2.3. Occupation et utilisation des sols dans l'arrière-pays argileux et analyses des dynamiques spatio-temporelles entre 1973 et 2018	270
Synthèse des dynamiques spatiales d'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols	274
Chapitre 5 : Modèles de structurations paysagères et de simulation des dynamiques territoriales	277
Introduction	277

5.1. Modélisation de la structuration paysagère	279
5.1.1. Les facteurs géographiques de la structure du paysage	279
5.1.2. Méthodologie de modélisation de la structure paysagère du territoire d'étude	284
5.1.3. Les structures paysagères mises en évidence	286
5.1.4. Répartition spatiales des principales unités paysagères	293
5.2. Simulation prospective de la structure paysagère	298
5.2.1. Méthodologie de simulation	298
5.2.2. Cartographies des unités paysagères en 2025, 2030 et 2035	300
5.2.3. Validation du modèle de simulation	302
Résumé de la modélisation du paysage	305
Conclusions et perspectives	307
Références Bibliographiques	319
Listes des figures	341
Liste des tableaux	351
ANNEXES	353

Introduction générale

- Contexte et problématiques

Les enjeux de connaissances de l'espace géographique dans lequel nous vivons sont aujourd'hui orientés vers la compréhension de l'état actuel et de l'évolution de l'environnement pour appréhender avec le moins d'incertitudes possibles l'avenir. La connaissance de l'environnement conditionne de plus en plus les raisonnements, les décisions, et les activités humaines dans un contexte à présent marqué par une pression démographique croissante, la disponibilité et l'évolution des modes d'utilisation des ressources naturelles, et les changements climatiques. Dans ce contexte, le besoin de représentation des portions géographiques du monde pour avoir une appréhension de leur état et de leur évolution prend des proportions très importantes. Ceci est particulièrement vrai pour les régions du monde où la disponibilité des ressources agricoles, pastorales, hydriques, et alimentaires est capitale pour l'existence des populations.

Dans cette représentation, les régions arides et semi-arides du globe en raison de leurs fortes réceptivités aux variations les plus sensibles du climat sont très étudiées (Sircoulon, 1976; Tucker et al., 1985; Nicholson et Lare, 1990; Lebel, Diedhiou, et Laurent, 2003; Sultan et Janicot, 2003; Ali et Lebel, 2009; Panthou, Vischel, et Lebel, 2014; Sanogo et al., 2015; Descroix et al., 2016; Vischel et al., 2015). Les ressources végétales, et les eaux de surfaces ou souterraines, sont les principaux éléments de l'environnement qui peuvent laisser dans ces régions transparaître de saisissants changements suites aux moindres variations du climat. En effet, le couvert végétal s'amenuise et les eaux de surfaces s'achèssent rapidement lorsque les conditions climatiques deviennent arides, et le reverdissement des surfaces est aussitôt observé avec le retour des conditions humides. Les impacts de ces variations sont immédiatement perceptibles sur les nombreux services éco systémiques rendus par ces ressources.

C'est ce qui s'est produit dans la bande sahéenne en Afrique lors de la longue période de déficit pluviométrique enregistrée entre le début de la décennie 1970 et le début des années 1990. En effet, cette période marque un tournant décisif dans l'étude du milieu sahéen en raison des sécheresses qui y sévissent. Leur intensité particulière viendra d'ailleurs, renforcer l'hypothèse qui soutient la progression rapide et irréversible du désert du Sahara vers ses marges sud. Les conséquences qui en découlent causent les migrations des populations, la disparition des cheptels, la famine, les conflits liés au contrôle et à l'exploitation des ressources.

Le lac Tchad, ressource partagée par quatre pays (Cameroun, Niger, Nigeria, Tchad), et situé au milieu de la bande sahéenne où il représente l'un des rares milieux humides au

cœur de cette région aride et semi-aride, n'échappe pas à ce scénario. Le lac et ses écosystèmes associés qui pourtant procurent de l'eau et un moyen de subsistance à plusieurs millions de personnes, dont la majorité vit de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche vont en effet voir la surface en eaux libres se rétrécir brutalement suite aux sécheresses du début de la décennie 1970. Cet ensemble constitué d'étendue d'eau douce libre permanente peu profonde et endoréique, de marécages, et de végétations dont l'aspect et la superficie sont très sensibles aux variations du niveau de l'eau et aux variabilités climatiques, va au même moment connaître d'importants flux des populations venues chercher en ces lieux les ressources nécessaires pour faire face aux sécheresses. Ce déplacement va une fois de plus renforcer le rôle joué par le lac depuis des siècles comme carrefour d'échanges économiques et culturels entre les populations du nord et celles du sud du Sahara constituées par un peuplement humain hétérogène (Réounodji et al., 2014).

La forte médiatisation des impacts des grandes sécheresses sahéliennes déclenche un intérêt sans précédent de la communauté scientifique pour l'étude de ces milieux, et l'apparition des images satellitaires dans le début des années 1970, va apporter des opportunités incroyables en termes de méthodologie et d'objets d'analyse, mais également en termes d'échelles d'analyses spatiales et temporelles. L'exploitation de ces nouvelles données notamment pour l'étude diachronique du couvert végétal à l'échelle sahélienne montre par exemple que contrairement aux idées reçues, une amélioration de la couverture végétale à partir des années 1990 va se produire au Sahel. Ces résultats basés dans un premier temps sur les images NOAA (1981) ont ensuite été confirmés avec l'exploitation des images MODIS au début des années 2000 et renforcés à mesure que la profondeur temporelle va prendre de l'importance.

L'amélioration de la végétation qui est observée sur l'ensemble du Sahel est consécutive à l'apparition des années pluvieuses en 1994 et 1999 et qui semblent marquer la fin de cette longue période de déficit pluviométrique (P. Ozer et al., 2003). Sauf que ces années pluvieuses n'interviennent pas aux mêmes moments entre le Sahel central et celui de l'ouest, ce qui va entretenir les divergences au sujet de la fin de la sécheresse (Descroix et al., 2016). Les études de suivi de l'évolution des écosystèmes aux échelles locales sont alors menées pour répondre à cette divergence, et les régions du Ferlo au Sénégal, du Gourma au Mali, du Nakanbé au Burkina Faso ou du Faraka au Niger sont étudiées (Diello et al., 2005; Dardel et al., 2014). Certaines confirment la tendance générale du reverdissement, et d'autres étudient ailleurs à des tendances d'évolution en contradiction avec l'observation générale, en révélant plutôt une dégradation continue du couvert végétal. De pareilles études qui questionnent l'influence des paramètres locaux sur le dynamisme végétatif utilisé en région sahélienne comme un marqueur important de la variabilité de l'espace, ne sont pas menées sur le lac Tchad et ses écosystèmes associés (qui pourtant représentent un environnement particulier dans la région sahélienne) pour situer ces espaces dans la mouvance générale au Sahel.

Dans cette thèse il va donc être question d'étudier et d'analyser l'évolution des écosystèmes de l'ensemble formé par le lac Tchad et son arrière-pays dans le contexte des variabilités des conditions climatiques observées au cours des dernières années au Sahel, et au regard du rôle important qu'ils occupent dans la sécurité alimentaire d'un arrière-pays peuplé d'au moins 13 millions d'âmes. Pour cela, l'étude va se focaliser sur l'espace lacustre camerounais et son arrière-pays associé.

Cette recherche doctorale s'inscrit dans un contexte où l'enjeu lié à la caractérisation des dynamiques paysagères attachées aux transformations des surfaces lacustres et des terres émergées de l'arrière-pays notamment en termes de consommation de terres agricoles, de pâturages, de déforestation ou d'étalement urbain, est de répondre aux besoins d'exploitation des espaces valorisables. Les besoins de diversification des activités productives, de contrôle de l'exploitation des ressources naturelles et de gestion durable des espaces viables deviennent plus qu'importants à cause des changements climatiques et de la pression démographique croissante.

Par ailleurs, les modifications écologiques et les adaptations anthropiques, provoquées par les fluctuations climatiques dans la région, soulignent la nécessité de l'analyse des interactions entre les facteurs du milieu biophysique et les facteurs socioéconomiques, pour évaluer l'ampleur des dynamiques paysagères et des conséquences qui en découlent, dans ce milieu fragile, où l'exposition des écosystèmes aux aléas climatiques a atteint un seuil critique lors des grandes sécheresses. Dès lors il est important de définir les indicateurs liés aux facteurs qui interagissent et d'appréhender l'évolution des processus morpho dynamiques en cours. Cela implique la caractérisation de la dynamique de l'occupation du sol, par l'analyse des indicateurs d'état et de changements, dont les premiers renseignent sur la situation et individualisent les zones à risque, tandis que les seconds servent au suivi de l'évolution des dynamiques en cours. De fait, les corrélations entre les modifications écologiques, les fluctuations climatiques, et le rôle ou la place des activités anthropiques sont à examiner grâce à l'exploitation en mode diachronique des données climatiques, démographiques et de télédétection.

La télédétection spatiale offre justement la possibilité de cartographier fréquemment de vastes espaces, grâce aux acquisitions satellitaires à base desquelles il est possible de produire des cartes d'occupation et de changements d'occupation de surfaces terrestres. L'utilisation de ces données est pleine de perspectives mais questionne sur le choix adéquat des données à fournir en entrée du système de classification et sur les méthodes d'analyses. Le second enjeu de cette étude est par conséquent relatif aux données utilisées, et pose d'une part la question du choix judicieux des données images à utiliser et d'autre part l'approche méthodologique adéquate permettant de caractériser le milieu.

Si les images satellitaires de hautes et très hautes résolutions se prêtent parfaitement à ce type d'étude du fait de leur résolution spatiale, celles de faibles résolutions spatiales, produites à l'échelle globale à base de pixel dont la taille est de l'ordre du mètre ou du kilomètre s'y prêtent moins car peu précises. En effet, plus la taille du pixel est importante,

plus il contient d'objet dont les caractéristiques spectrales peuvent être différentes. La généralisation entraînée par ce regroupement d'objet aux réponses spectrales variables réduit ainsi la précision des pixels. Ceci rend l'exploitation d'images de faibles résolutions spatiales et leur intégration aux échelles locales difficiles, pourtant elles sont importantes pour suivre les évolutions des dynamiques spatiales à ces échelles. Le défi consiste alors, ainsi d'une part à l'identification d'indicateurs et de données pertinentes à mobiliser lorsqu'elles existent, à produire le cas échéant et d'autre part à combiner les données de résolutions spatiales, spectrales et temporelles différentes alors que le compromis entre approche locale et globale reste d'actualité. Le but est non seulement d'établir un diagnostic complet des indicateurs en actions qui influent sur la dynamique de l'occupation du sol, mais également la production de modèle suffisamment fidèle pour reproduire les évolutions en tenant compte de la manière la plus réaliste possible des différents processus biophysiques et anthropiques en cours.

- Objets et Objectifs

L'objectif de cette thèse est dès lors d'étudier la structure du paysage dans la fenêtre lacustre camerounaise du lac Tchad et son arrière-pays par une nouvelle approche intégrée d'analyse spatiale basée sur les traitements et les analyses d'images satellitaires optiques. L'une des dimensions de cette approche est multi-scalaire dans la mesure où nous établissons la cartographie des écosystèmes de ces espaces à plusieurs échelles en fonction des principales classes d'occupation présentes. L'autre dimension cette fois multi-niveau, nous permet d'une part d'analyser les dynamiques spatiales qui y ont lieu en fonction des paramètres environnementaux et d'autre part de délimiter les grands ensembles paysagers. En fin, la dimension multi-temporelle favorise le suivi diachronique des évolutions spatiales et temporelles des classes d'occupation et des ensembles cartographiés. Cet objectif qui inclut la détermination de l'importance de la couverture végétale comme indicateur locale de la santé des écosystèmes, est étudié par le développement de méthodes qui combinent des modèles statistiques aux modèles d'intelligence artificielle pour la caractérisation morpho structurale des grands ensembles paysagers présents.

De ces objectifs découlent trois hypothèses :

❖ Dans l'ensemble formé par le lac Tchad et de son arrière-pays, la végétation reste probablement l'élément fondamental à suivre pour étudier ce milieu et le situer dans le contexte des tendances environnementales générales au Sahel.

En effet, l'état des lieux de l'étude des milieux arides sahéliens sur le long terme fait ressortir les variabilités importantes que le climat de cette région a connu depuis les

années 1950 et qui se départissent entre périodes humides, de sécheresses et d'amélioration de la pluviométrie. Par ailleurs, l'importance majeure de l'évolution de la pluviométrie dans la caractérisation du climat de la région a suffisamment été démontrée, et la relation déterminante entre ce paramètre et l'évolution du couvert végétal a également été abondamment soulignée comme l'une des particularités de cet environnement. Seulement, la différence constatée dans l'évolution climatique et environnementale entre le Sahel central et celui de l'ouest va attirer l'attention sur deux points essentiels concernant la relation entre pluie et végétation : celui de l'échelle d'analyser pour distinguer les évolutions régionales sur l'ensemble du Sahel, et les évolutions locales ; et celui de la pertinence du couvert végétal comme paramètre environnemental déterminant à analyser. Dans ce contexte, au niveau du lac Tchad et de ses écosystèmes associés, en plus de l'évolution du couvert végétal liée à la pluviométrie, les variations des niveaux d'eaux du lac Tchad vont entraîner d'autres types d'évolution sur la végétation notamment dans la partie lacustre. Cette hypothèse permet alors de questionner la convenance de la végétation comme principal indicateur de la santé de l'environnement local comme c'est le cas dans les autres régions sahéliennes. Nous procéderons par la cartographie de l'occupation des sols et l'analyse des tendances d'évolution de la couverture végétale pour y répondre.

❖ Les pressions humaines observées sur le lac Tchad et ses rives à la suite des grandes sécheresses sahéliennes ont accrue les processus d'anthropisation aussi bien dans la partie lacustre que dans les espaces de l'arrière-pays.

Les sécheresses sahéliennes des années 1970 ont entraîné d'importants changements au niveau du Sahel à travers l'aridification du climat et de l'environnement, ce qui a fortement perturbé la disponibilité des ressources et leur usage. Les surfaces en eaux libres du lac se sont rétrécies pendant cette période libérant de vastes espaces fertiles, propices aux différentes activités agro pastorales. La littérature a démontré les différentes formes de pressions exercées sur les nouveaux espaces libérés par le retrait des eaux à travers les modes d'adaptations liés aux multi usages de l'espace, à la mobilité humaine et à la multi activité des personnes dans le lac et ses rives. Mais ces travaux n'abordent cette question que dans la partie lacustre et l'arrière-pays notamment dans sa partie camerounaise n'a pas du tout été étudié sous cet angle. Pourtant la pression démographique que les espaces lacustres ont connue à la suite des sécheresses s'est probablement aussi opérée dans l'arrière-pays. Cette hypothèse pose alors la question de la mise en évidence de l'influence des activités humaines et des processus d'anthropisation qui se sont mis en place suite aux sécheresses, sur l'évolution de ces écosystèmes. Elle permet également de questionner aux échelles locales les rôles joués par les facteurs environnementaux locaux dans l'évolution et la disponibilité de la couverture végétale.

❖ Les images satellites qui permettent la visualisation et la cartographie des grandes surfaces, contiennent des informations synoptiques sur les éléments constitutifs de

l'environnement, et peuvent être envisagées pour l'analyse spatio-temporelle et multi-échelle des paysages de notre zone d'étude.

En raison de sa capacité à disposer de données d'observations régulières et holistiques, la télédétection offre un potentiel avéré pour l'étude des phénomènes de surface (Caloz et Collet, 2001; Escadafal, 2012). Les méthodologies de traitements d'images ont évolué aussi bien que les objectifs d'utilisation de ces données à tel point que la télédétection se prête aujourd'hui aussi bien aux simples calcul d'indice permettant de mettre en évidence une composante du milieu, qu'à l'utilisation de méthodes de modélisation spatiale par intelligence artificielle pour analyser le milieu comme un système dynamique avec ses interrelations. Les processus d'anthropisation observés dans l'arrière-pays camerounais du lac Tchad vont à cet effet être mis en évidence aux moyens des outils de télédétection. Nous faisons pour cela l'hypothèse que les images satellites au-delà de permettre la visualisation et la cartographie des surfaces, contiennent des informations synoptiques sur les éléments constitutifs déterminants qui modèlent notre région d'étude et sont importantes dans la spatialisation de l'occupation des éléments de surface. Lesdits éléments concernent les facteurs humains relatifs à la mise en culture des terres agricoles, à l'exploitation des parcours, aux différentes formes d'utilisation des sols, et regroupent également les facteurs environnementaux liés à la température des sols, à la topographie des sols, aux précipitations, à la texture des sols au réseau hydrographique et à la couverture végétale. Ainsi, nous partons du principe que toutes ces informations contenues dans les images satellites peuvent être mise en évidence sous forme d'indicateurs suffisamment descriptifs de la structuration des paysages et de leur utilisation.

Ce manuscrit s'organise en cinq chapitres (figure 1).

Après la présentation des objectifs et de la problématique générale de la thèse, le premier chapitre porte sur le cadre thématique général et conceptuel de cette thèse. Les éléments nécessaires à la compréhension du contexte environnemental sahélien en général et du contexte socio-économique et sécuritaire du lac Tchad et de son environnement immédiat en particulier y sont explicités. Il s'agit entre autres des caractéristiques climatiques (températures et précipitations), des composantes physiques du milieu (pédologie et phytogéographie) et des modes de mise en valeur des ressources (agriculture, pêche et élevage).

Le chapitre deux commence par une lecture critique à travers le temps de l'utilisation de la télédétection pour l'étude des milieux arides sahéliens. On s'intéresse à l'évolution des objectifs et des méthodes d'utilisation de la télédétection dans l'étude de ces milieux et leurs apports dans la production de connaissances et la compréhension des phénomènes environnementaux caractéristiques de ces régions, à l'exemple des sécheresses, de la désertification, des inondations, de la dégradation des sols, etc. Ensuite, c'est toute la structure méthodologique de cette thèse qui y est détaillée, de la description et du choix des données utilisées, à la démarche méthodologique de traitement des images : cartographie de l'occupation et de l'utilisation des sols ; détection des changements ; identification des facteurs de changements ; modélisation de la structuration paysagère.

Le chapitre trois, porte sur l'évolution spatio-temporelle du couvert végétal du territoire d'étude entre 2000 et 2018. Les séries temporelles d'images MODIS MOD13Q1 sont utilisées pour cartographier les principales classes de végétation et analyser les tendances d'évolution de la couverture végétale entre 2000 et 2018. Les corrélations spatiales et statistiques entre l'indice de végétation et les facteurs environnementaux (pluviométrie, géomorphologie, etc.) permettent ensuite d'identifier les facteurs géographiques qui influencent les dynamiques du couvert végétal dans ce milieu.

Dans le chapitre quatre il est question d'étudier les dynamiques spatiales d'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols de la zone d'étude entre 1973 et 2018. Les images multi spectrales de la série Landsat, sont combinées aux images multi spectrales Sentinel-2 et SPOT 6 pour cartographier l'occupation des surfaces de sols et leurs modes de valorisation (agricoles et pastorales). Les analyses des dynamiques d'évolution des classes d'occupation et d'utilisation des sols permettent ensuite d'identifier les facteurs géographiques importants d'occupation et d'utilisation dans ce milieu.

Enfin, au chapitre cinq il est question d'implémenter une nouvelle approche intégrée qui combine les modèles d'intelligence artificielle et les modèles d'analyses statistiques pour la délimitation et l'évaluation fonctionnelle des grands ensembles paysagers en région aride. Dans ce chapitre il est également analysé les interrelations spatio-temporelles entre les ensembles paysagers identifiés. La simulation des changements futurs viennent clore de chapitre.

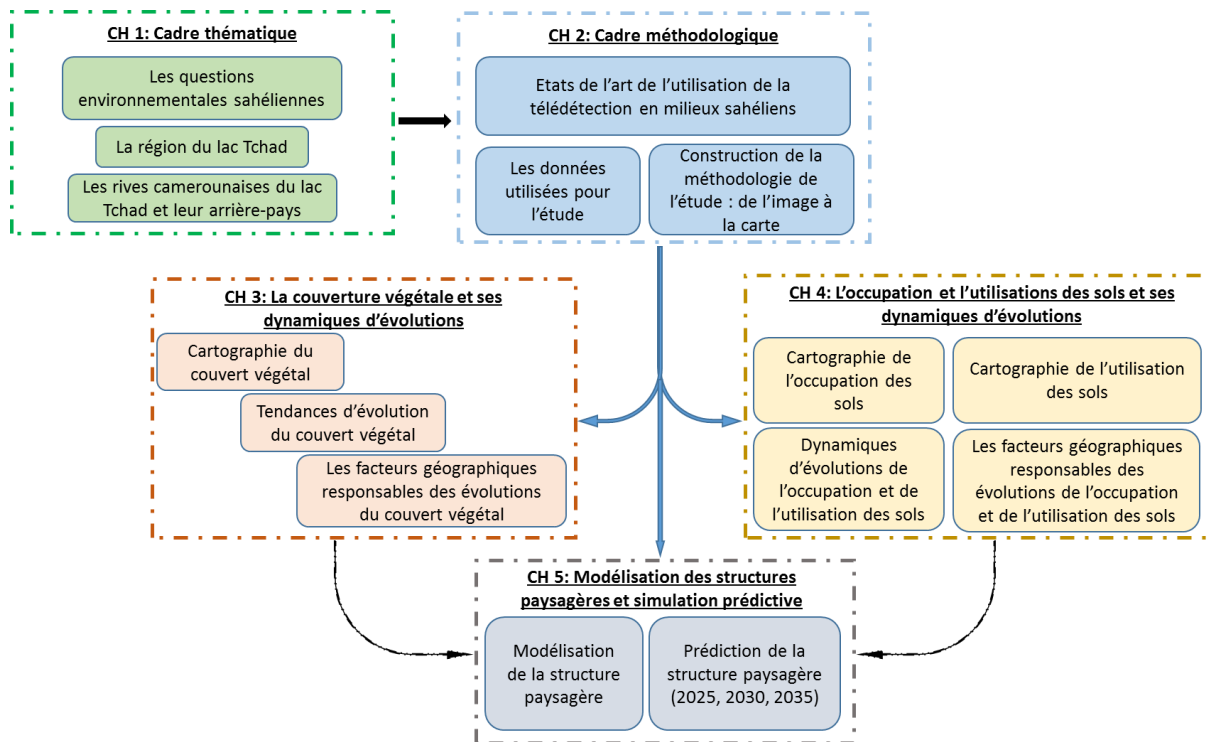


Figure 1 : Organisation générale du manuscrit.

Chapitre 1 : Les enjeux de connaissances

Introduction

Ce chapitre est consacré à une analyse approfondie et détaillée du cadre thématique générale et conceptuel de cette thèse. Nous situons notre travail de recherche dans le contexte environnemental sahélien en général, socio-économique et sécuritaire du lac Tchad et de son environnement immédiat en particulier. L'évolution climatique au Sahel est retracée, ses conséquences sur les écosystèmes précisées, et son impact sur l'usage des ressources rappelé. L'intérêt d'étudier à l'échelle locale les dynamiques des écosystèmes sahéliens en s'intéressant aux espaces humides et émergés de la partie camerounaise du lac Tchad et leur arrière-pays est enfin présenté. Il s'agit d'évaluer à quel point ce territoire peut être représentatif du lac Tchad dans son ensemble et servir à la compréhension des processus environnementaux qui y ont lieu.

Les critères ayant conduit au choix de ce site pour mener cette étude sont ensuite explicités, à savoir les critères : environnementaux ; anthropiques ; et de mise en exploitation des ressources naturelles. En fin, à travers une analyse sélective des composantes principales du milieu (climat, phytogéographie, pédologie, exploitation de l'espace, sécuritaire), les éléments naturels et anthropiques caractéristiques de ce territoire sont alors inventoriés dans le but de présenter et mieux connaître notre espace d'étude. Cet espace occupe une superficie d'environ 475 000 hectares, couvrant la partie lacustre camerounaise du lac et son arrière-pays.

1.1. Les questions environnementales des milieux arides sahéliens

Dans ce travail le Sahel ou bande Sahélienne correspond à la région qui traverse le continent Africain d'Est en Ouest entre les 12 et 20 degré de latitude Nord (figure 2). Cette région se caractérise par une seule saison des pluies qui atteint son maximum en août, et dont la quantité est fonction de trois processus déterminants : le flux d'air humide de la mousson en provenance du Sud du continent ; le déplacement du Front Inter Tropical (FIT) lié aux mouvements saisonniers de la Zone de Convergence Inter Tropicale (ZCIT), et le déplacement des masses d'aires sèches en provenance des zones sèches du désert du Sahara (Met Office, 2010). La partie centrale du Sahel couvre selon des proportions et des localisations variables les pays du Cameroun, du Nigéria du Tchad et de l'est Nigérien. Le Sahel de l'ouest s'étend de l'ouest du Niger au Sénégal en passant par le Burkina, le Mali et la Mauritanie.

La bande du Sahel également caractérisée par un fort gradient de pluies et de températures est l'une des régions du monde les plus sensibles aux changements du climat (Niasse, Afouda, et Amani, 2004). L'impact souvent désastreux des variabilités des conditions du climat sur ses écosystèmes et leurs conséquences sur le mode de vie des populations de la région au cours des cinquantes dernières années en est une parfaite illustration. A partir du début des années 1970, la région est en effet soumise à des variations chroniques importantes de son climat et qui vont durer sur plusieurs décennies.



Figure 2 : Localisation du Sahel. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université ; source : Open Street Map, fond de carte Google Earth.

Pendant ces décennies les problèmes environnementaux consécutifs à ces changements, et auxquels les écosystèmes sahéliens vont être confrontés sont les nombreuses sécheresses, la désertification, l'avancée du front agricole et la perturbation des régimes des cours d'eau principaux de la région (Marega, 2016). L'expansion des activités humaines comme moyen d'adaptation à l'accroissement de la démographie et aux changements du climat accentuent les effets des conditions climatiques et biogéographiques déjà défavorables.

1.1.1. Le contexte climatique au sahel

Compte tenu de son caractère important et de son implication directe dans les interactions entre les Hommes et leur environnement particulièrement dans ce milieu, le climat exige que l'on s'y intéresse sérieusement (Vischel et al., 2015). Non dans le but de refaire toute l'histoire du climat sahélien, mais davantage dans le souci de souligner ses particularités en termes de variabilités temporelles et spatiales dans le contexte de son évolution récente à partir des années 1950. Dans l'histoire contemporaine du Sahel les années 1950 correspondent aux dernières périodes humides. A l'échelle régional le climat sahélien qui marque la transition entre celui du Sahara au nord (isohyète 200 mm) et celui des régions tropicales humides au sud (isohyète 700 mm), est très vulnérable à la variabilité naturelle (Met Office, 2010) et marqué par de fortes disparités spatiales et temporelles (Hiernaux et Houérou, 2006; C. Dardel et al., 2014). Plusieurs études dédiées à l'analyse de climat au Sahel ont pu mettre en lumière les différences de variabilités inter annuelles entre le centre du Sahel et l'ouest, en s'appuyant particulièrement sur les évolutions des précipitations.

Au niveau de la zone intertropicale (où se trouve le Sahel), l'apport en énergie solaire qui conditionne la circulation générale de l'air à l'intérieure de l'atmosphère est maximal. Cette circulation est à l'origine de variations des éléments atmosphériques tels que la température, le vent, l'humidité relative, les précipitations etc., qui en retour détermineront le climat à l'échelle régionale. En ces lieux, la convergence entre les masses d'air alizés sèches du nord-est africain et les masses d'air humides du sud-ouest, va contribuer avec l'antagonisme dynamique et thermique entre l'anticyclone des Açores au nord-ouest et l'anticyclone austral humide de Sainte Hélène, à former autour de la frange sahélienne un flux convergent appelé Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) ou équateur météorologique. Le front intertropical (FIT), qui correspond à la trace au sol de la ZCIT, définit une aire de basses pressions repérable par une bande de nuages convectifs à fort développement vertical (les nuages cumulonimbus). La position de la ZCIT varie très sensiblement au cours de l'année et son activité n'est ni continue ni régulière en étendue ou en intensité. Le déplacement latitudinale du FIT détermine les saisons. La durée de celle des pluies par exemple est d'autant plus tardive et brève que l'on s'éloigne de l'équateur en direction du nord du sahel.

En Janvier, le FIT atteint sa position la plus méridionale (figure 3) et se situe en moyenne à 4° de latitude nord. Cette position induit le prolongement saharien de

l'anticyclone des Açores et favorise l'installation des masses d'air tropicales stables, chaudes et sèches dont les vents sont dominés par les alizés continentaux d'Est encore appelés harmattan (Seignobos et Iyébi-Mandjek, 2000). A cette période, le FIT est situé bien loin au sud du lac, l'harmattan règne au Sahel, les températures sont élevées, les précipitations sont nuls, l'ensoleillement est fort : c'est la saison sèche absolue. Entre Janvier et Août, le FIT commence à remonter progressivement vers le nord, son passage signal la rentrée de la saison des pluies. Il atteint sa position la plus septentrionale en Juillet et août, à la latitude moyenne de 18°30' nord, dessinant les frontières de la mousson au-dessus de l'Afrique sahélienne (Zairi, 2008). Cette remontée installe la saison des pluies, puisqu'elle est synonyme de retour des masses d'air instables et humides dont les origines se trouvent dans l'anticyclone de Saint-Hélène (Seignobos et Iyébi-Mandjek, 2000). En août, le FIT qui a amplement pénétré à l'intérieur du continent rétrograde rapidement vers le sud et la saison sèche s'installe de nouveau à la fin du mois de Septembre.

Dans le sahel central où se trouve le lac Tchad, Lebel, Diedhiou, et Laurent, (2003) tout comme Sultan et Janicot, (2003), distinguent, cinq phases dans le cycle saisonnier des précipitations : une augmentation progressive des précipitations de début Avril à fin Mai ; une stabilité des pluies au mois de Juin ; une augmentation rapide des cumuls en fin Juin ; une augmentation régulière des précipitations jusqu'au maximum en Août ; et une diminution régulière des pluies jusqu'à fin Octobre suite au retrait de la mousson.

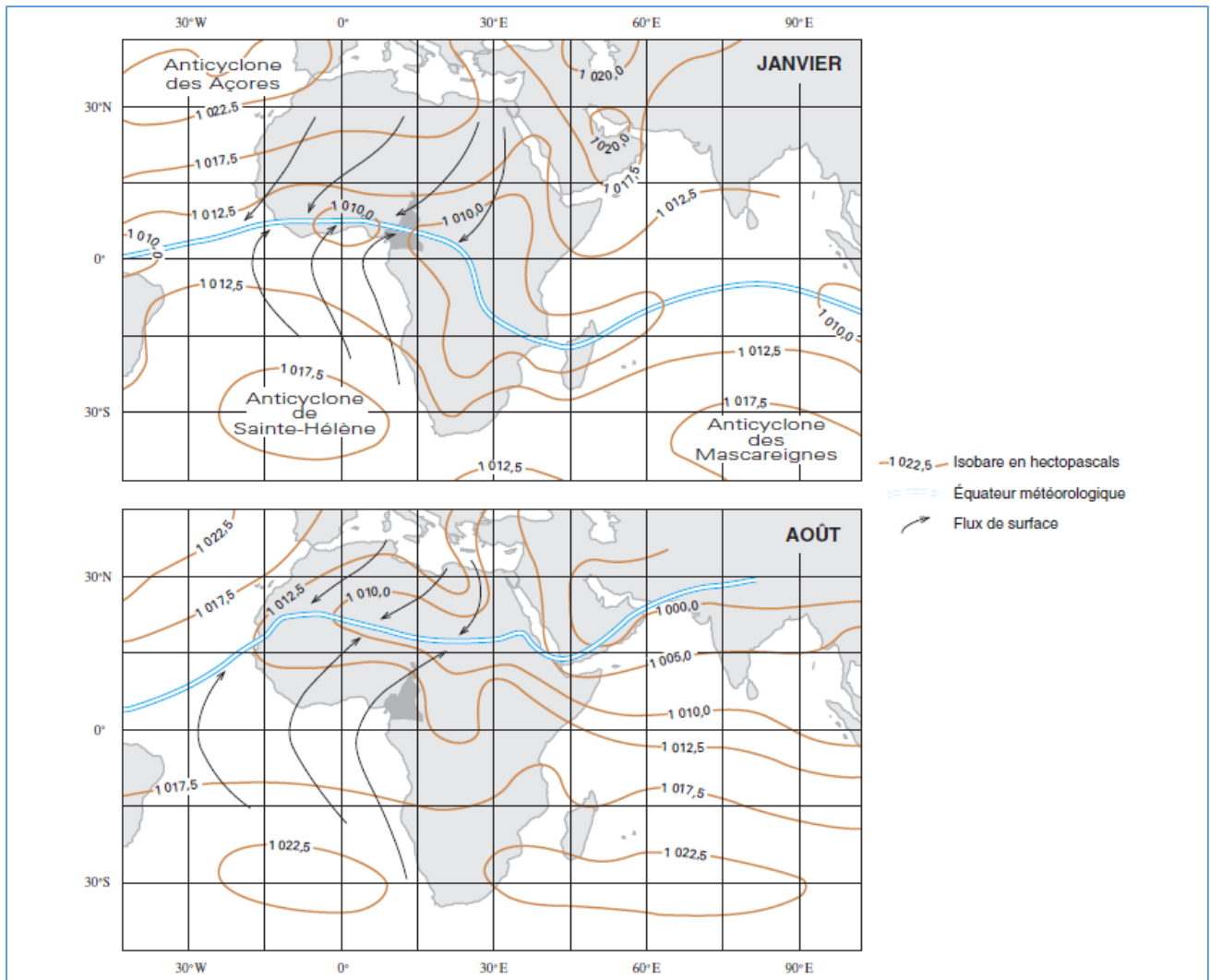


Figure 3 : Déplacement de l'équateur méridional (sources : (Seignobos et Iyébi-Mandjek 2000).

a. L'évolution du climat sahélien à travers la pluviométrie

L'intérêt pour l'étude du climat au Sahel s'accroît lorsque les sécheresses débutées dans les années 1970 amorcent une longue période de déficit pluviométrique. Le gradient climatique va alors traduire une accentuation vers l'aridité à travers la diminution des précipitations, l'augmentation des températures et de l'évaporation, accompagnée d'une baisse importante de l'humidité de l'air. Parmi les trois paramètres d'importance relative qui servent à définir le climat (la pluviométrie, la température et le vent), les pluies sont au Sahel la variable la plus déterminante et la plus utilisée pour analyser et caractériser l'évolution climatique. Si leur déficit affecte directement la production agricole encore fortement dépendante des ressources en eau, leur excès également peut réduire les rendements agricoles par l'inondation des champs ou exposer les populations aux événements hydrologiques dommageables. Elles sont régulées par la mousson dont les déplacements sont conditionnés par des phénomènes environnementaux globaux (Hiernaux et Houérou, 2006). La saison sèche longue en moyenne de huit mois (d'Octobre

à Mai) alterne avec la courte saison de pluies qui dure quatre mois environ (entre Juin et Septembre).

L'analyse approfondie du régime des pluies au Sahel permet de recouper son histoire récente en trois périodes (figure 4). L'intervalle entre 1951 et 1968 est la dernière période excédentaire aussi longue observée. Elle est suivie par la longue période déficitaire dite des « grandes sécheresses » (Ickowicz et al., 2014), qui débute en 1970 et dont les points culminants sont observés en 1972/73 et en 1983/84 (Sircoulon, 1976; Albergel et Valentin, 1989). La troisième période observée au cours de la décennie 1990 par la présence des années pluvieuses de 1994 et 1999 (Panthou, Vischel, et Lebel, 2014; Sanogo et al., 2015) marque la fin des sécheresses et des grandes crises de famines qui les ont accompagnées. Même si en raison de la faible reprise des pluies dont les valeurs n'atteignent pas celles des années 1950-1970, la fin ou non des sécheresses sahéniennes ne fait pas l'unanimité (Descroix et al., 2016).

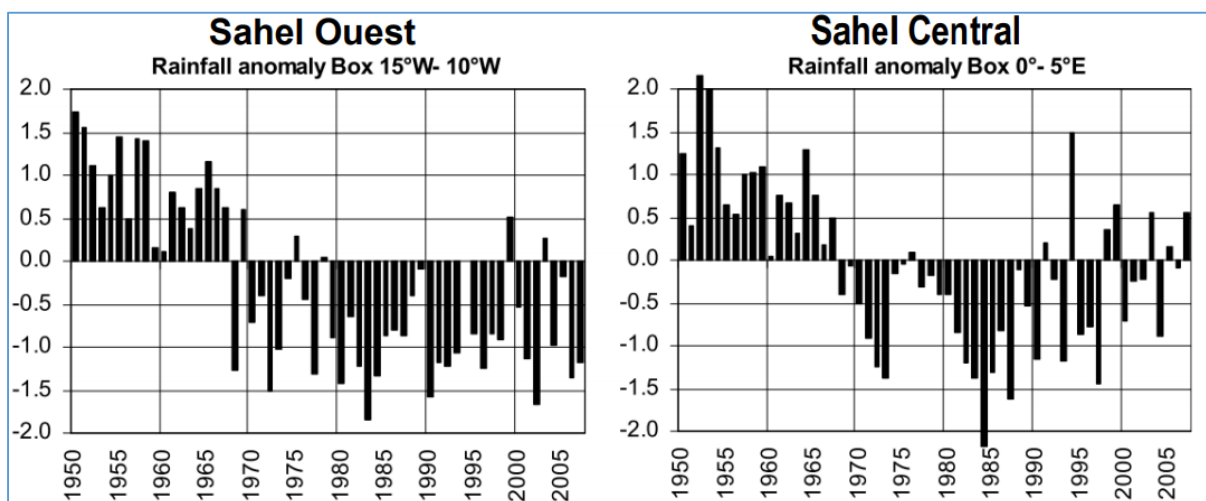


Figure 4 : Indice standardisé de précipitations calculé en référence à la période 1950-1989 sur le Sahel occidental et central (Source : Ali et Lebel, 2009).

Cependant, les connaissances approfondies sur l'évolution temporelle à long terme du régime des pluies montrent des dissemblances interannuelles et intra saisonnière entre le Sahel central et celui de l'ouest. En effet, le retour de la pluviométrie intervient à partir de 1993 au Sahel intérieur dans le bassin du Niger moyen, et un peu plus tard à partir de 1998 à l'ouest dans les régions littorales de l'Atlantique (Descroix et al., 2016; Ali et Lebel, 2009). Par ailleurs, en observant l'évolution du cycle des pluies au Sahel central pendant les trois intervalles correspondant aux périodes humides (1950-1969), aux périodes sèches (1970-1989) et aux périodes récentes (1990-2007), Vischel et al., (2015) observent ce qui suit : au cours de la période sèche la diminution des pluies est répartie de façon homogène sur l'ensemble de la saison des pluies et le maximum de pluies est bien inférieur à celui de la période humide et intervient 20 jours en avance ; la baisse des pluies au mois d'Août et le décalage du pic de la saison résultant des sécheresses

continuent d'être observés au cours de la période récente ; le cycle des pluies de la période récente est plus proche de celui de la période sèche que de celui de la période humide (figure 5).

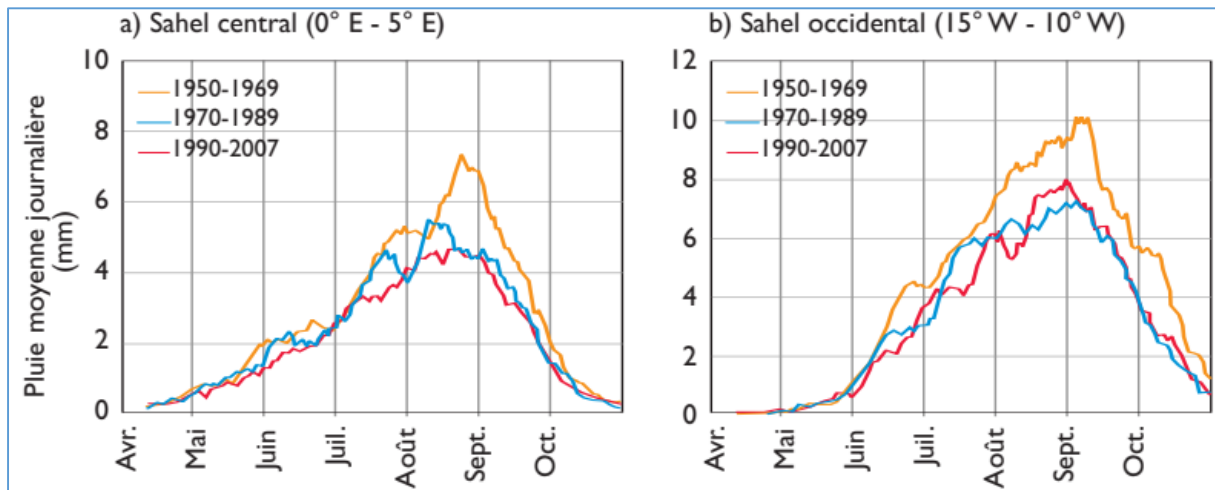


Figure 5 : Évolution décennale du signal saisonnier sur le Sahel central et occidental (source : (Vischel et al. 2015) D'après Ali et Lebel 2009).

Au moment où Ozer et al., (2003) affirment que les sécheresses ont arrêté de sévir vers le milieu des années 1990, L'Hôte et al., (2002) calculent l'indice standardisé des précipitations (SPI) à l'échelle du Sahel et constatent que celles-ci se prolongent de manière générale jusqu'à la fin des années 1990. Nicholson, en 2005 étend la période d'observation jusqu'en 2003 en utilisant les données du satellite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) et constate également une tendance à l'amélioration des précipitations mais sans pour autant omettre de souligner que la moyenne de celles-ci après les reprises est bien inférieure à celles de la période humide de 1950 à 1970. Ali et Lebel, (2009) vont se servir des relevés pluviométriques entre 1950 et 2007 d'un réseau de stations météorologiques au Sahel pour constater que la sécheresse a effectivement continué après 1994 et souligner également les différences de situation entre la partie centrale où ils observent une légère amélioration des quantités de pluies et la partie littorale du Sahel où la situation n'a presque pas changé depuis les grandes sécheresses. Plus récemment, Panthou, Vischel, et Lebel, (2014) analysent sur soixante années (de 1950 à 2010) les cumuls annuels de précipitations et les maxima journaliers en calculant l'indice standardisé des précipitations (SPI) et leurs résultats confirment les tendances observées par Ali et Lebel, (2009). Les divergences de constatations sur les reprises des pluies au Sahel sont liées aux particularités des lieux étudiés, l'étendue de la période d'observation mais également aux types de données utilisées.

b. La prise en compte de la végétation dans l'étude des milieux sahéliens

Au-delà des précipitations, la nécessaire intégration sur un plan écologique beaucoup plus large, de nouvelles composantes environnementales à des échelles de temps et

d'espaces différentes dans l'étude du Sahel émerge assez vite. Courel, (1984) analyse l'évolution des paysages végétaux des milieux sahéliens par imagerie satellitaire en utilisant les données Landsat MSS et Météosat. Tucker et al., (1985) tout comme Nicholson et Lare, (1990) s'intéressent à la cartographie et l'étude de l'évolution du couvert végétal au Sahel. Brabant, Simonneaux, et Egue, (1996) font une analyse temporelle de la dégradation des terres au Togo et Mazzucato, (2001) s'intéresse à la productivité des sols au Burkina Faso. Boulain et al., (2006), démontrent l'importance de la modélisation de la végétation avec les processus hydrologiques pour la compréhension du processus de déboisement des sols au Niger. Mahamane et al., (2007) analysent grâce aux photographies aériennes et aux images Landsat ETM, l'évolution de l'occupation du sol au Niger. Touré et al., (2010) questionne l'impact de l'homme dans l'évolution des écosystèmes sahéliens. Dans cette perspective, l'étude du découpage des paysages végétaux et l'analyse des couverts végétaux occupent donc très rapidement une place prépondérante.

En effet, la végétation sahélienne est fortement dominée par la strate herbacée, elle-même constituée essentiellement de graminées annuelles caractérisées par de fortes fluctuations interannuelles de leur composition floristique (Hiernaux et Houérou, 2006). Le tapis herbacé plus ou moins clairsemé que celle-ci constitue un cycle végétatif qui démarre et se termine avec la saison des pluies (Cissé, 2016). Cette structure végétative associe des ligneux disséminés de façon éparse dont certaines espèces sont également soumises à la dictature du climat (Ndong et al., 2016). Par ailleurs, l'organisation des paysages végétaux dans le milieu sahélien obéit à une distribution calquée sur la gradation pluviométrique dont la disposition est plus ou moins parallèle aux isohyètes (Hountondji, 2008). Nous sommes par conséquent dans un environnement où la répartition et la disponibilité des ressources végétales dont l'importance pour les besoins des populations est capitale, sont intimement liées à la quantité de précipitation et la présence des eaux de surfaces (Cornet et Rambal, 1981; Caroline Pierre et al., 2011). C'est la principale raison pour laquelle, les nombreuses recherches dédiées à l'étude de l'influence du climat sur la végétation au Sahel se sont focalisées à rechercher la relation parfois linéaire entre l'évolution de la pluviométrie et celle du couvert végétal (Cissé, 2016; Nicholson et Lare, 1990). Mais compte tenu de l'hétérogénéité des écosystèmes sous régionaux lié aux facteurs tels que les paramètres édaphiques, les techniques de conservation ou de mise en exploitation des sols aux échelles locales par les populations, il s'avère délicat d'établir une telle corrélation de façon générale (Helldén et Tottrup, 2008; Fensholt et al., 2013; Hoscilo et al., 2015; Huber, Fensholt, et Rasmussen, 2011; Rasmussen et al., 2014). C'est d'ailleurs à juste titre que Bégué et al., (2011) démontrent les limites des modèles simplistes de reproduction des phénomènes écologiques et géographiques basés sur les relations linéaires des analyses de tendance utilisant l'imagerie satellitaire et les relevés climatologiques.

Quoi qu'il en soit, la relation végétation/pluviométrie reste l'une des plus objectives et l'une des plus analysées pour l'étude du dynamisme environnementale au sahel. Puisque la disponibilité de l'eau peu importe son origine reste l'élément fondamental pour le

fonctionnement et la distribution spatiale de la végétation. C'est pourquoi avec l'apparition des images satellitaires dans les années 1970, les études menées à l'échelle du Sahel portent sur la mise en relation entre les variations pluviométriques observées et l'évolution de la disponibilité du couvert végétal à travers le calcul des indices de végétation (Nicholson et Lare, 1990; Pierre et al., 2016). C'est ainsi que la capacité de l'indice standardisé de végétation (NDVI) à détecter la présence, la densité et l'état de la végétation est exploitée par Eklundh et Olsson, (2003) qui constatent un reverdissement du Sahel entre 1982 et 2003 par l'augmentation spatiale de la couverture végétale. Les propriétés du NDVI sont également utilisées par Olsson, Eklundh, et Ardö, (2005) sur la période entre 1982 et 1999, par Tucker et Nicholson, (1999) sur l'intervalle 1980-1997, par Anyamba et Tucker, (2005) entre 1981 et 2003, et par Heumann et al., (2007) entre 1982 et 2005 et tous parviennent aux mêmes résultats relatifs au reverdissement du Sahel.

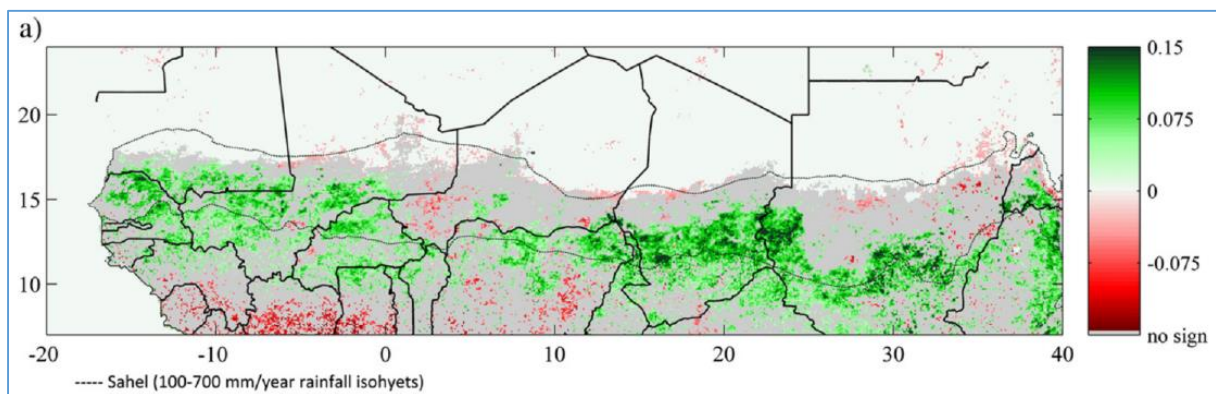


Figure 6 : Tendances temporelles du NDVI au Sahel entre Juillet et Octobre de 1981 à 2011. (Source : (Dardel et al., 2014)).

Seulement ces résultats ne suffisent pas à faire l'unanimité sur le reverdissement du Sahel et les notions d'échelle d'analyse et de résolution spatiale des images utilisées sont très vite évoquées. En effet, en comparant les valeurs mensuelles du NDVI et celles des précipitations entre 1982 et 2003 sur l'ensemble du Sahel, Herrmann, Anyamba, et Tucker, (2005) trouvent des corrélations positives qui confirment le reverdissement du Sahel, mais soulignent cependant que certaines portions du territoire sahélien produisent des tendances parfois en contradiction avec l'observation générale. Si Diello et al., (2005) trouvent une corrélation positive entre les indices de végétation et la pluviométrie dans le bassin du Nakanbé, Leroux et al., (2017) observent dans le sud-ouest du Niger une tendance négative du NDVI et constatent que la pluviométrie n'est pas la seule cause de la variation de la couverture végétale dans ce milieu. Dardel et al, (2014) comparent les tendances du couvert végétal entre la région du Gourma au Mali où ils observent une tendance positive entre 1984 et 2011 et la région du Faraka au Niger où les tendances sont plutôt négatives entre 1994 et 2011 (figure 6). L'étude des tendances du couvert

végétal dépend donc très fortement de la nature des données utilisées, de l'échelle d'analyse de l'effet de maille, et des résolutions spatiales et temporelles.

1.1.2. Mutations des écosystèmes sahéliens : les notions de désertification, de sécheresse et de dégradation des sols

L'intérêt de la recherche internationale et l'énorme production scientifique sur la santé des écosystèmes sahéliens prennent leur origine des catastrophes naturelles et des crises sociales et économiques qui frappent cet environnement à partir des années 1970. Les nombreuses crises qui éclatent à cette époque (grandes sécheresses, famines, guerres, etc.) finissent par en faire « un laboratoire d'expériences scientifiques » (Fall, 2014), et d'observation pour la recherche scientifique. Compte tenu du contexte environnemental et climatique de cette période, les travaux de recherche s'intéressent naturellement à la sécheresse due à la baisse des précipitations, et son impact possible sur la dégradation des sols et l'avancée du désert du Sahara vers ses marges sud.

C'est donc naturellement que les mutations observées de l'environnement vont interpeller sur les différents liens et les interactions entre les concepts de sécheresse, de dégradation des sols, et de désertification. D'autre part l'intérêt porté sur les niveaux de vulnérabilité, d'adaptation ou de résilience des populations locales faces aux différents changements observés va grandir. A partir de là, ces trois notions vont résumer pendant longtemps l'essentiel des préoccupations environnementales majeures au Sahel. Il nous paraît fondamental dans le cadre de cette étude d'approfondir la compréhension de ces trois notions et des concepts qui leur sont associés afin d'élucider leurs contenue.

a. La désertification

Le terme désertification est utilisé pour la première fois par Aubréville, (1949), qui l'emploi pour décrire les processus de changement de végétation à l'origine de sols dégradés et dénudés qu'il observe en Afrique tropicale. La définition de ce terme évolue ensuite en fonction des disciplines par les quelles il est appréhendé. L'agronome Dregne, (1986) décrit la désertification comme « *l'appauvrissement des écosystèmes terrestres sous l'impact de l'homme. C'est un processus de détérioration de ces écosystèmes qui peut être mesuré par la productivité des plantes désirables, l'altération de la biomasse et la diversité de la micro et la macrofaune et flore, accélérée par la détérioration des sols ; il accroît les risques pour l'occupation humaine* ». Pour le pédologue Rozanov, (1977) la désertification se conçoit comme « *un processus naturel ou anthropique d'un changement irréversible du sol et de la végétation des zones arides vers une aridisation et la diminution de la productivité biologique. Dans les cas extrêmes, ce processus peut mener jusqu'à une désintégration totale du potentiel biotique et la transformation du territoire en désert* ». Les divergences de positions sont fondées sur le caractère exclusivement naturel ou non du phénomène et sur le degré d'implication de l'humain. La convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (UNCCD), va fédérer ces différentes positions en proposant comme définition à la désertification « *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 » (UNCCD, 1996). Si la perception du phénomène est devenue difficile à circonscrire, c'est en raison du fait que les manifestations qui lui sont associées réunissent un ensemble de processus complexes relatifs à la détérioration de la qualité des sols, la déforestation, aux sécheresses et aux pratiques agropastorales.

Le Sahel où ces différentes transformations ont cours est donc longtemps considéré comme un environnement fortement exposé au phénomène de désertification. D'une part en raison de l'intensification progressive de transformations physiques et biologiques (Warren et Agnew, 1988; Mainguet, 1994) des environnements vulnérables qui y est observée résultant à l'apparition de signes de désert là où ils étaient jadis absents. L'autre raison est relative à la croissance démographique effective et prévue dans cet espace, qui amènent A. Ozer et Ozer, (2005), et P. Ozer et al., (2010) à établir la responsabilité des hommes à travers le déboisement incontrôlé, l'expansion agricole, et le surpâturage. Seulement P. Ozer et al., (2007) remettent en question cette perception en mentionnant à juste titre que la plupart des recherches menées sur la désertification au Sahel sont conduites par des chercheurs étrangers (Européens et Américains) qui associent très peu les observations de terrains et prennent très rarement en considération les perceptions locales. Par ailleurs, le phénomène n'est pas que sahélien puisqu'il se manifeste également sur les continents Américain, Asiatique et Européen avec parfois plus de sévérité qu'en Afrique (Fall, 2014).

b. Les sécheresses

Le climat de la bande sahélienne se caractérise par une pluviométrie à régime monomodale essentiellement contrôlée par la mousson. A la fin des années 1960 ce climat connaît une transition assez violente. La période la plus arrosée du siècle (P. Ozer et Erpicum, 1995; L'Hôte et al., 2002) est succédée par des épisodes de sécheresses particulièrement récurrents qui s'installent sur deux décennies pratiquement (D'Amato et Lebel, 1998; L'Hôte et al., 2002; Lebel, Diedhiou, et Laurent, 2003). La longue période de déficit pluviométrique qui s'installe sur toute l'étendue du Sahel avec des baisses de l'ordre de 190 mm par endroit (Barbé et Lebel, 1997), se matérialise entre autres par une diminution sévère des débits de certains cours d'eau et pour d'autres un arrêt de leur écoulement (Chappell et Agnew, 2004; Dai, Trenberth, et Qian, 2004).

De manière générale, le cycle des pluies au Sahel obéit à une saisonnalité où les précipitations commencent à être enregistrées entre les mois d'Avril et de mai, atteignent leur extremum en Août et se retirent entre Septembre ou Octobre (Frappart et al., 2009). Cependant, en faisant une comparaison entre les cycles saisonniers de la période humide des années 1950 à 1970 et ceux des décennies de sécheresse à partir de 1970, Barbé et Lebel, (1997) tout comme Ali et Lebel, (2009) constatent une diminution importante de 30% des évènements pluvieux seulement pour le mois d'Août pendant la période 1950-1970. Ils notent par ailleurs le cumul des pluies resté semblable entre Avril et Juin pendant les deux périodes ; la réduction des quantités de pluies entre Juillet et Août qui expliquent

90% de la baisse des précipitations annuelles ; et le retrait précoce de la saison des pluies exprimé par la diminution de tiers d'évènement pluvieux entre le 10 Août et le 10 Septembre (Touré, 2011).

Les deux années humides enregistrées en 1994 et 1999 dans le Sahel ont amenées les scientifiques et autres chercheurs à poser la question de savoir si celles-ci constituaient la fin des sécheresses. En effet, à partir de 1993 un nouveau type de variabilité inter annuelle de la pluviométrie s'est installé caractérisé par des années sèches qui succèdent de manière abrupte aux années pluvieuses et rend encore plus difficile les prévisions (Ali, 2010). Dans ce contexte, l'estimation à long terme des ressources en eau pourtant indispensable pour la maîtrise du déficit pluviométrique reste un enjeu majeur pour le fonctionnement des activités liées à l'eau et la conservation des écosystèmes.

c. La dégradation des sols

Les sécheresses au Sahel et l'installation des conditions désertiques qu'elles ont entraînées ont conduit à un amenuisement de la couverture végétale des sols par diminution de la quantité de biomasse des plantes herbacées et graminées essentiellement annuelles, et par la mort des ligneux épuisés par la durée des déficits pluvieux (Descroix et Diedhiou, 2012). Par ailleurs les famines occasionnées et la croissance démographique ont amenées les populations à augmenter les surfaces cultivables et à réduire les temps de jachère qui pourtant permettaient la récupération de la fertilité des sols grâce au repos. Ces situations se sont conjuguées pour aggraver et accélérer le processus de dégradation des sols qui déjà était perceptible, localement avant la sécheresse (Descroix et Diedhiou, 2012). La dégradation des sols ici renvoi à la diminution physique des sols et la réduction de ses capacités productrices agricoles et aux services éco systémiques qu'ils peuvent fournir (Balarabe, 2012).

Les sols de la région sahélienne étant pour la plupart très peu évolués et constitués d'une forte proportion de sables, leur état de surface est en partie inexorablement fonction de la qualité et la densité de la couverture végétale. Ils sont par conséquent très fragiles et fortement exposés à l'érosion éolienne et hydrique (Alain Casenave et Valentin, 1989; Casenave et Valentin, 1992). De ce fait, Descroix et Diedhiou, (2012) remarquent dès lors que les segments au nord du Sahel où sont présents des sols squelettiques couverts par une maigre couche de végétation xérophile qui n'a pas progressé après les années sèches, la capacité de rétention des sols a très vite été annulée et les sols, jadis retenus par les plantes ont rapidement été emportés par l'érosion après les disparition du couvert végétal.

D'autre part les stratégies d'adaptation des populations pour surmonter les sécheresses à travers l'extension des surfaces agricoles, le rythme accéléré des rotations des cultures, l'exploitation des nouveaux pâturages (Descroix et Diedhiou, 2012) ont entraîné par endroit un encroustement sur plusieurs centimètres et réduit les infiltrations (d'Herbès et Valentin, 1997). Le lien entre l'augmentation des surfaces cultivées et l'augmentation des surfaces dégradées au Sahel a été montré par Loireau, 1998; Leblanc

et al., (2008). Par ailleurs, Albergel et Valentin, (1989) constatent une augmentation de l'écoulement et déduisent que les modifications de la couverture végétale ont réduit les capacités d'infiltration des eaux. D'après eux, l'extension des surfaces cultivées, la réduction des temps de mise en repos des sols et le défrichement des sols contribuent à accroître la vulnérabilité des sols à l'érosion. Cette remarque à pour mérite de remettre en question les stratégies de longs ou courts termes adoptées par les populations pour s'adapter aux changements des conditions environnementales.

1.1.3. La disponibilité et l'utilisation des ressources dans l'espace sahélien

S'il y'a un point sur lequel le consensus peut s'établir concernant le Sahel c'est à propos de l'influence remarquable des conditions climatiques sur la disponibilité et l'usage des ressources végétales, hydriques et hydrauliques (Marega, 2016). Les conséquences des grandes sécheresses sahéliennes, se sont manifestées d'une part sur les paysages à travers la désertification, la variation des niveaux des nappes phréatiques, la modification sensible des débits de cours d'eau, la variation de la surface et de la profondeur du lac Tchad etc., et d'autre part sur les activités humaines telles que l'agriculture, le pastoralisme, les projets hydrauliques, l'alimentation en eau potable entre autres (Rechner, 2003).

Les débits moyens des grands fleuves de la sous-région ont connus des baisses drastiques au cours de cette période. Niasse et al., (2004) dressent un bilan faisant état de la réduction de la superficie moyenne de la plaine d'inondation du Hadéjia au nord du Nigéria dont la surface passe de 2.350 km² en 1969 à 1.000 km² en 1995 ; la réduction de la superficie du delta du Niger qui passe de 37.000 km² au début des années 1959 à 15.000 km² en 1990 ; la superficie du lac Tchad qui de 20.000 km² avant les années 1970 se réduit à 7.000 km au début des années 1990. Ils mentionnent également dans les régions humides dégradées la propagation des végétaux flottants dont la présence a pour conséquence d'obstruer la pêche et la navigation et de réduire les capacités de fonctionnement des aménagements hydro-agricoles et hydro-électriques. Avant de rajouter en fin la difficile recharge des aquifères avec pour exemple les nappes phréatiques du sous bassin Bani-Niger supérieur au Mali qui ont connues leur niveau le plus bas en 1987.

Du point de vue de l'agriculture, les changements climatiques affectent l'environnement et réduisent les rendements agricoles (Fluet, 2006). D'après Durand, (1977), en 1973 toutes les cultures sèches sont fortement réduites et même complètement détruites dans le nord Niger, et les cultures de décrue (sorgho niébé) et d'irrigation dans les vallées des grands fleuves comme le Niger ou le Sénégal ont été impossibles car leur débits n'ont pas permis l'inondation de leurs lits majeurs. Ce pendant dans le bilan que Sircoulon, (1976) dresse de l'impact des premières années de sécheresses sur l'agriculture, il précise que la situation est très variable d'un pays à un

autre et dépend du type de culture. Ce bilan fait mention de ce qu'au Sénégal par exemple la production arachidière baisse de moitié et les récoltes de riz ou de sorgho dans les espaces de cultures irriguées ou de décrues se réduisent également. Par contre au Burkina Faso, la production céréalière en 1983 qui occupe 90 % des terres cultivées ne baisse que de 2,5 % par rapport à la moyenne des quatre années précédentes ; la production industrielle de coton ne subit pas les effets de la baisse de la pluviométrie ; mais la production herbacée est très mauvaise et la surcharge en cheptel devient forte (Sircoulon, 1976).

Sur le plan pastoral, la qualité et la disponibilité des pâturages étant fortement corrélées aux quantités des pluies, l'alternance des saisons des pluies et des saisons sèches impacte directement l'humidité des sols et donc la production de biomasse. En d'autres termes les persistance d'épisodes secs au Sahel produisent d'importantes diminution des ressources en eau et végétales qui conduisent à réduire la production des pâturages sahéliens particulièrement sur les sols sableux et les sols peu évolués (Marega, 2016). Le rétrécissement des pâturages suite à la disparition des végétaux herbacés a obligé les éleveurs à parcourir des distances de plus en plus grandes pendant lesquelles les bêtes sont mortes de faim et d'épuisement (Durand, 1977). Par contre, dès les premiers signes d'amélioration des quantités des précipitations, la densification de la couverture végétale et l'extension des surfaces en eau deviennent vite perceptibles (Herrmann, Anyamba, et Tucker, 2005; Ali et Lebel, 2009; Marega, 2016). Par ailleurs, dans les dépressions où les sols argileux présents permettant de retenir les eaux pluviales et de ruissellement, la production des pâturages est maintenue ou augmente (Hiernaux et al., 2009).

La forte variabilité spatio-temporelle du climat au Sahel se traduit ainsi par des impacts extrêmes négatifs mais qui également peuvent avoir des aspects positifs (Marega, 2016), et l'un des écosystèmes sahéliens qui résume assez bien cette contrariété c'est le lac Tchad est ses écosystèmes associés où des modes d'exploitations endogènes des espaces ont vu le jour à la suite des sécheresses.

1.2. Les dynamiques spatiales, territoriales et sociales autour du lac Tchad

Située au cœur de l'Afrique et partagée par le Cameroun, le Tchad, le Niger et le Nigeria, le lac Tchad est une étendue d'eau douce peu profonde et endoréique qui couvre une superficie en eaux libres actuellement estimée à environ 1 350 km² (CBLT, 2015). Il n'est pas uniforme et se présente sous la forme de deux cuvettes nord et sud séparées par un léger étranglement encore appelée grande barrière (Chouret et Lemoalle, 1975; Magrin, Lemoalle et Pourtier, 2015) (figure 7). Son aspect et sa superficie sont très sensibles aux variations du niveau d'eau en raison du fait qu'il s'étend dans une cuvette endoréique faiblement déprimée, et du fait de ce que ses rives sont plus souvent plates et indécises. Avec une profondeur moyenne de 1,5 m, c'est un lac qui n'est relié à aucune nappe d'eau

souterraine et son remplissage est principalement assuré par ses affluents. Le réseau hydrographique auquel il est connecté est dominé par le Chari, la Komadougou Yobé et l'El Beïd qui lui assurent l'essentiel des apports en eaux, le complément étant fourni par les pluies (CBLT, 2015).

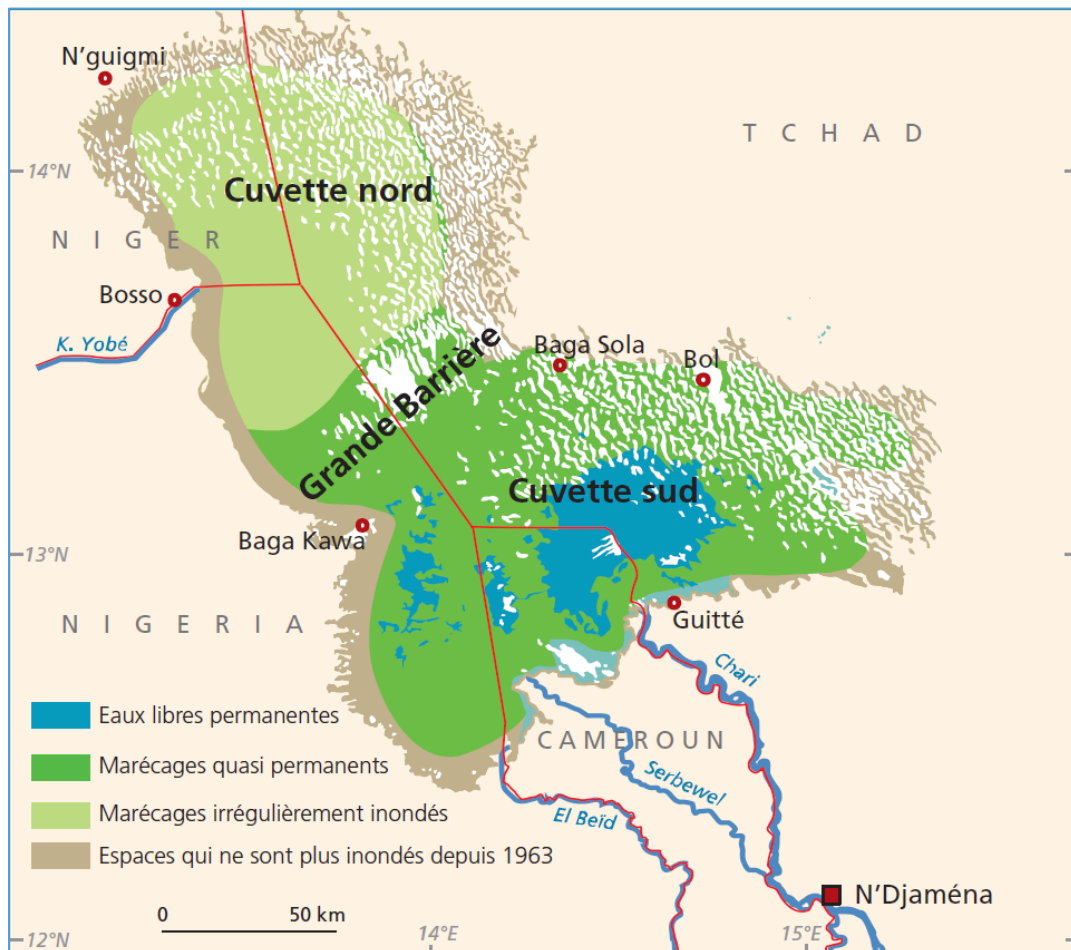


Figure 7 : Carte descriptive du lac Tchad (source : Magrin, Lemoalle et Pourtier, (2015).

Le début de la décennie 1970 amorce également le début du rétrécissement impressionnant de la superficie en eaux libres du lac Tchad et la question d'un assèchement définitif de cette ressource inquiète alors, en raison des conditions climatiques qui prévalent à cette période. Les nombreuses vagues de migrations des populations vers cet oasis situé en milieu aride et qui offre de nombreuses potentialités, questionnent quant à elles sur les pressions anthropiques exercées sur ce milieu, et sur le rôle joué par l'homme dans le maintien du lac dans son état asséché. Les prélèvements d'eau, l'irrigation, le surpâturage, l'aménagement des surfaces agricoles, les feux de brousse sont autant de raisons qui incriminent l'Homme et nourrissent le questionnement.

Par ailleurs, au moment où la nécessité de mener des études de suivi de l'évolution des écosystèmes sahéens aux échelles locales apparait comme une réponse aux divergences

liées aux évolutions des écosystèmes du Sahel, les travaux de recherche au niveau du lac Tchad sont pour la plupart menés dans les différentes portions nationales du lac (les parties camerounaise et nigérienne étant les moins documentées par les sciences sociales (Rangé, 2016)), ou à l'échelle du bassin. C'est l'apparition à partir de 2014 de plusieurs ouvrages de synthèse des connaissances à l'échelle du lac qui permet d'avoir une vue d'ensemble de l'état de cette ressource. Ces travaux abordent très largement les problématiques telles que : la variabilité des ressources naturelles, la durabilité des systèmes productifs, la dynamique d'anthropisation des périmètres lacustres ou les politiques de gouvernances (Lemoalle et Magrin, 2014; Magrin, Lemoalle et Pourtier, 2015; Rangé, 2016). Mais l'essentiel de leur production cartographique se concentre en majorité sur le lac et ses rives et l'arrière-pays est très peu pris en compte.

L'expertise collégiale publiée en 2014 par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), synthétise les connaissances diverses de plusieurs disciplines sur le lac Tchad et son bassin versant. Cet ouvrage intitulé « Le développement du lac Tchad : situation actuelles et futurs possibles », analyse d'une part, le fonctionnement hydrologique du lac, la variation de la pluviométrie et son implication dans les apports en eau du lac, la disponibilité en eau douce, la modification des paysages et de la biodiversité, la variabilité naturelle du lac et les mécanismes de fluctuation des eaux (Lemoalle, 2014c; Djoret et Favreau, 2014; Sylvestre, 2014; Ngatcha et Lemoalle, 2014; Lemoalle, 2014a). Ensuite les questions relatives aux dynamiques démographiques et à l'accès aux ressources sont abordées à travers l'étude de la diversité du peuplement et des relations que les populations entretiennent avec le lac, la compréhension des facteurs d'attractivité et de forte mobilité au sein de cet espace (Réounodji et al., 2014; Lemoalle et Magrin, 2014). Le dynamisme des activités agricoles, pastorales et de pêche et l'importance de l'exploitation des autres ressources naturelles sont également analysés et abordés sous le prisme de la multifonctionnalité de l'espace, de la mobilité et la multi activité des personnes pour comprendre les enjeux liés à la durabilité et à la variabilité des systèmes de productions (Lemoalle et Magrin, 2014; Lemoalle, 2014b; Mugelé et Lemoalle, 2014; Raimond, Range, et Guerin, 2014). Enfin, l'accès aux ressources et la gouvernance de celles-ci dans cet espace sont évoqués (Lemoalle et Magrin, 2014). Le second ouvrage synthétique également publié par l'IRD est un atlas du lac Tchad (Magrin, Lemoalle et Pourtier, 2015) dans lequel les cartes réalisées illustrent un panorama aussi complet que possible des connaissances disponibles sur le lac. Les 46 planches que comporte l'ouvrage traitent du système hydrologique, des relations entre écosystèmes et biodiversité, des peuplements depuis la paléontologie jusqu'aux époques contemporaines, des activités productives, l'influence des métropoles régionales et l'analyse des relations entre territoires institutions et projets. Il y'a ensuite l'ouvrage « Crise et développement. La région de lac Tchad à l'épreuve de Boko haram » paru en Avril 2018 qui se concentre à fournir un état des lieux pluridisciplinaire de la situation sécuritaire instable dans la région du lac Tchad et à mener une réflexion prospective de la situation.

I.2.1. Les évolutions contemporaines de l'état du Lac et sa situation actuelle

Un bref aperçu climatique sur l'espace du lac permet de faire quelques observations rapides. La variabilité spatio-temporelle des précipitations est matérialisée par l'amélioration de la pluviométrie au niveau des marges sud du lac et à l'est également (figure 8). Par contre au cœur de la cuvette sud et de part et d'autre du long de la frontière entre le Tchad et le Nigéria, les valeurs de pluviométrie reculent, passant de 300 mm environ entre 1970-2000, à 250 mm à peu près pendant l'intervalle 2001-2015.

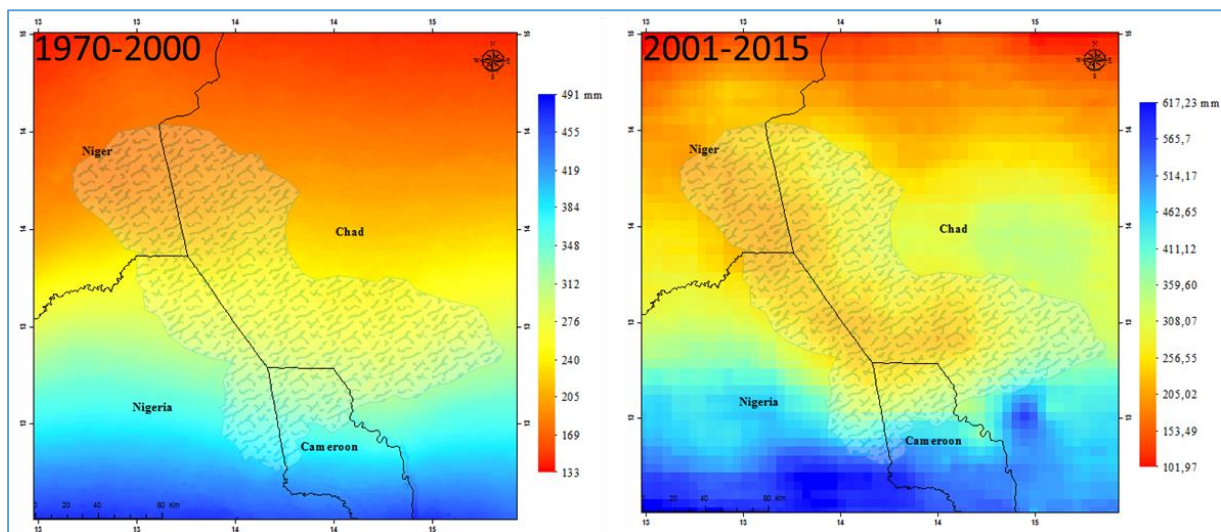


Figure 8 : Distribution moyenne des précipitations au-dessus du lac Tchad entre 1970 et 2000, et entre 2001 et 2015. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Pour les températures de surfaces du sol, elles baissent dans les zones humides au sein du lac, notamment dans la cuvette sud et au sud de la cuvette nord (figure 9). En revanche, dans les terres émergées qui entourent le lac les températures augmentent. C'est le cas au nord-est où elles passent de 27,7°C environ entre 1970-2000 à 28°C pendant la période 2001-2015.

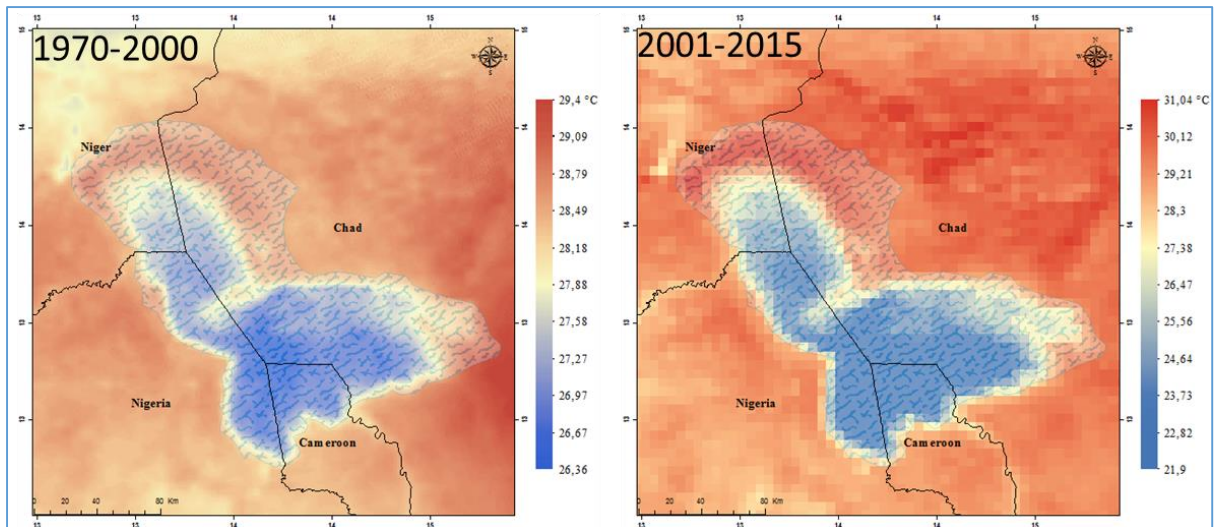


Figure 9 : Distribution moyenne des températures au-dessus du lac Tchad entre 1970 et 2000, et entre 2001 et 2015. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

La comparaison des diagrammes ombrothermiques de Gausse entre les périodes 1970-2000 et les périodes 2001-2015 permet également de constater ces nettes améliorations de la pluviométrie et de la température des sols pendant les années récentes (figure 10). Le signal saisonnier reste monomodal mais la pluviométrie entre les mois de Juin et de Septembre est particulièrement améliorée. Les valeurs élevées de température de surface de sol observées entre Avril et Juin pendant l'intervalle 1970-2000 se limitent à un pic pendant le mois d'Avril sur la période 2001-2015.

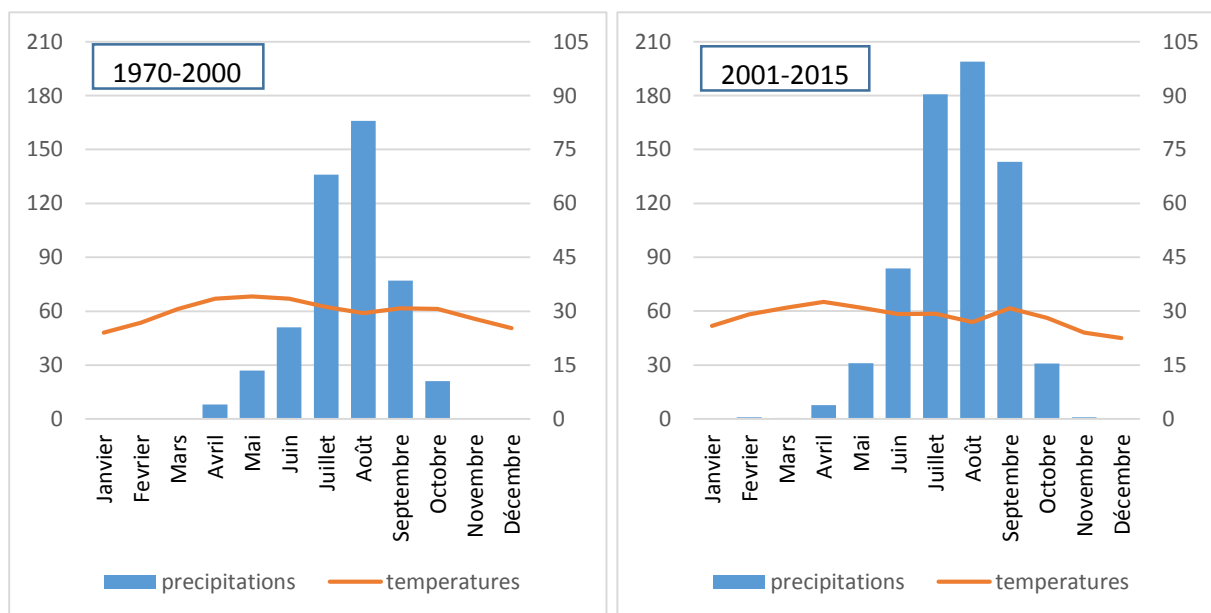


Figure 10 : Diagramme ombrothermique au-dessus du lac Tchad entre 1970 et 2000, et entre 2001 et 2015. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Du point de vue de son aspect, depuis le 19^{ième} siècle les études sur la dynamique naturelle du lac Tchad ont surtout porté sur les fluctuations du niveau du lac. Ces études remontent aux observations des voyageurs et des navigateurs, et à la mission Thilho effectuée en 1910 (Tilho, 1928). Depuis lors on sait que le lac est loin d'être uniforme et que sa superficie varie considérablement du fait de sa profondeur, sa topographie plane et de l'irrégularité climatique qui caractérise la région sahélienne (Magrin et al., 2009). Lors des grandes sécheresses, c'est l'inquiétude autour de la menace éventuelle de sa disparition qui retient l'attention (figure 11).

Les effets du changement climatique et les prélèvements en eau à travers les projets hydro-agricoles ont pendant longtemps été pointé du doigt comme causes du rétrécissement et d'une éventuelle disparition de la superficie en eau du lac (Pouyaud et Colombani, 1989; Coe et Foley, 2001; Rechner, 2003; GIZ, 2015). Mais les avis scientifiques les plus récents contredisent cette représentation pessimiste et constatent que depuis près d'une vingtaine d'années le lac est stable (Géraud Magrin et al., 2009). Dans Lavergne, (2017)) Armel Sambo chercheur à l'université de Maroua affirme que « *À ce jour, il n'existe pas d'étude fiable qui permette de mesurer l'influence du changement climatique sur l'état actuel de l'hydro-système. Depuis 2004, on observe une légère augmentation de sa superficie en eau* ». Bien que l'avenir soit incertain, aucune hypothèse ne permet d'affirmer pour l'heure que l'aridification du climat va condamner le lac à disparaître (Géraud Magrin et al., 2009). Quoi qu'il en soit, l'avenir de cet espace de polarisation démographique, partagé par quatre Etats, qui accueille un peuplement cosmopolite, est une question importante pour les millions de personnes dont les moyens de survie dépendent du lac (Lemoalle et Magrin, 2014).

La quantification de la superficie du lac Tchad se limite généralement à l'estimation spécifique de l'étendue des eaux libres. Les marécages sont généralement exclus de cette estimation. Nous reprenons la considération adoptée par Lemoalle, (2014c), qui intègre les marécages dans l'estimation de la superficie du lac Tchad tout en admettant par ailleurs que par le biais de l'imagerie satellitaire, l'estimation de la superficie des eaux libres est bien plus aisée que celle des marécages. Il justifie la prise en compte des marécages par le fait que ces espaces sont aquatiques puisqu'ils sont régulièrement inondés, contribuent de fait à la production de poisson par exemple et sont d'ailleurs considérés par les riverains comme partie intégrante du lac.

A partir des observations des différentes variations de superficie du lac et qui remontent aux siècles précédents Thilho en 1928 propose une classification en trois états du lac en fonction de l'aspect morphologique, de la côte du plan d'eau et enfin de la superficie et qui dépendent également de de la pluviométrie dans le bassin du Chari (Lemoalle, 2014c). Cette classification reprise ensuite par Olivry et al., (1996) et par Lemoalle, (2014c) permet de distinguer :

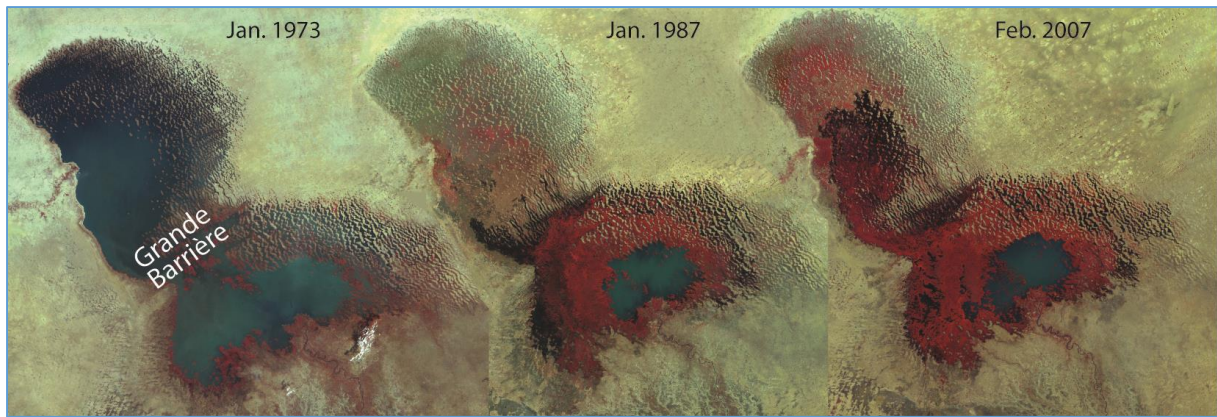


Figure 11 : Evolution temporelle du lac Tchad de Janvier 1973 à Février 2007, source :
D'après Pierre GENTHON, 2012.

- "**Le GRAND-TCHAD**" : correspond à une côte du plan d'eau dont l'altitude est de l'ordre de 284 m. C'est le lac décrit par les voyageurs du 19^{ème} siècle mais qui n'a plus été observé que brièvement au milieu des années 1950. La surface en eau estimée approche 25 000 km² et la navigation est possible partout mais les tempêtes sont dangereuses.
- "**Le MOYEN TCHAD**" : est celui que Thilho a observé de 1917 à 1919 et qui est réapparu entre 1967 et 1969. La superficie en eau à ce stade est estimée entre 15 000 et 20 000 km² et la cote du plan d'eau est de 282 m environ. Ce stade n'est observable que si les apports en eau du Chari principal tributaire du lac sont entre 34 et 43 km³/an.
- "**Le PETIT TCHAD**" : c'est le stade atteint lorsque le plan d'eau est à la cote 280 m et au-dessous et les apports annuels du Chari sont inférieurs à 34 km³. La cuvette sud qui contient encore une surface en eau libre de 1700 km² environ, se voit séparée de la cuvette nord qui reste la plus part du temps asséchée à cause de l'exondation de la grande barrière. Ce sont ces conditions observées par Freydenberg en 1905, Thilho en 1905, 1907 et Juillet 1914, qui sont de nouveau apparues après la sécheresse de Mai 1973 et qui perdurent jusqu'à nos jours.

Le retrait des eaux du lac a entraîné des modifications des écosystèmes et donné lieu à la mise en place d'un nouveau paysage dont les principales composantes sont les eaux libres, les marécages et les archipels.

Dans l'état actuel de petit Tchad, la réduction des eaux libres permanentes a laissé place à certains endroits à de vastes marécages permanents ou saisonniers présents dans les deux cuvettes et qui couvrent entre 2000 et 13 000 km² sur l'ensemble du lac (Lemoalle, 2014c). L'occupation du sol à l'échelle du lac est par conséquent dominée par les marécages dont le niveau de remplissage en eau dépend du régime pluviale et des apports des tributaires du lac Tchad (Ouedraogo et al., 2002). Les marécages de la cuvette

sud sont régulièrement inondés contrairement à ceux de la cuvette nord. Au-delà des marécages ce sont de vastes étendues d'espaces dénudés faiblement couverts en végétation à mesure que l'on s'éloigne du lac qui dominant. Un niveau d'assèchement particulier désigné « petit Tchad sec » (Lemoalle, 2014c) est observable lorsque les apports en eau du Chari n'excèdent pas 15 km³/an. Dans ce cas, l'inondation n'atteint pas la cuvette nord et celle-ci peut rester totalement asséchée pendant longtemps. La pêche n'y est pas possible, l'agriculture et l'élevage sont faiblement pratiqués et la fourniture en eau de consommation se fait rare (Lemoalle, 2014c).

1.2.2. Attractivité et mobilité autour du Lac favorisées par son état récent

Le dynamisme de peuplement du lac Tchad suscité par les sécheresses des décennies 1970 et 1980, et l'essor de la pêche, des cultures de décrue, du maraichage et du commerce apparaissent bien plus complexes, par leur ampleur, leur diversité et la variabilité des flux de migrations (Réounodji et al., 2014). Ces migrations vers le lac pourtant bien antérieures aux sécheresses sont amplifiées par les conflits fonciers qui obligent les populations à conquérir de nouveaux espaces, l'augmentation des prises de pêche et la mise en valeur des vastes terres de décrues qui émergent suite au retrait des eaux (Kolawole, 1988; Kirscht et Werthmann, 2000; Sarch et Birkett, 2000; Adam et al., 2004; Magrin, 1996). En effet, au moment où les milieux arides sahéliens sont frappés par les sécheresses, les périmètres immédiats du lac Tchad et les espaces découverts par la baisse des eaux du lac constituent des milieux humides favorables à l'agriculture, la pêche et l'élevage (Réounodji et al., 2014). On assiste dès lors à d'importantes migrations pour la pêche, pour l'élevage et pour l'agriculture qui donneront lieu à une intense exploitation des terres de décrues des cuvettes nord et sud libérés par le retrait des eaux.

Durant les périodes de sécheresse prononcées, au moment où la mise en valeur agricole des espaces humides sahéliens se fait principalement par l'aménagement des périmètres irrigués, l'exploitation du lac Tchad et de ses périmètres immédiats suit la même logique mais intègre des paramètres endogènes liés aux mobilités humaines et à l'exploitation rotationnelle de l'espace (Rangé, 2016). Un peuplement hétérogène et cosmopolite d'autochtones et de migrants va donc se mettre en place, constitué de pêcheurs, d'éleveurs et d'agriculteurs, dont le savoir-faire, la disponibilité des ressources naturelles et l'accès aux marchés, vont contribuer à développer des systèmes productifs fondés sur la multifonctionnalité de l'espace (une même portion de terre peut servir pour les trois activités au cours de l'année), la mobilité (le déplacement des personnes est fonction du niveau des crues) et la multi activité des personnes (l'association de l'agriculture, de la pêche et de l'élevage en fonction des revenus, du niveau des crues et des spécialités ethniques) (Pesche et al., 2016). C'est le début d'un boom économique au Lac Tchad lié au retrait des eaux et qui va se traduire par le développement important des activités agricoles de pêche et d'élevage (Kolawole, 1988; Sarch et Birkett, 2000; Adam et al., 2004).

En effet, le Petit Tchad installé depuis 1973 montre un dynamisme économique très important (Magrin, 2009), et les populations riveraines (2 millions d'habitants environs, (Lemoalle et Magrin, 2014)) ont su s'adapter à la variabilité des conditions du milieu par des systèmes innovants endogènes. Cette adaptation favorise la production et l'exportation régulière de céréales, de produits maraichers, de poisson et de bétail et contribue ainsi à la sécurité alimentaire d'un arrière-pays de 13 millions d'habitants concentrés dans les grandes villes de Maiduguri et de N'Djamena (Pesche et al., 2016). Par exemple d'après Lemoalle et Magrin, (2014), le Petit Tchad permet une production de poisson fumé et séché comprise entre 50 000 et 100 000 tonnes et estiment à 600 000 tonnes la production de maïs qui contribuerait à 80 % de la consommation en maïs des villes de Maiduguri et de N'Djamena. Cette situation fournit également un nombre très important d'emplois saisonniers ou permanents. Puisque, les crues, selon qu'elles soient importantes, modérées ou faibles, conditionnent la localisation des ressources et les migrations à l'intérieur du lac ou en provenance de l'arrière-pays. Les emplois dans cet espace sont donc fonctions des périodes de l'année et, étroitement liés au niveau des crues, qui elles même varient d'une année à l'autre. Entre 1975 et 1997 par exemple, l'assèchement régulier de la cuvette nord provoque le transfert des activités de la cuvette nord vers la cuvette sud. Certains migrants sont attirés au lac pour l'agriculture ou l'élevage, et d'autres pour la pêche, ce qui justifie pour les uns et les autres des séjours définitifs, temporaires ou prolongés (Réounodji et al., 2014).

1.2.3. Les pressions anthropiques sur le milieu

La concentration des populations autour du lac est causée par la présence de ressources halieutiques dans les eaux libres et les zones inondables, et par la disponibilité des vastes terres de décrue aux niveaux des rives et qui servent de pâturages ou de terres arables en fonction des périodes de l'année. Les différentes variations récentes du niveau d'eau ont entraîné une colonisation progressive du lac, dont la nature et le rythme de mise en place entre la cuvette nord et la cuvette sud diffèrent en fonction du niveau d'eau et créent des conditions favorables à l'essor de la pêche dans un premier temps puis de l'agriculture et de l'élevage. S'en suit alors une succession de vagues de migrations progressives, amorcées vers 1902 par les pêcheurs Houssa et Yoruba en provenance du Nigeria qui seront rejoints vers 1950 par les pêcheurs Massa, Kabalaye, Ngambaye et Kim du sud du Tchad et par les pêcheurs Bornouans et Houssa du Cameroun et du Niger. Les sécheresses sahéliennes des années 1970, vont déclencher de nouvelles vagues de migrations obligeant les populations de l'arrière-pays tels que les Zarma et Houssa du Niger, les Sokoto du Tchad, les Mousgoum du Cameroun à se mouvoir vers le lac Tchad pour exploiter les vastes espaces de décrue libérés par le retrait des eaux, qui sont riches en alluvions et propices aux activités agricoles et pastorales.

Dès lors, au peuplement ancien constitué de Kanembou, Bornouans, Boudouma, Kouri, Kanouri, Mobeur, Arabes, Haddad et Kotoko, s'ajoute donc un peuplement récemment installé à la suite de l'assèchement du lac et constitué de Kréda, Touareg, Mousgoum, Peul,

Ibo, Haoussa, Djoukoun, Margui Massa, Mandara, Mousseey et Sara, dont la structure et la répartition sont liées aux activités principales d'agriculture, de pêche et d'élevage ou à la combinaison de celles-ci. Un peuplement hétérogène et cosmopolite d'autochtones et de migrants va donc se mettre en place (figure 12), constitué de pêcheurs, d'éleveurs et d'agriculteurs, dont le savoir-faire, la disponibilité des ressources naturelles et l'accès aux marchés, vont contribuer à développer des systèmes productifs fondés sur la multifonctionnalité de l'espace, la mobilité et la multi activité des personnes.

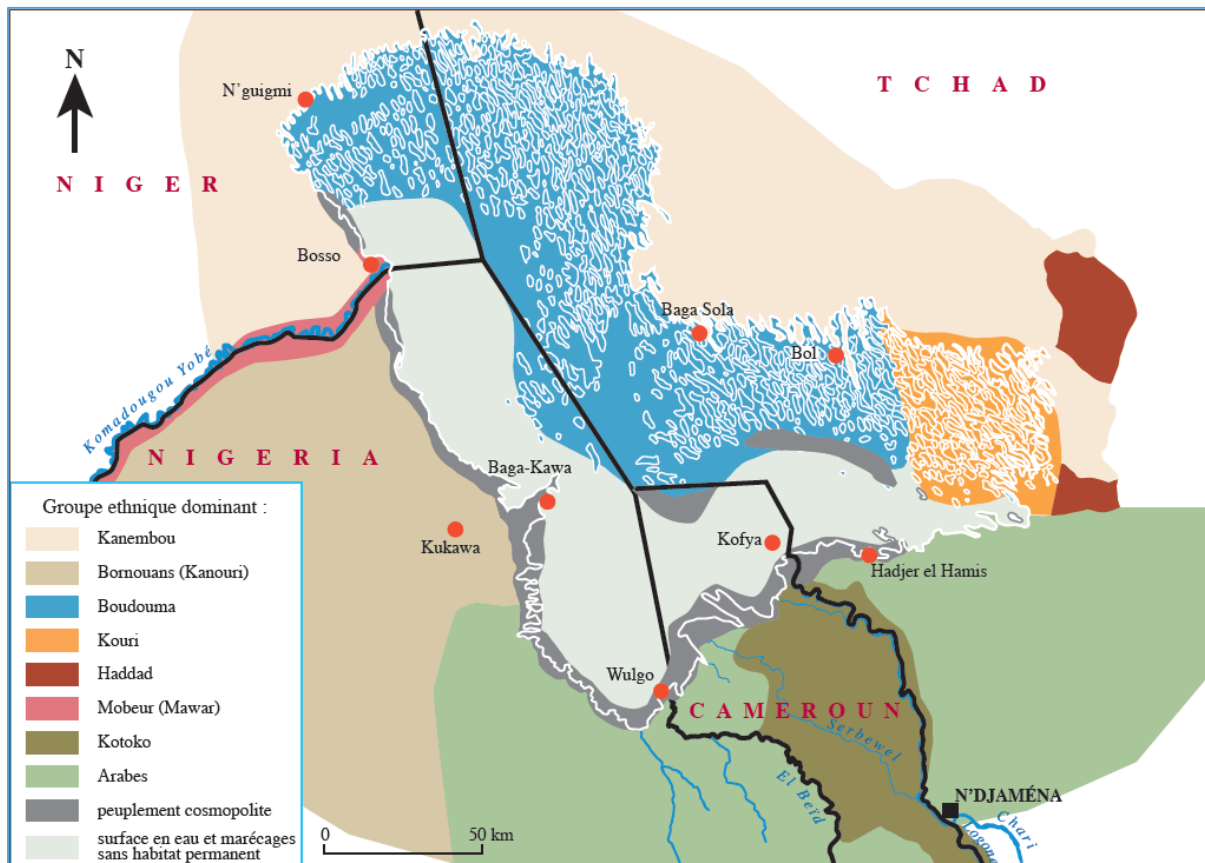


Figure 12: Répartition des populations du lac Tchad en 2015 (source : Seignobos 2015, dans Magrin, Lemoalle et Pourtier, (2015)).

A l'échelle du lac, selon qu'elles soient importantes, modérées ou faibles, les crues conditionnent la localisation des ressources et les migrations à l'intérieur du lac ou en provenance de l'arrière-pays. Les mobilités humaines dans cet espace sont fonctions des périodes de l'année et, étroitement liées au niveau des crues, qui elles même varient d'une année à l'autre. L'association de la mobilité des personnes, la multi activité et la multifonctionnalité des espaces permet ainsi d'optimiser les productions en s'adaptant à la disponibilité des ressources. Cette logique de multi usage de l'espace (par l'association des trois activités principales la pêche, l'élevage et l'agriculture), particulièrement propre aux zones lacustres et qui répond à la nécessité pour les populations de s'adapter aux conditions du milieu dépend alors de la disponibilité et de la localisation des ressources,

et diffère par conséquent dans les deux cuvettes ou d'un pays à un autre (figure 13). Depuis l'assèchement à long terme de la cuvette nord dès les années 1980, l'essentiel des activités de pêche, d'agriculture et d'élevage se pratique dans la cuvette sud. L'exploitation des ressources du lac Tchad est alors d'une part fonction du rythme et du calendrier des crues et des décrues qui conditionne la pratique de l'élevage transhumant, de l'agriculture et de la pêche, et s'appuie d'autre part sur la maîtrise du multi usage de l'espace par association ou succession de ces trois activités (Rangé, 2016; Raimond, Range, et Guerin, 2014; Raimond, Rangé, et Réounodji, 2014).

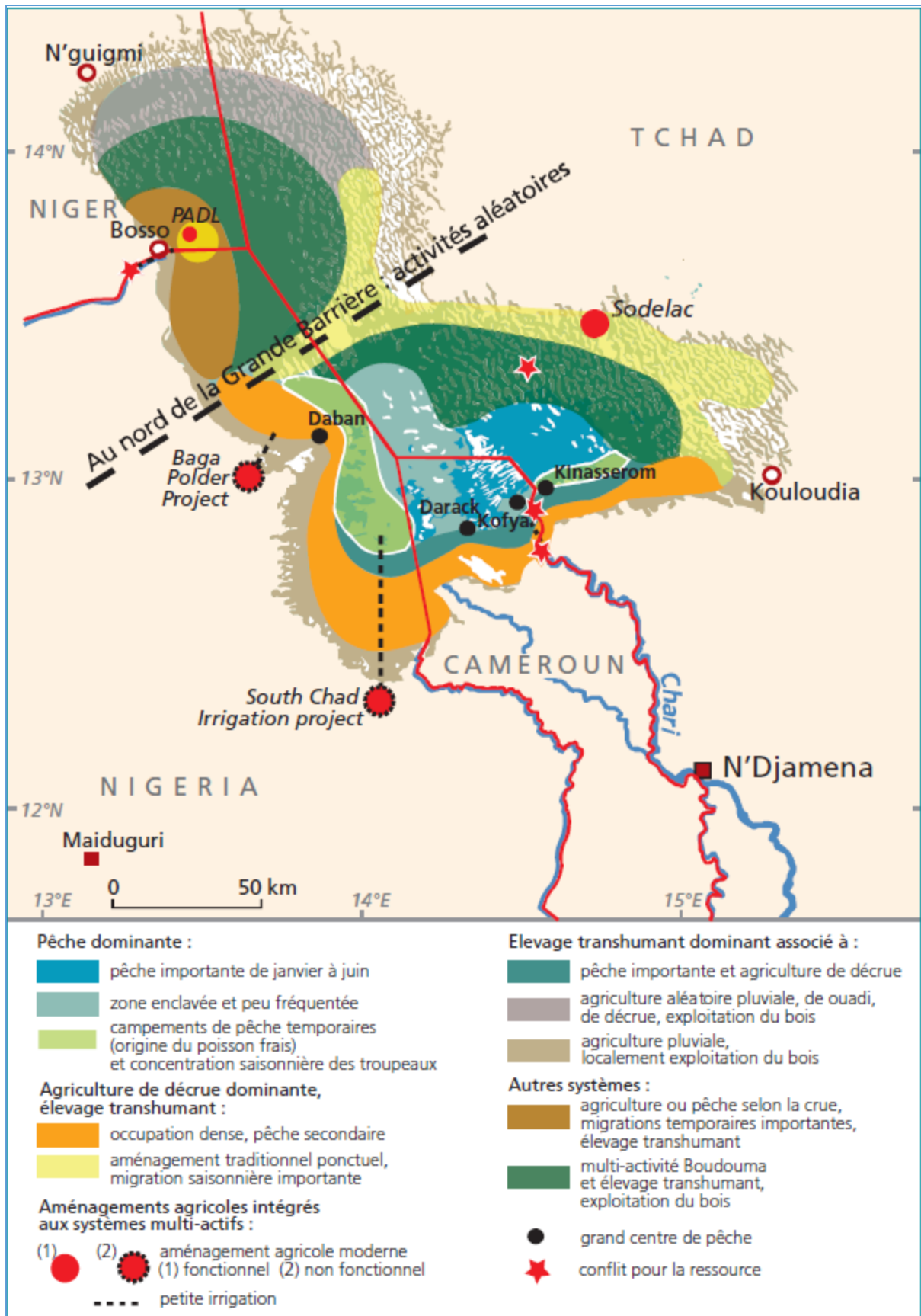


Figure 13 : Utilisation des espaces du lac Tchad (source : Raimond et Rangé 2015, dans dans Magrin, Lemoalle et Pourtier, (2015)).

Dans ses marges sud, le retrait des eaux du lac libère de vastes espaces fertiles qui sont exploités suivant une logique concentrique où du lac vers l'arrière-pays, selon différentes combinaisons possibles, on observe la dominance successive de la pêche puis de l'élevage et en fin de l'agriculture. Dans les rives internes situées aux marges des zones d'eaux libres où la pêche domine naturellement, la pratique de la pêche s'accompagne de l'élevage avec une dominance variable de l'une des activités sur l'autre. Lorsque le risque d'inondation est fort, la pêche domine et s'associe à un élevage saisonnier important. En fonction du retrait des eaux, l'élevage transhumant domine et s'associe à une importante activité de pêche et à l'agriculture qui exploite les terres de décrue. Dans les rives intermédiaires et extérieures où le risque d'inondation devient moins important, l'agriculture de décrue devient dominante, l'élevage transhumant reste importante et la pêche est faiblement pratiquée. L'essentiel de la production halieutique, pastorale et agricole dans l'espace du lac et de ses rives approvisionne les grands marchés de consommation des métropoles de Maiduguri au Nigéria et de N'Djamena au Tchad (figure 14).

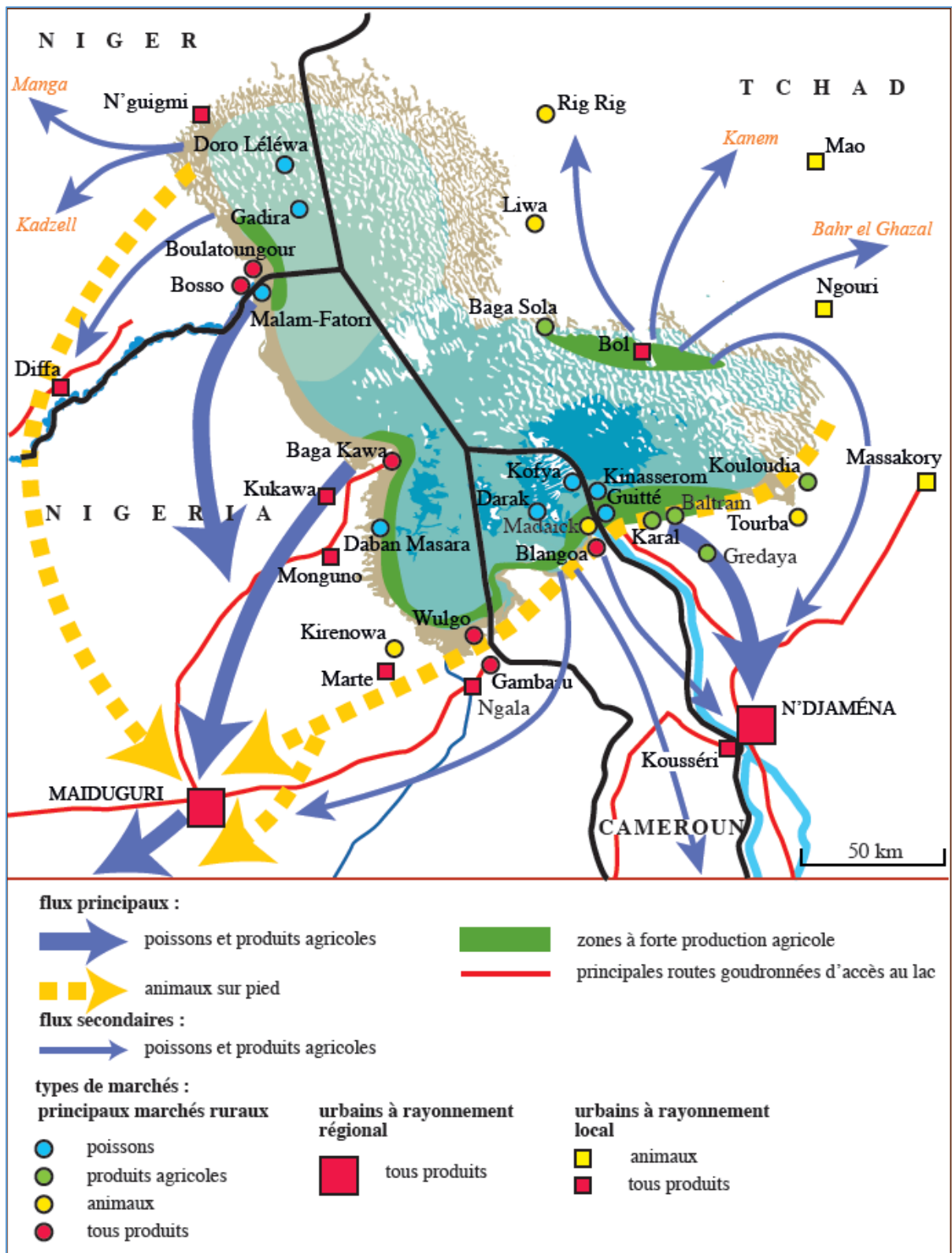


Figure 14 : Principaux échanges commerciaux autour du lac Tchad (source : Magrin 2015, dans Magrin, Lemoalle et Pourtier, (2015)).

a. La pêche

L'évolution de la pratique de la pêche au sein du lac Tchad a connu lors des 5 dernières décennies d'importants changements. L'évolution du matériel disponible, le changement de l'hydrologie lacustre et des conditions de milieu, l'importance accrue de la monnaie dans les échanges ainsi que les débouchés au Nigéria pour le poisson fumé ont contribué à transformer les mentalités et le comportement des pêcheurs (Lemoalle et Magrin, 2014). La dynamique aujourd'hui observée de la pêche dans le lac a par ailleurs été influencé dans son histoire récente par des facteurs importants comme la croissance démographique et le chômage qui ont contribué à créer un réservoir de main d'œuvre.

En phase actuelle de petit Tchad, il est important de différencier la pratique de la pêche dans la cuvette nord à aspect plus marécageux avec une faible diversité de poissons, de l'activité de la pêche dans la cuvette sud où les eaux permanentes encore présentes regorgent un peuplement de poisson plus diversifié. Lors des rares épisodes d'inondations de la cuvette nord, l'essentiel des prises de poisson est constitué de trois espèces halieutiques à savoir les poissons-chats (Claridés), les tiliapias (Cichlidés) et Heterotis (Lemoalle et Magrin, 2014). Mais pendant les moments d'assèchement permanent de cette cuvette, à l'exemple de la période 1980 1997, la pêche devient peu attrayante, certains pêcheurs migrent vers la cuvette sud ou se reconvertissent aux activités agricoles et pastorales. Par contre, la cuvette sud régulièrement inondée par les apports en eaux du Chari dispose toujours d'eaux libres permanentes et de vastes marécages en bordures des archipels qui offrent une variété de poisson élevée. Cette différence de paysage nécessite une diversité de techniques de pêche et les prises se composent de *Alestes baremoze*, *Labeo coubie*, *Brycinus macrolepidotus*, *Citharinops distichoides*.

De manière générale, sur l'ensemble du lac, les techniques et moyens de pêches dépendent des conditions financières des pêcheurs, des paysages rencontrés et des espèces ciblées. Depuis le début des années 1990 l'utilisation des barrages de nasses maliennes (domba) s'est adaptée aux captures de tilapias, Heterotis et silures dans les zones de faible profondeur. Les lignes sont plus adaptées aux espaces marécageux, et les filets maillants sont utilisés dans les eaux dégagées et profondes où les grandes pirogues motorisées des pêcheurs nantis sont également employées pour pratiquer la pêche avec de grandes sennes. En phase de moyen Tchad, la production de poisson était estimée entre 40 000 et 80 000 tonnes par an. Lors de l'assèchement du lac dans les années 1970 et son passage au stade de petit lac Tchad cette production est passée à environ 200 000 tonnes. Elle est actuellement estimée entre 50 000 et 100 000 tonnes et varie beaucoup d'un pays à un autre. La production de poisson est en majorité écoulee dans les marches de Maiduguri et de N'Djamena (figure 15).

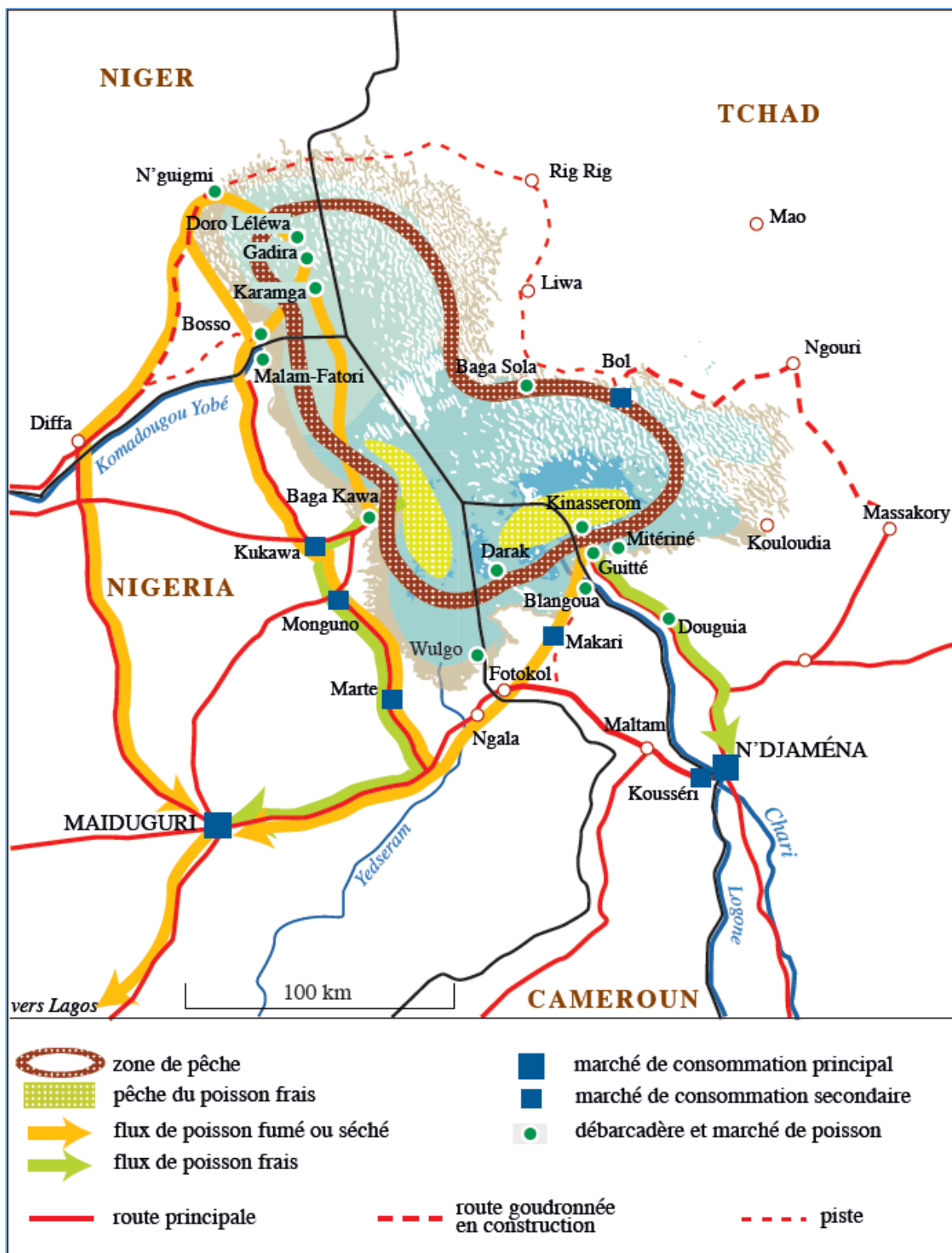


Figure 15 : Activités halieutiques et commercialisation des produits de pêche autour du lac Tchad (source : Ngaressem et Kiari, 2015, dans Magrin, Lemoalle et Pourtier, (2015)).

b. L'agriculture

C'est à la suite des grandes sécheresses que l'agriculture a été vraiment développée dans le lac et ses rives au moment où les vastes terres de décrue laissées libres par le retrait des eaux ont été prises d'assaut par de nombreuses populations migrantes en quête d'espace offrant de meilleures opportunités agricoles. Avant cette période, les cultures essentiellement pluviales et de décrues se limitaient à de petits champs de légumes et de maïs. Avec le passage au petit Tchad, l'agriculture pluviale devenue aléatoire à cause des conditions climatiques va laisser place à l'agriculture de décrue pratiquée sur les terres limono-argileuses très fertiles libérées par les eaux du lac. Aujourd'hui dans l'ensemble formé par le lac, ses rives et son arrière-pays, les conditions du milieu liées notamment aux inondations, à la qualité du sol, à la pluviométrie et à la couverture végétale influencent fortement les pratiques culturales et les systèmes agricoles de décrue, irrigué et pluvial cohabitent et sont les plus répandues.

Dans les rives intérieures où le risque d'inondation reste élevé, l'agriculture de décrue pratiquée aléatoirement domine et peut être importante en cas de faible crue. Les rives extérieures où le risque d'inondation devient moins fort sont intensivement exploitées chaque année par les parcelles agricoles de décrue ou irriguées. Les travaux durent la période de décrue soit de Novembre à Avril et les champs disposés en lanières occupent les berges perpendiculairement aux rives (Magrin, Lemoalle et Pourtier, 2015). Les pratiques agricoles dans l'ensemble des terres de décrue s'appuient sur un système endogène innovant qui repose entre autre sur la gestion du calendrier des crues, la diversification et la mobilité des cultures, l'aménagement des digues de protection ou d'irrigation. Ces terres sont assez fertiles pour permettre une production suffisamment diversifiée qui offre les céréales tel que le niébé, le riz, le blé, ou le maïs dont la production annuelle est estimée entre 600 000 et 900 000 tonnes (Lemoalle et Magrin, 2014) ; les tubercules de patate douce, et de manioc ; les maraîchers (pomme de terre, oignon, tomate, poivron, le concombre, aubergine, carotte, salade et betterave, piment, le gombo etc.), la canne à sucre, et la pastèque. La production agricole du lac Tchad est écoulee dans les grands marchés de consommation des villes de Maiduguri et de N'Djamena (figure 16).

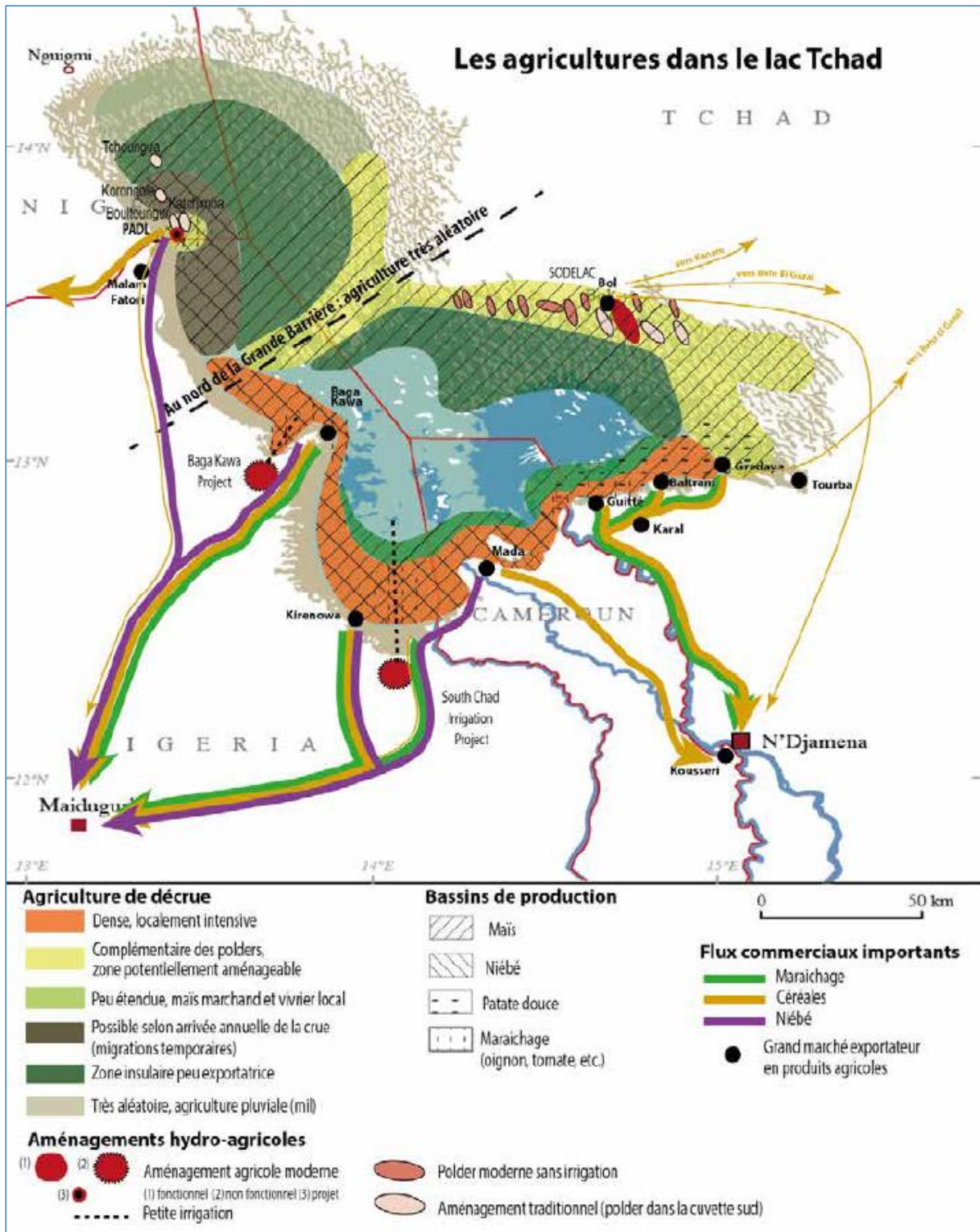


Figure 16 : Les espaces agricoles dans le lac Tchad (D'après C. Raimond, 2014, dans Lemoalle et Magrin (2014)).

c. L'élevage

Avec la dégradation des parcours sahéliens lors des grandes sécheresses, le lac va servir d'abri pour les éleveurs entre les années 1970 et 1980. La présence d'eaux libres et de marécages, et la succession des crues vont en effet permettre de maintenir un fourrage

hautement nutritif. La diversité du système fourrager constitué d'herbes vivaces sur les zones de décrue et les îles, d'herbes aquatiques, d'herbes annuelles, d'arbres et d'arbustes, et de résidus de cultures assure une succession de ressources fourragères variées tout au long de l'année (Lemoalle et Magrin, 2014). En dehors des éleveurs Boudouma et Kouri qui vivent toute l'année dans le lac, à partir des sécheresses de 1970 certains éleveurs décident de s'installer dans les pâturages du lac et d'autres par contre notamment les éleveurs Arabes et Peuls vont prendre pour habitude d'y intensifier leurs transhumances saisonnières (Lemoalle et Magrin, 2014; Magrin, Lemoalle et Pourtier, 2015).

Depuis lors, l'importance des niveaux de crues conditionne la disponibilité et la valorisation des ressources pastorales dans et en périphéries du lac et rythme également les transhumances. Dans la cuvette sud, ses rives et dans les archipels régulièrement inondés, les pâturages verts sont disponibles diversifiés entre herbes, arbres, arbustes et complétés par les résidus des récoltes (figure 17). Dans la cuvette nord au contraire si les crues sont faibles ou nulles, les parcours ne sont pas inondés et dans ce cas les fourrages disponibles et exploités se limitent à de la paille sèche (figure 17). Sur les terres émergées en périphérie du lac par contre, en plus de l'importance des crues, la distribution des fourrages est conditionnée par la topographie des sols et la répartition des espaces agricoles (Lemoalle et Magrin, 2014). Les ressources fourragères sont réparties entre les pâturages et les résidus des récoltes (figure 17).

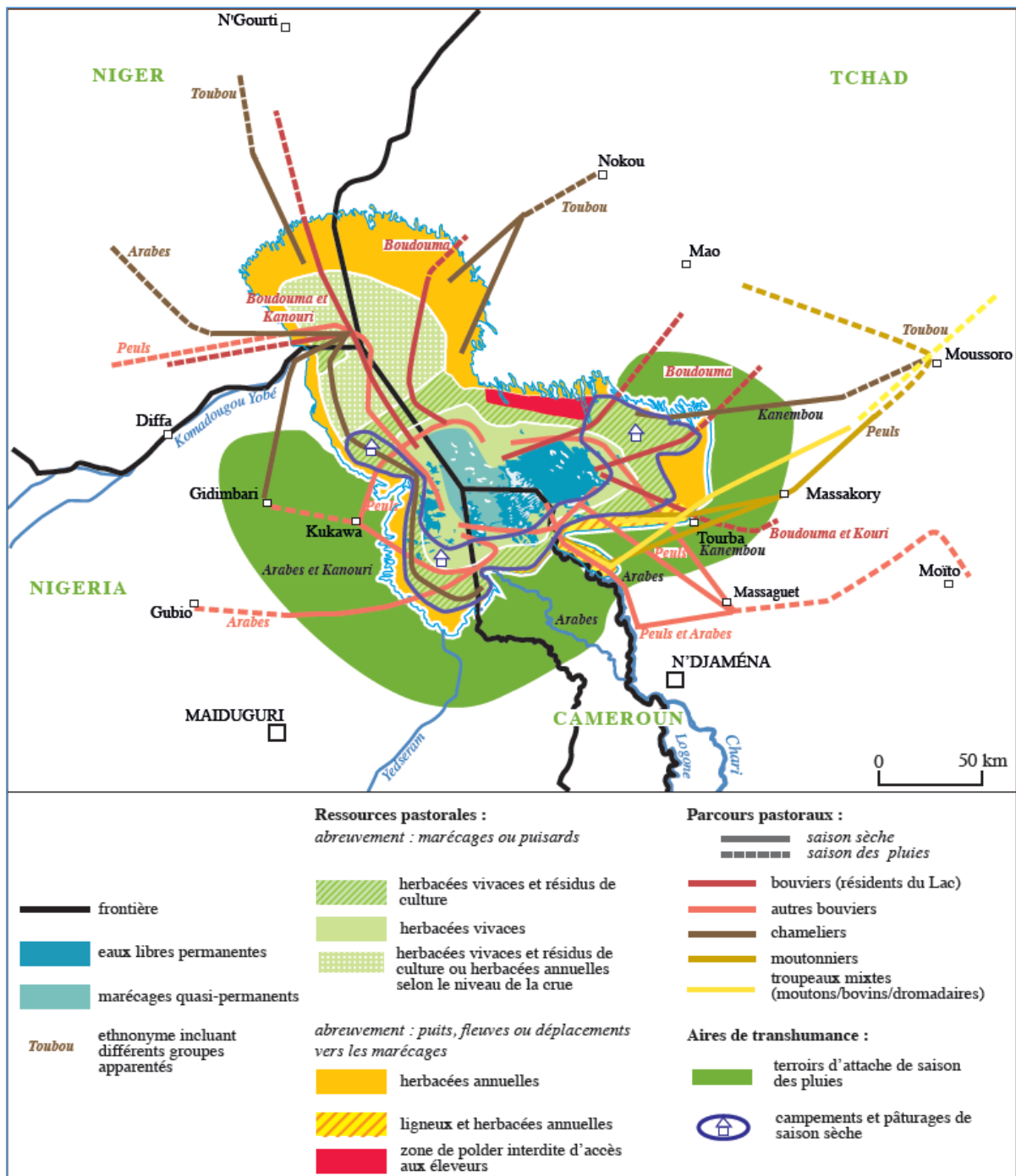


Figure 17 : Activités pastorales autour du lac Tchad (source : Réounodji, Rangé et Guérin, 2015, dans Magrin, Lemoalle et Pourtier, (2015)).

A la suite des sécheresses, la tendance à la diversification des sources de revenus qui s'est installée a conduit les pêcheurs et les agriculteurs à constituer des cheptels d'animaux. Selon les estimations de Guérin, Réounodji, et Rangé, (2014), à l'échelle des quatre pays se partageant le lac, les cheptels sont aujourd'hui évalués entre 2 à 3 millions de têtes de bovins et à plus de 2 millions des petits ruminants. L'estimation grossière de la production bovine des systèmes fourragers dépendants totalement ou partiellement des ressources du lac est également estimée entre 250 000 et 300 000 tête par an soit

environ 40 à 60 milliards de FCFA Guérin et al (2014). Cette production est largement destinée aux grands marchés de consommation Nigérian de Maiduguri, Kano et Lagos (Magrin, Lemoalle et Pourtier, 2015), à travers un circuit de commercialisation organisé en marchés de collecte, marchés de regroupement, marché-relais et grands marchés de consommation (Lemoalle et Magrin, 2014). Au Cameroun par exemple, dans les deux marchés de collecte situés à Mada et à Madaïck dans les arrondissements de Makari et Blangoua respectivement, les productions animales dépendant du lac y sont collectées et acheminées vers le marché de regroupement de Gambaru à la frontière avec le Nigéria.

d. Dans l'arrière-pays.

Dans l'arrière-pays par contre, ce sont les activités d'agriculture et d'élevage qui dominent, et la pêche est très peu pratiquée. Au Cameroun par exemple la pêche n'est pratiquée que temporairement dans les fleuves qui traversent la zone : Chari, Serbewel, Taf Taf, et l'El Beid. L'élevage est traditionnel, associant bovins, caprins, ânes, chevaux, lapins à la volaille (poulets, pintades, canards). Pour Les principales espèces de bovins et d'ovins, le nombre moyens de têtes est de 30 à 120 têtes de bovins et 10 à 100 têtes d'ovins dans l'arrondissement de Goulfey par exemple (PNDP, 2011). En sus de l'élevage, l'agriculture essentiellement pluviale entre Juin et Septembre est majoritaire sur l'ensemble de l'arrière-pays et accompagnée de quelques espaces irrigués principalement présents aux berges des cours d'eau saisonniers ou permanents. Les tailles des surfaces agricoles sont très variables. A Goulfey par exemple, un exploitant peut disposer en moyenne de 0,5 à 02 hectares (PNDP, 2011). La production agricole est répartie entre les récoltes maraichères dans les périmètres irrigués, les récoltes de céréales de légumineuses et de tubercules en saison des pluies et les récoltes de sorghos de contre saison repiqués dans les vertisols hydromorphes. Les principales cultures concernent : l'arachide, le maïs, le sésame, le mil, le sorgho, le niébé, le soja, les haricots communs et verts, le gombo, le piment, le poivron, le poireau, l'aubergine, le manioc, la pastèque, et le concombre etc.

Pour les autres activités génératrices de revenus dans l'arrière-pays camerounais, les plans de développement communaux des six arrondissements dans cette zone renseignent sur plusieurs activités pratiquées de diverses manières par arrondissements. L'important potentiel en sable dans les arrondissements de Makary et de Goulfey est exploité et commercialisé dans les pays voisins. La coupe des arbres ou arbustes pour la commercialisation de bois de chauffe et de service dans les arrondissements de Blangoua et de Goulfey exploite le potentiel forestier. Les secteurs de l'artisanat tel que la vannerie (tissages de nattes, fabrication de seko, panier), la poterie, la cordonnerie et la forge sont développés est pratiqués partout. Ces produits sont écoulés dans les marchés locaux dont ceux de Mada (arrondissement de Makary), de, Sagné (arrondissement de Fotokol) ou de Bargaram et de Tchika (arrondissement de Hile-alifa) comptent parmi les plus importants. Dans ces marchés on retrouve également les produits de transformations

artisanales comme le riz décortiqué, la farine de mil ou de maïs et les produits manufacturés. Malgré son interdiction la chasse est pratiquée par endroit.

1.2.4. Un territoire perturbé par la crise sécuritaire

Ces différentes formes d'exploitation des ressources du lac et les multiples déplacements des populations au sein du lac et dans ses périphéries se trouvent fortement perturbés par l'insurrection de Boko Haram depuis 2009 dans la partie Nigériane et qui va s'étendre successivement au Cameroun au Niger et au Tchad à partir de 2014. L'implantation désormais effective du groupe devient véritablement perceptible dans la région du lac par des attaques meurtrières, fréquentes, perpétrées à partir de 2014. A propos des raisons de l'émergence et de la radicalisation du groupe, les causes liées au changement climatique, à l'endoctrinement ou aux revendications ethniques sont très peu probantes et il faut davantage chercher du côté de la corruption des dysfonctionnements des Etats, de la brutalité de la répression militaire avec les dégâts qu'elle a causés au sein des populations civiles pour trouver les facteurs de l'insurrection et du prolongement de la crise (Pérouse, Seignobos, et Gluski, 2018; Magrin et Raimond, 2018).

Les vastes mouvements de personne provoqués par la crise ont mis en déplacement forcés environ 2,4 millions de personnes. Dans la région du lac Tchad les zones productives des îles et des rives se sont vidées entraînant ainsi une forte perturbation du système productif qui avant la crise était caractérisé par sa capacité productive, sa résilience faces aux variabilités de l'environnement et qui assurait la sécurité alimentaire d'un arrière-pays très élargi (Magrin et Raimond, 2018). Les mesures prises contre l'insurrection à travers l'interdiction de l'agriculture, des transhumances et la fermeture des marchés transfrontaliers ont également fragilisé la sécurité alimentaire régionale et rompues les complémentarités territoriales et les relations populations/ressources à l'exemple des éleveurs aujourd'hui obligés de faire paître leurs troupeaux à l'extérieur de la zone de combat (Magrin et Raimond, 2018). Le nord-est du lac et le sud de l'espace camerounais ont enregistré le plus d'arrivées de réfugiés (figure 18) avec des conséquences certaines sur les ressources naturelles (bois de chauffe, pâturages, eau de consommation etc.) (Magrin et al., 2018; Magrin et Raimond, 2018).

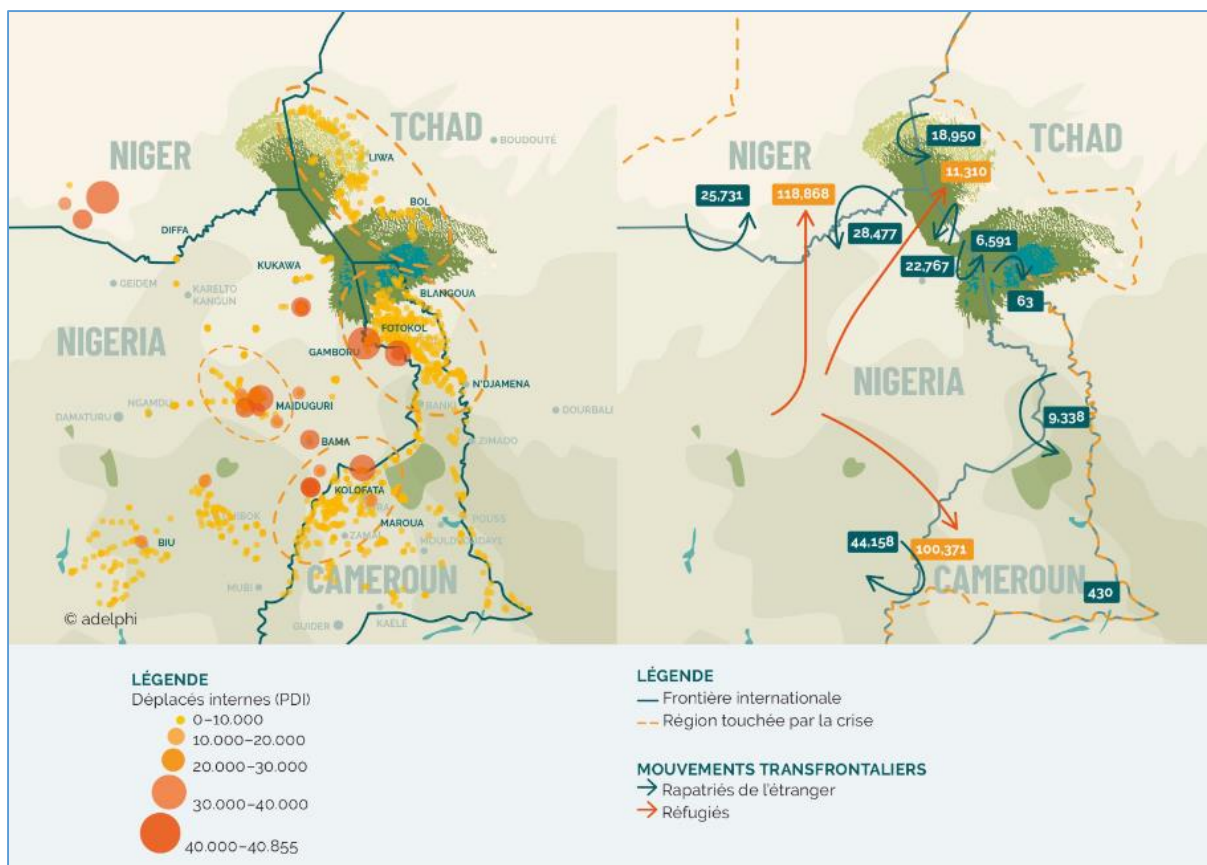


Figure 18 : Déplacements des réfugiés de la crise sécuritaire (source : <https://shoring-up-stability.org/fr/maps-infographics/>).

1.3. Les enjeux de connaissances aux rives camerounaises du lac Tchad

A l'échelle de notre zone d'étude, la thèse que Charline Rangé consacre en 2016 à la fenêtre lacustre camerounaise intitulée « *Multi-usage des ressources et mobilité : l'intensification dans une zone humide sahélienne. Le lac Tchad vu par sa fenêtre camerounaise* », interroge les enjeux autour du multi-usage des ressources, des mobilités, de la densification démographique et de l'intensification des processus productifs à travers l'analyse des dynamiques territoriales. La partie lacustre camerounaise située dans la région de l'extrême nord du pays y est décrite comme une lointaine marge vue de Yaoundé la capitale malgré son important potentiel.

« *La partie camerounaise ne compte certes que pour un douzième de l'espace lacustre mais elle bénéficie de conditions hydro-écologiques favorables. Elle offre en effet l'assurance d'une poche d'eau libre relativement vaste et de larges espaces de décrue quel que soit le niveau des eaux. Elle joue de ce fait un rôle central dans les mobilités transfrontalières, en particulier halieutiques et pastorales, impulsées par les variations du niveau des eaux. Conjuguée à son étroitesse et au désintérêt de l'Etat, la permanence des ressources naturelles fait de cette petite fenêtre un espace à l'intégrité territoriale fragile* » (Rangé, 2016).

C'est par ailleurs l'un des espaces les plus peuplées en comparaison avec les fenêtres lacustres des autres pays qui partagent le lac, avec environ 70 hab/km² dans l'arrière-pays et près de 111 400 habitants dans les rives et les îles en 2013 pour une longueur de rive d'environ 50 km (Rangé, 2016). Cette partie est également densément cultivée, et on y retrouve deux des principaux marchés à poisson du lac Tchad.

Zieba, Yengoh, et Tom, (2017) examinent les influences des migrations saisonnières agricoles, pastorales et halieutiques sur l'accès et la disponibilité des ressources dans les rives camerounaises du lac. En 2019 la gouvernance des ressources naturelles dans la partie camerounaises du lac Tchad est de nouveau analysée dans son processus de mise en place depuis les années 1950 et la durabilité de ce mode de gouvernance est questionné dans le contexte d'insécurité lié à Boko haram (Raimond et Sylvestre, 2019). Ces analyses extrêmement importantes pour la compréhension des enjeux d'occupation et d'utilisation de l'espace sont consacrées exclusivement à la partie lacustre et ses rives, et l'arrière-pays une fois de plus n'est pas concerné. Pourtant les influences des facteurs exogènes (migrations, sécheresses, variabilité climatiques, anthropisation etc...) largement démontrées dans la mise en valeur des ressources du lac s'appliquent probablement aussi à son arrière-pays.

A l'échelle du Cameroun, la fenêtre lacustre camerounaise et son arrière-pays situés dans l'extrême nord du pays appartiennent à la zone agro-écologique soudano-sahélienne (figure 19). Selon le Plan d'Action National de Lutte contre la Désertification, cette zone est la plus vulnérable au processus de désertification, soumise aux contraintes climatiques (variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie et agressivité des pluies), et se caractérise par des écosystèmes fragiles (sols très sensibles à l'érosion hydrique et éolienne, réseau hydrographique soumis aux crues annuelles brutales et à des étiages très prolongés), et une forte densité de population (forte croissance démographique, pression sur les ressources et déforestation qui conduit à une importante perte de biodiversité).

D'après le même plan les principaux impacts de la désertification et de la dégradation des terres dans cette zone se résument par :

- L'aridification du climat, le recul des isohyètes vers le Sud, le changement du régime des cours d'eau et la perturbation du cycle des pluies (intensité, variabilité spatio-temporelle) ;
- L'assèchement et/ou l'ensablement des rivières et des points d'eau, la modification du régime hydrologique des zones humides, la baisse des zones d'inondation et les pratiques de pêche inadaptées;
- La dégradation et la baisse de la fertilité des Sols, les pratiques culturelles non adaptées, une forte extension des terres hardés stériles ("Hardéisation"), l'érosion, le ruissellement, la diminution des jachères et la pollution par les pesticides ;

- La déforestation et la coupe anarchique de bois pour la satisfaction en bois de chauffage et de service, les feux de brousse tardifs, les défrichements agricoles (front pionnier/coton), la disparition des habitats naturels et la diminution de la biodiversité
- La diminution en qualité et en quantité des pâturages, le dépassement des capacités de charge, les pratiques d'élevage extensives basées sur la transhumance, l'expansion du front agricole, la disparition des pistes à bétail, les conflits agriculteurs-éleveurs et éleveurs-pêcheurs et l'insuffisance des cultures fourragères ;
- La disparition des habitats naturels, le braconnage, l'occupation anarchique des aires protégées, et la concurrence entre faune sauvage (éléphants) et systèmes agro-pastoraux (dégâts aux cultures).

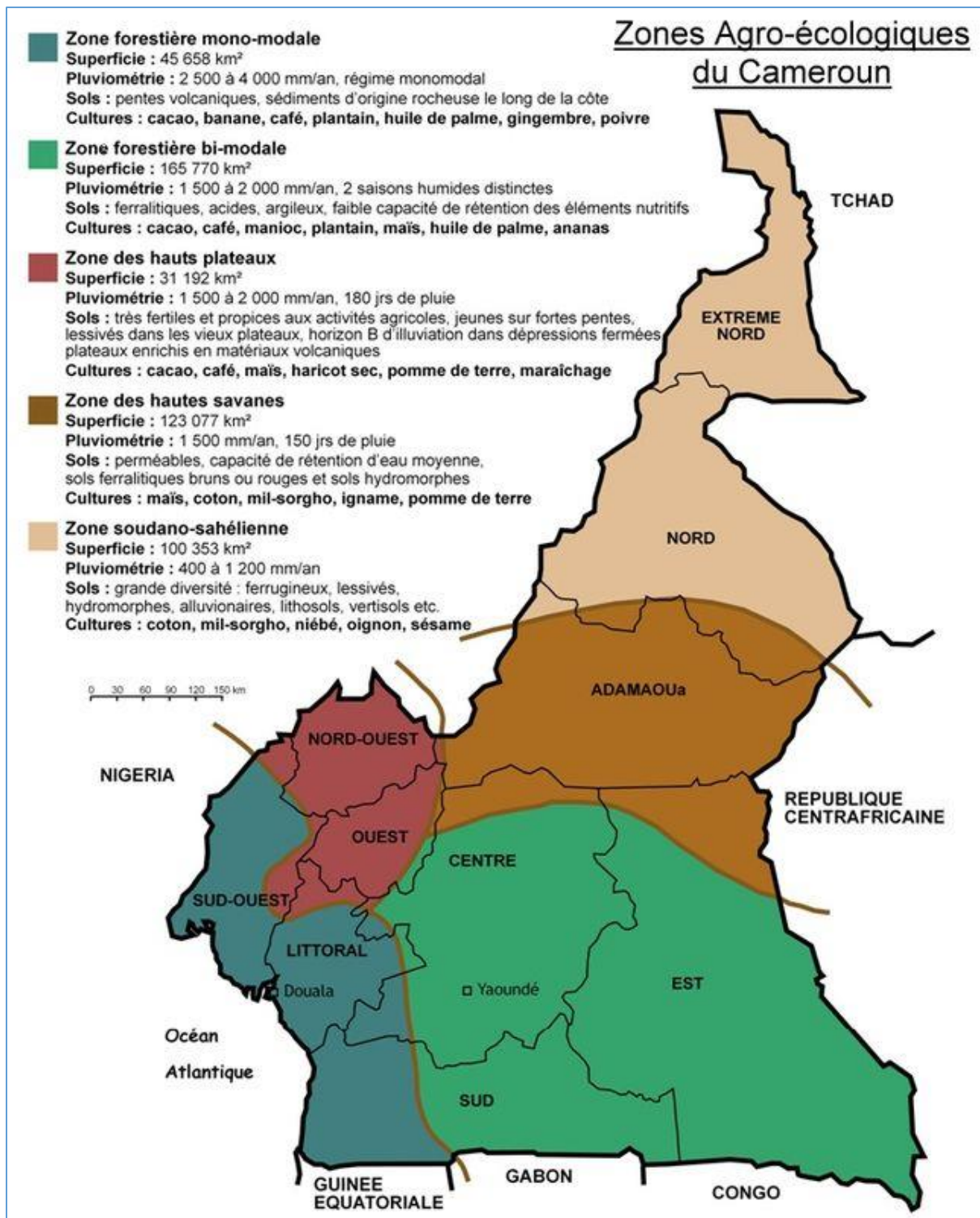


Figure 19 : Découpage agro écologique du Cameroun. Source: IRAD, 2000

1.3.1. Territoire d'étude et critère de choix

La variabilité des conditions climatiques, la disparité dans la répartition et la disponibilité des ressources entre la cuvette sud et la cuvette nord, l'éloignement du lac des centres de prises de décision notamment les capitales régionales et nationales, et plus

récemment la montée de l'insécurité due aux attaques perpétrées par le mouvement Boko Haram caractérisent la région du lac Tchad. Seule la cuvette sud où se situe la fenêtre lacustre camerounaise est régulièrement inondée et bénéficie de conditions écologiques et hydrologiques favorables qui lui assurent la permanence d'étendues d'eaux libres quelques soit le niveau de remplissage des eaux. La présence de vastes espaces de décrue propices aux activités agricoles et pastorales attirent dans cette cuvette les migrations aux grès des saisons et favorisent les mobilités transfrontalières halieutiques et pastorales notamment (Rangé, 2016). Cependant l'éloignement de cette zone des capitales nationales situées à plus de 1000 kilomètres (Lagos et Yaoundé), contribue à en faire un espace faiblement intégrée aux différents espaces nationaux. En témoignent le déploiement faible mais progressif des structures des Etats tels que les services administratifs, de santé, d'éducation, l'énergie et l'hydraulique (Lemoalle et Magrin, 2014) ; un taux d'urbanisation deux fois moins élevé en comparaison avec les moyennes nationales des différents pays du lac Tchad (Lemoalle et Magrin, 2014) ; et la mauvaise qualité des infrastructures routières. Au Cameroun par exemple, les arrondissements autour du lac sont reliés entre eux et à Kousseri le chef-lieu de département par des routes argileuses soumises aux inondations. La seule route bitumée reliant Kousseri à Maroua le chef-lieu de région est fortement dégradée (mais en cours de réhabilitation).

Le périmètre camerounais qui compte pour un douzième du lac Tchad et comprend deux des principaux marchés de pêche du lac (Darak et Kofya) et l'un des principaux marché à bétail (Mada), se distingue par son attractivité et son hétérogénéité en termes d'occupation du sol. En comparant les dynamiques démographiques du lac et de son arrière-pays étendu en 2013, à l'échelle des unités administratives de niveau équivalent entre les quatre pays (figure 20), la région de l'extrême nord du Cameroun qui par ailleurs est la plus densément peuplée à l'échelle nationale selon le dernier Recensement Général de la Population et de l'Habitat du Cameroun (RGPH , 2005), a la plus forte concentration humaine avec 122 hab/km² contre 3,7 hab/km² dans la région de Diffa au Niger, 7 hab/km² dans la région Tchadienne de Kanem et 73 hab/km² dans l'Etat du Bornou au Nigéria (Magrin, Lemoalle et Pourtier, 2015). Pour la même année Rangé, (2016) estime à 70 hab/km² la contribution des migrations saisonnières dans la densité humaine des arrondissements camerounais riverains au lac (Makary, Fotokol, Hilé-alifa, Darak, Blangoua).

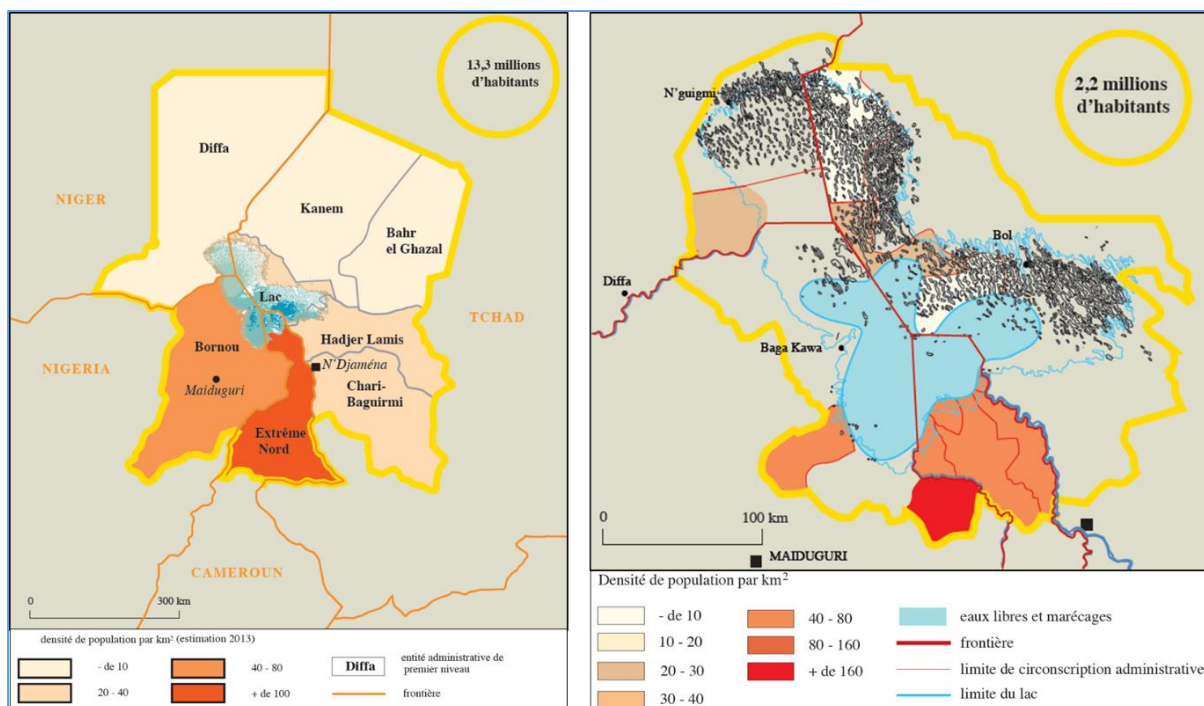


Figure 20 : Les densités de population autour du lac Tchad en 2013 (source : Magrin, 2015, in Magrin, Lemoalle et Pourtier 2015. Atlas du lac Tchad, 2015).

Par conséquent et en nous basant sur les travaux de Lemoalle et Magrin, (2014) nous délimitons le territoire d'étude de façon à circonscrire l'espace camerounais où les populations vivent et dépendent directement de l'exploitation régulière des ressources du lac. Le territoire obtenu comprend alors l'espace lacustre constitué du lac et de ses rives, et l'arrière-pays situé au-delà de 100 km du lac Tchad. Cette délimitation amène à considérer le lac et son arrière-pays comme un ensemble commun soumis aux mêmes contraintes environnementales et anthropiques.

De nombreux changements d'occupation des surfaces ont été mis en lumière dans cet espace depuis le début des années 1970 grâce notamment aux images satellitaires (Magrin, Lemoalle et Pourtier, 2015; Rangé, 2016; Gbetkom et al., 2018). Dans la zone lacustre, ils montrent la dominance quasi exclusive des eaux libres permanentes avant les sécheresses des années 1970, ensuite l'apparition des marécages et des espaces asséchés qui se sont exondés suite au retrait des eaux pendant les grandes sécheresses et enfin l'extension des eaux libres et des marécages devenus quasi permanents à partir des années 2000. Depuis le début de la décennie 2010 cet espace est occupé par les eaux libres permanentes, les marécages quasi permanents et les espaces asséchés depuis 1973 (Rangé, 2016), dont les surfaces fluctuent au cours de l'année en fonction des apports en eaux des tributaires du lac. Dans l'arrière-pays essentiellement constitué de terres fermes, les sols fortement dénudés en saisons sèches se reverdissent rapidement dès le retour des pluies (Gbetkom et al., 2018).

Ces changements récents, importants et plus ou moins irréguliers de l'occupation du sol, liés ou non aux variabilités des conditions climatiques invitent à la nécessaire analyse des interactions entre les modifications écologiques et les facteurs climatiques et humains. Par ailleurs, le multi usage de l'espace, les mobilités humaines et la multi activité, choisis comme modes d'adaptation par les populations pour palier à la variabilité spatiale et quantitative des ressources interpellent sur la question importante de l'impact des transformations des espaces et leurs rythmes. Enfin, l'attractivité de ce milieu en raison de son potentiel agricole, piscicole et pastoral observé par la densité de populations, les mouvements migratoires saisonniers et les mobilités importantes de biens et des personnes pour répondre aux besoins de diversification des activités productives, de contrôles des ressources naturelles et de gestion durable des espaces interpelle quant à elle sur la capacité de ce milieu à supporter de tels changements. Le milieu d'étude choisi (figure 21) et caractérisé par les particularités ci-dessus définies apparaît alors à nos yeux comme l'espace approprié pour une telle analyse.

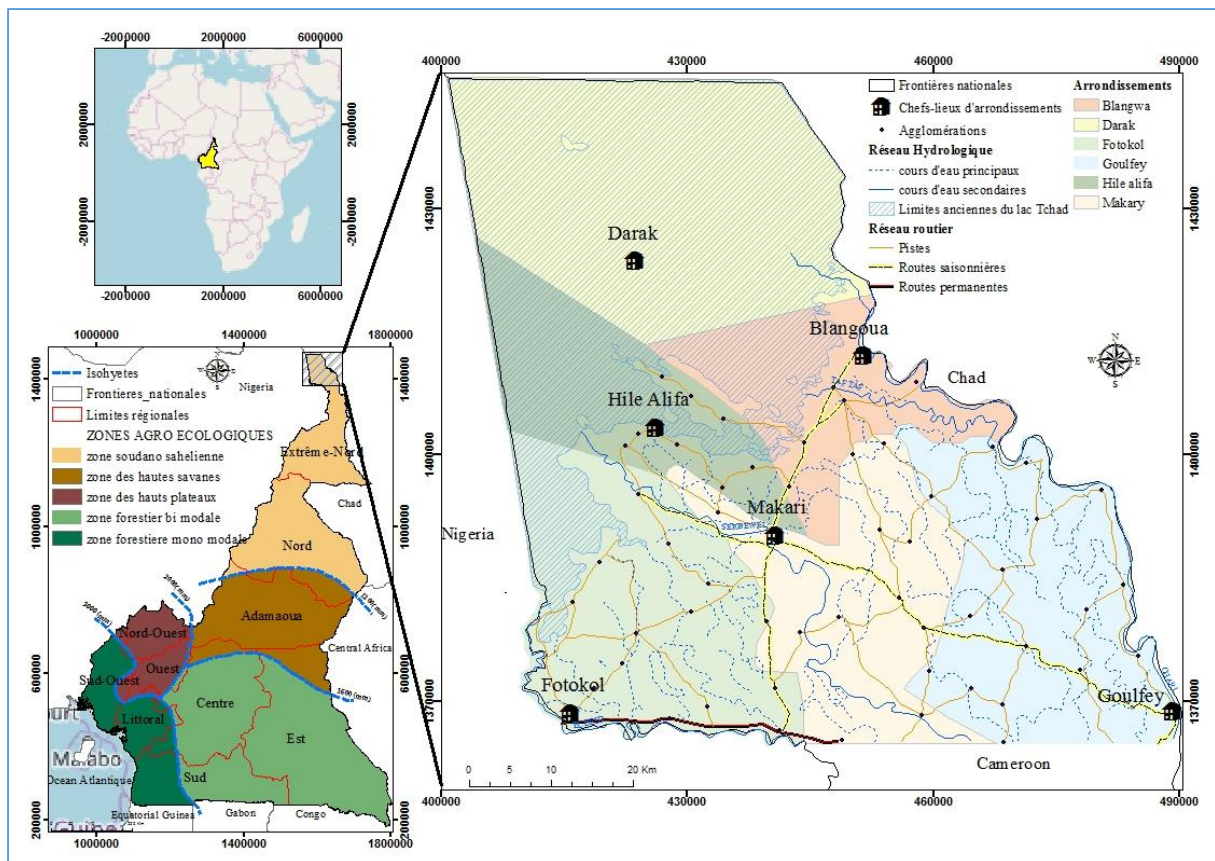


Figure 21 : Localisation de la partie camerounaise du lac Tchad et de son arrière-pays.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Le site d'étude, situé dans la partie septentrionale du Cameroun entre les parallèles 12° et 13° de latitude nord et entre les méridiens 14° et 15° de longitude Est, couvre une superficie d'environ 474 900 hectares. Partagé par les six arrondissements de Makary,

Fotokol, Hilé-alifa, Darak, Blangoua, Goulfey situés dans le département du Logone et Chari, région de l'Extrême nord, ses limites nord et est sont partagées avec la république du Tchad, et les frontières occidentales sont partagées avec la république fédérale du Nigéria.

1.3.2. Description et caractérisation du milieu

Le milieu d'étude est constitué d'une part de la fenêtre lacustre camerounaise majoritairement occupée par les eaux libres permanentes et les marécages, et d'autre part d'un arrière-pays dont l'occupation du sol varie au grès des saisons. Les rives du lac qui séparent ces deux espaces sont pour les besoins de l'étude redécoupées et catégorisées en trois unités territoriales en fonction de leur physionomie et de leur proximité avec le lac (figure 22). Ce redécoupage s'inspire également de travaux de Rangé, (2016) et de Lemoalle et Magrin, (2014) et distingue du lac vers l'arrière-pays :

- les rives intérieures constituées de marécages qui côtoient immédiatement les eaux libres permanentes le long de leurs marges nord ;
- les rives intermédiaires qui couvrent les marécages situés après les rives intérieures et dont les limites sud sont les terres nues ou non inondées depuis 1963 ;
- les rives extérieures formées de terres asséchées non inondées depuis 1963 et limitées dans leurs frontières intérieures par les rives intermédiaires et au sud par l'arrière-pays.

Dans la partie lacustre les rives servent à la fois comme indicateurs environnementaux et temporels des changements en cours (leurs aspects évoluent en fonction des niveaux de remplissage des eaux libres du lac), mais également comme indicateurs anthropiques (l'activité agricole par exemple devient importante à mesure que les eaux se retirent).

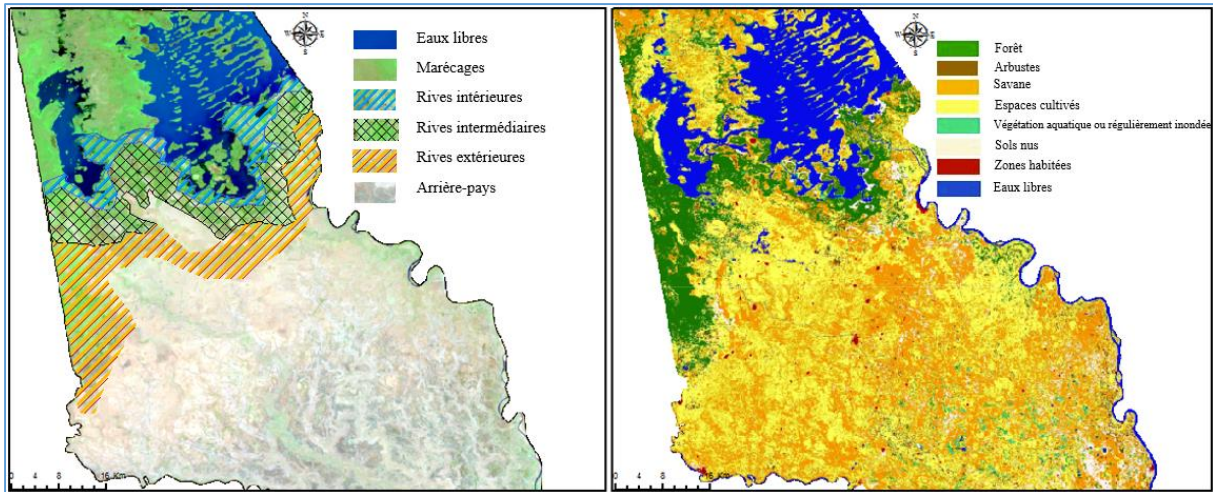


Figure 22 : Aspect physique de la partie camerounaise du lac Tchad et de son arrière-pays. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université, source : Image Landsat Avril 2015 et CCI land cover - S2 prototype land cover 20M map of Africa 2016

La classification de cet espace à partir d'images satellitaires fournit une représentation plus détaillée des éléments constitutifs du milieu. C'est l'exemple de la classification de l'occupation du sol à l'échelle du continent Africain proposée par l'Agence Spatiale Européenne. Cette classification proposée à 20 mètres de résolution spatiale, se base sur une synthèse d'image sentinel-2 de niveau 2A prises entre Décembre 2015 et Décembre 2016 et classifiées grâce aux algorithmes de "random forest" et de "machine learning". Le résultat distingue dans notre territoire d'étude : les eaux libres, le couvert végétal (composé des forêts, des arbustes, de la savane et des espaces cultivées), les sols nus, et les zones habitées.

Cependant, cette classification cache les différences de surfaces dans la répartition spatiale des classes d'occupation du sol entre les deux principales périodes climatiques de la région à savoir la saison sèche et celle des pluies. Si les espaces occupés par les eaux libres sont plus ou moins identiques entre ces deux périodes, la végétation et les sols dénudés en revanche varient significativement entre les deux saisons en particulier dans l'arrière-pays où la répartition spatiale du couvert végétal augmente pendant la période humide (figure 23).

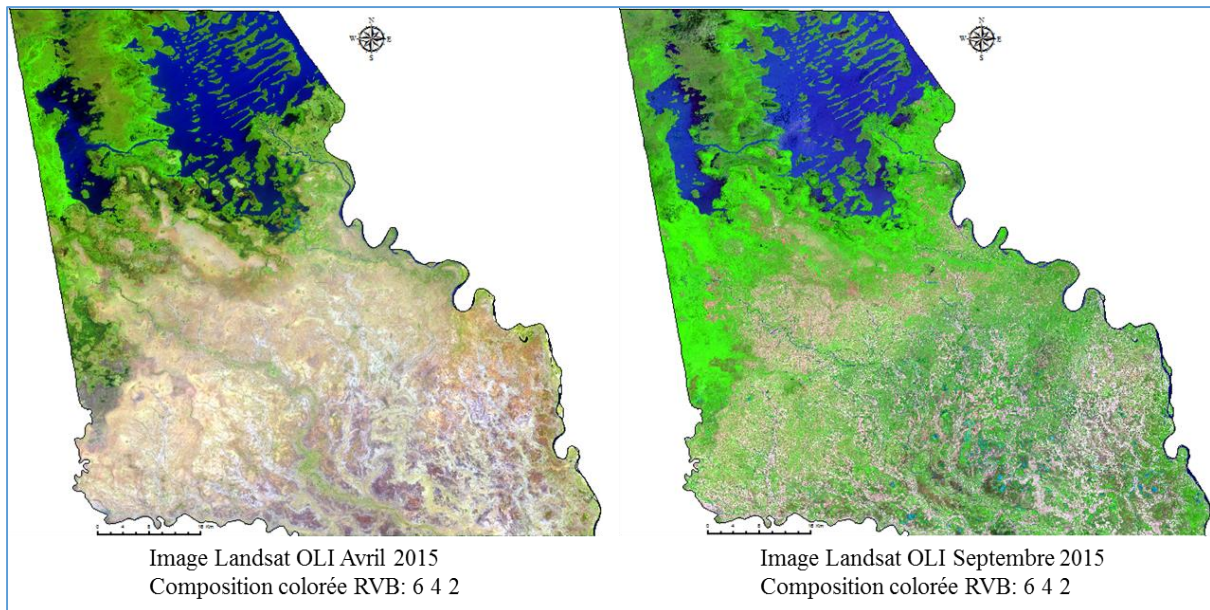


Figure 23 : Différence d'occupation des surfaces entre la saison sèche (gauche) et la saison pluvieuse (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

1.3.2.1. Structures, texture et morphologie de la surface des sols

La description des sols proposée dans cette section tient compte de la géomorphologie des sols et des potentialités agricoles qu'ils offrent (les auteurs des cartes utilisées regroupent les espaces en « Terroirs » agricoles). Au-delà de cette description, c'est aussi l'identification des indicateurs environnementaux qui est important à souligner. Par exemple, les unités géomorphologiques telles que les anciens deltas du lac ou les bourrelets de berges des fleuves sont des indicateurs temporels et géomorphologiques des changements environnementaux, et les utilisations agricoles et pastorales dans les terroirs servent comme indicateurs d'anthropisation de l'espace.

a. La géomorphologie des sols

Il y'a une variété importante de conditions et de type de sol à l'échelle du bassin du lac Tchad. Chaque type se caractérisant entre autre par la nature des matériaux originels (granite, basalte, alluvions, limons, sable, gneiss...) ; la dimension des particules en surface (qui varie des sables aux graviers et aux argiles plus fines avec l'exemple des argiles montmorillonites, d'oxyde hydratés, ou de kaolinites (Kindler et al., 1990) ; le drainage (sols bien drainés à sols très mal drainés, sols imbibés d'eau, et sols inondés saisonnièrement) ; et la profondeur qui peut être très superficielle pour les sols sur roches. Ainsi, les principaux sols présents sur le territoire du bassin du lac Tchad sont les vertisols, les sols ferralitiques, les sols ferrugineux tropicaux, et les sols hydromorphes (Gac et Tardy, 1980). L'ensemble de ces éléments sont plus ou moins télédétektés à partir de modèle numérique de terrain (Leblanc et al., 2006), et constituent des indices de

structuration du paysage et de prédisposition des espaces aux différentes formes d'exploitation agropastorales notamment.

Les sols de la zone d'étude sont constitués d'une part de sols des alluvions déposées depuis la période du paléo lac Tchad et d'autre part des sols des alluvions récents formés pendant la période récente et qui sont pour la plus part situés sur les bordures du lac et de ses rives (figure 24). La description ci-dessous proposée s'appuie des travaux de Brabant et Gavaud, (1985) ; et Seignobos et Iyébi-Mandjek, (2000).

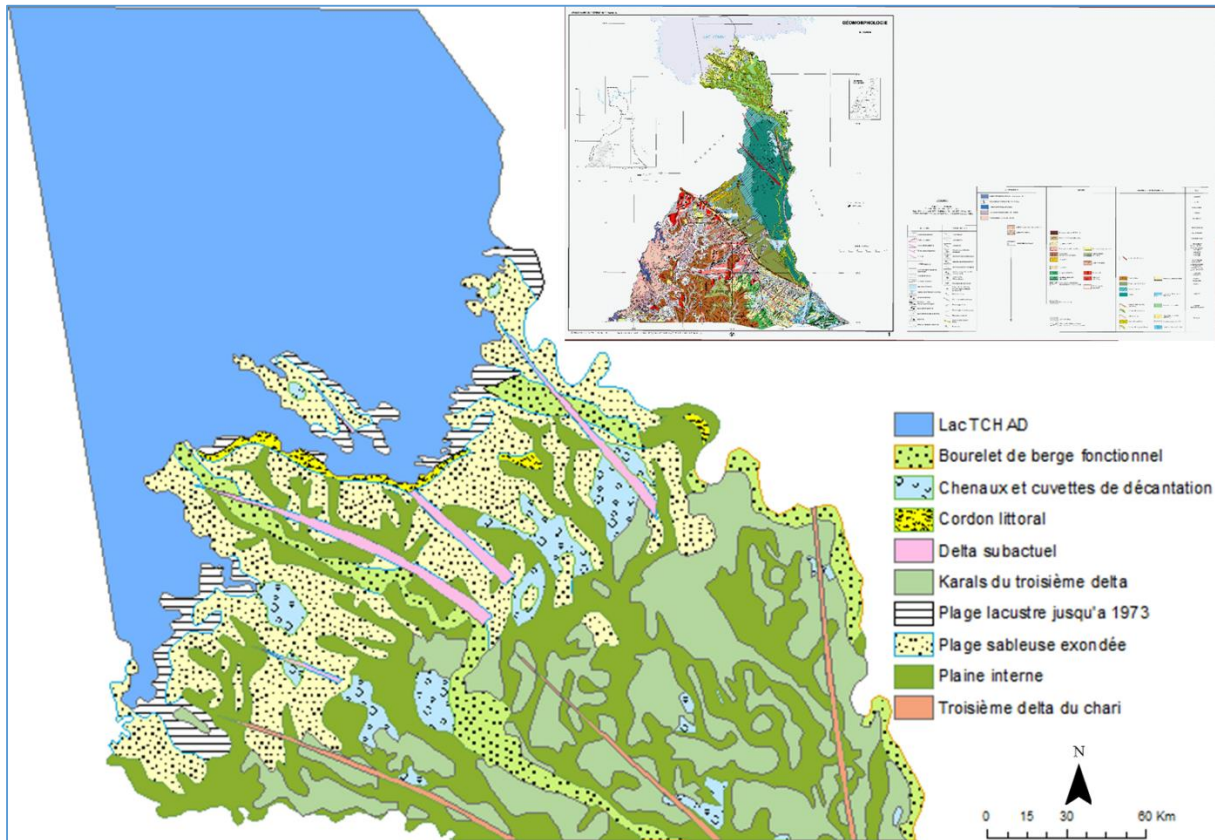


Figure 24 : Géomorphologie des sols de l'arrière-pays camerounais du lac Tchad. (Source : adapté de Morin, 2000, in Seignobos, et Mandjck 2000. Atlas de la Province Extrême-Nord Cameroun, 2000).

- Les Sols des alluvions récentes et actuelles

Plage lacustre jusque'en 1973

Apparaissent sous la forme de mosaïques de plages lacustres constituées de sables fins hydromorphe et halomorphe d'apport alluvial localement colmatés par des argiles gonflantes. Ce sont des sols lourds, très profonds dont la texture très argileuse présente des fentes de dessiccation en raison de la teneur élevée en argile gonflante. Ils sont généralement très plats, de faible pente, ce qui réduit les risques d'érosion. Saisonnièrement inondés ils possèdent un potentiel agricole et pastoral important. Mais

sont difficiles à travailler en raison de leur lourdeur. Leur capacité d'échange en surface est élevée et le bilan hydrologique est excédentaire voire très excédentaire.

Cordon littoral

C'est une dune exondée disposée le long des rives du lac Tchad et dont le matériau originel est le sable fin d'apport éolien. Ses terres sont bien drainées, plates, très profondes, constituées par une dune de sable disposée sous la forme d'un cordon. Sa texture sableuse le rend facile à travailler mais l'expose également aux risques de dégradation éoliens, surtout que les pentes sont comprises entre 3 et 15 %. La capacité d'échange en surface est faible et le bilan hydrologique déficitaire.

Plage sableuse exondée

C'est un ensemble de plaine sableuse disposé en bordure du lac Tchad, plates en surface, très profondes, avec une pente très faible toujours inférieures à 1%. De texture sableuse uniforme, le matériau originel est le sable fin d'apport alluviale. Ces sols dont la profondeur excède toujours 200 cm sont légers et donc faciles à exploiter pour des besoins agricoles. Ils sont peu évolués, mal drainé avec un faciès de surface de type calcique. En bordure du lac Tchad, la surface de ces plaines est compacte par endroit et laisse apparaître les empreintes de croûte de battance. Leur capacité d'échange en surface est faible et le bilan hydrique est équilibré.

Chenaux et cuvettes de décantation

Mosaïque de plaine sableuse temporairement inondés, situées en bordure du lac Tchad, plate en surface et de faible pente. Ce sont des sols peu évolués, d'apport alluvial, au faciès hydromorphe, généralement très profonds et légers avec pour matériau originel l'argile fin. Leur texture est soit sablo-argileuse, soit argileuse, ou sableuse. Le travail agricole de ces sols est facile en raison de leur texture. La capacité d'échange en surface est moyenne et le bilan hydrique est équilibré.

Karals du troisième delta

Ce sont des sols inondés de plaines de décantation argileuse dont le paysage est également constitué par une mosaïque de plaine. Leur texture est argileuse ou sablo-argileuse, et repose sur un matériau originel fait d'argile fluviatile et fluvio-lacustre. Ce sont des vertisols hydromorphes lourds et très profonds, neutres et de natures subalcalins carbonatés. Très plats en surface, leur pente moyenne est faible et inférieure à 3%. En raison de cette forte teneur en argile, leur aspect physique est étroitement lié à la quantité d'eau qu'ils contiennent. Ainsi, ils apparaissent gonflants en saison des pluies, mais le retrait des eaux pendant la saison sèche les assèche et laisse apparaître les fentes de dessiccations. Malgré que ces sols soient difficiles à travailler en raison de leur lourdeur, leur capacité de rétention d'eau est mise à profit pour prolonger la période de

culture après le départ des pluies et permet la culture de sorgho de contre saison ou de décrue. Leur capacité d'échange en surface est très élevée, et leur bilan hydrique est équilibré en générale mais déficitaire dans les zones dégradées.

- Sols exondés des alluvions anciennes

Regroupe les bourrelets de berge fonctionnels formés sur alluvions et les plaines internes formés sur socle granitique. C'est une mosaïque constituée de bourrelet de berge fonctionnel formé sur alluvions et de plaine interne du delta ancien du Logone formés sur socle granitique. Leur texture est sableuse à sablo-limoneuse du fait du type de matériaux originels à savoir sable et limon d'apport alluvial et de faciès hydromorphe dans les berges et lits fonctionnel ou d'érosion dans les plaines. Ce sont des sols profonds peu évolués, particulièrement dénudées de couleur gris claire en général. Ondulées ou presque plats avec une pente moyenne variant entre 1 et 4 %. Les surfaces recouvertes d'une fine pellicule laisse apparaitre des affleurements rocheux par endroit. En raison de leur extrême compacité, l'eau ruisselle beaucoup plus qu'elle ne s'infiltré et augmente ainsi les risques d'érosion hydrique. L'épaisseur des sols étant faible, les horizons humidifiés s'assèchent très rapidement ce qui rend l'exploitation agricole de ces sols très difficile. Leur capacité d'échange est faible en surface et leur bilan hydrique est déficitaire voir très déficitaire.

b. Les potentialités des sols

A l'aide d'une carte de potentialité des sols qui s'inscrit vraiment dans la logique des cartes d'utilisation des sols, Seignobos et Iyébi-Mandjek, (2000) regroupent ces formations pédologiques en terroirs agricoles qui décrivent les potentialités agronomiques des sols en prenant en compte les éléments naturels et anthropiques (figure 25). La différenciation qu'ils utilisent obéit à une hiérarchisation de critère qui définit le type et la nature du drainage comme étant celui de premier ordre ; la texture des sols comme le critère de deuxième ordre ; et la pédologie des sols, la couverture végétale naturelle et les modes de production comme critères de troisième ordre.

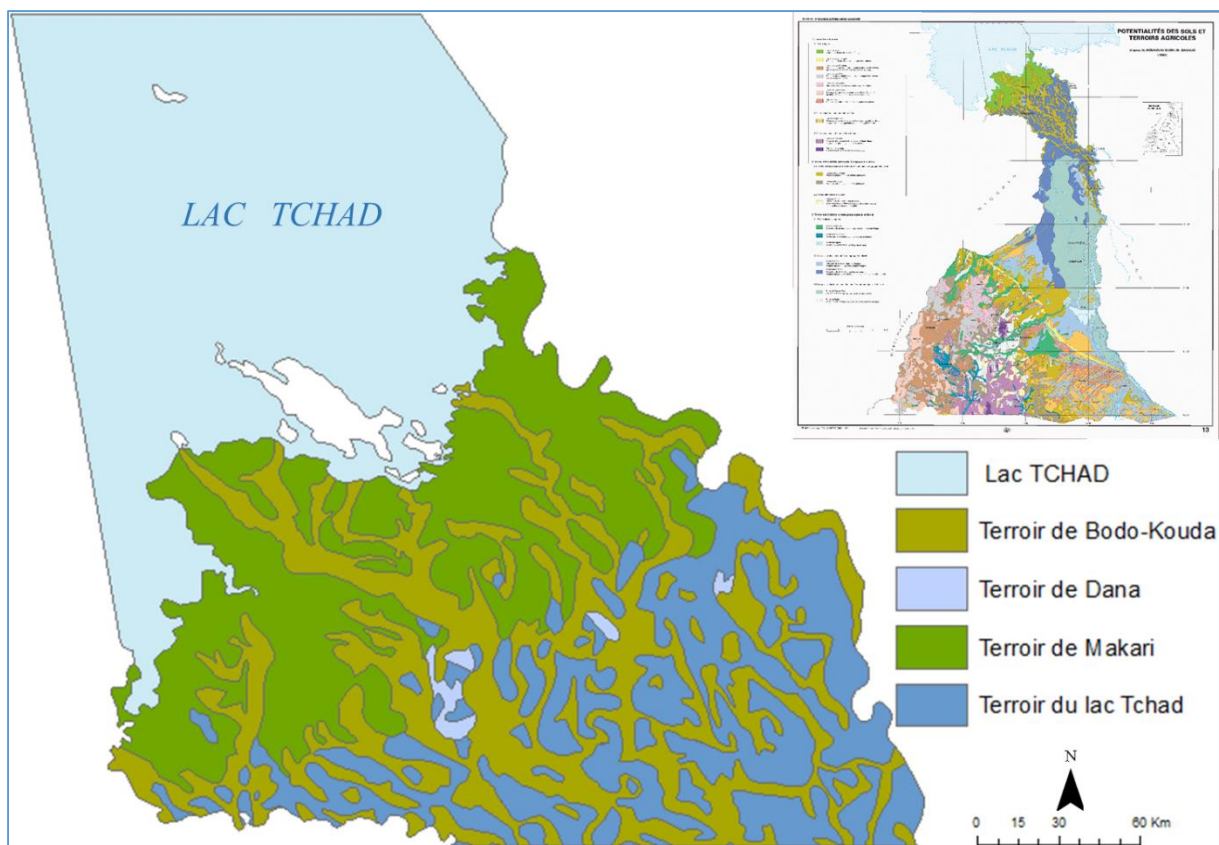


Figure 25 : Géomorphologie des sols de l'arrière-pays camerounais du lac Tchad. (Source : adapté de Seignobos et Moukouri, 2000, in Seignobos, et Mandjeck 2000. Atlas de la Province Extrême-Nord Cameroun, 2000).

Ainsi, ils distinguent parmi les terres bien drainées, le terroir de Makari qui englobe les plages lacustres depuis 1973, le cordon littoral, les plages lacustres exondées et les chéneaux et cuvettes de décantation, regroupe les terres légères peu évoluées de formations récentes, sur sables lacustres bruns. L'irrégularité de la montée et du retrait des eaux rendent les récoltes aléatoires et ne favorise pas l'agriculture à grande échelle. La mise en culture des terres se limite donc à de petites exploitations autour des maisons et les cultures pratiquées sont celles du maïs, du niébé et de cucurbitacées. La valorisation des pâturages de saison de pluies dans ce terroir s'étend jusqu'aux espaces en périphérie du lac Tchad. Les sols sont pour certains exposés aux risques d'érosion éolienne à cause de leur texture et de l'action du vent.

Ensuite les terres mal drainées à engorgement pluvial où on rencontre le terroir de Bodo-kouda et qui comprend les bourrelets de berges fonctionnels et les plaines internes. Les sols ici reposent sur des alluvions et sont essentiellement solonetziques avec un taux de matières organiques important ou vertisols à hydromorphie importante. Ils sont pourtant faiblement adaptés aux activités agricoles et les cultures ici se limitent aux graminées comme le sorgho de contre saison et le niébé dans les zones inondables, ou aux mils et maïs sur les sols plus légers.

Enfin les terres mal drainées à engorgement pluvial et fluvial auxquelles appartiennent les terroirs du lac Tchad et de Dana.

Terroir du lac Tchad correspond au karals du troisième delta où les sols sont lourds, profonds, de texture argileuse ou sablo argileuse et constitués d'alluvions compactes et sèches en saison sèche mais collant en saison des pluies. Ces sols sont essentiellement dédiés à la culture de muskwari ou sorghos de décrue grâce à leur forte capacité de rétention d'eau et servent également de pâturage.

Le terroir de Dana très faiblement représenté à l'échelle de la zone d'étude couvre les chéneaux et cuvettes de décantation et une petite partie des karals du troisième delta. Ce sont des sols hydromorphes de texture sableuse régulièrement inondés par les pluies où les écoulements fluviaux avec un taux de matière organique faible. L'exploitation agricole de ces sols nécessite absolument la mise en place d'un système d'irrigation notamment pour les portions de ce terroir qui sont présentes dans la zone d'étude.

1.3.2.2. Caractérisations topographiques des sols

En raison de son influence dans la répartition et le maintien de la couverture végétale, la désagrégation mécanique et l'altération chimique des sols, le maintien des sols notamment les horizons arables, l'érosion hydrique et éolienne de ceux-ci, et le cycle de l'eau entre autres, la topographie des sols est un paramètre important. Le profil topographique de la zone d'étude montre une augmentation croissante de l'altitude des sols, qu'il est possible de regrouper en 05 classes de niveau d'altitude (figure 26). Les altitudes les moins élevées comprises entre 253 et 280 mètres correspondant aux eaux libres, suivies successivement des marécages 280-284 mètres ; des rives extérieures et exondées 284-288 mètres ; des terres non inondées 288-292 mètres ; et du sud de l'arrière-pays 292-317 mètres (figure 26). Cependant, cette classification cache l'homogénéité topographique apparente des sols et la faible variation de leur pente en particulier dans l'arrière-pays. Les pentes influencent directement le ruissellement, l'infiltration et la concentration des eaux dans le sol et sont par conséquent également importantes pour l'appréciation de la sensibilité des sols à la dégradation, notamment en milieux arides et semi arides. A l'exception de quelques îles des rives extérieures et des terres au nord de l'arrondissement de Goulfey, les pentes sont essentiellement faibles dans ce milieu et varient en majorité entre 1 et 3 % (figure 26).

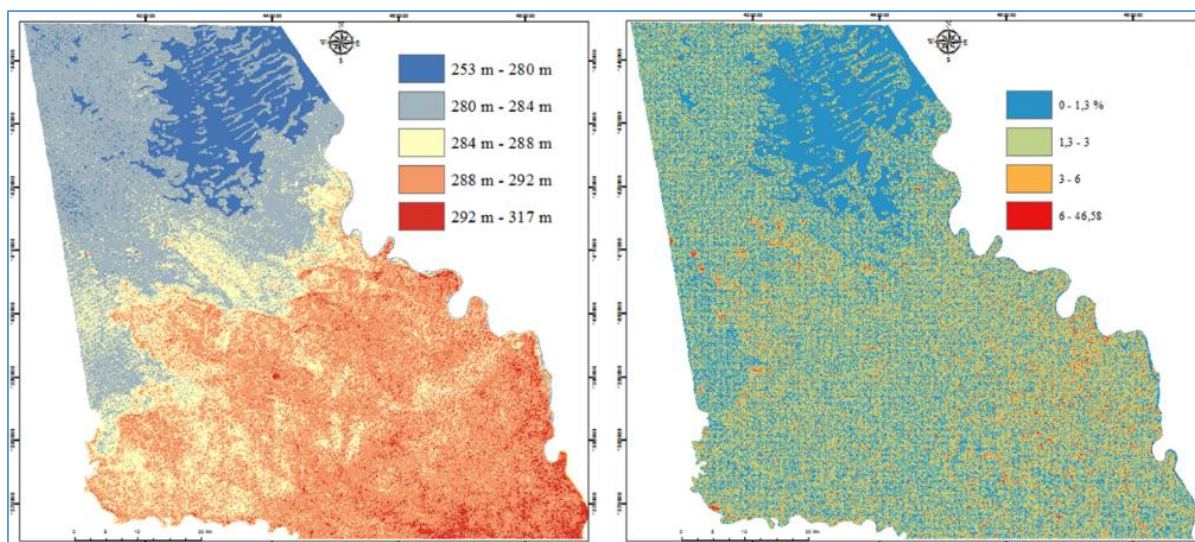


Figure 26 : Reliefs et pentes des sols dans le territoire d'étude. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Les eaux libres dont la côte (altitude moyenne) est d'environ 280 mètres et au-dessous, correspondent aux niveaux du lac dans son état de « PETIT TCHAD » et celles dont la cote du plan d'eau est de 282 m environ matérialisent le lac dans son état de « MOYEN TCHAD » (Tilho, 1928). Le niveau actuel de petit Tchad laisse apparaître au milieu des eaux libres, des îlots de végétation ou des hauts fonds végétalisés submergés pendant les crues et exondés lors du retrait des eaux et dont l'altitude est comprise entre 282 et 285 mètres (figure 27).

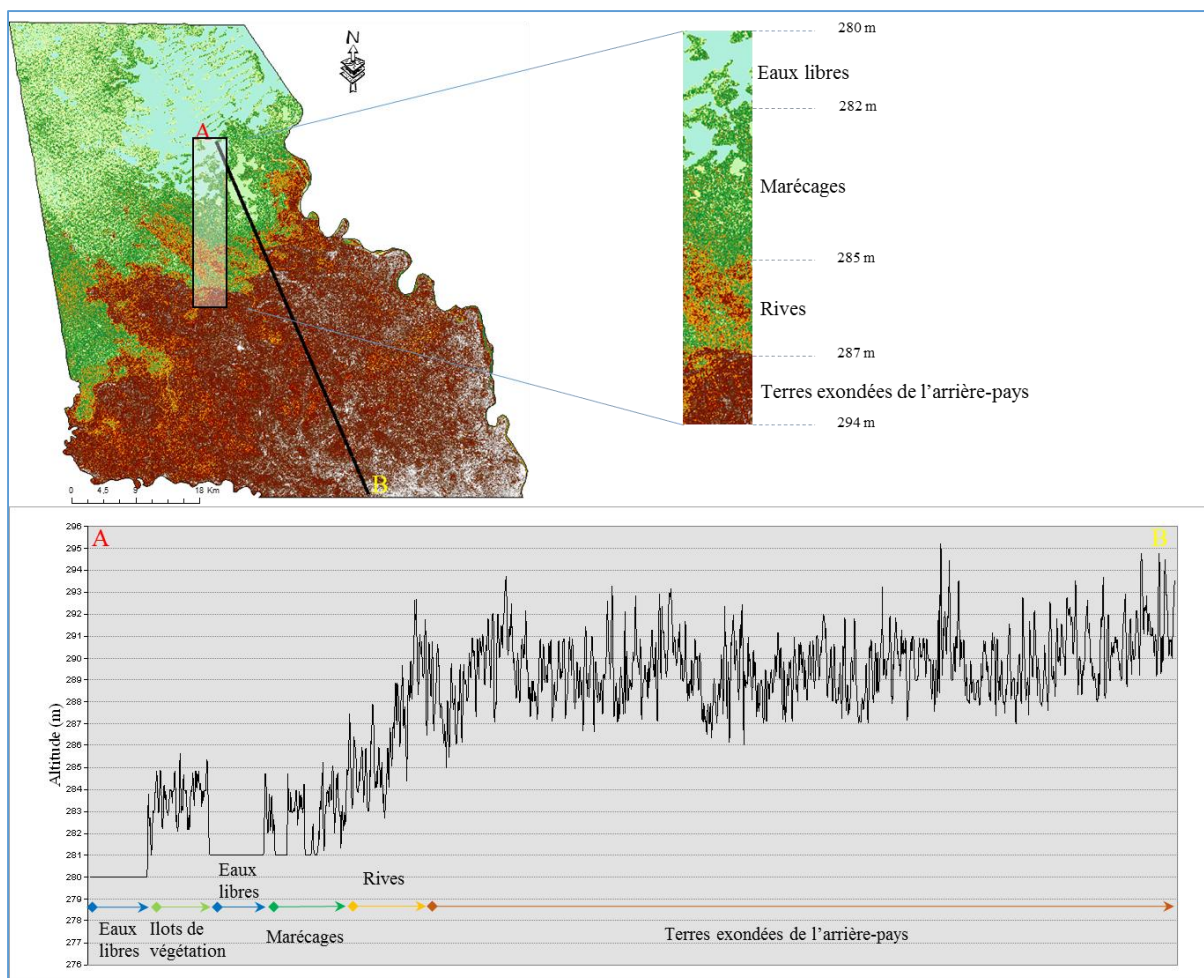


Figure 27 : Evolution du relief des sols de la partie inondée vers l'arrière-pays camerounais du lac Tchad. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

En l'état actuel, les marécages ont également une altitude variant entre 282 et 285 mètres mais apparaissent par contre en périphérie des eaux libres. Entre les altitudes 283 et 287 mètres se trouvent les rives qui jouxtent les marécages et constituées principalement des rives extérieures qui n'ont plus été inondées depuis 1963. A partir des terres exondées de l'arrière-pays, l'altitude excède les 287 mètres et peut atteindre en moyenne le niveau 293. Au-delà de ces valeurs, c'est d'avantage la faible variation des altitudes dans l'arrière-pays et son aspect plat qu'il faut souligner à nouveau.

1.3.2.3. Caractéristiques du couvert végétal

La couverture végétale sur l'ensemble formé par le lac Tchad et ses écosystèmes associés est fonction du type de substrat rencontré, de la teneur en sels dissous et des variations du niveau d'eau du lac, en particulier pour ce qui est de la végétation du lac et de celle de ses rives. Cette dernière par exemple, majoritairement composée de macrophytes, est largement influencée par la profondeur d'eau, l'intensité des vents et des courants, la composition physico-chimique de l'eau et l'amplitude des variations du

niveau d'eau du lac (Beaudoin, 2010). Par conséquent, certaines espèces rencontrées dans la cuvette sud diffèrent de celles de la cuvette nord totalement ou partiellement asséchée. En effet, Kiari, (2014) constate à juste titre depuis le delta du Chari vers le nord du lac une dominance progressive, des Typha, puis celle des Phragmites vers le nord ; l'abondance puis la disparition progressive des Cyperus papyrus (absents de la cuvette nord) ; une dominance puis une disparition progressive des prairies aquatiques à Vossia ; et une disparition progressive de nombreuses espèces et groupements aquatiques liés aux eaux douces (nymphaies, utriculaire, etc.).

De façon générale, la CBLT, (2015) présente la végétation au sein du lac et dans ses environs comme étant plutôt clairsemée et dominée par des grands ensembles végétaux tels que les steppes arbustives, les prairies, les formations désertiques et la végétation aquatique constituée par un phytoplancton qui compte une centaine d'espèces d'algues environ.

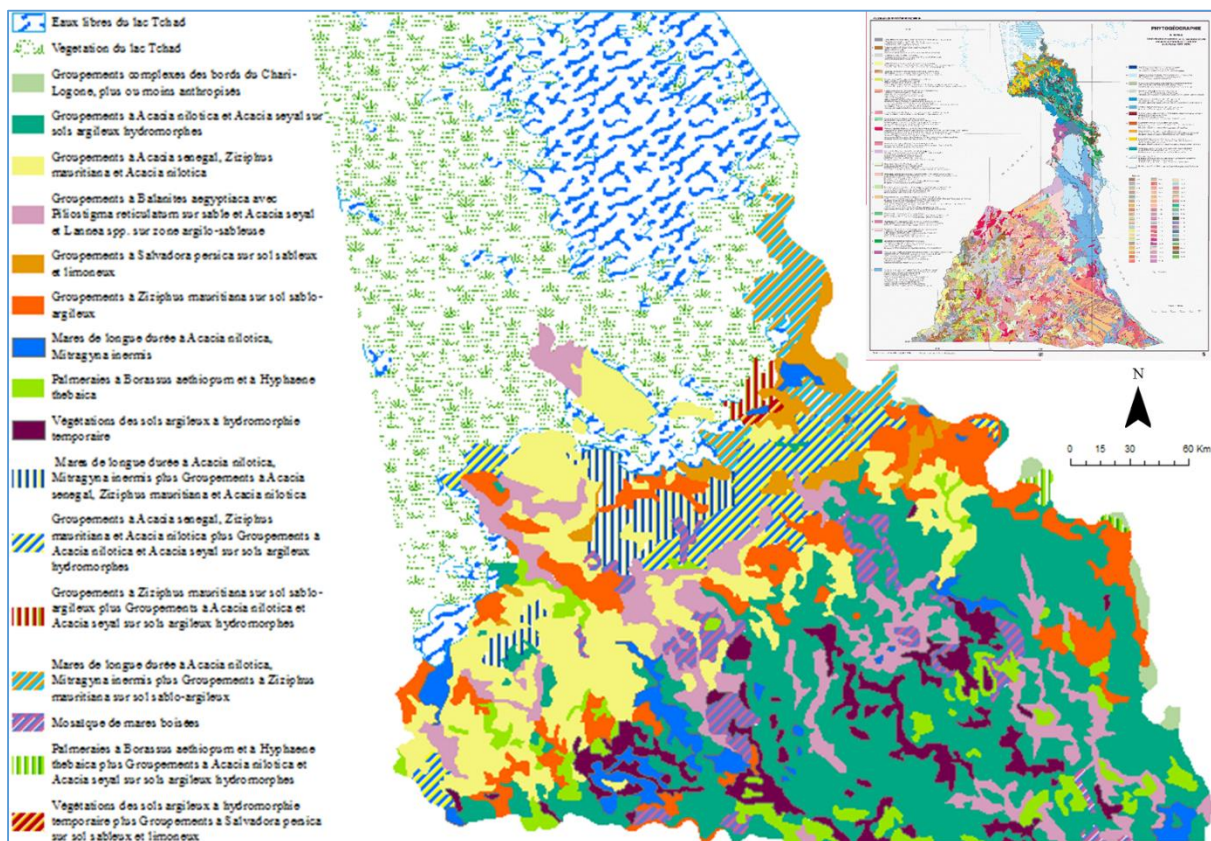


Figure 28 : Répartition des essences végétales sur le territoire d'étude en 1998. (Source : adapté de Seignobos, 1998, in Seignobos, et Mandjeck 2000. Atlas de la Province Extrême-Nord Cameroun, 2000).

Dans les travaux de Seignobos et Iyébi-Mandjek, (2000) qui renseignent sur la répartition des espèces végétales dans la région de l'extrême nord Cameroun, 18 groupements végétaux et associations de groupements végétaux recouvrent notre aire

d'étude (figure 28). Deux d'entre elles dominent de façon homogène la partie lacustre, tandis que l'arrière-pays est recouvert d'une mosaïque hétérogène de plusieurs groupements végétaux et associations de groupements végétaux. Cette phytogéographie renseigne sur l'importante diversité floristique et indique les conditions environnementales de la zone d'étude à propos notamment des types de sols (les formations végétales sur sols inondés, sur sols sableux, sur vertisols etc.), de l'action anthropique (déforestation), du climat (végétation annuelle et pérenne), ou des fluctuations des niveaux d'eau du lac. Pour ces raisons, leur répartition dans le temps sert à mesurer les changements environnementaux liés au climat ou aux modes d'exploitations des espaces.

a. Les groupements végétaux

Dans les eaux libres, la végétation est dominée par les espèces d'eaux douces comme *Ceratophyllum demersum*, *Lemna aequinoctialis*, *Pistia stratiotes*, *Nymphaea lotus* et *Nymphaea guineensis*. A celles-ci s'ajoutent d'une part les grands herbacées tels que *Cyperus papyrus*, *Phragmites australis*, *Typha domingensis*, *Echinochloa pyramidalis* qui se développent sur les îlots flottants encore appelés Kirtas, et d'autre part les espèces comme *Ipomoea aquatica*, *Ipomoea rubens*, *Luffa echinata* présentes sur les tiges en décomposition.

La végétation du lac Tchad régulièrement représentée comme marécages (Lemoalle et Magrin, 2014; Gbetkom et al., 2018) est présente aux rives des eaux libres. Sa composition est étroitement liée aux fluctuations du niveau d'eau du lac. En fonction de la hauteur des eaux et de la durée des crues celle-ci peut être considérée comme végétation d'eaux libres ou des rives. Les espèces ligneuses présentes sont *Polygonum senegalense*, *Mimosa pigra*, *Aeschynomene elaphroxylon*. Les herbacées sont composés de *Jussiaea repens* var. *diffusa*, *Jussiaea* sp., *Vossia cuspidata*, *Polygonum senegalense*, *Cyperus maculatus*, *Cyperus bulbosus*, *Cyperus articulatus* en sus des *Phragmites australis*, *Typha domingensis*, *Cyperus papyrus* présents sur les îlots. Selon la nature du substrat on peut également rencontrer dans des proportions très variantes des espèces comme *Jussiaea leptocarpa*, *Jussiaea erecta*, *Phragmites australis*, *Typha domingensis*, *Leersia hexandra*, *Ipomoea aquatica*, *Ipomoea rubens*, *Sacciolepis africana*, *Paspalidium geminatum*, *Aeschynomene pfundii*, *Sesbania rostrata*.

Les groupements complexes de végétaux présents sur les bourrelets en bordures du Chari-Logone : ce sont des espaces sur sols sablo-argileux, parfois cultivés dont les essences ligneuses sont composées de *Mitragyna inermis*, *Combretum glutinosum*, *Borassus aethiopicum* et les herbacées de *Andropogon gayanus*, *Panicum anabaptistum*, *Hyparrhenia rufa*.

Les Groupements d'*Acacia nilotica* et *Acacia seyal* est l'un des plus dominants de l'arrière-pays en terme de superficie. Ces espèces prospèrent sur les sols de type hydromorphe « yaérés » qui dominent dans le sud de l'arrière-pays. Les autres espèces ligneuses tel que *Balanites aegyptiaca*, *Mitragyna inermis*, *Acacia sieberana* sont

également présentes mais moins dominantes et sont accompagnées d'essences herbacées comme *Echinochloa colonum*, *Panicum laetum*, *Brachiaria lata*.

Acacia senegal, *Ziziphus mauritiana* et *Acacia nilotica* forment des groupements d'espèces situés sur les terres exondées qui jouxtent les rives extérieures du lac Tchad. Dans cet ancien delta du lac, les sols sont argilo sableux et la présence de mares à inondations temporaires favorisent la prolifération de ces ligneux auxquels s'ajoutent *Acacia seyal*, *Balanites aegyptiaca*, *Capparis* sp., *Cadaba farinosa*, *Piliostigma reticulatum*, *Tamarindus indica*, *Acacia sieberiana*, *Boscia senegalensis*, *Faidherbia albida*, *Calotropis procera*. Les herbacées sont entre autres *Brachiaria xantholeuca*, *Aristida adscensionis*, *Panicum laetum*, *Chloris* spp *Digitaria ciliaris* *Brachiaria lata*, *Echinochloa colona*, *Acroceras amplexans*, *Dinebra retroflexa*, *Schoenefeldia gracilis*, *Indigofera crassifolia*, *Sporobolus helvolus*, *Hygrophila spinosa*.

Les Groupements à *Balanites aegyptiaca* avec *Piliostigma reticulatum* lorsque le sol est sableux, ou avec *Acacia seyal* et *Lanea* spp. Lorsque le substrat est argilo-sableux. Dans un cas comme dans l'autre, l'espèce dominante reste *Balanites aegyptiaca*. En fonction du type de substrat et de son état de dégradation on peut retrouver également en ligneux *Bauhinia rufescens*, *Ziziphus mauritiana*, *Tamarindus indica*, *Acacia seyal*, *Acacia nilotica*, *Acacia sieberiana*, *Boscia senegalensis* et *Calotropis procera* et en herbacées *Chloris prieurii*, *Chloris pilosa*, *Leptadenia hastata*.

Les Groupements à *Salvadora persica* qui forment avec *Acacia senegal* la dominante ligneuse sur sol sableux et limoneux à l'ouest du delta du Chari près de Blangwa. Les autres espèces ligneuses sont *Cordia sinensis*, *Boscia senegalensis*, *Cadaba farinosa*, *Capparis* spp. *Balanites aegyptiaca*, *Ziziphus mauritiana*, *Acacia seyal*, *Securinega virosa*, *Hyphaene thebaica*. Les herbacées dominants sont *Schoenefeldia gracilis*, *Aristida* sp auxquels se rajoutent *Aristida adscensionis*, *Brachiaria xantholeuca*, *Aristida mutabilis* *Sporobolus festivus*, *Chloris prieurii*, et *Chloris pilosa*.

Groupements à *Ziziphus mauritiana* présents en bordures des yaérés et dans les terres exondées notamment sur des sols sablo-argileux. Les autres ligneux rencontrés sont *Acacia seyal*, *Acacia nilotica*, *Cordia sinensis*, *Boscia senegalensis*, *Cadaba farinosa* *Balanites aegyptiaca*, *Bauhinia rufescens*, *Maerua crassifolia*. Ici, le tapis herbacé clairsemé est dominé par *Aristida adscensionis*, *Brachiaria ramosa*, *Chloris pilosa*.

Les mares de longue durée situées dans les anciens lits du Chari et qui sont soit de type *Acacia nilotica* ou de type *Mitragyna inermis* pour celles situées le long des cours d'eau permanents ou semi permanents. Les ligneux fréquents sont entre autres *Crateva andansonii*, *Acacia polyacantha* *Acacia sieberiana* *Tamarindus indica*. Les espèces herbacées sont *Panicum anabaptistum*, *Echinochloa stagnina*, *Oryza barthii*, *Acroceras amplexans*, *Ipomoea aquatica*.

Les Palmeraies de *Borassus aethiopum* et d'*Hyphaene thebaica* sont généralement présentes sur les bourrelets de berges des cours d'eau ou de mares, le plus souvent sur

des sols sablo-argileux. En plus de ces deux espèces on dénombre également la présence des ligneux comme *Ziziphus mauritiana*, *Faidherbia albida*, *Acacia sieberana*, *Celtis integrifolia*, *Ficus gnaphalocarpa*, *Piliostigma reticulatum*, *Crateva adansonii*. Le couvert herbacé est fait de *Vetiveria nigritana*, *Hyparrhenia rufa*, *Eragrostis barteri*, *Hyperthelia dissoluta*, *Andropogon Gayanus*, *Andropogon pseudapricus*.

Sur les sols argileux temporairement hydromorphes présents en bordure des cours d'eaux, les espèces ligneuses régulièrement présentes sont *Acacia seyal*, *Balanites aegyptiaca*, *Bauhinia rufescens*, *Boscia senegalensis*, l'une pouvant dominer seule ou être accompagnée des autres. Les autres ligneux rencontrés sont *Tamarindus indica*, *Faidherbia albida*, *Diospyros mespiliformis*, *Ziziphus mauritiana*. Parmi les herbacés présents il y'a *Panicum laetum*, *Eragrostis pilosa*, *Sporobolus capensis*.

b. Les associations de groupements végétaux

Elles sont en totalité présentes dans l'arrière-pays et se développent en majeure partie sur des substrats sableux, argileux ou sablo-argileux situés dans les rives ou près de celles-ci. C'est l'exemple de l'association entre les mares de longue durée à *Acacia nilotica* ou *Mitragyna inermis* et les groupements à *Acacia senegal*, *Ziziphus mauritiana* et *Acacia nilotica* avec présences des espèces ligneuses comme *Crateva andansonii*, *Acacia polyacantha*, *Balanites aegyptiaca*, *Cadaba farinosa*, *Boscia senegalensis*, *Faidherbia albida*, *Calotropis procera* et des herbacés comme *Echinochloa stagnina*, *Oryza barthii*, *Acroceras amplexans*, *Ipomoea aquatica*, *Brachiaria xantholeuca*, *Aristida adscensionis*, *Panicum laetum*, *Chloris* spp. C'est aussi le cas pour l'association entre les groupements à *Ziziphus mauritiana* sur sol sablo-argileux avec les groupements à *Acacia nilotica* et *Acacia seyal* présents sur sols argileux hydromorphes (Ligneux : *Acacia seyal*, *Acacia nilotica*, *Cordia sinensis*, *Boscia senegalensis*, *Cadaba farinosa*, *Balanites aegyptiaca*, *Mitragyna inermis*, *Acacia sieberana* ; Herbacés : *Aristida adscensionis*, *Brachiaria ramosa*, *Chloris pilosa*, *Echinochloa colonum*, *Panicum laetum*, *Brachiaria lata*).

Par contre, les mosaïques formées par les mares boisées d'*Acacia nilotica* et de *Mitragyna inermis* avec les groupements à *Balanites aegyptiaca* et *Ziziphus mauritiana* sont situées loin des rives sur des substrats hydromorphes. L'association entre les palmeraies de *Borassus aethiopicum* et à *Hyphaene thebaica* avec les groupements d'*Acacia nilotica* et d'*Acacia seyal* (Ligneux : *Balanites aegyptiaca*, *Mitragyna inermis*, *Acacia sieberana*, *Ziziphus mauritiana*, *Faidherbia albida*, *Acacia sieberana*, *Celtis integrifolia* ; Herbacées : *Echinochloa colonum*, *Panicum laetum*, *Brachiaria lata*, *Hyperthelia dissoluta*, *Andropogon Gayanus*, *Andropogon pseudapricus*) se situent sur sols argileux hydromorphes des berges du Chari.

1.3.2.3. Récapitulatif des caractéristiques du milieu d'étude.

L'ensemble des données (cartes thématiques, MNT, etc.) utilisées pour la description du milieu d'étude, sont dans la suite des travaux (chapitres 3, 4 et 5) assemblées et intégrées dans un SIG (après numérisation pour celles qui l'exigent). Elles sont en effet

superposées aux résultats de traitements d'images pour identifier les changements environnementaux et les analyser en fonction de la nature des sols, des types de végétation, des activités anthropiques etc. Par conséquent ces cartes nous permettent de déterminer les indicateurs environnementaux présents et qui sont spatiaux, temporels ou spatio-temporels et témoignent des changements en cours dans notre espace d'étude (tableau 1).

Tableau 1. Récapitulatif des caractéristiques du milieu d'étude.

Principaux paysages géomorphologie	Substrat dominant	Les groupements végétaux	Usage anthropique	Type d'indicateur des changements environnementaux
Zone humide lacustre	Argiles et sables fins hydromorphes	<ul style="list-style-type: none"> - Végétation d'eaux douces - Ligneux : Polygonum senegalense, Mimosa pigra, Aeschynomene elaphroxylon etc. - Herbacées : Cyperus maculatus, Vossia cuspidata, Pistia stratiotes etc. 	<ul style="list-style-type: none"> Agriculture de décrue Pêche Elevage transhumant 	Spatial et temporel (possibilité d'être différencié au reste du territoire par télédétection : classification d'image et calcul d'indices spectraux)
Plaines sableuses	Sable fin d'apport alluviale	<ul style="list-style-type: none"> - Acacia senegal, Ziziphus mauritiana et Acacia nilotica - Groupements à Balanites aegyptiaca avec Piliostigma reticulatum sur sable et Acacia seyal et Lannea spp. sur zone argilo-sableuse - Salvadora persica et Acacia senegal - Ziziphus mauritiana 	<ul style="list-style-type: none"> Agriculture de décrue Agriculture pluviale Pâturages de saison de pluies 	Spatial (possibilité d'être différencié du reste du territoire par télédétection : calcul d'indices spectraux)
Berges	Sable et limon d'apport alluvial	<ul style="list-style-type: none"> - Acacia nilotica et Acacia seyal - Acacia senegal, Ziziphus mauritiana et Acacia nilotica - Groupements à Balanites aegyptiaca avec Piliostigma reticulatum sur sable et Acacia seyal et Lannea spp. sur zone argilo-sableuse - Ziziphus mauritiana - Mitragyna inermis, Combretum glutinosum, Borassus aethiopum 	<ul style="list-style-type: none"> Agriculture irriguée (maraichers) Pêche 	Spatial (possibilité d'être différencié du reste du territoire par télédétection : peu probante)
Chenaux et cuvettes	sablo-argileux ou argile	<ul style="list-style-type: none"> - Acacia nilotica et Acacia seyal 	<ul style="list-style-type: none"> Agriculture pluviale 	Spatial (possibilité d'être différencié du

		<ul style="list-style-type: none"> - Acacia senegal, Ziziphus mauritiana et Acacia nilotica - Balanites aegyptiaca et Ziziphus mauritiana - Palmeraies de Borassus aethiopum et d'Hyphaene thebaica - Acacia nilotica ou Mitragyna inermis 	Pâturages de saison de pluies	reste du territoire par télédétection : peu probante)
Plaines de l'arrière-pays	Sable, argile ou sablo-argileux	<ul style="list-style-type: none"> - Acacia nilotica et Acacia seyal - Acacia senegal, Ziziphus mauritiana et Acacia nilotica - Balanites aegyptiaca et Ziziphus mauritiana - Borassus aethiopum et d'Hyphaene thebaica - Acacia seyal, Balanites aegyptiaca, Bauhinia rufescens, Boscia senegalensis 	Agriculture pluviale Agriculture de contre saison Pâturages de saison de pluies	Spatial (possibilité d'être différencié du reste du territoire par télédétection : peu probante)

Conclusion

Le contexte environnemental général au Sahel a été sujet à plusieurs variations récentes du climat dont les conséquences sur les écosystèmes et les impacts sur les activités humaines se sont fait ressentir et ont largement été analysés et documentés. L'unanimité sur la sévérité des sécheresses débutées pendant la décennie 1970 est établie mais la fin de cette période sèche rencontre moins d'adhésion. L'utilisation de la pluviométrie et de l'état de la couvert végétal comme éléments importants de la caractérisation des écosystèmes sahéliens a largement été adoptée et appliquée à la fois à l'échelle régionale mais aussi à des échelles locales compte tenu des particularités de certaines régions d'études. Ces différentes études ont mis en lumière les contradictions parfois observées entre les observations locales de l'évolution de la couverture végétale et les résultats obtenus à l'échelle de la bande sahélienne.

Ce chapitre nous a également permis de présenter notre territoire d'étude. Deux grands ensembles le composent : la zone humide et inondable de la fenêtre lacustre camerounaise dont l'altitude moyenne est inférieure à 286 mètres, et les terres émergées de son arrière-pays, planes dans leur ensemble avec des altitudes comprises au-delà de 287 mètres (figure 26). L'espace délimité compte parmi les plus densément peuplés de la région, la pression anthropique y est forte et les populations qui y vivent dépendent en majorité de l'exploitation des ressources du lac. La disponibilité des ressources naturelles en fait un espace attractif et explique en partie la forte démographie et les déplacements (permanents, temporaires ou saisonniers) des populations. Cette pression entraîne des changements qui interpellent sur la capacité de ce milieu à les supporter et nécessite que les éléments naturels et anthropiques du milieu soient analysés.

Fort de cela, et du fait que le lac Tchad est ses périmètres associées, parties intégrantes du Sahel soient parmi les milieux à avoir subi de plein fouet les conséquences des sécheresses, il est intéressant d'étudier également la dynamiques temporelles et territoriales de ces zones d'autant plus que de pareilles études n'y ont pas encore été menées. Le premier objectif est de caractériser l'évolution des écosystèmes dans la partie lacustre et dans l'arrière-pays du lac. Le second objectif en prenant en compte les particularités locales est de déterminer les facteurs importants qui influencent l'évolution des écosystèmes.

A partir de ces objectifs le défi à présent est d'identifier les données appropriées et de déterminer la méthodologie adéquate. Mais déjà, les différentes cartes utilisées pour analyser le climat, les sols ou la végétation par exemple, donnent plus ou moins un aperçu des données mobilisables pour y parvenir. L'approche de cette thèse étant essentiellement cartographique, le chapitre suivant fait l'état des lieux des données cartographiques mobilisées pour cette thèse et des méthodes appliquées.

Chapitre 2 : Données, méthodes et modèles

Introduction

Le chapitre précédent a permis de définir le cadre thématique et conceptuel de notre recherche et de présenter l'objet de l'étude. Le but du présent chapitre est de présenter les données utilisées et l'approche méthodologique retenue pour cette étude. Pour les données, il s'agit principalement des images satellitaires (Sentinel-2 ; SPOT6 ; la série Landsat (5,7 et 8) ; MODIS TERRA (MOD13Q1, MOD11C3) ; Chirp's ; MNT ASTER GDEM, et worldclim), auxquelles s'ajoutent les données vectorielles de la zone d'étude et les cartes de géomorphologie et de phytogéographie de la région de l'extrême nord Cameroun. L'approche méthodologique, est une séquence d'analyses multi-niveaux, multicritères et multi-capteurs des images satellites permettant : la cartographie de la couverture végétale (MODIS à 250 mètres) et celle de l'occupation et de l'utilisation des sols (SPOT6 à 1,5 mètres, Sentinel-2 à 10 mètres, Landsat à 30 mètres) par classification multi-échelles des images satellitaires ; l'analyse de l'évolution diachronique du couvert végétal et de l'occupation et l'utilisation des sols entre 1973 et 2017 ; l'examen des facteurs de changements environnementaux par analyses multicritères spatiales (intégration en SIG des résultats des traitements d'images) et statistiques (corrélations linéaires et multiples) ; et la délimitation des grands ensembles paysagers par modélisation spatiale morpho structurale (Analyse en Composantes Principales et Minimum Noise Fraction).

La présentation de la méthodologie s'accompagne d'une lecture critique à travers le temps de l'utilisation de la télédétection pour l'étude des milieux arides sahéliens. Cette lecture s'intéresse à l'évolution des objectifs et des méthodes d'utilisation de la télédétection pour les études des milieux arides sahéliens. Le but étant de montrer la capacité de la télédétection à s'adapter aux objectifs de recherche et à permettre une telle étude. Cette analyse a le mérite de permettre de façon induite de clarifier les raisons liées au choix de la télédétection comme outils d'analyse.

La première section du chapitre s'intéresse à l'état de l'art de l'utilisation de la télédétection pour l'étude des milieux arides (objectifs et approches méthodologiques). La seconde section est consacrée à la description de l'ensemble des données utilisées pour cette étude (images satellites à basses résolution (MODIS), à hautes résolution (Sentinel-2 et Landsat) et à très hautes résolution (SPOT 6). Dans la troisième section, les étapes de la démarche méthodologique de cette thèse sont expliquées : cartographie de la couverture végétale et cartographie de l'occupation et de l'utilisation des sols ; analyse de l'évolution diachronique du couvert végétal (de 2000 à 2018) et de l'occupation et l'utilisation des sols (entre 1973 et 2017) ; analyses multicritères spatiales et statistiques

des facteurs de changements environnementaux ; et modélisation spatiale morpho structurale des principales unités paysagères.

2.1. La télédétection au service de l'étude des milieux arides : une lecture critique à travers le temps

L'utilisation de la télédétection pour les recherches à propos des milieux arides est multiforme et pluridisciplinaire. Elle concerne aussi bien la compréhension de l'influence du climat sur les changements environnementaux et leurs impacts sur les activités humaines, que l'identification des éléments biophysiques caractéristiques de la désertification, le déplacement des dunes de sables, le suivi de la salinisation des sols, l'estimation de la production de biomasse, l'ensablement des points d'eau, le suivi des espaces agricoles et pastoraux etc. Par exemple, Lennart Olsson, (1985); Hellden, (1984 et 1988); Dregne, (1986); Warren et Agnew, (1988); Tucker, Dregne, et Newcomb, (1991), etc., se servent presque tous des données de télédétection pour analyser le phénomène de dégradation des sols dans les zones arides et suivre le phénomène de désertification. L'application de la télédétection sous ces différentes formes a évolué dans le temps avec la disponibilité des données, la technologie (algorithmes de traitements, logiciels et expertise technique) et en fonction des priorités de recherche.

2.1.1. Les objectifs des études des milieux arides sahéliens par télédétection

Les images des capteurs tels que ceux des premiers satellites Landsat déterminent les propriétés optiques des objets à la surface de la terre par la mesure de leur valeur de réflectance propre. La surface des régions arides étant majoritairement constituée de sables de roches et de végétation, les valeurs de réflectance mesurées par les satellites sont le plus souvent dans ces régions un mélange de sol et de végétation (Ruiz Sinoga et al., 2010). A partir de là, les premières expériences de l'usage de la télédétection en Afrique s'intéressent à : l'étude de l'état des surfaces des sols et la surveillance des conditions écologiques de l'environnement en Tunisie à travers le projet ARZOTU (Long et al., 1977) ; la production herbacée de biomasse au Sénégal (Tucker et al., 1983; Tucker et al., 1985). D'après Escadafal, (2012) ces premières expériences révèlent deux difficultés. La première est liée à la maîtrise des mesures.

« ... après l'enthousiasme, voire la naïveté qui a animé les premières tentatives d'utilisation des images satellites, il s'est avéré nécessaire de retourner aux fondamentaux et de comprendre la nature des mesures faites par les capteurs utilisés, pour pouvoir correctement les interpréter ensuite en termes écologiques ».

La seconde à la reproductibilité des modèles développés.

« En effet, différents essais d'applications de techniques de photo-interprétation, ou de classification d'images à partir de méthodes mises au point dans des régions fortement

agricoles avec de grandes parcelles de culture des grandes plaines américaines, vont se révéler décevantes et inadaptées à la caractérisation écologique des milieux arides ».

Les images sont également entachées de défauts (lignes manquantes, artefacts en bandes), ne sont parfois pas disponibles, ou nécessitent des corrections géométriques et radiométriques. Quoi qu'il en soit, les questions importantes concernent d'une part l'extraction des informations et leurs interprétations écologiques, et d'autre part le choix des objets caractéristiques à mesurer, d'autant plus que ces objets sont soumis aux paramètres environnementaux comme l'humidité des sols ou l'évolution phénologique (Escadafal, 2012). En s'appuyant sur l'hypothèse que les objets de même type ont des signatures spectrales identiques, les approches par seuillage de niveaux numériques des bandes spectrales (ORSTOM, 1978) ou par calcul d'indices spectraux ont été appliquées à l'étude de ces milieux. Les indices les plus utilisés en raison de la dominance spatiale des objets qu'ils caractérisent vont être les indices de sols : couleur (Escadafal et Huete, 1991) ; brillance (Kauth et Thomas, 1976) ; croute (Karnieli, 1997) ; salinité (Fernández-Buces et al., 2006) ; texture (Madeira Netto, 1991), et les indices de végétation : NDGI (Chamard et al., 1991) ; NDVI (Rouse et al., 1973) ; TSAVI (Baret, Guyot, et Major, 1989) ; PVI (Richardson et Wiegand, 1977) ; MSAVI (Qi et al., 1994) ; TSARVI (Bannari et al., 1996) ; DVI (Clevers, 1988).

La classification des pixels d'images en thème d'occupation (végétation, bâti, sols nus, surfaces agricoles etc.), représentant les formes d'occupation ou d'utilisation de l'espace est ensuite appliquée dans le but de cartographier l'environnement et de faciliter sa compréhension (Bardinet, 1981). Les classifications s'intéressent ainsi à cartographier les types de couverts végétaux, les types de sols, les surfaces agricoles et pastorales, les couvertures en eaux, les zones urbaines etc. Les résultats obtenus par approche orientée objet ou basée pixel en fonction de la résolution spatiale des images, vont nécessiter les descentes de terrain afin d'être confrontés au terrain et validés. La préoccupation suivante va être l'estimation des facteurs environnementaux notamment climatiques, anthropiques ou écologiques qui donnent la possibilité de suivre les changements de surface à l'aide de séries temporelles. L'environnement aride est alors modélisé en fonction des paramètres tels que les propriétés des sols, la productivité végétative, la couverture végétale, l'hydrographie, la topographie, le climat, l'utilisation des terres, ou encore l'urbanisation.

Cette faculté à modéliser l'environnement va particulièrement intéresser les organisations intergouvernementales qui à travers de nombreux projets de recherches multidimensionnelles sur l'environnement et les milieux arides en particulier vont s'efforcer à mesurer les impacts des activités humaines sur ces écosystèmes et évaluer le développement durable. Depuis le début des années 1990, le Programme Intergouvernemental de Géosphère-Biosphère (IGBP) et le Programme International de la Dimension Humaine (IHDP) ont mis sur pied le projet Changement d'Utilisation et d'Occupation des Sols (LUCC), avec pour objectifs d'analyser les interactions Homme-Environnement et de constituer un réseau de surveillance et de modélisation des

changements locaux, régionaux et globaux d'utilisation et d'occupation des sols ; le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) et l'Organisation Météorologique Mondiale (WMO) ont également établi depuis 1988 un panel intergouvernemental chargé de suivre les changements climatiques (IPCC) (Wu, 2003). En région sahélienne, l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS) est mis sur pied en 1992 avec entre autre objectifs de contribuer à la maîtrise de l'information sur ces environnements ; favoriser la gestion durable des ressources naturelles des milieux arides au Sahara et au Sahel et soutenir la mise en œuvre des mesures d'urgences et la connaissance scientifique des ressources partagées (Fezzani, 1995). Les travaux menés par cet organisme concernent entre autre le suivi de la dynamique de dégradation des sols ; l'estimation des pluies, la gestion des aquifères des grands bassins sahariens et sahéliens et la surveillance écologique à long termes de la zone circum-saharienne à travers des indicateurs écologiques biotiques et abiotiques (Fezzani, 1995; D'Herbès et Fezzani, 2004).

2.1.2. Evolutions des approches d'études des milieux arides par télédétection

Autant les objectifs d'études par télédétection des environnements sahéliens ont évolué avec le temps, les méthodes et approches d'analyses ont également suivi le même dynamisme. Au départ, de simples calculs d'indices permettaient par exemple l'estimation de la production herbacée de biomasse en calculant le NDVI sur les images NOAA AVHRR (Tucker et al., (1983) au Sénégal, Justice et Hiernaux, (1986) au Niger). Ces indices ont ensuite été corrélés à la pluviométrie pour permettre de suivre l'écologie sahélienne (Nicholson et Lare, 1990) analysent le couvert végétal au Sahel en fonction de l'évolution de la pluviométrie à partir d'images TRMM). Plus tard les priorités de traitements ont évolué aux classifications du paysage (Achard, (1989) analyse les rythmes saisonniers de la végétation en Afrique de l'Ouest à l'aide des images NOAA AVHRR, Franklin, (1991), utilise les images Landsat TM pour cartographier les types de végétation en zone sahélienne et soudanienne au Mali), puis aux classifications multi temporelles mettant en évidence les changements d'utilisation et d'occupation des espaces (analyse temporelle de l'occupation des sols dans le Ferlo au Sénégal entre 1990 et 2002 à partir d'image Landsat (Sarr, 2009).

Ces évolutions ont largement été impulsées par l'amélioration de la qualité des images (amélioration de la résolution spatiale : SPOT 1, 2, 3, 4 XS = 20m ; SPOT 5 XS = 10m ; et SPOT 6 et 7 XS = 6m. Amélioration de la résolution spectrale : Landsat 1,2,3 = 5 bandes multi-spectrales ; Landsat 4 et 5 = 7 bandes multi-spectrales ; Landsat 7 = 7 bandes multi-spectrales et une bande panchromatique ; et Landsat 8 = 10 bandes multi-spectrales et une bande panchromatique), la variabilité des prises de vue (acquisitions diurnes (capteurs optiques) et nocturnes (capteurs radars), images spatiales et photo aériennes), la disponibilité de quantité d'image de plus en plus importante avec le temps (images SPOT disponibles depuis 1986, et images Landsat disponibles depuis 1972), et les

avancées technologiques (logiciel de traitement d'images de plus en plus performants, amélioration de la capacité de stockage et de calculs des ordinateurs, internet etc.).

La révolution liée à l'intelligence artificielle et la mise à disposition à accès libre de quantité importante de données images ont amorcé l'ère de la cartographie en ligne avec son lot d'opportunité. C'est l'exemple de Xiong et al., (2017) qui utilisent les images MODIS NDVI pour cartographier les terres agricoles du continent africain ou bien de Venter, Cramer, et Hawkins, (2018) qui utilisent les images Landsat pour cartographier l'occupation et les changements d'occupation des plantes ligneuses en Afrique subsaharienne entre 1986 et 2016.

2.1.2.1 Méthodes mobilisées en télédétection pour l'analyse et le suivi des milieux sahéliens

a. Le calcul des indices spectraux et leur seuillage

Le principe consiste à établir des relations entre les caractéristiques des composantes du milieu à l'exemple de la verdure, la contenance en eau, la densité de végétation ; l'humidité, la rugosité, la texture, la salinité, des sols ; le taux de matière en suspension des eaux, etc., et les valeurs radiométriques de ces composantes. Les valeurs de réflectances obtenues des capteurs satellitaires ou par imagerie aérienne et acquises dans deux ou plusieurs bandes spectrales, et dans plusieurs fenêtre spectrales sont alors combinées entre elles par ratio, addition, différence, etc. pour établir des combinaisons linéaires ou non. Ce principe de calcul qui permet de mettre en évidence les surfaces de natures différentes, repose sur les variabilités de réflectances au sein de bandes spectrales identiques et sur les écarts de réponses spectrales illustrés à travers la signature spectrale des objets. Par exemple, les différences de propriétés optiques des sols dans les fenêtres spectrales du rouge et du vert sont exploitées, tout comme celles de la végétation dans le rouge et le proche infrarouge. Les bases de règles peuvent alors être établies et appliquée aux résultats du calcul d'indice par seuillage successifs des valeurs de pixels pour distinguer les surfaces de natures différentes.

Cette approche est utilisée par Tucker et al., (1983) pour calculer la production herbacée de biomasse dans la région du Ferlo au Sénégal. En effet, ils établissent la différence normalisée entre les bandes spectrales du rouge et du proche infrarouge du satellite NOAA7 pour établir l'indice de différence normalisée de la densité de feuilles vertes de la végétation (Normalized Difference Green Leaf Density Vegetation Index). Le résultat leur permet d'estimer l'activité photosynthétique de la biomasse active et la relation entre l'intensité et la durée de production de la biomasse. Cet indice qui en réalité est le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), est ensuite repris par Justice et Hiernaux, (1986) pour étudier les savanes au Niger ; Diallo et al., (1991) pour la production des savanes primaire au Sénégal. Le principe de la différence normalisée est repris dans plusieurs recherches pour proposer différents types d'indices à l'exemple de l'indice de couleur des sols (Escadafal et Huete, 1991) qui utilise les bandes spectrales

du rouge et du vert pour distinguer les matériaux de surfaces des sols en fonction de la saturation de leur couleur.

Si les méthodes de calcul et de seuillage d'indices ont l'avantage d'être facilement applicables et compréhensibles, elles présentent quelques limites. Certains indices sont très sensibles aux variations atmosphériques, aux contributions spectrales des éléments autres que ceux qu'ils sont destinés à mettre en évidence, à la position du soleil au moment de la prise de vue, et aux corrections radiométriques (Escadafal, 2012). Par ailleurs, les règles de seuillage établies parfois de manière empirique ne s'appliquent pas forcément à toutes les régions et nécessitent par conséquent une connaissance de la réalité de terrain pour déterminer les seuils, ce qui limite leur reproductibilité. Les méthodes de classification permettent en partie de palier à ces difficultés.

b. Méthodes de cartographie de l'occupation des sols par classification

L'objectif des méthodes de cartographie par classification est de regrouper les pixels de caractéristiques communes par classe thématique représentant des conditions d'intérêt dans une zone. Les méthodes les plus anciennes se basent sur les valeurs radiométriques des pixels pour former les classes (Caloz et Collet, 2001). Les échantillons de pixel de caractéristiques communes sont utilisés dans le cas de la classification supervisée pour établir les règles de classification. L'algorithme se sert alors de ces jeux d'entraînement pour attribuer le reste des pixels aux différents groupes selon leur ressemblance. Lorsque le regroupement des pixels aux caractéristiques semblables est effectué sans qu'aucune connaissance du terrain ne soit utilisée pour constituer les groupes, la classification est dite non supervisée et les différents groupes obtenus sont caractérisés par l'expert en fonction de ses connaissances du milieu. C'est de cette manière que Franklin, (1991) utilise les images du satellite Landsat TM à 30 mètres de résolution pour cartographier les types de végétation en zone sahéenne et soudanienne au Mali, par classification non supervisée après l'Analyse en Composante Principales des bandes spectrales originales. Achard, (1989) choisissent plutôt la méthode supervisée pour cartographier les principales classes de végétation au sud de la Côte d'Ivoire à l'aide des images NOAA AVHRR à 1,1 km de résolution.

Au cours des années 1990, les images satellitaires connaissent des évolutions de leurs caractéristiques spatiales (amélioration de la résolution spatiale) et spectrales (augmentation des bandes spectrales) qui ont pour effets d'améliorer la performance des classifications basées pixel (Caloz et Collet, 2001). Cependant, les méthodes de classification essentiellement basées sur les valeurs radiométriques des pixels vont très vite être dépassées par les méthodes de classification orientées objets, grâce à l'amélioration de la qualité spatiale des images. Vacqu  et Houet, (2012) comparent ces deux méthodes lors de la délimitation des zones humides de montagnes   partir des images Quickbird et SPOT 5, les résultats de la méthode orientée objet sont meilleurs car plus homogènes et moins pixelisés. Cette méthode permet de s'affranchir de l'effet « poivre de sel » (Whiteside, Boggs, et Maier, 2011; Sellin et al., 2015). Si ces images

de meilleures résolutions spatiales permettent de distinguer des objets jusque-là difficiles à identifier en raison de leur faible taille (par exemple un pixel Landsat à 30 m² correspond à 25 pixels de 6 m² sur une image SPOT6. Si ce pixel représente la végétation, à partir de 6m (ou 1,5 après fusion) il est possible de distinguer les arbres, les herbacées ou les surfaces agricoles par exemple ce qui est difficilement faisable à 30m), un objet peut désormais dans certains cas être constitué de plusieurs pixels aux réponses spectrales très différentes, avec pour conséquence d'augmenter son hétérogénéité, et dans ces cas l'approche par pixel peut être limitée pour la classification (Rougier, 2016). Par exemple dans la forêt on peut désormais distinguer la forêt arborée ou la forêt arbustive et dans la végétation herbacée on peut avoir les savanes, les steppes ou les prairies. Les images acquises avec des résolutions spatiales de plus en plus meilleures donnent alors la possibilité d'ajouter aux valeurs radiométriques des pixels, de nouvelles règles de classification liées aux objets et intégrant par exemple leur texture, leur forme, leurs contours, ou leur taille etc. Cette forme de classification dite orientée objet est par conséquent plus sollicitée pour les milieux particulièrement hétérogènes.

Par ailleurs, la fauchée des images à hautes résolutions ou très hautes résolutions spatiales nécessaires pour l'utilisation des approches orientées objets est toujours inférieure à celle des images à moyennes et basses résolutions et couvrent alors des espaces réduits comparés à la couverture terrestre des images à moyennes et basses résolutions. Par exemple la fauchée des images SPOT6 est de 60 km, celle des images Landsat de 185 km, pourtant la fauchée des images MODIS est égale à 2330 km. D'autre part, les milieux arides sahéliens sont très peu hétérogènes à l'échelle régionale. Pour ces raisons, l'utilisation des méthodes de classification en région sahélienne se limite davantage aux échelles locales, bien que Hagenlocher et al., (2014) réussissent par cette approche à modéliser les îlots de chaleur à l'échelle du Sahel pour cartographier les zones vulnérables aux impacts des changements climatiques en utilisant les images NOAA AVHRR et les données de température et de précipitation du Climatic Research Unit (CRU). A l'échelle local l'un des exemples d'utilisation de cette approche c'est l'étude des changements d'occupation des sols dans le bassin versant de Binah au Togo et au Bénin (Badjana et al., 2015). Mais les utilisations les plus récurrentes s'intéressent davantage à la cartographie et le suivi de l'expansion des zones urbaines (Taubenböcka et al., 2009; Tewolde et Cabral, 2011; Sori, 2012). Les exemples d'utilisations « locales » montrent en outre l'importance des études multi temporelles et leurs habilités à mettre en évidence les dynamiques de changements.

2.1.2.2. Méthodes multi temporelles d'analyses et le suivi des changements en milieux sahéliens

Les approches sur une date permettent de décrire l'état de surface à un instant précis, mais n'offrent pas la possibilité de suivre les changements. L'utilisation d'images sur plusieurs dates a pour objectifs de suivre les différents constituants de l'environnement sous plusieurs conditions de prises de vue différents (par exemple l'état du couvert végétal en saison des pluies et en saison sèche, les étendues d'eau pendant les crues et

pendant les étiages, ou encore l'évolution d'un couvert forestier après un feu de forêt). Il s'agit d'identifier l'état des unités paysagères ou des conditions environnementales en prenant en compte l'évolution diachroniques des mesures enregistrées à différentes dates sous des conditions diverses. Cette nécessité de disposer d'informations sur le long terme est encore plus importante en environnement sahélien en raison de la forte influence des facteurs climatiques, édaphiques, ou anthropiques sur la santé des écosystèmes. En effet, le diagnostic de l'évolution de ces milieux nécessite de l'appréhender sous plusieurs conditions différentes (particulièrement en saison sèche et en saison des pluies), dans le long terme, et sur plusieurs décennies parfois. Comme nous l'avons mentionné précédemment, cette approche est particulièrement capitale dans le suivi des écosystèmes sahéliens à travers la mise en corrélation des évolutions de la pluviométrie et celles du couvert végétal lors des sécheresses. Ces approches d'analyses évolutives s'appliquent également à l'étude des changements d'utilisation et d'occupation des sols à l'exemple de la vallée de Keita au Niger (Boureima, Wang, et Boubacar, 2016) ou les zones de parcours du nord de l'Ethiopie (Tsegaye et al., 2010). Elles permettent également d'évaluer l'impact des techniques de conservation des sols sur la régénération de la végétation au Sahel (Tappan et Cotillon, 2014).

Escadafal, (2012) analyse quelques outils permettant dans l'étude évolutive multi temporelle de mettre en évidences des changements :

- La comparaison de dates : consiste à effectuer des calculs simples (addition, soustractions, etc.) entre bandes ou indices spectraux issues de deux images séparées dans le temps. Cette approche permet de comparer deux situations et de déterminer les changements importants, mais se trouve très limitée dans le cas des changements irréguliers, et inadaptée pour des analyses sur plus de deux images ;
- L'analyse de tendances : dans une série de plusieurs données, l'analyse de tendance permet par le calcul de la pente et de la droite de régression entre les dates, de rechercher l'évolution globale d'un paramètre en termes d'augmentation de diminution ou de stabilité. Elle mesure les tendances persistantes mais ne peut illustrer les phénomènes périodiques (saisonniers ou pluriannuels) ;
- L'analyse de Fourier : consiste à décomposer les séries temporelles d'un paramètre ou d'un indice pour déterminer les phénomènes ou cycles périodiques communs. Cette méthode ne permet de distinguer que quelques pixels exceptionnels dont les temporalités de changements sont identiques, mais la périodicité du reste des pixels n'est pas révélée ;
- La classification : va réduire la multitude des profils en un nombre défini correspondant aux différents thèmes utilisés pour regrouper tous les pixels en fonctions des caractéristiques des surfaces du sol. Le profil temporel de chaque pixel va être révélé en fonction de son appartenance aux différentes classes ;

- Les vitesses de changement : en fonction de la périodicité ou du cycle des changements (mensuels, saisonniers, annuels, etc.) des composantes de surface du sol, et de la régularité temporelle des images, il est possibles dans une série multi temporelle de mesurer la vitesse avec laquelle ont lieu différents changements.

Par ailleurs, cette approche évolutive multi date permet également de combiner des données de plusieurs capteurs différents et par la même occasion de capitaliser les avantages en termes de résolutions spatiales, temporelles spectrales ou radiométriques proposés par chaque type d'image (Gadal, 2011a). Par exemple, les valeurs de température au sol du satellite Meteosat sont combinées aux valeurs de réflectance du capteur Landsat MSS par Bardinnet, (1981) pour analyser les paysages de N'Djamena et d'Annaba. Andrieu, (2018) utilise les valeurs de NDVI des satellites AVHRR et MODIS à 8 km et 250 m de résolutions spatiales respectivement, pour analyser l'évolution de la couverture végétale en Côte d'Ivoire et en Benin.

Au début, le nombre limites d'image d'archives pouvait être une contrainte pour certaines applications à l'exemple des études multi dates (de l'occupation des sols, des fluctuations des niveaux d'eau etc.) en raison de leur faible quantité (sur le lac Tchad par exemple entre 1972 et 1980 les images Landsat ne sont pas disponibles en 1974 et en 1977, et pour les années comme 1972, 1973 et 1976 ces images ne sont pas disponibles pour tous les mois et elles ne couvrent spatialement qu'une partie du lac dans certains cas). Mais avec le temps, la multiplication des acquisitions sous différentes conditions et la multitude de satellites aujourd'hui disponibles, l'analyse des changements devient plus variable.

Quelques remarques importantes sont à faire dans ces approches multi dates. Les comparaisons d'images nécessitent dans certains cas que celles-ci soient acquises dans des conditions plus ou moins semblables (par exemple la comparaison du couvert végétal entre les printemps d'une année n1 et d'une année n2 ne peut se faire qu'en utilisant les images acquises pendant les printemps de ces années). Et dans les cas des utilisations d'images de capteurs différents, les disparités de résolutions doivent être corrigées et harmonisées tout comme les systèmes de projections (entre une image MODIS à 250 m et une image Landsat à 30 m il est nécessaire d'avoir une superposition d'images pixel par pixel pour effectuer des calculs. Les points de contrôle peuvent être utilisés pour caler l'une des images à l'autre, tout comme les modules d'extraction spatiale d'image sous des logiciels comme Arcgis). Par ailleurs, cette approche fonctionne avec un nombre limité d'images (pour une comparaison de dates seules deux images peuvent être utilisées) sélectionnées par le spécialiste selon des critères prédéfinis (année d'acquisition, mois d'acquisition, coût, résolution spatiale etc.), qui dans certains cas peuvent être subjectifs (selon les capacités financières notamment le recours aux images à très hautes résolutions peut être préféré aux images à hautes résolutions et améliorer la qualité des résultats).

2.1.3. Les méthodes de modélisation par imagerie satellitaires appliquées aux régions arides

Cette section présente un état de l'art de quelques méthodes appliquées aux régions arides. Notre but ici n'est pas de donner une liste exhaustive des méthodes de modélisation de ces milieux, mais de décrire les caractéristiques des modèles les plus appliqués aux milieux arides pour comprendre leur degré de compatibilité avec nos objectifs de recherche et révéler dans quelles mesures elles sont ou pas adaptées à notre zone d'étude.

a. Modélisation de la désertification en milieu aride : l'approche MEDALUS

L'une des méthodes les plus utilisées pour évaluer la sensibilité à la désertification est l'approche MEDALUS. Elle a été développée spécifiquement pour les milieux arides méditerranéens par Kirkby, Kosmas, et Geeson, (1999). Avec un gros volet de modélisation de l'érosion à petite et grande échelle spatiale et à court terme (Poisson, 2003), cette méthode est basée sur une combinaison pondérée des caractéristiques physiques liées au sol, au climat, à la végétation et à l'action humaine, pour évaluer le niveau d'exposition ou le degré de vulnérabilité à la désertification. Les informations relatives à chacun de ces paramètres sont intégrées dans un SIG pour spatialiser les différents niveaux de désertification dans le milieu. La carte d'exposition à la désertification est ainsi déterminée par l'Indice de Sensibilité à la Désertification (ISD) résultant de la pondération de quatre sous-indices à savoir : l'indice de la qualité du climat (IQC), l'indice de la qualité de sol (IQS), l'indice de la qualité de la végétation (IQV), l'indice de la qualité de système d'aménagement des terres (IQSA)

L'équation de l'ISD est la suivante :

$$ISD = (IQC \times IQS \times IQV \times IQSA)^{1/4}$$

C'est par ce modèle que Jaume et Páramo, (2003) établissent la cartographie de la sensibilité à la désertification et à la sécheresse des pays des rives nord de la méditerranée. Dans les pays au sud de la méditerranée le modèle est utilisé au Maroc dans le bassin versant de l'Oued El Maleh (Lahloui et al., 2017) ou dans les oasis du moyen Draa (Ait Lamqadem et al., 2018) ; en Tunisie dans la région de Gabès (Chandoul, Bouaziz, et Dhia, 2014) ; en Egypte dans le Sinaï (Mohamed, 2013) et dans le nord-ouest (Saleh, Belal, et Jalhoum, 2018). Les études sont également menées hors du périmètre méditerranéen, en Mongolie (Lee et al., 2019), en Serbie (Kadović et al., 2016) ou au Cap Vert (De Pina Tavares et al., 2015), et montrent la faculté du modèle à cartographier les zones arides à différents milieux.

Cependant, dans ses travaux de thèse, où il applique la méthode MEDALUS à la cartographie de la désertification dans le bassin versant de la Moulaya au Maroc, Mokhtari, (2016) souligne les difficultés de cette approche à s'adapter aux particularités des terrains d'études notamment aux échelles locales. Son argumentaire repose sur :

l'absence de pondération des sous indices qui pose le problème du poids de chacun d'eux en fonction des conditions du milieu ; les normes de classifications des couches utilisées pour calculer les sous indices ne s'adaptent pas toujours à l'hétérogénéité intrinsèque des territoires ; l'intégration des données de différentes sources et de différentes formes qui influencent la précision des résultats ; et les facteurs anthropiques (les mécanismes de marchés, les niveaux de subventions agricoles, les changements de technologies) qui pourraient avoir une influence sur les changements environnementaux ne sont pris en compte qu'à travers l'occupation du sol et la densité du cheptel.

b. Modélisation de la dégradation des sols par l'Equation Universelle de Perte en Sols RUSLE

L'utilisation de la version révisée de l'Equation Universelle de Perte en Sols en SIG et télédétection permet de modéliser spatialement le degré de sensibilité à l'érosion hydrique en estimant sur un ordre d'échelle croissant les risques d'érosion des sols. Encore appelée équation de Wischmeier l'équation USLE est développée en 1978 par Wischmeier et Smith, (1978), puis revisitée en par Renard et al., (1997). L'intérêt pour l'érosion hydrique vient du fait que ce phénomène est particulièrement responsable de la dégradation des terres notamment sur les sols dénudés et soumis aux pentes. Le lessivage des couches superficielles entraîne la perte des éléments minéraux utiles aux plantes et réduit les potentialités agricoles des sols. Le modèle RUSLE permet alors de quantifier les pertes en sol par érosion en nappe.

Sa logique est semblable à celle du modèle MEDALUS puisque la carte finale résultant de l'équation ci-dessous est obtenue par pondération de cinq sous facteurs à savoir :

L'exposition à l'agressivité des pluies (F) ;

La vulnérabilité des sols à l'érosion (K) ;

L'inclinaison et la longueur de la pente des sols (LS) ;

L'occupation des sols (C) ;

Les techniques de protection et de conservation des sols (P).

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Cette méthode Fils, Etouna, et Hakdaoui, (2014) l'appliquent à la cartographie des zones à risque d'érosion hydrique dans le bassin versant de Sanguéré dans le nord Cameroun. C'est aussi le cas pour Thiaw et Dacosta, (2018) qui s'en servent dans le bassin versant de Diarha dans le sud du Sénégal ; pour Tamene et Le Quang, (2015) en Afrique subsaharienne notamment dans les bassins du Nil et de la Volta et pour Yesuph et Dagneu, (2019) dans le bassin de Beshillo en Ethiopie.

Quelques limites de ce modèle répertoriées par Yesuph et Dagneu, (2019) concernent : la sélection des paramètres d'entrée ne repose pas sur une analyse préalable de la

sensibilité de la région étudiée permettant de déterminer les paramètres les plus influents, l'absence de mesures des ravins pour une meilleure estimation de la perte des sols, et l'absence de lien entre les pratiques et gestion anthropiques des sols et les pertes de sols.

c. Modèle global de suivi de la productivité/dégradation des sols : TRENDS EARTH

Ce modèle s'inscrit dans les objectifs du millénaire pour le développement SDG et s'intéresse particulièrement aux trois indicateurs de neutralité en matière de dégradation des sols à savoir : la productivité des sols, la couverture des sols et le taux de matière organique. C'est le fruit du partenariat entre Conservation International, Lund Université, et la NASA et soutenu par Global Environment Facility. Le modèle a pour objectif de mettre en évidence les tendances et les changements de la productivité primaire des sols. Il détecte avant tout les zones présentant des déclin actifs et persistants de la productivité des sols. Celles où le processus de dégradation est déjà suffisamment avancé sont aussi cartographiées mais avec moins de priorité. Les données de base combinées sont celles relevant de la végétation (NDVI : MODIS et AVHRR), de l'humidité du sol (MERRA2 ERA1), des précipitations (GPCP v2.3, GPCP V7, CHIRPS, PERSIANN-CDR), de l'évapotranspiration (MOD16A2), de l'occupation terrestre des sols (ESA CCI Land Cover), de la teneur en carbone des sols (grille terrestre ISRIC), et de la répartition des zones agro écologiques à la surface du globe (FAO-IIASA Global Agroecological Zones (GAEZ)).

La combinaison de ces données permet de disposer en sortie du modèle de cartes de : dynamique de la productivité primaire exprimant en termes de changement ou de stabilité la capacité des terres à soutenir la production primaire, l'état de la productivité des sols qui détecte les récents changements dans la productivité primaire des sols, d'occupation des sols, de teneurs en carbone des sols, l'estimation des rendements de production des sols etc. Pour le cas précis de l'état de la productivité il est obtenu par comparaison de la productivité entre une période historique servant de période de base et la productivité récente calculée sur un cumul minimum de trois ans. Lorsque la différence de valeurs obtenues entre la période historique et la période récente est < -2 il s'agit d'une dégradation potentielle de la productivité, dans le cas contraire (différence $> +2$) il s'agit d'une croissance de celle-ci et si cette différence est comprise entre -1 et 1 alors la productivité est stable.

Les résolutions spatiales des données de bases utilisées dans ce modèle sont à 250 mètres et plus (MODIS NDVI). Par conséquent il est plus adapté aux observations planétaires qu'aux études et analyses aux échelles locales. En plus, les traitements sont effectués entre 2001 et 2015 et ne prennent pas en compte les changements plus antérieurs qui parfois sont importants. L'aspect anthropique n'est pris en compte qu'à travers la carte de l'occupation du sol et de nombreux facteurs liés aux modes d'utilisation des terres sont par conséquent sous évalués.

2.2. Les données géographiques : contexte et disponibilité

Une donnée n'est géographique que dans la mesure où elle fournit une information sur un objet, un événement ou un phénomène spatialement référencé à la surface terrestre (Puissant, 2003). Cette information est d'ordre géométrique (forme et localisation), sémantique (caractérisation attributaire) et topologique (formes d'agencement des éléments de base), et ne peut prendre que deux représentations possibles : vectorielle (fichier de forme) ou matricielle (raster) (Gadal, Gazel, et Lekaviciute, 2006).

La représentation vectorielle des objets géographiques dispose l'information de manière continue sous forme de points, de lignes ou de surfaces généralement représentés en couches différentes. Pour chacune des formes de représentations d'objets, il est possible (voire nécessaire) d'associer des informations attributaires permettant de les décrire. Cette forme de représentation est la plupart du temps le résultat de la numérisation manuelle ou semi-automatique de photographies aériennes ou de cartes.

D'autres sources de données géographiques sont les images aériennes et spatiales qui autorisent une représentation matricielle de l'espace géographique en pixels pour lesquelles une ou plusieurs valeurs numériques peuvent être associées. Les pixels sont disposés dans un raster de manière régulière, et leur enchainement permettant de représenter les lignes et les surfaces selon une approximation étroitement liée à leur taille va conditionner l'exactitude de la représentation des objets. Ces images de télédétection sont issues d'un processus d'acquisition aérien (photographie aérienne) ou spatial (imagerie satellitaire) d'information par le biais d'un radiomètre qui va enregistrer un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par des objets. Dans le cas des acquisitions spatiales, celle-ci sont actives si le capteur émet et reçoit le signal (les images sont acquises de jour comme de nuit par des capteurs radars), ou passives si la source d'émission de l'énergie est différente du capteur (les produits sont des images optiques acquises en journées). L'essentiel des images rasters utilisées dans cette thèse ont pour source les capteurs optiques. Ces images satellites sont caractérisées par des paramètres liés à leurs résolutions spatiales, spectrales et temporelles (tableau 2).

La résolution spatiale est fonction de la dimension du pixel. Cette caractéristique est essentielle dans la mesure où elle définit la précision des détails discernables sur une image (figure 29). On distingue ainsi en fonction de la taille du pixel : les satellites à basse résolution (dont la résolution est supérieure à 250m) et les satellites à Moyenne résolution (entre 100 et 250m) à l'exemple des satellites MODIS, NOAA AVHRR, METEOSAT, et CHIRP'S qui servent aux applications de la télédétection pour les études météorologiques ou les cartographies aux échelles régionales et planétaires ; les satellites à Haute résolution (entre 10 à 100m) tels que Landsat 7 et 8, Aster, ou Sentinel-2, utilisés pour les cartographies aux échelles locales (déforestation, urbanisation, etc.) ; et les satellites à Très haute résolution spatiale pour ceux dont la taille du pixel est inférieure à

10 mètres (Pléiades, SPOT 6 et 7, Ikonos-2, Worldview-2) et qui sont utilisés pour la cartographie de précision.

L'étude des dynamiques paysagères dans un contexte de changement climatique comme dans celui du Sahel nécessite l'utilisation des images de Moyenne résolution pour caractériser le climat (CHIRP'S) et étudier les évolutions du couvert végétal (MODIS NDVI). Les images de Haute résolution (Landsat et Sentinel-2) et celles de Très haute résolution (SPOT6) sont également indispensables pour cartographier l'occupation et l'utilisation des sols (surfaces en eau, sols nus, parcelles agricoles, etc.) aux échelles plus fines.

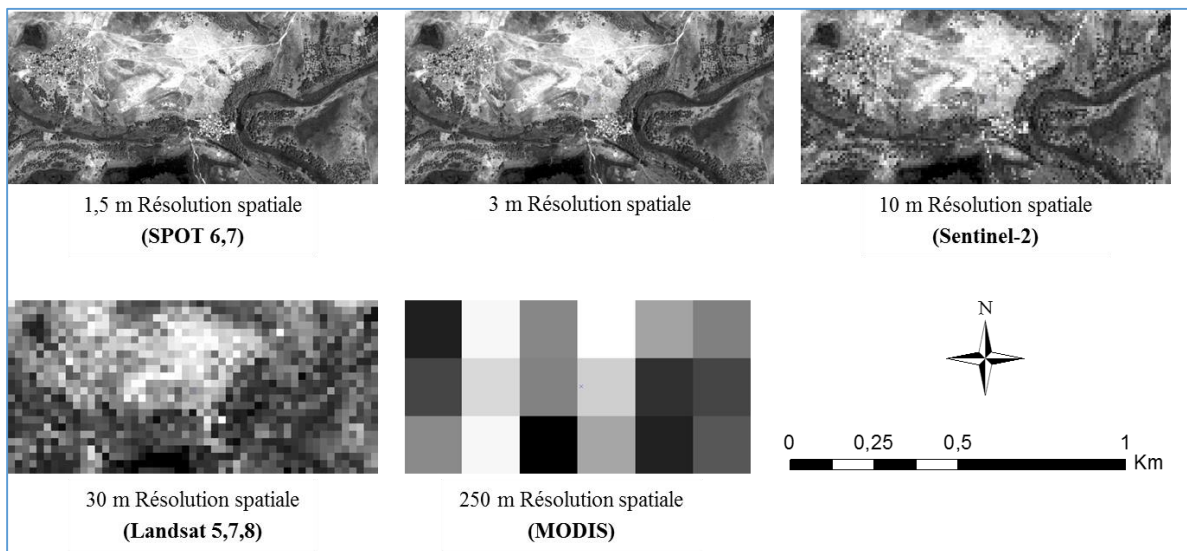


Figure 29 : Résolution spatiale des capteurs spatiaux d'observation de la Terre (extrait d'une image SPOT 6 initialement à 1,5m de résolution, dégradée à des résolutions spatiales plus faibles) Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Les images satellites sont acquises régulièrement grâce à la répétition des prises de vue par les capteurs. Cette caractéristique fait appel à la notion de résolution temporelle des capteurs et désigne en fonction de la latitude, de la largeur de la fauchée, et de la zone de chevauchement, la fréquence de revisite (au nadir) d'un satellite pour un emplacement spécifique. En principe la résolution temporelle est inversement proportionnelle à la résolution spatiale, et les satellites à haute résolution ont une fréquence de revisite moins importante que ceux de basse résolution (Dusseux, 2014) (SPOT 26 jours et NOAA 1 jour). Cependant la capacité de programmation des prises de vues (SPOT et Pléiades) permet d'améliorer la résolution temporelle de ces capteurs. D'autre part les satellites tels que Sentinel-2 disposent désormais d'une haute résolution spatiale (10 m) et temporelle (5 jours) (ESA Standard Document, 2015) (figure 30).

La répétition des prises de vues permet de constituer des archives d'images. Seulement, pour les capteurs optiques les conditions climatiques (notamment la couverture nuageuse) altèrent la résolution temporelle et rend impossible l'utilisation de certaines images acquises pendant les saisons pluvieuses en particulier. Pour une étude de suivi multi temporel des changements qui nécessite des images acquises à plusieurs périodes différentes, la résolution temporelle est alors déterminante.

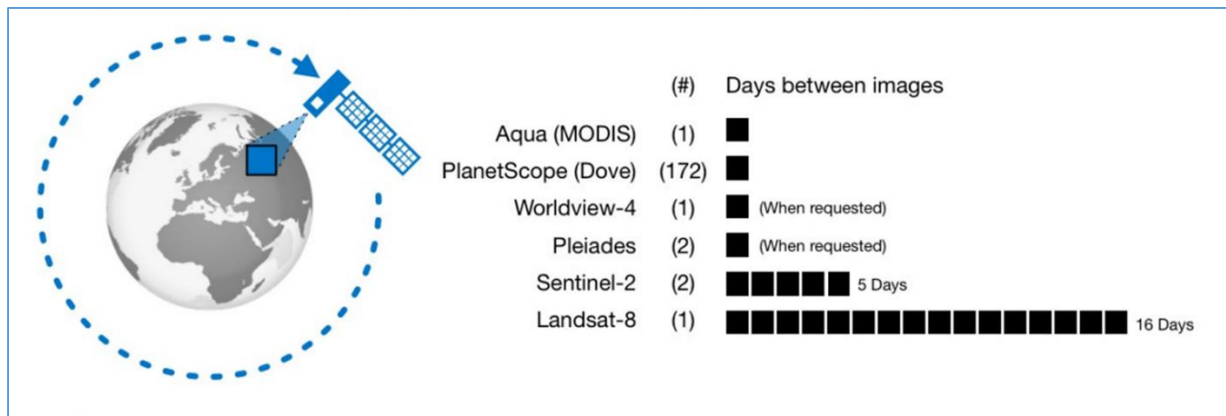


Figure 30 : Résolution temporelle des capteurs spatiaux d'observation de la Terre (MODIS, Sentinel-2, Landsat-8, etc.) (Source : Gregory Giuliani, 2019).

La troisième caractéristique des capteurs c'est leur résolution spectrale. Elle est déterminée par le nombre de bandes spectrales et caractérise la capacité des capteurs à discriminer de petites fenêtres de longueurs d'ondes (figure 31). Les images hyper spectrales Hypérion (242 bandes) ont une résolution spectrale plus importante que celle des images Sentinel-2 (13 bandes multi spectrales) et plus importante encore que celle des images Pléiades ou Quickbird-2 (4 bandes multi spectrales). Lorsque cette résolution est fine, l'intervalle de longueur d'onde est étroit et contiguë et les images acquises fournissent des signatures spectrales précises des objets permettant ainsi de bien les discriminer (Dusseux, 2014). Par conséquent les images des capteurs tels que Landsat (7 à 11 bandes) ou Sentinel-2 (13 bandes) sont parfaitement adaptées pour différencier les objets de surface et les cartographier dans un environnement hétérogène comme notre espace d'étude.

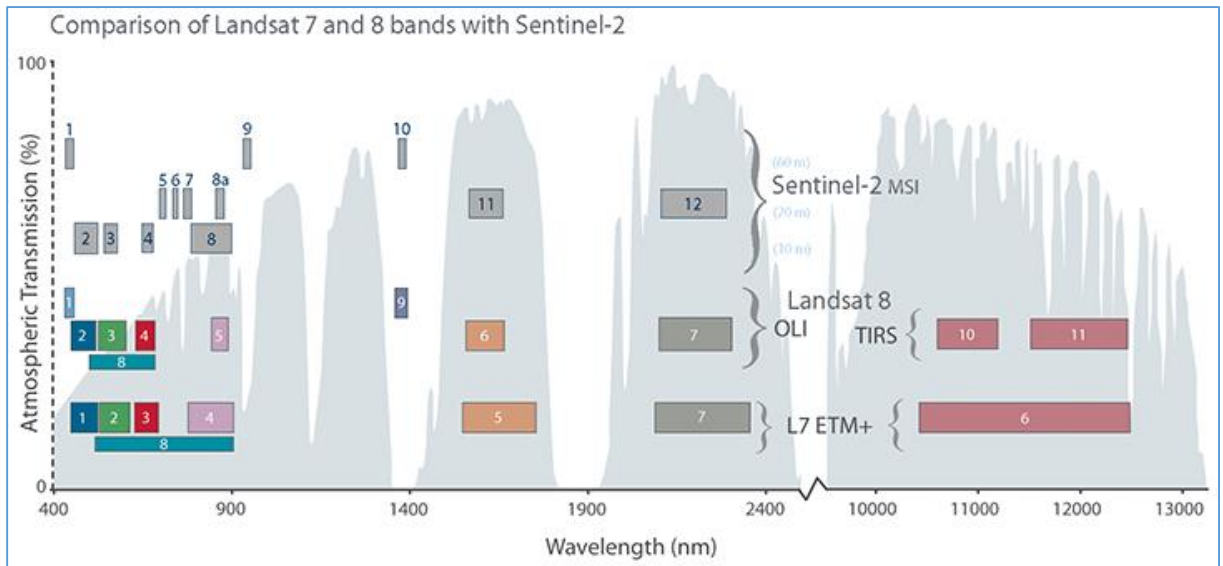


Figure 31 : Comparaison des résolutions spectrales des capteurs Sentinel-2 et Landsat 7 et 8 (source : <https://www.usgs.gov/media/images/comparison-landsat-7-and-8-bands-sentinel-2>).

Tableau 2. Caractéristiques des images satellites optiques et radars.

Satellite	Domaine	Résolution spectrale	Bande ou polarisation	Résolution spatiale (m)	Résolution temporelle (j)	Fauchée (km)
Satellite à Très Haute Résolution Spatiale (THRS)						
GEOEYE-1	Optique	Panchromatique Multispectral	1 4	0,41 1,65	<3	15,2
IKONOS-2	Optique	Panchromatique Multispectral	1 4	1 4	2-3	11
PLEIADES	Optique	Panchromatique Multispectral	1 4	0,5 2	2	20
QUICKBIRD-2	Optique	Panchromatique Multispectral	1 4	0,6 2,5	3-7	16,5
SPOT 6,7	Optique	Panchromatique Multispectral	1 4	1,5 6	26	60
WORLDVIEW-2	Optique	Panchromatique Multispectral	1 8	0,5 1,8	1-4	16,4
CASI	Optique	Hyperspectral	288	2,5		
RADARSAT-2	Radar	Bande C	polarimétrique	de 3 à 100	24	de 45 à 500
TERRASAR-X	Radar	Bande X	double	1	11	10*5
Satellite à Haute Résolution Spatiale (HRS)						
ALOS	Optique	Panchromatique Multispectral	1 4	2,5 10	2	40
ASTER	Optique	Multispectral Multispectral	3 6	15 30	16	60
FORMOSAT-2	Optique	Panchromatique Multispectral	1 4	2 8	1-2	24
LANDSAT 1,2,3	Optique	Multispectral	5	60	18	185
LANDSAT 4,5	Optique	Multispectral	7	30	16	185
LANDSAT 7	Optique	Panchromatique Multispectral	1 7	15 30	16	185

LANDSAT 8- TIRS	Optique	Panchromatique Multispectral	1 8	15 30	16	185
SENTINEL-2	Optique	Multispectral	13	10	5	290
SPOT 1,2,3	Optique	Panchromatique Multispectral	1 3	10 20	26	60
SPOT 4	Optique	Panchromatique Multispectral	1 4	10 20	26	60
SPOT 5	Optique	Panchromatique Multispectral	1 4	5 10	26	60
AVIRIS	Optique	Hyperspectral	224	20		12
HYPERION	Optique	Hyperspectral	242	30	16	
ALOS - PALSAR	Radar	Bande L	polarimétrique	10	2	40
ENVISAT/ASAR	Radar	Bande C	double	de 30 à 1000	23	de 10 à 400
ERS-2	Radar	Bande C	VV	30	35	100
RADARSAT-1	Radar	Bande C	Simple	de 8 à 100	24	de 45 à 500
Satellite à Moyenne Résolution Spatiale (MRS)						
HJ-1A	Optique	Hyperspectral	115	100	de 4 à 31	50
MODIS	Optique	Multispectral	36	250	2	2330
Satellite à Basse Résolution Spatiale (BRS)						
SPOT - VEGETATION	Optique	Multispectral	4	1000	1	22500
NOAA	Optique	Multispectral	6	de 500 à 1000	1	2940

Depuis la mise en orbite du premier satellite d'observation de la Terre Landsat effectué en 1972, des centaines de satellites passifs et actifs d'observation de la Terre ont été lancés (figure 32). Ils fournissent aujourd'hui des images satellites aux résolutions spatiale, temporelle et spectrale diverses. L'accès à certaines de ces images est gratuit à l'exemple des images Landsat. D'autres en revanche sont à caractère commerciale comme les images Pléiades, SPOT 6 et 7, Ikonos-2 ou Worldview-2.

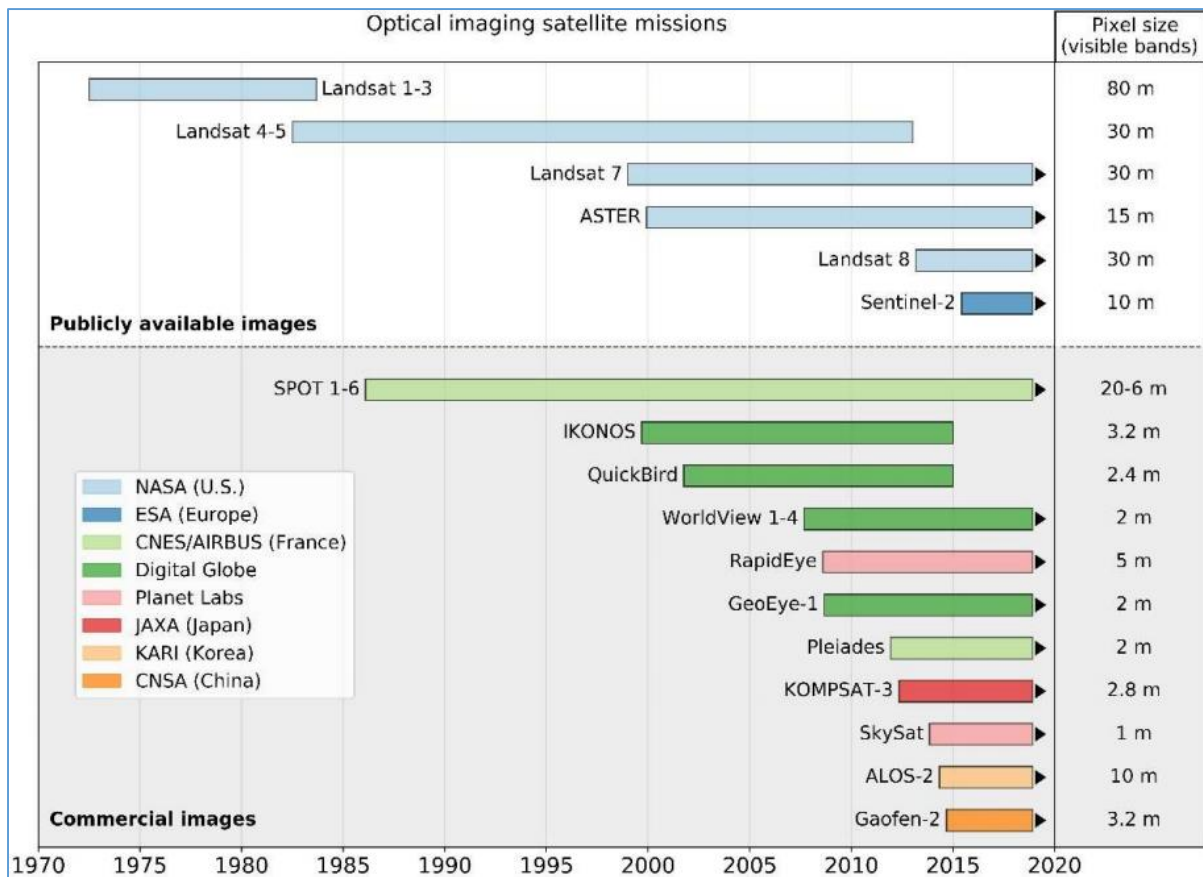


Figure 32 : Evolution de l'offre en satellites spatiaux optiques. (Sources (Vos et al. 2019)).

2.2.1. Le choix des données utilisées

Les images utilisées dans l'analyse spatio-temporelle de la partie camerounaise du lac Tchad et de son arrière-pays sont essentiellement de télédétection spatiale optique, et issues de plusieurs systèmes d'observations et caractérisés par des résolutions très différentes d'un capteur à un autre. La diversité des images pour cette étude est indispensable pour la cartographie multi échelles et multi temporelles de l'occupation et de l'utilisation des sols. Le choix de l'imagerie satellitaire est grandement dépendant des paramètres liés à leurs résolutions spatiales, spectrales et de répétitivités temporelles. Celles-ci vont entres autres définir la disponibilité des images et leur compatibilité aux applications ou opérations telles que la cartographie de l'occupation et de l'utilisation des sols, les analyses spatiales (aux échelles locales ou régionales), et les analyses diachroniques des changements sur pas de temps variables (hebdomadaires, mensuels ou annuels).

2.2.1.1. Approches multi-niveaux

a. Les images MODIS

Les données images de MODIS TERRA sont exploitées dans ce travail pour suivre l'évolution de la couverture végétale entre 2000 et 2018 et d'autre part pour extraire les valeurs mensuelles de température de surfaces des sols durant les mêmes périodes. Les valeurs de températures exprimées en degré kelvin (Vermote, Roger, et Ray, 2015), et celles de NDVI caractérisant l'état du couvert végétal, sont issues du capteur MODIS TERRA dont les produits fournis au niveau L3 bénéficient de quelques corrections (à l'exemple des valeurs de NDVI qui sont moyennées) avant leur mise en ligne et sont proposées par l'opérateur LP DAAC en charge de ce capteur (Giglio, Schroeder, et Hall, 2018). L'utilisation de cette donnée se justifie régulièrement par l'accessibilité, la haute résolution temporelle et la largeur de la fauchée qui permet de couvrir des territoires vastes en superficies (c'est l'exemple des images MODIS de températures (MOD11C3) dont les scènes couvrent la planète toute entière).

Les images MODIS de température (MOD11C3) disposent de 17 bandes qui mesurent des paramètres climatiques dans l'atmosphère et à la surface des sols (Vermote, Roger, et Ray, 2015). Les bandes 01 et 06 correspondent à la température des sols mesurée de jours et de nuits (tableau 3). Ces images satellites servent donc dans ce travail à estimer respectivement les températures maximales et minimales pour déduire les températures moyennes des sols. Les images mensuelles de 5600 m de résolution spatiale (à l'équateur) en projection latitude et longitude sont obtenues en faisant la moyenne des observations journalières du mois correspondant. Pour couvrir du 18 Février 2000 au 31 Décembre 2018, pas moins de 215 granules sont nécessaires.

Tableau 3. Extrait des caractéristiques d'image MODIS TERRA MOD11C3.

N° Bande	Nom de la bande	Description	Unité	Format de l'image	Valeur de remplissage	Valeurs nulles	Intervalles	Facteur d'échelle	Décalage supplémentaire
01	LST_ Day_ CMG	Température des sols mesurée de jour	Kelvin	16-bit unsigned integer	0	N/A	7500 à 65535	0.02	N/A
06	LST_ Night_C MG	Température des sols mesurée de nuit	Kelvin	16-bit unsigned integer	0	N/A	7500 à 65535	0.02	N/A

Sources : <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11c3v006/>

Les images MODIS/Terra végétation de référence MOD13Q1 sont disposées par granules (les scènes ne sont pas planétaires comme c'est le cas de MOD11C3). Les images qui couvrent le territoire de la région du lac Tchad et son arrière-pays sont de coordonnées h19v07 (figure 33). Elles sont constituées de 12 bandes. Les deux premières

correspondent aux indices spectraux de végétation (tableau 4) (NDVI pour l'activité chlorophyllienne des plantes et EVI pour la quantité de biomasse contenue dans celles-ci) (Solano, Kamel, et Andree, 2010). Grâce à leur régularité temporelle ces mesures correspondent à un résumé bihebdomadaire des meilleurs enregistrements en termes de qualité de donnée et qui prend en compte la faible couverture nuageuse, l'angle de prise de vue et les fortes valeurs enregistrées de NDVI et d'EVI (Solano, Kamel, et Andree, 2010).

Tableau 4. Extrait des caractéristiques d'images MODIS TERRA MOD13Q1.

N° Bande	Nom de la bande	Description	Format de l'image	Valeur de remplissage	Valeurs nulles	Intervalles	Facteur d'échelle
01	250m 16 days NDVI	Moyenne NDVI de 16 jours	16-bit signed integer	-3000	N/A	-2000 à 10000	0.0001
02	250m 16 days EVI	Moyenne EVI de 16 jours	16-bit signed integer	-3000	N/A	-2000 à 10000	0.0001

Sources : <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/>

Ces images satellites sont utilisées dans notre recherche pour cartographier la couverture végétale de la partie camerounaise du lac Tchad et de son arrière-pays entre Février 2000 et Décembre 2018. Pour cela, 434 granules de 250 mètres de résolution spatiale sont nécessaires. Elles permettront d'une part de cartographier les principales classes de végétation présentes dans notre espace d'étude et d'autre part de suivre leurs évolutions spatio-temporelles (mensuelles et annuelles) durant cette période.

Cependant, ces images sont des résumés d'observation sur des périodes de prises de vues bihebdomadaires. Par conséquent, les valeurs spectrales des pixels sont moyennées ce qui revient à dire que les valeurs obtenues sur l'image bihebdomadaires ne correspondent pas à une date précise mais à une période (intervalle de 16 jours). Par ailleurs à 250 m de résolution spatiale il est impossible sur l'étendue de notre espace d'étude de cartographier véritablement l'occupation et l'utilisation des sols d'autant plus que les images satellites MOD13Q1 ne renseignent que sur la couverture végétale. De plus ces images ne sont disponibles qu'à partir de l'année 2000.

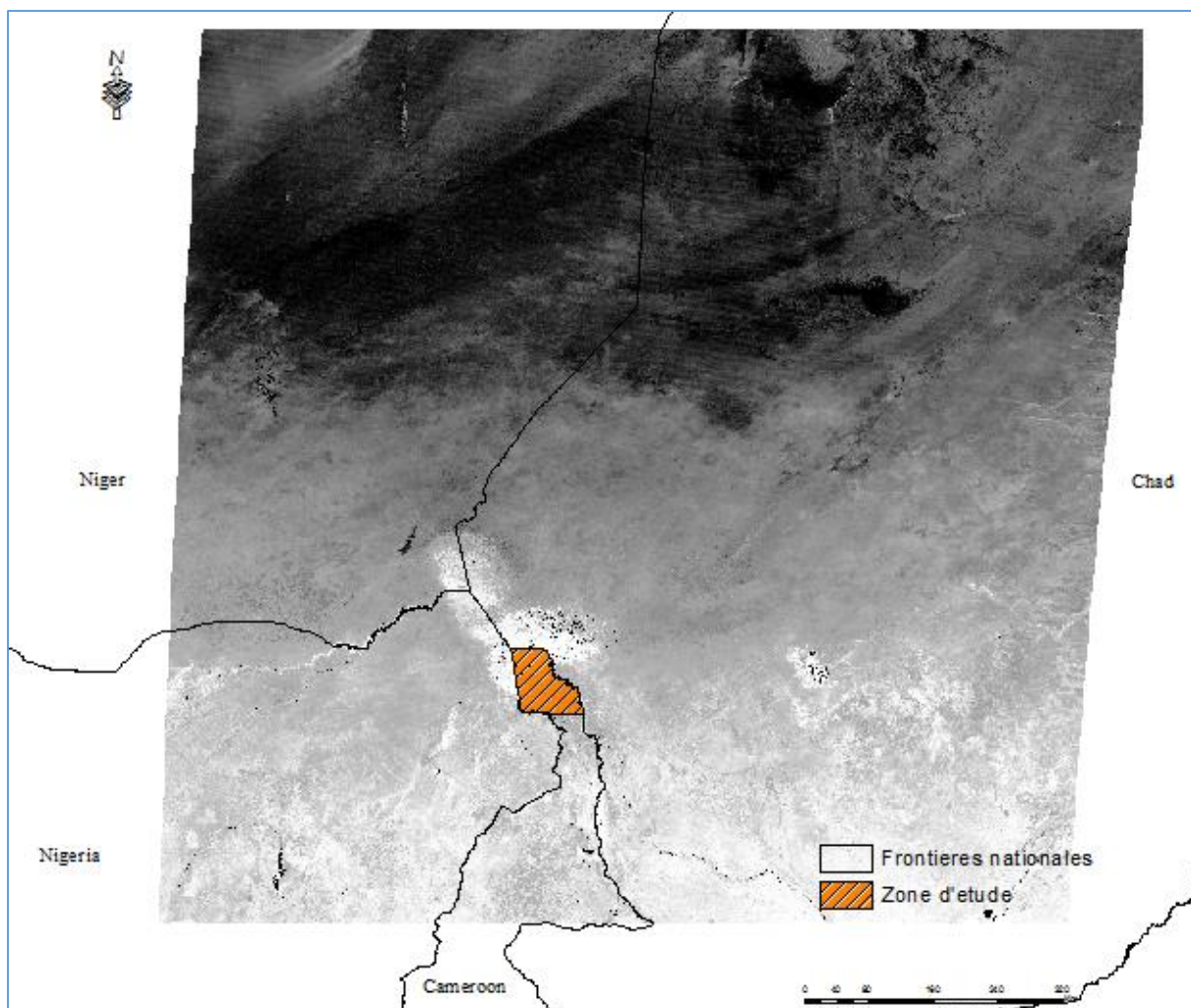


Figure 33 : Couverture terrestre d'une scène MODIS végétation MOD13Q1. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

b. Les images multispectrales de la série Landsat

De par leur profondeur temporelle (images acquises à partir de 1972), les images des satellites Landsat représentent une base de données images importante pour ce travail. En effet, Landsat est le nom donné au premier programme civil d'observation de la Terre par satellite. C'est le programme américain de télédétection spatiale (NASA et USGS), débuté en 1972 et qui compte aujourd'hui 8 satellites dont 7 lancés entre 1972 et 1999, et un dernier mis en orbite en 2013 (seuls 7 satellites ont été exploités ou le sont encore puisque Landsat 6 est sorti de son orbite). Les instruments embarqués ont évolué au fil des satellites, depuis la caméra RVB (Return Beam Vidicon) et le radiomètre multi spectral MSS (Multi Spectral Scanner) de 1972, le radiomètre TM (Thematic Mapper) de 1984, le radiomètre ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) de 1999 jusqu'au capteur OLI (Operational Land Imager) en 2013 (USGS, 2016). Ce programme a donc permis l'acquisition de millions de données formant une librairie exceptionnelle des conditions d'observations de la Terre depuis presque 50 ans.

En raison du caractère diachronique de notre étude, l'utilisation des images acquises par ces quatre générations de capteurs s'impose donc comme une nécessité. D'une part pour retracer les observations les plus antérieures possibles en liens notamment avec les changements environnementaux du milieu physique, et d'autre part pour constituer une base de données conséquente et solide pour modéliser les changements observés. Deux scènes de coordonnées 198/051 et 199/051 pour le capteur MSS, et de coordonnées 184/051 et 185/051 pour les trois autres capteurs sont à chaque fois nécessaires pour la couverture de l'ensemble de la zone d'étude (figure 34). Grâce à leur résolution spatiale (15, 30 et 60 m), et spectrale (5, 7, et 11 bandes), ces images nous permettent de discriminer les objets de surface (sols nus, végétation, eaux de surfaces, marécages, bâti) dans notre aire d'étude. Elles vont par conséquent nous servir à cartographier l'occupation et les changements d'occupation du sol depuis les grandes sécheresses sahéliennes. Les images d'archive accessibles via internet depuis Janvier 2009 ont été acquise sur le site <http://earthexplorer.usgs.gov>. L'absence d'image et/ou la forte couverture nuageuse à certaines périodes de l'année ont fortement influencé le choix des dates.

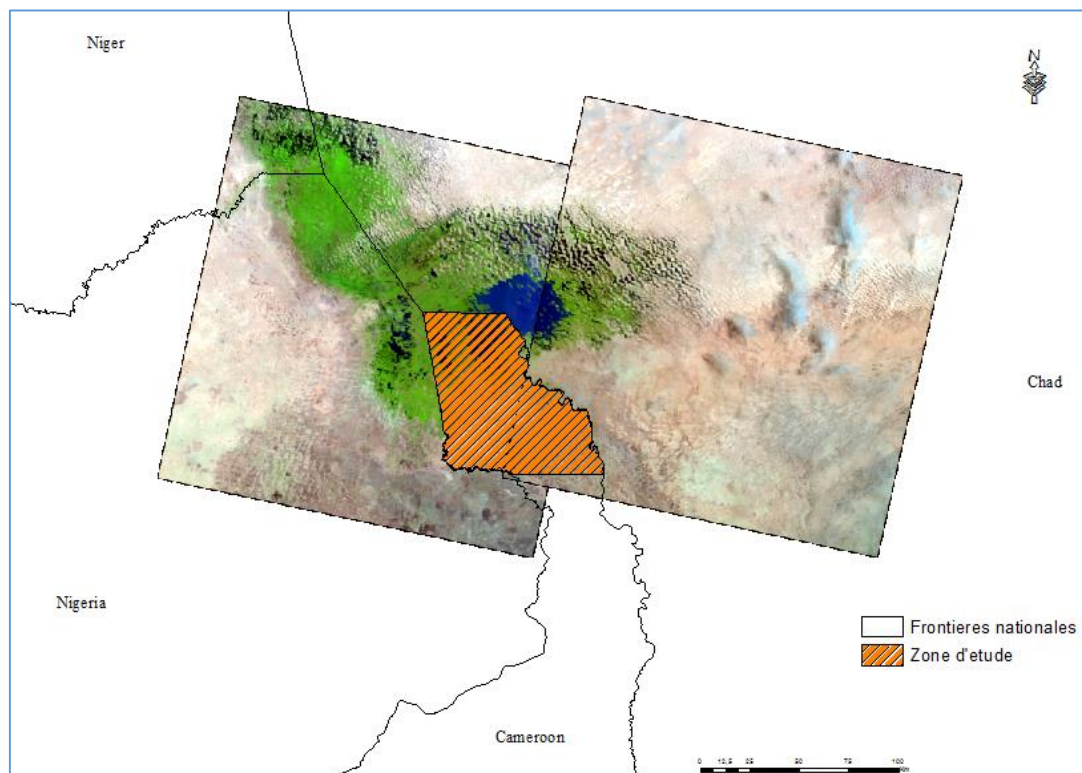


Figure 34 : Couverture terrestre des scènes Landsat-8. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

- Les images du capteur MSS (Multispectral Scanner)

Elles permettent une visualisation relativement ancienne de l'état du lac Tchad et de son environnement au début de la décennie 1970, avant les grandes sécheresses

sahéliennes notamment. Enregistrées par le scanner MSS les images sont réparties en cinq bandes spectrales soit deux bandes dans le domaine spectral du visible et deux autres dans le domaine infrarouge (tableau 5). Les scènes acquises tous les 18 jours ont une taille de 185/185km avec une résolution spatiale de 60 mètres et 240 mètres pour la bande infrarouge thermique (Landsat 3 uniquement) (USGS, 2016).

Tableau 5. Caractéristiques des scènes du capteur MSS.

Capteur MSS	N° Bande	Fenêtre spectrale	Résolution spatiale	Domaine spectral
<u>Date d'acquisition des images utilisées :</u>	4	0,5 - 0,6 μm	60 m x 60 m	Visible (vert)
- Mars 1973	5	0,6 - 0,7 μm	60 m x 60 m	Visible (rouge)
- Octobre 1975	6	0,7 - 0,8 μm	60 m x 60 m	Proche IR
<u>Path/row</u> : 198/051, 199/051	7	0,8 - 1,1 μm	60 m x 60 m	Proche IR
<u>Projection</u> : UTM, WGS84_zone 33N	8	10,5 - 12,4 μm	240 m x 240 m	IR thermique

Sources : (USGS 2016)

- Les images du capteur TM (Thematic Mapper)

L'usage des images issues de ce capteur servent dans ce travail à étudier l'état de la zone d'étude au cours de la décennie 1980, période pendant laquelle les sécheresses sahéliennes ont été parmi les plus sévères. Les images sont de haute résolution spatiale, possédant 07 bandes spectrales dont quatre en lumière visible et proche infrarouge, deux en infrarouge moyen et une dernière en infrarouge thermique (tableau 6). Les scènes acquises avec une répétitivité temporelle de 16 jours couvrent également une fauchée de 185 km (Northrop, 2015), avec une résolution spatiale de 120 mètres pour la bande infrarouge thermique et 30 mètres pour les autres bandes.

Tableau 6. Caractéristiques des scènes du capteur TM.

Capteur TM	N° Bande	Fenêtre spectrale	Résolution spatiale	Domaine spectral
<u>Date d'acquisition des images utilisées :</u>	1	0,45 - 0,52 μm	30 m x 30 m	Visible (bleu)
- Mars 1987	2	0,52 - 0,60 μm	30 m x 30 m	Visible (vert)
- Octobre 1987	3	0,63 - 0,69 μm	30 m x 30 m	Visible (rouge)
	4	0,76 - 0,90 μm	30 m x 30 m	Proche IR

	5	1,55 - 1,75 μm	30 m x 30 m	Moyen IR1
<u>Path/row</u> : 184/051, 185/051	6	10,4 - 12,5 μm	120 m x 120 m	IR thermique
<u>Projection</u> : UTM, WGS84_zone 33N	7	2,08 - 2,35 μm	30 m x 30 m	Moyen IR2

Sources : (USGS, 2016)

- Les images du capteur ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus).

Les images prises par ce capteur couvrent la fin de la décennie 1990 et le début des années 2000 et sont cruciales pour cette étude car cette période est marquée au Sahel par le retour des conditions climatiques favorables qui ont amorcée selon (Nicholson, 2005) le début du reverdissement du sahel. Les images ETM+ sont une évolution des TM et ETM précédentes en ce sens qu'elles comportent une large bande panchromatique à haute résolution spatiale de 15 mètres, utilisée pour améliorer la résolution spatiale des images multi spectrales (tableau 7). Par ailleurs, la résolution spatiale de la bande infrarouge thermique s'améliore et passe à 60 mètres (Northrop, 2015).

Tableau 7. Caractéristiques des scènes du capteur ETM+.

Capteur ETM+	N° Bande	Fenêtre spectrale	Résolution spatiale	Domaine
<u>Date d'acquisition des images utilisées</u> :	1	0,45 - 0,52 μm	30 m x 30 m	Visible (bleu)
- Septembre 1999	2	0,525 - 0,605 μm	30 m x 30 m	Visible (vert)
- Avril 2000	3	0,63 - 0,69 μm	30 m x 30 m	Visible (rouge)
- Août 2000	4	0,77 - 0,90 μm	30 m x 30 m	Proche IR
	5	1,55 - 1,75 μm	30 m x 30 m	Moyen IR1
	6	10,4 - 12,5 μm	60 m x 60 m	IR thermique
<u>Path/row</u> : 184/051, 185/051	7	2,09 - 2,35 μm	30 m x 30 m	Moyen IR2
<u>Projection</u> : UTM, WGS84_zone 33N	8	0,52 - 0,90 μm	15 m x 15 m	Panchromatique

Sources : (USGS, 2016)

c. Les images optiques multi spectrales Sentinel-2

Les images Landsat sont complétées par celles du capteur Sentinel-2 (figure 35) qui sont de meilleure résolution spatiale (10 m), spectrale (13 bandes) et temporelle (5 jours). Ce sont les images optiques multi spectrales en libre accès les plus précises de la zone d'étude, qui offrent grâce à leur haute résolution spatiale, de meilleures possibilités en

termes d'analyse de l'occupation du sol. Leurs résolutions spectrales dans le domaine du proche infrarouge supérieures à celles des images landsat (figure 31) autorisent notamment des analyses plus détaillées de la couverture végétale (ESA Standard Document, 2015). Elles sont utilisées dans cette étude pour la cartographie détaillée de l'occupation et l'utilisation des sols, la caractérisation de l'état des sols et la modélisation de l'utilisation des sols en 2018.

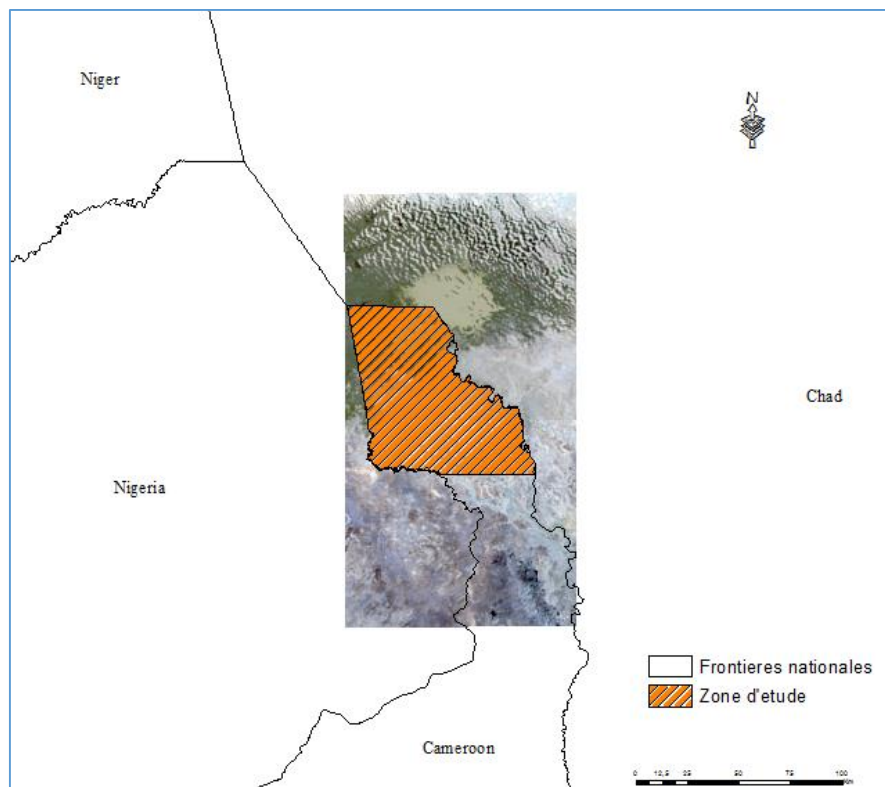


Figure 35 : Couverture terrestre des scènes Sentinel-2. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Partie intégrante du programme spatiale Européen Copernicus, la mission Sentinel 2 a pour objectif de fournir des images multi spectrales à hautes résolutions nécessaires aux études comme le suivi de la végétation, les changements d'utilisation et d'occupation du sol, ou encore la cartographie des parcelles agricoles. Chaque capteur dispose de 13 bandes spectrales (tableau 8) réparties en quatre bandes de 10 mètres de résolution spatiale dans le domaine du visible ; six bandes de 20 mètres de résolution dans l'infrarouge dont quatre dans le proche infrarouge et deux dans l'infrarouge moyen 1 et 2 ; et trois bandes à 60 mètres dont une dédiée au aérosols, une autre à la vapeur d'eau et la dernière au cirrus (ESA Standard Document, 2015). Pour couvrir l'ensemble de la zone d'étude, deux images carrées de 100 x 100 km, référencées T33PVP et T33PVQ correspondant aux coordonnées de la scène sont nécessaires. Les scènes acquises tous les 05 jours vers les régions équatoriales sont téléchargées avec un niveau de traitement correspondant aux corrections radiométriques et géométriques (niveau L1C). Elles sont

la propriété de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et sont disponibles sur le site <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>.

Tableau 8. Caractéristiques des scènes du capteur Sentinel-2.

Capteur Sentinel-2 L1C	Résolution spatiale	N° bande	Nom de bande	Longueur d'onde (µm)
<u>Date d'acquisition des images utilisées :</u> - Avril 2017 - Septembre 2018	10 m	B02	BLUE	0,458-0,523 µm
		B03	GREEN	0,543-0,578 µm
		B04	RED	0,650-0,680 µm
		B08	NIR	0,785-0,900 µm
		B05	Red Edge 1	0,698-0,713 µm
		B06	Red Edge 2	0,734-0,748 µm
	20 m	B07	Red Edge 3	0,765-0,785 µm
		B08A	Red Edge 4	0,855-0,875 µm
		B11	SWIR 1	1,565-1,655 µm
		B12	SWIR2	2,100-2,280 µm
		B01	Aerossol	0,433-0,453 µm
		B09	Water Vapor	0,930-0,950 µm
<u>Projection</u> : UTM, WGS84_zone 33N	60 m	B10	Cirrus	1,365-1,385 µm

Sources : (ESA Standard Document, 2015)

d. Les images multi spectrales SPOT

Les cartographies obtenues à 15 ou 10 mètres de résolution ne nous permettent pas de discriminer précisément l'occupation des sols (surfaces bâties, espaces agricoles, etc.) dans notre espace d'étude. Nous faisons alors recours aux images du capteur SPOT6 (figure 36).

Ces images sont fournies en cinq bandes spectrales (tableau 9) dont une bande panchromatique à 1,5 mètre de résolution spatiale ; trois bandes spectrales à 6 mètres de résolution dans le domaine du visible et une bande dans le proche infrarouge à 6 mètres de résolution également (Astrium, 2013). A cette résolution, la cartographie des surfaces naturelles et artificielles, des parcelles agricoles, des cultures et des forêts, l'aménagement du territoire, l'exploration des ressources naturelles, etc. devient possible. Les images SPOT6 gérées par le Programme spatial français à travers le Centre National des Etudes

Spatiales (CNES), sont acquises par le Satellite SPOT6 mis en orbite en Septembre 2012 (Astrium 2013). Les scènes sont acquises avec une répétitivité temporelle de 26 jours et une fauchée de 60 km au nadir. Quatre scènes primaires avec les corrections radiométriques mais sans les corrections géométriques sont nécessaires à la couverture de l'ensemble de la zone d'étude.

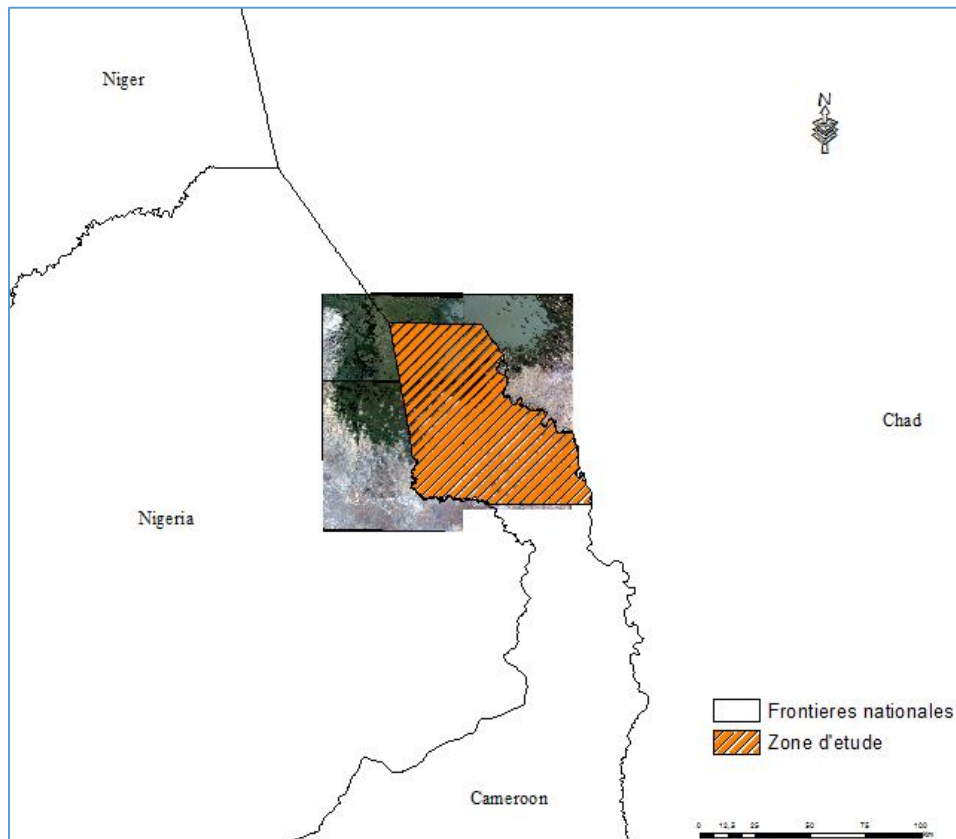


Figure 36 : Couverture terrestre des scènes SPOT. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Ces images sont propriétaires, mais les scènes d'archive du 02 Avril 2017 au-dessus de la cuvette sud du lac Tchad et de son arrière-pays ont pu être acquises dans le cadre de ce travail à travers la plateforme EQUIPEX GEOSUD (Le projet GEOSUD vise à développer l'utilisation de l'imagerie satellitaire au sein de la communauté scientifique nationale Française et des acteurs publics engagés dans la gestion de l'environnement et le développement territorial, et regroupe les acteurs de la Recherche (IRSTEA, CIRAD, CNRS, IRD) ; de la Formation Recherche (AgroParisTech, Université de Montpellier, Université Antilles-Guyanne, Université de la Réunion) ; et du Transfert (CEREMA, CINES, IGN, AFIGEO, GEOMATYS) (EQUIPEX GEOSUD, 2014). Les images n'étant disponibles qu'à une seule date, elles ne peuvent permettre la cartographie des changements d'occupation ou d'utilisation des sols et leurs analyses. Elles sont cependant très importantes voire indispensables pour cette recherche, car elles nous servent de références pour la cartographie et l'extraction précise et détaillée des surfaces bâties en 2017, la validation

des classifications de l'occupation du sol, et pour valider et affiner la délimitation des superficies agricoles des années récentes. Pour cela, la résolution spatiale des bandes multi spectrales est rééchantillonnée de six mètres à un mètre et demie de résolution.

Tableau 9. Caractéristiques des scènes du capteur SPOT6.

Capteur SPOT 6	Bande	Fenêtre spectrale	Résolution spatiale	Domaine spectral
<u>Date d'acquisition des images utilisées :</u>	PAN	0,450-0,745µm	1,5 m x 1,5 m	Panchromatique
- Avril 2017	B0	0,450-0,520 µm	6 m x 6 m	Visible (bleu)
	B1	0,530-0,590 µm	6 m x 6 m	Visible (vert)
	B2	0,625-0,695 µm	6 m x 6 m	Visible (rouge)
<u>Projection</u> : UTM, WGS84_zone 33N	B3	0,760-0,890 µm	6 m x 6 m	Proche IR

Sources: (Astrium 2013)

2.2.1.2. Résumé des caractéristiques des images satellites utilisées pour l'étude.

Les images de sources différentes sont comparées et combinées pour l'étude des surfaces terrestres, en l'occurrence la cartographie du couvert végétal (Huete, 1997; Cheng, 2006; Albarakat et Lakshmi, 2019). Dans notre cas, il s'agit de cartographier l'occupation du sol et de suivre leurs dynamiques spatiales et temporelles par la combinaison d'images issues de capteurs différents. L'exploitation de ces données nous donne par ailleurs la possibilité de combiner les images de faible résolution spatiale mais de bonne répétitivité temporelle (MODIS (MOD13Q1) avec les images de meilleures résolutions spatiales mais faiblement répétées dans le temps (Landsat, SPOT 6). La figure 37 illustre entre 1973 et 2018 toutes les images téléchargées et utilisées dans cette recherche.

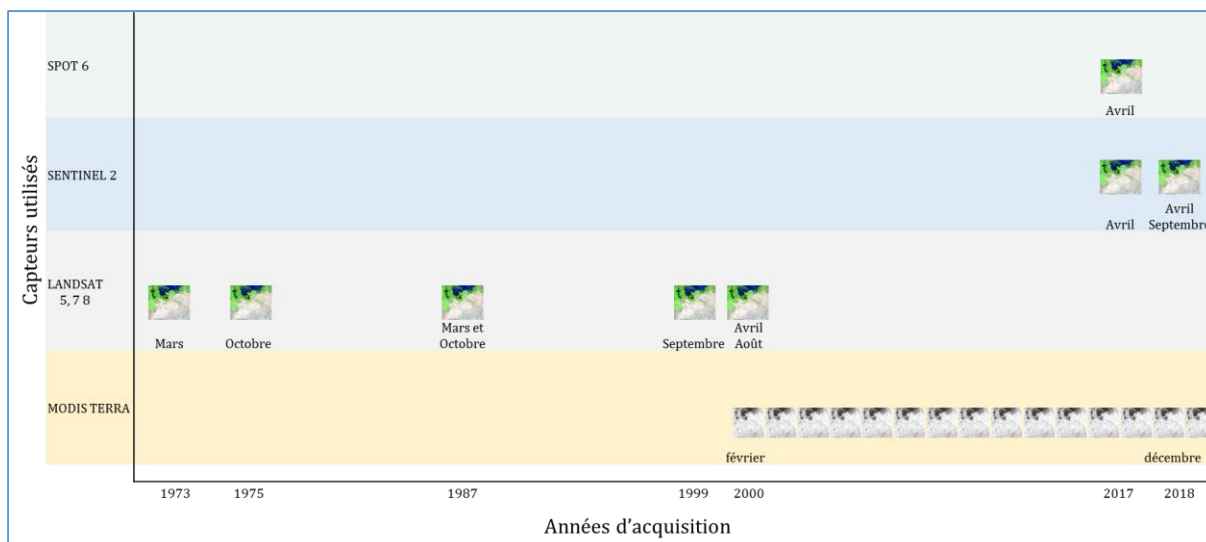


Figure 37 : Couverture temporelle des images utilisées. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Une réflexion sur les niveaux de correspondance entre les types de capteurs dont les images sont utilisées s'impose. En termes de résolutions spatiales, les images Landsat à 30 mètres, sentinel-2 à 10 mètres et SPOT 6 à 1,5 mètres de résolutions offrent une précision bien meilleure que celle de MODIS à 250m (tableau 10) (figure 38). Ce détail et d'autant plus important en raison du fait que notre échelle d'analyse est locale. La cartographie des classes de végétation qui ne nécessite pas une précision particulière peut s'établir à partir des images MODIS, en revanche pour l'occupation et l'utilisation des sols les trois premiers capteurs sont incontournables.

Tableau 10. Avantages et limites des images satellites utilisées.

Capteurs	Avantages	Limites
		Valeurs moyennées
MODIS (MOD13Q1)	Résolution temporelle Accès libre	Résolution temporelle faible (250 m) Ne concernent que le couvert végétal Disponible seulement à partir de 2000
LANDSAT	Profondeur temporelle (disponible depuis 1972) Accès libre	Classification pas assez précise (15 m de résolution spatiale) Couverture nuageuse (saison des pluies)
SENTINEL-2	Résolution spectrale et temporelle	Classification pas assez précise (10 m de résolution spatiale)

	Accès libre	Couverture nuageuse (saison des pluies)
		Disponible seulement à partir de 2015
		Commerciale
SPOT 6	Résolution spatiale (Classification de précision)	Résolution spectrale faible (4 bandes multispectrales) Fauchée réduite (les quatre scènes utilisées ne couvrent pas entièrement la zone d'étude)

Les scènes d'images SPOT 6, Sentinel-2, Landsat-7 et 8 sont acquises de façon instantanée à un moment précis et les images sont constituées de valeurs radiométriques enregistrées par le capteur (ESA Standard Document, 2015; USGS, 2016). Par contre les images MODIS (NDVI) sont des résumés d'observation sur des périodes de prises de vues bihebdomadaires. Après chaque deux semaines d'acquisitions, l'algorithme sélectionne les meilleures valeurs des pixels en fonctions de trois critères : la couverture nuageuse la plus basse, l'angle de prise de vue le plus faible, et la valeur de NDVI la plus élevée pour constituer une image de valeurs moyennes des observations. Les indices de végétation obtenus de ces images sont donc des valeurs moyennées de NDVI par pixels sur une période de deux semaines. Cette méthode d'acquisition a pour avantage de fournir des valeurs d'indices pour chaque pixel quelques soit la période de l'année, contrairement aux modes d'acquisitions des images Landsat où la couverture nuages parfois dense constitue un handicap pour l'exploitation des images à certaines dates comme dans le cas des saisons des pluies où la présence des nuages est particulièrement forte.

Par ailleurs, avec les images Landsat par exemple les indices de NDVI sont calculés par l'opérateur après que les prétraitements atmosphériques et radiométriques soient appliqués aux images pour améliorer leur qualité. Ces opérations permettant de contrôler les valeurs radiométriques des pixels et les valeurs spectrales des indices calculés ne sont pas possibles sur les images MODIS. En d'autres termes, bien que les formules d'indices soient universelles et s'appliquent pareillement quelques soit le capteur utilisé, la marge de contrôle des données dont dispose l'opérateur qui manipule les images Landsat est bien plus grande qu'avec les données MODIS.



Figure 38 : Synthèse des caractéristiques des images utilisées. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

2.2.1.3. Données complémentaires de la zone d'étude nécessaires à l'étude

Ce sont des données qui viennent en complément de celles servant à analyser les occupations des sols. Elles nous permettent de compléter les informations relatives entre autres à la géomorphologie des sols (Modèle Numérique de Terrain), aux variations des niveaux d'eau du lac Tchad, aux paramètres climatiques (précipitations, humidité de l'air, ensoleillement), etc. Elles sont également superposées aux résultats de traitements d'images pour analyser les changements environnementaux intervenus.

a. Les images worldclim températures et précipitation

Ces données nous aident à suivre et analyser l'évolution de la pluviométrie et de la température au-dessus de la zone d'étude et sont également utilisées pour la modélisation rétrospective de l'utilisation des sols. Calculées entre 1970 et 2000 à l'échelle planétaire, ces images représentent les valeurs moyennes mensuelles de précipitations ; des températures minimales, moyennes et maximales ; du rayonnement solaire ; de la pression de la vapeur d'eau et enfin de la vitesse du vent (Fick et Hijmans, 2017). Elles sont produites sous formes de raster à 1 km² de résolution spectrale avec 12 bandes spectrales représentant les valeurs de chaque mois, et sont disponibles à l'adresse <https://www.worldclim.org/>.

b. Les images de précipitations du capteur Chirp's

Les images CHIRPS fournissent également l'historique des précipitations depuis 1981 jusqu'à présent et nous offrent alors la possibilité de suivre et d'analyser l'évolution de la pluviométrie au-dessus du lac Tchad et ses environs depuis cette date. Elles sont obtenues par l'interpolation de plusieurs données telles que les relevés pluviométriques in situ des stations météorologiques, les données de Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) ou encore les observations infrarouge thermiques du satellite NOAA (Funk et al., 2015). Les images à 5 km de résolution spatiale sont des estimations de précipitations des régions comprises entre 50° de latitudes Nord et Sud et entre 180° de longitude Ouest et Est. Elles sont produites sur l'initiative commune de L'USGS, la NASA, l'université de Californie et la Santa Barbara Climate Hazards Group (Funk et al., 2014). Ces données produites quotidiennement et à de fréquences temporelles variées (journalières, mensuelles, annuelles) sont disponibles sur le site internet de l'USGS et les images d'archives remontent jusqu'à 1981. Pour notre recherche nous utilisons les images comprises entre Janvier 2001 et Décembre 2018.

c. Le MNT ASTER GDEM

Le moyen le plus accessible pour visualiser la topographie de cette région est l'utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). C'est la version 3 de l'ASTER

GDEM à 30x30 mètres de résolution spatiale disponible depuis 2011 qui est ici utilisée. Les images sont disponibles en pixels de 1 degré sur 1 degré avec les altitudes exprimées en mètre et sont accessibles depuis la plateforme de l'USGS. Deux scènes de coordonnées ASTGTMV003_N13E014 et ASTGTMV003_N12E014 sont nécessaires à la couverture de l'ensemble de la zone d'étude. Chaque scène associe un « DEM » qui correspond aux valeurs d'élévation à un « NUM » qui représente l'évaluation de la précision. Ces données sont également disponibles sur le site internet de l'USGS.

d. Cartographies existantes de l'occupation des surfaces

- Les cartes ancillaires de l'IRD

Ce sont les résultats de travaux publiés en 2000 par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), à l'échelle de l'extrême nord Cameroun, qui soit mettent à jour des travaux antérieures ou sont le fruit de nouveaux. Elaborées à l'échelle 1/650 000 elles cartographient la Géomorphologie des sols, les potentialités des sols et terroirs agricoles, et la Phytogéographie (Seignobos et Iyébi-Mandjek, 2000). Elles nous servent ici à expliquer l'évolution de la couverture végétale en fonction du type de groupements végétaux, de la nature des sols et de leurs caractéristiques physiques, et en fonction des utilisations agronomiques des espaces.

e. Les données vectorielles de limitation de la zone d'étude

L'essentiel des données vectorielles sollicitées dans cette recherche sont de type polygone. Elles nous servent à extraire des images satellitaires, la surface correspondant à notre espace d'étude. Ces données nous permettent également de visualiser les limites des quatre pays qui se partagent le lac Tchad. En dehors des frontières nationales ces données présentent aussi le découpage administratif aux échelles régionales, départementales et communales par pays. Elles sont accessibles via internet à l'adresse <http://www.diva-gis.org/Data>.

f. Paramètres climatiques de la station météorologique de N'Djamena

Pour pallier à l'absence de relevés climatiques de la zone d'étude, les données climatiques in situ de la station météorologique la plus proche à savoir celle de N'Djamena sont exploitées. Elles vont nous servir à mettre en lien les différents changements observés avec l'évolution du climat. Ce sont les relevés mensuels entre 2000 et 2015 de la pluviométrie, des moyennes de températures maximales et minimales, de l'évapotranspiration, de la vitesse du vent à 10 mètres au-dessus du sol, des moyennes maximales et minimales de l'humidité relative de l'air et de la durée d'ensoleillement. Elles sont mises à disposition par la Division de la Climatologie/Direction Générale de la Météorologie Nationale (DGMN) du Tchad et la Direction d'Exploitation et d'Application Météorologique de l'ASECNA (Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar).

2.3. Méthodologie de l'étude

L'approche méthodologique de cette thèse tient en quatre étapes principales :

- La cartographie de l'occupation et de l'utilisation des sols : cette première étape permet de décrire et de caractériser les éléments de surfaces qui occupent notre espace d'étude ;
- La détection des changements : dans cette seconde étape il est question d'analyser l'évolution diachronique de l'occupation et de l'utilisation des sols entre 1973 et 2017 ;
- L'examen des facteurs de changements : c'est l'étape des analyses multicritères spatiales et statistiques qui a pour objectifs d'identifier les facteurs environnementaux responsables des changements ;
- La modélisation spatiale : dans cette dernière étape les relations morpho structurales entre les éléments de surfaces sont mises en évidence pour identifier les principales unités paysagères.

Nos images satellites (MODIS, Landsat 5,7 et 8, Sentinel-2, et SPOT 6) utilisées à l'effet d'analyser les occupations des sols font l'objet d'une séquence de prétraitement (corrections des distorsions radiométriques ; assemblage des bandes spectrales ; mosaïque des images ; extraction à l'échelle de la zone d'étude) qui seront détaillés dans les chapitres 3,4, et 5.

2.3.1. Cartographie multi-échelle de l'occupation et de l'utilisation des sols

En télédétection le traitement qui permet de cartographier l'occupation et l'utilisation des sols à partir des images satellites est la classification d'images. La classification consiste à effectuer les correspondances entre les pixels d'une image (caractérisés par leurs valeurs radiométriques) et un ensemble de classes thématiques *a priori* connues ou non, représentant des conditions d'intérêts (occupation et/ou utilisation des sols) (Masse, 2013). Dans cette représentation l'occupation du sol désigne les éléments caractéristiques de la description de l'espace c'est-à-dire de la couverture physique des surfaces terrestres. Il s'agit des catégories biophysiques telles que : les différents types de couverts végétaux (forêt, savane, champs, pelouses), les zones dénudées, les surfaces dures (roches, bâtiments), les surfaces humides et les plans d'eau (nappes et cours d'eau, zones submergées). En revanche, l'utilisation des sols, plus complexe à déterminer car fonction de l'usage socio-économique des terres caractérise les arrangements, les activités et les intrants introduits par l'homme sur un type d'occupation de sol pour en tirer des produits et/ou des bénéfices. En d'autres termes c'est la description des surfaces terrestres selon leurs finalités socio-économiques (D'Herbès et Fezzani, 2004; Lecerf,

2008). Une surface végétalisée peut par exemple remplir les fonctions de pâturage, de parcelle agricole ou d'espace vert. C'est donc essentiellement la dimension fonctionnelle de l'utilisation des sols au détriment de la dimension séquentielle (séquence d'opération sur le même type de couverture physique) qui sera approfondie dans ce travail.

Dans notre cas, la première cartographie est celle de la couverture végétale. En effet, la littérature (Tucker et al., (1985); Nicholson et Lare, (1990); Eklundh et Olsson, (2003)) démontre que la dynamique de la végétation est un indicateur essentiel de l'évolution des écosystèmes sahéliens. Nous utiliserons pour cela les images MODIS (MOD13Q1) car leur résolution spatiale (250 m) et temporelle (bihebdomadaires) permettent une telle analyse. La seconde cartographie est plus descriptive et détaillée de l'occupation des sols car prenant en compte les autres éléments de surfaces. Pour cette cartographie, les images utilisées sont celles de la série Landsat. Avec une meilleure résolution spatiale (de 15 à 60 mètres), et leurs résolutions spectrales, elles permettent en effet de discriminer d'autres objets de surfaces. Par ailleurs, la profondeur temporelle de ces images satellites permet d'établir les cartographies de l'occupation des sols à partir de 1972. Enfin, la dernière cartographie est plus précise et permet en plus de l'occupation des sols d'identifier les modes d'utilisations dont ils font l'objet (utilisations agricoles en l'occurrence). Les images SPOT 6 à 1,5 mètres de résolution sont utilisées à cet effet.

La photo interprétation de l'image satellite (Landsat 8, 15 mètres) de notre espace d'étude permet de distinguer de prime à bord : les eaux libres, la végétation et marécages, les sols nus, et les surfaces bâties (figure 39).

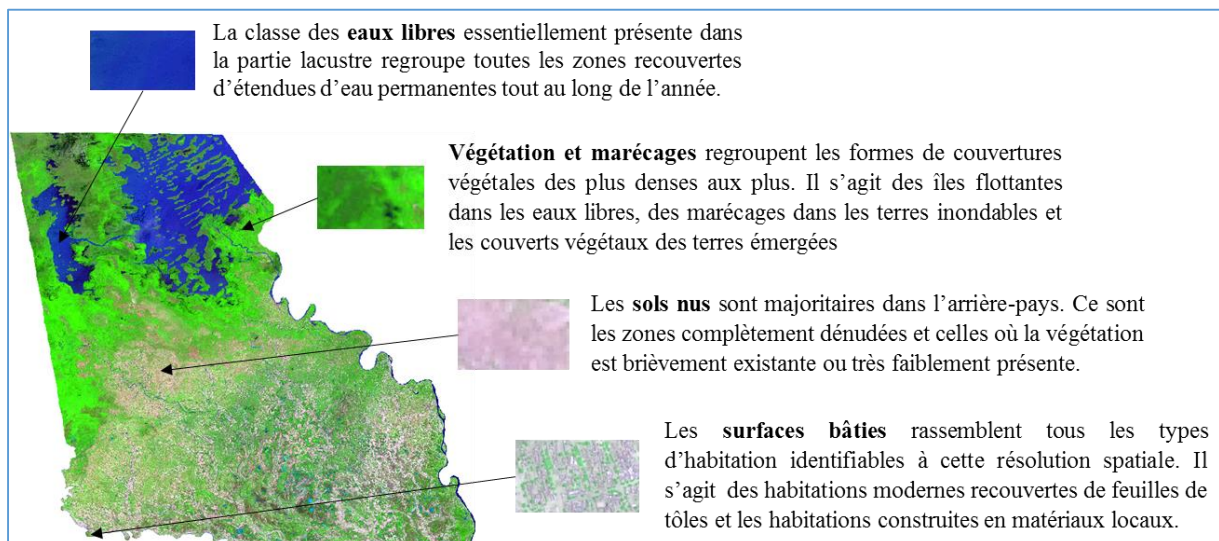


Figure 39 : Description des classes retenues pour la cartographie de l'occupation des sols. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Plusieurs méthodes de classification permettent selon les résolutions (spatiale et spectrale) d'images de cartographier l'occupation et l'utilisation des sols. Elles peuvent

être distinguées en classifications supervisées et en classifications non supervisées (Caloz et Collet, 2001).

Les classifications non supervisées n'utilisent aucunes informations externes à l'image lors de la phase initiale (les pixels sont thématisés en prenant en compte uniquement les critères de ressemblance spectrale). Parmi celles-ci on distingue trois types (Gressin, 2014) :

- Les méthodes par agglomération : c'est l'exemple des classifications hiérarchiques. Elles sont ascendantes si la classification part de chaque pixel pour les regrouper dans des classes, ou descendantes si par contre la classification s'effectue à partir d'un ensemble de pixel qui sont ensuite regroupés en sous classes ;
- Les méthodes par partitionnement : elles permettent de séparer les pixels en n classes homogènes en fonction de la distance spectrale entre les pixels. Parmi ces classificateurs on compte la méthode d'IsoData ou de Kmeans ;
- Les méthodes probabilistes : elles modélisent la distribution des classes d'occupation par une fonction analytique dont les paramètres sont le plus souvent établis par maximum de vraisemblance. Parmi ces classificateurs on compte les méthodes dites de modèles de mélanges (Gressin, 2014).

Pour les classifications supervisées, les pixels sont regroupés dans des classes thématiques d'intérêt connues et préalablement définies au cours de la phase initiale. Ces classes encore appelées échantillons d'apprentissage influencent considérablement le résultat de la classification en fonction notamment de la taille des échantillons, leur distribution sur l'image à classifier, et la séparabilité spectrale des pixels sélectionnés (Caloz et Collet, 2001). La différenciation entre les algorithmes de classification supervisée s'appuie sur la modélisation de la fonction de discrimination des individus à classifier (pixels) (Caloz et Collet, 2001)

- Les classificateurs paramétriques : associent à la signature spectrale une loi de distribution statistique normale ou multi normale. Par cette association, ces classificateurs affectent à chaque pixel la probabilité d'appartenance à une classe donnée. Le plus célèbre d'entre eux est le maximum de vraisemblance (Caloz et Collet, 2001) ;
- Les classificateurs non paramétriques : ne prennent en compte que la distance spectrale et n'exploitent aucune distribution statistique. Seule la relation entre individu est considérée. C'est l'exemple des réseaux neuronaux, des Séparateurs à Vastes Marges (SVM), ou de la distance de Mahalanobis.

Nous choisissons donc parmi ces différentes méthodes de classifications celles qui sont les plus adaptées pour nos cartographies en fonction des caractéristiques des images

(résolutions spatiales, spectrales et temporelles) utilisées et des objectifs des cartographies. Les détails de ces choix sont apportés dans les paragraphes suivants.

2.3.1.1. Cartographie de la répartition du couvert végétal

Le but de cette cartographie est de catégoriser les types de couvertures végétales en fonction de leur comportement végétatif saisonnier ou annuel pour permettre ensuite d'analyser l'évolution des écosystèmes de notre espace d'étude dans le contexte des différents changements environnementaux intervenus au Sahel à partir des grandes sécheresses. Le couvert végétal étant l'indicateur essentiel de l'évolution des écosystèmes sahéliens, il est nécessaire de disposer d'image de végétation à toutes les périodes de l'année. Ceci justifie le recours aux images satellites MODIS MOD13Q1 (une image toutes les deux semaines) et la quantité importante d'images téléchargées (434).

Ces images sont classifiées par la méthode non supervisée. En effet, ce mode de classification est facile à mettre en œuvre, rapide, reproductible et est surtout particulièrement adaptée lorsqu'il s'agit de traiter un nombre important d'image (figure 40).

L'algorithme que nous utilisons est celui de Kmeans. C'est un algorithme approprié au grand jeu de données en raison de sa rapidité. Concernant son principe, on définit un nombre n de classes distinctes à extraire, le classificateur désigne alors aléatoirement n centres de classes parmi les individus (pixel de l'image). Ensuite dans l'étape suivante chaque individu ou pixel qui n'est pas un centre de classe est affecté au centre de la classe dont la valeur est la plus proche. Puis, dans les nouvelles classes obtenues l'algorithme définit à nouveau de nouveaux centres qui sont cette fois ci les barycentres des points de la classe et les pixels sont ensuite réaffectés en fonctions de la proximité de leurs valeurs avec celles des nouveaux barycentres. Cette dernière étape est appliquée de manière itérative et l'algorithme ne s'arrête que lorsque le nombre limite d'itération est atteint ou si l'algorithme a convergé. La convergence de l'algorithme signifie alors que les classes formées entre deux itérations restent les mêmes et que l'inertie intra classe ne s'améliore plus.

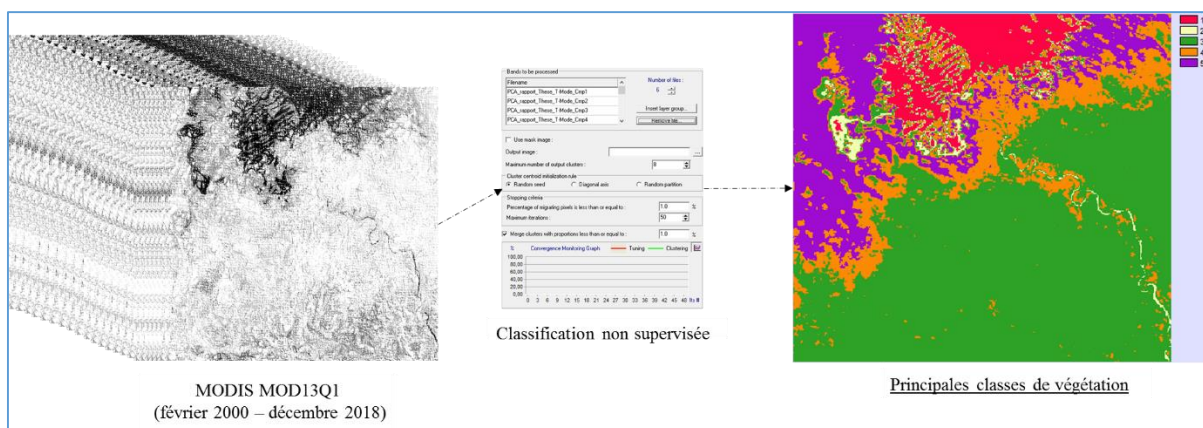


Figure 40 : Processus de Classification des images MODIS NDVI. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Résultats obtenus :

- *Carte de répartition de la couverture végétale dans la partie camerounaise de lac Tchad et son arrière-pays.*

Connaissances produites :

- *Identification des principales classes de végétation ;*
- *Répartition du couvert végétal en fonction de la proximité avec le lac ;*
- *Répartition du couvert végétal en fonction des saisons.*

Apports pour la thèse :

- *Elaboration des variations saisonnières et annuelles de l'activité végétative du couvert végétal et analyse de l'évolution des écosystèmes.*

2.3.1.2. Cartographie de l'occupation et de l'utilisation des sols

La seconde cartographie vise à produire une description détaillée de l'occupation et de l'utilisation des sols. Les premières cartes obtenues à partir des images Landsat concernent l'occupation des sols uniquement. Les cartes obtenues ensuite à partir des images satellites SPOT 6 sont plus précises et concernent aussi bien l'occupation des sols que leur utilisation. Ces deux cartographies ont pour objectif de décrire et caractériser la disposition des éléments de surfaces de l'espace d'étude entre 1973 et 2018. Ces cartographies serviront dans les traitements antérieurs à analyser l'évolution diachronique de l'occupation et de l'utilisation des sols de 1973 à 2018.

La classification de ces types d'image est plus complexe car elles sont de haute et de très haute résolution spatiale et donc sont plus précises. Pour cette raison, la méthode retenue pour les cartographier est la classification supervisée (figure 41). Le jeu de données est par ailleurs peu important (1 image pour SPOT6 et 8 images pour la série Landsat) et permet de traiter chaque image individuellement. L'algorithme utilisé est le classificateur non paramétrique par SVM. C'est un algorithme robuste qui a montré toute son efficacité pour les classifications de ce type d'image (Tzotsos, 2006; Srivastava et al., 2012).

L'algorithme de SVM (Support Vectors Machines en anglais) est une méthode de classification binaire introduite par Vapnik en 1992 dont le but est de déterminer une surface de décision ou hyperplan qui sépare de manière optimale un jeu de données. Les éléments les plus proches de l'hyperplan, constitués en un sous ensemble de données encore appelés vecteurs de support, et issues des échantillons d'apprentissage sont alors utilisés pour déterminer la surface de décision permettant de discerner les deux classes (Tzotsos, 2006; Srivastava et al., 2012). C'est un classificateur qui n'exploite aucune

distribution statistique, ne prend en compte que la distance spectrale (Caloz et Collet, 2001), et s'applique selon deux méthodes.

La première méthode dite « un contre tous » compare une classe avec toutes les autres au moyen d'un classificateur binaire en déterminant pour chacune des classes une surface de décision entre cette classe et les autres. Pour n classes, n hyperplans sont générés et chaque élément à classifier est présenté aux n classificateurs et sera attribué au classificateur ayant renvoyé la plus forte valeur d'appartenance. La seconde approche appelée « un contre un » consiste à calculer l'hyperplan entre chaque classe et chacune des autres classes ce qui aboutit à un classificateur par paire avec $n*(n-1)/2$ surface de décisions. Chaque élément à classifier est alors présenté à chaque $n*(n-1)/2$ surface de décisions et hérite la valeur de l'hyperplan ayant eu la plus forte valeur (Réchal, 2008; Masse, 2013). L'approche de « un contre tous » en raison de sa robustesse et sa simplicité est utilisée dans ce travail.

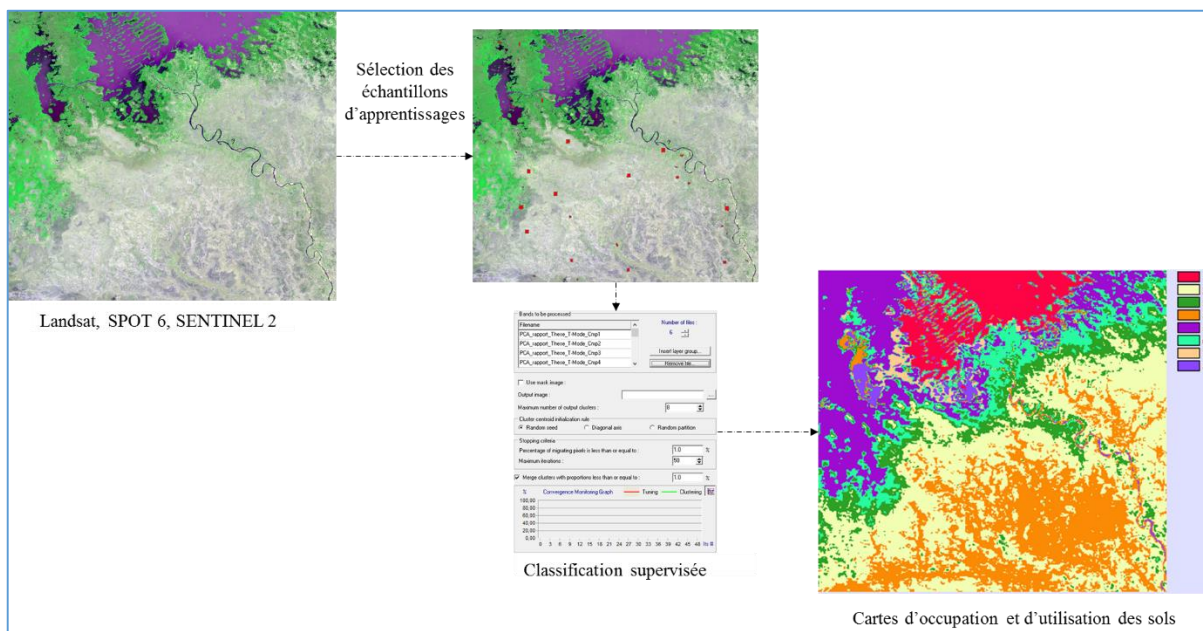


Figure 41 : Etapes de la cartographie de l'occupation et de l'utilisation des sols.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Résultats obtenus :

- Carte de l'occupation des sols dans la partie camerounaise de lac Tchad et son arrière-pays entre 1973 et 2018 ;
- Carte de l'occupation et de l'utilisation des sols dans la partie camerounaise de lac Tchad et son arrière-pays en 1984, 1999 et 2018.

Connaissances produites :

- *Répartition des classes d'occupation du sol (eaux libres, végétation et marécages, sols nus) ;*
- *Estimation des surfaces pastorales ;*
- *Identification et cartographie des zones agricoles ;*
- *Identification et cartographie des espaces urbanisés.*

Apports pour la thèse :

- *Description et caractérisation de la disposition spatiale des éléments de surfaces présents dans l'espace d'étude.*

Les cartographies obtenues nous renseignent sur l'occupation et l'utilisation des sols à des dates précises (Mars 1973, Octobre 1987, Avril 2000, Avril, 2018 etc.). Cependant, vu que notre étude a entre autre pour objectif d'analyser l'évolution diachronique de notre espace d'étude, il est par conséquent nécessaire de détecter les changements environnementaux intervenus dans cet espace.

2.3.2. Identification et analyse des changements d'occupation et d'utilisation des sols

L'étude des changements d'occupation et d'utilisation des sols nécessite la détection et l'identification de la nature desdits changements, la mesure des surfaces qu'ils affectent et la caractérisation de leur organisation spatiale. Ainsi, pour interpréter correctement un type de changement, il est nécessaire non seulement de l'identifier, le qualifier, le quantifier mais également, de le localiser et de déterminer l'évolution de son empreinte spatiale (Lefebvre, 2011). La détection revient alors à fournir des indicateurs de changements entre deux ou plusieurs images (Gressin, 2014) et peut se rapporter soit à des phénomènes lents et évolutifs ou à des événements abrupts (Lefebvre, 2011).

La détection des changements s'applique soit dans la phase de pré classification (différences d'images, les différences d'indices spectraux, régression d'image, Tasseled Cap, ACP, fusions ensemblistes) ou en post classification (classification dirigée ou non, classification visuelle et classification hiérarchique). Selon leur approches les méthodes de détection des changements valables en télédétection se distinguent en : approche binaire (à partir d'une image binaire on identifie les changements et les non-changements) ; approche par trajectoire de changements (elle décrit la provenance et la destination de chaque classes) ; approche spécifique (se focalise sur un type de changement précis par exemple l'assèchement des cours d'eaux) ; approche continue (c'est l'évolution continue d'une variable qui est étudié à l'exemple de l'impact du manque d'eau pour les cultures) (Gressin, 2014). Ces méthodes se distinguent également en fonction de leur niveau de complexité (allant de simples différences d'images aux méthodes d'intégration des SIG et de télédétection), des techniques de traitement

(interprétation visuelle ou approches basées pixel ou basées objet) ou en fonction de leur temporalité.

L'approche adaptée à notre problématique de recherche et aux types d'images satellites à notre disposition est celle des trajectoires de changement. C'est une méthode très simple qui peut s'appliquer aux séries temporelles d'images satellites ou aux couples d'images.

Dans le cas des séries temporelles la détection des changements permet de dégager des tendances d'évolutions en s'appuyant sur un nombre important d'images. Cette méthode est donc adaptée à nos images MODIS en raison de leur nombre important et la régularité des prises de vue.

Concernant les couples d'images cette approche est utilisée pour la détection des changements entre deux dates. C'est l'approche la plus indiquée pour nos images Landsat et SPOT 6. Elle ne nécessite que deux images pour chaque détection de changement et sa mise en œuvre est simple. Pour cette dernière approche l'étape de classification des images est déterminante car elle va conditionner la qualité des cartographies et donc influencer les analyses de changement.

Par conséquent, pour la couverture végétale nous allons identifier et analyser les tendances d'évolution, par contre pour l'occupation et l'utilisation des sols nous analyserons les changements intervenus entre deux dates.

2.3.2.1. Les tendances d'évolutions du couvert végétal

Compte tenu de l'importance de la végétation dans l'étude des milieux sahéliens, nous détectons les changements du couvert végétal dans notre espace d'étude pour déterminer l'évolution des écosystèmes de cet espace. L'approche retenue est celle des séries temporelles car elle supporte bien des volumes importants de données.

L'une des méthodes de détection des changements à partir des séries temporelles d'images consiste à faire une Analyse en Composante Principale (ACP) de l'ensemble des images utilisées. Parmi les composantes obtenues en résultats, la première (qui correspond à la plus grande valeur propre) donne une idée de la tendance générale de la série d'image, et le reste des composantes permettent de visualiser les changements (Gressin, 2014).

Une seconde méthode s'intéresse à la fréquence de valeurs des pixels dans la série temporelle des images pour détecter des changements abrupts ou des changements lents et évolutifs (Gressin, 2014; Genesis et al., 2016). C'est le cas par exemple du test de corrélation statistique de Mann-Kendall qui détermine si les données augmentent ou diminuent entre deux dates, en temps et en valeur, en calculant les fréquences relatives de hausses moins les fréquences relatives de baisses (Genesis et al., 2016). Le résultat dépend fortement de la fréquence temporelle d'acquisition des images. C'est ce test que

Andrieu, (2018) applique aux séries temporelles NDVI des capteurs MODIS et NOAA AVHRR pour analyser la cinématique de la végétation en côte d'Ivoire entre 1981 et 2014.

Le même test est reproduit à nos images MODIS pour mettre en évidence des changements du couvert végétal entre 2000 et 2018 (figure 42). Le choix est dû à la robustesse du test de Mann-Kendall (Yue et Pilon, 2004) et au fait qu'il soit largement utilisé pour des études similaires avec des résultats satisfaisants (Edea et al., 2016; Andrieu, 2018).

Dans le cadre de cette recherche, le test va associer la corrélation de Mann-Kendall ou tau de Kendall, qui mesure les tendances d'évolution du couvert végétal avec le test de significativité qui est appliqué au résultat de la corrélation pour retenir les tendances d'évolution significatives. Le test de significativité appliqué à notre résultat de corrélation permet de retenir les tendances dont les valeurs de probabilité p correspondent à $p < 0.001$.

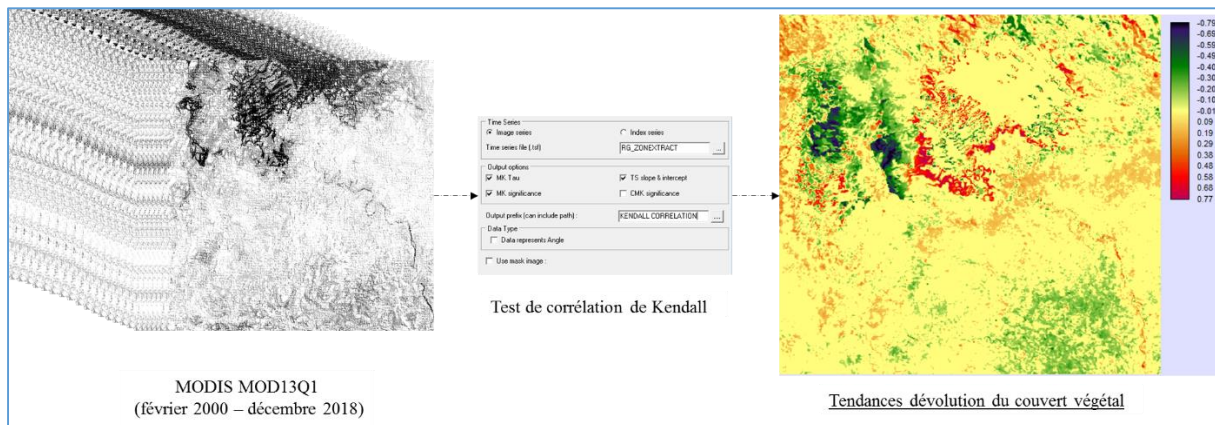


Figure 42 : Corrélation de Mann-kendall. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Résultats obtenus :

- *Cartographie de la tendance d'évolution du couvert végétal dans la partie camerounaise de lac Tchad et son arrière-pays entre Février 2000 et Décembre 2018.*

Connaissances produites :

- *Répartition des formes d'évolution du couvert végétal (Augmentation, Régression Stabilité) ;*
- *Détection des tendances d'évolution du couvert végétal en fonction de la proximité avec le lac ;*
- *Quantification de ces trois formes d'évolution du couvert végétal.*

Apports pour la thèse :

- *L'évolution générale des écosystèmes de la zone d'étude entre 2000 et 2018 est visualisée ;*
- *La cartographie de l'évolution du couvert végétal va servir à identifier les paramètres du milieu responsables des changements environnementaux.*

2.3.2.2. Détection des changements d'utilisation et d'occupation des sols

Les classifications d'images sont croisées deux par deux pour détecter entre deux dates les changements et les non changements. L'objectif est d'obtenir pour chaque classe d'occupation ou d'utilisation des sols la spatialisation des changements et leur trajectoire. Parmi les méthodes en post classification (comme dans notre cas) permettant d'établir ces changements, les comparaisons en post classification sont les plus utilisées car simples à appliquer (Robin, Moisan, et Le Hégarat-Masclé, 2005). En effet, les images sont classifiées de façon indépendante et leur résultats sont comparées ensuite (Ghosh, Mishra, et Ghosh, 2011). Cette méthode est tributaire du résultat des classifications et elle est par ailleurs inadéquate pour analyser des tendances (elle cartographie uniquement les changements et les non changements) (Robin, Moisan, et Le Hégarat-Masclé, 2005). Cependant c'est la méthode adaptée à nos classifications d'occupation et d'utilisation des sols.

Dans notre cas la comparaison en post classification consiste à calculer les différences d'image. Le principe est de soustraire aux valeurs d'un pixel à une date donnée les valeurs du même pixel à une autre date. Les deux images doivent pour cela partager des caractéristiques géométriques communes comme la projection géographique ou la résolution spatiale. C'est une méthode en post classification qui permet d'exprimer les changements obtenus en termes de nombres de pixels, ou en unité de superficies (hectares, mètres ou kilomètres carrés). Les images à croiser sont choisies en fonctions de la nature des changements à cartographier. Par exemple, la carte qui résulte du croisement entre la classification d'août 2000 et celle de Septembre 2018 exprime les changements de l'occupation en saison des pluies entre ces deux dates (séparées de seize ans) (figure 43).

La cartographie des changements est complétée par le calcul des pourcentages d'évolution des classes d'occupation des sols dans le but de déterminer l'évolution de chaque occupation du sol en rapport avec les autres classes. Pour le faire, la différence de superficie d'une classe donnée entre une date initiale t_0 et une date finale t_1 est rapportée à sa superficie à la date t_0 . Ceci permet d'établir le degré d'augmentation ou de diminution de la superficie de ladite classe entre ces deux dates.

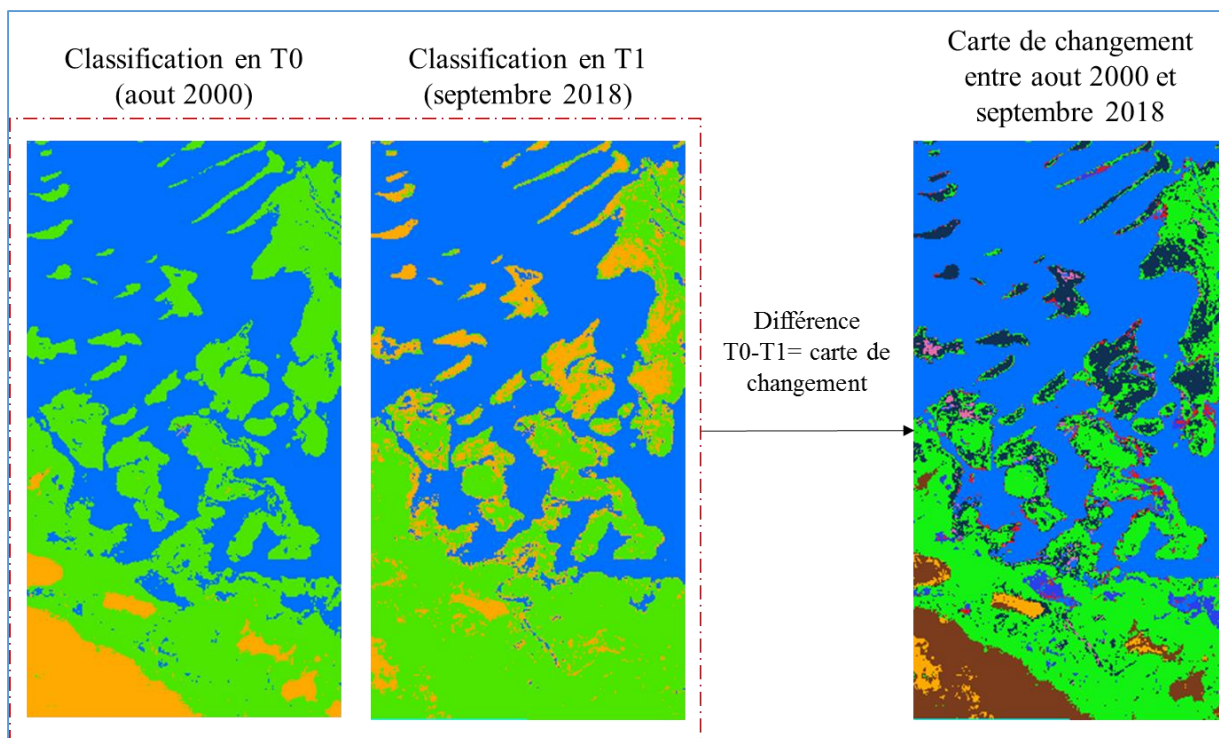


Figure 43 : Méthode de suivi de changements de l'occupation et de l'utilisation des sols.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Résultats obtenus :

- *Cartes de changements d'occupation et d'utilisation des sols dans la partie camerounaise de lac Tchad et son arrière-pays entre 1973 et 2017.*

Connaissances produites :

- *Détection des évolutions de l'occupation des sols entre les saisons ;*
- *Détection des évolutions de l'occupation et de l'utilisation des sols entre les années ;*
- *Quantification des évolutions de l'occupation et de l'utilisation des sols.*

Apports pour la thèse :

- *Les cartographies des changements permettent d'évaluer la résilience des écosystèmes et visualiser l'évolution de l'utilisation anthropiques des sols de l'espace d'étude depuis les grandes sécheresses sahéliennes ;*
- *Les cartographies des changements d'occupation et d'utilisation des sols vont servir à identifier les paramètres du milieu responsables des changements environnementaux.*

La détection des changements permet de visualiser les modifications spatiales et temporelles des éléments de surfaces, mais ne permet pas d'identifier les causes qui expliquent ces changements. La troisième étape de nos traitements porte sur

l'identification des paramètres environnementaux intervenants dans les changements observés. Elle est expliquée dans la section suivante.

2.3.3. Examen des changements d'occupation et d'utilisation des sols par corrélations multicritères

La nature et la disposition de l'occupation et de l'utilisation des sols varient dans le temps et dans l'espace sous l'impulsion des composantes environnementales (naturelles et anthropiques) dont les influences peuvent être directement ou indirectement mesurées. Ces composantes sont des facteurs de changement dont l'identification est déterminante pour comprendre les dynamiques spatiales qui impactent sur l'environnement et les paysages (Corgne, 2004b). Pour cela, Il est important d'expliquer les changements détectés en fonctions de ces facteurs environnementaux dans l'objectif de définir les poids respectifs des facteurs identifiés. Cette identification pose cependant au moins un problème d'ordre méthodologique. C'est celui de la détermination des variables permettant de décrire les changements observés et leur hiérarchisation (Corgne, 2004b).

Dans cette démarche le choix de la variable à expliquer (changements d'occupation et d'utilisation des sols (en particulier le couvert végétal)) et des variables explicatives (précipitation, température, sols, flore, urbanisation, topographie, etc.) est déterminant (Ngandam et al., 2016). Dans notre cas la variable à expliquer étant connue, l'enjeu à présent est de pouvoir identifier et établir l'influence des variables explicatives. Pour le choix des variables explicatives, il est important de distinguer celles qui sont liées aux facteurs environnementaux directs (la démographie, les modes d'exploitation des ressources, etc.) et celles liées aux facteurs indirectes (climatiques, politiques, économiques, culturels, technologiques, etc.) (Corgne, 2014). Contrairement aux facteurs directs, les facteurs indirects sont pour la plupart exogènes à la zone d'étude (le climat au-dessus du lac Tchad est par exemple fortement conditionné par l'apport en énergie solaire et la convergence entre les masses d'air alizés sèches du nord-est africain et les masses d'air humides du sud-ouest du continent) et agissent à des échelles régionales ou globales (Corgne, 2014).

Pour caractériser les facteurs de changements environnementaux, il est primordiale de suivre l'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols sur le long terme, et la télédétection grâce à sa capacité d'observation en continue des milieux offre cette possibilité. Elle fournit ainsi des observations sur le long terme des paramètres tels que la pluviométrie, la déforestation, l'urbanisation, etc., permettant d'effectuer des analyses diachroniques multi temporelles et multi critères à plusieurs échelles différentes. Elle permet par ailleurs à travers les méthodes d'analyses spatiales et de corrélations spatiales et temporelles, de combiner les résultats de classification et de détection de changement aux mesures in situ et aux enquêtes de terrain pour établir ces influences et déterminer les facteurs de changements. C'est l'exemple de Ngandam et al., (2016) qui appliquent les

corrélations linéaires entre l'indice de végétation MSAVI2 (utilisé comme variable indépendante) et plusieurs autres indices de sols et de végétation (GSI, NDBSI, indice de croute, indice de texture, etc.) pour cartographier l'état de dégradation des sols de l'extrême-nord Cameroun à partir des images Landsat-8. Tout comme Corgne, (2004b) qui utilise l'analyse statistique en calculant les corrélations entre les variables des systèmes de production et la couverture des sols pour définir les poids des facteurs de changements structurant la dynamique des sols nus hivernaux. Campbell et al., (2005) quant à eux démontrent l'importance des relevés de terrain (enquêtes, mesure, etc.) dans ce type de démarche. Zewdie et Csaplovics, (2015); Msofe, Sheng, et Lyimo, (2019) se servent ainsi des relevés de terrain pour expliquer la nature des changements d'utilisation et d'occupation des sols en Ethiopie et en Tanzanie respectivement.

Dans notre recherche, les influences des facteurs environnementaux sont établies en combinant les relevés météorologiques in situ (pluviométrie, température, humidité de l'air) et les cartographies existantes de la zone d'étude (carte géologique, phytogéographique, etc.). Ces données sont toutes intégrées dans un SIG et superposées à nos résultats de classification et de détection de changement pour identifier les facteurs de changements. Les relevés météorologiques sont exploités par la méthode d'analyse statistique (figure 44) et les cartes par l'analyse spatiale (figure 45).

2.3.3.1. Analyse statistiques des paramètres climatiques responsables des changements du couvert végétal

Les paramètres climatiques sont indispensables dans l'étude des évolutions des écosystèmes sahéliens (Lebel, Diedhiou, et Laurent, 2003; Vischel et al., 2015) et sont particulièrement sollicités pour suivre les changements de la couverture végétale en l'occurrence (Tucker et al., 1985; Nicholson et Lare, 1990; Eklundh et Olsson, 2003; Boulain et al., 2006; Nicholson, 2005; Pierre et al., 2016). Ils serviront dans cette recherche à expliquer les variations saisonnières et annuelles de l'activité chlorophyllienne des plantes (ici mesurée par le NDVI).

Les données obtenues dans le cadre de cette thèse sont : les cumuls mensuels de précipitations, les valeurs moyennes mensuelles de la température et les mensualités de l'humidité relative de l'air. De ces données sont déduites les valeurs mensuelles de l'indice d'aridité selon l'approche de De Martonne et celles de l'évapotranspiration selon la formule de Thornthwaite (Pereira et Pruitt, 2004; Maeda, Wiberg, et Pellikka, 2011).

Les trois premiers paramètres déduits des relevés météorologiques permettent de caractériser l'atmosphère notamment en termes de quantité d'eau mobilisable, de qualité de l'air et de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Ce sont des variables de temps dont le suivi sur une longue période permet de caractériser le climat c'est pourquoi les évolutions de leurs valeurs mensuelles sont comparées à celles des moyennes mensuelles de la végétation (figure).

Les deux autres paramètres sont calculés à partir des relevés météorologiques pour permettre de caractériser le mieux possible le climat de notre zone d'étude. Ils utilisent les valeurs moyennes de températures et de précipitation d'une part pour indiquer le degré de sécheresse et d'autre part pour renseigner sur les quantités en eau disponibles pour la végétation (figure 44).

L'indice d'aridité de DE MARTONNE (Malunda et Marembo, 2018; Gebremedhin, Kahsay, et Fanta, 2018) aussi appelé indice de sécheresse de DE MARTONNE est utilisé pour renseigner sur le degré de carence en précipitation. C'est un indicateur quantitatif du degré de manque d'eau dont les valeurs moyennes sont corrélées ici aux valeurs de l'indice de végétation.

Sa formule est la suivante :

$$I_a = P/T + 10$$

I_a : Indice d'aridité
P : précipitation moyenne annuelle (mm)
T : température moyenne annuelle

L'évapotranspiration potentielle permet en fonction des températures moyennes mensuelles et de la latitude du lieu, d'estimer en millimètres les quantités d'eau susceptibles de regagner l'atmosphère par évaporation des sols et par transpiration de la végétation (Pereira et Pruitt 2004). Ce qui justifie son utilisation pour suivre l'évolution de la végétation.

La formule de Thornthwaite s'écrit :

$$ETP(m) = 16 \left(\frac{10 q(m)}{I} \right)^a F$$

q(m) est la température moyenne sous abri du mois m exprimée en °C
I est la somme des douze indices mensuels i(m)
 $i(m) = (q(m)/5)^{1,514}$
 $a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49239$
F est un coefficient de correction dépendant de la latitude et du mois considérés.

La méthode d'analyse des variations de la végétation par rapport au climat consiste à calculer les coefficients de corrélation statistiques et de régression (R^2) pour mesurer le degré de corrélation entre les évolutions de l'activité chlorophyllienne et les variabilités des éléments du climat. Pour chacune de ces corrélations la variable à expliquer est l'indice de la couverture végétale et les variables explicatives sont les paramètres climatiques du milieu. La démarche adoptée est identique pour tous les paramètres à l'exception des précipitations pour lesquelles les valeurs des mois précédents sont également prises en compte.

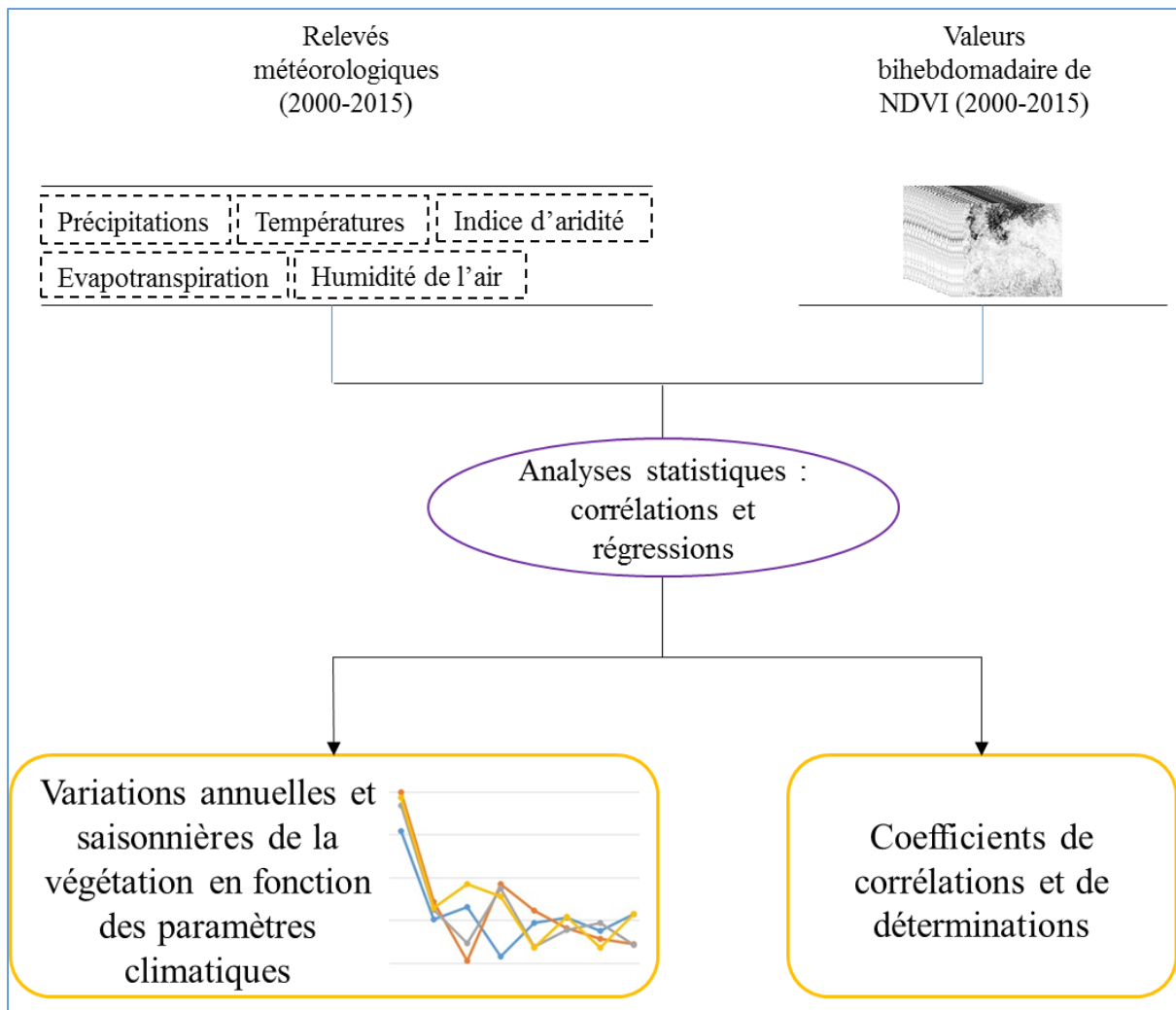


Figure 44 : Etapes des corrélations linéaires entre l'indice de végétation et les composantes du milieu. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Résultats obtenus :

- Variations annuelles et saisonnières de l'activité chlorophyllienne des plantes dans la partie camerounaise de lac Tchad et son arrière-pays entre 2000 et 2015 ;
- Corrélations entre les variations des paramètres climatiques et les cycles de l'activité chlorophyllienne.

Connaissances produites :

- Identification des paramètres climatiques déterminants pour le couvert végétal ;
- Détection des poids des paramètres climatiques dans les variations annuelles et saisonnières de l'activité chlorophyllienne ;
- Répartition annuelles des cycles de croissance de la couverture végétale.

Apports pour la thèse :

- *Les principaux paramètres climatiques nécessaires à la modélisation de la structure paysagère sont identifiés.*

2.3.3.2. Analyses spatiales des cartes thématiques : les changements d'utilisation et d'occupation des sols en fonctions des éléments de surfaces

Les cartes thématiques ancillaires de la zone d'étude permettent de percevoir les modes d'organisation de l'espace géographique à travers l'identification des types et structures des paysages de ce milieu (couverture biophysiques des sols, exploitation des ressources naturelles, modes d'utilisation des sols). Elles sont superposées par analyse spatiale (figure 45) à nos résultats de classification et de détection de changement pour expliquer les changements d'occupation et d'utilisation des sols en fonctions des caractéristiques spécifiques de notre espace d'étude.

Certaines couvrent l'ensemble de la surface d'étude (carte phytogéographique) et d'autre s'étendent soit à l'échelle de la partie lacustre (cartes de fluctuations des niveaux d'eau du lac) ou bien dans l'arrière-pays uniquement (carte géologique ou carte des potentialités agricoles de sols). Chacune d'elle est choisie pour apporter une information significative qui répond à un besoin identifié (c'est la cas par exemple des cartes de variations des eaux du lac qui permettent d'étudier l'influence des fluctuations des eaux sur l'état du couvert végétal dans la zone lacustre, ou la carte géomorphologique qui aide à tenir compte de l'influence du substrat pédologique) de connaissance du site afin de palier à l'absence de données de terrain.

Les cartes de changement et de transitions de la couverture en eau produites à partir des images Landsat 5,7 et 8 à 30 mètres de résolution et qui synthétisent les variations des surfaces d'eau lacustres entre 1984 et 2015, sont utilisées pour déterminer les types de changements d'occupation et d'utilisation des sols qui se sont produits dans les espaces lacustres où l'étendue en eau a varié ces dernières années. Nous partons de l'hypothèse que les changements de superficie de l'eau dans la fenêtre camerounaise du lac Tchad modifient la répartition du couvert végétal et induit des changements dans sa disponibilité.

La carte de la Géomorphologie des sols de l'extrême nord Cameroun produite en 1998 (Seignobos et Iyébi-Mandjek, 2000) aide à déterminer les relations spatiales éventuelles entre la morphologie du paysage et la spatialisation des changements d'occupation et d'utilisation des sols. En effet, les sols selon leur morphologie sont prédisposés à un certains types de couverture végétale car ils peuvent offrir ou pas des conditions édaphiques favorables à la mise en place de la végétation et influencer à long terme leur disponibilité.

Le potentiel agronomique des sols et les usages dont ils font effectivement l'objet pour répondre à des besoins agro pastoraux influencent sur le long terme la structure des éléments de surface. La carte de potentialités des sols et terroirs agricoles de l'extrême

nord Cameroun mise à jour en 1999, qui décrit les particularités agronomiques des terroirs agricoles sert à déterminer les relations spatiales éventuelles entre ce découpage en terroirs et les changements d'occupation et d'utilisation des sols.

La carte de la Phytogéographie de l'extrême nord Cameroun qui renseigne sur la répartition des espèces végétales est utilisée pour mettre en lien la spatialisation des changements d'occupation et d'utilisation des sols avec la répartition des groupements et les associations de groupements végétaux. L'hypothèse étant que les changements d'occupation et d'utilisation des sols sont étroitement liés avec les espèces végétales et les types de regroupements végétaux en présence.

Pour mettre en corrélation les cartes de changements d'occupation et d'utilisation des sols et les cartes thématiques, nous procédons par analyse spatiale en établissant des masques correspondant aux différentes classes d'intérêt de chaque carte thématique (la figure 45 est une illustration du procédé appliqué entre la carte géologique des sols et celle de l'évolution du couvert végétal). Cette méthodologie de mise en corrélation est la même qui est adoptée à toutes les autres cartes thématiques (figure 45). L'analyse de chaque extraction se fait ensuite au moyen du calcul des superficies et des pourcentages de couverture des différents changements d'occupation et d'utilisation des sols.

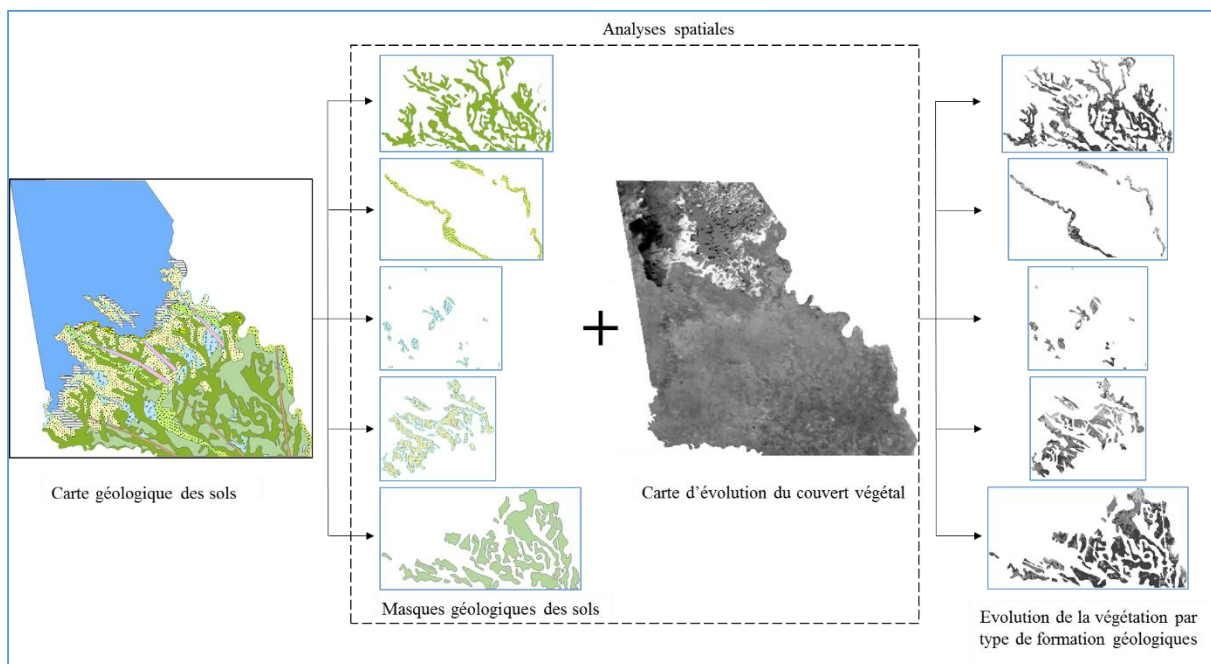


Figure 45 : Etapes des corrélations spatiales entre l'indice de végétation et les composantes du milieu. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Résultats obtenus :

- *Evolutions de l'occupation et de l'utilisation des sols dans la partie camerounaise de lac Tchad et son arrière-pays en fonctions des facteurs de changement (variations en eau du lac, nature des sols, répartition des essences végétales, etc.).*

Connaissances produites :

- *Identification des facteurs de changement déterminants pour l'occupation et l'utilisation des sols;*
- *Détection des poids des facteurs de changement dans les changements de l'occupation et de l'utilisation des sols.*

Apports pour la thèse :

- *Les principaux facteurs de changement nécessaires à la modélisation de la structure paysagère sont identifiés.*

Une fois les facteurs de changement identifiés, la dernière étape de notre démarche méthodologique consiste à réaliser la modélisation de la structure paysagère de la zone d'étude et à simuler les changements futurs. Cette dernière étape est expliquée dans la section suivante.

2.3.4. Modélisations spatiales et simulations des dynamiques paysagères

Modéliser en géographie c'est simuler le fonctionnement d'un espace choisit comme objet d'étude et qui devient de fait un objet scientifique, pour lequel on va s'intéresser aux interrelations entre les éléments qui le constituent (Chamussy, 1989; Gadai, 2011a). D'après Roger Brunet « *Un modèle est toujours une simplification de la réalité, ou plus exactement de la vision qu'on a de cette réalité. Cette simplification est faite dans un but opératoire : l'action, la prédiction, ou l'explication. Un modèle est donc un construit et une représentation* » (Brunet, 1980). Selon cette approche la modélisation systémique en géographie dont le but est la compréhension du fonctionnement et la structuration des espaces par la connaissance des relations, des processus et des régulations qui s'y déroulent (Sède et Moine, 1999; Houet et al., 2008), se distingue de l'approche dynamique qui s'intéresse à l'évolution de l'espace géographique dans le temps, dans le but de visualiser et prévoir les changements en fonction de la séquence des opérations (Bonney, Bousquet, et Rouchier, 2001; Thinon et al., 2007). L'analyse systémique permet d'une part d'appréhender le fonctionnement des territoires en considérant les niveaux d'organisation et les jeux d'acteurs, et d'autre part d'analyser les liens et les interactions qui régissent le fonctionnement de ce territoire (Vannier, 2011). Elle constitue en d'autres termes la base conceptuelle des modèles de simulation dynamiques (Houet, Hubert-Moy, et Tissot, 2008).

L'une des notions importantes à prendre en compte est celle de la temporalité des études de dynamique spatiale des paysages, de l'espace géographique et des territoires. Celle-ci conduit à la nécessité de tenir compte aussi bien des changements antérieurs et

des futurs et dans ce cas la modélisation peut alors dans ce cas prendre la forme soit rétrospective ou prospective. Lorsqu'ils sont rétrospectifs, les modèles sont intéressants dans la mesure où ils permettent de retracer l'histoire des changements antérieurs des structures territoriales. Ils visent avant tout à renforcer les connaissances et permettent d'accéder à la mémoire du passé. Quant aux approches prospectives, elles sont régulièrement sollicitées pour réduire les degrés d'incertitudes relatives aux scénarii futurs, en donnant « *un regard sur l'avenir destiné à éclairer l'action présente* » (Hatem, Cazes, et Roubelat, 1993). Leur élaboration donne la latitude de tester plusieurs possibilités de choix en termes de gestion dans le but de tenir compte des dynamiques à venir dans les évolutions des modes d'utilisations des espaces et en termes de structurations paysagères à moyen ou long terme. Bien qu'ils ne soient pour certains, adaptés qu'à des échelles nationales ou régionales tels que le modèle CLUE (Veldkamp et Fresco, 1996), ou le modèle Environment Explorer (Engelen, White, et Nijs, 2003).

Il existe aujourd'hui de nombreuses méthodes de modélisation de l'environnement, que Parker et al., (2003) (dans Corgne, (2004a)) synthétisent en sept groupes à savoir : les modèles mathématiques (basés sur une ou plusieurs équations ils recherchent une solution d'équilibre) ; les modèles systémiques (utilisent les équations différentielles pour représenter les informations) ; les modèles statistiques (fondés sur des techniques statistiques telles que des régressions) ; les modèles experts (combinent les dires d'experts avec les approches de probabilité ou d'intelligences artificielles) ; les modèles d'évolution (reposant sur les réseaux neuronaux) ; les modèles cellulaires (qui relèvent de l'intelligence artificielle et comprennent les automates cellulaires et les champs de Markov) ; et les modèles multi-agents (relèvent également de l'intelligence artificielle et simulent un évènement en le découpant en tâches spécifiques qui sont ensuite traités par des règles de calcul) (Corgne, 2004a). Certaines de ces méthodes sont dites hybrides car permettent de combiner plusieurs modèles (à l'exemple du modèle CLUE qui combine des techniques statistiques avec des modèles cellulaires (Veldkamp et Fresco, 1996). Elles peuvent également être automatiques c'est-à-dire incorporées dans les logiciels de géomatiques tel que les modèles mathématiques d'intelligence artificielle (ACP, MNF, les tests de corrélation, etc.) ou semi automatiques pour permettre l'intégration variable des composantes du milieu aux modèles de calcul (MEDALUS, RUSLE, etc.).

L'autre avantage de ces modèles est l'élaboration de scénario. Pour Houet, Hubert-Moy, et Tissot, (2008), les scénarios qui sont les méthodes les plus employés en analyse prospective se nourrissent des apports méthodologiques des systèmes complexes et comprennent quatre phases : la construction de la base des scénarios, l'élaboration des scénarios, leur spatialisation, et leur évaluation. Ces modèles peuvent être « spatialement explicites » ou « spatialement intelligents » (Houet, Hubert-Moy, et Tissot, 2008), et s'appuient généralement soit sur des outils stochastiques à l'exemple des chaînes de Markov et des modèles logistiques, ou alors sur des modèles à base d'intelligence artificielle comme les automates cellulaires, les systèmes multi-agents ou les réseaux de neurones (Olmedo, Paegelow, et Martínez, 2007).

Les méthodes de modélisation permettent d'étudier des phénomènes très variés tel que : la déforestation (Solefack et al., 2012), l'urbanisation (Gadal et Ouerghemmi, 2019), la prédiction des feux de forêt (Hessas, 2005), la désertification (Kirkby, Kosmas, et Geeson, 1999; Poisson, 2003), l'érosion hydrique (Renard et al., 1997), la dégradation des sols (Payet, Dumas, et Pennober, 2012), etc. Malgré ce fort potentiel ces méthodes sont très peu utilisées pour comprendre les interactions spatiales qui façonnent le paysage, la vitesse de celles-ci et leur ampleur dans l'espace du lac Tchad et ses écosystèmes associés.

Dans notre démarche, la première étape consiste à modéliser les relations structurales et morpho structurales entre les paramètres importants de l'occupation et de l'utilisation des sols (figure 46). Les résultats de la modélisation servent ensuite à la simulation des scénarios futurs.

2.3.4.1. Modélisation de la structuration paysagère par les modèles intelligents

La modélisation en géographie produit par conséquent des modèles d'analyses spatiales. Ces modèles sont en quelque sorte des schémas représentatifs des réalités matérielles et immatérielles, et se basent en majorité sur des méthodes de statistiques spatiales (Gadal, 2011b). Leur utilisation permet de ressortir et prévoir les mécanismes généraux d'organisation des phénomènes divers dans l'espace (étalement urbain, écoulement hydrographique d'un bassin versant, déplacement d'une masse d'air etc...).

La modélisation nécessite l'utilisation des données multi dates sur un pas de temps important pour permettre de visualiser les changements inscrits dans la durée. Dans notre cas ces images sont séparées de 15 ans minimum. Ce choix d'images (Landsat 5 et 7 respectivement pour les années 1984, 1999 et Sentinel-2 pour 2018) n'est pas anodin. En réalité, il tient compte des évolutions spécifiques des conditions climatiques de la région. L'année 1984 est l'une des plus sèches de la période des grandes sécheresses au sahel. Au début de la décennie 2000, les premiers signes du reverdissement du sahel observés plus tôt par endroit ont été confirmés avec les images MODIS. L'année 2018 est utilisée pour exploiter les images (Sentinel-2) les plus récentes et de meilleure qualité spectrale et spatiale. Chacune de ces périodes d'évolutions climatiques (notamment les deux premières) se rapportant à des changements sociaux importants au sahel, ces images vont par conséquent nous permettre de contextualiser nos modélisations avec les évolutions climatiques et de l'anthropisation.

L'approche utilisée pour modéliser les relations structurales et morpho structurales entre les paramètres importants de l'occupation et de l'utilisation des sols est la méthode mathématique d'intelligence artificielle par l'algorithme de MNF (Minimum Noise Fraction). C'est un algorithme simple d'utilisation et qui a montré ses capacités pour de telles analyses (Lu et al., 2008; Wong et al., 2017).

Le MNF est une transformation utilisée pour supprimer le bruit (redondance ou dégradation d'information) sur les images ou sélectionner les meilleures bandes qui

contiennent le plus d'information. Cette transformation calcule les combinaisons linéaires normalisées des bandes originales qui maximisent le rapport entre le bruit et la qualité du signal (Green et al., 1988). La transformation directe permet de déterminer les images ou bandes spectrales qui contiennent les informations les plus pertinentes et la transformation inverse utilise des sous-ensembles spectraux pour lisser les bandes bruitées (spectralement).

Le processus de cette transformation linéaire (Green et al., 1988) se produit en deux étapes à travers la rotation des axes des analyses en composantes principales.

- Une première rotation pendant laquelle les composantes principales de la matrice de covariance du bruit sont utilisées pour décorréler et redimensionner le bruit dans les images ou les bandes spectrales. Il en résulte des données transformées décorrélées et dans lesquelles le bruit a une variance unitaire.
- La seconde rotation utilise les composantes principales des bandes d'images d'origine nettoyées du bruit lors de la première rotation. Cette deuxième rotation permet d'obtenir d'une part des données associant des valeurs propres encore appelées « eigenvalues » et des images de cohérence ou « eigenimages », et d'autre part des données complémentaires associant les valeurs moins larges et des images dominées par le bruit.

Les données utilisées pour cette transformation sont les cartes d'utilisation agropastorales des terres, les cartes de couverture végétales, les cartes de texture et de morphologie des sols, les cartes de précipitations de températures.

Parallèlement à l'approche par MNF, les mêmes données sont également traitées par ACP (Analyse en composante principale) pour améliorer la prise en compte des informations statistiques pertinentes et établir les liens statistiques entre les descripteurs environnementaux extraits des images satellites. L'intérêt de cette combinaison est de prendre en compte les corrélations statistiques, morphologiques et structurales entre les composantes du milieu utilisées ici comme descripteurs de l'environnement (répartition spatiale des pluies, répartition des surfaces agricoles, texture des sols, etc.). En effet, en sus des liens statistiques obtenus grâce au modèle d'analyse statistique (ACP), les composantes issues de l'algorithme d'intelligence artificielle en MNF apportent les informations sur la structure paysagère du milieu car elles nous renseignent sur les liens morpho structuraux en place qui conditionnent la mise en place des différents modes d'anthropisation dans l'espace géographique de la partie camerounaise du lac Tchad.

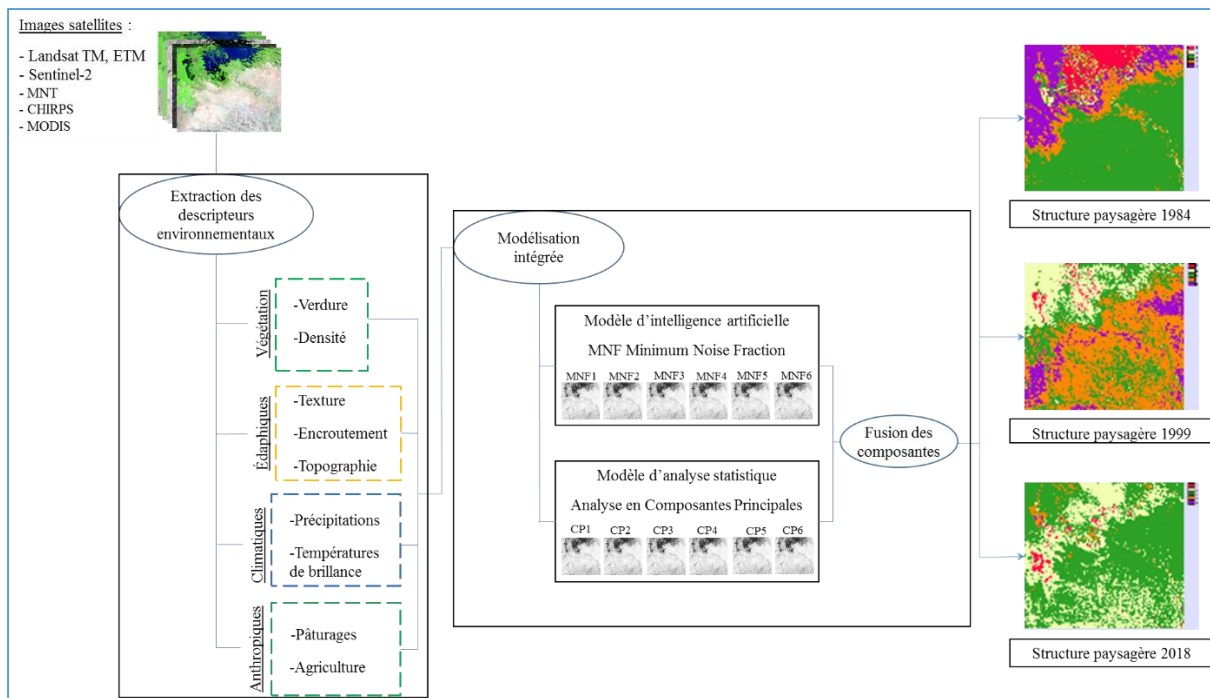


Figure 46 : Processus de modélisation de la structuration paysagère par les modèles intelligents. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Résultats obtenus :

- *Cartes des grands ensembles paysagers en 1984, 1999 et 2018 dans la partie camerounaise de lac Tchad et son arrière-pays.*

Connaissances produites :

- *Identification des principales relations morpho structurales entre les éléments de surfaces dans la partie camerounaise de lac Tchad et son arrière-pays ;*
- *Mise en évidence des dynamiques spatiales et fonctionnelles entre les grands ensembles paysagers en 1984, 1999 et 2018.*

Apports pour la thèse :

- *L'évolution temporelle des pressions anthropiques sur l'exploitation des espaces est établie.*

2.3.4.2. Méthodologie de simulation des changements futurs

La modélisation des relations structurales et morpho structurales entre les paramètres importants de l'occupation et de l'utilisation des sols permet d'envisager la construction de scénarii prédictifs. La simulation des changements est sollicitée ici pour donner un aperçu des dynamiques à venir dans les évolutions des modes d'occupations et d'utilisations des espaces dans la partie camerounaise de lac Tchad et son arrière-pays (figure 47).

L'approche utilisée pour simuler les changements d'occupation et d'utilisation des sols et prédire les scénarios futurs repose sur les méthodes de prédiction de Markov (Barona et Mena, 2014). Elles intègrent les effets d'interaction active spatio-temporelle, pour analyser le comportement de la dynamique d'utilisation des terres dans un modèle temps-espace en vue de fournir des prévisions de changements futurs utiles à la prise de décision. La capacité de ces méthodes à décrire les tendances et l'ampleur des changements dans l'utilisation des terres a été démontrée à travers plusieurs travaux de recherches. Cabral et Zamyatin, (2009) ainsi que Barona et Mena, (2014) démontrent par ailleurs que les méthodes de prédiction de Markov nécessitent de combiner les chaînes de Markov avec les automates cellulaires pour permettre d'une part d'analyser la dynamique spatio-temporelle des changements et d'autre part de simuler ou prédire les scénarios futurs.

Les chaînes de Markov se définissent comme un modèle stochastique qui à travers une matrice de probabilité de transition détermine et décrit les probabilités de changement d'une classe d'utilisation des sols à une autre entre deux dates. La matrice de transition est construite à partir des différences d'utilisation des sols (valeur de pixel) entre deux dates. Pour obtenir cette matrice, deux images sont croisées en définissant une erreur proportionnelle. Pour un pixel donné, la valeur de probabilité obtenue à partir de la matrice correspond par conséquent à sa probabilité de transition d'un type d'occupation (pixel) à une date t_0 pour un autre type d'occupation à une date t_1 . La même valeur de probabilité est utilisée pour prédire les cartes d'utilisation pour une période future.

L'équation de calcul des probabilités de transition est la suivante :

$$\sum_{i=1}^m p_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, \dots, m$$

$$p = (p_{ij}) = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & p_{2m} \\ p_{m1} & p_{m2} & p_{mm} \end{pmatrix}$$

p_{ij} = la probabilité de transition d'une classe d'occupation à une autre, m le type d'occupation du sol

À la matrice de transition obtenue il faut associer les automates cellulaires pour pouvoir spatialiser les changements à travers des cartes où chaque pixel obtient une valeur correspondant à un type d'occupation. En effet, les automates cellulaires vont simuler l'occupation des sols en confrontant les variables temporelles et spatiales avec les variables relatives aux interactions entre les classes obtenues à partir des chaînes de Markov. Les scénarios futurs sont ensuite prédits en affectant des valeurs aux pixels à partir d'une fonction de transition prenant comme arguments la valeur mesurée du pixel et celles des pixels voisins en fonction du temps.

Dans notre cas, cette fonction de transition est établie en utilisant la carte de structuration du paysage en 1984 et celle de 1999, et une seconde autre à partir des cartes

de 1999 et 2018. Les valeurs des pixels éloignés du pixel central sont attribuées grâce à un filtre spatial de taille 5*5. Ces fonctions sont utilisées ensuite par les automates cellulaires pour prédire l'occupation et l'utilisation des sols en 2025, 2030 et en 2035. Ce qui signifie par exemple que pour prédire l'utilisation des sols en 2025 le modèle utilise des scénarios établis grâce à la combinaison de la matrice de probabilité de transitions obtenue à partir des changements observés entre 1999 et 2018 et la carte de probabilité de transition en 2018. Les projections sont testées en 2025, 2030 et 2035 car les intervalles de projections que nous choisissons doivent relativement être proportionnels aux pas de temps qui séparent les deux images utilisée en entrée.

Enfin, pour valider notre modèle de simulation, la carte de prédiction des changements d'utilisation des sols en 2018 est comparée au résultat de la modélisation de la structuration paysagère de 2018 obtenue avec classification par la méthode des K-means. Nous établissons cette comparaison en calculant la matrice de confusion entre ces deux cartes. La matrice de confusion ici permet d'établir le degré de correspondance entre les classes d'utilisation des sol classifiées et simulées en calculant le pourcentage de correspondance entre les valeurs de pixels appartenant à chaque types de classes d'utilisation.

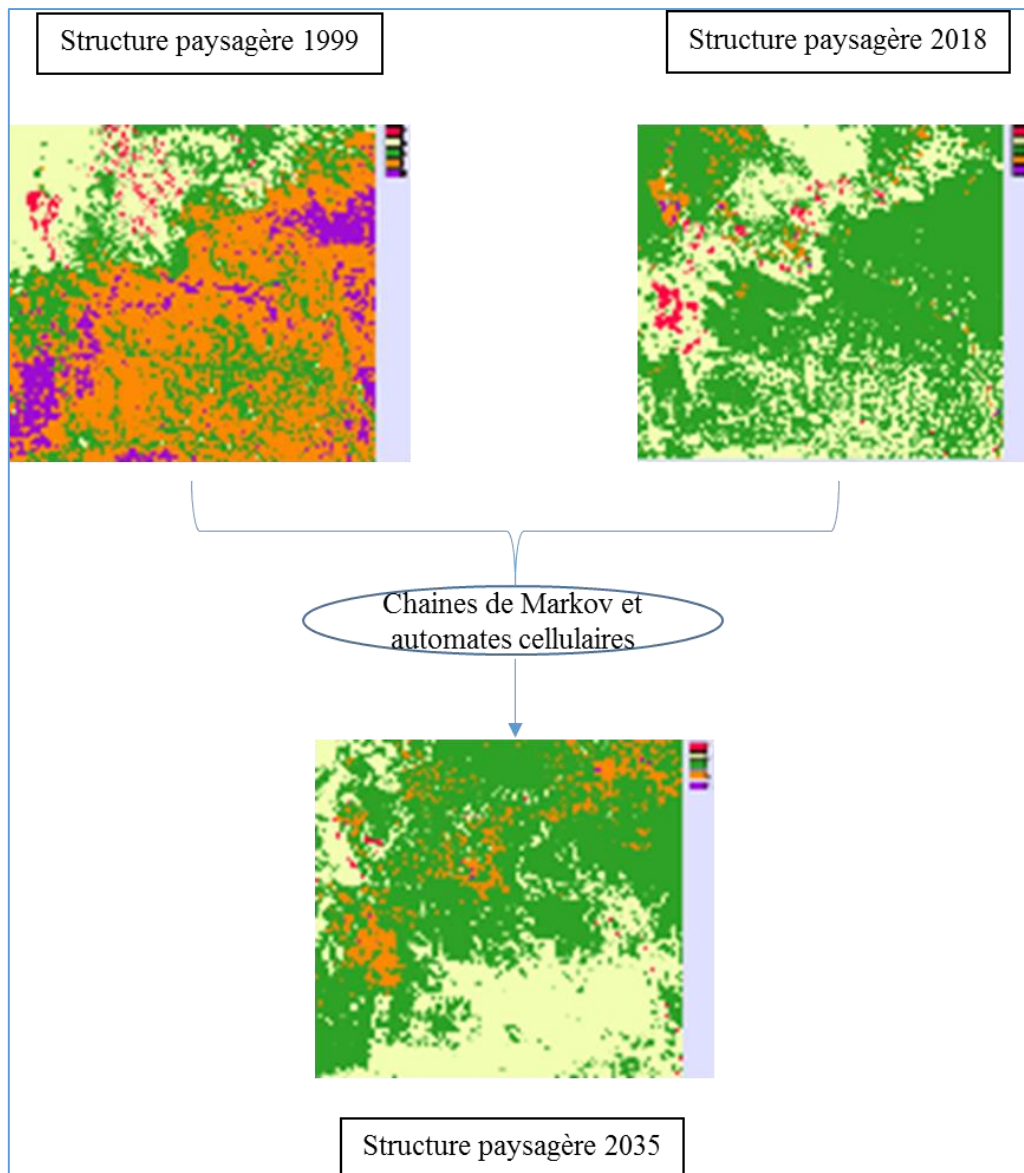


Figure 47 : Méthodologie de simulation des changements. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Résultats obtenus :

- *Simulation de la répartition future des grands ensembles paysagers en 2035 dans la partie camerounaise de lac Tchad et son arrière-pays.*

Connaissances produites :

- *Identification des possibles relations morpho structurales entre les éléments de surfaces dans la partie camerounaise de lac Tchad et son arrière-pays en 2035.*

Apports pour la thèse :

- *L'évolution temporelle future des pressions anthropiques sur l'exploitation des espaces est établie.*

Conclusion

Ce chapitre a servi à répertorier les outils et les méthodes cartographiques aujourd'hui disponibles et adaptées à l'étude des écosystèmes arides en liens avec les objectifs énoncés au premier chapitre. L'évolution de l'offre en imagerie spatiale optique a montré que les données optiques aujourd'hui disponibles offrent de grandes possibilités pour les études des écosystèmes arides. Leurs caractéristiques (résolution spatiales, spectrales, radiométriques et temporelles) ont beaucoup évoluées récemment et la profondeur temporelle de ces images permet aujourd'hui des études sur des périodes très importantes. De même, les approches méthodologiques permettent à présent d'analyser les écosystèmes dans leur globalité en prenant en considération de manière systémique et dynamique l'ensemble des interrelations qui existent entre les composantes du milieu.

La démarche méthodologique utilisée dans cette thèse repose sur une approche :

- multi capteurs : qui combine les images de faible résolution spatiale mais de bonne répétitivité temporelle (MODIS MOD13Q1) avec les images de meilleures résolutions spatiales mais faiblement répétées dans le temps (LANDSAT, SPOT 6). Les images MODIS MOD13Q1 sont affranchies des nuages (contrairement aux Landsat, Sentinel-2, et SPOT 6) mais leurs valeurs sont moyennées ;
- multi échelle : les images à basses résolution spatiale permettent la cartographie du couvert végétal et celle de hautes et de très hautes résolutions permettent une description détaillée de l'occupation et de l'utilisation des sols ;
- multi temporelle : les images bihebdomadaires MODIS sont appropriées pour analyser les tendances d'évolution du couvert végétal, et les images Landsat et SPOT 6 pour les changements d'occupation et d'utilisation intervenus entre deux dates. La profondeur temporelle des images Landsat permet de cartographier les images à partir de 1973.

La première étape a pour objectif d'établir la cartographie des éléments de surfaces qui occupent notre espace d'étude, par la cartographie de la couverture végétale (classification non supervisée des images MODIS MOD13Q1) et la cartographie de l'occupation et de l'utilisation des sols (classification supervisée des images LANDSAT, et SPOT 6) (figure 48). La seconde étape est la détection des changements permettant d'analyser l'évolution diachronique du couvert végétal (par les séries temporelles entre 2000 et 2018) et de l'occupation et l'utilisation des sols entre 1973 et 2017 (croisement des cartes de classification) (figure 48). La troisième étape examine les facteurs de changements environnementaux par analyses multicritères spatiales et statistiques. En fin la dernière étape est celle de modélisation spatiale morpho structurale des principales unités paysagères.

Les chapitres suivants vont essentiellement être consacrés à la présentation des résultats obtenus à chaque étape de la démarche d'étude.

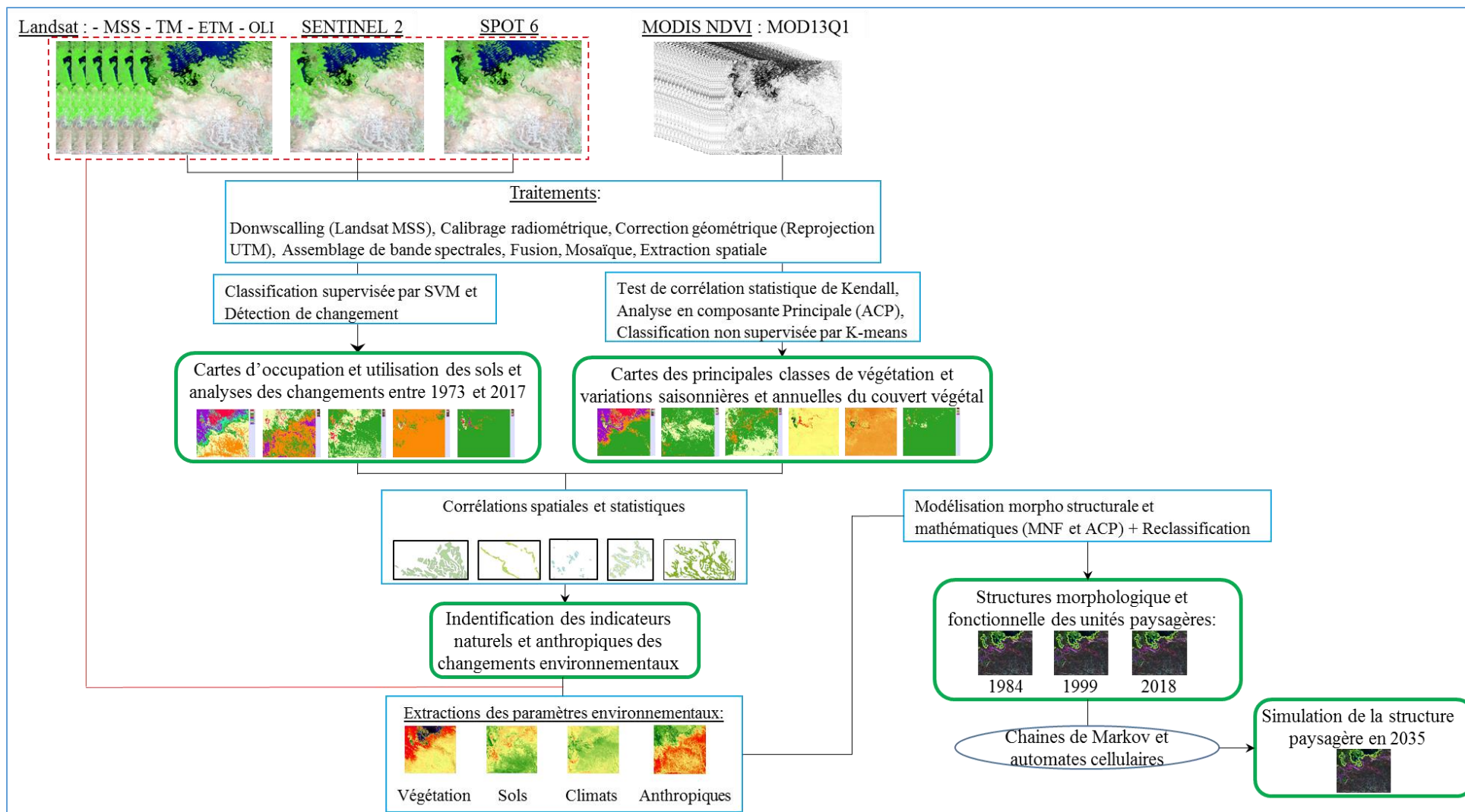


Figure 48 : Schéma générale de la thèse. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Chapitre 3 : L'évolution du couvert végétal de la fenêtre lacustre camerounaise du lac Tchad et de son arrière-pays (2000-2018)

Introduction

D'après Karlson et Ostwald, (2016) le rôle déterminant à donner à la végétation dans le milieu sahélien est justifié par : ses fonctions éco-systémiques notamment dans le contrôle de l'érosion, la fertilisation des sols, la recharge des eaux souterraines, la séquestration du carbone atmosphérique (Gnankambary et al., 2008; Bargués Tobella et al., 2014; Sinare et Gordon, 2015) ; son importance dans l'approvisionnement en alimentations, en source d'énergie, en matériaux de construction ou en fourrage pour le bétail (Bailis, 2005; Manning, Gibbons, et Lindenmayer, 2009) ; et son influence dans le climat (Nicholson, 2005).

Dans le contexte des changements environnementaux intervenus au Sahel à partir des grandes sécheresses, le couvert végétal est également identifié par Tucker et al., (1985); Nicholson et Lare, (1990); Herrmann, Anyamba, et Tucker, (2005) comme l'indicateur essentiel de l'évolution de ces écosystèmes. La dynamique du couvert végétal est ainsi régulièrement analysée en fonction des paramètres climatiques (pluviométrie, évapotranspiration potentielle, etc.) (Bambara et al., 2019) pour suivre le développement du couvert végétal.

Il est donc nécessaire dans l'étude des écosystèmes de la fenêtre lacustre camerounaise du lac Tchad et de son arrière-pays, de s'intéresser particulièrement au couvert végétal. Le premier objectif est celui d'identifier les principales classes de végétation et de suivre leurs évolutions spatio-temporelles entre 2000 et 2018. En effet, les classes de végétation sont des observables géographiques (spatiaux et temporels) permettant de visualiser et de quantifier les changements intervenus sur le couvert végétal au cours de cette période. Le second objectif est ensuite de déterminer les facteurs géographiques qui influencent cette évolution (pluviométrie, température, types de sols, activités anthropiques).

Cette démarche nécessite de disposer d'image du couvert végétal acquises sous plusieurs conditions climatiques (saisons sèches saisons, des pluies, etc.). Ceci justifie le recours aux images satellites MODIS MOD13Q1, vu qu'elles sont disponibles toutes les deux semaines à partir de Février 2000 et couvrent toutes les périodes de l'année. Leur utilisation permet ainsi de cartographier les types de couvertures végétales en fonction de leur comportement végétatif saisonnier ou annuel et de déterminer les facteurs de changements environnementaux du couvert végétal.

L'approche consiste d'abord à cartographier des principales classes de végétation, ensuite à détecter les changements dans la répartition du couvert végétal entre 2000 et 2018 et en fin à identifier les facteurs géographiques qui influencent sur l'évolution du couvert végétal (figure 49).

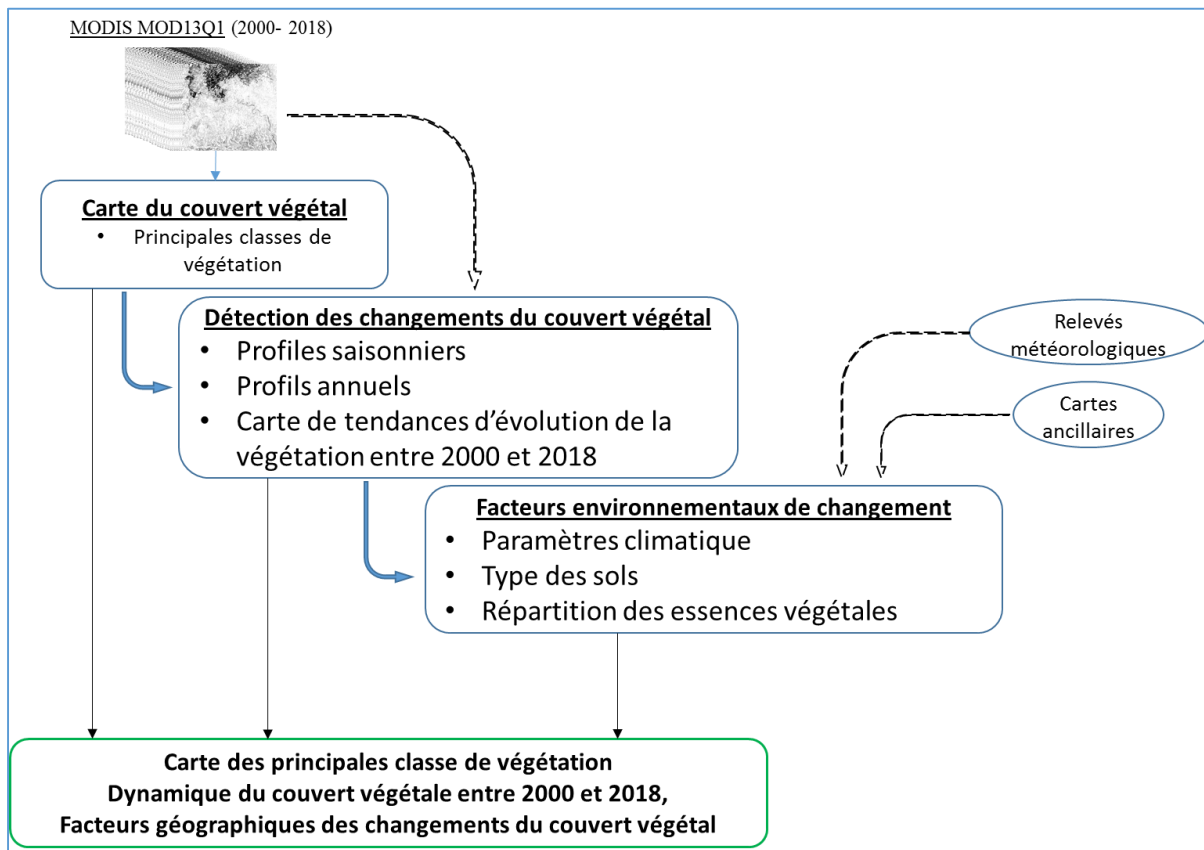


Figure 49 : Etapes de l'analyse de l'évolution du couvert végétal entre 2000 et 2018.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

3.1. Cartographie des principales classes de végétation

L'identification des principales classes de végétation présentes dans notre espace d'étude va se faire en deux étapes (figure 50). La première c'est l'analyse en composantes principales de toutes nos images satellites MOD13Q1. En effet, pour identifier les principales classes de végétation présentes dans notre espace d'étude à partir des images satellites MODIS, la classification des synthèses bihebdomadaires que nous disposons est essentielle. Leur nombre important (434) sur la période allant de Février 2000 à Décembre 2018 rend cette tâche fastidieuse. Pour ces raisons, l'analyse en composante principale va permettre de résumer les informations bihebdomadaires sur le couvert végétal contenue dans les 434 granules en composantes principales plus faciles à classifier (leur nombre étant plus réduit).

Les composantes principales obtenues de ce traitement contiennent des observables géographiques de la répartition du couvert végétal à partir desquelles les principales classes de végétation vont être identifiées et nommées.

La seconde étape est la fusion des composantes principales et la classification non supervisée de l'image fusionnée pour obtenir la carte des principales classes de végétation (figure 50).

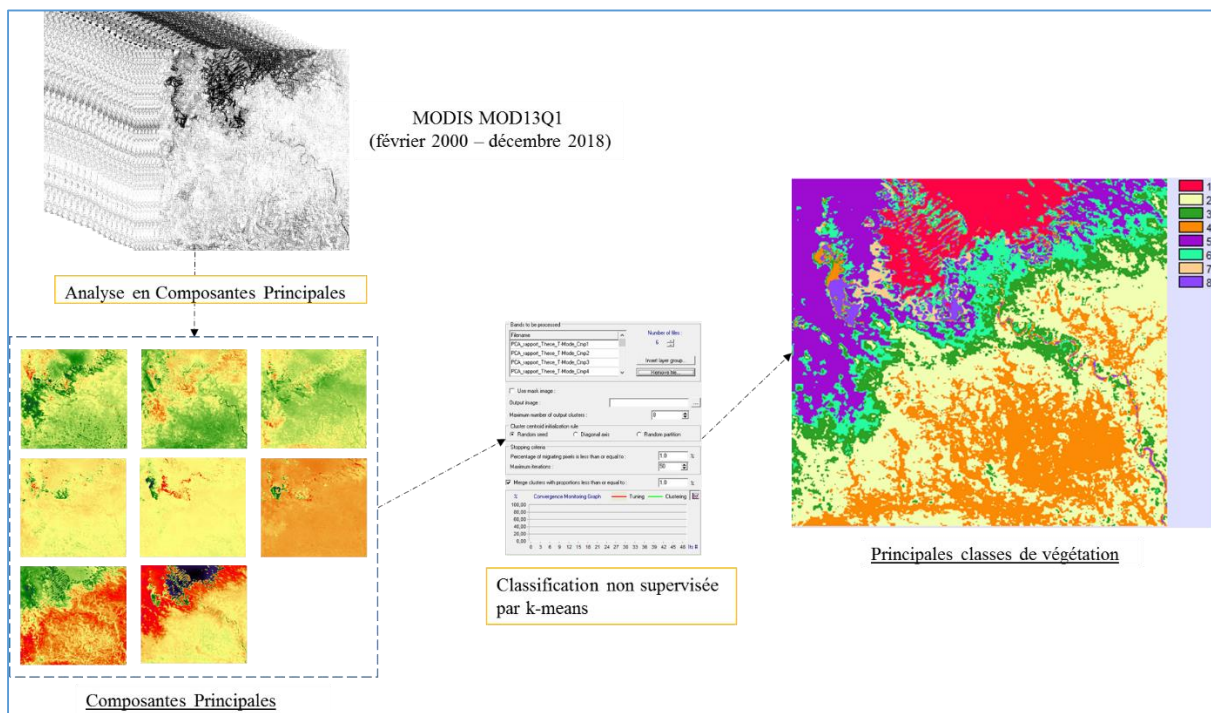


Figure 50 : Processus de classification des principales classes de végétation. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

3.1.1. Analyses en composantes principales des images MODIS MOD13Q1

3.1.1.1. L'approche par Analyses en Composantes Principales (ACP)

C'est une méthode de synthèse de l'information (Guerrien, 2003), très utile en télédétection lorsque l'on est en présence d'un jeu important de données multi spectrales à traiter et interpréter comme ici où nous disposons de 434 synthèses bihebdomadaires (granules) de NDVI (figure 51). L'approche consiste à fusionner les informations initiales dans un espace de dimension réduite en déterminant de nouveaux canaux multi spectraux qui résument l'information contenue dans les bandes spectrales originales de façon à maximiser du point de vue statistique la quantité d'information de départ dans un nombre limité de composantes (Chitroub, 2007; Estornell et al., 2013). La matrice de corrélation est utilisée sans rotation des axes pour traiter chaque pixel des images originales comme des variables spatiales. Ce procédé permet donc un résumé optimal de l'information spectrale contenue dans chaque bandes spectrales qui en raison du niveau de corrélation très élevé entre elles répètent parfois la même information (Guerrien, 2003). Les nouveaux canaux (composantes principales) découplés obtenus sont décorrélés et apportent alors de nouvelles informations avec un ordre d'importance décroissant de la première composante vers la dernière.

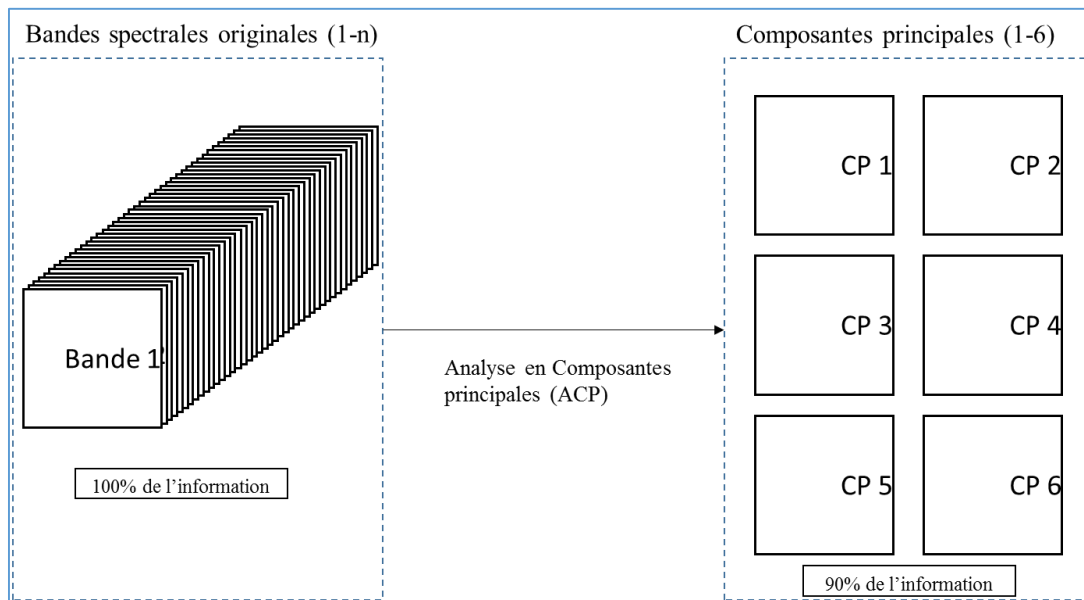


Figure 51 : L'approche de l'Analyse en Composante Principale. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

3.1.1.2. Les composantes principales obtenues

Avant de commencer il est important de noter que l'ACP est appliquée à nos 434 images simultanément. Par conséquent, les composantes principales (08 composantes principales) obtenues ne correspondent pas à une date précise mais plutôt à des résumés de l'activité chlorophyllienne durant toute la période d'observation (en l'occurrence de Février 2000 à Décembre 2018).

Par ailleurs, chacune d'elle concentre un pourcentage d'information qui correspond à un condensé particulier de l'activité chlorophyllienne de la zone d'étude. La première composante a le résumé d'information de l'ensemble de nos images satellites MODIS NDVI le plus important et compte pour 83,04% de l'information. A partir de la seconde composante l'information fusionnée devient beaucoup moins importante en pourcentage puisque la seconde composante concentre 3,08%, la troisième 2,66%, la quatrième 1,28%, la cinquième 0,73%, la sixième 0,46 %, la septième 0,37%, et la huitième 0,36% (tableau 11).

Tableau 11. Poids des composantes principales obtenues des images MODIS NDVI.

Composante Principale	Valeur propre	Histogramme
CP1	83,04	
CP2	3,08	
CP3	2,66	
CP4	1,28	
CP5	0,73	
CP6	0,46	
CP7	0,37	
CP8	0,36	

A 250 mètres de résolution il est impossible de discriminer les espèces végétales, les regroupements végétaux ou les stades de croissance de la végétation. Par contre les marqueurs géographiques (des observables) de la répartition de la couverture végétale entre 2000 et 2018, sont identifiables à partir des composantes principales. En effet, chacune des composantes correspond à une mesure de l'activité chlorophyllienne et constitue à ce titre un indicateur de l'évolution de la couverture végétale.

Les composantes sont illustrées en palette de gris (figure 52). La première composante nous permet de percevoir la tendance générale de la répartition de la couverture végétale au sein de la zone d'étude. Cette composante est un indicateur géographique de la couverture végétale dans la mesure où on observe en fonction de la densité de couleur la répartition de la végétation dense. Les couleurs claires correspondent aux couverts végétaux denses et se concentrent dans les zones humides au tour du lac. Les couleurs moins claires sont présentes dans l'arrière- pays où la végétation est moins dense et

annuelle. Les couleurs sombres représentent les eaux libres contenues essentiellement dans la partie lacustre.

C'est surtout dans les sept autres composantes que sont contenus les marqueurs temporels de l'occupation végétale. En effet, ces composantes discriminent autant dans la partie lacustre que dans l'arrière-pays les espaces ayant connus de fortes modifications (augmentation ou régression) de leur couverture végétale.

En claires se sont les zones d'augmentation de la végétation, et qui contrastent avec les zones sombres (figure 52).

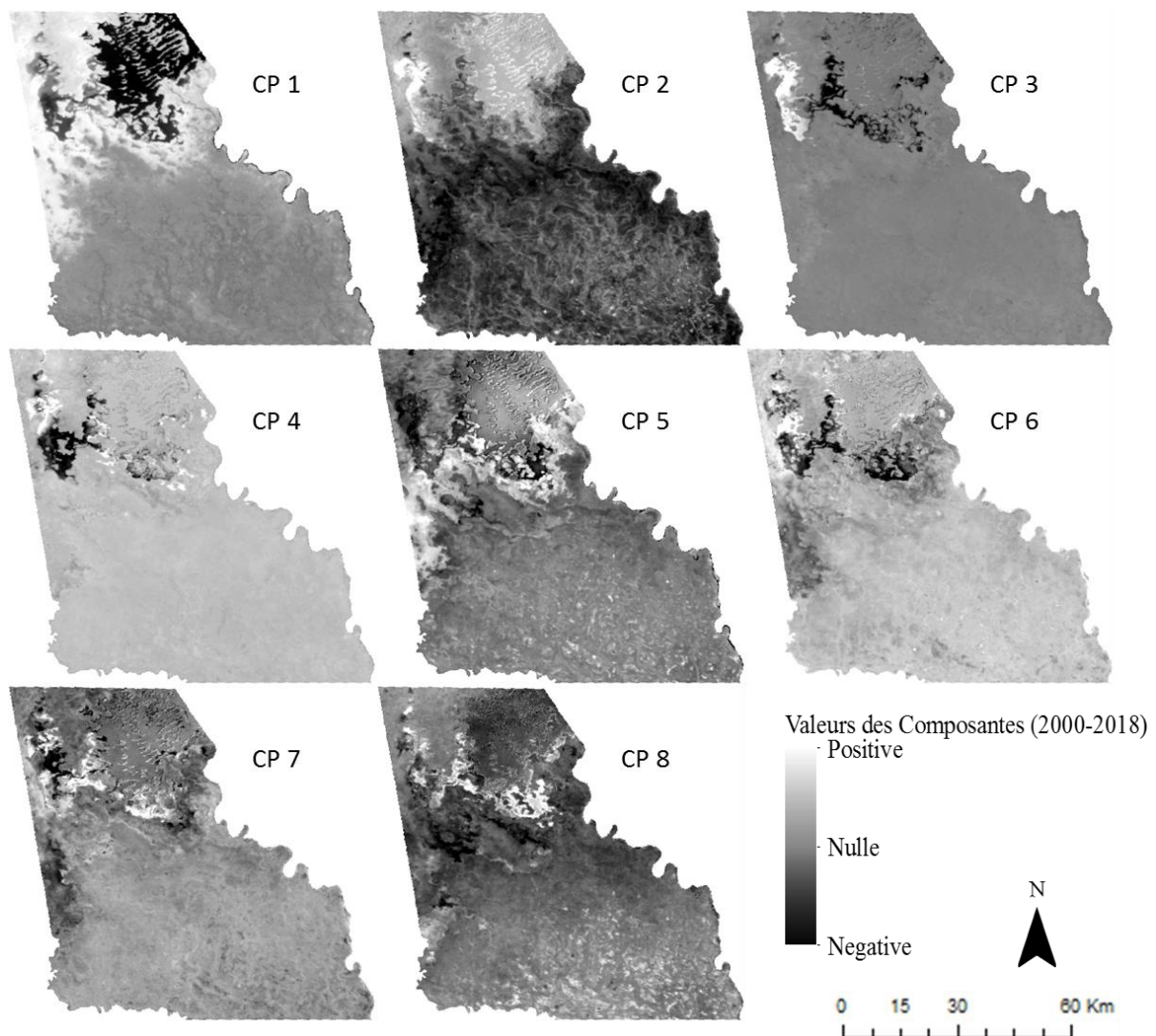


Figure 52 : Les composantes principales obtenues des images MODIS NDVI. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Pour décrire davantage ces marqueurs géographiques (spatiaux et temporels), et mettre en évidence les comportements végétatifs dominants et leur étendues spatiales, les composantes principales sont reclassifiées automatiquement par la méthode des

écarts type (la méthode de seuillage par écart type permet de visualiser à quel point les valeurs d'attribut d'une classe varient par rapport à la moyenne en utilisant les valeurs moyennes et les écarts types par rapport à la moyenne). C'est seulement au terme de l'analyse des marqueurs géographiques et temporels de la répartition de la couverture végétale que les principales classes de végétation sont identifiées et nommées.

L'identification, l'analyse et l'interprétation de ces marqueurs de végétation sont détaillées dans la section suivante.

3.1.1.3. Analyses et interprétations des Composantes Principales

Avant toutes interprétations des composantes principales reclassifiées des remarques importantes sont à faire

REMARQUE 1 : Toutes les images satellites MOD13Q1 (434) sont regroupées pour faire l'analyse en composantes principales. Cela veut dire que les composantes obtenues ne correspondent pas à une date précise entre 2000 et 2018, mais à la fusion de l'information sur la couverture végétale sur toute la période (de 2000 à 2018).

REMARQUE 2 : Les classes de végétation ne peuvent être nommées sans que toutes les composantes ne soient préalablement interprétées. Pour cette raison, la nomenclature des classes contenues dans les composantes principales n'est pas attribuée à ce stade. Les différents groupes de végétation seront pour le moment désignés par le terme « Classe ».

REMARQUE 3 : L'objectif principal des profils associés aux composantes principales n'est pas forcément d'analyser les changements du couvert végétal (ceci se fera après la cartographie des classes de végétation), mais de comprendre les comportements végétatifs des couverts végétaux mis en évidence par celles-ci. Ces profils sont obtenus en établissant les séries temporelles (annuelles et saisonnières) à partir des images satellites MODIS MOD13Q1 (les courbes obtenues retracent grâce aux valeurs de NDVI des pixels par groupe, les variations de l'activité chlorophyllienne). La lecture des profils permet d'identifier pour chaque classe le début et la fin de l'activité chlorophyllienne, les périodes de valeurs maximums de NDVI, la longueur de la période de croissance et d'augmentation de la biomasse verte, la longueur de la période de décroissance et de sénescence de la biomasse, et la durée totale du cycle (croissance, maturité, sénescence). C'est à partir de l'analyse de ces comportements végétatifs que la nomenclature des principales classes de végétation est établie lors de la classification non supervisée des composantes fusionnées.

- La composante principale I (CP1)

Les classes de la première composante représentent cinq groupes de végétation avec des cycles végétatifs différents (figures 53 et 54) (tableau 12). Les deux premières classes (classes 1 et 2) situées dans les eaux libres ont de faibles valeurs d'indice de végétation, contrairement aux classes localisées dans les marécages et l'arrière-pays (classes 3,4 et

5) qui ont de fortes valeurs d'indice de végétation. Les contrastes saisonniers sont assez marqués et deux types de profils se distinguent. L'un regroupe les classes 1 et 2, et le second concerne les classes 3,4 et 5.

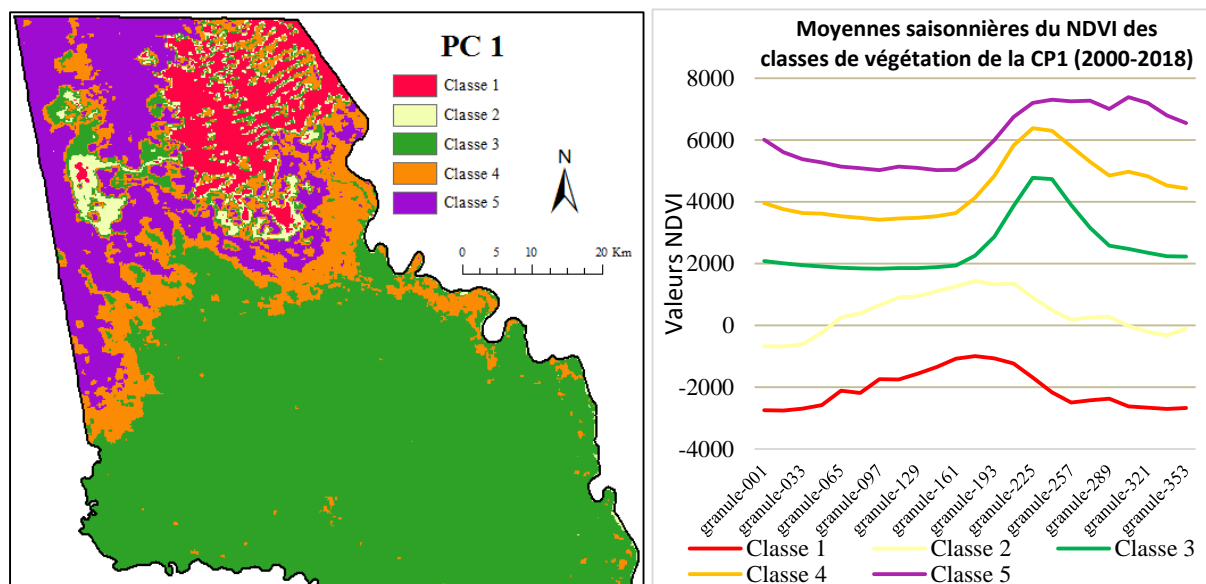


Figure 53 : Résultats de la CP I : Classe de végétation (gauche) évolution annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Les classes 1 et 2 situées dans la partie lacustre au niveau des eaux libres permanentes et dans une partie des marécages présentent un NDVI faible toute l'année. Leur activité végétative a lieu entre les mois de Février et de Juin et commence à chuter mi-Juin à cause du retour des pluies. La classe 3 située dans l'arrière-pays se caractérise par une activité végétative qui débute en Juin avec la reprise des pluies et s'achève en Octobre au début de la saison sèche. Le même cycle végétatif est décrit par la classe quatre qui occupe une partie des rives. La classe 5 qui regroupe l'essentiel des marécages permanents de la zone lacustre, présente les valeurs les plus élevées de l'indice de végétation. L'activité végétative de cette classe est également influencée par les précipitations mais celle-ci dure plus longtemps (jusqu'en Décembre), contrairement à l'activité des classes 3 et 4.

Par conséquent cette composante permet de distinguer deux marqueurs géographiques du couvert végétal. Il s'agit d'une part de la végétation lacustre immergée soumise aux variations des niveaux d'eau du lac (classes 1 et 2), et d'autre part de la végétation lacustre émergée (classes 4 et 5) et la végétation de l'arrière-pays (classes 3) qui sont influencées plutôt par les précipitations.

Tableau 12. Superficies des classes de la CP1.

Désignation	Nombres de pixels	Superficie en hectares
-------------	-------------------	------------------------

Classe 1	6176	33143,299
Classe 2	3017	16190,6303
Classe 3	59443	318998,886
Classe 4	13645	73225,4395
Classe 5	14256	76504,3507

Concernant les variations de l'activité végétative entre 2000 et 2018, les cycles annuels des classes 3, 4, et 5 sont plus ou moins identiques d'une année à l'autre entre 2000 et 2018) (figure 54). En revanche pour les classes 1 et 2 on observe une modification de leurs cycles annuels. Pour la classe 2 par exemple le profil régresse jusqu'en 2005, augmente ensuite jusqu'en 2010, et se stabilise jusqu'en 2018. Dans les espaces occupés par ces classes il y'a eu montée des eaux en 2005, ce qui a submergé la végétation c'est pourquoi les valeurs de NDVI régressent. Cette observation vient renforcer le caractère de ces deux classes comme marqueurs géographiques de l'influence des niveaux d'eau du lac pour la végétation lacustre immergée.

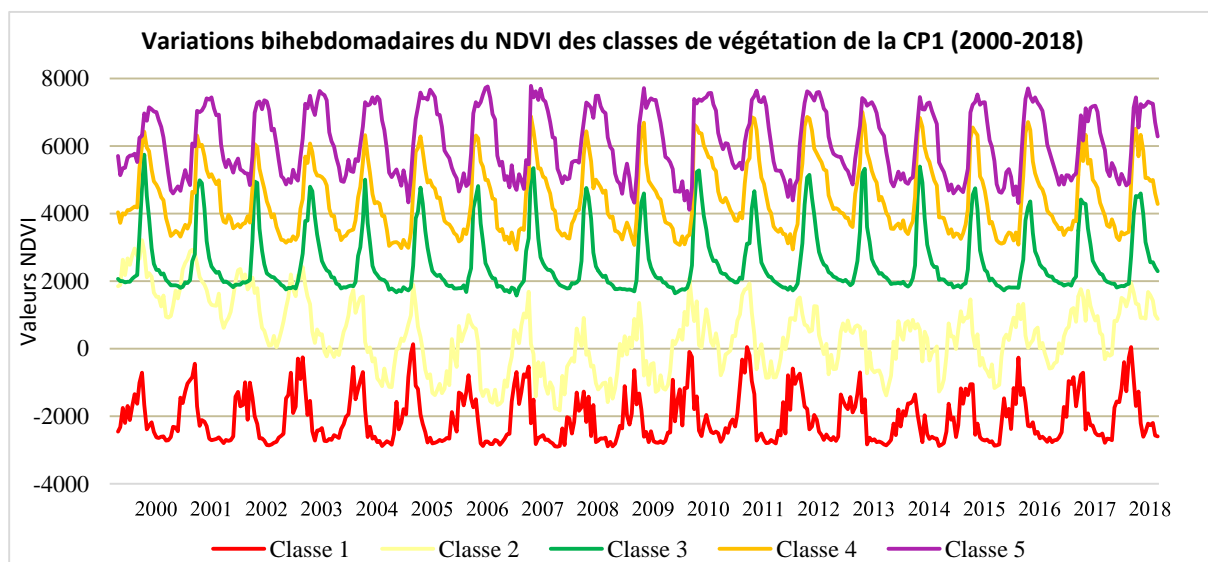


Figure 54 : Variations bihebdomadaires du NDVI des classes de végétation de la CP1 (2000-2018). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

- La composante principale II (CP2)

Les classes de la deuxième composante représentent également cinq groupes de végétation avec des cycles végétatifs différents (figures 55 et 56) (tableau 13). Les deux premières classes dominent l'arrière-pays et les rives. Leurs variations saisonnières sont fortes, mais celles de la classe 1 sont plus importantes. La phase de croissance a lieu à partir de Juin, le maximum est atteint pendant la première quinzaine du mois d'août, la senescence démarre en fin août et dure jusqu'en décembre. Dans la période de senescence deux phases peuvent être distinguées. La première se produit entre la fin du

mois d’Août et le début du mois d’Octobre et concerne certainement la végétation annuelle qui domine les terres émergées de l’arrière-pays. La seconde qui se prolonge jusqu’en Décembre représente la végétation annuelle lacustre (située dans les rives). A partir de Décembre l’activité végétative varie très peu dans ces deux classes jusqu’au retour des pluies.

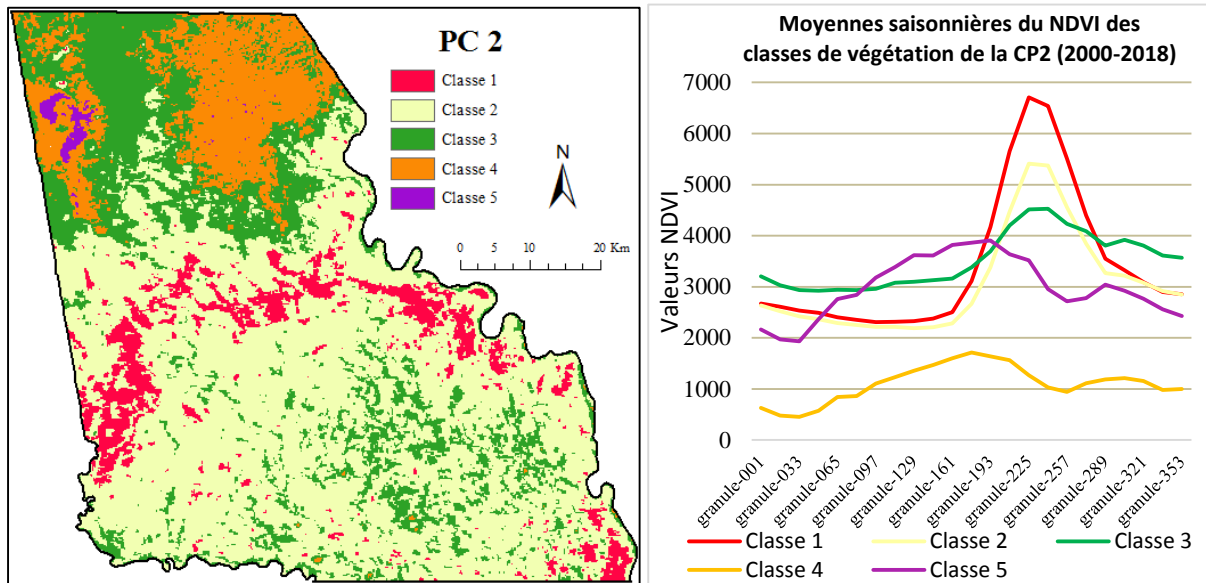


Figure 55 : Résultats de la CP II : Classe de végétation (gauche) évolution annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Les variations dans les trois autres classes (3,4 et 5) sont moins importantes au cours de l’année, comparé aux variations des deux premières classes. Dans la classe trois qui recouvre une partie des marécages permanents la croissance de la végétation débute également en Juin, la maximum forme un plateau qui dure tout le mois d’Août, et la senescence moins drastique que celles des classes précédentes dure jusqu’en Décembre en raison de la présence des eaux du lac. Cependant dans les classes 4 et 5 essentiellement présentes dans les eaux libres permanentes, l’activité chlorophyllienne se produit en grande partie pendant la saison sèche. Les valeurs de l’indice de végétation sont plus importantes dans la classe 5 et varient plus fortement de celles de la classe 4. La croissance commence en début Février après le retrait des eaux. Elle se poursuit jusqu’en Juillet et la senescence débute en fin Juillet à cause de la montée des eaux dû aux retours des précipitations.

Cette composante met en lumière les influences des précipitations sur les couvertures végétales lacustres et de l’arrière-pays et permet de discriminer ainsi 03 nouveaux observables géographiques du couvert végétal : la végétation annuelle de l’arrière-pays fortement influencée par les précipitations (classe 1) ; la végétation émergée (lacustre et de l’arrière-pays) qui varie très peu sous l’influences des précipitations (classe 3) ; et la végétation lacustre émergée soumise aux variations des niveaux d’eau du lac (classe 5).

Tableau 13. Superficies des classes de la CP2.

Désignation	Nombres de pixels	Superficie en hectares
Classe 1	825	4427,33511
Classe 2	2186	11731,0964
Classe 3	91427	490639,96
Classe 4	1292	6933,47511
Classe 5	807	4330,73871

De Février 2000 à Décembre 2018, les profils annuels des classes 1, 2, 3 et 4 restent presque identiques après chaque années et stables sur l'ensemble de la période (figure 56). Par contre, le profil de la classe 5 reste stable jusqu'en 2007 puis régresse entre 2008 et 2012 avant de se stabiliser à nouveau de 2013 à 2018. Au regard de la localisation de cette classe sur la carte, ces changements montrent que la végétation présente dans cet espace a progressivement été remplacée par les eaux libres à partir de 2007 au point de disparaître et d'être immergée dès 2013. Par conséquent cette classe est également un indicateur spatial et temporel du retour des eaux dans certains espaces lacustres.

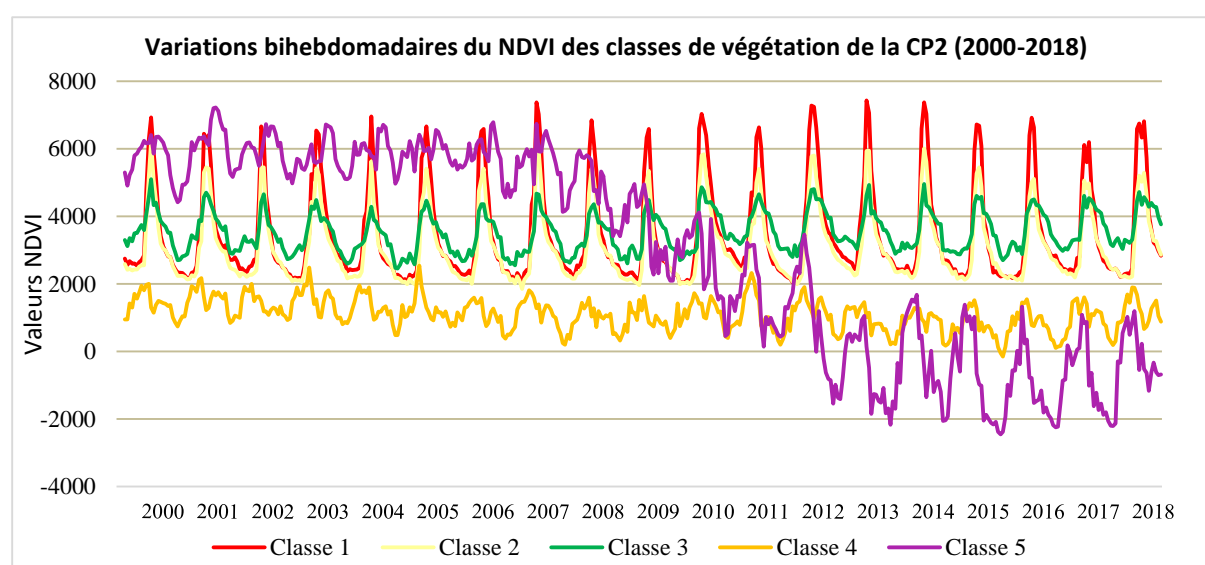


Figure 56 : Variations bihebdomadaires du NDVI des classes de végétation de la CP2 (2000-2018). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

- La composante principale III (CP3)

La composante trois discrimine particulièrement les différents comportements végétatifs fortement liés aux fluctuations des niveaux d'eaux du lac (classes 1, 2, 4, et 5) (la classe 3 en réalité n'est qu'un masque qui permet d'améliorer la mise en évidence des couverts végétaux soumis aux variations des eaux du lac.). Ces classes sont principalement présentes dans la zone lacustre (figure 57).

Les classes 1 et 2 présentent des profils presque identiques où on distingue une période de croissance qui débute pendant la seconde quinzaine du mois de Janvier et atteint son maximum en fin Juillet. Cette phase est suivie par une période de décroissance qui dure jusqu'en début Septembre et qui est succédée par une courte période d'activité végétale qui dure jusqu'en début Décembre.

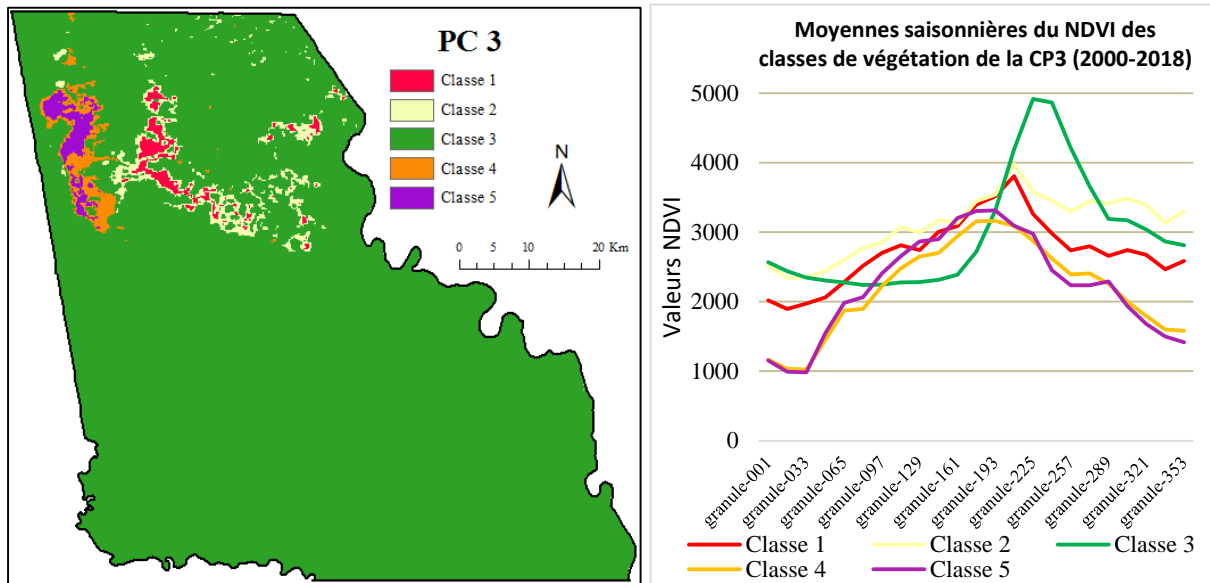


Figure 57 : Résultats de la CP III : Classe de végétation (gauche) évolution annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Les classes 4 et 5 quant à elles ont des profils qui présentent des périodes actives semblables à celles des classes 1 et 2, à la différence que pour les classes 4 et 5, la croissance atteint son maximum en fin Juin, la décroissance se produit en début Juillet et la courte période d'activité entre fin Septembre et début Décembre n'a vraiment pas lieu. Par ailleurs, les valeurs d'indices des classes 4 et 5 sont inférieures à celles des classes 1 et 2.

En résumé, ces quatre classes (1, 2, 4, et 5), décrivent des comportements végétatifs, actifs pendant les périodes de décrue mais qui baissent avec la montée des eaux liée au retour des pluies.

En réalité ces classes décrivent des comportements végétatifs déjà observés dans les deux premières composantes (classes 1 et 2 de la première composante). En revanche ce sont de nouveaux marqueurs temporels de la répartition du couvert végétal comme l'illustre la figure 58 ci-dessous.

Tableau 14. Superficies des classes de la CP3.

Désignation	Nombres de pixels	Superficie en hectares
-------------	-------------------	------------------------

Classe 1	825	4427,33511
Classe 2	2186	11731,0964
Classe 3	91427	490639,96
Classe 4	1292	6933,47511
Classe 5	807	4330,73871

Sur l'ensemble de la période d'observation, les tendances annuelles de chacune des classes sont plus ou moins semblables années après années (le profil de la classe 3 qui est un masque reste stable) (figure 58). Les classes 1 et 2 évoluent à peu près de façon similaire en décrivant une allure générale progressive. Leurs courbes débutent en réalité par une phase de régression qui dure de 2000 à 2002, ensuite a lieu une période de progression qui s'opère jusqu'en 2010, entre 2010 et 2018 ces profils sont globalement stables. Les profils des classes 4 et 5 ont par contre des allures générales régressives. Elles sont également stables jusqu'en 2002, mais amorcent une phase de régression qui se produit jusqu'en 2010 avant de se stabiliser pendant le reste de la période d'observation.

Par conséquent vu que ces quatre classes sont situées dans la zone lacustre ce sont des marqueurs spatiaux et temporels de la répartition du couvert végétal lacustre. En effet, dans les espaces couverts par les classes 1 et 2, les eaux libres ont régressé laissant place à l'apparition du couvert végétal à partir de 2010. Par contre dans les espaces couverts par les classes 4 et 5, c'est par contre la montée des eaux qui a eu lieu au tour de 2010 et conduit à l'immersion du couvert végétal.

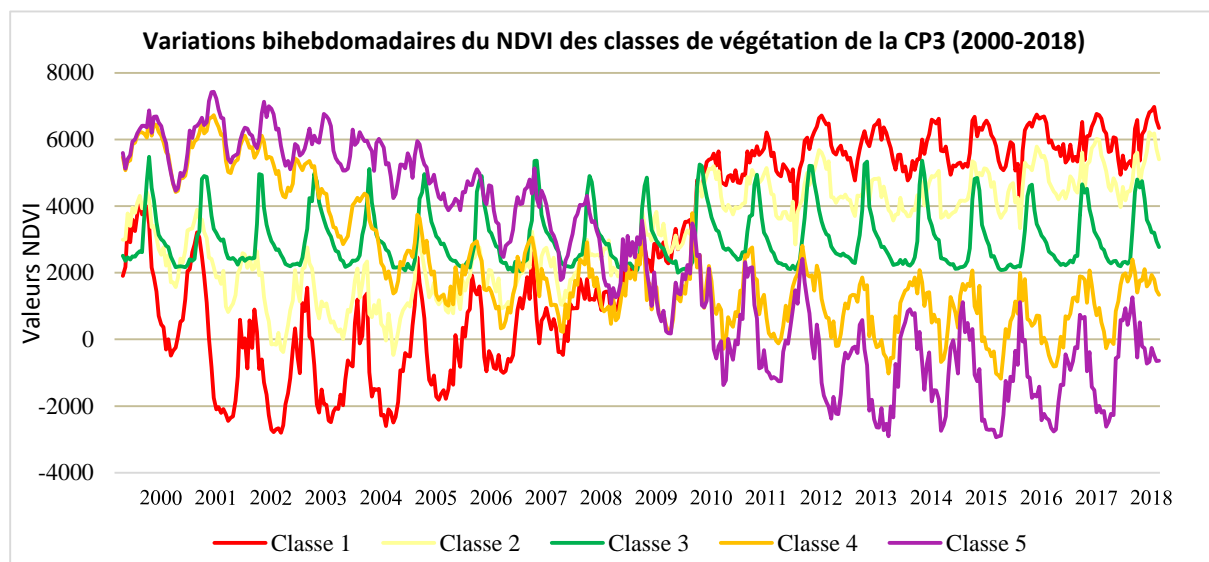


Figure 58 : Variations bihebdomadaires du NDVI des classes de végétation de la CP3 (2000-2018). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

- **La composante principale IV (CP4)**

Cette composante présente quatre classes de végétation mais ne distingue que trois comportements végétatifs (figure 59). Les courbes des classes 1 et 2 sont celles des végétations influencées par les variations des surfaces en eaux du lac. La classe 3 une fois de plus est un masque et représente le couvert végétal influencé par les pluies. Seule la classe 4 présente un profil différent de ce qui a déjà été observé dans les composantes précédentes.

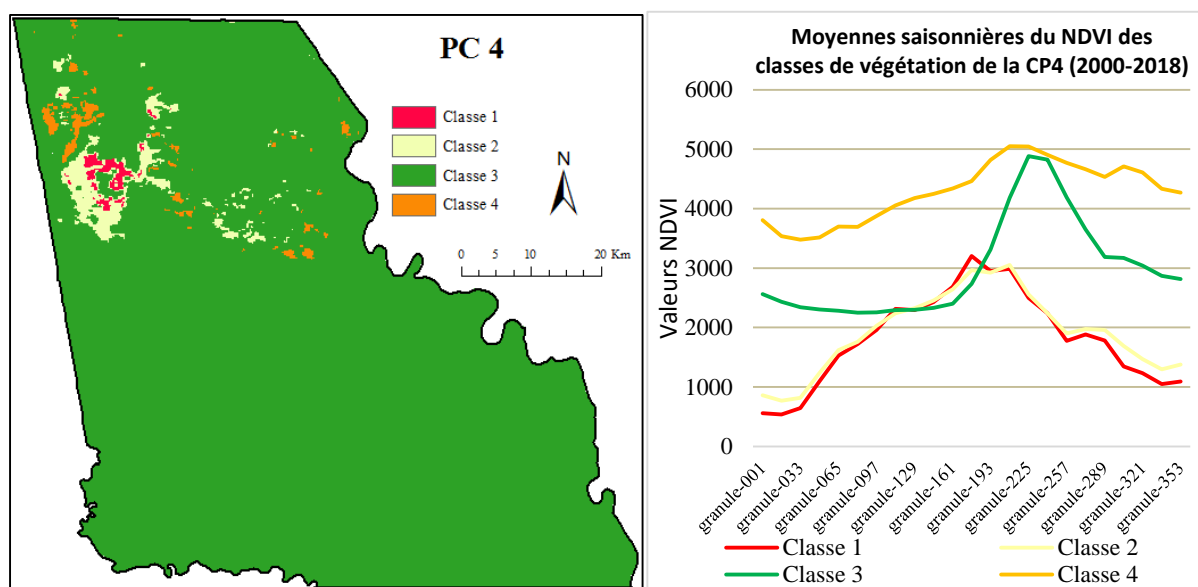


Figure 59 : Résultats de la CP IV : Classe de végétation (gauche) évolution annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

La classe 4 regroupe les pixels avec les plus fortes valeurs d'indice de végétation. La phase de croissance débute en fin Février, elle atteint son pic en début Septembre, et la décroissance qui suit dure jusqu'en fin Octobre. Une légère reprise d'activité a également lieu et dure de la mi-Octobre à début Décembre.

Cette classe est un observable spatiale qui indique les couverts végétaux lacustres denses toute l'année et dont les valeurs varient très peu. C'est aussi un indicateur temporel comme l'illustre la figure 60 ci-dessous.

Tableau 15. Superficies des classes de la CP4.

Désignation	Nombres de pixels	Superficie en hectares
Classe 1	390	2092,92205
Classe 2	1950	10464,6103
Classe 3	93389	501168,968
Classe 4	808	4336,10517

Les tendances annuelles de chacune des classes sont une fois de plus à peu près semblables au fil des années (figure 60). Le profil de la classe 3 reste une fois de plus stable. Les profils temporels des classes une et deux présentent sensiblement les mêmes allures générales. Ils sont stables les trois premières années, puis une phase de régression commence et dure jusqu'en 2006, ensuite ces profils restent stables jusqu'en 2010, et progressent ensuite jusqu'en 2018. La classe 4 est stable les trois premières années, progresse ensuite jusqu'en 2008, régresse jusqu'en 2014 et reste stable sur le reste des années.

Ces profils montrent en effet que dès 2003 il y'a eu montée des eaux dans la partie ouest de l'espace lacustre. La végétation des classes 1 et 2 a été immergée pendant que celle de la classe 4 a émergé. Mais à partir de 2010, les eaux se retirent à nouveau de ces espaces et les végétations des classes 1 et 2 réapparaissent pendant que celle de la classe 4 s'immerge.

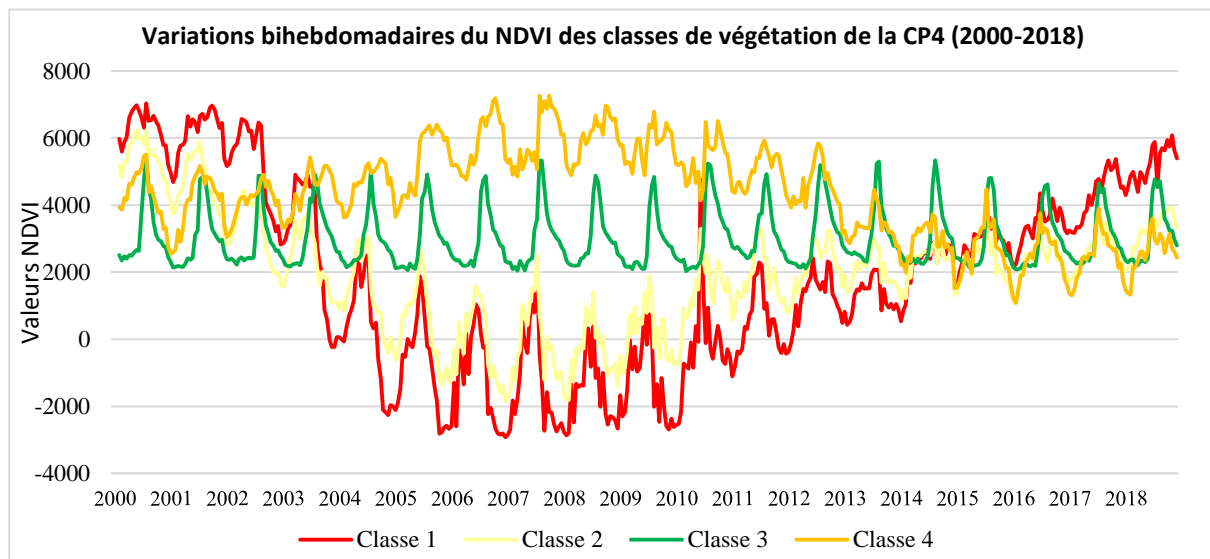


Figure 60 : Variations bihebdomadaires du NDVI des classes de végétation de la CP4 (2000-2018). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

- La composante principale V (CP5)

Les cinq classes de cette composante permettent de distinguer dans la zone lacustre trois nouveaux types de comportement végétatifs (les classes 2, 4 et 5) (figure 61). La classe 3 une fois de plus est un masque et la classe 1 est très faible spatialement (à peine 67 pixels) (tableau 16).

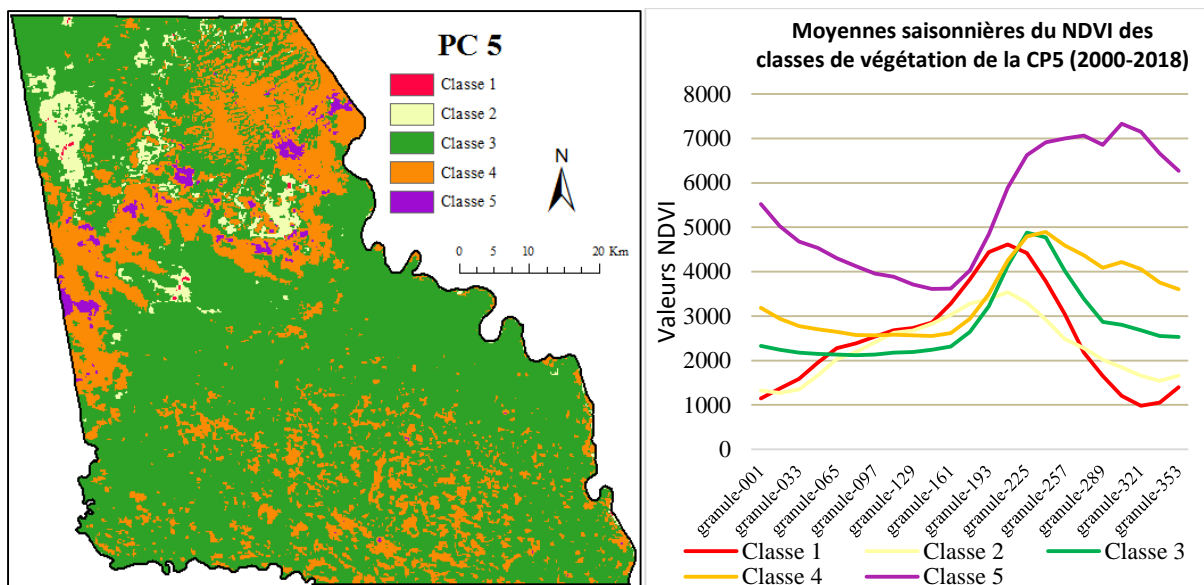


Figure 61 : Résultats de la CP V : Classe de végétation (gauche) évolution annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Dans la classe 2, l'activité chlorophyllienne croit du mois de Novembre, jusqu'en début Juin où l'arrivée des pluies apporte un souffle d'énergie à cette croissance qui croit ensuite rapidement jusqu'à son pic atteint en fin Juillet. La montée des eaux déclenche ensuite la phase de senescence qui s'étend jusqu'en Décembre. Pour les classes 4 et 5 essentiellement présentes dans les rives, la variation de la végétation est influencée par les précipitations. Cependant, leurs activités végétatives se prolongent après les pluies (à l'exemple de la classe 5 de la CP1) puisque la décroissance intervient très tard en Décembre. Les valeurs les plus importantes de l'indice de végétation pour la classe 5 sont par exemple enregistrées en début Novembre. D'ailleurs, pour ces deux classes une légère phase de croissance observée en fin Octobre déclenche un nouveau cycle qui dure un mois environ.

Nous sommes donc en présence ici de deux nouveaux marqueurs géographiques de l'occupation du couvert végétal. Il s'agit d'une part de la végétation qui se développe dès le retrait des eaux, bénéficie de l'apport des précipitations mais est immergée par les crues (classe 2), et d'autre part de la végétation qui bénéficie des influencent positives à la fois les pluies et des fluctuations des eaux du lac (classe 4 et 5).

Tableau 16. Superficies des classes de la CP5.

Désignation	Nombres de pixels	Superficie en hectares
Classe 1	67	359,553276
Classe 2	3204	17194,1596
Classe 3	69990	375599,011
Classe 4	22118	118695,513
Classe 5	1158	6214,36855

A quelques différences près, les tendances annuelles de toutes ces classes sont stables et pratiquement identiques pour chaque année (figure 62). Elles sont également stables sur l'ensemble de la période observée à l'exemption des classes 1 et 2 qui sont légèrement régressives à partir de 2010.

La classe 2 est donc également un marqueur temporel qui indique une montée progressive des eaux libres dans les espaces qu'elle occupe à partir de 2010 et qui poursuit au-delà de 2018.

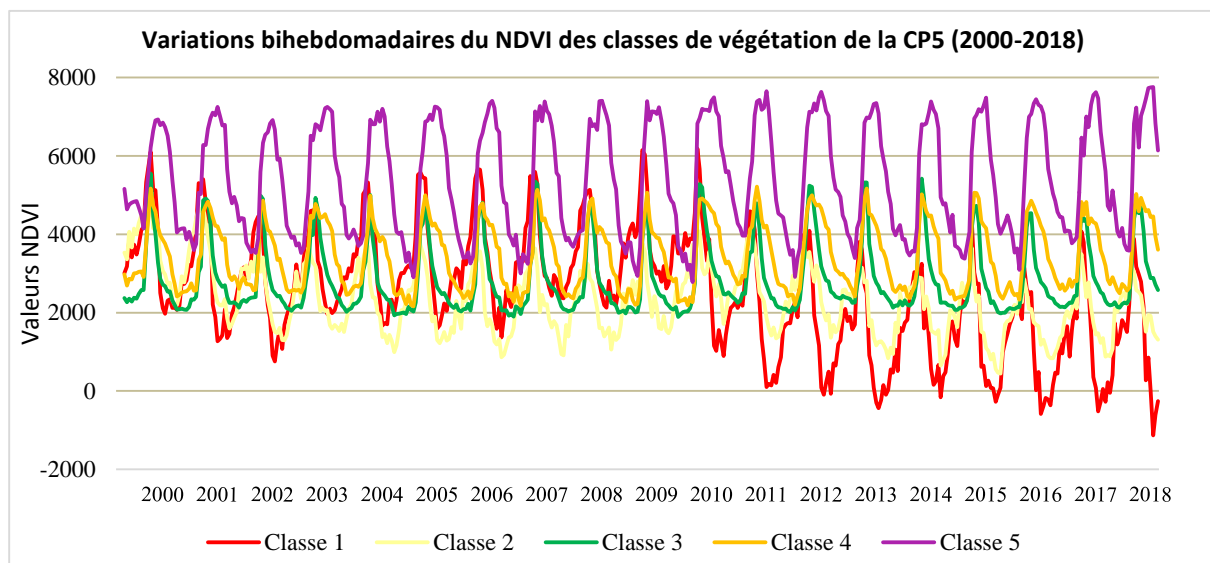


Figure 62 : Variations bihebdomadaires du NDVI des classes de végétation de la CP5 (2000-2018). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

- La composante principale VI (CP6)

La composante 6 distingue elle aussi 5 cycles chlorophylliens différents (figure 63). Les classes 1 et 5 sont spatialement faibles (respectivement 164 pixels et 156). Les classes 3 et 4 sont des masques et présentent des profils déjà observés (classe 4 de la composante 5, et classe 2 de la composante 2 respectivement).

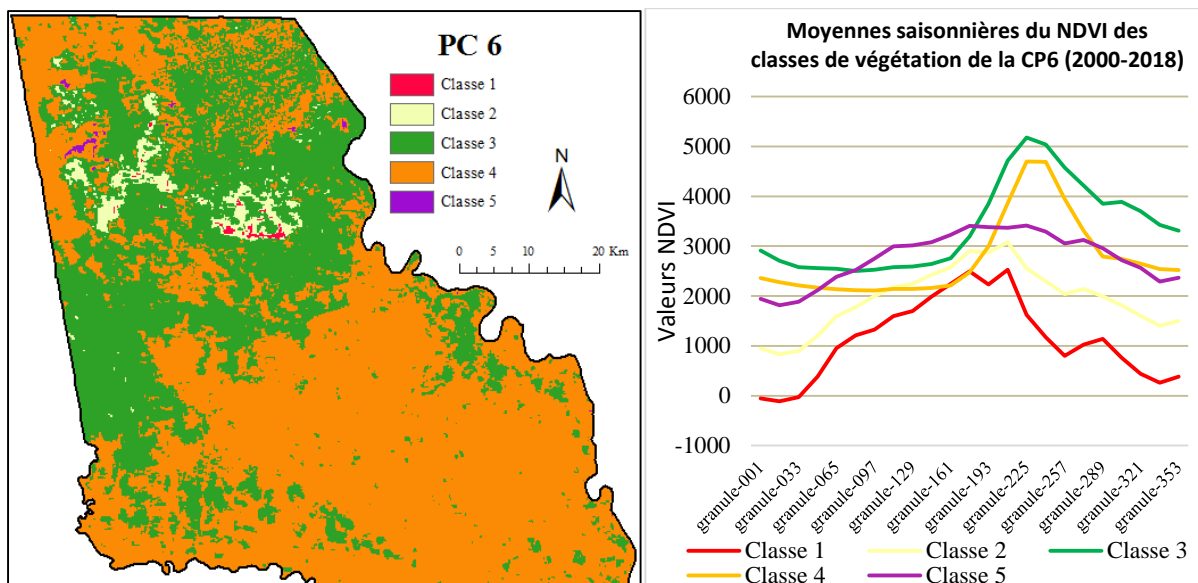


Figure 63 : Résultats de la CP VI : Classe de végétation (gauche) évolution annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

La classe 2 est dans une certaine mesure la synthèse des classes 1 et 2 de la composante principale 3, à la différence que pour cette classe le maximum d'activité dure plus longtemps (de mi-Juin à fin Juillet) et la légère reprise de l'activité chlorophyllienne observée à partir de mi-Septembre est plus brève. Tout comme les classes 1 et 2 de la composante principale 3, la classe 2 de cette composante est également un indicateur temporel de la couverture végétale (figure 64).

Tableau 17. Superficies des classes de la CP6.

Désignation	Nombres de pixels	Superficie en hectares
Classe 1	164	880,100555
Classe 2	1981	10630,9707
Classe 3	35876	192527,363
Classe 4	58360	313187,002
Classe 5	156	837,168821

Les cycles annuels des profils de végétation sont très peu variant pour toutes les classes (figure 64). La courbe de la classe 2 est régressive jusqu'en 2002, puis stable jusqu'en 2009 et progressive à partir de 2010 et se stabiliser pour le reste des années.

Par conséquent, dans les espaces couverts par la classe 2, les eaux libres ont régressée laissant place à l'apparition du couvert végétal à partir de 2010.

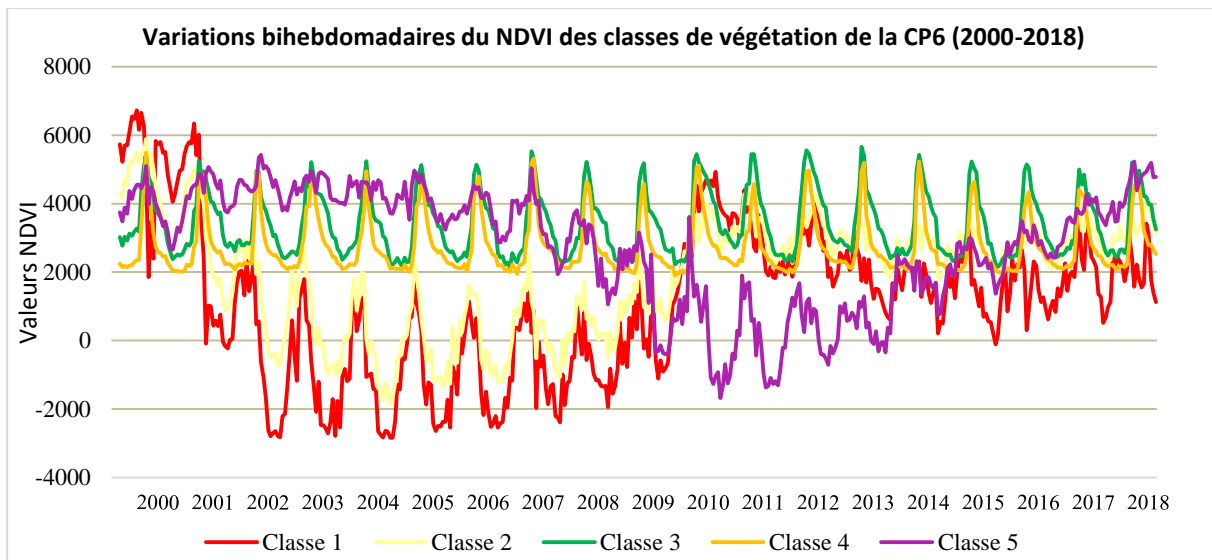


Figure 64 : Variations bihebdomadaires du NDVI des classes de végétation de la CP6 (2000-2018). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

- **La composante principale VII (CP7)**

Les classifications des composantes 7 et 8 donnent des résultats identiques. Les classes identifiées sont soit spatialement faibles (classe 1 et 5), soit des masques (classe 3) ou distinguent des profils déjà mis en évidences par les composantes précédentes (classes 2 et 4) (figure 65).

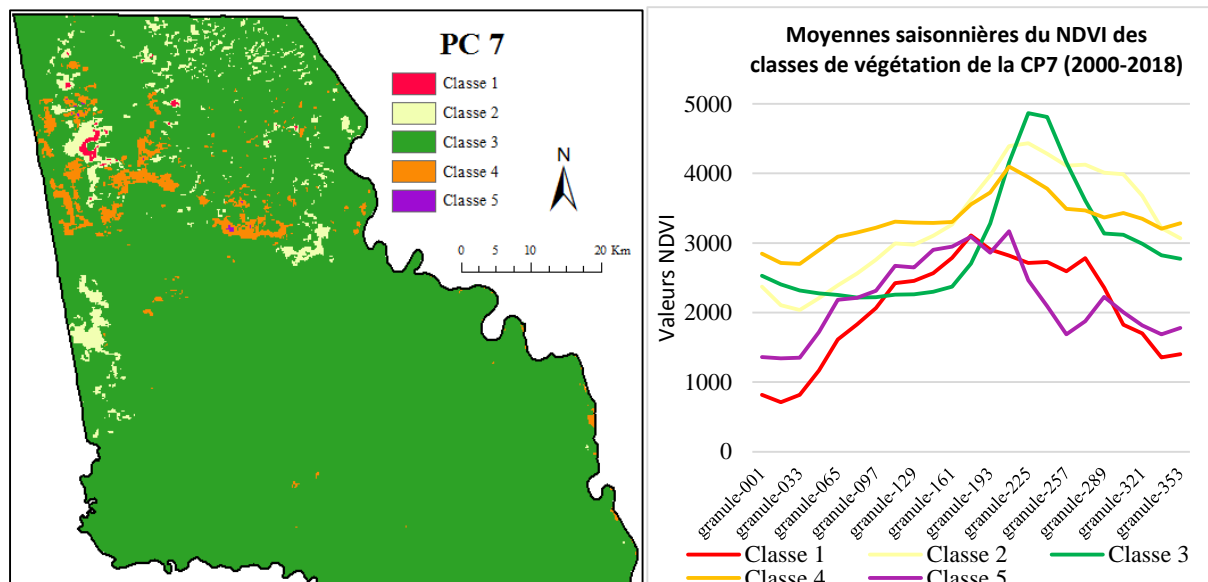


Figure 65 : Résultats de la CP VII : Classe de végétation (gauche) évolution annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Tableau 18. Superficies des classes de la CP7.

Désignation	Nombres de pixels	Superficie en hectares
Classe 1	158	847,901754
Classe 2	2864	15369,5609
Classe 3	91028	488498,74
Classe 4	2459	13196,1419
Classe 5	28	150,26107

Au regard de leurs courbes instables (figure 66) les classes 1 et 5 auraient pu être des marqueurs temporels de la répartition de la végétation lacustre mais elles occupent de très faibles espaces (158 et 28 pixels respectivement) (tableau 18). Toutes fois elles montrent une fois de plus l'influence des eaux libres sur le couvert végétal lacustre à partir de 2010. Le retrait des eaux entraîne l'augmentation de la végétation de la classe 5 dès 2010, et de la classe 1 à partir de 2013.

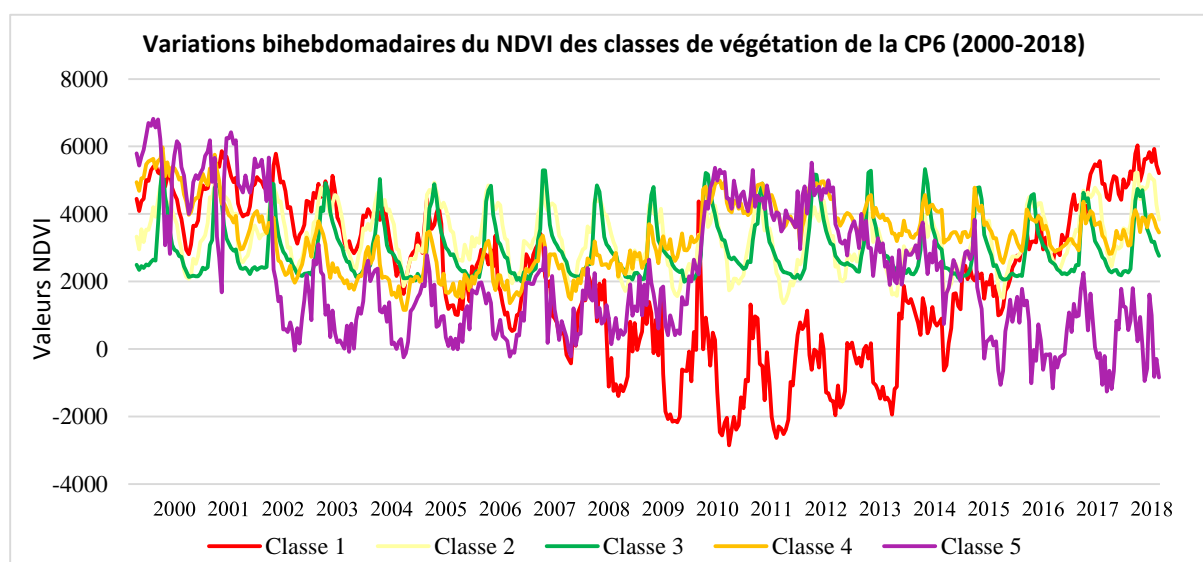


Figure 66 : Variations bihebdomadaires du NDVI des classes de végétation de la CP6 (2000-2018). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

L'analyse des composantes permet d'identifier plusieurs marqueurs géographiques (spatiaux et temporels) de l'évolution de la couverture végétale. Dans la composante une, les marqueurs géographiques de la couverture végétale sont identifiables : les végétations denses (classes 4 et 5) sont essentiellement présentes dans l'espace lacustre ; les végétations saisonnières dominent l'arrière-pays (classe 3) ; et les végétations lacustres immergées (classes 1 et 2) sont présentes exclusivement dans les eaux libres. Cette composante permet par ailleurs de distinguer que dans notre espace d'étude la couverture végétale est principalement influencée par les pluies (classes 3, 4 et 5) ou par les fluctuations des eaux du lac (classes 1 et 2). La composante 2 met en lumière les influences des précipitations sur les couverts végétaux et permet d'identifier 3 autres

marqueurs du couvert végétal : le couvert végétal annuelle de l'arrière-pays fortement influencée par les précipitations (classe 1) ; la végétation émergée (lacustre et de l'arrière-pays) faiblement influencée par les précipitations (classe 3) ; et la végétation lacustre émergée soumise aux variations des niveaux d'eau du lac (classe 5). La composante 3 identifie les marqueurs temporels de la répartition du couvert végétal lacustre (classes 1, 2, 4, et 5). Dans la composante 4 c'est le marqueur indiquant les couverts végétaux lacustres denses toute l'année qui est observé. Sur la composante 5, deux nouveaux marqueurs géographiques sont présents à savoir : la végétation qui se déploie dès le retrait des eaux, bénéficie de l'apport des précipitations en début de saison pluvieuse mais est immergée par les crues (classe 2) ; et d'autre part la végétation qui bénéficie à la fois des influences positives des pluies et des fluctuations des eaux du lac (classe 4 et 5). La composante 6 montre un nouvel indicateur temporel de la couverture végétale (classe 2) qui montre une fois de plus que la régression des eaux libres s'accompagne d'une augmentation du couvert végétal lacustre.

Les composantes 7 et 8 sont essentiellement constituées des profils saisonniers redondants déjà décrits dans les composantes précédentes. Les autres composantes également présentes des redondances pour certains profils saisonniers. Ceci met en évidence des corrélations systémiques probables entre les composantes.

Pour cette raison, les composantes principales sont fusionnées entre elles pour former une nouvelle image qui synthétise l'essentiel des informations sur la couverture végétale. Cette nouvelle image est alors classifiée pour obtenir enfin les principales classes de végétation présentes dans notre espace d'étude.

3.1.2. Fusion des Composantes Principales : Cartographie des principales classes de végétation

Chacune des composantes correspond à une mesure particulière de l'activité chlorophyllienne et contient des marqueurs de la couverture végétale qui en réalité sont des indicateurs spatiaux et temporels (saisonniers et annuels) de la répartition de la végétation et des interactions qu'elle entretient avec le climat et le lac Tchad. Ces indicateurs sont répartis sur les composantes, d'où la nécessité de fusionner ces composantes pour prendre en compte simultanément les indicateurs dans la cartographie des principales classes de végétation.

En raison de leur poids (pourcentage d'information fusionnée), de la quantité et de la qualité des informations qu'elles contiennent (les différents marqueurs spatiaux et temporels identifiés et leur importance spatiale), seules les six premières composantes sont utilisées. Les composantes 7 et 8 répètent en fait dans leur ensemble les informations déjà répertoriées dans les six premières.

L'algorithme de classification non supervisée par les K-means est appliqué à l'image de synthèse utilisée pour cartographier les principales classes de végétation. Outre le fait

qu'il soit adapté à un nombre important d'image, il est rapide, très facile à mettre en place et reproductible (la description de cet algorithme de classification est donnée dans le chapitre 2).

Les critères préalables que nous définissons au classificateur sont :

- le nombre de variables : les 06 composantes principales ;
- le nombre d'individus : 08 classes ;
- le pourcentage d'affectation d'un pixel à une classe : < 1 %
- le maximum d'itération : 50
- le pourcentage d'agrégation des barycentres : < 1 %

Le nombre d'individus fixé à 08 classes s'est avéré être approprié pour cette cartographie. En effet, en deçà de huit classes on observe par exemple que l'influence des précipitations sur le couvert végétal des rives n'apparaît pas et toute la végétation des rives est contenue dans la même classe. Au-delà de ce nombre il y'a une sous-estimation de la végétation annuelle de l'arrière-pays et une sur estimation de la végétation annuelle lacustre.

La classification obtenue permet alors de catégoriser dans notre espace d'étude huit principales classes de végétation (figure 67).

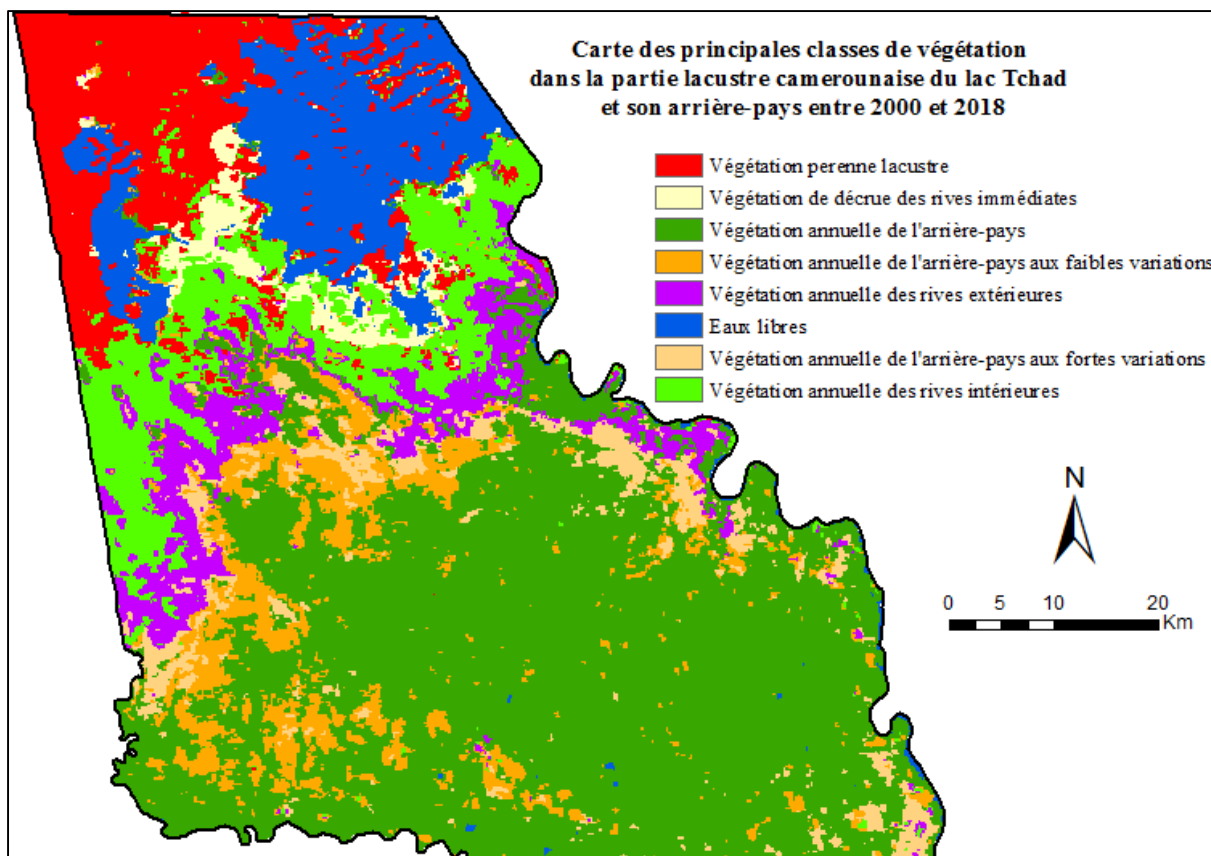


Figure 67 : Carte des principales classes de végétation. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Les profils saisonniers de ces différentes classes de végétation permettent de caractériser la nature des cycles végétatifs et de suivre leur comportement au cours de l'année (figure 69). Cette différence des cycles de végétation a joué un rôle important dans la nomenclature des classes de végétation (figure 67). La description ci-dessous des principales classes de végétation obtenues est fonction des différents cycles chlorophylliens.

Dans l'espace lacustre, les classes présentent sont :

- Les « eaux libres » présentes dans l'espace lacustre uniquement, ont une activité végétative nulle puisque les valeurs de l'indice de végétation sont régulièrement inférieures à zéro ;
- La « végétation pérenne lacustre » recouvre le nord de la partie lacustre au-delà des eaux. Son activité végétative est en partie liée au cycle des pluies, puisque la phase de croissance a lieu au retour des pluies. Mais il faut également noter que les variations des niveaux du lac impactent fortement et positivement ce cycle car les valeurs les plus élevées de l'indice de végétation sont enregistrés en Novembre. La senescence ne commence qu'en début Décembre ;

- La « végétation de décrue des rives immédiates » est située dans la partie lacustre entre les eaux libres et les rives. C'est parmi toutes les classes, celle qui dépend le plus des variations des eaux du lac. La croissance commence en Février atteint son pic en début Août et la senescence prend le relais jusqu'en début Septembre. C'est également l'une des classes où l'amplitude des variations de la végétation est la moins forte ;
- La « végétation annuelle des rives intérieures » constitue une partie du couvert végétal des rives. Ses valeurs sont les plus élevées comparées à toutes les autres classes, sauf entre Janvier et fin Juillet où les végétations annuelles des rives immédiates présentent des meilleures valeurs. Son cycle est également lié aux précipitations avec une phase de croissance en début Juin. Les valeurs restent maximales jusqu'en Novembre et le second cycle de végétation entre la fin du mois d'Octobre et la fin de Novembre a bien lieu. En début Décembre, la phase de senescence commence ;
- La « végétation annuelle des rives extérieures » forme une sorte de limite entre la zone lacustre et l'arrière-pays. Parmi les classes les plus fortement soumises aux variations du climat c'est celle qui possède les valeurs d'indices les plus élevés. L'activité chlorophyllienne commence en Juin, le maximum de croissance est atteint en fin Août et la senescence se déclenche en début Septembre.

Dans l'arrière-pays les classes présentent sont :

- « La végétation annuelle de l'arrière-pays aux fortes variations saisonnière » est située aux marges des rives. C'est également l'une des classes les plus fortement soumises aux changements des saisons au cours de l'année. L'activité chlorophyllienne commence aussi en Juin, le pic de croissance est atteint en fin Août et la senescence commence en début Septembre ;
- « La végétation annuelle de l'arrière-pays aux faibles variations saisonnière » située aux marges de l'arrière-pays, cette classe aussi est soumise fortement aux cycles des pluies. Son cycle végétatif est presque identique à celui de la précédente classe à la seule différence que les variations de valeurs d'indices de végétation sont moins marquées entre le début de la croissance en Juin et la fin de la senescence en Décembre ;
- La « végétation annuelle de l'arrière-pays ». C'est la classe la plus importante spatialement (figure 68). Elle est essentiellement contenue dans l'arrière-pays loin des rives du lac. Les pluies régissent le cycle de la végétation pendant l'année. La croissance aussi se produit en Juin, le maximum forme un plateau qui dure tout le mois d'Août pour laisser ensuite place à la senescence qui dure jusqu'en Octobre.

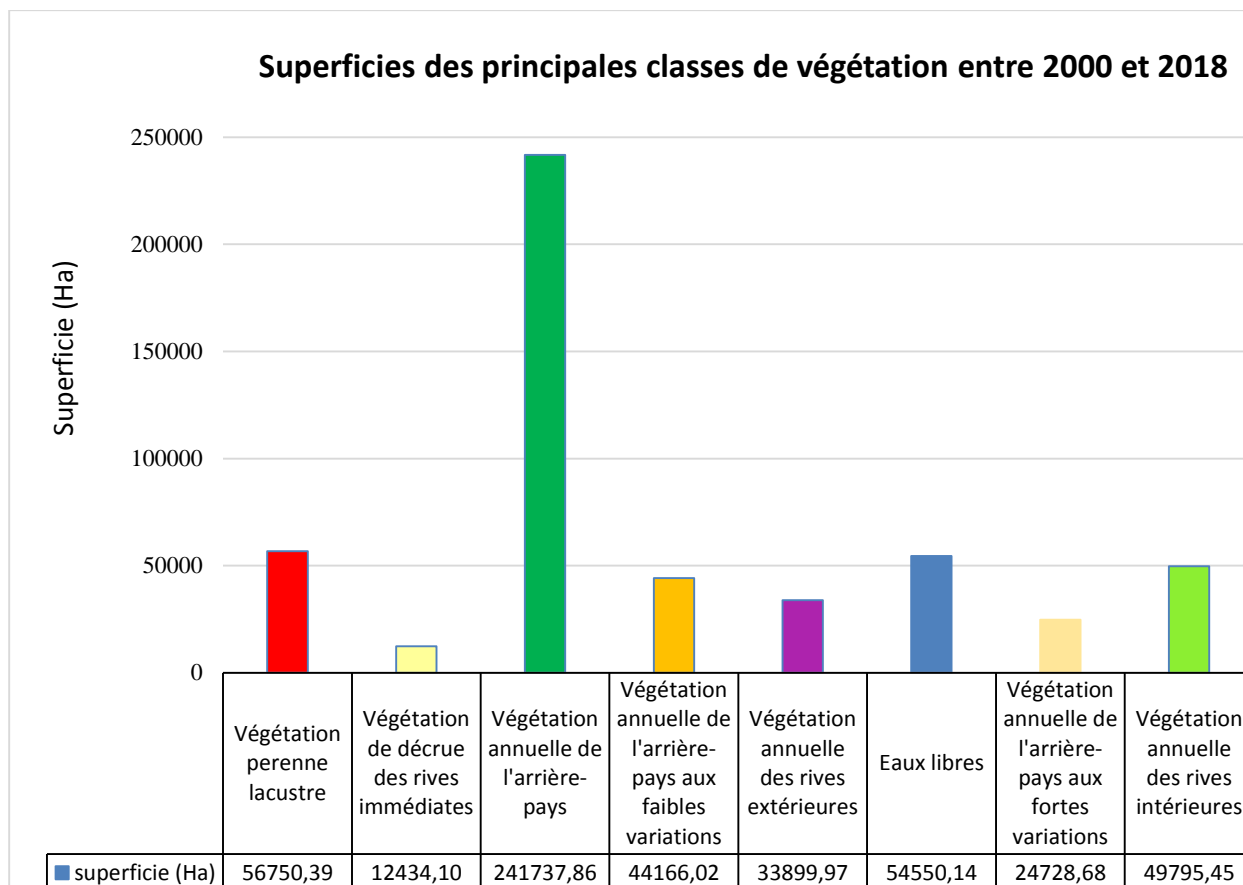


Figure 68 : Superficies des principales classes de végétation entre 2000 et 2018.
 Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

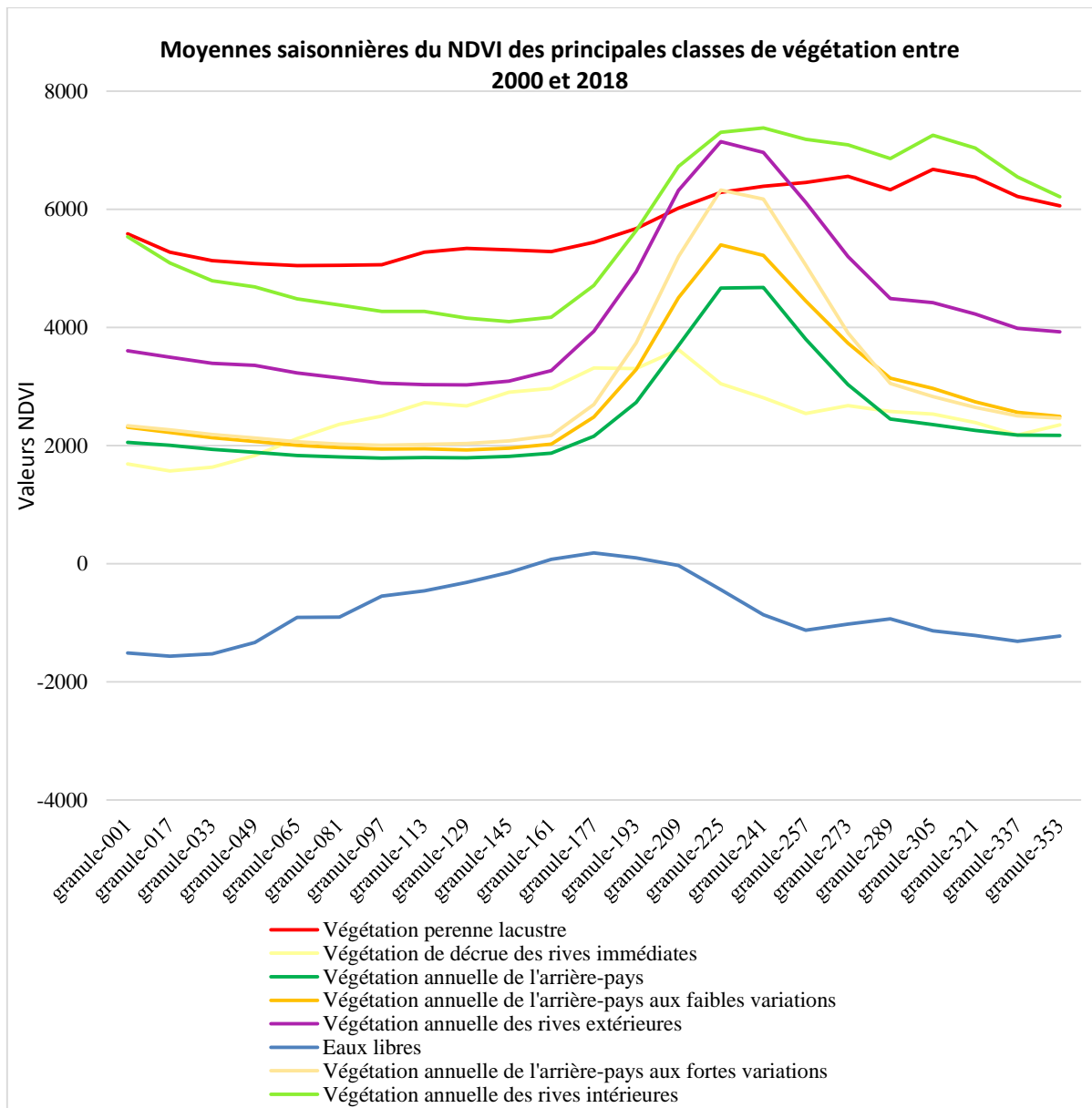


Figure 69 : Moyennes saisonnières du NDVI des principales classes de végétation entre 2000 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

La carte des principales classes de végétations obtenue résume la couverture végétale de notre espace d'étude entre 2000 et 2018. Cependant les composantes principales ont montré que la couverture végétale durant cette période a évolué (régression et augmentation) autant dans la zone lacustre que dans l'arrière-pays. Il est donc question à présent de détecter les changements que le couvert végétal a connu dans cet espace entre 2000 et 2018.

3.2. Les changements observés dans la répartition du couvert végétal entre 2000 et 2018

3.2.1. Analyses des cycles végétatifs annuels et saisonniers des classes de végétation

3.2.1.1. Les changements annuels des cycles végétatifs

Concernant les variations de l'activité végétative entre 2000 et 2018, à quelques différences près, les tendances annuelles de toutes ces classes sont stables et pratiquement identiques d'une année à l'autre (figure 70). Elles sont également stables sur l'ensemble de la période observée. Cependant, et c'est d'ailleurs le changement le plus significatif observé à partir de ces profils, les valeurs de NDVI des végétations de décrue des rives immédiates régressent dès le début de la période d'observation, ensuite elles restent stables jusqu'en 2008, puis commencent à augmenter à partir de 2010 (figure 70). En 2011 les valeurs de cette classe de végétation doublent pratiquement et restent stables jusqu'à la fin de l'observation en Décembre 2018.

Ces évolutions témoignent par conséquent d'un changement important opéré dans ce milieu. En effet, les « végétations de décrue des rives immédiates » sont un résumé des classes 1 et 2 de la composante 3 (figure 57) qui en tant que marqueurs spatiaux et temporels de la répartition du couvert végétal lacustre montraient déjà qu'en 2010 les eaux libres ont régressée pour laisser place à l'apparition du couvert végétal. Le regroupement de ces deux marqueurs spatiaux et temporels au sein d'une même classe permet de quantifier ce changement à 16 158,33 hectares. Par conséquent, à partir de 2010 dans la partie lacustre, environ 16 158,33 hectares d'eaux libres disparaissent pour laisser place à la végétation.

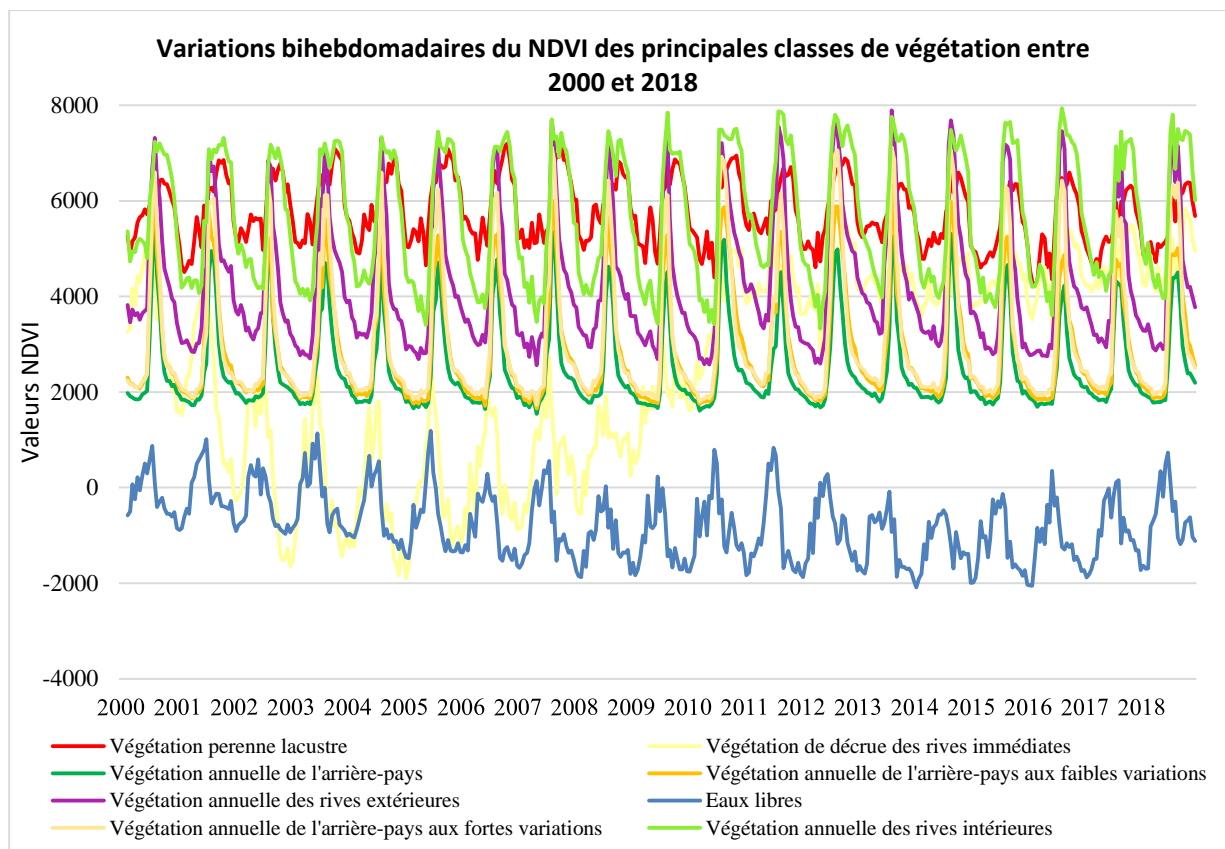


Figure 70 : Variations bihebdomadaires du NDVI des principales classes de végétation entre 2000 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

3.2.1.1. Les changements saisonniers des cycles végétatifs

Pour analyser les influences des changements de la répartition du couvert végétal sur les cycles végétatifs saisonniers, nous divisons notre période d'observation en deux : la première moitié est celle de 2000 à 2009 ; et la seconde de 2010 à 2018 (figure 71). Le choix des deux périodes est dû au fait que sur les différents profils annuels des composantes 2, 3, 4, 5, 6, et même sur les profils annuels de la classification finale (figure 70), l'année 2010 apparaît à chaque fois comme celle pendant laquelle d'importants changements se produisent. La comparaison de ces deux périodes va par conséquent permet d'analyser l'influence de ces changements sur l'activité chlorophyllienne saisonnière des principales classes de végétation cartographiées.

Si les profils temporels des eaux libres et des végétations annuelles des rives intermédiaires semblent très peu varier entre les deux périodes, celles des six autres classes sont différentes à bien des égards (figure 71). Pour commencer, la différence dans le positionnement des courbes des végétations de décrue des rives immédiates entre les deux périodes confirme les observations décrites dans la section précédente. Entre 2000 et 2009 les valeurs de ces courbes sont généralement inférieures à 2000, par contre entre 2010 et 2018, elles doublent et sont la plus part du temps supérieures à 4000.

Entre 2000 et 2009, la croissance végétative de toutes les classes de végétations annuelles atteint son pic au début du mois d’Août (tout comme c’est le cas sur la période 2000-2018 (figure 71)). Mais pour la période 2010-2018, ce pic de croissance se rallonge vers la deuxième moitié du mois d’Août et forme un plateau. Le maximum de végétation dure ainsi plus longtemps pendant cette période. Par ailleurs, sur la période 2010-2018, pour toutes les classes de végétations annuelles les profils présentent de manière très nette une légère reprise de la croissance végétale au début du mois de Novembre. Le pic de cette croissance est atteint en fin Novembre et la décroissance commence en début Décembre. En d’autres termes contrairement à la première moitié de la période d’observation où la senescence de ces classes dure de fin Août à début Novembre, cette senescence est stoppée dans la période 2010-2018 par une seconde phase de croissance végétative.

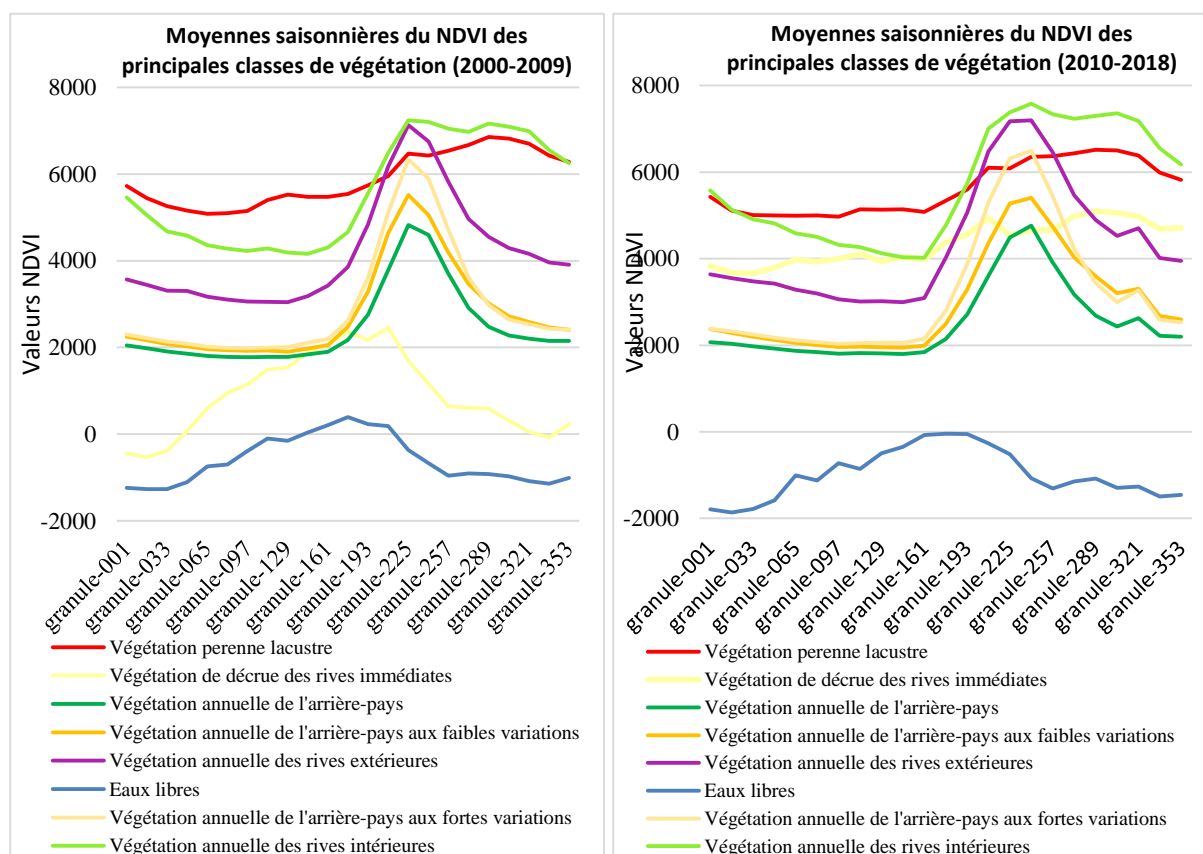


Figure 71 : Moyennes saisonnières du NDVI des principales classes de végétation de 2000 à 2009 (gauche), et de 2010 à 2018 (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Ces courbes saisonnières montrent en réalité qu’à partir de 2010 les conditions climatiques s’améliorent aux niveaux des rives camerounaises du lac Tchad et son arrière-pays, où la pluviométrie devient plus importante. Les plateaux formés sur les cycles végétatifs des végétations annuelles (figure 71) permettent de constater que le maximum de précipitations s’allonge au moins sur deux semaines supplémentaires à partir de 2010.

D'autre part, à partir de cette date l'amélioration de la pluviométrie s'observe également par la légère reprise de l'activité végétative des cycles annuels au début du mois de Novembre mais celle-ci est brève. Ceci montre que durant le second intervalle (2010-2018) une timide reprise des pluies à lieu entre Octobre et Novembre.

Par conséquent, les cycles végétatifs saisonniers témoignent de ce que les végétations annuelles aussi bien dans la partie lacustre que dans l'arrière-pays sont également de très bons marqueurs géographiques de l'évolution du climat et de son impact sur le couvert végétal aux rives camerounaises du lac Tchad et son arrière-pays.

L'amélioration de la pluviométrie a entraîné la montée des eaux et celles-ci ont immergée une partie des couverts végétaux lacustres. C'est la raison pour laquelle la courbe des eaux libres s'affaisse légèrement (sur les profils annuels on peut d'ailleurs constater l'allure générale régressive de cette classe de végétation (figure 70)).

La montée des eaux s'accompagne également de l'augmentation du couvert végétal dans les rives immédiates. Ce constat paradoxal s'explique mieux à partir de l'analyse des tendances d'évolution du couvert végétal.

3.2.2. Les tendances d'évolution du couvert végétal entre 2000 et 2018

3.2.2.1. L'approche par le test statistique de Mann-Kendall

La mise en évidence des tendances d'évolutions du couvert végétal entre 2000 et 2018 à partir de nos images MODIS MOD13Q1 est effectuée selon le test de tendance statistique de Mann-Kendall (les 434 images sont utilisées donc le résultat ne correspond pas à une date précise mais à l'ensemble de la période d'observation soit de 2000 à 2018). C'est un test robuste (Yue et Pilon, 2004) très utilisé pour ce type de traitement (Tra Bi et al., 2013; Edea et al., 2016; Andrieu, 2018). Dans cette étude ce test associe la corrélation de Kendall ou « tau » de Kendall au test de significativité, pour déterminer les évolutions du couvert végétal selon trois hypothèses alternatives de tendance : négative, non nulle ou positive.

C'est un test non paramétrique qui détermine si les données augmentent ou diminuent en temps et en valeur grâce au « tau » de Kendall qui produit une tendance à partir du calcul de la fréquence relative des baisses moins la fréquence relative des hausses. Le « tau » de Kendall, compris entre -1 et 1 est la mesure des corrélations entre deux variables selon les équations ci-dessous. Les valeurs en sortie sont positives si les données augmentent plus souvent qu'elles ne baissent dans le temps, et négatives dans le cas contraire.

Le test de significativité appliqué au « tau » de corrélation est la mesure de probabilité (p) qui permet de rejeter l'hypothèse nulle correspondant à l'absence de tendance dans la série et de ne retenir que l'hypothèse alternative de l'existence d'une tendance. Les hypothèses alternatives dans la série temporelle sont mises en évidence dans notre cas

par la mesure de probabilité $p < 0,001$, afin de prendre en compte les changements significatifs non nuls.

$$S = \sum_{i=1}^{x-1} \sum_{j=i+1}^x \text{sign}(x_i - x_j) \quad \text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i - x_j < 0 \\ 0 & \text{if } x_i - x_j = 0 \\ -1 & \text{if } x_i - x_j > 0 \end{cases} \quad \tau = \frac{2s}{n(n-1)}$$

Où S représente la corrélation, X_i et X_j les variables observées aux temps i et j respectivement, n la longueur de la série temporelle

3.2.2.2. Les tendances d'évolution du couvert végétal

D'après la figure 72 on observe sur l'ensemble de la zone d'étude une dominance des corrélations stables qui occupent 65,08% de l'espace, suivies des corrélations négatives (Régression) avec 21,61% et des corrélations positives (Progression) qui couvrent 13,29%. La situation est différente entre l'espace lacustre où les tendances sont fortes dans les deux sens d'évolution et l'arrière-pays dominé par des tendances moins marquées et plus éparées.

En effet, l'analyse de cette carte en fonction de la proximité avec le lac montre des corrélations faibles mais significatives oscillant entre 0,05 et - 0,08 dans les eaux libres permanentes où on observe la faible régression et la stabilité de la végétation. Les îlots de végétations situés au centre des eaux libres permanentes ont une tendance régressive comprise entre -0,09 et -0,21, contrairement à ceux situés au nord qui ont une corrélation progressive au-delà de 0,20. Les rives intérieures et intermédiaires concentrent l'essentiel des tendances progressives les plus fortes, et forment un périmètre qui contourne les eaux libres permanentes depuis la frontière Tchadienne jusqu'au milieu de l'espace lacustre avec des valeurs de corrélations supérieures ou égales à 0,20. L'est de l'espace lacustre est dominé par une bande régressive avec les valeurs de corrélations négatives les plus élevées et comprises entre -0,09 et -0,79. Dans les rives extérieures la tendance est à dominance stable avec des valeurs de corrélations comprises entre 0,05 et - 0,08.

L'arrière-pays peut être divisé en trois selon les trois types d'évolution (figure 72). D'abord au nord, juste après les rives extérieures, une zone à tendance progressive avec des corrélations positives mais faibles comprises entre 0,06 et 0,19 traverse la zone d'étude de façon latitudinale. En-dessous de cette zone, le milieu de l'arrière-pays est stable avec les mêmes valeurs de corrélation que les rives extérieures. En fin, au sud de la zone d'étude les corrélations négatives sont dominantes avec des valeurs comprises entre -0,09 et -0,79.

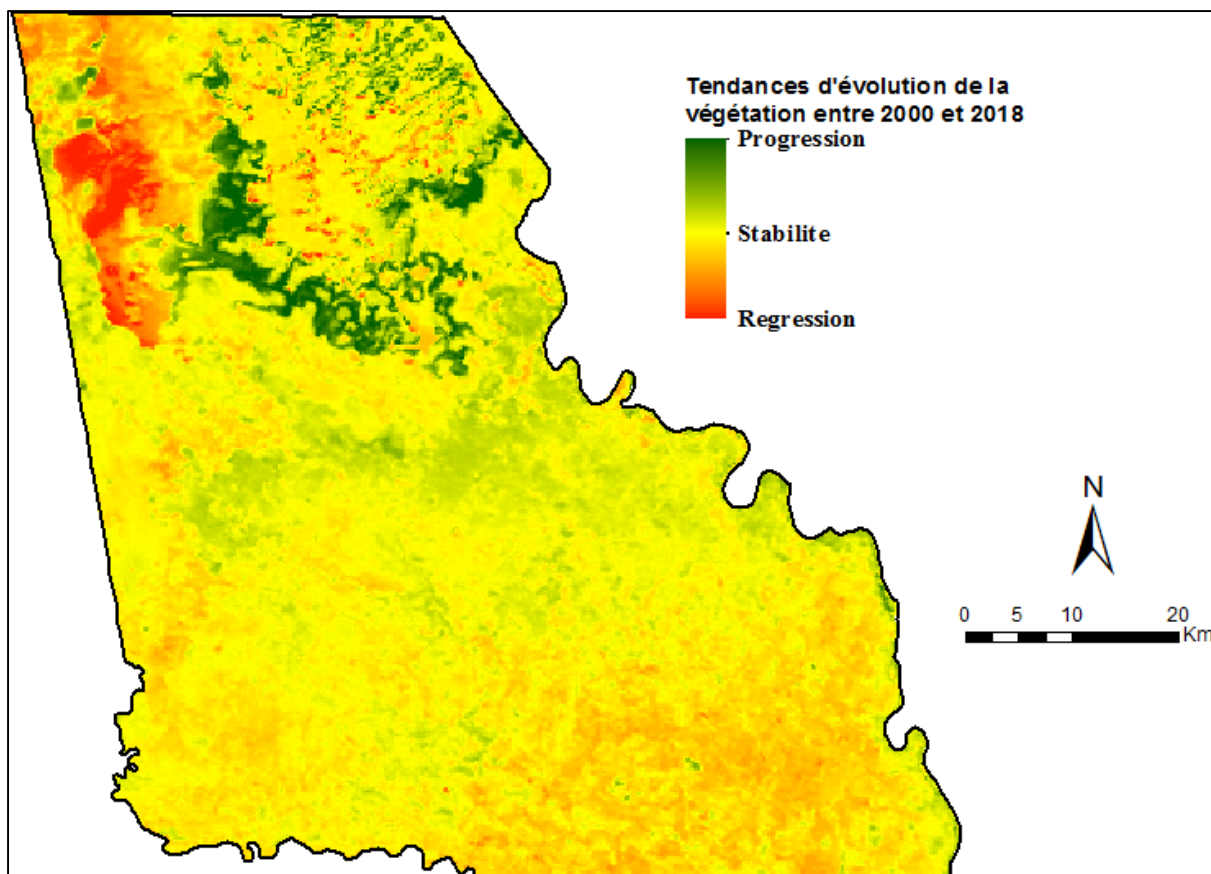


Figure 72 : Tendances d'évolution du couvert végétal entre Février 2000 et Décembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Dans la partie lacustre, les fortes tendances régressives (figure 72) représentent en réalité les classes 4 et 5 de la composante 3. Les courbes annuelles de ces dernières classes dans cette composante (figure 58) montraient déjà des allures essentiellement régressives à partir de 2002. C'est pourquoi dans la cartographie finale ces espaces apparaissent dans les eaux libres. En d'autres termes, au début de la période d'observation ces espaces (classes 4 et 5 de la composante 3) étaient recouverts de végétation qui a progressivement été remplacée par les eaux libres.

Toujours dans la partie lacustre, les fortes tendances progressives sur la figure 72 représentent quant à elles la « végétation de décrue des rives immédiates » et correspondent également aux classes 1 et 2 de la composante 3. Leur superficie est égale à 16 158,33 hectares et celle des classes 4 et 5 est de 11 264,2 hectares. Donc en réalité entre 2000 et 2018 l'amélioration des précipitations a conduit à la montée des eaux et il s'est produit un déplacement des quantités d'eau entre les espaces occupés par les fortes tendances positives vers les espaces couverts par les fortes tendances négatives. C'est la raison pour laquelle on assiste simultanément à l'augmentation et la réduction du couvert végétal dans l'espace lacustre.

A la lumière de ces observations les classes 1, 2, 4 et 5 de la composante 3 sont confortées comme marqueurs géographiques importants de la couverture végétale dans

l'espace lacustre, d'autant plus qu'elles permettent de différencier les changements temporaires, définitifs, ou saisonniers et d'observer les gains et les pertes du couvert végétal.

Dans l'arrière-pays par contre, malgré l'amélioration des précipitations rien jusqu'ici ne permet d'expliquer les tendances négatives observées. Tout comme rien n'explique pourquoi près du lac les tendances sont progressives ou stables mais deviennent régressives à mesure qu'on s'en éloigne.

Pour expliquer ces tendances dans l'arrière-pays les deux hypothèses suivantes peuvent être émises :

- Les tendances observées sont dues à d'autres facteurs naturels à l'instar du type de sols ;
- Les précipitations ne sont peut-être pas le seul paramètre climatique à considérer dans l'explication des tendances, et il faudrait aussi tenir compte des autres paramètres climatiques tels que la température, l'humidité de l'air, etc.

Par conséquent il devient nécessaire de confronter les tendances d'évolutions du couvert végétal avec les paramètres naturels (type de sols, température, l'humidité de l'air) de cet espace pour évaluer leurs influences sur l'évolution du couvert végétal dans la partie camerounaise du lac Tchad et son arrière-pays.

3.3. Influences des facteurs géographiques sur l'évolution du couvert végétal

Le but de cette démarche est d'identifier les facteurs environnementaux qui expliquent les changements détectés dans l'évolution du couvert végétal, et de définir leurs poids respectifs. Ceci sera fait en deux étapes. Une première étape au cours de laquelle les relevés climatiques sont corrélés aux valeurs d'indice de végétation et une seconde étape où l'analyse spatiale permet de superposer la carte des tendances d'évolution du couvert végétal à celles des sols et de la répartition des essences végétales (figure 73). Les méthodologies appliquées pour les analyses statistiques et spatiales sont expliquées dans le chapitre 2 (figures 44 et 45).

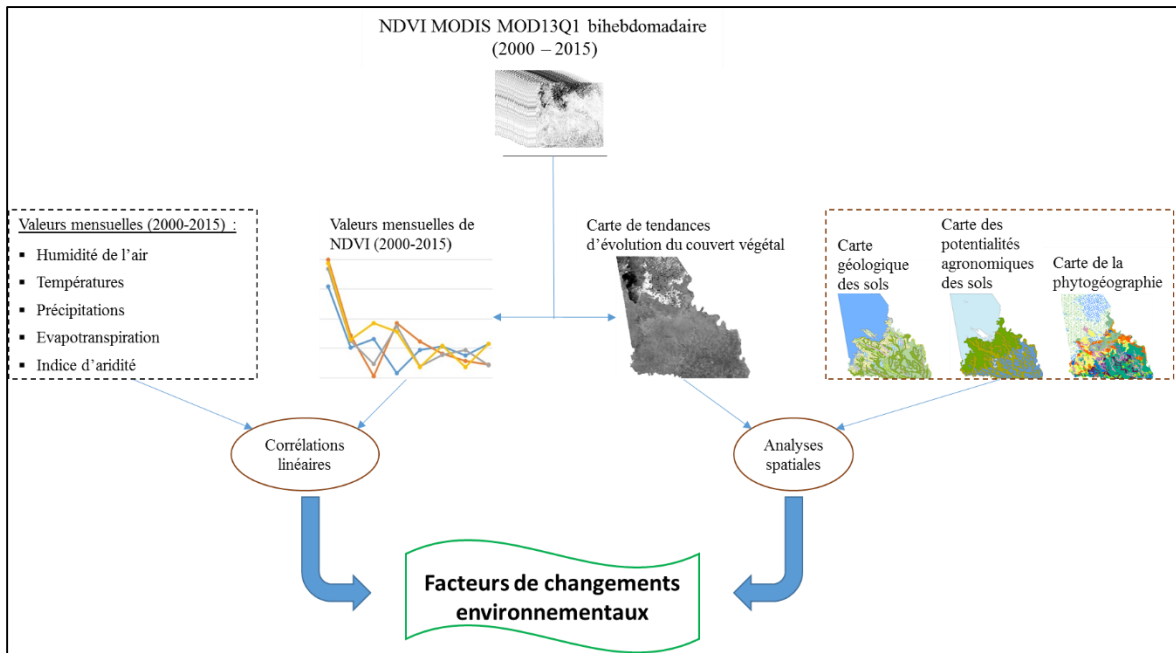


Figure 73 : Méthodes d'analyse des influences des facteurs géographiques sur l'évolution du couvert végétal. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

3.3.1. Influences des paramètres climatiques

À l'échelle du Sahel, les influences du climat sur le couvert végétal ont surtout été démontré en prenant en compte les précipitations (Boulain et al., 2006; Nicholson, 2005; Pierre et al., 2016). Nos résultats obtenus jusqu'ici montrent également l'influence des précipitations sur l'évolution du couvert végétal dans notre espace d'étude notamment à travers les variations des cycles saisonniers du couvert végétal (figure 71). Nous cherchons à présent par l'étude des relevés des données atmosphériques (précipitation, température, humidité de l'air, indice d'aridité, etc.), à identifier en dehors des précipitations, les autres paramètres climatiques influents sur la couverture végétale de notre espace d'étude.

En effet, l'amélioration à partir de 2010 de l'activité chlorophyllienne des végétations annuelles est justifiée jusqu'ici par l'amélioration des précipitations. Mais ce paramètre bien que très important en régions sahéliennes pourrait ne pas être le seul à expliquer ces changements. D'ailleurs à l'exemple de Bambara et al., (2019) la variabilité de la pluviométrie est associée à celles de l'humidité relative de l'air et de l'évapotranspiration potentielle pour analyser leur impact sur le développement du couvert végétal au Burkina Faso.

La couverture végétale est mesurée à travers les valeurs de l'indice de végétation NDVI extraites de nos images MODIS MOD13Q1 de 2000 à 2018. Ces valeurs sont corrélées à celles des paramètres climatiques de la station météorologique de N'Djamena. Le recours aux données de cette station nous permet de pallier l'absence de relevés climatiques *in*

situ de notre zone d'étude dans le cadre de cette thèse, en utilisant celles de la station météorologique la plus proche, et dont les données sont les plus régulières sur cette période. Les paramètres climatiques ici utilisés ne résultent pas d'un processus de sélection particulier. Il s'agit simplement des seuls relevés qui ont pu être accessibles (ils sont présentés dans le chapitre 2).

Concernant la temporalité des mesures, la régularité des acquisitions d'images MODIS MOD13Q1 permet de disposer d'images bihebdomadaires d'indice de végétation. D'autres part, les relevés météorologiques sont mensuelles et couvrent la période de 2000 à 2015. Par conséquent nos analyses peuvent être à la fois mensuelles et annuelles et donc capables de suivre les évolutions aux rythmes mensuels ou annuels.

Les images MODIS ne sont disponibles qu'à partir de 2000, et la période couverte par les relevés météorologiques va de 2000 à 2015. Par conséquent nos analyses ne peuvent se faire qu'entre 2000 et 2015.

Au regard de ces données, l'approche méthodologie basée sur la détermination des corrélations statistiques entre valeurs nous apparaît comme étant la plus adaptée pour atteindre notre objectif. Dans cette démarche, les valeurs de l'indice de végétation vont être utilisées comme variable indépendante et les paramètres climatiques comme variables dépendantes. Les coefficients de corrélations et de détermination sont à chaque fois calculés pour toutes les corrélations.

Les courbes mensuelles ou annuelles utilisées pour établir ces différentes corrélations ne correspondent pas à une année précise mais à la moyenne ou aux cumuls par mois ou par années de toutes les valeurs entre 2000 et 2015. Par exemple, les valeurs de températures ou de précipitations de Janvier correspondent à la moyenne de toutes les valeurs des mois de Janvier entre 2000 et 2015, et c'est pareil pour les autres mois. Les courbes annuelles correspondent aux moyennes ou aux cumuls annuels (lorsqu'il s'agit des précipitations). Par exemple la valeur de température de 2005 correspond à la moyenne de tous les mois de 2005, et la valeur de précipitation au cumul.

3.3.1.1. Les précipitations

Les diagrammes ci-dessous (figure 74) illustrent les évolutions de l'indice de végétation en fonction de celles des précipitations. Les courbes de variations saisonnières (figure 74) ont la même allure générale et sont de type monomodal. Le coefficient de corrélation est de 0,68 et le coefficient de détermination de 0,46 ce qui laisse apparaître un bon degré de corrélation entre elles. Ce résultat renforce les remarques déjà faites précédemment sur le lien entre les précipitations et le couvert végétal (voir les deux premières sections de ce chapitre).

Cependant, sur les courbes de moyennes annuelles (figure 74), cette corrélation apparaît de façon moins évidente. Entre 2000 et 2005, on observe une certaine synchronisation entre les deux courbes, mais après 2005, les allures des courbes sont

moins symétriques. Les coefficients de corrélation (0,12) et de détermination (0,014) viennent alors confirmer la faible corrélation entre ces deux paramètres aux échelles annuelles.

Les relations entre la couverture végétale, et les variations pluviométriques sont plus fortes mensuellement plus tôt qu'au niveau annuelle. Par conséquent, l'analyse de ces deux paramètres nécessite de prendre plus en considération les variations saisonnières.

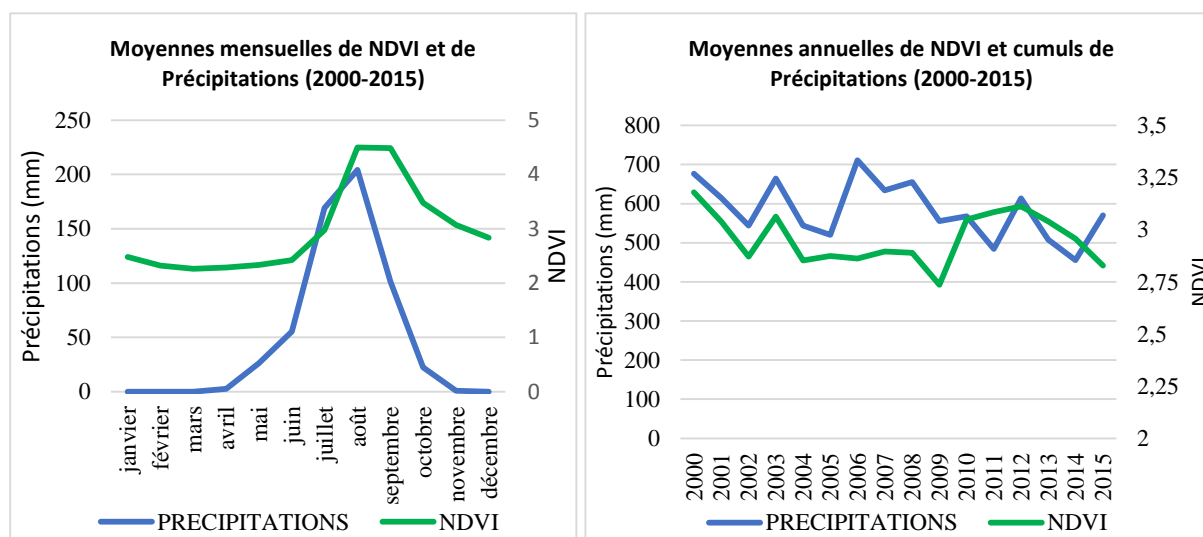


Figure 74 : Comparaison des évolutions des courbes de NDVI et de précipitations entre Janvier 2000 et Décembre 2015 : moyennes mensuelles (gauche), courbes annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Par ailleurs, en comparant les allures mensuelles des deux courbes (figure 74) on remarque que, la courbe de l'indice de végétation est décalée de celle des précipitations d'au moins un mois. En plus, alors que la courbe de précipitations forme un pic pour ses valeurs maximales (200 mm), le maximum du NDVI (4,5) s'étale sur un mois et forme un plateau. Ce décalage permet d'émettre l'hypothèse que l'influence des précipitations sur le couvert végétal s'étend au-delà d'un mois, tandis que le plateau formé par la courbe de l'indice laisse présager d'un niveau de saturation des valeurs de l'indice en fonction des valeurs des pluies. Pour scruter cette influence, nous établissons les corrélations entre les valeurs de NDVI et les valeurs de précipitations des mois précédents pour établir la durée d'influence des précipitations sur la végétation.

a. NDVI et précipitations du mois précédent

Pour tous les mois de la période 2000-2015, nous calculons les coefficients de corrélation et de détermination entre la valeur du NDVI d'un mois et la valeur des précipitations du mois précédent. Par exemple, la valeur de NDVI de Juillet 2014 est corrélée à celle des précipitations de Juin 2014. Sur tous les mois entre 2000 et 2015, le coefficient de corrélation établit est égale à 0,84 %, et le coefficient de détermination

obtenu est de 0,72. L'activité chlorophyllienne mensuelle est donc fortement et positivement corrélée aux précipitations du mois précédent (figure 75). Mieux encore, cette corrélation est plus forte qu'avec les précipitations du même mois, puisque le coefficient de corrélation est bien supérieur et le coefficient de détermination a pratiquement doublé.

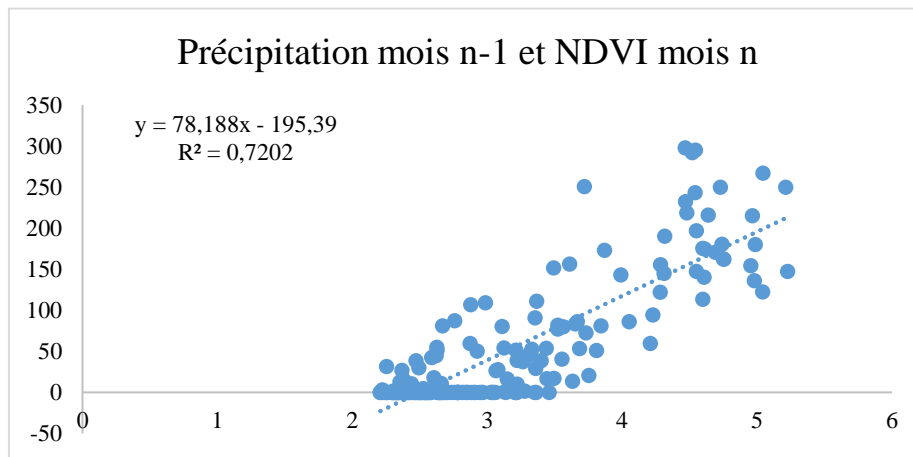


Figure 75 : Corrélation entre l'indice de végétation et la pluviométrie du mois précédent.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

b. NDVI et précipitations cumulées des deux précédents mois

Les coefficients de corrélations sont ensuite calculés entre la valeur du NDVI d'un mois et la valeur du cumul des précipitations des deux mois précédents. Cette fois les calculs sont restreints à la période entre le début des pluies c'est-à-dire le mois de Mai pour certaines années (mais qui ne correspond pas forcément au début de la saison des pluies) et la fin des pluies au mois d'Octobre (qui également ne correspond pas forcément à la fin de la saison des pluies). Nous cherchons ici à savoir si l'influence des précipitations sur l'évolution du couvert végétal peut aller au-delà d'un mois, et dans ce cas comment évolue-t-elle durant la saison des pluies. Les corrélations sont également établies pour tous les mois entre 2000 et 2015. Par exemple, la valeur de NDVI de Juillet 2014 est corrélée à celle du cumul des précipitations de Mai et Juin 2014 (figure 76).

Le coefficient de corrélation est important et positif au début de la saison des pluies entre le NDVI de Juin et les précipitations de Mai où il est égal à 0,76. Cette valeur décroît progressivement à 0,57 puis à 0,46 au milieu de la saison des pluies (tableau 19). Elle devient ensuite faible et négative (-0,08) au début de la fin de la saison des pluies, entre le NDVI de Septembre et les cumuls des précipitations de Juillet et d'Août. A la fin de la saison des pluies cette corrélation est faible mais positive entre le NDVI d'Octobre et les cumuls des précipitations d'Août et de Septembre (0,17).

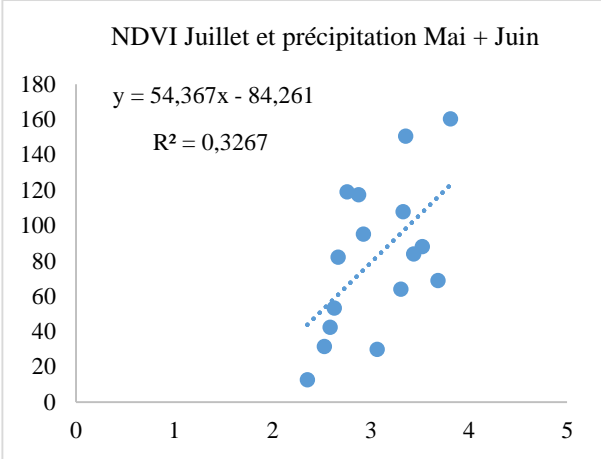
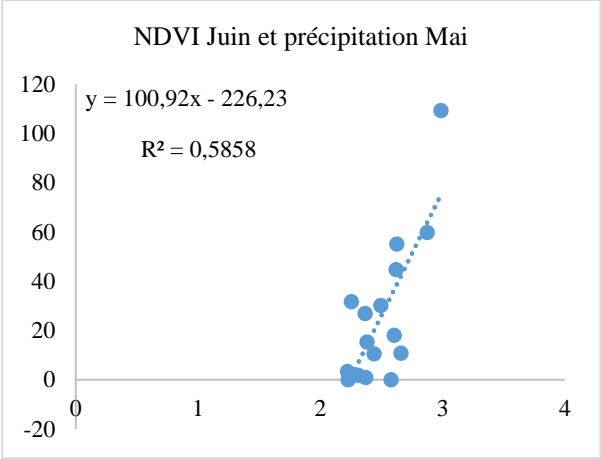
Cette évolution de l'indice de corrélation montre que lors de la phase de croissance du couvert végétal, pendant les trois premiers mois de saison des pluies, toutes

augmentations de précipitation impactent positivement sur la couverture végétale. Dès que le pic de croissance des végétaux est atteint en Août, l'augmentation des précipitations n'améliore pas la croissance des végétaux vu que le maximum est atteint, mais permet plutôt de maintenir ce maximum longtemps (environ un mois). C'est ce qui explique le plateau observé entre Août et Septembre sur la courbe mensuelle de NDVI.

L'augmentation des précipitations ne s'accompagnant plus alors de celle de la végétation, le coefficient de corrélation entre le NDVI de Septembre et le cumul des précipitations de Juillet et Août, devient faible et négatif. A partir du mois de Septembre, la senescence est entamée, les valeurs de précipitations commencent également à chuter c'est pourquoi nous observons une corrélation faible mais positive entre le NDVI d'Octobre et le cumul de précipitation d'Août et de Septembre.

Tableau 19. Corrélations entre l'eindice de végétation et les cumuls de précipitations.

	Précipitation Mai		Précipitation Mai + Juin		Précipitation Juin + Juillet		Précipitation Juillet + Août		Précipitation Août + Septembre		
	CC	R ²	CC	R ²	CC	R ²	CC	R ²	CC	R ²	
Ndvi Juin	0,76	0,58	Ndvi Juillet	0,57	0,32	Ndvi Août	0,46	0,21	Ndvi Septembre	-0,08	0,007
									Ndvi Octobre	0,17	0,03



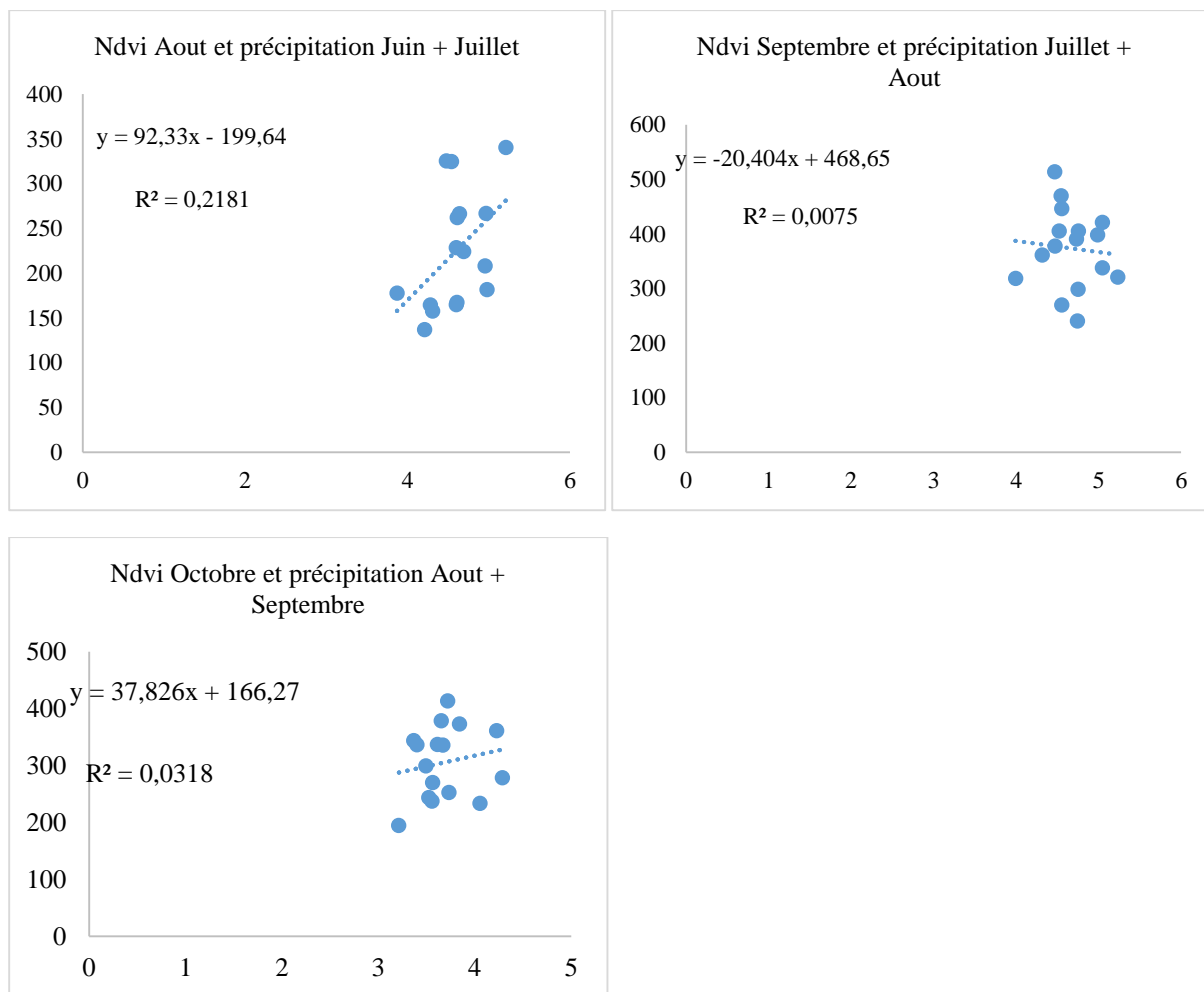


Figure 76 : Corrélations entre l'indice de végétation et le cumul pluviométrique des mois précédents. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

3.3.1.2. Les températures

Les courbes de variations mensuelles des températures indiquent que la région connaît un régime bimodal qui distingue pour des températures supérieures à 30 °C, deux périodes de chaleurs observées entre Mars et Juin et en Octobre. Ce cycle saisonnier est différent de celui du couvert végétal et en raison de cette différence, le coefficient de corrélation est faible et négatif soit -0,3, et celui de détermination est encore plus faible soit 0,09. Les températures sont donc faiblement et négativement corrélées à l'évolution du couvert végétal.

En réalité le couvert végétal de notre espace d'étude est essentiellement dominé par la végétation annuelle (excepté dans l'espace lacustre où les marécages sont présents) qui est totalement dépendante des précipitations. La fin de la saison des pluies s'accompagne par l'amenuisement du couvert végétal annuel, et donc lorsque la saison sèche s'installe (marquée par de fortes températures) le couvert végétal est fortement réduit. C'est

pourquoi les fortes valeurs de températures correspondent aux faibles valeurs de NDVI et vice versa (figure 77).

Les coefficients pour les valeurs annuelles sont de -0,4 pour le coefficient de corrélation et 0,1 pour le coefficient de détermination, et confirment la faible corrélation entre ces deux paramètres.

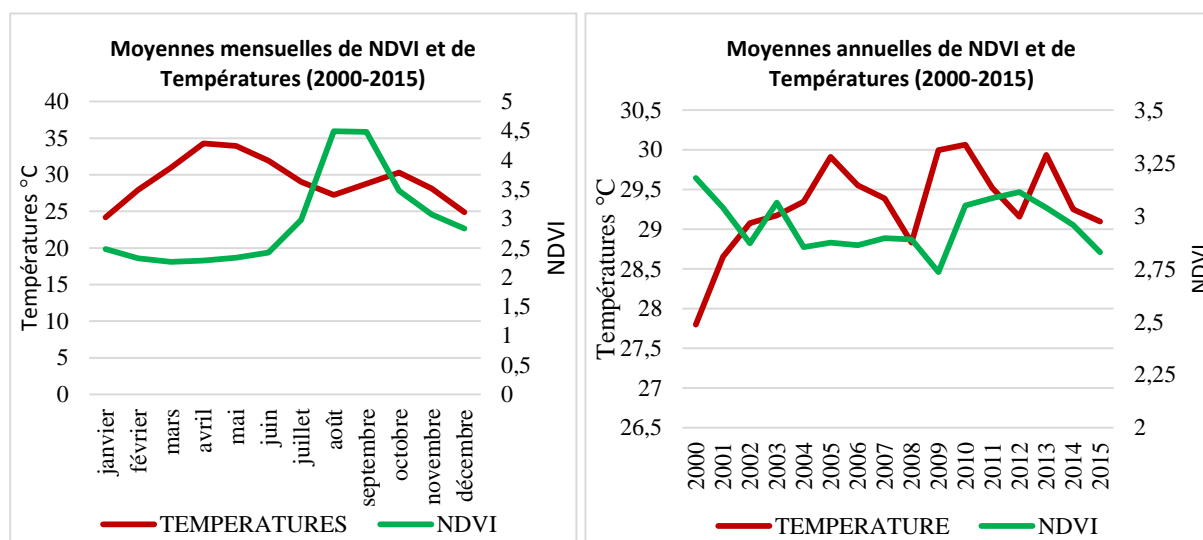


Figure 77 : Comparaison des évolutions des courbes de NDVI et de températures : moyennes mensuelles (gauche), courbes annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

3.3.1.3. L'indice d'aridité

Les conditions climatiques sont exprimées par l'indice d'aridité de De Martonne. Les valeurs mensuelles obtenues entre 2000 et 2015 sur l'ensemble de notre zone d'étude sont comprises entre 10 et 20 (figure 78). Selon la classification de De Martonne, le climat de notre zone d'étude est de type « semi-aride ».

Les coefficients obtenus pour les évolutions moyennes mensuelles correspondent à 0,69 pour le coefficient de corrélation et à 0,48 pour le coefficient de détermination. Les courbes de l'indice d'aridité et celle de l'indice de végétation sont monomodales pour les évolutions moyennes mensuelles (figure 78). L'indice étant calculé à partir des valeurs de températures et de précipitations, ceci montre que la prise en compte des températures combinées aux précipitations, est plus significative pour le suivi de la végétation, que l'utilisation exclusive des températures. Selon sa formule (chapitre 2), cet indice est nul si les précipitations sont nulles, et ses valeurs dépendent plus des précipitations que des températures. C'est pourquoi sa courbe mensuelle monomodale correspond à la saison pluvieuse et explique les corrélations obtenues.

Par contre pour les valeurs annuelles, les coefficients sont faibles soit 0,16 et 0,02 respectivement pour le coefficient de corrélation et de détermination. Ceci s'explique par le fait que les valeurs annuelles de l'indice d'aridité sont calculées en cumulant les précipitations et en prenant la température moyenne annuelle. Pourtant les températures ont un cycle bimodal contrairement aux précipitations qui sont monomodales. En plus, les valeurs de l'indice d'aridité sont nulles en saison sèche en raison de l'absence de pluies durant cette période. Pourtant, l'activité végétative n'est pas nulle pendant la saison sèche grâce à la présence de la végétation lacustre et de la végétation pérenne dans l'arrière-pays.

Ces résultats révèlent une fois de plus les faibles correspondances entre les valeurs annuelles.

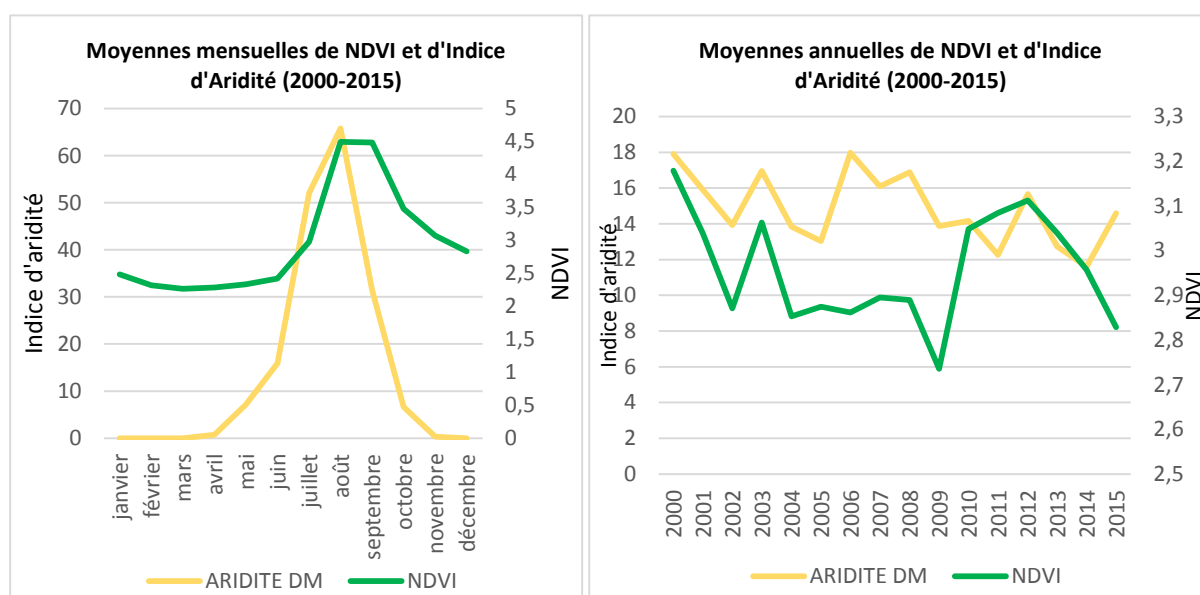


Figure 78 : Comparaison des évolutions des courbes de NDVI et de l'indice d'aridité : moyennes mensuelles (gauche), courbes annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

3.3.1.4. L'évapotranspiration

L'évapotranspiration (ET) est la vapeur d'eau produite résultant de la transpiration par les végétaux et de l'évaporation à partir des surfaces d'eau libre, et du sol. Cette production est maximale pendant la période sèche, lorsque les températures sont élevées. Lorsque les précipitations deviennent faibles pour supporter la production de cette vapeur d'eau, le déficit est comblé par ponction dans l'eau de la réserve utile du sol. C'est pourquoi on observe à partir des courbes mensuelles que les pics de l'ETP se produisent pendant les périodes sèches, alors que les maximums de végétations sont atteints en période pluvieuses. Les deux courbes mensuelles sont pourtant mono modales (figure

79), mais cette différence d'évolution aboutit à des faibles valeurs de corrélation (-0,09) et de détermination (0,009).

Les faibles valeurs pour les coefficients annuels soit 0,3 pour le coefficient de corrélation et 0,09 pour le coefficient de détermination, confirment ces observations. Il est par conséquent difficile de conclure à une corrélation autant au niveau mensuel qu'annuel, entre l'évolution de la couverture végétale et l'évapotranspiration potentielle.

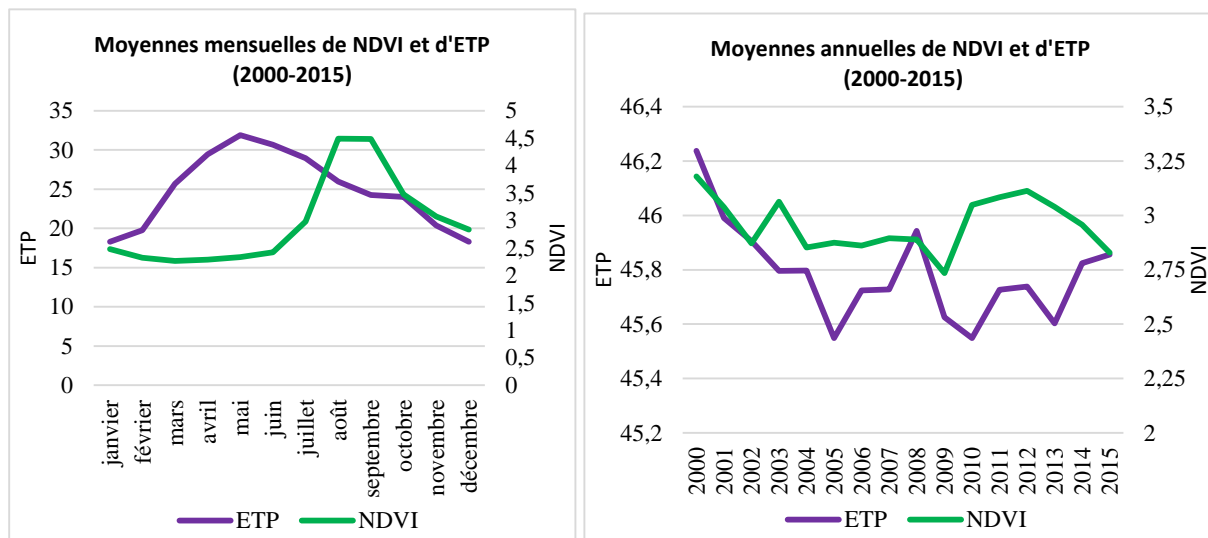


Figure 79 : Comparaison des évolutions des courbes de NDVI et de l'évapotranspiration : moyennes mensuelles (gauche), courbes annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

3.3.1.5. L'humidité de l'air

Pour les valeurs mensuelles, les coefficients de corrélation et de détermination entre l'humidité de l'air et le couvert végétal sont respectivement de 0,79 et de 0,63 (figure 80). Ces deux paramètres sont donc fortement et positivement corrélés.

En effet, pour une température donnée, l'humidité relative représente le degré de saturation de l'air en quantité d'eau. En région sahélienne, les quantités d'eau dans l'atmosphère sont maximales pendant les saisons de pluies c'est pourquoi les deux courbes mensuelles sont monomodales, et les valeurs maximales sont observées au cours des mêmes périodes. L'humidité de l'air commence à s'améliorer dès le mois d'Avril, le pic est atteint en Août au même moment que celui de la végétation et l'assèchement de l'air se produit pendant la phase de senescence de la végétation au mois de Septembre.

Pour les valeurs annuelles, les coefficients de corrélation et de détermination sont quasiment nuls et aucune corrélation n'est observée entre ces deux paramètres (figure 80). C'est la preuve une fois de plus que les analyses des valeurs annuelles ne sont pas aussi pertinentes que les celles des valeurs mensuelles.

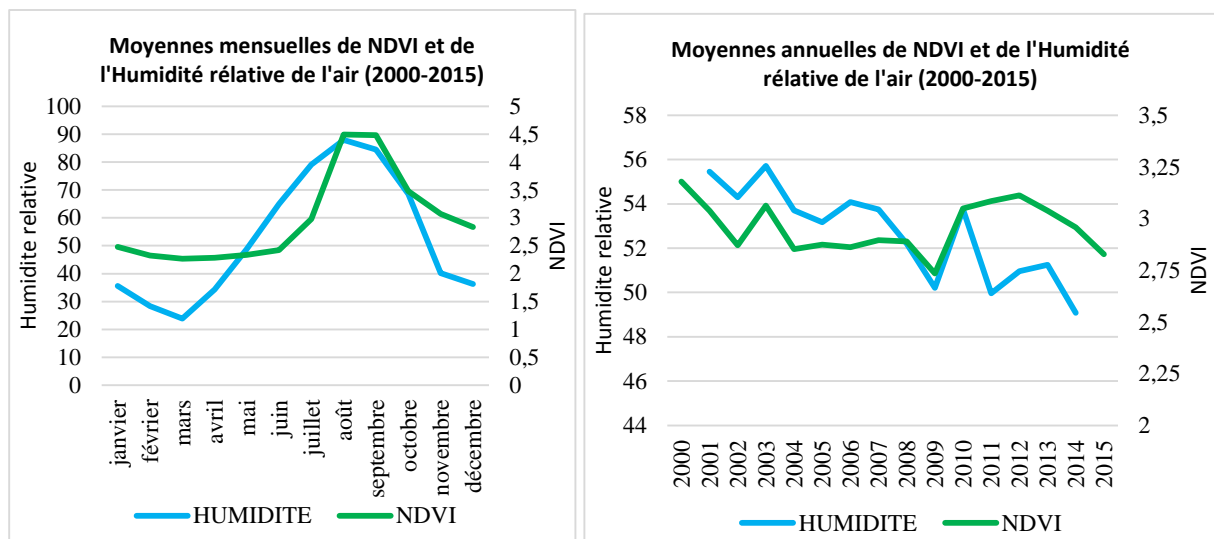


Figure 80 : Comparaison des évolutions des courbes de NDVI et de l'humidité de l'air : moyennes mensuelles (gauche), courbes annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

3.3.1.6. Synthèse de l'influence des paramètres climatiques

L'étude des corrélations entre les variations de la couverture végétale et les variations des éléments climatiques montre que les évolutions mensuelles de ces paramètres sont plus pertinentes à étudier que les évolutions annuelles. En effet, les valeurs mensuelles dressent le profil des variabilités des éléments du climat en fonction des changements des saisons dans l'année, alors que les valeurs annuelles sont surtout des bilans sur douze mois (cumul, moyenne). Si le cycle des saisons reste le même d'une année à l'autre bien que des différences puissent être enregistrées (retard des pluies, excès de chaleurs, forte pluviosité, etc.), les disparités interannuelles des éléments du climat peuvent en revanche être très importantes (le cumul de précipitation est de 711 mm en 2006 contre 455 en 2014 ; la température moyenne annuelle est de 27,8°C en 2001 contre 30°C en 2010). C'est la raison pour laquelle les corrélations les plus significatives sont obtenues avec les valeurs mensuelles.

Cette analyse vient également confirmer les observations relatives à l'importance forte des précipitations pour la végétation dans notre zone d'étude. En effet, les précipitations ont les corrélations positives (0,68) parmi les plus élevées avec l'indice de végétation (MODIS MOD13Q1 de 2000 à 2015). La pluviométrie du mois n-1 avec un coefficient de corrélation de 0,84 est d'ailleurs plus importante pour la couverture végétale du mois n, que la pluviométrie du mois n dont le coefficient est de 0,68. Cette influence décalée concerne également le mois n-2 qui garde un niveau de corrélation significatif (entre 0,46 et 0,57) avec l'état de la végétation du mois n.

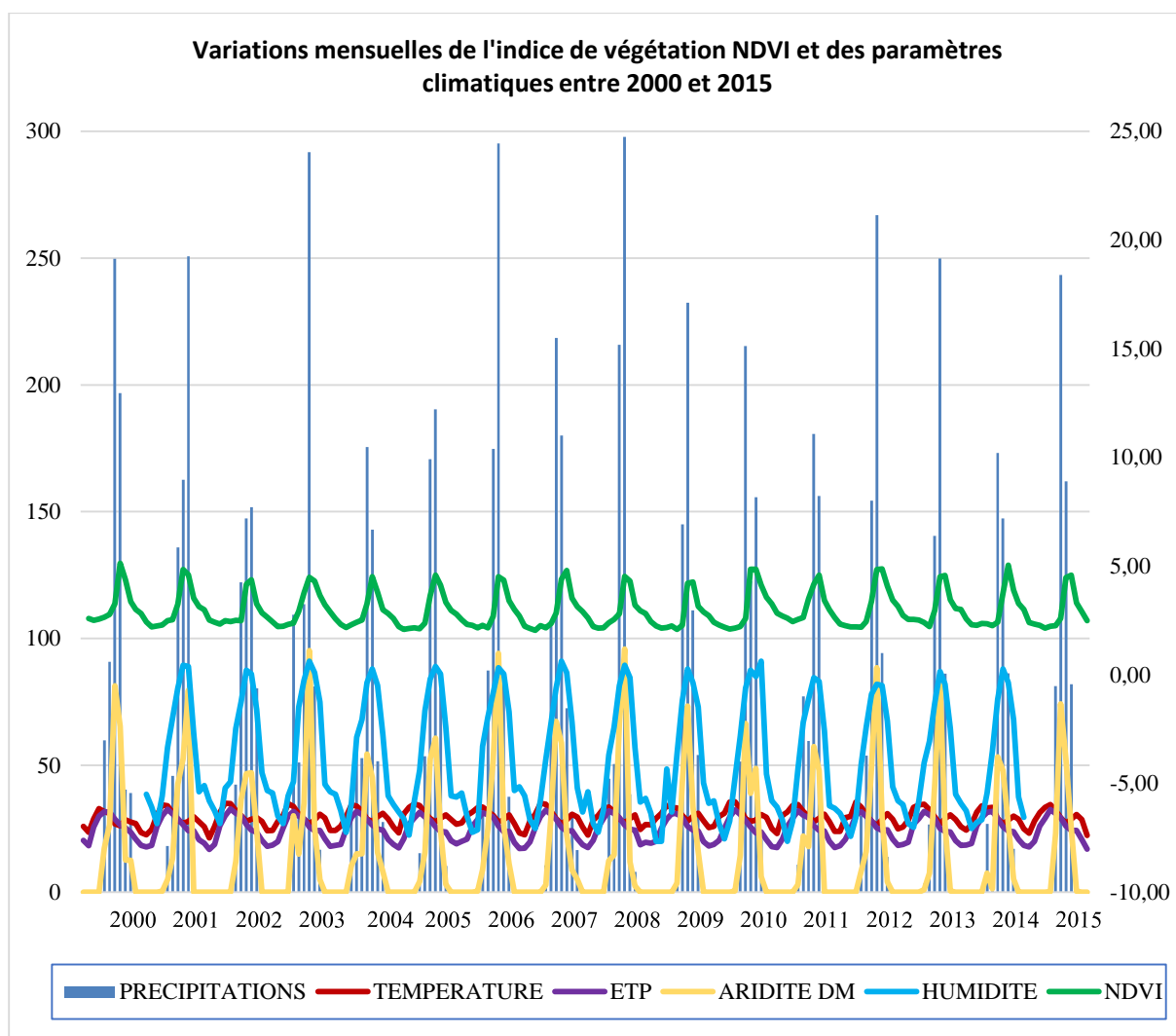


Figure 81 : Variations mensuelles de l'indice de végétation NDVI et des paramètres climatiques entre 2000 et 2015. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

L'indice de végétation est également fortement corrélé à l'indice d'aridité (0,69) et à l'humidité relative de l'air (0,79) dont les cycles mensuels tracent des profils de formes monomodales semblables aux variations mensuelles de l'activité végétative, avec des maxima enregistrés au milieu de la saison des pluies. L'évapotranspiration potentielle et la température du sol en revanche, évoluent différemment du couvert végétal. Les valeurs les plus importantes de l'évapotranspiration potentielle sont enregistrées en saison sèche au moment où l'activité chlorophyllienne se réduit. C'est pareil pour la température qui par ailleurs, présente un cycle bimodal. Pour ces raisons, les évolutions mensuelles de ces paramètres sont faiblement corrélées à la variabilité mensuelle du couvert végétal.

Les valeurs utilisées pour calculer les corrélations correspondent aux valeurs moyennes (de NDVI, de températures, de précipitations, etc.) sur l'ensemble de la zone d'étude. Par conséquent, les corrélations obtenues expliquent les influences des

paramètres climatiques sur l'évolution générale de la couverture végétale dans la zone d'étude.

Pour analyser les tendances du couvert végétal entre la zone lacustre et l'arrière-pays le recours aux analyses spatiales est indispensable. Cette approche va permettre d'expliquer les différentes tendances observées en fonction du type de sols et de la répartition des essences végétales présentes.

3.3.2. Influences des sols et de la répartition des essences végétales

Les cartes utilisées pour analyser ces influences sont celles de la géomorphologie des sols, des potentialités agronomiques et modes d'utilisation des sols, et celle de la phytogéographie (Seignobos et Iyébi-Mandjek, 2000). Ce sont les seules cartes de facteurs géographiques auxquelles nous avons pu accéder dans le cadre de cette thèse. Néanmoins grâce à l'étendue des espaces qu'elles couvrent, ces cartes sont parfaitement adaptées à l'identification des facteurs géographiques influents dans l'évolution du couvert végétal dans notre espace d'étude.

Elles sont toutes intégrées dans un SIG et superposées par analyses spatiales (voir figure 45 chapitre 2) à celles des tendances d'évolution de la végétation obtenue par corrélation de Man-Kendall sur la série temporelle d'image satellites MODIS MOD13Q1 (de 2000 à 2018). Ce traitement fait appel au concept d'analyse cartographique et permet d'obtenir pour chaque unité spatiale (formations géologiques, groupements végétaux, etc.), une description quantifiée de l'évolution de la végétation.

La carte de corrélation de Man-Kendall est pour le besoin reclassifiée en 5 thèmes reprenant les tendances d'évolutions majeurs de la couverture végétale (figure 82). Les 5 thèmes obtenus par reclassification automatique selon l'algorithme des écarts types sont :

- « Régression importante » pour les espaces où la diminution du couvert végétal est très forte ;
- « Régression » pour les zones où la végétation diminue mais de manière moins forte ;
- « Stabilité » désigne les espaces où la couverture végétale reste plus ou moins constante ;
- « Augmentation » pour désigner là où cette couverture augmente ;
- « Augmentation importante » pour les milieux où la progression de la végétation est très significative.

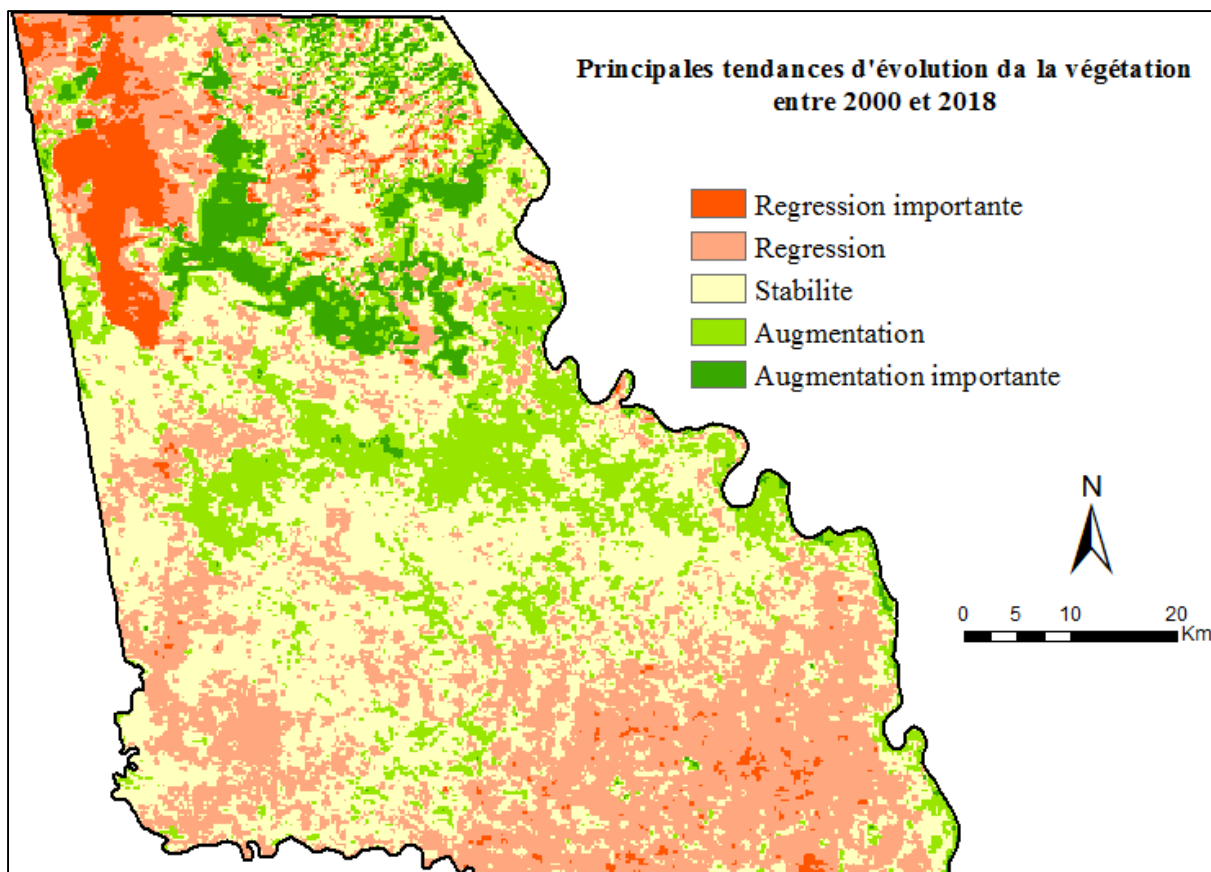


Figure 82 : Les cinq principales classes de tendances d'évolution du couvert végétal dans l'espace lacustre camerounais du lac Tchad et son arrière-pays entre Février 2000 et Décembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

3.3.2.1. La géomorphologie des sols

La carte de la géomorphologie des sols renseigne sur l'hétérogénéité importante des conditions et des types de sol de notre zone, en caractérisant la nature et l'origine des matériaux originels, la dimension des particules en surface, les valeurs de pentes, la profondeur des sols, etc. Elle nous sert à cet effet à présenter les différents éléments constitutifs du relief observables dans le paysage, en fonction de leur topographie et de leur structure, et fournit un inventaire complet des données d'observation du relief et celles utiles à sa description (Seignobos et Iyébi-Mandjek, 2000).

Notre objectif est de déterminer les relations spatiales éventuelles entre la morphologie du paysage et la spatialisation des tendances d'évolution de la végétation. Nous partirons de l'hypothèse que les sols selon leur morphologie offrent un certain nombre de conditions édaphiques favorables ou non au développement du couvert végétal et influencent donc à long terme leur disponibilité.

Les résultats sont illustrés en fonctions des unités géomorphologiques tel que présentées par les auteurs de la carte (la nomenclature des unités notamment).

Pour la présentation des résultats, les taux et les superficies des tendances d'évolution du couvert végétal sont d'abord présentés pour chaque unité géomorphologique. C'est au terme de cette présentation qu'une interprétation générale est faite sur l'influence de la géomorphologie des sols dans l'évolution du couvert végétal.

La figure 83 ci-dessous sert juste à rappeler la disposition de la géomorphologie des sols elle est décrite en détails dans le chapitre 1.

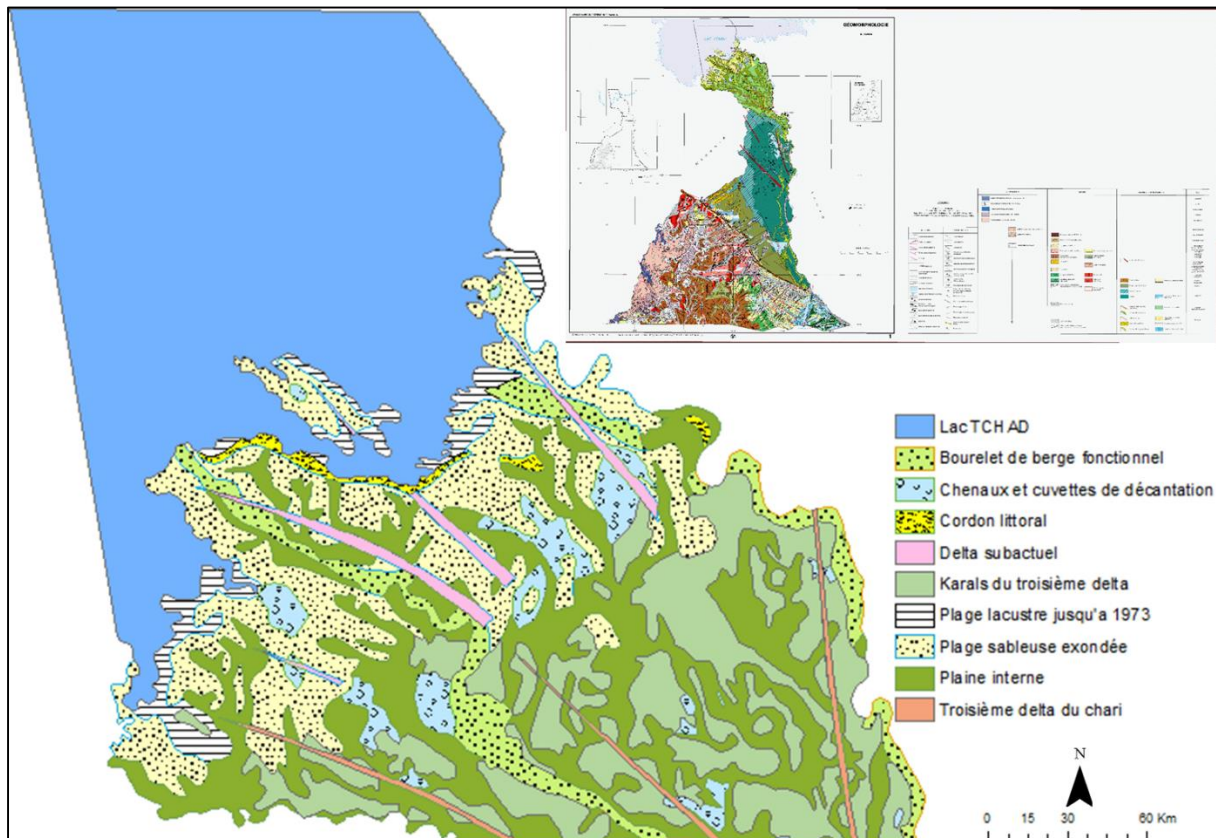


Figure 83 : Géomorphologie des sols de l'arrière-pays camerounais du lac Tchad. (Source : adapté de Morin, 2000, in Seignobos, et Mandjeck 2000. Atlas de la Province Extrême-Nord Cameroun, 2000).

a. Chenaux et cuvettes de décantation (figure 83)

Ce sont des sols hydromorphes temporairement gorgés d'eau et qui sont constitués en mosaïque de plaines sableuses, de faible pente. Ces sols légers et très profonds avec pour matériau originel l'argile fin, sont de texture soit sablo-argileuse, soit argileuse, ou sableuse. La capacité d'échange en surface est moyenne et le bilan hydrique est équilibré. Cette unité géomorphologique située au milieu des terres émergées, occupe une superficie totale de 14720,21 hectares. Dans ce totale, la tendance d'évolution du couvert végétal est dominée par la « Stabilité » avec 57,56 % soit 8473,65 hectares. La tendance à l'« Augmentation » vient ensuite avec 24,68 % correspondant à 3633,09 hectares, suivie de la « Régression » qui couvre 2597,36 hectares (soit 17,64 %) (figure 84). La

« Régression importante » avec 0,07 % (10,73 hectares), et l'« Augmentation importante » avec à 0,03 % (5,36 hectares), complètent l'évolution de la végétation au sein de cette unité.

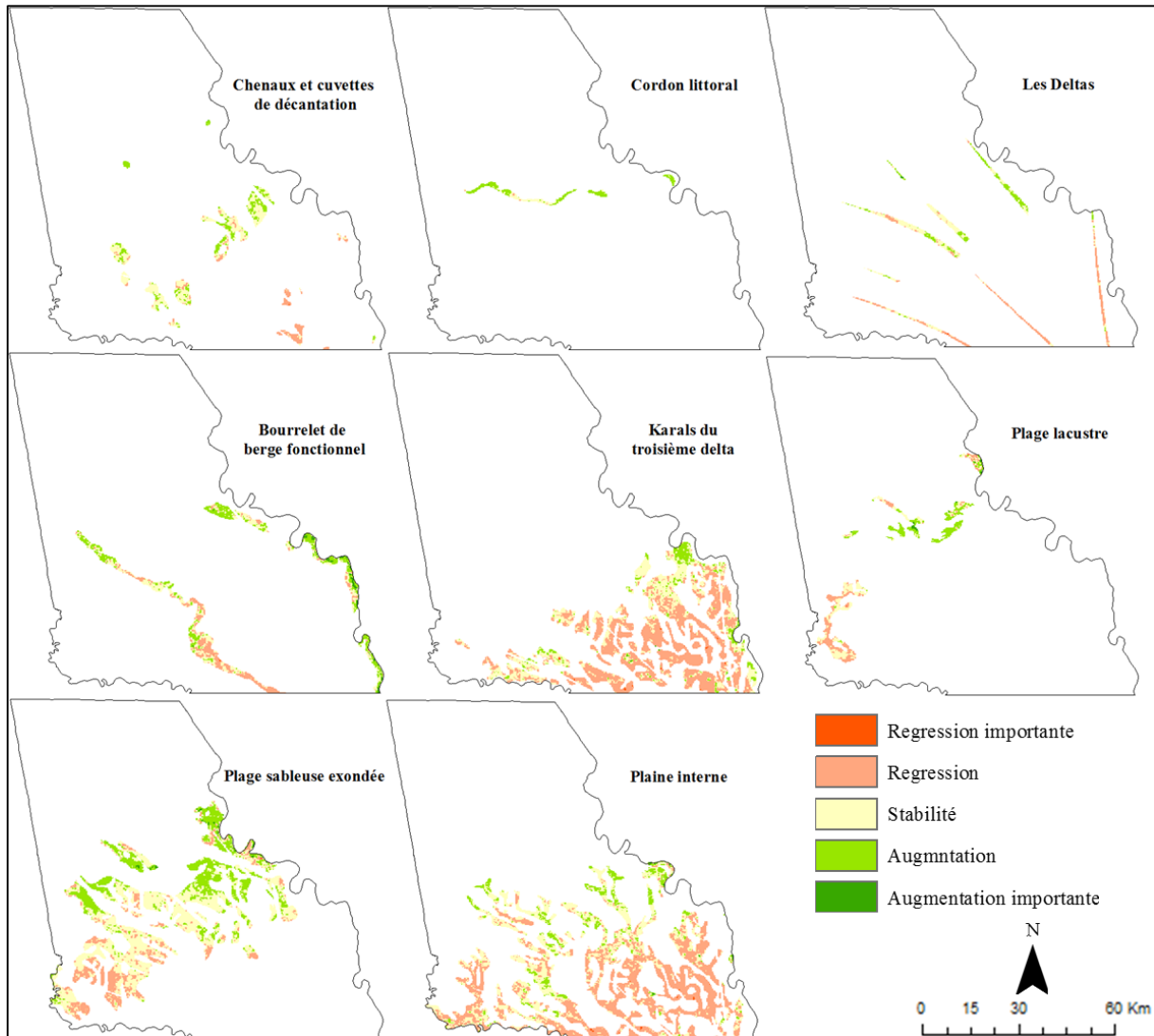


Figure 84 : Principales tendances d'évolution du couvert végétal dans : les deltas ; le cordon littoral ; et les chenaux et cuvettes de décantation. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

b. Le cordon littoral (figure 83)

C'est une dune exondée constituée de sable fin d'apport éolien, qui longe les rives extérieures du lac Tchad. Elle est bien drainée, plate et très profonde et sa capacité d'échange en surface est faible. Sa texture sableuse l'expose aux risques de dégradation éoliens et les pentes sont comprises entre 3 et 15 %. Cette unité géomorphologique de superficie totale égale à 3080,35 hectares, est dominée par la classe « Augmentation » qui l'occupe à raison de 64,63 % soit 1990,95 hectares, suivi de la « Stabilité » qui correspond à 33,27 % (1024,99 hectares), ensuite de la « Régression » qui couvre 1,74 % (53,66

hectares), et en fin de l'« Augmentation importante » avec 0,34 % (10,73 hectares) (figure 84).

c. Les Deltas (figure 83)

Ce sont des formations, alluviales qui s'abaissent en altitude jusqu'au lac Tchad et correspondent à des remblais fluvio-deltaïques. Ils représentent l'exondation visible d'une série de delta qui n'est aujourd'hui que partiellement fonctionnelle, où le Chari canalise une partie de ses eaux (Seignobos et Iyébi-Mandjek, 2000). Dans notre zone d'étude, cette unité n'occupe que 10405,57 hectares. L'évolution du couvert végétal est dominée par la « Stabilité » qui occupe 44,92 % de cet espace soit 4674,19 hectares. La « Régression » suit avec 33,88 % (3525,76 hectares) ; l'« Augmentation » correspond à 20,78 % (2162,68 hectares) ; l'« Augmentation importante » est égale à 0,25 % (26,83 hectares) ; et la « Régression importante » occupe 0,15 % (16,09 hectares) (figure 84).

d. Bourrelet de berge fonctionnel (figure 83)

C'est une mosaïque constituée de bourrelet de berge fonctionnel formé sur alluvions et situé dans les lits majeurs des cours d'eau qui longent l'arrière-pays. Les matériaux originels sont soit le sable ou le limon et leur texture est donc sableuse à sablo-limoneuse. Ce sont des sols profonds peu évolués, particulièrement dénudées, de couleur gris clair en général. Ils sont presque plats avec une pente moyenne variant entre 1 et 4 %, et en raison de leur extrême compacité, l'eau ruisselle beaucoup plus qu'elle ne s'infiltré. Ils occupent à l'échelle de la zone d'étude 21186,81 hectares (figure 84). La « Stabilité » est la tendance dominante avec 8140,93 hectares (38,42 %). L'« Augmentation » est répartie sur 6928,1 hectares (32,7 %). La « Régression » couvre 5393,29 hectares (25,45 %). L'« Augmentation importante » fait 703 hectares (3,31 %), et la « Régression importante » occupe 21,46 hectares (0,1 %).

e. Karals du troisième delta (figure 83)

Ce sont des vertisols hydromorphes lourds et très profonds, neutres et de natures subalcalin carbonatées. Leur texture est argileuse ou sablo-argileuse, et repose sur un matériau originel fait d'argile fluvatile et fluvio-lacustre. Ils sont très plats en surface et leur pente moyenne est faible et inférieure à 3%. En raison de leur forte teneur en argile, leur aspect physique est étroitement lié à la quantité d'eau qu'ils contiennent. Ils sont essentiellement présents dans le sud de la zone d'étude sur une surface totale égale à 65068,41 hectares (figure 84). Ce total est réparti en 58,39 % (soit 37994,58 hectares) pour la classe de « Régression » ; 34,28 % (soit 22308,4 hectares) pour la « Stabilité » ; 6,94 % (soit 4518,56 hectares) pour la classe « Augmentation » ; 0,27 % (soit 177,09 hectares) pour la « Régression importante » ; et 0,1 % (soit 69,76 hectares) pour l'« Augmentation importante ».

f. Plage lacustre (figure 83)

Les plages lacustres apparaissent sous la forme de mosaïques de plages de sables fins hydromorphes et halomorphes colmatés par des argiles gonflantes (figure 83). Leurs sols sont lourds, très profonds et de texture très argileuse. Ils sont généralement très plats, de faible pente et saisonnièrement inondés. Présente aux marges de la partie lacustre (figure 84), cette unité géomorphologique correspond à 11983,32 hectares. La « Régression importante » occupe 0,17 % (21,46 hectares) ; la « Régression » couvre 29,55 % (3541,86 hectares) ; la « Stabilité » correspond à 39,36 % (4717,12 hectares) ; l'« Augmentation » domine 29,06 % (3482,83 hectares) et l'« Augmentation importante » est égale à 1,83 % (220,02 hectares).

g. Plage sableuse exondée (figure 83)

C'est un ensemble de plusieurs plaines sableuses que l'on retrouve en bordure du lac Tchad. Elles sont plates en surface, très profondes, avec une pente très faible régulièrement inférieure à 1%. Leur texture sableuse est justifiée par le matériau originel qui est le sable fin d'apport alluvial. Ils sont très profonds, mal drainés avec un faciès de surface de type calcique, et sont par endroit très compacts. Cette unité géomorphologique couvre un espace égal à 68046,79 hectare et dominé par la « Stabilité » des surfaces végétales qui correspond à 54,68 % (37211,08 hectares) (figure 84). La classe « Augmentation » occupe 26,61 % (soit 18111,82 hectares) ; la classe « Régression » couvre 18,03 % (soit 12273,1 hectares) ; l'« Augmentation importante » recouvre 0,64 % (soit 440,05 hectares) ; et la « Régression importante » complète avec 0,01 % (soit 10,73 hectares).

h. Plaine interne (figure 83)

C'est une mosaïque de plusieurs plaines internes du delta ancien du Logone formées sur socle granitique, et qui sont présentes sur l'ensemble de l'arrière-pays depuis les rives externes du lac. Ils sont également profonds, peu évolués, très dénudés et de couleur gris clair comme les bourrelets de berge. Ils sont pratiquement plats avec des pentes moyennes comprises entre 1 et 4 %. Les matériaux originels sont soit le sable ou le limon et leur texture est donc sableuse à sablo-limoneuse. Sur ces sols très compacts, l'eau ruisselle beaucoup plus qu'elle ne s'infiltré. Cette formation occupe une superficie de 86067,39 hectares (figure 84). La « Régression importante » occupe 0,2 % (177,09 hectares) ; la « Régression » couvre 51,44 % (44278,71 hectares) ; la « Stabilité » correspond à 38,94 % (33518,95 hectares) ; l'« Augmentation » domine 9,19 % (7910,17 hectares) et l'« Augmentation importante » est égale à 0,21 % (182,45 hectares).

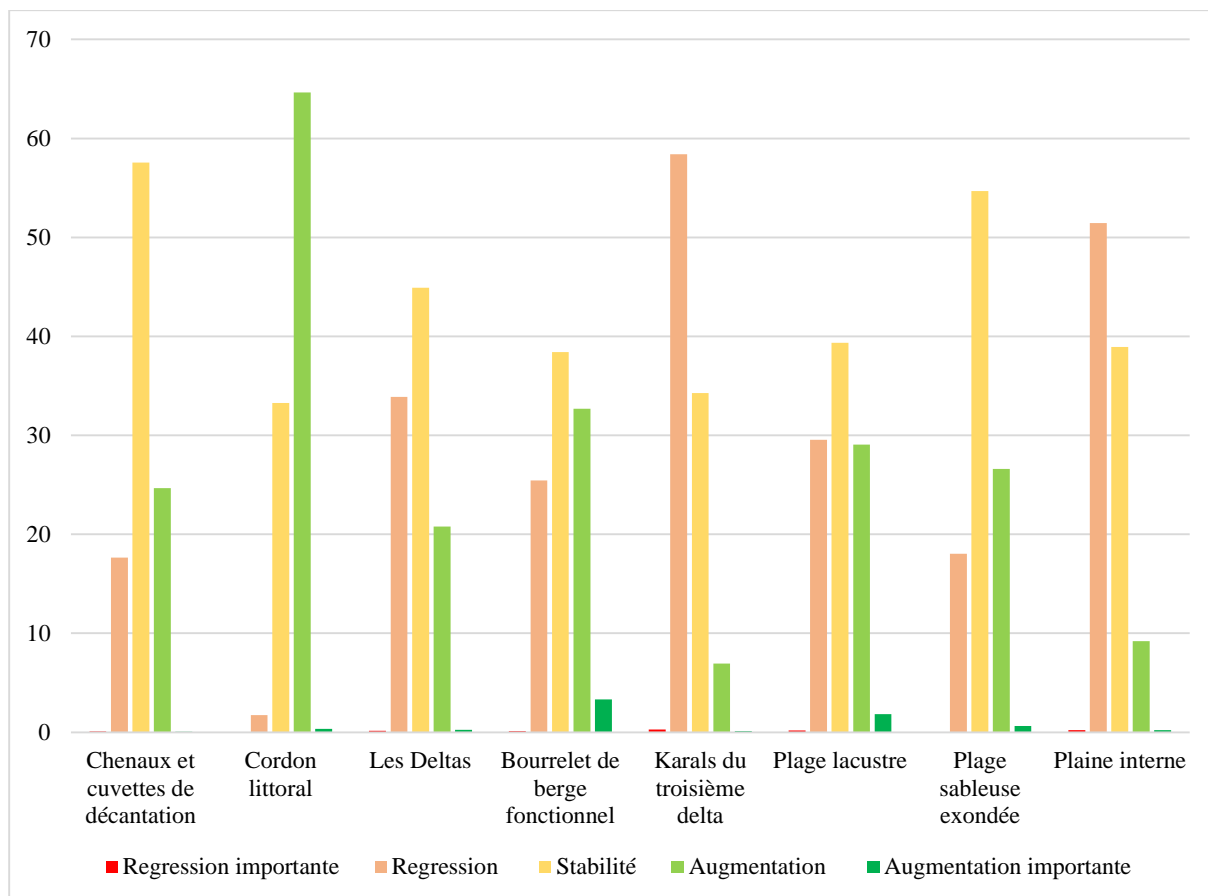


Figure 85 : Superficies des classes d'évolution du couvert végétal en fonction des formations géologiques. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

A l'échelle de l'unité géomorphologique la « Stabilité » est la tendance qui semble dominer avec un taux d'évolution qui atteint régulièrement les 40% de superficie (à l'exemple des chenaux et cuvettes de décantation 57,56 %, des deltas 44,92 %, des plages sableuses exondées 54,68 %), excepté pour le cordon littoral, le karal du troisième delta et les plaines internes (figure 85). Mais les analyses détaillées permettent de percevoir les véritables tendances pour ces unités.

Le cumul des deux classes d'augmentation de la végétation donne des meilleurs taux dans les plages lacustres et les plages sableuses exondées (30%), les bourrelets de berge fonctionnels (35%), et dans le cordon littoral (65 %) (figure 85). Ceci s'explique par le fait que ce sont des formations sableuses (cordon littoral, plages sableuses exondées) et hydromorphes (plages lacustres) qui jonchent les rives du lac ou longent les cours d'eau dans l'arrière-pays et bénéficient par conséquent d'une meilleure infiltration des eaux. Dans les plages lacustres par exemple présentes en bordure du lac, la capacité d'échange en surface est élevée et le bilan hydrologique est excédentaire voire très excédentaire (Seignobos et Iyébi-Mandjek, 2000). Par ailleurs, ces formations sont pour la plupart plates et leurs faibles pentes favorisent les infiltrations des eaux. Toutefois, les bourrelets de berge fonctionnels et les plages sableuses exondées sont par endroit très compacts ce

qui explique pourquoi au sud de ces deux formations la « Régression » de la végétation est importante.

La diminution de la végétation est par contre très marquée dans le karal du troisième delta et dans les plaines internes, où le cumul des deux classes de régression correspond environ à 60 % et à 52 % respectivement (figure 85). Dans les plaines internes cette tendance est expliquée par le fait que ces sols soient peu évolués, et laissent apercevoir par endroit des affleurements rocheux. Ils sont également caractérisés par leur compacité qui réduit leur capacité d'échange en surface et ne permet pas l'infiltration des eaux. Le fait qu'ils soient particulièrement dénudés conduit à l'assèchement rapide des horizons humidifiés.

En revanche, les karals du troisième delta sont des formations hydromorphes tout comme les plages lacustres, et de texture argileuse ou sablo-argileuse également. Ce qui leur donne la capacité de retenir l'eau dans leurs horizons supérieurs (cette capacité de rétention d'eau est d'ailleurs mise à profit pour prolonger la période de culture après le départ des pluies), et leur capacité d'échange en surface est très élevée, pourtant la « Régression » de la végétation dans cette formation est à près de 60 %. L'une des raisons qui peut expliquer cette évolution est le fait que cette unité géomorphologique (aussi bien que les plaines internes) est située loin du lac et très peu traversée par les cours d'eau qui serpentent l'arrière-pays. Par conséquent en plus d'être compacts (plaines internes) et donc de ne pas favoriser l'infiltration des eaux, les quantités d'eau faibles dans ces unités constituent un facteur limitant pour l'amélioration de la couverture végétale.

Les formations géomorphologiques sableuses, sablo-limoneuses et argileuses à proximité des eaux favorisent l'amélioration de la couverture végétale, au contraire des formations sablo-limoneuses et argileuses éloignées de ces eaux. Les différences dans les caractéristiques telles que les capacités d'échanges, la compacité, le taux d'infiltration, etc. ne sont pourtant pas si différentes. Par conséquent, la géomorphologie des sols à elle seule ne permet pas d'expliquer totalement les tendances de végétation observées dans l'arrière-pays. Par contre leurs caractéristiques (capacités d'échanges, compacité, taux d'infiltration, etc.) dépendent entre autres du type de végétation présent et pour cette raison la répartition des espèces végétales est à prendre en compte.

3.3.2.2. La phytogéographie

La carte de la phytogéographie à laquelle nous avons recours ici (figure 86), informe sur la répartition des essences végétales dans notre zone d'étude. Elle renseigne également sur les conditions du milieu dans lesquelles les différentes essences végétales inventoriées se développent (Seignobos et Iyébi-Mandjek, 2000).

Dans le cadre de cette recherche, la carte de la phytogéographie va nous permettre d'identifier les espèces végétales présentes et de percevoir leur dominance spatiale.

A travers la prise en compte de la répartition des espèces végétales renseignée par cette carte, notre objectif est d'analyser les tendances d'évolution de la végétation en fonction des groupements végétaux et des associations des groupements végétaux. La question qui sous-tend cette analyse est celle de déterminer le lien potentiellement existant entre les différentes tendances d'évolution du couvert végétal mis en évidence et la répartition des peuplements végétaux en présence.

Les nomenclatures des groupements et des associations de groupement végétaux est calquée à celle utilisée par les auteurs de la carte et nous faisons l'effort de déformer le moins possible les noms utilisés pour désigner les différents groupes de végétaux.

Les résultats sont illustrés en fonctions des groupements végétaux tel que présentés par les auteurs de la carte (la nomenclature des groupements notamment).

Pour la présentation des résultats, les taux et les superficies des tendances d'évolution du couvert végétal sont d'abord présentés pour chaque groupement. C'est au terme de cette présentation qu'une interprétation générale est faite sur l'influence de la phytogéographie dans l'évolution du couvert végétal.

La figure 86 ci-dessous sert juste à rappeler la disposition de la phytogéographie elle est décrite en détails dans le chapitre 1.

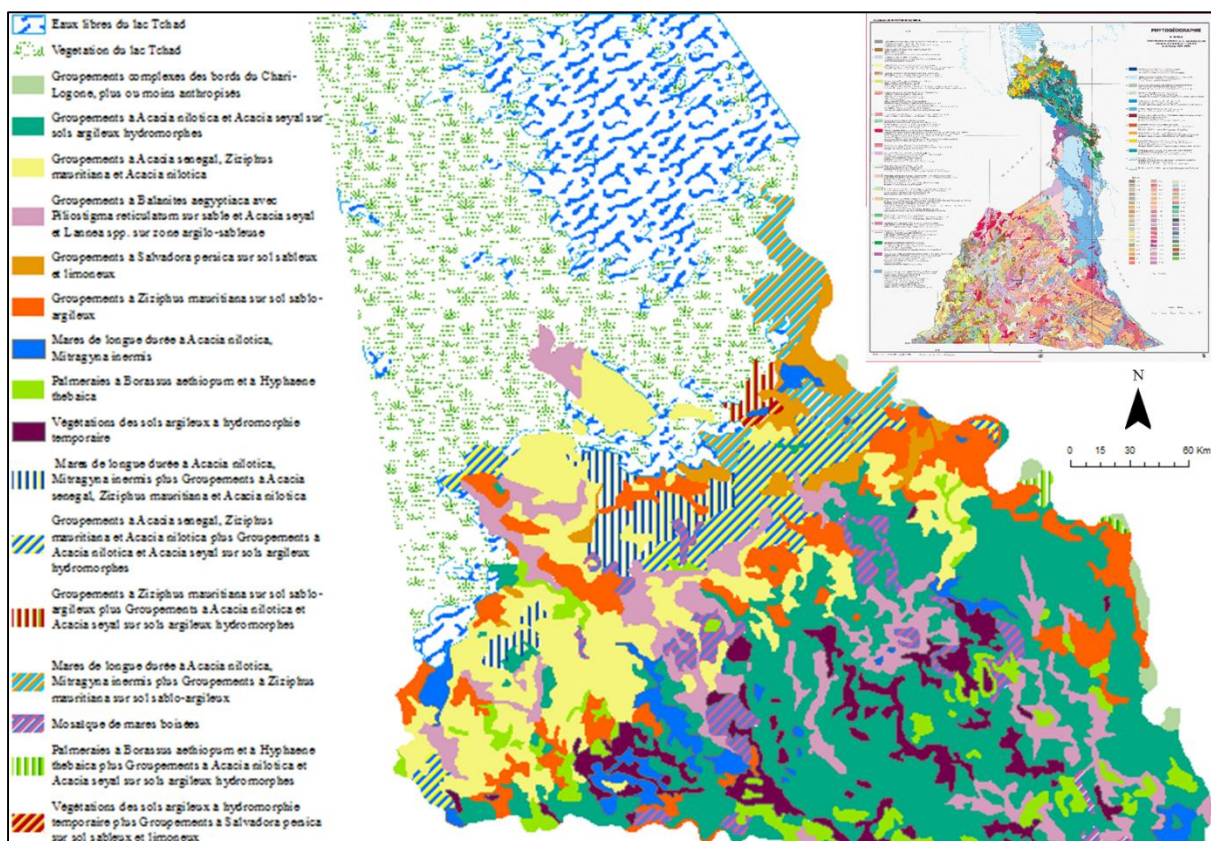


Figure 86 : Répartition des essences végétales sur le territoire d'étude en 1998. (Source : adapté de Seignobos, 1998, in Seignobos, et Mandjeck 2000. Atlas de la Province Extrême-Nord Cameroun, 2000).

a. Eaux libres du lac Tchad

Essentiellement dominée par les espèces d'eaux douces dans les eaux libres, cette classe occupe une superficie de 62208,08 hectares (figure 86).

- Espèce en présence : Pistia stratiotes, Ceratophyllum demersum et Nymphaea spp
- Tendance d'évolution de la végétation (figure 87)

La couverture végétale est marquée par la « Stabilité » à 36,79 % (22887,98 hectares). La « Régression » occupe également une superficie majeure avec 24,68 % (15353,46 hectares). L'« Augmentation » occupe 18 % (11199,81 hectares), l'« Augmentation importante » est égale à 15,43 % (9600,6 hectares) ; et la « Régression importante » occupe 5,08 % (3166,21 hectares).

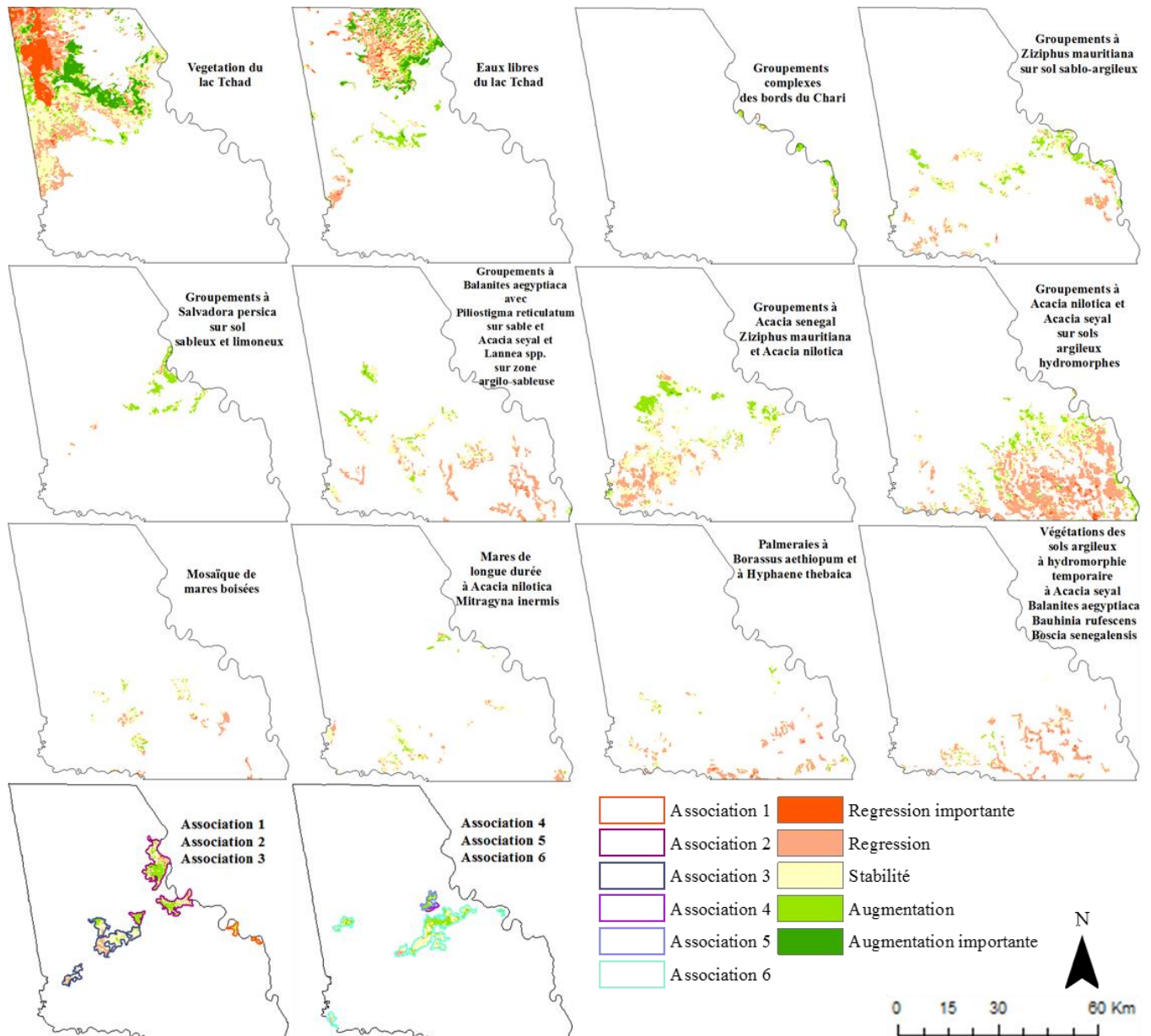


Figure 87 : Principales tendances d'évolution du couvert végétal dans l'espace lacustre camerounais du lac Tchad en fonction de la répartition des espèces végétales.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

b. Végétations du lac Tchad

Régulièrement représentée comme marécages, la végétation du lac Tchad est présente aux rives des eaux libres et sa composition est fonction variations des niveaux d'eau du lac. Elle couvre un espace égal à 123638,02 hectares (figure 86).

- Espèce en présence :

- En bordure : *Polygonum senegalense*, *Mimosa pigra*, *Aeschynomene elaphroxylon*
- Herbacées : *Cyperus maculatus*, *Vossia cuspidata*

- Sur les îlots : *Phragmites australis*, *Typha domingensis*, *Cyperus papyrus*

- Tendence d'évolution de la végétation (figure 87)

La « Régression importante » occupe 13,9 % (17199,52 hectares) ; la « Régression » couvre 25,9 % (32096,83 hectares) ; la « Stabilité » correspond à 36,2 % (44799,26 hectares) ; l'« Augmentation » domine 11,37 % (14065,5 hectares) et l'« Augmentation importante » est égale à 12,51 % (15476,89 hectares).

c. Groupements complexes des bords du Chari-Logone, plus ou moins anthropisés

Ce sont des espaces sur sols sablo-argileux présents sur les bourrelets en bordures du Chari-Logone qui occupent une superficie égale à 3745,79 hectares (figure 86).

- Espèce en présence :

- Ligneux : *Mitragyna inermis*, *Combretum glutinosum*, *Borassus aethiopum*
- Herbacées : *Andropogon gayanus*, *Panicum anabaptistum*, *Hyparrhenia rufa*

- Tendence d'évolution de la végétation (figure 87)

L'« Augmentation » domine avec 47,27 % (1770,93 hectares), suivit de la « Stabilité » qui correspond à 27,07 % (1014,26 hectares), ensuite la « Régression » qui couvre 14,61 % (547,38 hectares), l'« Augmentation importante » qui est égale à 10,31 % (386,386 hectares), et enfin la « Régression importante » qui occupe 0,71 % (26,83 hectares).

d. Groupements à *Ziziphus mauritiana* sur sol sablo-argileux

Présents en bordures des yaérés et dans les terres exondées sablo-argileux notamment. Ils couvrent un espace dont la dimension correspond à 29016,48 hectares (figure 86).

- Espèce en présence :

- Ligneux : *Acacia seyal*, *Acacia nilotica*, *Cordia sinensis*, *Boscia senegalensis*, *Cadaba farinosa*
- Herbacées : *Aristida adscensionis*, *Brachiaria ramosa*, *Chloris pilosa*

- Tendence d'évolution de la végétation (figure 87)

La « Régression importante » occupe 0,2 % (59,03 hectares) ; la « Régression » couvre 26,57 % (7711,61 hectares) ; la « Stabilité » correspond à 48,52 % (14081,6 hectares) ; l'« Augmentation » domine 23,82 % (6912,01 hectares) et l'« Augmentation importante » est égale à 0,86 % (252,224 hectares).

e. Groupements à *Salvadora persica* sur sol sableux et limoneux

Ils sont présents à l'ouest du delta du Chari près de la ville de Blangwa. Leur étendue spatiale est estimée à 8318,02 hectares (figure 86).

- Espèce en présence :

- Ligneux : *Cordia sinensis*, *Boscia senegalensis*, *Cadaba farinosa*, *Capparis* spp.
- Herbacées : *Aristida adscensionis*, *Brachiaria xantholeuca*, *Aristida mutabilis*

- Tendances d'évolution de la végétation (figure 87)

L'« Augmentation » est dominante sur 56,25 % (4679,56 hectares) et la « Stabilité » occupe ensuite 32,38 % (2693,97 hectares). Pour le reste, la « Régression » couvre 9,87 % (821,069 hectares) ; l'« Augmentation importante » est égale à 1,29 % (107,32 hectares) et la « Régression importante » occupe 0,19 % (16,09 hectares).

f. Groupements à *Balanites aegyptiaca* avec *Piliostigma reticulatum* sur sable et *Acacia seyal* et *Lannea* spp. sur zone argilo-sableuse

C'est l'un des groupements les plus densément répandu, et présent à la fois près de l'espace lacustre et dans l'arrière-pays lointain. L'espace occupé est égale à 30266,87 hectares (figure 86).

- Espèce en présence :

- Ligneux : *Bauhinia rufescens*, *Ziziphus mauritiana*, *Tamarindus indica*
- Faciès dégradé : *Boscia senegalensis* et *Calotropis procera*
- Herbacées : *Chloris priurii*, *Chloris pilosa*, *Leptadenia hastata*

- Tendances d'évolution de la végétation (figure 87)

La « Régression » est dominante avec 44,04 % (13330,3 hectares) et surtout présente au sud de l'arrière-pays. La « Stabilité » correspond à 41,47 % (12552,2 hectares) et s'observe à mesure que l'on se rapproche du lac. L'« Augmentation » avec 13,24 % (4008,75 hectares) domine près du lac. La « Régression importante » occupe 1,04 % (316,622 hectares) et l'« Augmentation importante » est égale à 0,19 % (59,03 hectares).

g. Groupements à *Acacia senegal*, *Ziziphus mauritiana* et *Acacia nilotica*

Ils sont présents sur les sols argilo sableux situés dans les terres exondées qui jouxtent les rives extérieures du lac Tchad. Leur superficie est égale à 45727,66 hectares (figure 86).

- Espèce en présence :

- Ligneux: *Balanites aegyptiaca*, *Cadaba farinosa*, *Boscia senegalensis*, *Faidherbia albida*, *Calotropis procera*

- Herbacées : *Brachiaria xantholeuca*, *Aristida adscensionis*, *Panicum laetum*, *Chloris* spp.

- Tendance d'évolution de la végétation (figure 87)

L'évolution de la couverture végétale est Stable à 54,41 % (24884,3 hectares). La tendance qui domine ensuite est la « Régression » avec 25,43 % (11629,1 hectares), suivit de l'« Augmentation » pour 19,93 % (9117,63 hectares) et l'« Augmentation importante » avec 0,21 % (96,59 hectares).

h. Groupements à *Acacia nilotica* et *Acacia seyal* sur sols argileux hydromorphes

C'est également l'un des groupements les plus dominants de l'arrière-pays en termes de superficie puisqu'il couvre un total de 85772,23 hectares (figure 86). Les terres dans cet espace sont dominées par les « yaérés » qui sont des sols de type hydromorphe.

- Espèce en présence :

- Ligneux : *Balanites aegyptiaca*, *Mitragyna inermis*, *Acacia sieberana*
- Herbacées : *Echinochloa colonum*, *Panicum laetum*, *Brachiaria lata*

- Tendance d'évolution de la végétation (figure 87)

La « Régression » est fortement présente et couvre 52,90 % de cet espace soit 45378,8 hectares. Après, c'est la « Stabilité » qui est importante avec à 35,76 % (30680,1 hectares). L'« Augmentation » domine ensuite sur 9,27 % soit 7953,1 hectares, la « Régression importante » occupe 1,76 % (1513,34 hectares), et l'« Augmentation importante » est égale à 0,28 % (246,85 hectares).

i. Mosaique de mares boisées

Elles sont répandues sur les substrats hydromorphes situés dans l'arrière-pays. Leur superficie totale est estimée à 10040,65 hectares (figure 86).

- Espèce en présence :

- *Acacia nilotica*, *Mitragyna inermis* et groupements à *Balanites aegyptiaca* et *Ziziphus mauritiana*

- Tendance d'évolution de la végétation (figure 87)

La « Régression importante » occupe 1,12 % (112,69 hectares) ; la « Régression » couvre 33,99 % (3413,07 hectares) ; la « Stabilité » correspond à 54,89 % (5511,36 hectares) et l'« Augmentation » domine 9,99 % (1003,53 hectares).

j. Mares de longue durée à *Acacia nilotica*, *Mitragyna inermis*

Elles sont présentes dans les anciens lits du Chari ou situées le long des cours d'eau permanents ou semi permanents. Leur superficie cumulée est de 9740,13 hectares (figure 86).

- Espèce en présence :

- Ligneux : *Crateva andansonii*, *Acacia polyacantha*
- Herbacées : *Echinochloa stagnina*, *Oryza barthii*, *Acroceras amplexans*, *Ipomoea aquatica*

- Tendence d'évolution de la végétation (figure 87)

La « Régression importante » occupe 0,22 % (21,46 hectares) ; la « Régression » couvre 25,01 % (2436,38 hectares) ; la « Stabilité » correspond à 60,22 % (5865,55 hectares) ; l'« Augmentation » domine 14,43 % (1406,01 hectares) et l'« Augmentation importante » est égale à 0,11 % (10,73 hectares).

k. Palmeraies à *Borassus aethiopum* et à *Hyphaene thebaica*

Elles sont présentes dans l'arrière-pays sur les bourrelets de berges des cours d'eau ou de mares. Leur surface à l'échelle de la zone d'étude est équivalente à 12927,81 hectares (figure 86).

- Espèce en présence :

- Ligneux : *Ziziphus mauritiana*, *Faidherbia albida*, *Acacia sieberana*, *Celtis integrifolia*
- Herbacées : *Hyperthelia dissoluta*, *Andropogon Gayanus*, *Andropogon pseudapricus*

- Tendence d'évolution de la végétation (figure 87)

La tendance dominante est à la « Régression » avec 57,53 % (7437,92 hectares). La « Stabilité » correspond ensuite à 32,62 % (4218,04 hectares). L'« Augmentation » domine sur 7,22 % (933,76 hectares) et la « Régression importante » occupe 2,61 % (338,08 hectares).

l. Végétations des sols argileux à hydromorphie temporaire à *Acacia seyal*, *Balanites aegyptiaca*, *Bauhinia rufescens*, *Boscia senegalensis*

Ils sont principalement présents en bordure des cours d'eaux où les sols argileux sont temporairement hydromorphes. Ils couvrent un espace égale à 17038,53 hectares.

- Espèce en présence :

- Autres Ligneux : *Tamarindus indica*
- Herbacées : *Panicum laetum*, *Eragrostis pilosa*, *Sporobolus capensis*

- Tendance d'évolution de la végétation

La « Régression importante » occupe 2,11 % (359,55 hectares) ; la « Régression » couvre 66,07 % (11258,84 hectares) ; la « Stabilité » correspond à 28,28 % (4819,08 hectares) et l'« Augmentation » domine 3,52 % (601,04 hectares).

m. Association entre Palmeraies à *Borassus aethiopum* et à *Hyphaene thebaica* plus Groupements à *Acacia nilotica* et *Acacia seyal* sur sols argileux hydromorphes

Cette association est référencée sur la figure 87 comme « Association 1 ». Elle est présente sur les berges du Chari et occupe un espace qui vaut 912,29 hectares.

- Espèce en présence :

- Ligneux : *Balanites aegyptiaca*, *Mitragyna inermis*, *Acacia sieberana*, *Ziziphus mauritiana*, *Faidherbia albida*, *Acacia sieberana*, *Celtis integrifolia*
- Herbacées : *Echinochloa colonum*, *Panicum laetum*, *Brachiaria lata*, *Hyperthelia dissoluta*, *Andropogon Gayanus*, *Andropogon pseudapricus*

- Tendance d'évolution de la végétation

La « Régression » couvre 4,7 % (42,93 hectares) ; la « Stabilité » correspond à 35,29 % (321,98 hectares) ; l'« Augmentation » domine 54,11 % (493,71 hectares) et l'« Augmentation importante » est égale à 5,88 % (53,66 hectares).

n. Association entre Mares de longue durée à *Acacia nilotica*, *Mitragyna inermis* plus Groupements à *Ziziphus mauritiana* sur sol sablo-argileux

Dénommée « association 2 » dans la figure 87, et proche du delta du Chari et des rives extérieures du lac, elle occupe une superficie de 11178,35 hectares.

- Espèce en présence :

- Ligneux : *Crateva andansonii*, *Acacia polyacantha*, *Acacia seyal*, *Acacia nilotica*, *Cordia sinensis*, *Boscia senegalensis*, *Cadaba farinosa*
- Herbacées : *Echinochloa stagnina*, *Oryza barthii*, *Acroceras amplexans*, *Ipomoea aquatica*, *Aristida adscensionis*, *Brachiaria ramosa*, *Chloris pilosa*

- Tendance d'évolution de la végétation

La « Régression importante » occupe 0,76 % (85,86 hectares) ; la « Régression » couvre 10,75 % (1202,08 hectares) ; la « Stabilité » correspond à 36,34 % (4062,41 hectares) ; l'« Augmentation » domine 49,2 % (5500,62 hectares) et l'« Augmentation importante » est égale à 2,92 % (327,35 hectares).

o. Association entre mares de longue durée à *Acacia nilotica*, *Mitragyna inermis* plus Groupements à *Acacia senegal*, *Ziziphus mauritiana* et *Acacia nilotica*

Nous l'appelons « Association 3 » dans la figure 87. Elle est située sur le prolongement de l'association précédente, en longeant les rives extérieures du lac et occupe un espace qui correspond à 8704,40 hectares.

- Espèce en présence :

- Ligneux : *Crateva andansonii*, *Acacia polyacantha*, *Balanites aegyptiaca*, *Cadaba farinosa*, *Boscia senegalensis*, *Faidherbia albida*, *Calotropis procera*
- Herbacées : *Echinochloa stagnina*, *Oryza barthii*, *Acroceras amplexans*, *Ipomoea aquatica*, *Brachiaria xantholeuca*, *Aristida adscensionis*, *Panicum laetum*, *Chloris* spp.

- Tendance d'évolution de la végétation

La « Régression » couvre 19,35 % (1685,07 hectares) ; la « Stabilité » correspond à 70,16 % (6107,03 hectares) et l'« Augmentation » domine 10,48 % (912,29 hectares).

Association de Végétations des sols argileux à hydromorphie temporaire à *Acacia seyal*, *Balanites aegyptiaca*, *Bauhinia rufescens*, *Boscia senegalensis* plus Groupements à *Salvadora persica* sur sol sableux et limoneux

C'est qui est rebaptisée « Association 4 » sur la figure 87 ci-dessus. C'est la plus petite de tous les groupes de végétaux inventoriés avec une superficie de 359,55 hectares.

- Espèce en présence :

- Autres Ligneux : *Tamarindus indica*, *Cordia sinensis*, *Boscia senegalensis*, *Cadaba farinosa*, *Capparis* spp.
- Herbacées : *Panicum laetum*, *Eragrostis pilosa*, *Sporobolus capensis*, *Aristida adscensionis*, *Brachiaria xantholeuca*, *Aristida mutabilis*

- Tendance d'évolution de la végétation

La « Stabilité » correspond à 13,43 % (48,29 hectares) et l'« Augmentation » domine 86,56 % (311,25 hectares).

p. Association entre Groupements à *Ziziphus mauritiana* sur sol sablo-argileux plus Groupements à *Acacia nilotica* et *Acacia seyal* sur sols argileux hydromorphes

Présente tout près des rives extérieures, elle correspond à l'« Association 5 » et couvre une superficie de 1336,25 hectares.

- Espèce en présence :

- Ligneux : *Acacia seyal*, *Acacia nilotica*, *Cordia sinensis*, *Boscia senegalensis*, *Cadaba farinosa*, *Balanites aegyptiaca*, *Mitragyna inermis*, *Acacia sieberana*
- Herbacées : *Aristida adscensionis*, *Brachiaria ramosa*, *Chloris pilosa*, *Echinochloa colonum*, *Panicum laetum*, *Brachiaria lata*

- Tendances d'évolution de la végétation

La « Régression » couvre 1,2 % (16,09 hectares) ; la « Stabilité » correspond à 18,07 % (241,49 hectares) ; l'« Augmentation » domine 76,3 % (1019,62 hectares) et l'« Augmentation importante » est égale à 4,41 % (59,03 hectares).

q. Association entre Groupements à *Acacia senegal*, *Ziziphus mauritiana* et *Acacia nilotica* plus Groupements à *Acacia nilotica* et *Acacia seyal* sur sols argileux hydromorphes

C'est l'association de groupements de végétaux la plus dominante dans l'arrière-pays. Elle est renommée ici « Association 6 » et couvre un espace équivalent à 13121,01 hectares.

- Espèce en présence :

- Ligneux : *Balanites aegyptiaca*, *Mitragyna inermis*, *Acacia sieberana*, *Balanites aegyptiaca*, *Cadaba farinosa*, *Boscia senegalensis*, *Faidherbia albida*, *Calotropis procera*
- Herbacées : *Echinochloa colonum*, *Panicum laetum*, *Brachiaria lata*, *Brachiaria xantholeuca*, *Aristida adscensionis*, *Panicum laetum*, *Chloris spp.*

- Tendances d'évolution de la végétation

La « Régression importante » occupe 0,12 % (16,09 hectares) ; la « Régression » couvre 7,64 % (1003,52 hectares) ; la « Stabilité » correspond à 55,58 % (7293,02 hectares) et l'« Augmentation » domine 36,64 % (4808,35 hectares).

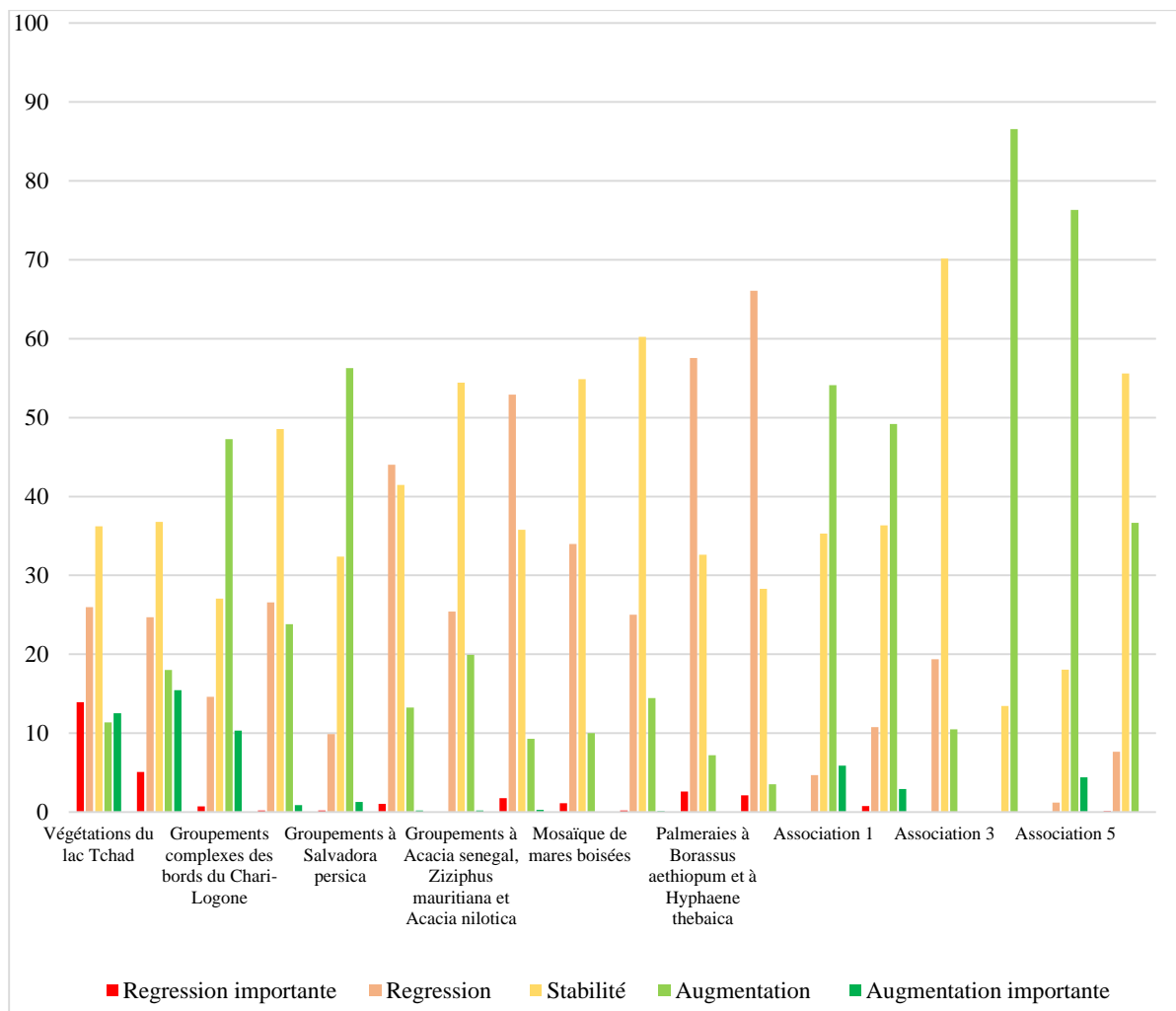


Figure 88 : Superficies des classes d'évolution du couvert végétal en fonction de la répartition des essences végétales. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Les plus forts taux d'« Augmentation importante » du couvert végétal sont situés dans les zones humides (figure 88) où dominent les espèces d'eaux douces comme *Pistia stratiotes* et *Ceratophyllum demersum*, et d'autres formations aquatiques à l'exemple de *Polygonum senegalense*, *Mimosa pigra*, *Cyperus maculatus*, *Cyperus papyrus*, *Combretum glutinosum*, *Andropogon gayanus*, ou *Panicum anabaptistum*. Ces végétaux prolifèrent dans le milieu lacustre et sur les berges du Chari. C'est dans le groupement « végétations du lac Tchad » en particulier que les deux tendances extrêmes ont lieu entre 2000 et 2018 (« Augmentation importante » et « Régression importante ») (figure 88). Celles-ci correspondent aux classes 1 et 2 (« Augmentation importante ») et aux classes 4 et 5 (« Régression importante ») de notre composante principale 3 (figure 57). Ceci revient à dire que ce sont les espèces d'eaux douces qui ont particulièrement changé entre 2000 et 2018. En d'autres termes la montée des eaux n'a pas entraîné une modification profonde en termes de qualité du couvert végétal dans l'espace lacustre, mais plutôt une migration des espèces d'eau douce (figure 67).

Le couvert végétal ligneux dans le reste de la zone d'étude est dominé par les familles de Fabaceae (*Acacia nilotica*, *Acacia sieberana* et *Acacia seyal*, *Bauhinia rufescens* *Tamarindus indica*), Arecaceae (*Borassus aethiopum* et *Hyphaene thebaica*), Zygophyllacées (*Balanites aegyptiaca*), Rubiaceae (*Mitragyna inermis*), Rhamnaceae (*Ziziphus mauritiana*), Mimosaceae (*Faidherbia albida*), Capparaceae (*Crateva andansonii* *Cadaba farinosa*, *Boscia senegalensis*), Apocynaceae (*Calotropis procera*), et des Boraginacées (*Cordia sinensis*). Les herbacés sont essentiellement de la famille des Poaceae (*Echinochloa colonum* *Panicum laetum*, *Brachiaria lata* *Hyperthelia dissoluta*), mais on retrouve également les Oryzoideae (*Oryza barthii*) et les Convolvulaceae (*Ipomoea aquatic*).

L'explication des différentes évolutions temporelles de ces espèces se trouve dans leur localisation dans l'arrière-pays.

En effet, dans les associations de groupements végétaux qui sont situés pour l'essentiel à proximité des rives du lac, la tendance générale est à la hausse de la couverture végétale, et on observe à chaque fois plus de 50 % de taux de progression en cumulant les valeurs des deux classes d'augmentation de la végétation (association 2 et 5 par exemple figure 88). Ces associations sont peuplées par les mêmes espèces de palmiers (*Borassus aethiopum* et *Hyphaene thebaica*) ou d'*Acacia* que l'on retrouve dans l'arrière-pays lointain mais connaissent une augmentation de leur couverture végétale.

Par contre, les groupements tels « Groupements à *Acacia nilotica* et *Acacia seyal* sur sols argileux hydromorphes » (figure 87) qui sont particulièrement peuplés d'*Acacia* connaissent une très forte réduction de leur couverture végétale (près de 55 %). Tout comme les groupements où on retrouve *Piliostigma reticulatum* ou *Ziziphus mauritiana* connaissent également une perte de végétation particulièrement dans leurs parties éloignées du lac (figure 87). L'une des explications est l'exploitation de ces ressources végétales pour la production de bois de chauffe et de service (PDC Goulfey, 2011), l'autre explication est liée au déboisement pour les besoins agricoles. Par exemple les *Acacia nilotica* et *Acacia seyal* (figure 87) se trouvent sur des sols argileux hydromorphes qui pourtant sont très prisés pour la culture de céréales de contre saison (*muskwari*).

Par conséquent, les pressions anthropiques relatives aux modes d'exploitations des sols et de valorisations des végétaux doivent être analysées simultanément. La carte des potentialités agronomiques et des modes d'utilisation des sols va être utilisée à cet effet.

3.3.2.3. Les potentialités agronomiques et modes d'utilisation des sols

La carte de potentialités des sols et terroirs agricoles (figure 89) redécoupe le paysage en terroirs agricoles plus ou moins homogènes quant à leurs potentialités agronomiques. Les terroirs sont constitués par des espaces réunissant un certain nombre de particularité permettant de les distinguer les uns aux autres (l'occupation humaine, le découpage ethnique, et les conditions d'exploitation du milieu par les populations constituent les

déterminants des potentialités des sols). Les éléments pris en compte dans la distinction et les descriptions des différents terroirs sont : le drainage qui différencie les terres bien drainées et les terres à engorgement fluvial ; la texture des sols qui permet de distinguer les terres légères sableuses et les terres lourdes argileuses ; et enfin, la pédologie des sols dominants, la végétation naturelle et les modes de production (Seignobos et Iyébi-Mandjek, 2000).

Notre objectif alors est de déterminer les relations spatiales éventuelles entre ce découpage en terroirs et la spatialisation des tendances d'évolution de la végétation. Nous partons de l'hypothèse que la prédisposition des sols à certaines utilisations notamment agricoles (agriculture et élevage) et les usages dont ils font effectivement l'objet influencent à long terme sur la disponibilité de la couverture végétale.

Les résultats sont illustrés en fonctions des terroirs agricoles tel que présentés par les auteurs de la carte (la nomenclature des terroirs notamment).

Pour la présentation des résultats, les taux et les superficies des tendances d'évolution du couvert végétal sont d'abord présentés pour chaque terroir. C'est au terme de cette présentation qu'une interprétation générale est faite sur l'influence des potentialités des sols et terroirs agricoles dans l'évolution du couvert végétal.

La figure 89 ci-dessous sert juste à rappeler la disposition de la phytogéographie elle est décrite en détails dans le chapitre 1.

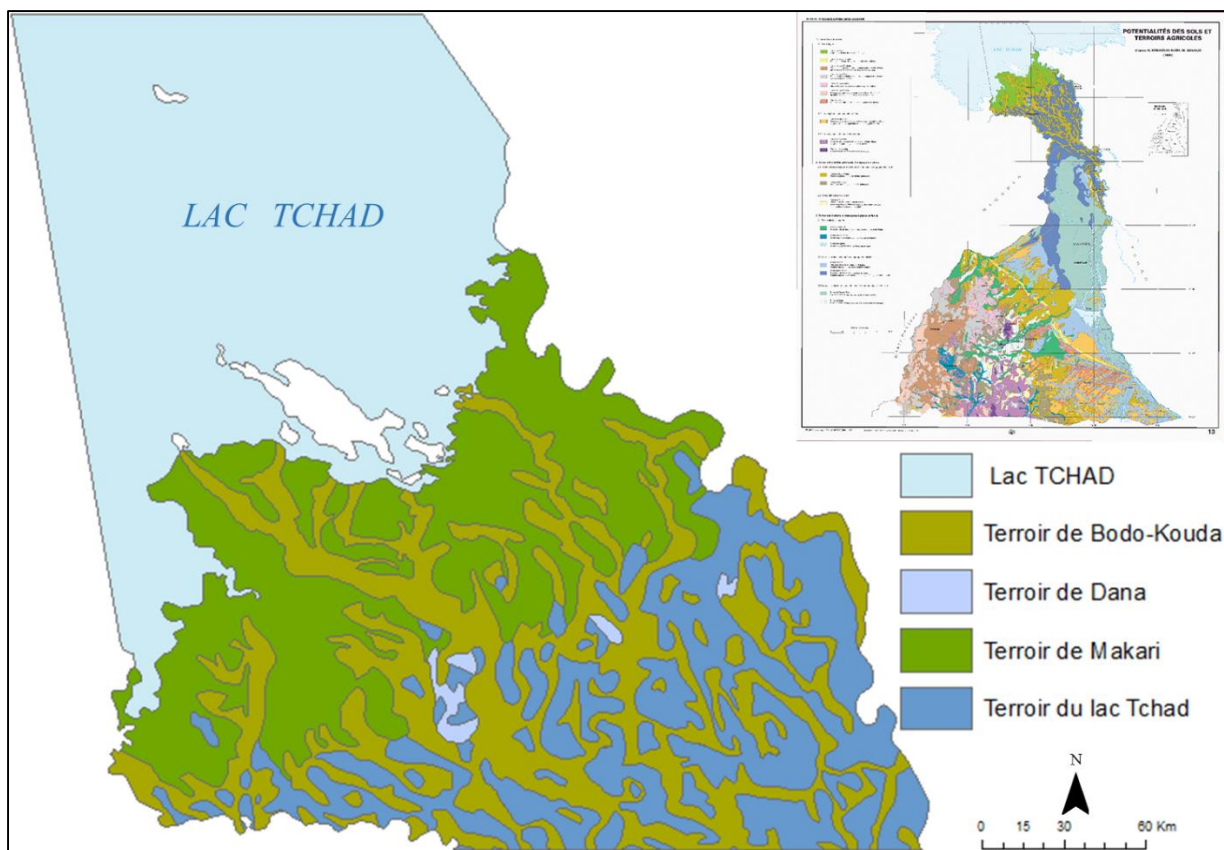


Figure 89 : Géomorphologie des sols de l'arrière-pays camerounais du lac Tchad. (Source : adapté de Seignobos et Moukouri, 2000, in Seignobos, et Mandjeck 2000. Atlas de la Province Extrême-Nord Cameroun, 2000).

a. Le Terroir de Makari

- Description

A l'échelle de notre espace d'étude, c'est le seul terroir décrit comme étant bien drainé par les auteurs de cette carte. Les sols sont peu évolués, constitués de dépôts récents sur sables lacustres bruns. Les terres sont légères et l'érosion éolienne est à prendre en considération. En dehors des ceintures de champs aux alentours des villages, cet espace reste peu cultivé aux rives du lac à cause des récoltes aléatoires dues aux fluctuations des eaux. Toutes fois, les cultures de maïs et de niébés occupent les périmètres proches du lac. Les cultures traditionnelles de niébés et de cucurbitacées se retrouvent quant à elles dans les bas-fonds de l'arrière-pays. Les pâturages de saisons des pluies s'étendent jusqu'au lac Tchad. Cet espace occupe un espace égale à 93843,40 hectares.

- Tendence d'évolution de la végétation (figure 90)

Dans ce terroir, l'évolution du couvert végétal est à dominance stable avec 54,38 % équivalant à 51035,1 hectares. Les classes des tendances progressives cumulent 28,72% de cet espace correspondant à 28,22% (26483,51 hectares) et 0,5% (472,24 hectares) pour les classes « Augmentation » et « Augmentation importante » respectivement. Les

zones de régressions concentrées au sud de ce terroir, occupent 16,76% (15734,48 hectares) pour la classe « Régression » et 0,12 % (118,06 hectares) pour la « Régression importante ».

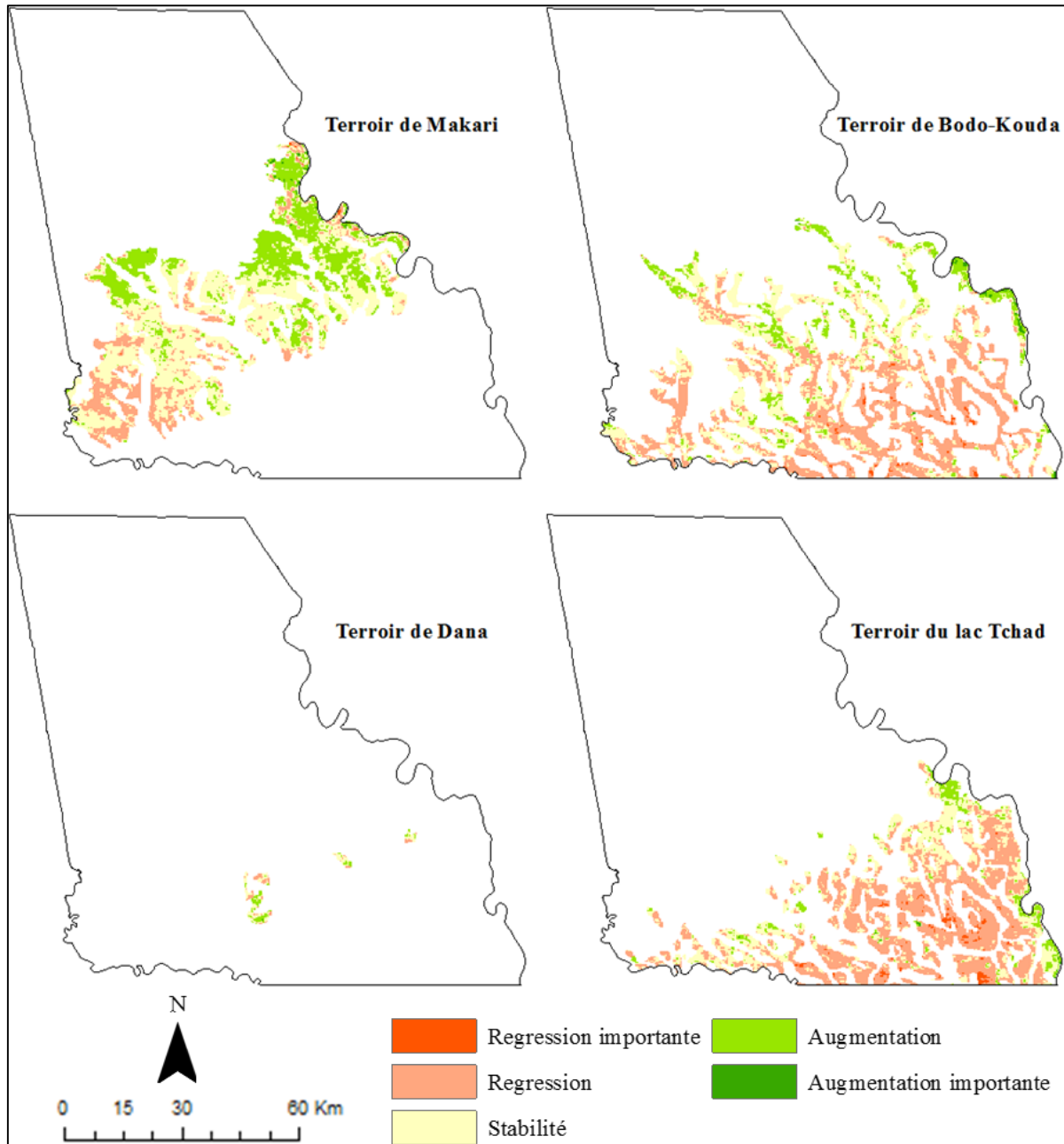


Figure 90 : Principales tendances d'évolution du couvert végétal dans le Terroir de Makari. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

a. Le Terroir de Bodo-Kouda

- Description

Les sols dominants de cet espace sont de types planosoliques et solonetziques suivis de vertisols hydromorphes développés sur alluvions. Les terres sont lourdes planiques et sodiques constitués de matière organiques bien évoluée et leurs capacités d'échanges sont bonnes. Ces terres qui servent également de pâturage sont peu propices à l'agriculture mais supportent les cultures de petits mils et maïs sur sols légers, et muskwari et niébés sur les bas-fonds. La superficie totale occupée par ce terroir est de 99172,30 hectares.

- Tendances d'évolution de la végétation (figure 90)

L'évolution du couvert végétal est plus ou moins équilibrée entre la classe « Stabilité » qui occupe 41,41% soit 41074,93 hectares et la classe « Régression » qui couvre 44,91% (44547,04 hectares). Les classes « Régression importante » 1,14%, « Augmentation » 11,91% et « Augmentation importante » 0,6% occupent respectivement 1132,32 hectares, 11816,95 hectares et 601,04 hectares.

b. Le Terroir de Dana

- Description

La texture des sols est variable mais les sables dominent et leur teneur en matière organique est faible. Les sols sont peu utilisés à cause de l'absence d'un système d'irrigation ou de drainage. Les terres sont mal drainées, à engorgement fluviales et développées sur alluvions. Ces espaces où on y pratique la culture de sorgho repiqués, et de sorgho rouge servent également de pâturages de terres alluviales. Leur superficie à l'échelle de la zone d'étude est négligeable et égale à 2688,59 hectares.

- Tendances d'évolution de la végétation (figure 90)

Dans ce petit espace, la classe « Stabilité » domine avec 53,09% de l'occupation soit 1427,48 hectares suivi de la classe « Augmentation » qui couvre 25,34% (681,54 hectares) et de la classe « Régression » 21,35% (574,21 hectares).

c. Le Terroir du lac Tchad

- Description

Les terres sont lourdes, compactes à l'état sec et collantes lorsqu'elles sont humides. Les sols sont peu profonds sur alluvions, de texture argileuse ou sablo-argileuse. Ces sols dont la topographie est faible avec des pentes le plus souvent inférieures à 1%, sont très fragiles, d'une capacité d'échange très élevée et présentent des risques d'érosion en ravines importants. Les sécheresses des décennies 70 et 80 ont causé la suspension de la culture du sorgho de décrue dans cet espace qui est devenu une zone de pâturage pour les éleveurs transhumants. La valeur en superficie de cet espace est estimée à environ 77497,14 hectares.

- Tendances d'évolution de la végétation (figure 90)

La zone est dominée par les tendances régressives qui occupent plus de 61 % de cet espace soit 58,9 % (45647,1 hectares) pour la classe « Régression » et 2,07 % (1609,9 hectares) pour la « Régression importante ». La classe stable couvre 32,32 % soit 25050,66 hectares et constitue en quelque sorte une zone tampon entre les tendances régressives et progressives. L'ensemble des deux classes qui représentent la progression de la végétation occupent 6,68% pour un total de 5189,37 hectares.

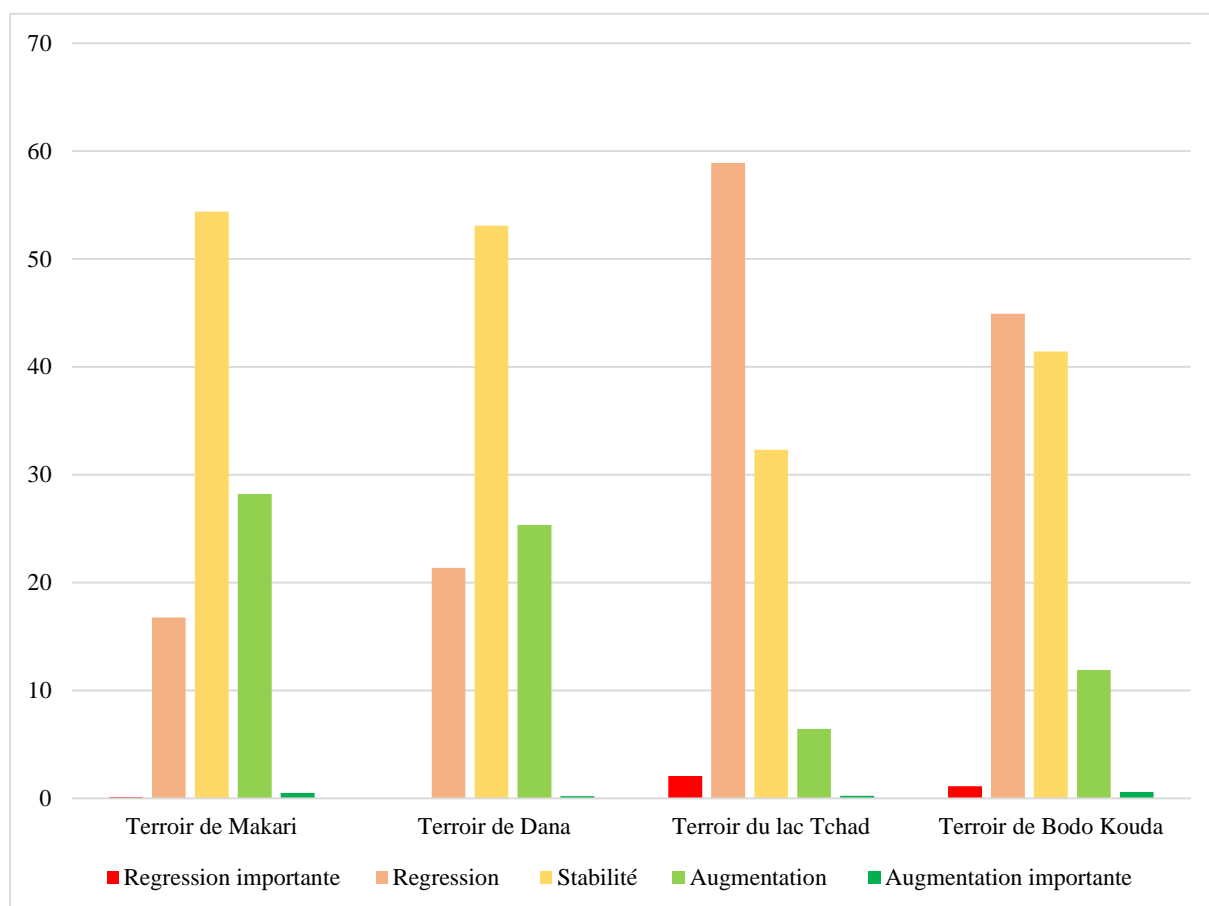


Figure 91 : Superficies des classes d'évolution du couvert végétal en fonction des potentialités agronomiques et des modes d'utilisation des sols. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

La comparaison des cartes de potentialité des sols avec celle de l'évolution du couvert végétal offre un autre regard de la dynamique de la végétation. Les tendances dominantes par terroir sont partagées entre la « Stabilité » et la « Régression » (figure 91).

Parmi les terroirs avec une importance spatiale significative, seul celui de Makari présente une tendance à la progression du couvert végétal importante, puisque la classe « Augmentation » représente près de 30 % de sa superficie. Le reste de l'espace est de tendance stable avec plus de 50%. C'est aussi le seul terroir bien représenté aux abords du lac, ce qui est déjà une première explication des tendances observées. Par ailleurs, du fait des fluctuations aléatoires des eaux du lac, les cultures vers les bords du lac sont peu

importantes et les quelques champs présents se limitent aux alentours des villages. Par contre, dans l'arrière-pays de ce terroir, les cultures traditionnelles de niébés et de cucurbitacées sont plus importantes et c'est justement dans ces espaces que les tendances stables ou régressives dans ce terroir sont observées (figure 90). En plus des raisons agricoles, ces tendances régressives s'expliquent également par le fait que le couvert végétal dans cette tranche d'espace est dominé par les Acacia (figure 86) qui connaissent pourtant une diminution importante de leur quantité du fait de la coupe de bois de chauffe et de service.

Dans les terroirs de Bodo-kouda et du Lac Tchad en revanche les tendances régressives sont plus marquées. Les cumuls des deux classes de régression de la végétation dans ces terroirs correspondent respectivement à 46 % et 61 %. Les modes d'utilisations des sols dans ces deux terroirs expliquent ces tendances. En effet, dans ces deux terroirs la pression agricole est plus intense en raison notamment de la nature de leurs sols (vertisols hydromorphes) qui sont favorables aux cultures de muskwari en contre saisons. Ces terroirs constituent également les principaux pâturages de l'arrière-pays et donc connaissent une pression pastorale importante en saison des pluies notamment (la végétation y est principalement annuelle figure 67). A cela il faut ajouter les faits qu'ils sont majoritairement constitués d'Acacia, et éloignés du lac et des cours d'eaux.

Le constate qui se dégage est que les pressions agricoles et pastorales déterminent pour beaucoup la nature des évolutions du couvert végétal. Puisque le terroir de Makari qui est moins cultivé que les terroirs de Bodo-Kouda et du lac Tchad connaît des tendances régressives moins importantes que les deux autres.

Ceci montre qu'en plus de la proximité au cours d'eaux (le lac ou les cours d'eau de l'arrière-pays), de la nature des sols et de la répartition des essences végétales, les modes d'exploitation des terres déterminent pour beaucoup la nature des évolutions du couvert végétal.

Résumé de l'analyse du couvert végétal

La cartographie du couvert végétal de la fenêtre lacustre camerounaise du lac Tchad et de son arrière-pays à partir de la série temporelle d'images MODIS acquises entre de 2000 à 2018 permet de distinguer dans cet espace trois catégories de végétations : les végétations dont le cycle saisonnier est influencé par les variations en eau du lac (exemple de la « végétation de décrue des rives immédiates ») ; les végétations dont le cycle saisonnier est lié à la pluviométrie (exemple de la « végétation annuelle de l'arrière-pays ») ; et celles qui bénéficient des pluies et des eaux du lac (c'est le cas de la « végétation pérenne lacustre ») essentiellement contenues dans l'espace lacustre.

Ces classes de végétation sont également des observables géographiques qui permettent de localiser dans l'espace, les zones de régression et d'augmentation du couvert végétal et permettent également de percevoir l'influence des conditions climatiques sur le couvert végétal. Par exemple, entre 2010 et 2018 l'amélioration des conditions pluviométriques conduit pour les végétations annuelles, au rallongement sur deux semaines (deuxième moitié du mois d'Août) du maximum de l'activité végétative et d'autre part à une légère reprise de la croissance végétale au début du mois de Novembre. En plus des précipitations, les coefficients de corrélations de l'indice d'aridité (0,69) et de l'humidité relative de l'air (0,79) avec le NDVI montrent que ces deux autres paramètres sont également influents sur l'activité végétative dans cet espace.

Si les fortes tendances régressives et progressives ont lieu dans la zone lacustre et s'expliquent par la pluviométrie et les fluctuations des eaux du lac, dans l'arrière-pays par contre ces tendances sont moins fortes et sont justifiées par plusieurs facteurs géographiques. Les espaces en proximité du lac ou des cours d'eau qui serpentent l'arrière-pays ont un couvert végétal stable ou en augmentation. Par contre, dans les sols argileux hydromorphes situés loin du lac dans l'arrière-pays et qui sont propices pour les cultures de contre saison, l'évolution du couvert végétal est essentiellement régressive. La charge pastorale y est également plus importante et contribue également à l'amenuisement du couvert végétal.

Ces résultats confirment le lien fort déjà démontré par Tucker et al., (1985); Nicholson et Lare, (1990); Herrmann, Anyamba, et Tucker, (2005); Diello et al., (2005) entre la pluviométrie et la couverture végétale dans cet espace, et prouvent par ailleurs que l'évolution de la végétation reste le meilleur indicateur pour analyser l'état de santé de ces écosystèmes.

Ils montrent également l'influence des activités anthropiques sur l'évolution du couvert végétal. Cependant avec ces images de basse résolution (250m) il est impossible de faire une cartographie détaillée de l'occupation et de l'utilisation des sols permettant de mettre en évidence les exploitations de l'espace. Par ailleurs, les images MODIS

MOD13Q1 sont disponibles seulement à partir de 2000 pourtant d'importants changements environnementaux ont eu lieu au Sahel avant cette date. A cela s'ajoute le fait que les images MODIS MOD13Q1 sont des résumés bihebdomadaires de prises de vues ce qui revient à dire que les valeurs obtenues sur l'image ne renvoient pas à une date précise mais à une période (intervalle de 16 jours).

Dans le chapitre suivant les images satellites de meilleur résolution spatiale et spectrale et plus antérieures aux images MODIS sont utilisées pour analyser l'occupation et l'utilisation des sols sur une période plus importante.

Chapitre 4 : Dynamiques spatiales d'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols de la fenêtre lacustre camerounaise du lac Tchad et de son arrière-pays (1973- 2018)

Introduction

L'histoire récente du climat au Sahel (à partir des années 1970), est marquée par des variabilités qui ont vu les sécheresses des années 1970-1990 succéder aux périodes humides des années 1950-1970, et précéder le retour d'humidité observé à partir de la décennie 2000 (S. Nicholson, 2005; Ali et Lebel, 2009; Vischel et al., 2015). Les effets de ces différentes variabilités climatiques sont analysés au Sahel grâce au suivi de l'état du couvert végétal et de ses changements en fonction de la pluviométrie (Diello et al., 2005; Cécile Dardel, 2014), et montrent que la faible pluviométrie entraîne un amenuisement du couvert végétal et conduit à l'aridification du milieu, et dès leur retour c'est le reverdissement qui s'installe (Herrmann, Anyamba, et Tucker, 2005; Olsson, Eklundh, et Ardö, 2005). L'état du couvert végétal est donc un paramètre important de la santé des écosystèmes sahéliens.

C'est pourquoi le chapitre précédent a abordé la question cruciale de l'évolution spatiale et temporelle de la couverture végétale à l'échelle de notre zone d'étude, avec pour objectif d'une part d'identifier les espaces de progression et de régression de la végétation, et d'autre part d'établir les influences des facteurs géographiques sur l'évolution du couvert végétal. Cependant la faible résolution spatiale des images MODIS utilisées (250m), la nature des mesures (valeurs moyennées), et leur indisponibilité au-delà de l'année 2000, empêchent d'établir une cartographie détaillée de l'occupation et de l'utilisation des sols et ne permettent pas de suivre l'évolution diachronique de l'espace d'étude depuis les sécheresses sahéliennes.

Ceci justifie le recours aux images de meilleures résolutions spatiales (Landsat, Sentinel-2, SPOT6) et plus anciennes que les images MODIS puisqu'elles permettent de remonter jusqu'en 1973 (Landsat). L'objectif de leur utilisation dans le présent chapitre est donc de décrire et caractériser la disposition des éléments de surfaces de l'espace d'étude depuis 1973, et analyser l'évolution diachronique de l'occupation et de l'utilisation des sols depuis les sécheresses sahéliennes.

En partant de l'hypothèse que l'amélioration de la pluviométrie au Sahel entraîne également un reverdissement de notre espace d'étude et accentue les pressions

anthropiques sur le milieu, nous établissons d'abord l'évolution diachronique de l'occupation et de l'utilisation des sols pour ensuite déterminer les facteurs géographiques qui influencent cette évolution.

4.1. Analyse multi-échelle, multi-capteurs et multi-temporelle de l'occupation et de l'utilisation des sols des rives camerounaises du lac Tchad et de leur arrière-pays entre 1973 et 2018

L'analyse diachronique de l'occupation et de l'utilisation des sols dans la fenêtre lacustre camerounaise du lac Tchad et son arrière-pays, va nous permettre de restituer entre 1973 et 2018, la dynamique spatiale de ce territoire par rapport aux évolutions récentes climatiques et environnementales des écosystèmes sahéliens. L'intérêt est d'établir les effets de ces récentes évolutions climatiques et environnementales sur les écosystèmes naturels du territoire d'étude, et d'autre part de mettre en évidence leurs implications sur les modes d'utilisation et de valorisation des sols dans cet espace.

Dans cette démarche, la première préoccupation consiste à cartographier la couverture spatiale des principales classes d'occupation des sols (figure 92). Cette cartographie a pour but de compléter l'analyse de l'espace précédemment établie à partir des images MODIS NDVI, en utilisant les images de haute et de très haute résolution (Landsat, Sentinel-2, SPOT6) pour prendre en considération les autres types d'occupation des sols (sols nus, eaux libres, etc.). La seconde est relative à l'utilisation des sols (figure 92). Celle-ci permettra de s'intéresser à l'évolution spatiale et temporelle de la pression anthropique sur les ressources.

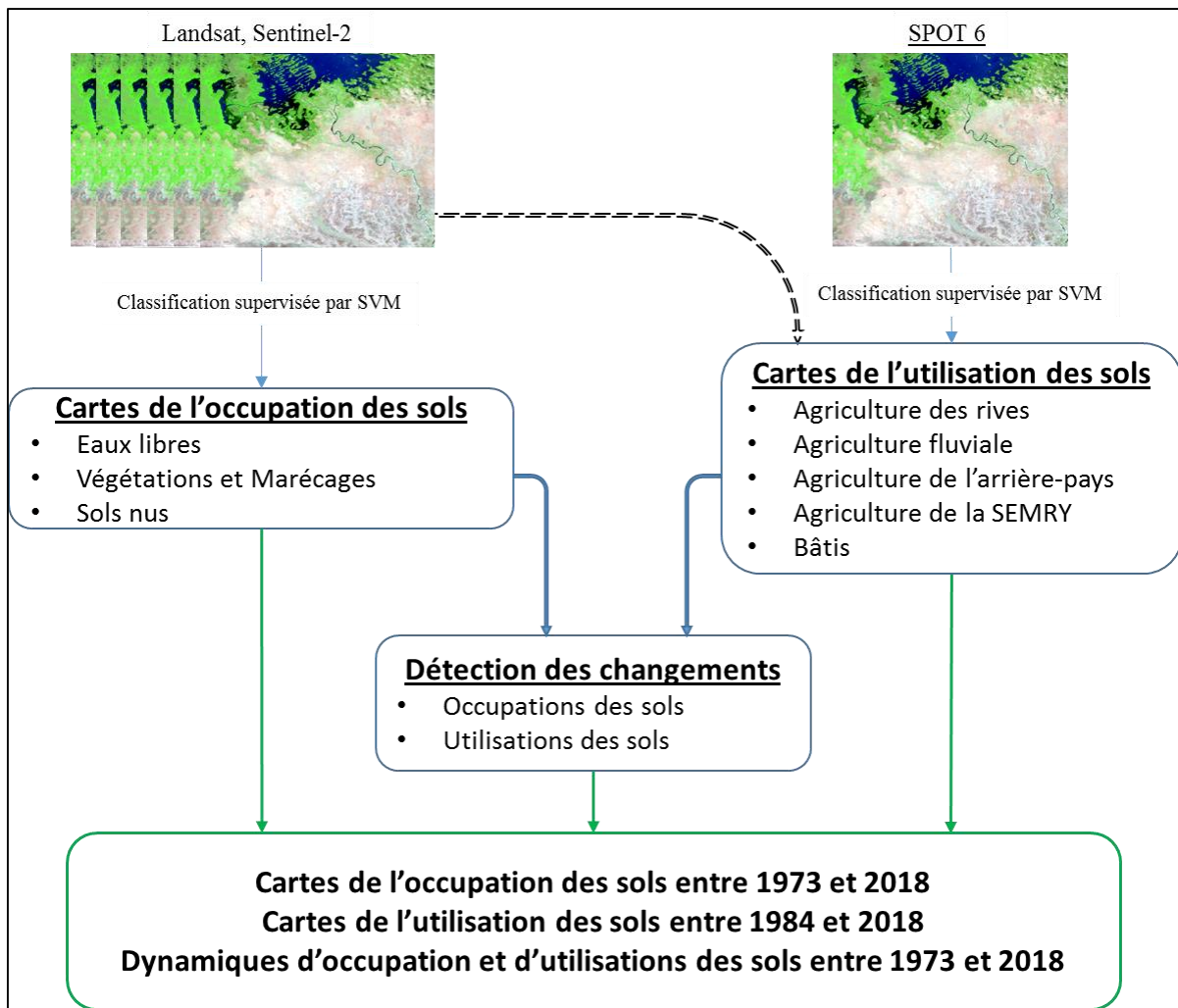


Figure 92 : Etapes de l'analyse multi-échelle, multi-capteurs et multi-temporelle de l'occupation et de l'utilisation des sols des rives camerounaises du lac Tchad et de leur arrière-pays. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Dans ces milieux où la moindre variation climatique entraîne des changements importants de l'aspect physique des objets en surface, le choix des dates pour une telle analyse prend une dimension délicate. Le nôtre se fonde sur le besoin de prendre en considération dans cette approche diachronique, les dates marquantes de l'évolution récente du climat au Sahel.

Les images des années 1973 et 1975 (tableau 20) permettent de visualiser la zone d'étude au début des grandes sécheresses sahéniennes. Avec celles des années 1984 et 1987, nous avons l'état de la zone d'étude au cours de la période pendant laquelle les sécheresses sahéniennes ont été parmi les plus sévères. Les images des années 1999 et 2000 sont importantes dans la mesure où cette période est marquée au Sahel par le retour des conditions climatiques favorables qui ont amorcée le reverdissement du Sahel. En fin, les images satellites de 2017 et 2018 nous renseignent sur l'occupation et l'utilisation récente des sols. Les choix de ces dates sont par ailleurs consécutifs aux contraintes liées

à la disponibilité des images et à la qualité de celles disponibles. Dans la décennie 1970 par exemple, très peu de scènes permettent de couvrir toute l'étendue de la zone d'étude pendant le même mois et à la même année (par exemple les images de Septembre 1972 couvrent la cuvette nord et en Février 1979 seule la cuvette sud est couverte). Un autre exemple est celui de l'année 1984, régulièrement référencée comme l'une des plus sèches au Sahel, mais dont les images sur la zone d'étude sont indisponibles à certaines dates ou fortement recouvertes de nuages.

Tableau 20. Les images satellites utilisées pour classifier l'occupation et l'utilisation des sols.

	Landsat MSS	Landsat TM	Landsat ETM	SPOT 6	Sentinel-2
Images satellites	Mars 1973 Octobre 1975	Octobre 1984 Mars 1987 Octobre 1987	Octobre 1999 Avril 2000 Août 2000	Avril 2017	Avril 2018 Septembre 2018

Ces images font l'objet d'une séquence de prétraitements et de traitements destinés à : corriger les distorsions radiométriques ; assembler les bandes spectrales nécessaires pour distinguer et classifier l'occupation et l'utilisation des sols ; mosaïquer les scènes d'images et les extraire à l'échelle de la zone d'étude ; et classifier ces images pour regrouper les pixels en classes d'occupation et d'utilisation.

4.1.1. Les étapes de prétraitements et de classifications de nos images multi spectrales

4.1.1.1. Le calibrage radiométrique

La transformation radiométrique ou calibrage radiométrique intervient lorsque la luminance a été correctement mesurée, mais pour des raisons de contexte physique de la mesure, les valeurs enregistrées ne correspondent pas à la signature spectrale réelle de la classe ou de l'objet (c'est-à-dire celle qu'établirait un radiomètre situé à proximité de la cible et qui ne subirait pas ou peu d'effets perturbateurs) : effet de pente et d'orientation, d'ombrage, d'atténuation ou d'émission atmosphériques, dérive des instruments de mesure (Caloz et Collet, 2001). Le calibrage radiométrique a pour but de convertir le signal enregistré par le satellite (comptes numériques) en variables physiques (valeurs de réflectance) faciles à interpréter. Pour y parvenir les comptes numériques sont convertis en valeurs de radiance, et les radiances sont ensuite ramenées en valeurs de réflectances (Chander, Markham, et Helder, 2009). Cette conversion prend en compte la distribution spectrale de la lumière du soleil pour compenser l'influence de l'élévation solaire qui varie selon le jour l'heure et le lieu.

4.1.1.2. La mosaïque des scènes et l'extraction de la zone d'étude

Lorsque l'étendue de la zone à étudier dépasse le champ d'une photographie aérienne ou d'une scène d'image spatiale, il est absolument nécessaire de recourir à l'élaboration d'une mosaïque d'images qui va permettre leur raccordement géométrique et radiométrique (Leruth, 2000; Tidjani, Ozer, et Karimoune, 2009). Cette opération est appliquée à toutes les images Sentinel-2, SPOT 6 et Landsat pour rassembler les scènes et couvrir l'entièreté de la zone d'étude (figure 93). Les images qui résultent de cette opération donnent une vision d'ensemble de la zone d'étude et possèdent les mêmes caractéristiques de cohérence géométrique et d'aspect radiométrique qu'aurait une image acquise en une seule fois sur la même zone.

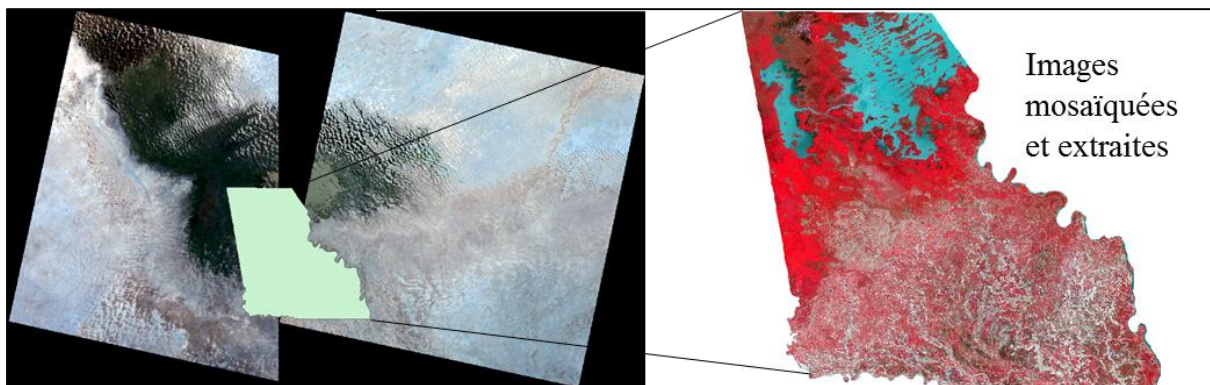


Figure 93 : Illustration de la mosaïque et de l'extraction de deux scènes Landsat à l'échelle de la zone d'étude. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

4.1.1.3. Classification par SVM

Les cartographies de l'utilisation et de l'occupation des sols sont obtenues par classifications supervisées de nos images (figure 94). L'algorithme utilisé est celui de SVM (Support Vectors Machines). C'est un classificateur non paramétrique, choisit en raison de sa robustesse (Tzotsos, 2006; Srivastava et al., 2012), et qui s'adapte parfaitement classifications d'images de haute et de très haute résolutions spatiales (les détails sur cet algorithme et les raisons de son choix sont donnés dans le chapitre 2).

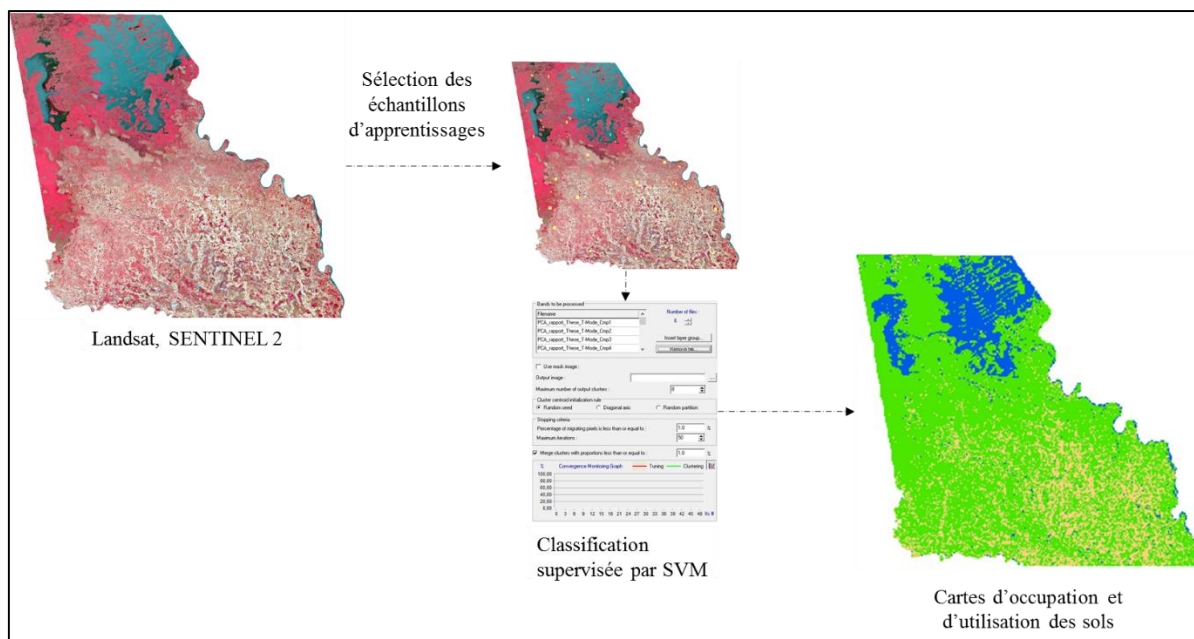


Figure 94 : Typologie de l'occupation des sols. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

4.1.1.4. Validation de la classification

La validation des résultats de classification permet de s'assurer de la performance et de la significativité des résultats obtenus. Pour tester l'efficacité de nos classifications nous avons choisi de procéder pas deux méthodes. La première méthode consiste à calculer la séparabilité entre les classes en mesurant la distance de divergence transformée (tableau 21). Cet indicateur est compris entre 0 et 2, où 2 correspond à la séparabilité maximale. Plus la séparabilité est élevée plus on réduit les risques de confusion entre les classes d'occupation lors de l'application de l'algorithme de classification.

Tableau 21. Calcul de la séparabilité des sites d'entraînements.

Classes d'occupation	Code des classes	Combinaisons possibles entre les classes	Mesure de la distance de divergence transformée	Degrés de séparabilité
Classe X	1	1 : 2	0.000	Séparabilité minimale
Classe Y	2	1 : 3	1.000	Séparabilité moyenne
Classe Z	3	2 : 3	2.000	Séparabilité maximale

La deuxième méthode consiste à calculer les matrices de confusion pour chaque classification (tableau 22). Après application de l'algorithme de classification on évalue la pertinence de l'image classifiée à l'aide d'une matrice de confusion, en reportant les pixels connus par rapport aux pixels classés. La matrice de confusion permet de confronter les vérités terrains aux résultats de la classification et d'évaluer la précision de la classification par rapport à la référence sur le terrain (Duminil, 2007). En d'autres termes, c'est un outil permettant de mesurer la concordance entre un ensemble d'éléments observés (pixels issus de la classification) et un ensemble d'éléments de référence correspondant aux échantillons de vérification (Masse, 2013). A cet effet, deux jeux d'échantillons sont nécessaires, un jeu utilisé pour initialiser le processus de classification et un autre utilisé pour valider la classification à travers le calcul de la matrice de confusion.

Tableau 22. Présentation de la matrice de confusion.

		Vérité terrain				
		Reference Classe X (rx)	Reference Classe Y (ry)	Reference Classe Z (rz)	total	Exactitude
Classification	Classe X (cx)	(cx, rx)	(cx, ry)	(cx, rz)	Total cx	Exactitude cx
	Classes Y (cy)	(cy, rx)	(cy, ry)	(cy, rz)	Total cy	Exactitude cy
	Classe Z (cz)	(cz, rx)	(cz, ry)	(cz, rz)	Total cz	Exactitude cz
	Total	Total rx	Total ry	Total rz	TOTAL	
	Exhaustivité	Exhaustivité rx	Exhaustivité ry	Exhaustivité rz		

L'analyse de la matrice de confusion nécessite l'interprétation des valeurs importantes de celle-ci parmi lesquelles on a :

L'exhaustivité qui détermine pour chaque classe d'occupation les nombres de pixels de la vérité de terrain à avoir été classé exactement dans la bonne classe. Cette valeur est complémentaire au taux d'omission ;

$$\text{Exhaustivité} = \frac{(cx,rx)}{\text{Total rx}} * 100 \quad \text{Taux d'omission} = 1 - \text{Exhaustivité}$$

L'exactitude représente également pour chaque classe d'occupation le nombre de pixel à avoir été bien classés par l'algorithme. Cette valeur permet alors de déterminer pour chaque classe le nombre de pixel ne faisant pas partir d'une classe mais qui ont été rajoutés par l'algorithme. Cette valeur est complémentaire au taux de commission ;

$$\text{Exactitude} = \frac{(cx,rx)}{\text{Total cx}} * 100 \quad \text{Taux de commission} = 1 - \text{Exactitude}$$

L'exactitude globale obtenue en pourcentage est calculée pour l'ensemble des classe en divisant le nombre de pixels biens classes sur le nombre total de pixels ;

$$\text{Exactitude globale} = \frac{(cx,rx)+(cy,ry)+(cz,rz)}{\text{TOTAL}} * 100$$

Le Kappa informe sur la proportion de la classification qui n'est pas dû au hasard ;

$$\text{Kappa} = \frac{\text{exactitude globale} - E}{\text{TOTAL} - E}$$

Avec E qui représente la portion de la classification dû au hasard

$$E = (\text{Total cx} * \text{Total rx}) + (\text{Total cy} + \text{Total ry}) + (\text{Total cz} + \text{Total rz})$$

4.1.2. Cartographie multi-temporelle et multi-capteur de l'occupation des sols des rives camerounaises du lac TCHAD et de leur arrière-pays entre 1973 et 2018

Pour cette cartographie il est important d'utiliser les images de saison sèche et de saison des pluies dans le suivi diachronique de l'évolution de l'occupation des sols, pour prendre en considération l'influence des saisons. Cependant, dans le choix des dates, il faut tenir compte de la nature des éléments de surface présents sur le territoire d'étude (eaux libres, marécages, végétation des sols émergés, sols nus) et qui ne réagissent pas tous pareillement aux changements de saisons. Selon que l'on se situe dans les terres émergées de l'arrière-pays ou dans les parties lacustres, l'influence des saisons sur l'occupation des sols diffère. En effet, dans l'espace lacustre la montée et le retrait des eaux du lac Tchad se conjuguent à la disponibilité des précipitations pour conditionner l'occupation des sols (les variations saisonnières de l'activité végétative le démontrent), contrairement aux terres émergées de l'arrière-pays où l'occupation des sols est essentiellement soumise à la disponibilité des précipitations. Cependant dans la mesure où le maximum de crue et d'étiage sont décalés par rapport aux pluies le choix des dates devient donc délicat.

Dans la partie lacustre soumise aux fluctuations des eaux du lac Tchad, l'intérêt d'une telle analyse diachronique est de capter le maximum de crue et d'étiage. En effet, dans cet espace, la mise en valeur des ressources naturelles (agriculture, pêche, élevages) est essentiellement dépendante des fluctuations des niveaux d'eau du lac. Pour cela il est indispensable d'utiliser les images satellites sur deux années différentes car le maximum de la crue a lieu entre Novembre et Décembre de l'année n-1 et l'étiage entre Mai et Juin de l'année n.

Cependant dans l'arrière-pays, où l'occupation des sols dépend fortement des précipitations l'utilisation des images spatiales de saisons sèches et de saisons de pluies reste pertinente.

Dans la mesure où la logique de notre étude est de cartographier les variations les plus importantes de l'occupation du sol, et en raison de la disponibilité et de la qualité des données de télédétection spatiale, l'utilisation des images satellites Landsat et Sentinel-2 de saisons de pluies et de saisons sèches reste la plus appropriée (tableau 23).

Tableau 23. Les images satellites utilisées pour classifier l'occupation des sols.

	Décennie 1970		Décennie 1980		Décennie 2000		Décennie 2010	
	Saison sèche	Saison de pluies	Saison sèche	Saison de pluies	Saison sèche	Saison de pluies	Saison sèche	Saison de pluies
Images satellites	Landsat MSS Mars 1973	Landsat MSS Octobre 1975	Landsat TM Mars 1987	Landsat TM Octobre 1987	Landsat ETM Avril 2000	Landsat ETM Août 2000	Sentinel-2 Avril 2018	Sentinel-2 Septembre 2018

Les résolutions spatiales des images satellites utilisées pour cette cartographie sont comprises entre (60 m et 10 m). A cette résolution, la photo interprétation des images satellites permet de distinguer trois principales classes d'occupation :

- La classe des **eaux libres** essentiellement présente dans la partie lacustre regroupe toutes les zones recouvertes d'étendues d'eau permanentes tout au long de l'année. Elle désigne également les zones temporairement inondées dans les surfaces marécageuses lacustres et de l'arrière-pays, et les fleuves qui traversent l'arrière-pays notamment le Serbewel au centre et le Chari à l'est ;
- Dans la **végétation et marécages** se retrouvent toutes les formes de couvertures végétales des plus denses aux plus éparses présentes au sein du lac, dans les rives et au niveau de l'arrière-pays. Il s'agit entre autre des îles flottantes dans les eaux libres, des marécages ou prairies aquatiques occupant les terres inondables de la partie lacustre jusqu'aux rives extérieures, et les différentes couvertures végétales pérennes et annuelles des terres émergées de l'arrière-pays ;
- La classe des **sols nus** majoritairement présents dans les terres émergées de l'arrière-pays rassemblent les zones complètement dépourvues de couverture végétale. Ce sont également les zones où la végétation est brièvement existante ou très faiblement présente.

4.1.2.1. Répartition de l'occupation des sols entre 1973 et 2018

Pour toutes nos classifications nous effectuons une vérification préalable de la séparabilité des sites d'apprentissages pour nous assurer que les classes d'occupations obtenues seront parfaitement discriminées. Le test de séparabilité des classes par le calcul de l'indice de divergence transformée a été appliqué aux échantillons d'apprentissage. Pour les classes qui présentaient les valeurs de séparabilité inférieures à 1,6 la sélection des échantillons a été reprises afin d'améliorer la discrimination entre les classes. Les valeurs des échantillons retenus sont toutes supérieures à 1,9 et témoignent de la meilleure distinction possible entre les classes (tableau 24). Sur l'ensemble des

classifications, les moins bonnes séparabilités sont observées pour le couple Végétation et marécages/ Sols nus avec des valeurs régulièrement égales à 1,9. Ce cas traduit en réalité la difficulté à distinguer les sols nus de la végétation annuelle en particulier, en raison aussi de la résolution spatiale des images.

Tableau 24. Résultat de la séparabilité des sites d'entraînements pour les classifications.

Mesure de distance de la transformée de divergence				
Classes d'occupation	Paires de Classes	Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur moyenne
Classification de Mars 1973				
1 = Eaux libres	1 : 2	1.999	2.000	1.999
2 = Végétation et marécages	1 : 3	1.999	2.000	1.999
3 = Sols nus	2 : 3	1.966	1.999	1.982
Classification d'Octobre 1975				
1 = Eaux libres	1 : 2	1.999	2.000	1.999
2 = Végétation et marécages	1 : 3	2.000	2.000	2.000
3 = Sols nus	2 : 3	1.981	2.000	1.990
Classification de Mars 1987				
1 = Eaux libres	1 : 2	2.000	2.000	2.000
2 = Végétation et marécages	1 : 3	2.000	2.000	2.000
3 = Sols nus	2 : 3	1.999	2.000	1.999
Classification d'Octobre 1987				
1 = Eaux libres	1 : 2	1.993	2.000	1.996
2 = Végétation et marécages	1 : 3	2.000	2.000	2.000
3 = Sols nus	2 : 3	1.999	2.000	1.999
Classification d'Avril 2000				
1 = Eaux libres	1 : 2	1.999	2.000	1.999
2 = Végétation et marécages	1 : 3	2.000	2.000	2.000
3 = Sols nus	2 : 3	1.999	2.000	1.999
Classification d'Août 2000				
1 = Eaux libres	1 : 2	1.999	2.000	1.999
2 = Végétation et marécages	1 : 3	1.999	2.000	2.000
3 = Sols nus	2 : 3	1.950	1.999	1.974

Classification d'Avril 2018				
1 = Eaux libres	1 : 2	2.000	2.000	2.000
2 = Végétation et marécages	1 : 3	2.000	2.000	2.000
3 = Sols nus	2 : 3	1.999	2.000	1.999
Classification de Septembre 2018				
1 = Eaux libres	1 : 2	2.000	2.000	2.000
2 = Végétation et marécages	1 : 3	2.000	2.000	2.000
3 = Sols nus	2 : 3	1.999	2.000	1.999

Les résultats de classifications obtenus donnent un aperçu de la répartition des principales classes de la couverture des sols dans la zone lacustre camerounaise du lac Tchad et de son arrière-pays. La figure 95 illustre cette répartition de l'occupation des sols en saison sèche (Mars 1973, Mars 1987, Avril 2000 et Avril 2018), et en saison des pluies (Octobre 1972, Octobre 1987, Août 2000 et Septembre 2018). Les trois principales classes d'occupation du sol sont identifiées (eau libre ; végétation et marécages; et sols nus) et quantifiées (figure 96 et tableau 25).

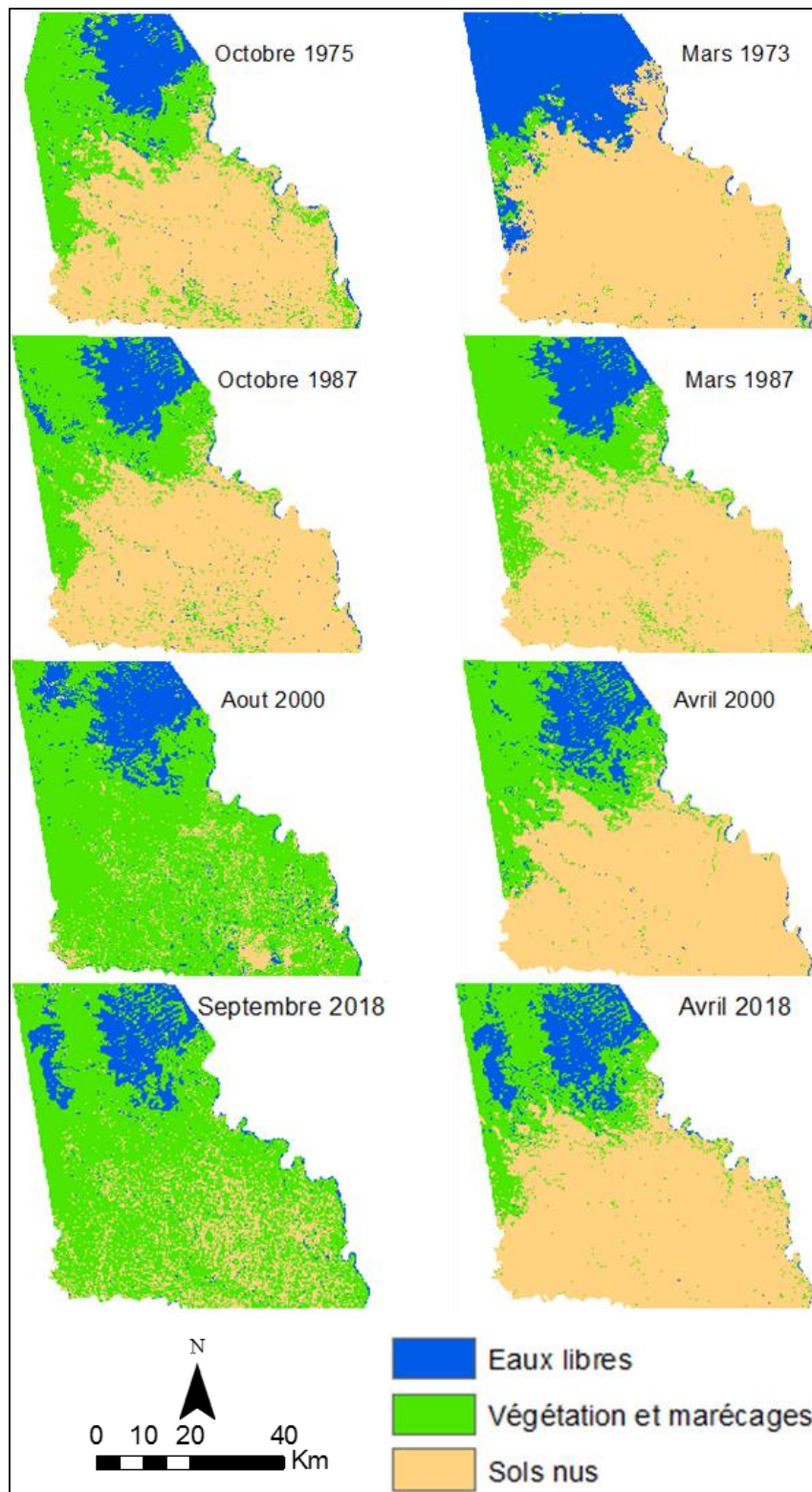


Figure 95 : Occupation des sols de la fenêtre lacustre camerounaise du lac Tchad et de son arrière-pays entre Mars 1973 et Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

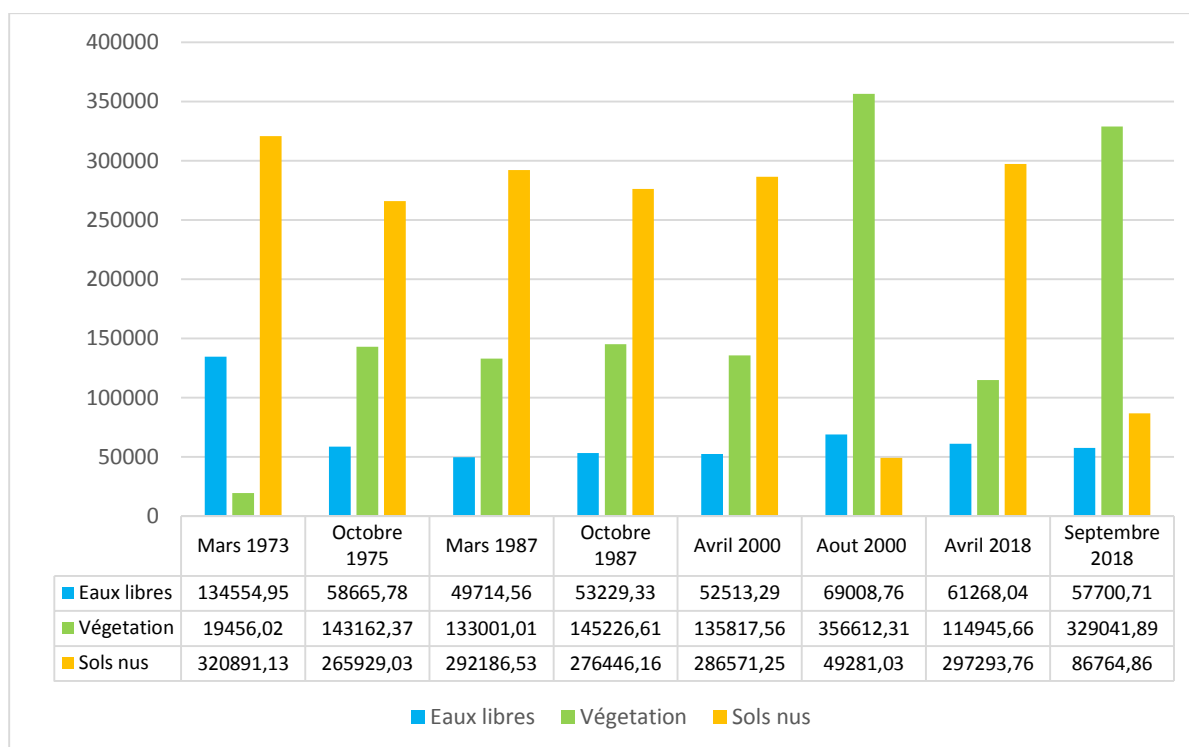


Figure 96 : Variabilités des classes d'occupation entre Mars 1973 et Septembre 2018.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Le tableau 25 donne en pourcentage l'étendue spatiale des classes d'occupation pour les saisons pluvieuses et sèches. Les eaux libres s'étendent sur une superficie moyenne comprise entre 49714,56 ha (10,47%) et 69008,76 ha (14,53%) à l'exception de Mars 1973 où cette couverture s'élève jusqu'à 134554,95 ha (28,33%).

Concernant les deux autres classes, leur répartition spatiale est caractéristique des milieux arides. La végétation est majoritairement présente dans la partie lacustre humide et absente dans les terres émergées de l'arrière-pays notamment en saison sèche (exceptée en Mars 1973 où elle couvre à peine 04,10% (19456,02 ha)). Ses proportions aussi bien en saison des pluies qu'en saison sèche, varient autour de 25% (figure 96). Avec le retour des pluies, les sols nus totalement dénudés en saison sèches se reverdissent rapidement et le couvert végétal atteint environ 70% de la surface d'étude (en 2000 et 2018) (figure 96).

Les sols nus par contre dominent largement l'occupation des sols quelle que soit la saison, et représente plus de la moitié de la zone d'étude avec une occupation supérieure à 56,85% (265929,03 ha) (sauf en août 2000 avec 49 281 ha (10,38%) et en Septembre 2018 avec 174969 ha (36,84%)). La cartographie des classes de végétation (chapitre 3) montre bien que le couvert végétal dans les terres émergées de l'arrière-pays est dominé par la végétation annuelle. C'est pourquoi les sols apparaissent nus en saisons sèches.

Ces résultats montrent d'une part qu'entre la saison sèche et celle des pluies (exemple Août 2000 et Avril 2000), d'importantes modifications spatiales ont lieu entre ces trois

classes d'occupation. D'autre part, les couvertures spatiales des occupations des sols ont évolué notamment entre les saisons des pluies (exemple Octobre 1987 et Août 2000). Ces changements méritent d'être analysés pour établir la dynamique temporelle de l'occupation des sols dans cet espace.

Tableau 25. Étendue spatiale des principales classes d'occupations du sol.

	Octobre 1975		Octobre 1987		Août 2000		Septembre 2018	
Classes d'occupation	Aire (Ha)	Aire (%)	Aire (Ha)	Aire (%)	Aire (Ha)	Aire (%)	Aire (Ha)	Aire (%)
Eaux libres	58665,78	12,54	53229,33	11,21	69008,76	14,53	57700,71	12,15
Végétation et marécages	143162,37	30,61	145226,61	30,58	356612,3	75,09	329041,89	69,29
Sols nus	265929,03	56,85	276446,16	58,21	49281,03	10,38	86764,86	18,27
	Mars 1973		F1987		Avril 2000		Avril 2018	
Classes d'occupation	Aire (Ha)	Aire (%)	Aire (Ha)	Aire (%)	Aire (Ha)	Aire (%)	Aire (Ha)	Aire (%)
Eaux libres	134554,95	28,33	49714,56	10,47	52513,29	11,06	61268,04	12,90
Végétation et marécages	19456,02	4,10	133001,01	28,01	135817,6	28,60	114945,66	24,20
Sols nus	320891,13	67,57	292186,53	61,53	286571,3	60,34	297293,76	62,60

En absence de relevés de terrain sur la zone d'étude, nous nous référons aux cartes existantes issues des travaux antérieurs sur la zone du lac Tchad et au-delà (cartes d'occupations de la fenêtre lacustre camerounaise (Rangé, 2016), carte de la situation moyenne du lac Tchad autour des années 2010 (Lemoalle et Magrin, 2014)) pour valider nos résultats de classification. Les cartes d'occupations de la fenêtre lacustre camerounaise produites par Rangé, (2016) et qui distinguent (les eaux libres, les îles et ilots, les marécages, les terres asséchées et les terres non inondées) sont utilisées pour valider les classifications des années 1973, 1975, 1987 et 2000. La carte de la situation moyenne du lac Tchad autour des années 2010 (Lemoalle et Magrin, 2014) qui identifie quatre classes principales d'occupation (les eaux libres permanentes, les marécages quasi permanents, les marécages irrégulièrement inondées, et les espaces qui ont cessé d'être inondé depuis 1963), est utilisée pour valider la classification de 2018.

Pour cela, nous avons généré sur ces cartes un semis de point aléatoire pour chaque classe d'occupation respectant un échantillonnage proportionnel à la surface des zones cartographiées. En calculant la matrice de confusion, nous avons les valeurs de précision globale et d'indice de kappa pour chaque classification. La précision globale donne en pourcentage le nombre de pixel correctement classifié par rapport au nombre total de

pixel de l'image. Le coefficient de Kappa mesure à quel degré la classification est meilleure qu'une classification opérée aléatoirement (tableau 26).

Tableau 26. Valeurs de précision globale et de Kappa pour les classifications.

	Mars 1973	Octobre 1975	Mars 1987	Octobre 1987	Avril 2000	Août 2000	Avril 2018	Septembre 2018
Précision globale	86,21%	85,88%	95,37%	82,71%	80,35%	97,56%	84,96%	82,44%
Kappa	0,78	0,78	0,93	0,74	0,70	0,96	0,77	0,73

4.1.2.2. Les Dynamiques spatio-temporelles de l'occupation des sols entre 1973 et 2018

a. Les changements annuels de l'occupation des sols

Le graphique ci-dessous, (figure 97) illustre les évolutions au cours de l'année de l'occupation des sols. Les différences spatiales sont obtenues en croisant pour la même année l'image satellite de saison sèche (Mars ou Avril) et l'image de saison des pluies (août Septembre ou Octobre). Par conséquent, en 1987, 2000 et 2018, les résultats mettent en exergue les changements intervenus de la saison sèche à la saison des pluies (Figure 97) (cette dynamique ne peut être établie entre Mars 1973 et Octobre 1975 puisqu'il s'agit de deux années différentes).

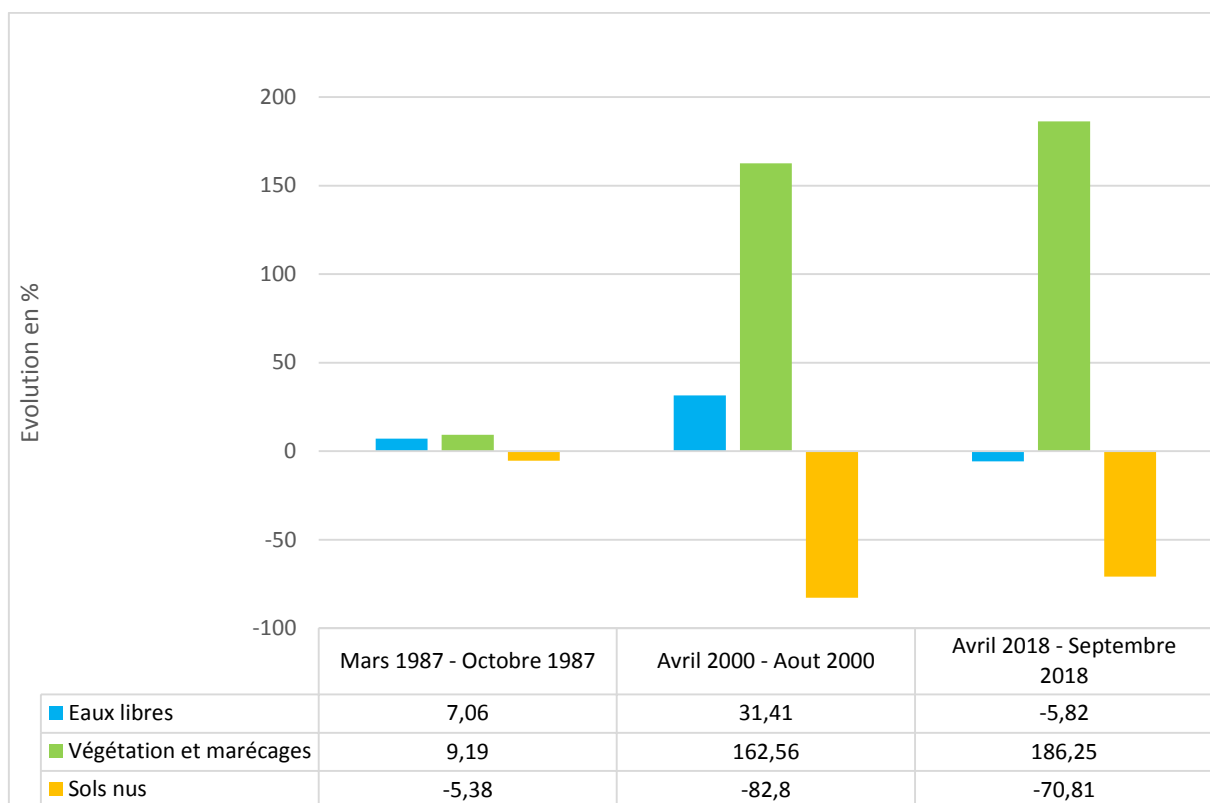


Figure 97 : Evolutions annuelles de l'occupation des sols en 1987, 2000 et 2015.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

En 1987, la couverture spatiale des sols entre la saison sèche est celle des pluies n'est pas si différente (figure 98). Les variations de superficies des classes d'occupation entre les deux saisons n'excèdent pas 10% de superficie par classe d'occupation. En effet, en cette année les sécheresses sahéliennes sévissent encore et les déficits pluviométriques limitent le développement du couvert végétal annuel. C'est pourquoi, l'augmentation du couvert végétal annuel est faible et correspond à peine à 9 % soit un supplément de 12225,6 hectares (figure 97).

En revanche, à partir des années 2000, la différence se fait vraiment ressentir entre l'occupation de saison sèche et celle des pluies (figure 97). On observe une amélioration significative de la couverture végétale correspondant à une augmentation de 220794,75 hectares en 2000 (162,56%) et 214096,23 hectares en 2018 (186,25%). Cette augmentation se conjugue à la réduction des sols nus, soit une perte de 237290,22 hectares (82,8 %) en 2000 et 210528,9 hectares (70,81%) en 2018. Ce qui veut dire qu'en 2000 et 2018, la pluviométrie est suffisamment significative pour permettre la croissance de la végétation annuelle (figure 98). Celle-ci se développe particulièrement sur les sols nus et entraîne la réduction de leurs superficies.

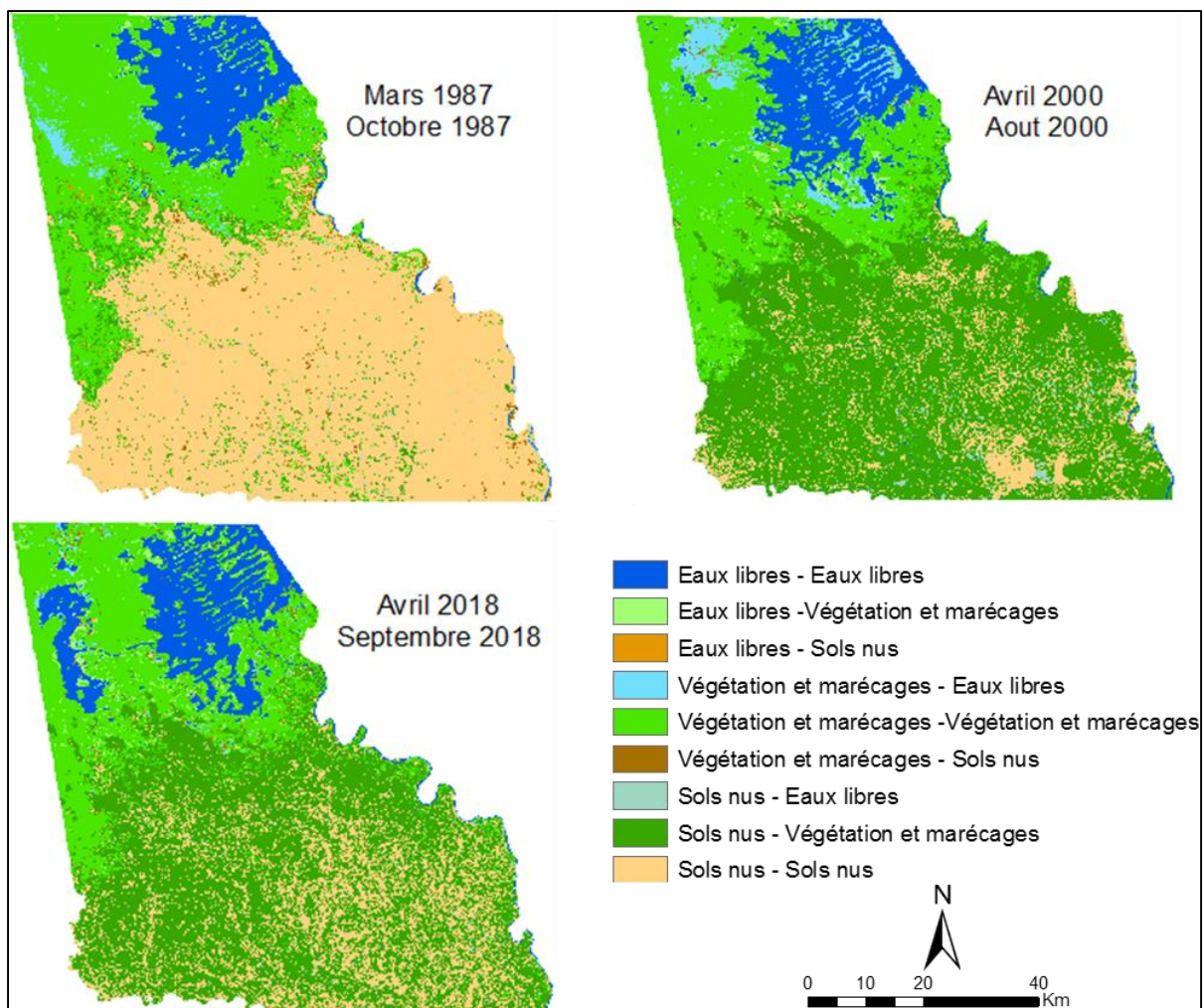


Figure 98 : Carte des changements annuels de l'occupation du sol en 1987, 2000 et 2018.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

b. Les dynamiques de saisons sèches entre 1973 et 2018

Les dynamiques spatiales entre saisons sèches sont établies en calculant les différences d'occupations entre les images de saisons sèches. La cartographie de Mars 1973 est croisée à celle de Mars 1987, la carte de Mars 1987 est ensuite croisée avec celle d'Avril 2000, et enfin la carte d'Avril 2000 est croisée avec celle d'Avril 2018.

Les cartes de détections de changements entre les saisons sèches des années 1973, 1987, 2000 et 2018 sont représentées à la figure 100 et les valeurs contenues dans la figure 99 et le tableau 27 permettent d'illustrer ces changements.

Entre Mars 1973 et Mars 1987, il se produit principalement une augmentation très importante de la superficie de végétation et de marécages correspondant à 583,5% soit 113544,99 Ha. Ce changement est principalement causé par la réduction des eaux du lac Tchad qui a eu lieu au début des grandes sécheresses sahéliennes. C'est ce que Lemoalle dans Magrin, Lemoalle et Pourtier, (2015) décrit comme le passage du lac Tchad de son état de Moyen lac Tchad à l'état de Petit lac Tchad et qui s'est produit en 1973 par un

assèchement important des eaux libres. Dans notre espace d'étude les eaux libres qui se retirent sont alors remplacées par la végétation marécageuse.

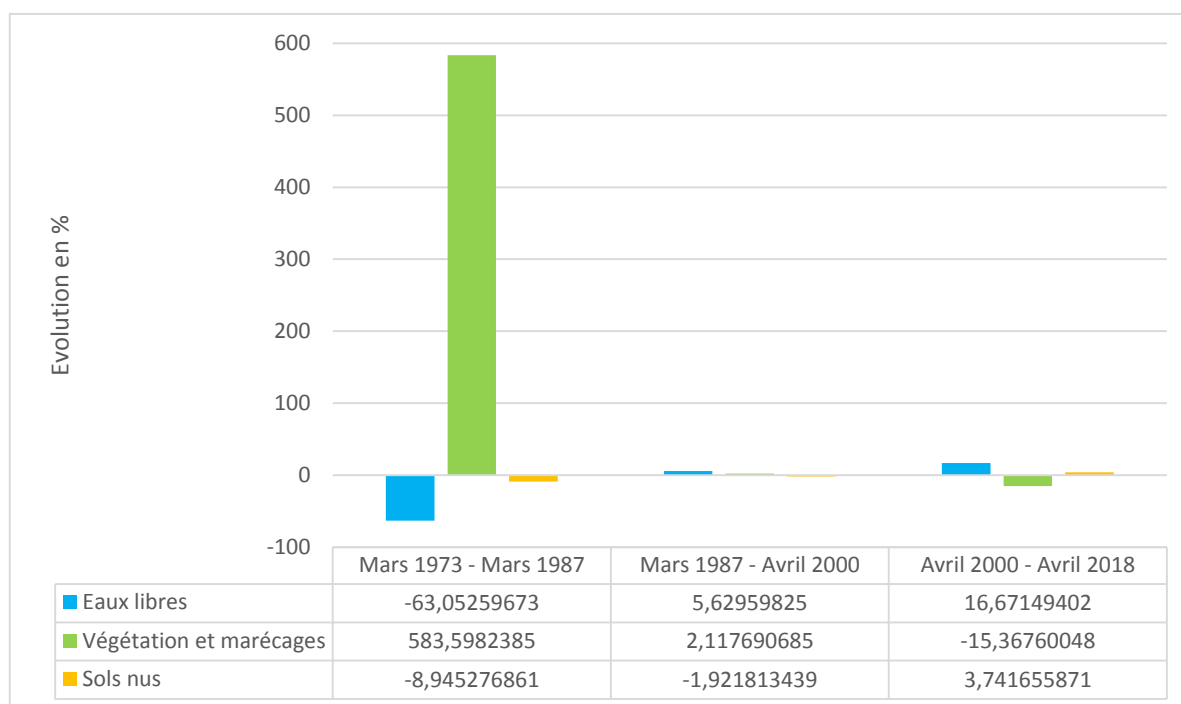


Figure 99 : Evolutions de l'occupation du sol entre saisons sèches. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Les deux autres périodes (de Mars 1987 à Avril 2000 et d'Avril 2000 à Avril 2018) sont plus stables, avec des variations de superficies par classes d'occupation de moins de 6% entre Mars 1987 et Avril 2000, et moins de 17% d'Avril 2000 à Avril 2018 (figure 99). Ce qui montre que l'occupation des sols en saison sèche ne change pas de manière significative peu importe que l'on soit dans une année sèche ou pas. L'absence de pluies en saison sèche justifie cette stabilité.

Tableau 27. Superficies des changements d'occupation du sol entre saisons sèches.

Classes	Mars 1973		Mars 1987		Avril 2000	
	Aire (Ha)	Aire (%)	Aire (Ha)	Aire (%)	Aire (Ha)	Aire (%)
Eaux libres - Eaux libres	49241,34	10,37	39936,87	8,41	41577,3	8,85
Eaux libres -Végétation et marécages	82007,28	17,27	9689,31	2,04	9424,26	2,01
Eaux libres - Sols nus	3306,33	0,70	88,38	0,02	1009,08	0,21
Végétation et marécages - Eaux libres	117,18	0,02	11447,82	2,41	18687,42	3,98

Végétation et marécages -Végétation et marécages	13505,22	2,84	108408,24	22,83	98299,89	20,93
Végétation et marécages - Sols nus	5833,62	1,23	13144,95	2,77	16920,18	3,60
Sols nus - Eaux libres	356,04	0,07	1128,6	0,24	311,85	0,07
Sols nus - Végétation et marécages	37488,51	7,89	17720,01	3,73	6749,28	1,44
Sols nus - Sols nus	283046,58	59,60	273337,92	57,56	276596,1	58,90

En revanche entre Avril 2000 et Avril 2018, l'augmentation de 16,67% (8754,75 Ha) de la superficie des eaux libres, est simultanée à la diminution de 15,36% (20871,9 Ha) de la surface de végétation et marécages. Ce qui traduit le remplacement de la végétation par les eaux libres dans l'espace lacustre. Ce changement a été précédemment mis en évidence par la cartographie de l'évolution du couvert végétal avec les images MODIS MOD13Q1 (figures 67 et 71).

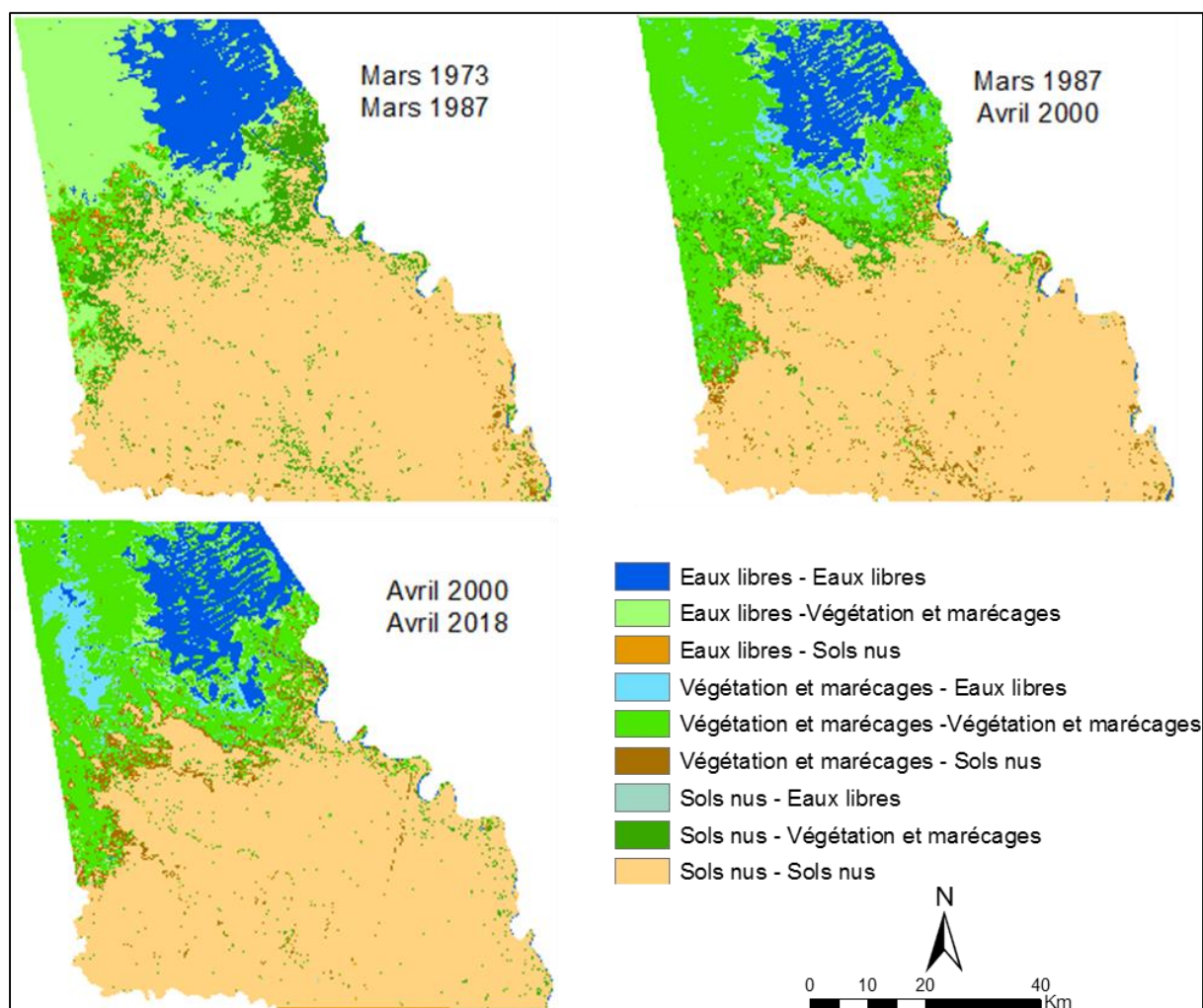


Figure 100 : Carte des changements de l'occupation du sol entre saisons sèches.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

c. Les dynamiques de saisons des pluies entre 1973 et 2018

Les dynamiques spatiales entre saisons pluvieuses sont établies par les différences d'occupations entre les images de saisons pluvieuses. La cartographie d'Octobre 1975 est croisée à celle d'Octobre 1987, la carte d'Octobre 1987 est ensuite croisée avec celle d'Août 2000, et enfin la carte d'Août 2000 est croisée avec celle de Septembre 2018 (figure 102).

Les figures 101 et 102 illustrent les évolutions des superficies de l'occupation des sols pendant les saisons des pluies des années 1975, 1987, 2000 et 2018, et les valeurs contenues dans le tableau 28 quantifient ces changements.

Entre Octobre 1975 et Octobre 1987, les changements par classe d'occupation sont très faibles. En dehors de la réduction de 9,2% (soit 5436,45 Ha) des eaux libres, les autres classes ne varient presque pas (figure 101). Ces deux années appartiennent aux périodes de grandes sécheresses. Les déficits pluviométriques étant importants, l'occupation des sols et leurs dynamiques sont par conséquent semblables à celles de saisons sèches caractérisées par la stabilité de leurs occupations. Par ailleurs, la réduction observée des surfaces en eaux et l'augmentation des sols nus (10517,13 Ha) traduisent de l'aridification des écosystèmes au cours de cette période.

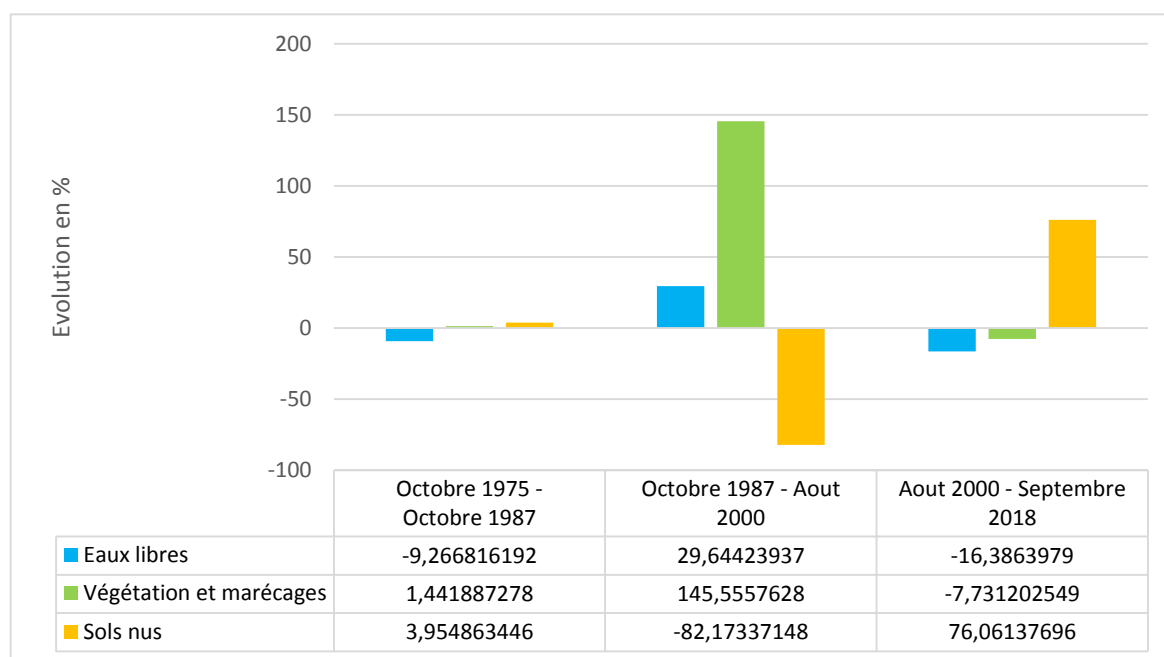


Figure 101 : Evolutions de l'occupation du sol entre saisons pluvieuses. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

En revanche, les évolutions des superficies des trois classes d'occupation entre Octobre 1987 et Août 2000 illustrent parfaitement le reverdissement observé au Sahel entre les années 1980 et 2000 (Eklundh et Olsson, 2003; Anyamba et Tucker, 2005). Les eaux libres augmentent de 30% soit 15779,43 hectares, les végétations et marécages augmentent de

145 % soit 211385,7 hectares, et les sols nus se réduisent de 82% soit 227165,13 hectares (figure 101). Cette dynamique spatiale est le résultat de l'amélioration de la pluviométrie observée au Sahel au cours de la décennie 1990 (Ali et Lebel, 2009).

Tableau 28. Superficies des changements d'occupation du sol entres saisons pluvieuses.

Classes	Octobre 1975		Octobre 1987		Août 2000	
	Aire (Ha)	Aire (%)	Aire (Ha)	Aire (%)	Aire (Ha)	Aire (%)
Eaux libres - Eaux libres	46484,28	9.94	43649,82	9.19	42807,78	9,12
Eaux libres -Végétation et marécages	9552,06	2.04	9437,94	1.99	23035,59	4,91
Eaux libres - Sols nus	2611,44	0.56	141,57	0.03	2500,56	0,53
Végétation et marécages - Eaux libres	5119,29	1.09	21462,66	4.52	13484,34	2,87
Végétation et marécages -Végétation et marécages	112921,2	24.15	121830,66	25.65	283808,16	60,44
Végétation et marécages - Sols nus	25074,63	5.36	1933,29	0.41	55194,57	11,75
Sols nus - Eaux libres	1233,72	0.26	3896,28	0.82	322,2	0,07
Sols nus - Végétation et marécages	16125,75	3.45	225343,71	47.45	20214,45	4,30
Sols nus - Sols nus	248480,19	53.14	47206,17	9.94	28207,71	6,01

Entre Août 2000 et Septembre 2018, c'est surtout l'augmentation des sols nus qu'il faut remarquer (figure 101). La superficie de cette classe d'occupation croit de 76% soit 37483,83 hectares. Ce changement confirme les résultats de la corrélation de Mann-kendall qui montraient dans l'arrière-pays une réduction spatiale importante de la couverture végétale. Cette augmentation de sols nus s'explique par l'exploitation des vertisols de l'arrière-pays pour les cultures de contre saisons et l'exploitation des pâturages.

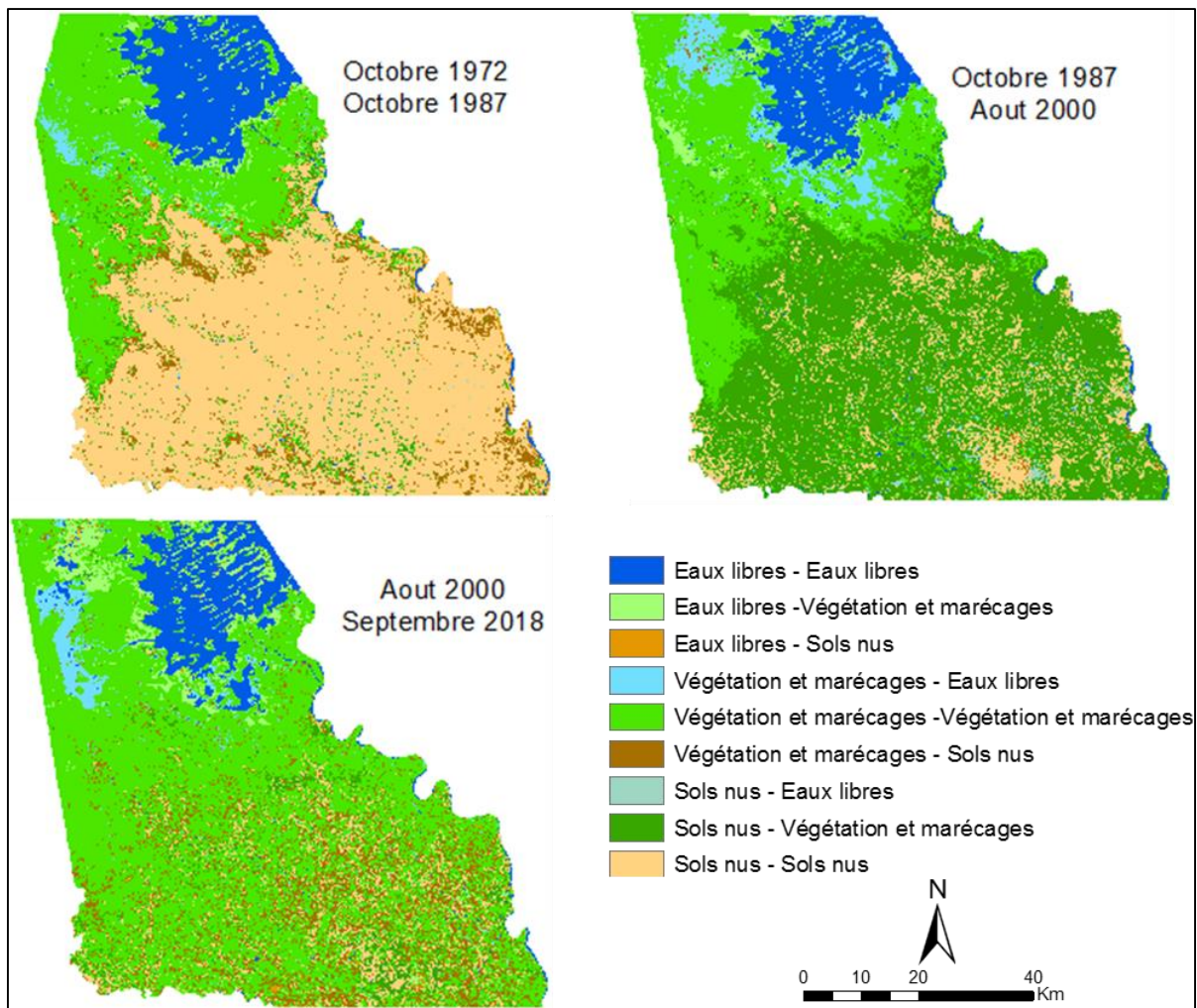


Figure 102 : Carte des changements de l'occupation du sol entre saisons pluvieuses.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

4.1.2.3. Résumé des dynamiques spatiales d'évolution de l'occupation des sols

La cartographie de l'espace d'étude entre 1973 et 2018 permet de constater que l'occupation du sol est dominée par les sols nus (Mars, 1973, Octobre, 1987, Avril 2018, etc.). Les eaux libres occupent en moyenne 15% du territoire d'étude, la végétation et marécages 35%, et les sols nus environ 50 %.

Les changements dans l'occupation des sols sont étroitement liés aux conditions climatiques, et confirment le reverdissement observé au Sahel pendant les années 1990 par Eklundh et Olsson, (2003) ou par Anyamba et Tucker, (2005). En effet, entre Octobre 1987 et Août 2000 les superficies des eaux libres et celles de la végétation et marécages augmentent respectivement de 30% et 145 %, au contraire de celles de sols nus qui diminuent de 82%. D'autre part, de la saison sèche à la saison de pluies les superficies des classes d'occupations sont sensiblement pareilles en 1987. Par contre en 2000 et 2018

l'augmentation de la végétation conjuguée à la réduction des sols nus est très importante lors du passage de la saison sèche à celle des pluies. Ces résultats démontrent que les classes d'occupation sont de très bon marqueurs géographiques de l'évolution de l'occupation des sols dans notre espace d'étude au même titre que les classes de végétations obtenues précédemment.

Au-delà de ces changements qu'ils mettent en évidence, leur analyse saisonnière est tout aussi enrichissante et permet de compléter les observations obtenues de la cartographie du couvert végétal entre 2000 et 2018 à partir des images MODIS MOD13C1.

Les cartes de saisons sèches permettent en effet de se concentrer uniquement sur le couvert lacustre puisque la végétation annuelle est absente de l'arrière-pays. Les résultats montrent que les surfaces des classes d'occupation en saisons sèches ne varient pratiquement pas aussi bien pendant les périodes de sécheresses (1970-1980) que pour les périodes humides (à partir de 2000).

En revanche, les images de saisons des pluies permettent véritablement de voir la dynamique de reverdissement, et montrent que cette dynamique est particulièrement due au couvert végétal annuel de l'arrière-pays qui devient plus important en saisons pluvieuses à partir de 2000.

Par ailleurs, les changements entre saison des pluies de 2000 et 2018 mettent en évidence l'influence des mises en valeurs des espaces dans le dynamisme de l'occupation des sols. Cette influence nécessite d'être analysée et les images SPOT 6 de meilleure résolution spatiale sont sollicitées à cet effet.

4.1.3. Cartographie multi-temporelle et multi-capteur de l'utilisation des sols des rives camerounaises du lac TCHAD et de leur arrière-pays entre 1984 et 2018

La pêche est avec l'agriculture et l'élevage les principales activités génératrices de revenus dans notre milieu d'étude et constituent de fait les principaux modes de valorisation de l'espace. Il faut inclure à ces modes de valorisation la répartition des espaces habités pour obtenir l'essentiel des composantes de l'empreinte écologique humaine dans ce milieu. Par conséquent, pour étudier l'utilisation anthropique de l'espace et son influence sur l'environnement à partir des images satellites, il faut absolument s'intéresser à l'emprise spatiale des activités agricoles et pastorales, et à la répartition des zones urbanisées.

Les études multi-temporelles du couvert végétal et de l'occupation des sols ont permis de mettre en évidence les dynamiques de reverdissement de l'environnement après les longues périodes de sécheresses, en identifiant les marqueurs géographiques naturels des dynamiques spatiales et temporelles (végétation de décrue, végétation annuelles, végétation pérenne, etc.). A travers la cartographie de l'utilisation des sols il est question

de s'intéresser cette fois aux marqueurs ou observables anthropiques. L'objectif est de déterminer les influences des changements climatiques et environnementaux sur les modes de valorisation de ce milieu. L'hypothèse que les améliorations des conditions environnementales à travers l'augmentation de la pluviométrie et le reverdissement, favorisent l'expansion de l'exploitation des espaces peut être émise à ce stade.





Les données relatives aux influences des modes d'utilisations et d'exploitations anthropiques de l'espace dans ce milieu n'ont pu être accessibles dans le cadre de cette thèse. Elles sont donc à produire compte tenu de leur importance dans les objectifs de cette recherche.


La classification des images de très haute résolution spatiale SPOT 6 va nous permettre de cartographier les emprises spatiales des espaces agricoles et urbanisés présents dans la zone d'étude (pour ensuite déterminer et suivre leurs évolutions spatio-temporelles).

Le calcul d'indices spectraux de végétation va permettre, l'estimation des zones pastorales.

L'analyse diachronique de l'occupation des sols ayant déjà permis de s'intéresser aux espaces naturels, nous nous focalisons pour cette cartographie sur les principaux espaces artificialisés identifiables sur nos images à savoir les surfaces agricoles et bâties (tableau 29).

Tableau 29. Description des classes d'utilisation des sols.

Classes d'utilisation	Description	Illustration
Agriculture des rives	Essentiellement pratiquée sur les rives du lac Tchad, il s'agit de l'agriculture de décrues dont la pratique est rythmée par les fluctuations des eaux du lac.	
Agriculture fluviale	Constituée des espaces irrigués et des maraichers qui occupent les abords des fleuves (Chari, Serbewel, TAF-TAF).	
Agriculture arrière-pays	Présente sur les terres émergées de l'arrière-pays, elle est en majorité destinée à la production céréalière grâce aux cultures de saisons de pluies et de contre-saisons.	
Agriculture SEMRY	Il s'agit des périmètres industriels rizicoles de la SEMRY (Secteur Expérimental de Modernisation de la Riziculture de Yagoua).	

Bâtis	Il s'agit de tous les types d'habitation identifiables à cette résolution spatiale. On y retrouve les habitations modernes recouvertes de feuilles de tôles et les habitations construites en matériaux locaux qui sont plus difficiles à identifier.	
-------	---	---

4.1.3.1. Méthodologie de cartographie de l'agriculture et du bâti

L'identification des surfaces agricoles et bâties requiert un niveau de précision spatiale que seules les images SPOT 6 (1,5 m) possèdent, parmi les images satellites à notre disposition. Malheureusement elles ne sont disponibles qu'à une date (2017), et en plus en saison sèche (Avril). L'analyse diachronique de l'occupation des sols montre pourtant que les changements environnementaux les plus importants et les plus perceptibles se produisent en saison des pluies. D'autre part, si les maraichers sont présents aux bords des fleuves quasiment toute l'année, autant que les cultures de décrues qui se pratiquent également toute l'année sur les rives du lac Tchad grâce au système de rotation des cultures, l'agriculture dans l'arrière-pays en revanche, se pratique en saison des pluies (à partir de Juin/Juillet) ou en contre saison (à partir d'Août /Septembre) pour ce qui est du Muskwari. Il est donc difficile sur une image de cartographier toutes les formes d'agriculture, en particulier sur celle d'Avril. L'intérêt étant d'extraire les surfaces agricoles lorsqu'elles sont à leur maximum spatial, nos cartographies s'appliquent sur des images de saisons pluvieuses.

La démarche adoptée pour cartographier l'activité agricole et établir celle des années antérieures consiste alors à extraire les masques correspondant aux différents types d'utilisations agricoles et de bâtis (figure 104). Pour cela, une première classification supervisée par l'algorithme SVM est appliquée à l'image SPOT 6. Chaque classe d'utilisation est ensuite séparée de l'image de classification et convertie en fichier vecteur (polygone). Les polygones sont exportés sur Google Earth pour être numérisés et ainsi améliorer la prise en compte de tous les espaces qui présentent des traces d'exploitation agricole de saison de pluie ou de saison sèche, et en tenant compte de la proximité au lac et avec les fleuves (figure 103). Les masques obtenus sont ensuite appliqués aux images Landsat et Sentinel-2 pour cartographier l'agriculture et le bâti.

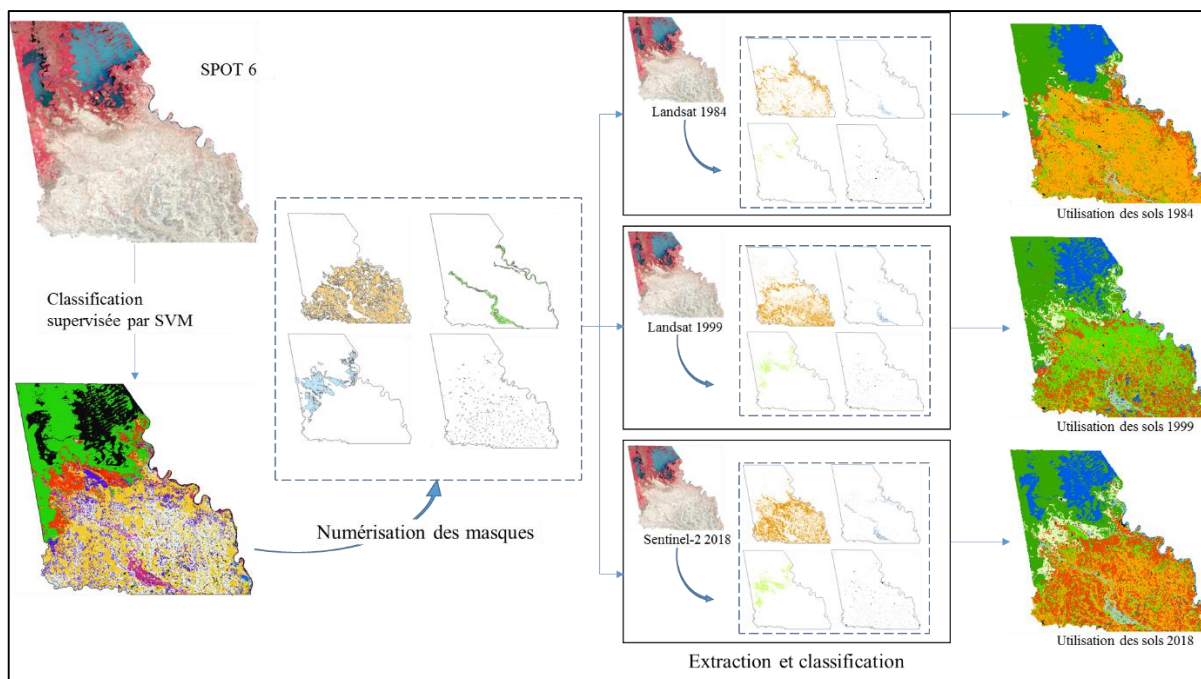


Figure 103 : Extraction des masques agricoles et classification de l'utilisation des sols.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

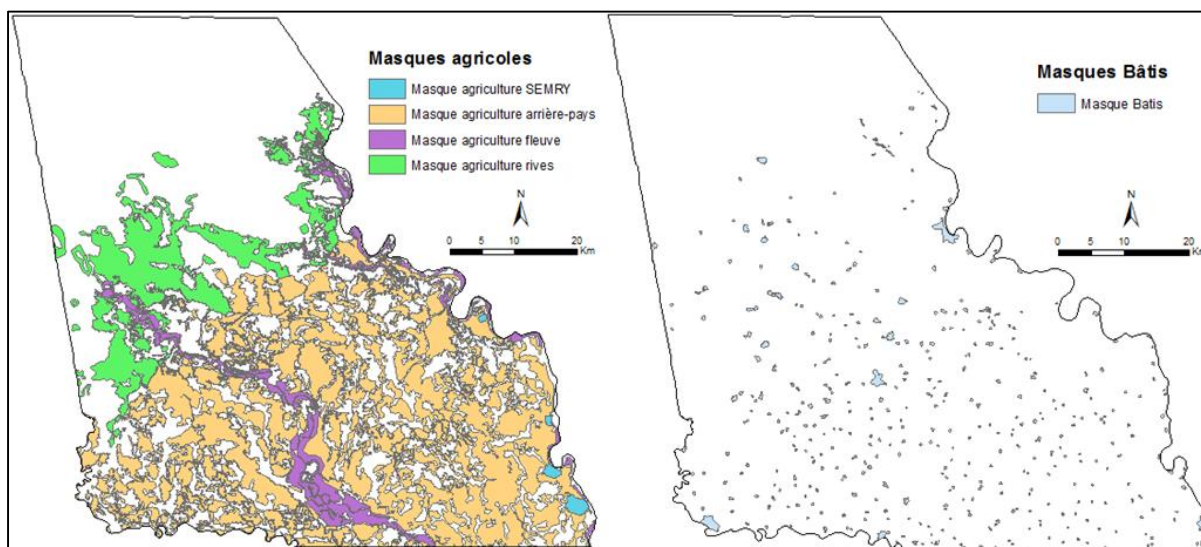


Figure 104 : Répartition des masques agricoles et de bâtis sur la zone d'étude.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Les images satellites utilisées ensuite pour cartographier l'utilisation des sols sont les images Landsat-5 d'Octobre 1984, Landsat-7 d'Octobre 1999, et Sentinel-2 de Septembre 2018. Le choix des dates est conditionné par le contexte climatique, la disponibilité des images satellites et leur résolution spatiale. Si l'éventail des données disponibles est plus important pour l'année 2018 avec les images Sentinel-2, ce n'est pas le cas pour les années antérieures (1999 et 1984) avec les images Landsat-5 et 7, ce qui explique les décalages

mensuels des dates utilisées. Par ailleurs, la résolution spatiale des images Landsat MSS à 60 m est trop grossière pour permettre une telle cartographie.

4.1.3.2. Répartition de l'utilisation des sols entre 1984 et 2018

Les résultats cartographiques donnent un aperçu de la répartition des surfaces valorisées dans la fenêtre lacustre camerounaise du lac Tchad et son arrière-pays entre 1984 et 2018. La figure 105 illustre cette répartition en Octobre 1984, Octobre 1999, et en Septembre 2018. Quatre classes d'occupation du sol (Eaux libres ; Végétation lacustre, Végétation de l'arrière-pays, et Sols nus) et cinq classes d'utilisation (Agriculture des rives, Agriculture fluviale, Agriculture de l'arrière-pays, Agriculture de la SEMRY, et Bâtis) sont à identifier.

L'image d'Octobre 1984 se situe dans un contexte climatique particulier marqué par les sécheresses des années 1980, et l'année 1984 est régulièrement citée comme l'une des plus sèches au Sahel à cause du déficit pluviométrique. La végétation présente est essentiellement concentrée dans l'espace lacustre et l'arrière-pays est dominé par les sols nus (figure 105). L'activité agricole est très peu pratiquée. L'ensemble des surfaces agricoles occupent 62936,73 hectares soit 13,29% du territoire, et c'est l'agriculture de l'arrière-pays avec 48827,88 hectares qui est la plus dominante spatialement. Les espaces agricoles aux rives du lac Tchad occupent 7298,28 hectares, et aux rives des fleuves ces surfaces sont estimées à 6755,13 hectares.

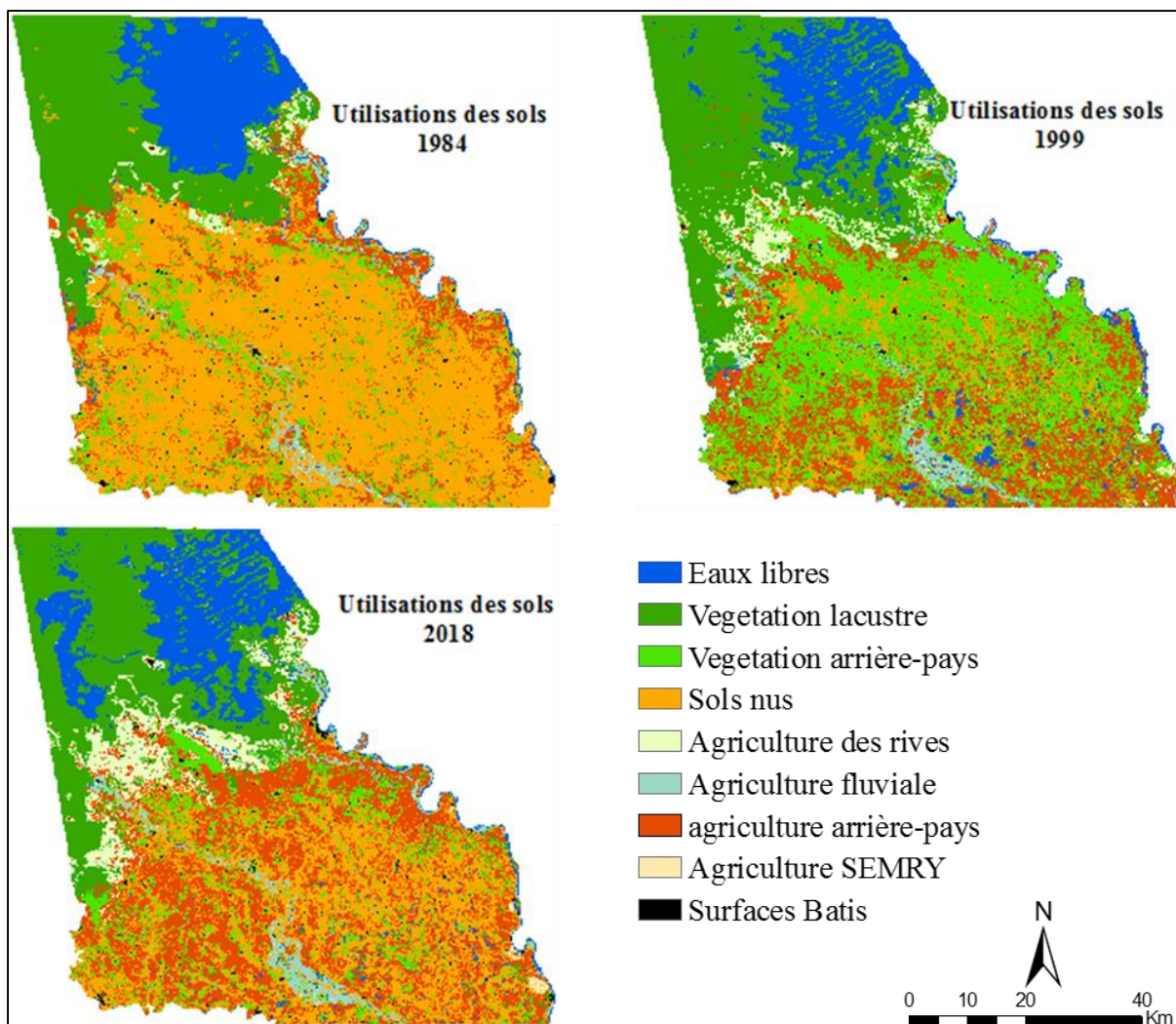


Figure 105 : Les types de cultures et les surfaces agricoles en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

En Octobre 1999, le contexte climatique est plus favorable, l'amélioration de la pluviométrie entraîne notamment l'augmentation de la végétation de l'espace lacustre, l'apparition des eaux dans l'arrière-pays, et la substitution partielle des sols nus de l'arrière-pays par la végétation annuelle (figure 105). L'exploitation agricole des espaces connaît également une expansion, dans la mesure où l'ensemble des espaces agricoles occupent à présent 121132,68 Ha soit l'équivalent de 25,57% du territoire (figure 106). L'agriculture de l'arrière-pays reste dominante avec 92204,61 Ha, suivie des exploitations agricoles aux rives du lac 19817,55 Ha, et de celles aux abords des fleuves 8777,22 Ha.

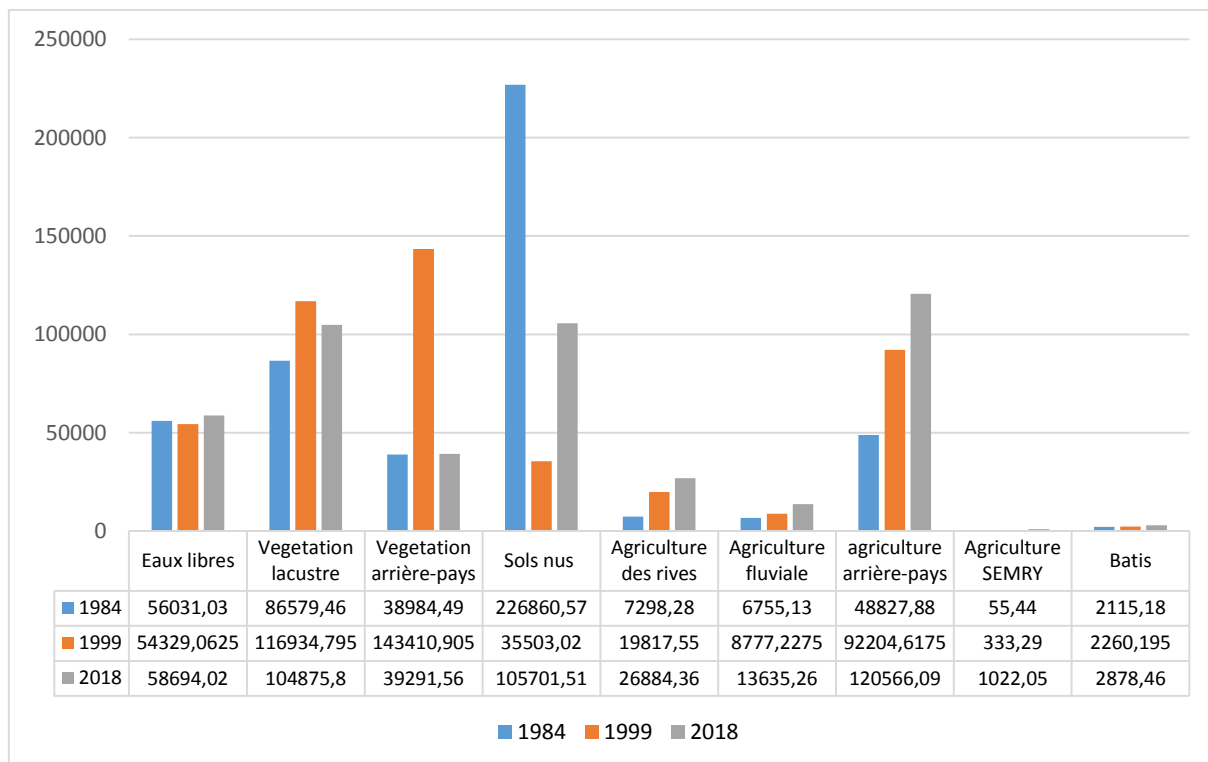


Figure 106 : Variabilités des classes d'utilisation en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Les conditions climatiques en 2018 sont plus semblables à celles de 1999 qu'à celles de 1984. La végétation lacustre et les eaux libres sont restées plus ou moins stables, mais la végétation annuelle de l'arrière-pays régresse et les sols nus augmentent (figure 106). Concernant les surfaces agricoles elles occupent un espace total estimé à 162107,76 Ha soit 34,23% du territoire d'étude. Dans ce total, l'agriculture de l'arrière-pays occupe 120566,09 ha, l'agriculture aux rives du lac couvre 26884,36 Ha et celle aux bords des fleuves correspond à 13635,26 Ha.

Cette cartographie montre que le reverdissement de la zone d'étude s'est accompagné par une consommation croissante des espaces pour les besoins agricoles (figures 105 et 106), et c'est particulièrement dans l'arrière-pays que les surfaces agricoles sont mises en exploitation. En effet, les superficies agricoles dans l'arrière-pays passent de 48827,88 HA en 1984 à 92204,61 Ha en 1999, et à 120566,09 Ha en 2018 (figure 107), et occupent pour les trois années plus de 70% de l'espace total agricole. Dans l'analyse diachronique de l'évolution de l'occupation des sols, c'est précisément dans l'arrière-pays que le reverdissement est perceptible grâce notamment à la végétation annuelle. Ce qui prouve que l'amélioration des conditions environnementales favorise l'expansion de l'agriculture dans cet espace. L'agriculture de l'arrière-pays apparaît donc comme un premier observable à partir duquel l'empreinte écologique humaine est mise en évidence dans notre milieu d'étude.

L'analyse détaillée des dynamiques spatiales et temporelles par classes d'utilisation des sols va permettre d'identifier les autres observables anthropiques des principaux changements opérés entre 1984 et 2018 dans cet espace.

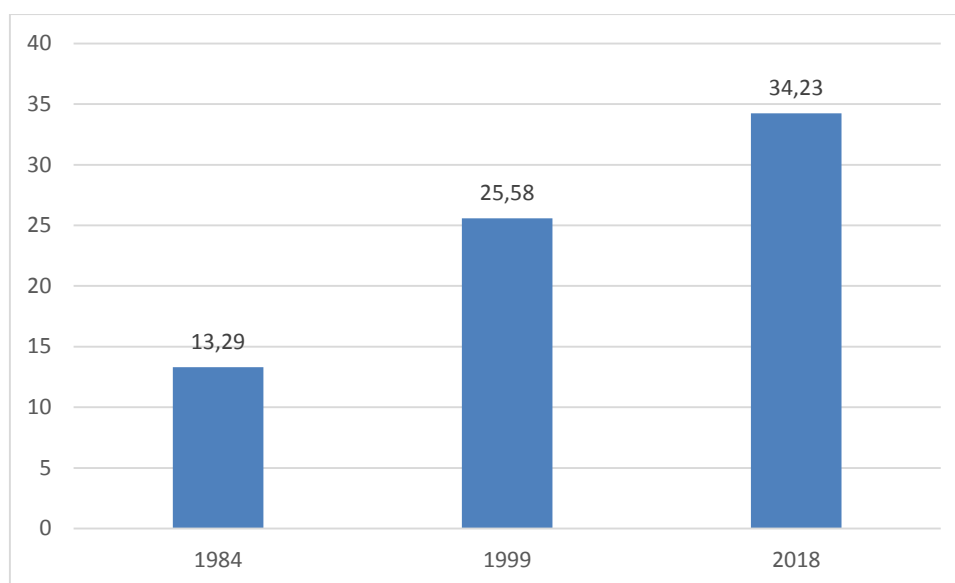


Figure 107 : Evolutions en pourcentage des espaces agricoles entre 1984 et 2018.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

4.1.3.3. Les évolutions spatio-temporelles des utilisations des sols des rives camerounaises du lac Tchad et de leur arrière-pays entre 1984 et 2018

Les cartes et les matrices de changements nous servent à analyser de façon plus précise les dynamiques spatiales opérées par classes d'utilisation entre 1984 et 2018. Les premières servent à spatialiser et localiser les différents changements, et les secondes permettent de les quantifier. Par ce moyen il devient alors possible de distinguer les espaces restés inchangés, des espaces ayant subi des modifications au cours du temps.

a. Les changements des utilisations des sols entre 1984 et 1999

La carte des changements d'utilisation des sols entre 1984 et 1999 (figure 108) est obtenue en croisant la carte d'utilisation des sols de 1984 à celle de 1999. Par conséquent cette carte et la matrice de changement qui lui est associée (tableau 30) mettent en exergue les changements intervenus d'Octobre 1984 à Octobre 1999.

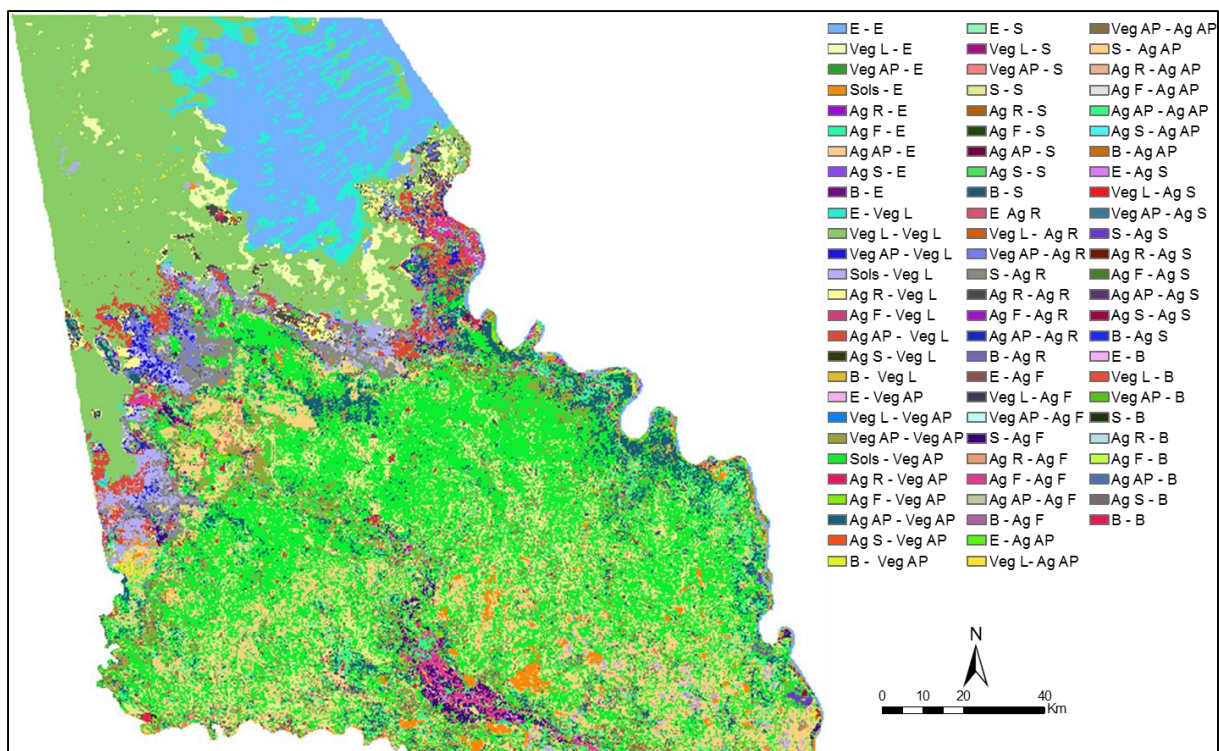


Figure 108 : Carte des changements des utilisations des sols entre 1984 et 1999.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Les surfaces restées inchangées constituent au total 40,46 % de l'espace d'étude. Il s'agit principalement des eaux libres et de la végétation lacustre qui comptent pour plus de la moitié de ce total (tableau 30) et se trouvent dans la zone lacustre (figure 108). Parmi les changements, le plus important en terme de superficie est le passage des sols nus en 1984 à la végétation annuelle en 1999 ce qui représente 25,35 % de l'espace d'étude. C'est le résultat de l'amélioration des conditions climatiques observé entre 1984 et 1999 avec l'augmentation de la pluviométrie.

Concernant les classes d'utilisation, les changements les plus significatifs sont observés à travers 4,32% de l'espace d'étude qui changent d'agriculture de l'arrière-pays en végétation de l'arrière-pays ; 0,83% de l'espace qui passe d'agriculture des rives en végétation lacustre ; et 0,39% qui passe d'agriculture fluviale à végétation de l'arrière-pays. Comme hypothèses pour expliquer ces changements nous avons d'une part la montée des eaux du lac qui a conduit à l'inondation des espaces agricoles au tour du lac, et d'autre part les mises en jachères.

Tableau 30. Matrice de transition des classes d'utilisation des sols entre 1984 et 1999.

Occupation en 1999									
Eaux libres	Végétation lacustre	Végétation arrière-pays	Sols nus	Agriculture des rives	Agriculture fluviale	agriculture arrière-pays	Agriculture SEMRY	Bâties	Total général

Occupation en 1984	Eaux libres	8,84	2,78	0,01	0,00	0,01	0,00	0,09	0,00	0,00	11,73
	Végétation lacustre	1,25	16,75	0,01	0,00	0,07	0,00	0,16	0,00	0,00	18,25
	Végétation arrière-pays	0,12	0,56	4,34	0,60	0,66	0,07	1,85	0,03	0,02	8,25
	Sols nus	1,41	2,13	25,35	5,45	2,22	0,70	10,60	0,10	0,05	48,01
	Agriculture des rives	0,02	0,83	0,06	0,00	0,56	0,04	0,02	0,00	0,00	1,54
	Agriculture fluviale	0,03	0,04	0,39	0,01	0,05	0,89	0,01	0,01	0,00	1,43
	agriculture arrière-pays	0,26	1,91	4,32	0,14	0,23	0,02	3,44	0,00	0,02	10,33
	Agriculture SEMRY	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
	Bâtis	0,00	0,00	0,08	0,09	0,00	0,00	0,09	0,00	0,18	0,45
	Total général	11,94	24,99	34,56	6,29	3,80	1,73	16,27	0,15	0,27	100,00

b. Les changements des utilisations des sols entre 1984 et 1999

La carte des changements d'utilisation des sols entre 1999 et 2018 (figure 109) est obtenue également par le croisement de la carte d'utilisation des sols de 1999 à celle de 2018. Par conséquent la carte et la matrice de changement (tableau 31) montrent les dynamiques spatiales intervenues d'Octobre 1999 à Septembre 2018.

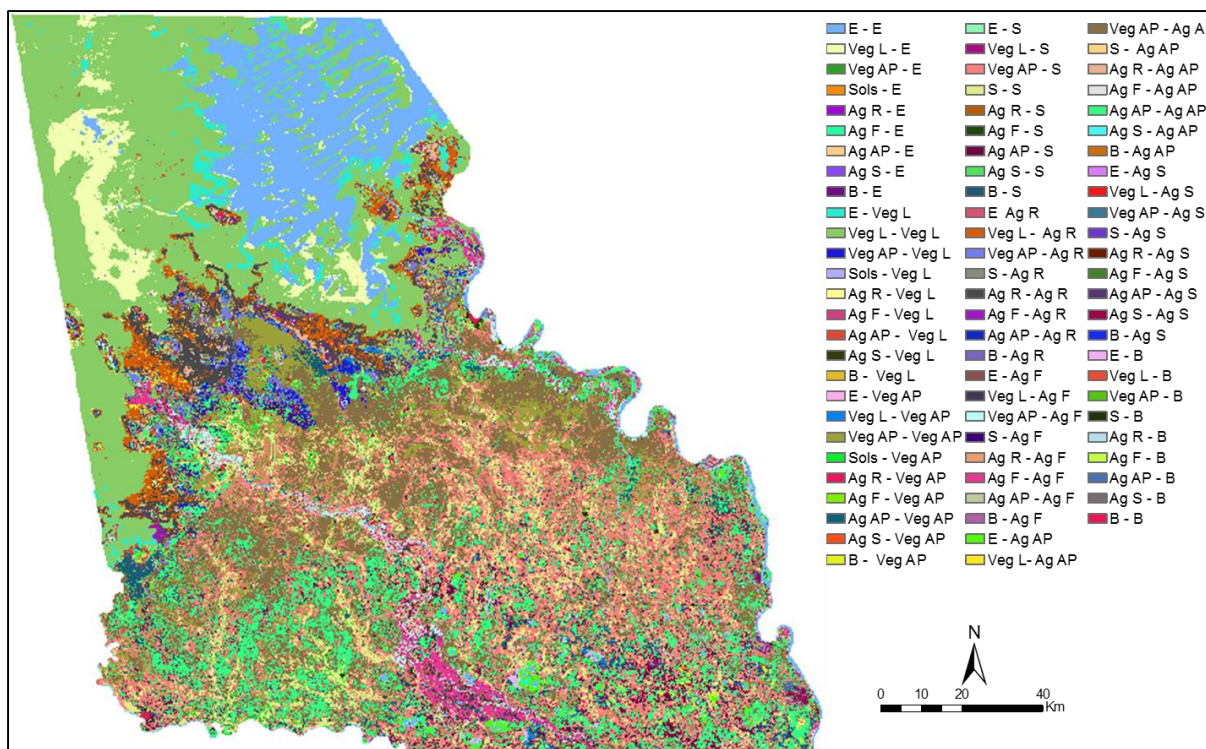


Figure 109 : Carte des changements des utilisations des sols entre 1999 et 2018.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Entre 1999 et 2018, 52,56% de l'espace d'étude restent inchangés. Ce total est une fois de plus principalement constitué pour plus de la moitié par les eaux libres et la végétation lacustre (tableau 31) (figure 109). C'est dans la végétation de l'arrière-pays que les changements les plus importants sont observés à travers 14,02% des espaces qui sont convertis de végétation de l'arrière-pays en agriculture de l'arrière-pays, et 13,49% qui sont convertis de végétation de l'arrière-pays en sols nus.

Entre les classes d'utilisation, les changements les plus significatifs à observer concernent surtout la transformation de l'agriculture de l'arrière-pays en sols nus (2,62%), et la transformation de l'agriculture de l'arrière-pays en végétation de l'arrière-pays (2,21%). Ce dynamisme montre d'une part l'augmentation des surfaces agricoles (végétation de l'arrière-pays en agriculture de l'arrière-pays) et d'autre part les premiers effets de la pression anthropique sur les sols (transformation de l'agriculture de l'arrière-pays en sols nus).

Cependant ces différents changements aussi bien que ceux observés entre 1984 et 1999, ne peuvent être totalement compris que s'ils sont interprétés par classes d'utilisation.

Tableau 31. Matrice de transition des classes d'utilisation des sols entre 1999 et 2018.

Occupation en 2018

	Eaux libres	Végétation lacustre	Végétation arrière-pays	Sols nus	Agriculture des rives	Agriculture fluviale	agriculture arrière-pays	Agriculture SEMRY	Bâties	Total général	
Occupation en 1999	Eaux libres	8,89	1,77	0,38	0,20	0,04	0,13	0,51	0,00	0,01	11,94
	Végétation lacustre	3,01	19,26	0,26	0,04	1,93	0,15	0,33	0,00	0,01	24,99
	Végétation arrière-pays	0,09	0,30	4,94	13,49	0,62	0,85	14,02	0,08	0,16	34,56
	Sols nus	0,01	0,01	0,48	5,30	0,01	0,02	0,34	0,00	0,13	6,29
	Agriculture des rives	0,09	0,18	0,06	0,04	2,62	0,16	0,64	0,01	0,01	3,80
	Agriculture fluviale	0,02	0,02	0,01	0,26	0,05	1,37	0,01	0,00	0,00	1,73
	agriculture arrière-pays	0,21	0,58	2,21	2,62	0,48	0,16	9,90	0,00	0,11	16,27
	Agriculture SEMRY	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,01	0,09	0,00	0,15
	Bâties	0,00	0,00	0,02	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,27
	Total général	12,33	22,12	8,37	22,01	5,76	2,85	25,76	0,19	0,60	100,00

4.1.3.4. Analyses des changements par classes d'utilisation

Les cartes de changements montrent de profondes dynamiques dans l'utilisation des sols entre 1984 et 2018, et permettent de constater que l'amélioration des conditions environnementales s'est accompagnée d'une consommation progressive de l'espace pour l'agriculture. Ces résultats nécessitent d'être analysés par classes d'utilisation pour identifier les contributions de chaque classe aux différents changements d'utilisation.

a. Les changements dans l'Agriculture des rives entre 1984 et 2018

En 1984 l'agriculture des rives représente 7298,28 hectares soit 1,54% de l'espace d'étude. Cette superficie croît à 19817,55 hectares en 1999 (4,18% de l'espace d'étude) et à 26884,36 hectares en 2018 (5,67% du l'espace d'étude). En marge de cette croissance, d'importants changements ont lieu dans ces espaces (figure 110).

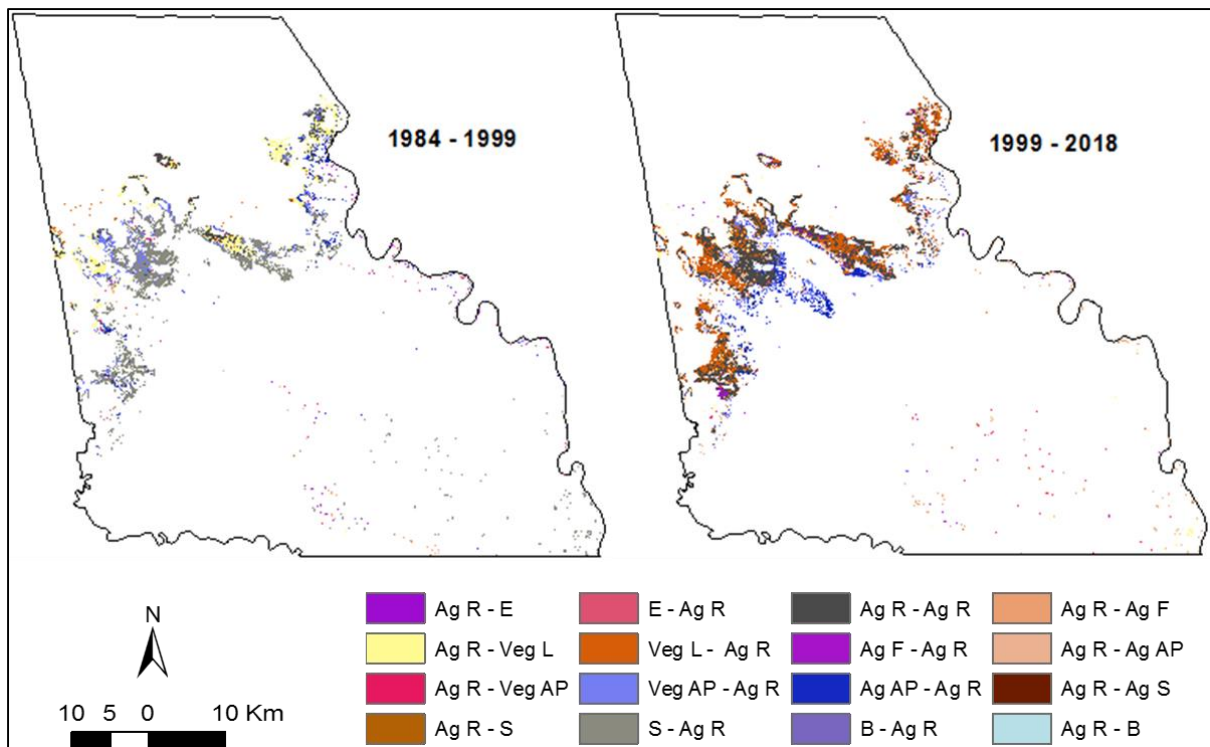


Figure 110 : Carte des changements dans l'Agriculture des rives entre 1984 et 2018.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Entre 1984 et 1999, les superficies d'agriculture des rives du lac Tchad maintenues correspondent à 2663,28 Ha. Au cours de cette période, environ 1068,12 Ha d'agriculture de l'arrière-pays, 10532,34 Ha de sols nus, et 3121,02 Ha de végétation de l'arrière-pays sont transformés en agriculture des rives (figure 111). Au même moment, 3935,16 Ha d'agriculture des rives sont convertis en végétation lacustre. Ces changements s'expliquent par l'augmentation des surfaces marécageuses des rives du lac suite à l'amélioration des précipitations. La montée des eaux repousse les limites des marécages vers les terres émergées et inonde au passage d'autres espaces agricoles dans les rives.

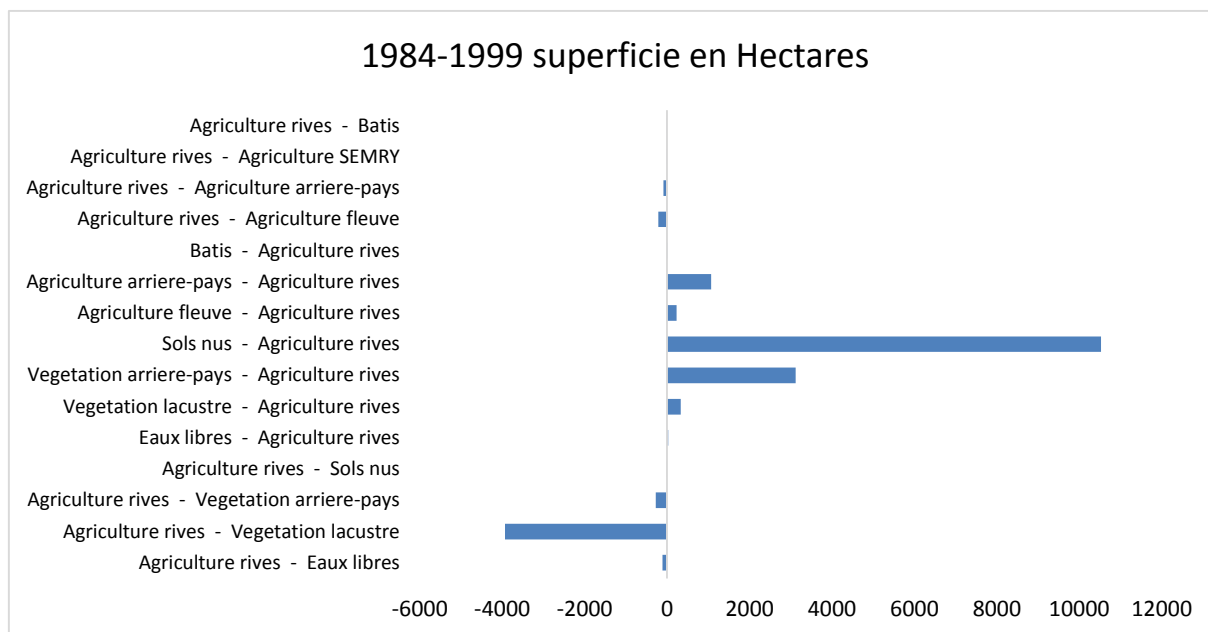


Figure 111 : Changements dans l'Agriculture des rives entre 1984 et 1999. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Entre 1999 et 2018 les superficies d'agriculture des rives du lac Tchad qui sont maintenues correspondent cette fois à 12409,47 Ha. Les classes qui contribuent à l'augmentation des superficies de l'agriculture des rives entre ces deux dates sont : l'agriculture de l'arrière-pays (2289,42 Ha) ; la végétation de l'arrière-pays (2938,86 Ha) et la végétation lacustre (9131,22 Ha) (figure 112). Pendant la même période, des espaces d'agriculture de rives sont convertis en agriculture de l'arrière-pays (3014,46 Ha) ; en agriculture du fleuve (768,24 Ha) ; en végétation lacustre (841,23 Ha) et en eaux libres (424,53 Ha). Ces changements s'inscrivent dans la continuité de ceux observés entre 1984 et 1999 et s'expliquent par les mêmes raisons. La seule différence cette fois est la conversion d'une partie de l'agriculture des rives en agriculture de l'arrière-pays, en raison du retrait des eaux par endroit.

Ces dynamiques montrent que dans l'espace lacustre, la montée des eaux en plus d'accroître la couverture végétale, a également favorisé la progression du front agricole lacustre vers les terres émergées (figures 110, 111 et 112).

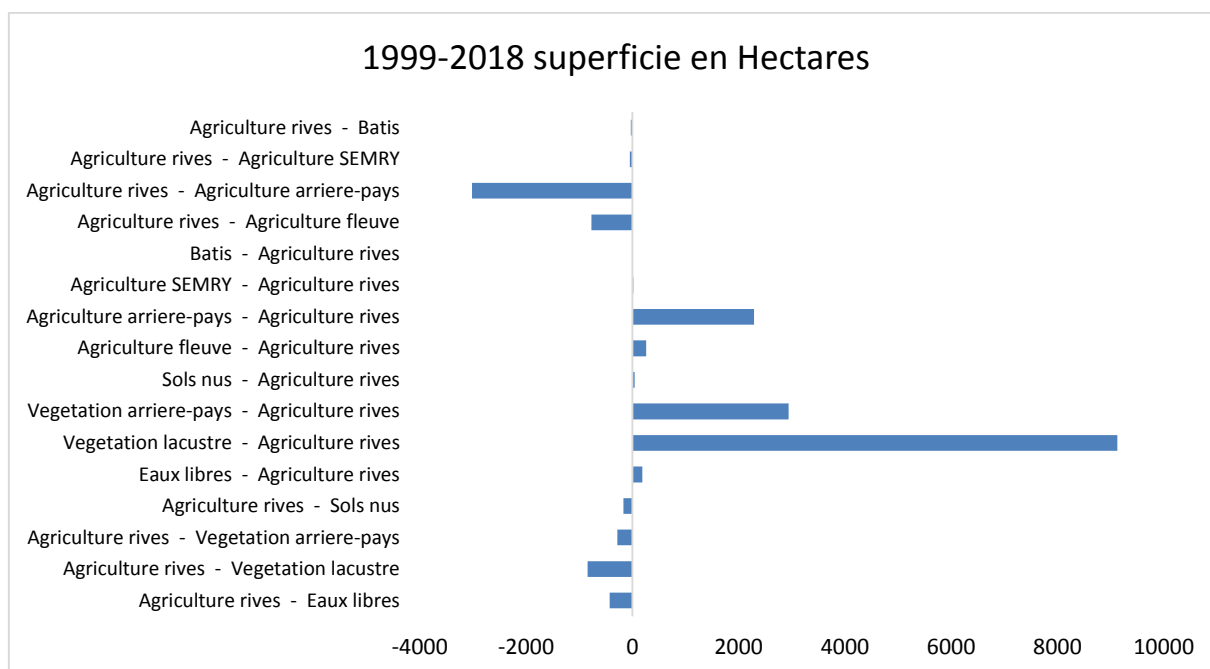


Figure 112 : Changements dans l'Agriculture des rives entre 1999 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

b. Les changements dans l'agriculture fluviale entre 1984 et 2018

En 1984 l'agriculture aux bords des fleuves occupe 6755,13 hectares soit 1,42% de l'espace d'étude. En 1999 cette superficie est de 8777,2275 hectares soit 1,85% de l'espace d'étude, et elle croit ensuite à 13635,26 hectares en 2018 (2,87%). Les surfaces agricoles aux bords des fleuves interagissent ensuite de façon importante avec les autres espaces agricoles entre 1984 et 2018 (figure 113).

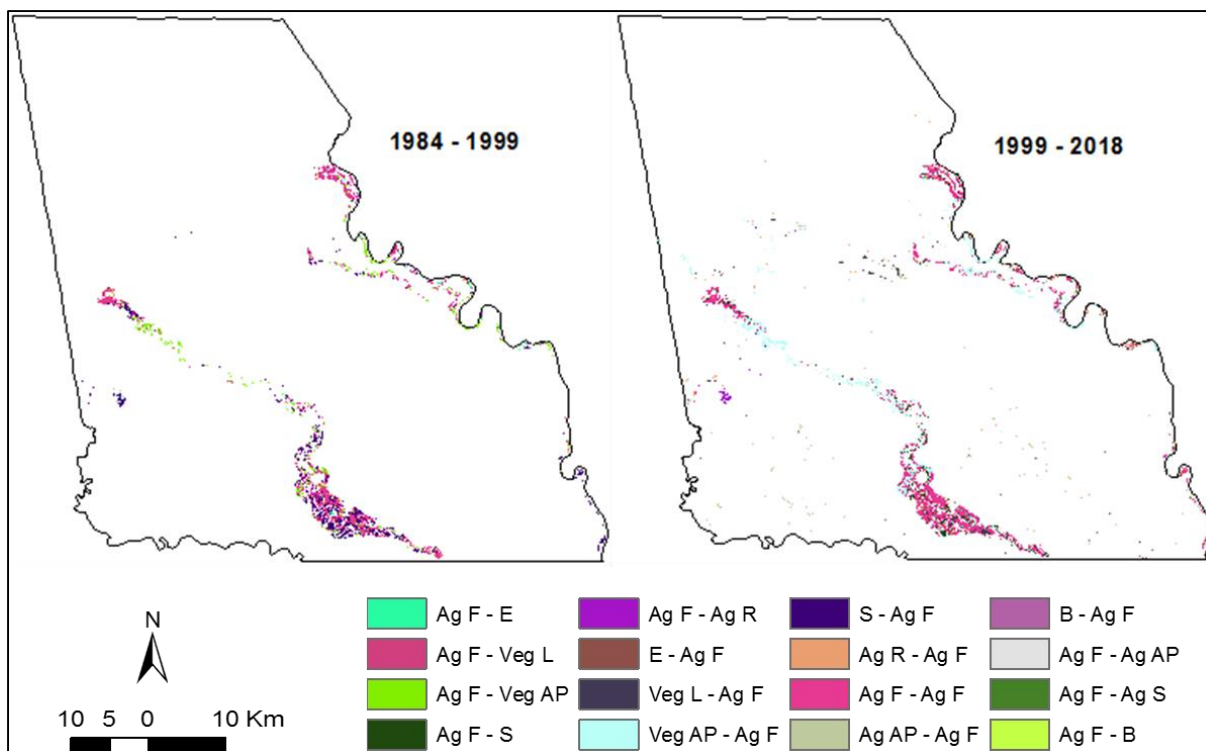


Figure 113 : Carte des changements dans l'agriculture fluviale entre 1984 et 2018.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Entre 1984 et 1999 environ 4228,65 Ha d'espaces agricoles aux bords des fleuves sont restés inchangés. Cette superficie est ensuite améliorée par la conversion de 3304,89 Ha de sols nus, 354,78 Ha de végétation de l'arrière-pays et 209,7 Ha d'agriculture des rives, en agriculture de fleuve (figure 114). Les surfaces d'agriculture de fleuve sont également transformées pendant cet intervalle en végétation de l'arrière-pays (1831,95 Ha), en agriculture des rives (234,18 Ha) ou en végétation lacustre à hauteur de 173,7 Ha. Ceci montre une fois de plus que les sols nus à la suite du reverdissement ont largement été convertis en espaces agricoles notamment aux bords de fleuves pour les cultures maraichères.

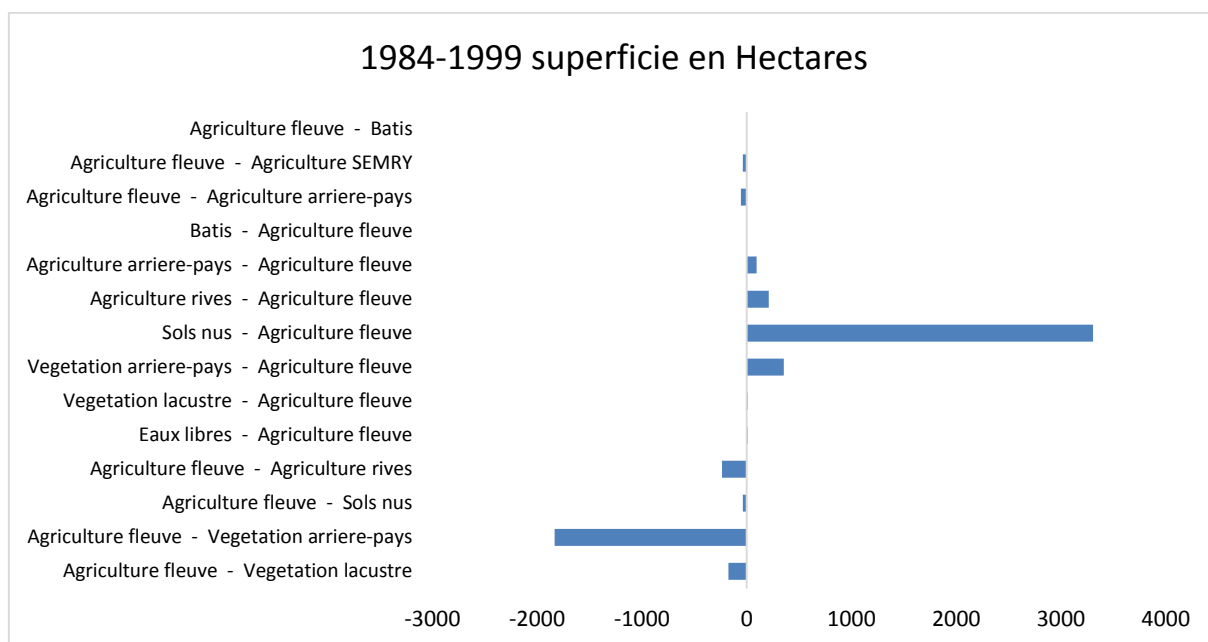


Figure 114 : Changements dans l'agriculture fluviale entre 1984 et 1999. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Dans l'intervalle entre 1999 et 2018, c'est environ 768,24 hectares d'agriculture aux bords des fleuves qui restent stables. Entre ces deux dates, les surfaces agricoles aux bords des fleuves progressent plus qu'elles ne régressent grâce notamment aux contributions de la végétation de l'arrière-pays (4010,04 Ha), l'agriculture de l'arrière-pays (734,4 Ha), l'agriculture des rives (768,24 Ha), la végétation lacustre (701,01 Ha) et les eaux libres (606,33 Ha) (figure 115). Les régressions observées dans cette classe sont dues aux conversions de 1212,12 Ha d'agriculture de fleuve en sols nus, et 259,11 Ha en agricultures de rives. Cette dynamique montre que les cultures maraichères connaissent entre 1999 et 2018 une expansion grâce à des conditions climatiques meilleures au cours de cet intervalle.

Autant que l'agriculture des rives, celle pratiquée en bordures des fleuves connaît également une croissance continue depuis 1984, et consomme particulièrement les espaces nus et la végétation naturelle situés en périphérie des espaces humides.

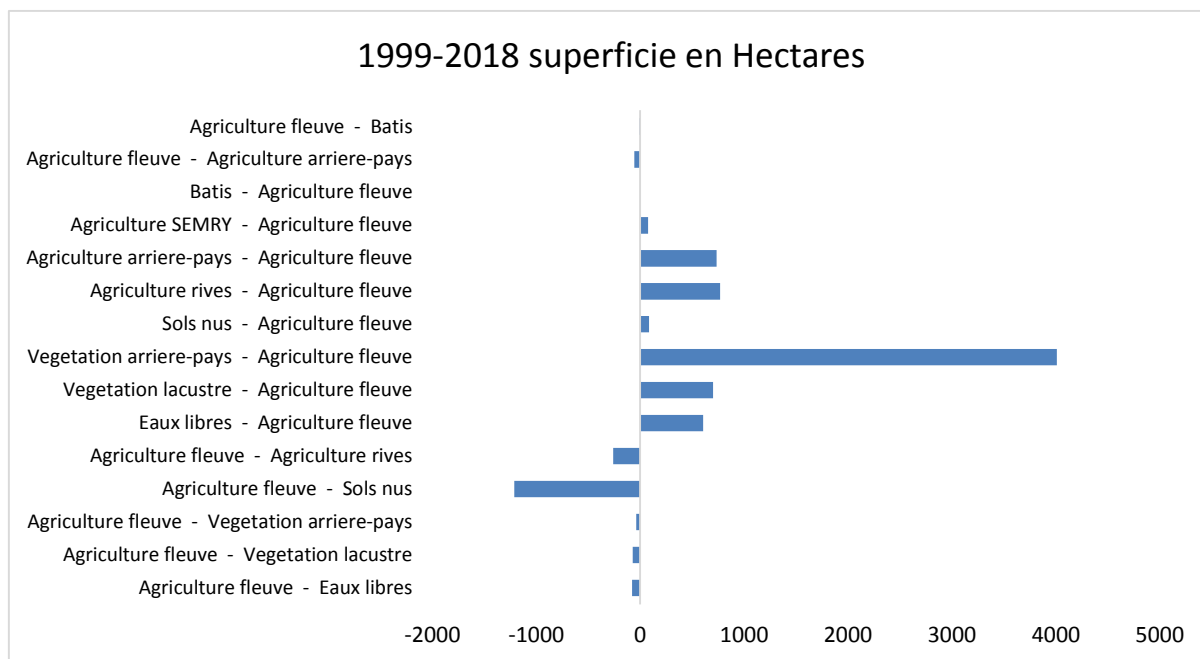


Figure 115 : Changements dans l’agriculture fluviale entre 1999 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

c. Les changements dans l’agriculture de l’arrière-pays entre 1984 et 2018

La superficie des espaces d’agriculture de l’arrière-pays correspond en 1984 à 48827,88 hectares, l’équivalent de 10,31% de l’espace d’étude. Cette superficie double pratiquement en 1999 et atteint 92204,6175 hectares (soit 19,47% du territoire d’étude), puis progresse ensuite à 120566,09 hectares en 2018 (soit 25,46%). Au-delà de cette progression, les interactions spatiales les plus importantes en termes de superficies notamment sont obtenues dans l’agriculture de l’arrière-pays (figure 116).

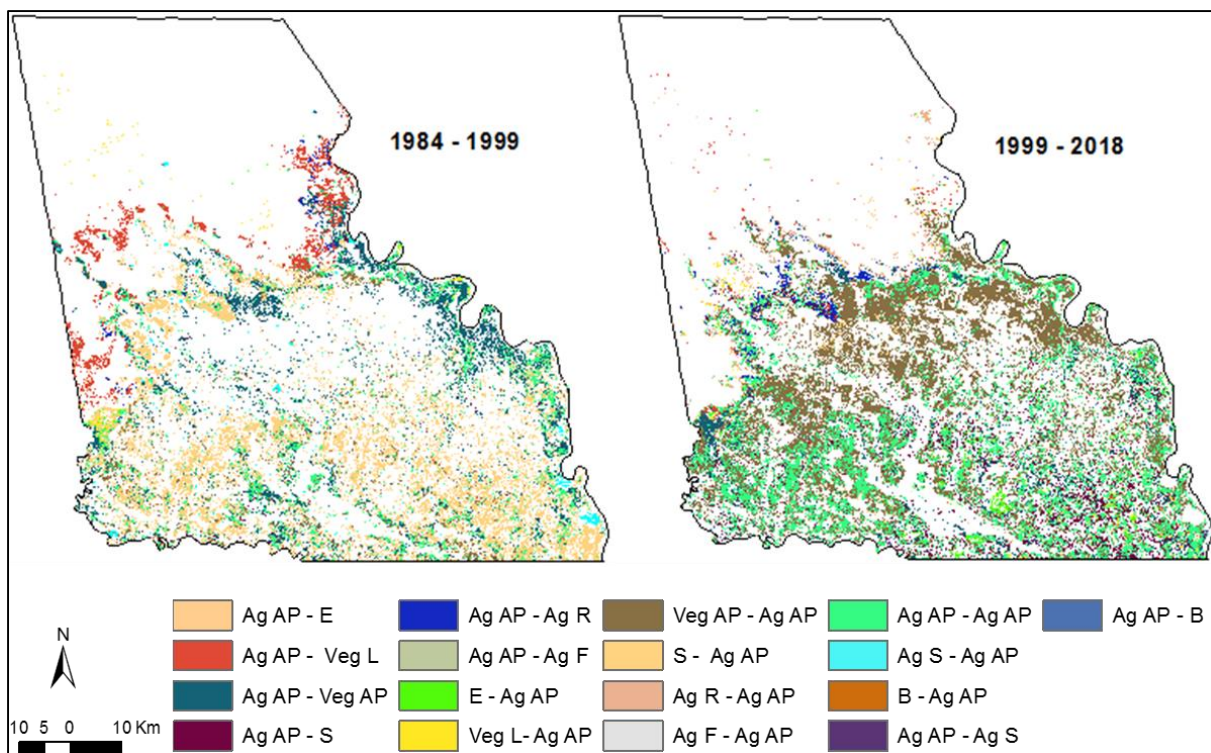


Figure 116 : Carte des changements dans l'agriculture de l'arrière-pays entre 1984 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Les superficies d'agriculture de l'arrière-pays restées stables entre 1984 et 1999 correspondent environ à 16275,69 Ha. Ces espaces agricoles connaissent essentiellement une tendance progressive entre ces deux dates grâce notamment aux sols nus (50191,38 Ha) et à la végétation de l'arrière-pays qui contribue pour 8748,99 Ha (figure 117). Il faut tout de même noter la réduction de 20463,21 Ha au bénéfice de la végétation de l'arrière-pays et 9028,08 Ha au profit de la végétation lacustre.

Ces changements illustrent parfaitement les évolutions de l'emprise spatiale humaine dans notre espace d'étude en fonction de l'évolution du contexte climatique. En effet, le retour de l'humidité installe des conditions favorables à l'expansion de l'agriculture sur les sols nus ce qui justifie la mise en valeur de ces espaces au profit de l'agriculture.

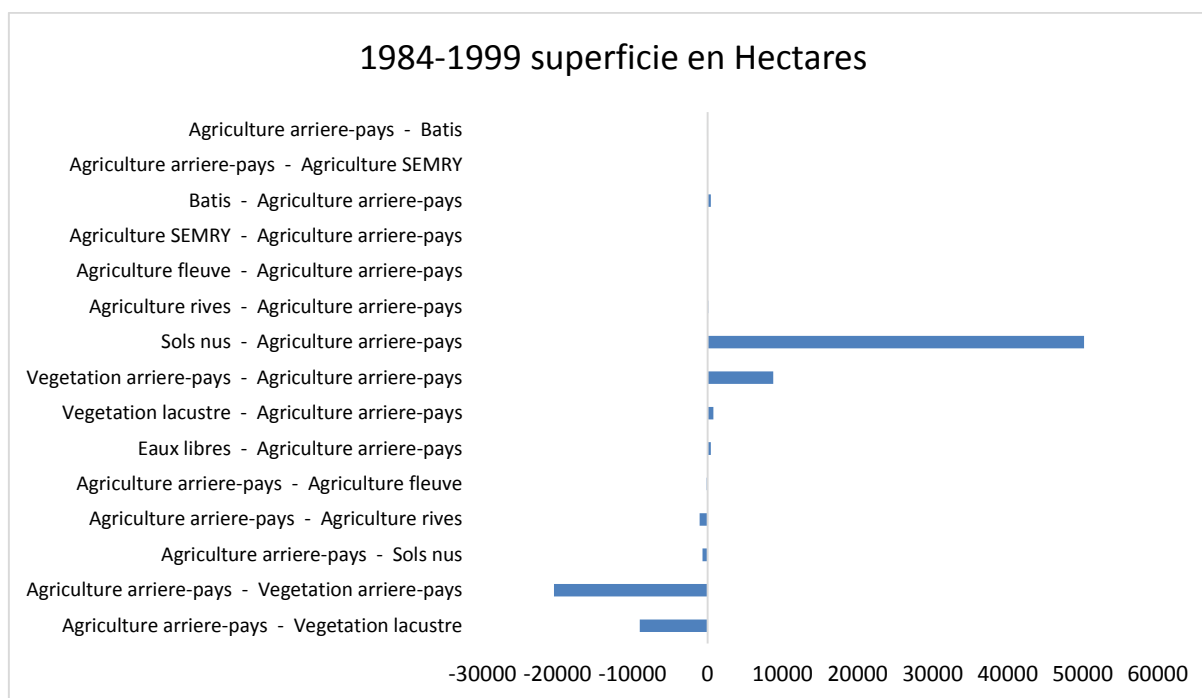


Figure 117 : Changements dans l'agriculture de l'arrière-pays entre 1984 et 1999.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Entre 1999 et 2018 c'est l'équivalent de 46859,31 hectares qui sont stables dans les espaces occupés par l'agriculture de l'arrière-pays. A cette superficie il faut rajouter la contribution importante de la végétation de l'arrière-pays dont 66389,76 Ha sont convertis en agriculture de l'arrière-pays (figure 118). Les réductions observées sont dues aux sols nus (12383,91 Ha), et à la végétation de l'arrière-pays (10486,35 Ha).

Ce dynamisme permet de réaffirmer que l'amélioration de la couverture végétale dans l'arrière-pays observée suite à l'amélioration des conditions climatiques est particulièrement exploitée pour les besoins agricoles.

Par ailleurs, l'observation des changements dans l'agriculture de l'arrière-pays met en évidence le fait qu'entre une année sèche (1984) et une année plus humide (1999) c'est sur les sols nus que les plus importantes croissances des espaces agricoles sont observées. En revanche, entre deux années plus favorables en termes de pluviométrie (1999 et 2018), c'est davantage la végétation naturelle de l'arrière-pays qui est mise à contribution pour accroître les espaces agricoles.

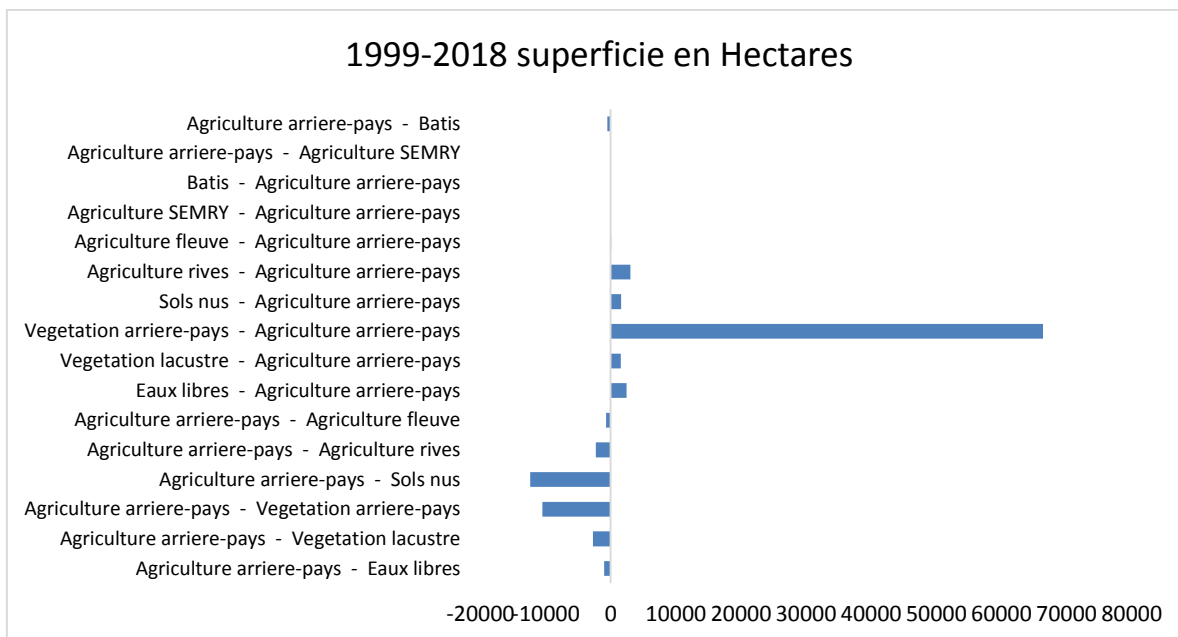


Figure 118 : Changements dans l’agriculture de l’arrière-pays entre 1999 et 2018.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

d. L'évolution des surfaces agricoles de la SEMRY

La riziculture pratiquée par la SEMRY se fait dans des périmètres délimités (les caisses rizicoles). C’est la raison pour laquelle nous n’allons pas nous intéresser particulièrement à cette classe d’agriculture. Néanmoins il faut noter que les caisses présentes dans la zone d’étude ont été mise en place à partir de 1978 (Seignobos et Iyébi-Mandjek, 2000) et les superficies de riziculture augmentent depuis 1984 : 55,44 Ha (1984) ; 333,29 Ha (1999) ; et 722,05 (2018) (figure 119).

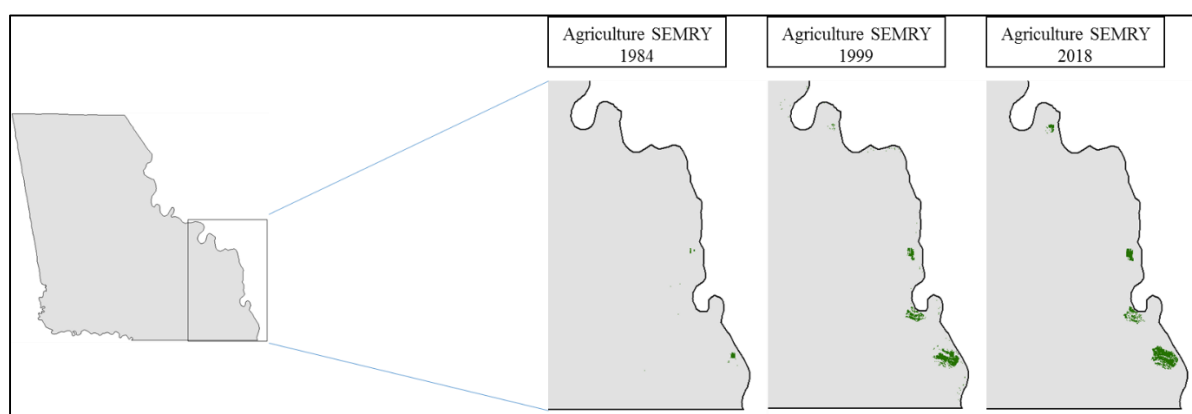


Figure 119 : Evolutions des périmètres rizicoles de la SEMRY entre 1984 et 2018.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

e. Les évolutions des surfaces Bâties

Dans les marges du lac et au-delà, les densités des populations n'ont cessées d'augmenter depuis les épisodes des sécheresses sahéliennes, et après le retour des conditions climatiques favorables qui ont eu pour effet d'améliorer les disponibilités des ressources naturelles (Raimond, Rangé, et Réounodji, 2014). L'accélération continue et importante de l'utilisation des espaces et des ressources, illustre l'accroissement des pressions anthropiques sur les écosystèmes en présence. Ces pressions sont également observées à partir des superficies des espaces bâtis qui ne cessent de croître (figure 120). En 1984 elles représentaient 2115,18 hectares (soit 0,44% de l'espace d'étude), en 1999 elles ont augmenté à 2260,2 hectares (0,47%) et en 2018 elles constituent 2878,46 hectares (0,6%). Cette progression est cohérente avec l'augmentation des densités humaines observées dans les espaces lacustres au tour du lac Tchad et avec l'augmentation de la démographie constatée par les recensements de la population (Lemoalle et Magrin, 2014).

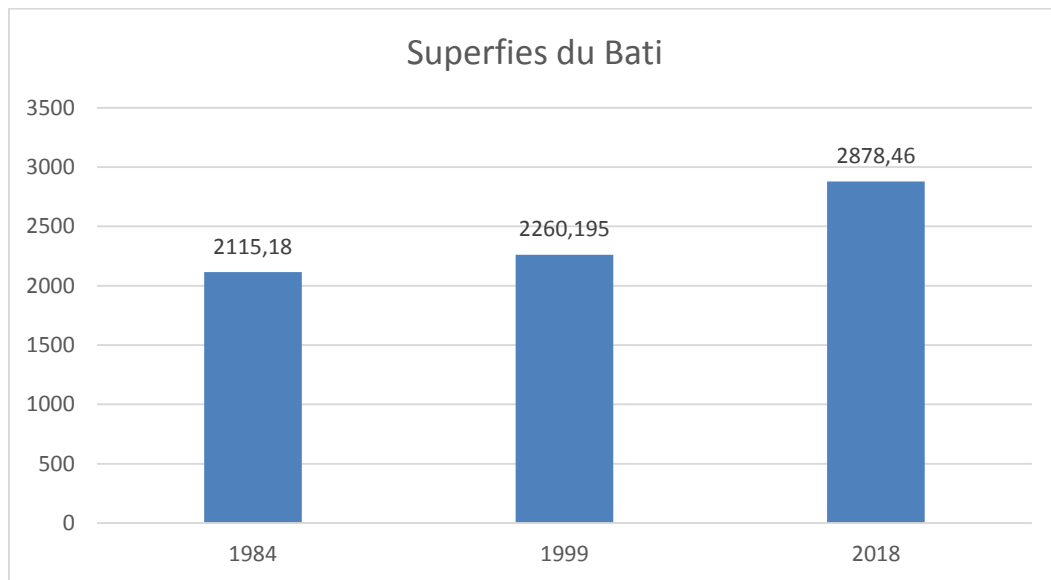


Figure 120 : Evolutions en hectares des surfaces bâties entre 1984 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Les cartes ci-dessous montrent que les augmentations des densités humaines documentées dans l'espace lacustre (Lemoalle et Magrin, 2014) s'observent également dans les espaces de l'arrière-pays.

A l'échelle de la zone d'étude, la valeur spatiale des surfaces bâties est négligeable (à peine 0,6% en 2018) mais leur progression est tout de même intéressante puisqu'elle permet de constater que c'est l'ensemble de la zone d'étude qui est concernée par cette progression (figure 121).

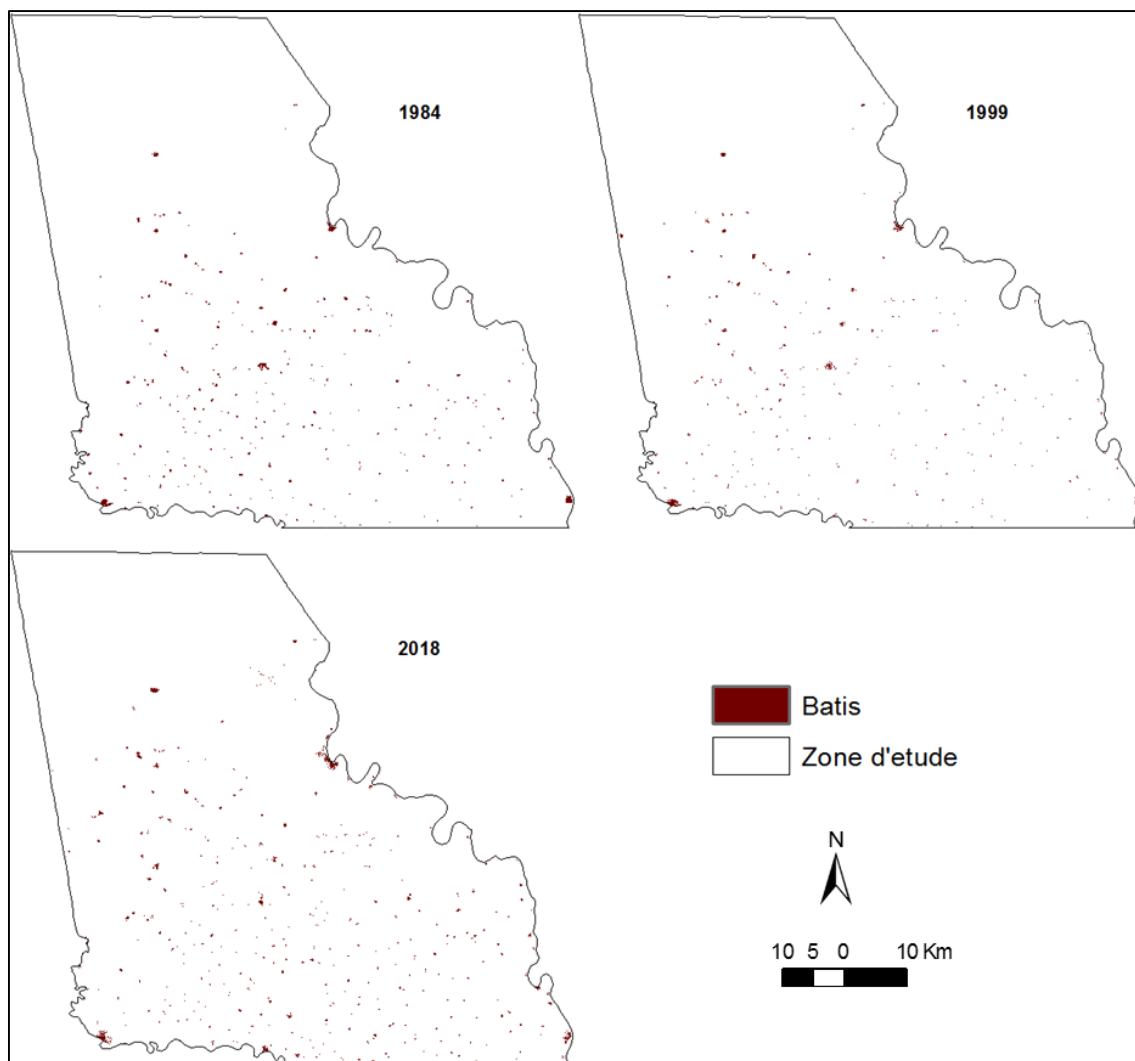


Figure 121 : Evolutions spatiales des surfaces bâties entre 1984 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

4.1.3.4. L'estimation des Surfaces pastorales

Les cartographies des surfaces pastorales n'ont également pas pu être accessibles dans le cadre de cette thèse et sont donc à produire. Seulement, la cartographie des pâturages est bien plus complexe que celle des surfaces agricoles ou bâties. En effet, contrairement aux espaces agricoles et bâtis, les pâturages ne sont pas matérialisés dans l'espace, et donc sont difficilement identifiables sur une image satellite.

Par conséquent, les surfaces pastorales sont estimées dans cette thèse en calculant l'indice de surface foliaire (LAI). C'est un indice qui permet d'évaluer la croissance et la biomasse végétale, la densité du couvert végétal en réduisant l'influence du sol dans la réponse spectrale de la végétation (Boegh et al., 2002). Cet indice dépend de la composition des espèces et des stades de croissance pour estimer la quantité de biomasse contenue dans le couvert végétal, les potentialités de la photosynthèse permettant la

production primaire, l'évapotranspiration des plantes, et le flux de carbone entre la biosphère et l'atmosphère (Boegh et al., 2002).

$$LAI = (3,618 * EVI - 0,118) \quad \text{avec} \quad EVI = 2,5 * \frac{(PIR - R)}{(PIR + 6 * R - 7,5 * B + 1)}$$

EVI est l'indice de végétation Enhanced Vegetation Index

PIR est la bande spectrale proche infra rouge

R et B sont les bandes spectrales Rouge et Bleue

L'indice LAI est calculé sur nos images de 1984, 1999 et 2018 non pas pour avoir la répartition exacte des surfaces pastorales mais davantage pour les estimer en fonction de la biomasse végétale.

Les cartes d'indice sont reclassifiées selon l'algorithme des écarts-types et on distingue (figure 122) :

- Les pâturages annuels, avec un indice foliaire très faible (<0,4) regroupent les espaces couverts de végétation annuelle (herbacés) en période humide et fortement dénudés en saison sèche ;
- Les pâturages de savanes, sont des espaces avec un indice moyen (0,4-1,5), où la couverture végétale se réduit considérablement en saison sèche mais pas totalement
- Les pâturages arbustifs sont caractérisés par un indice élevé (1,5-2), la végétation est permanente mais pas très dense ;
- Pour les forêts, l'indice est très élevé (>2) et la végétation est permanente et dense.

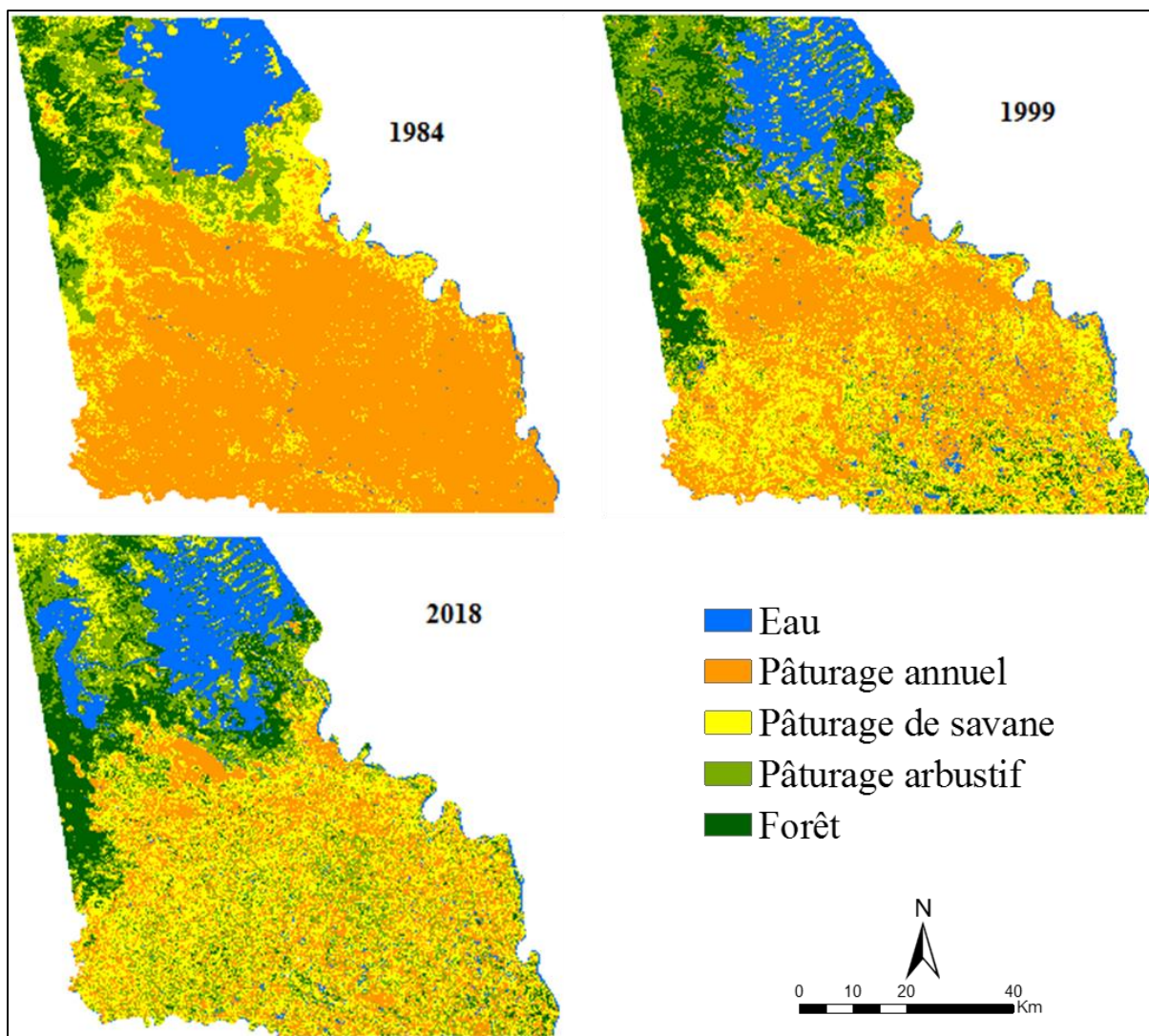


Figure 122 : Les surfaces pastorales en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Les résultats cartographiques donnent un aperçu de la disponibilité du fourrage dans la fenêtre lacustre camerounaise du lac Tchad et son arrière-pays pendant les saisons pluvieuses des années 1984, 1999 et 2018 (figure 122). Si les pâturages annuels sont dominants en 1984 (287175,87 Ha), on observe qu’avec l’amélioration des conditions pluviométrique ils sont progressivement remplacés par des pâturages plus durables (pâturages de savane et arbustifs notamment). Les pâturages forestiers augmentent aussi entre 1984 (24261,75 Ha) et 1999 (66694,2 Ha) mais régressent légèrement en 2018 (53792,05 Ha) en raison de la montée des eaux dans l’espace lacustre (figure 123).

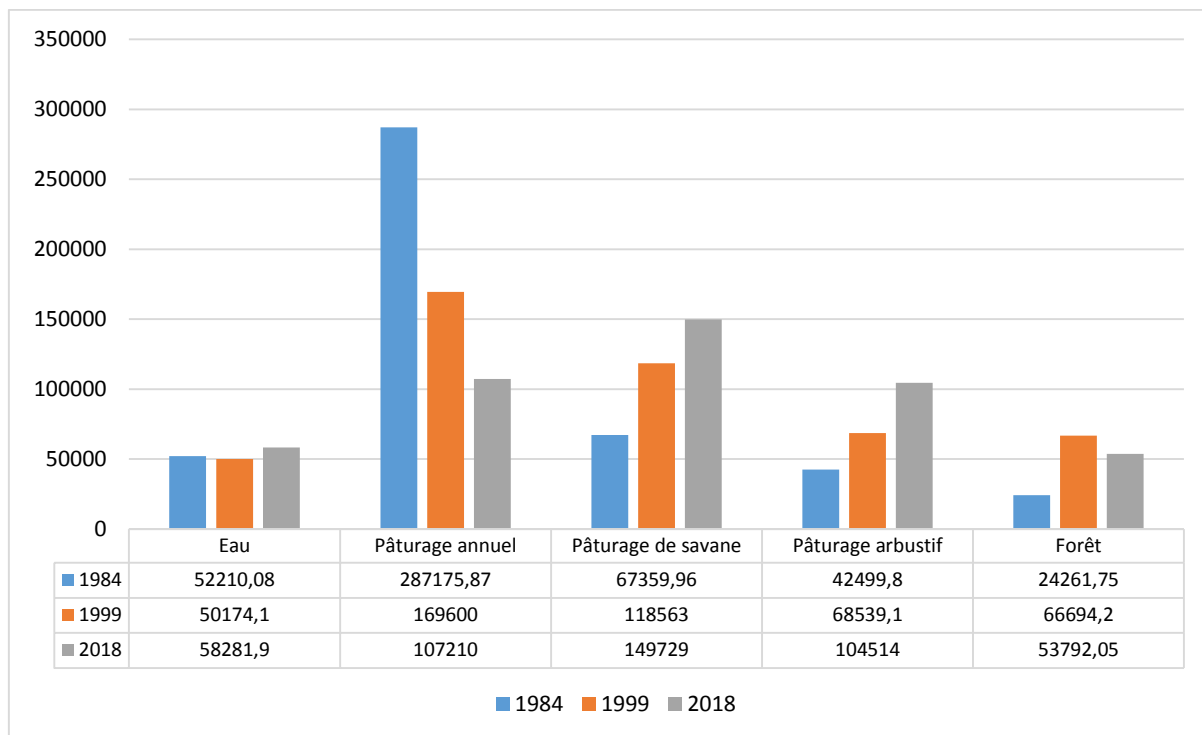


Figure 123 : Variabilités des surfaces pastorales en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

4.1.3.5. Résumé des dynamiques spatiales d'évolution de l'utilisation des sols

La cartographie de l'utilisation des sols dans l'espace d'étude montre d'une part que de 1984 à 2018, les superficies des espaces agricoles n'ont pas cessé de croître, et d'autre part que l'agriculture de l'arrière-pays apparaît comme la plus importante, car elle pèse pour plus de 70% de l'espace totale agricole. L'agriculture des rives passe de 7298,28 Ha en 1984 à 26 884,36 Ha en 2018, et l'agriculture aux bords des fleuves passe de 6755 Ha en 1984 à 13635,26 Ha en 2018. L'accroissement des surfaces agricoles s'explique par l'amélioration des conditions climatiques, et démontre que le reverdissement de la zone d'étude s'est accompagné par une augmentation des pressions anthropiques sur le milieu.

L'analyse des dynamiques spatio-temporelles, des espaces agricoles montre que les sols dénudés sont largement mis à contribution pour l'expansion des surfaces agricoles entre 1984 et 1999. Par contre, entre 1999 et 2018 c'est davantage la végétation naturelle qui est réduite au profit des surfaces agricoles. Au niveau des rives du lac Tchad et des fleuves, la montée des eaux favorise la progression du front agricole vers les terres émergées, et accroît la disponibilité des espaces agricoles de crues ou de décrues et des cultures maraichères.

Au regard de ces résultats, l'agriculture des rives et celle des fleuves apparaissent comme étant des marqueurs des pressions anthropiques aux marges des espaces

humides, et l'agriculture de l'arrière-pays quant à elle est un très bon indicateur de ces pressions sur les terres émergées de l'arrière-pays.

L'évolution des surfaces bâties indique également l'accroissement des pressions anthropiques sur les écosystèmes du milieu d'étude. La superficie totale des espaces bâtis passe de 2115,18 hectares en 1984 à 2260,2 hectares en 2018.

Enfin l'estimation des surfaces pastorales montre que leur disponibilité ne cesse de s'améliorer depuis 1984. Les pâturages annuels sont par ailleurs remplacés par des pâturages plus durables (pâturages de savane et arbustifs notamment) dans l'arrière-pays notamment.

Sur l'ensemble de la zone d'étude, les cartographies montrent que le dynamisme spatio-temporel de l'occupation et de l'utilisation des sols est fortement lié aux facteurs climatiques. Dans l'espace lacustre en particulier, les fluctuations des eaux du lac Tchad s'associent au facteur climatique pour conditionner la disponibilité des ressources naturelles et leurs utilisations. Mais tout comme avec les tendances d'évolutions du couvert végétal, le climat seul ne suffit pas à expliquer les dynamiques observées dans l'arrière-pays. Il est donc nécessaire dans l'arrière-pays de confronter les évolutions observées à la répartition des types de sols et des essences végétales pour évaluer leurs influences sur les dynamiques d'occupation et d'utilisation des sols détectées.

4.2. Influence des facteurs géographiques sur l'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols

Les cartographies de l'occupation et de l'utilisation des sols sont corrélées à celles des facteurs géographiques de la zone d'étude. Le but de cette démarche c'est l'identification des facteurs environnementaux déterminants dans la disposition de l'occupation et l'utilisation des sols et qui expliquent les changements mis en évidence entre 1973 et 2018.

Les cartes utilisées pour apprécier ces influences sont une fois de plus celles de la géomorphologie des sols, des potentialités agronomiques et modes d'utilisation des sols, et celle de la phytogéographie (Seignobos et Iyébi-Mandjek, 2000). Elles sont également toutes intégrées dans un SIG et superposées par analyse spatiale (figure 45) aux cartes d'occupation et d'utilisation des sols et à celles des changements. L'analyse cartographique permet ensuite d'interpréter nos résultats cartographiques en fonctions des caractéristiques géographiques spécifiques de notre espace d'étude.

Afin de simplifier la démarche (compte tenu du nombre et de l'hétérogénéité des cartes à corrélérer), l'espace d'étude est redécoupé en quatre zones en fonctions de la géomorphologie des sols, de la répartition des terroirs agricoles, et de la distribution des

essences végétales (figure 124). En effet, ces trois cartes laissent apercevoir une certaine homogénéité spatiale dans l'arrière-pays, et qui permet de distinguer les berges de fleuves au reste des terres émergées qui également peuvent être divisées entre espaces sableux et espaces argileux (figure 124).

Les descriptions des trois zones comprises dans l'arrière-pays sont apportées dans la section suivante et accompagnées de l'analyse de l'occupation et de l'utilisation des sols ainsi que l'interprétation des dynamiques observées entre 1973 et 2018. La partie lacustre représente la quatrième zone. Mais nous focalisons cette analyse uniquement sur les zones de l'arrière-pays puisque les dynamiques lacustres sont expliquées essentiellement par le climat et les variations des eaux du lac Tchad.

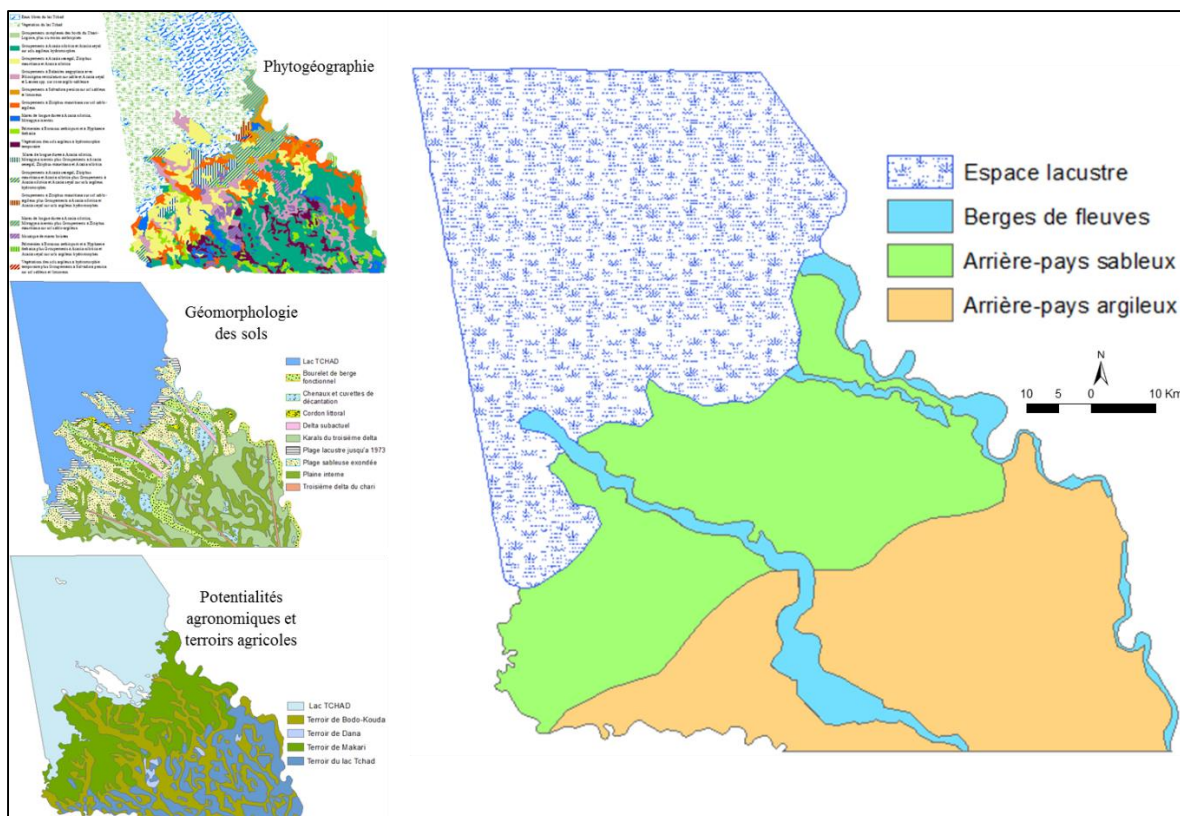


Figure 124 : Découpages de l'arrière-pays en zones homogènes. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

4.2.1. Occupation et utilisation des sols aux berges des fleuves et analyses des dynamiques spatio-temporelles entre 1973 et 2018

Les berges des fleuves sont constituées d'une mosaïque des bourrelets de berges fonctionnels qui dessinent les lits des fleuves dans l'arrière-pays. Leurs sols sont de texture sableuse à sablo-limoneuse avec un taux de matière organique important grâce aux apports alluviaux. Le couvert végétal aux bords du Serbewel est dominé par l'Acacia

nilotica et l'Acacia seyal, mais se diversifie (*Balanites aegyptiaca*, *Mitragyna inermis*, etc.) près du lac (Seignobos et Iyébi-Mandjek, 2000). Sur les berges du Chari les espèces végétales présentes sont entre autres *Mitragyna inermis* et *Borassus aethiopicum*, etc. (Seignobos et Iyébi-Mandjek, 2000).

Nos résultats cartographiques montrent que malgré la présence des cours d'eau et la texture sableuse des sols, le couvert végétal est quasi inexistant en saison sèche en particulier sur les berges du Serbewel (figure 125) où les Acacia (végétaux à feuilles caduc) sont dominants. Seuls les espaces en bordure du Chari sont recouverts de végétation. Les sols nus occupent alors environ 80% de cet espace.

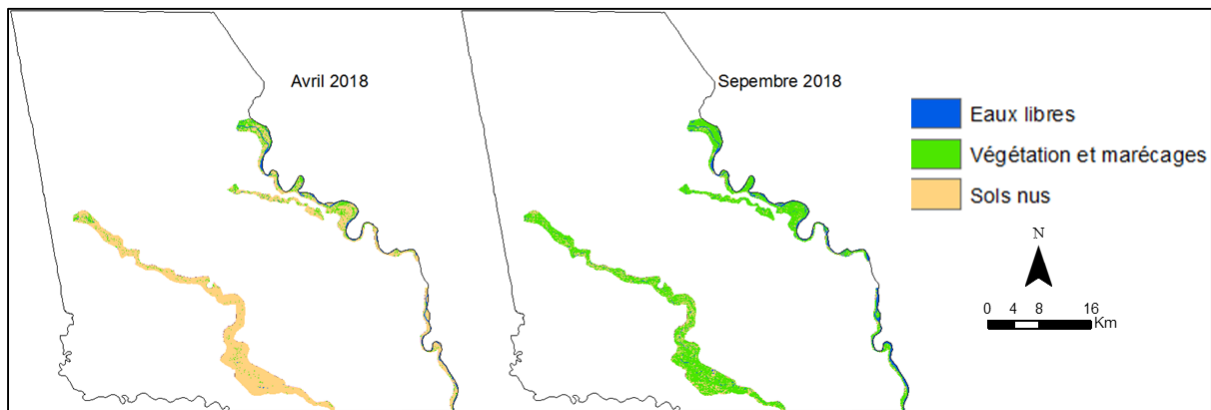


Figure 125 : Occupation des sols aux berges des fleuves. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Avec le retour des pluies, le reverdissement est total, et la couverture végétale occupe plus de 82% de cette zone. Ainsi, entre la saison sèche et la saison des pluies, c'est l'équivalent de 60% des sols nus dans cet espace qui sont convertis en végétation. Par ailleurs, la couverture des sols observée en saison sèche est semblable à celle des années arides (1973 et 1987), et le reverdissement observé entre la saison sèche et la saison des pluies est le même qui a lieu avec l'amélioration des précipitations à partir des années 2000. La texture sableuse des sols, la présence des cours d'eau, et des essences caducifoliées expliquent ces changements. La seconde raison d'un tel dynamisme c'est l'importance des herbacés (*Poaceae*) qui sont des plantes annuelles, dans le recouvrement végétal dans cette zone.

La texture sableuse des sols et la présence des cours d'eau favorisent également les exploitations des végétations de saison des pluies dans cette zone pour les cultures maraîchères aux bords des fleuves. C'est pourquoi l'agriculture fluviale est la plus dominante, et en pleine expansion.

Les berges des fleuves appartiennent au terroir agricole de Bodo-kouda, décrit en 1999 par Seignobos et Iyébi-Mandjek, (2000) comme étant faiblement soumis aux activités agricoles. Nos résultats cartographiques montrent cependant une croissance des espaces agricoles et des maraichers en particulier, dont les proportions dans cette zone

augmentent de 10% entre 1999 et 2018, et doublent pratiquement entre 1984 et 2018 (figure 126).

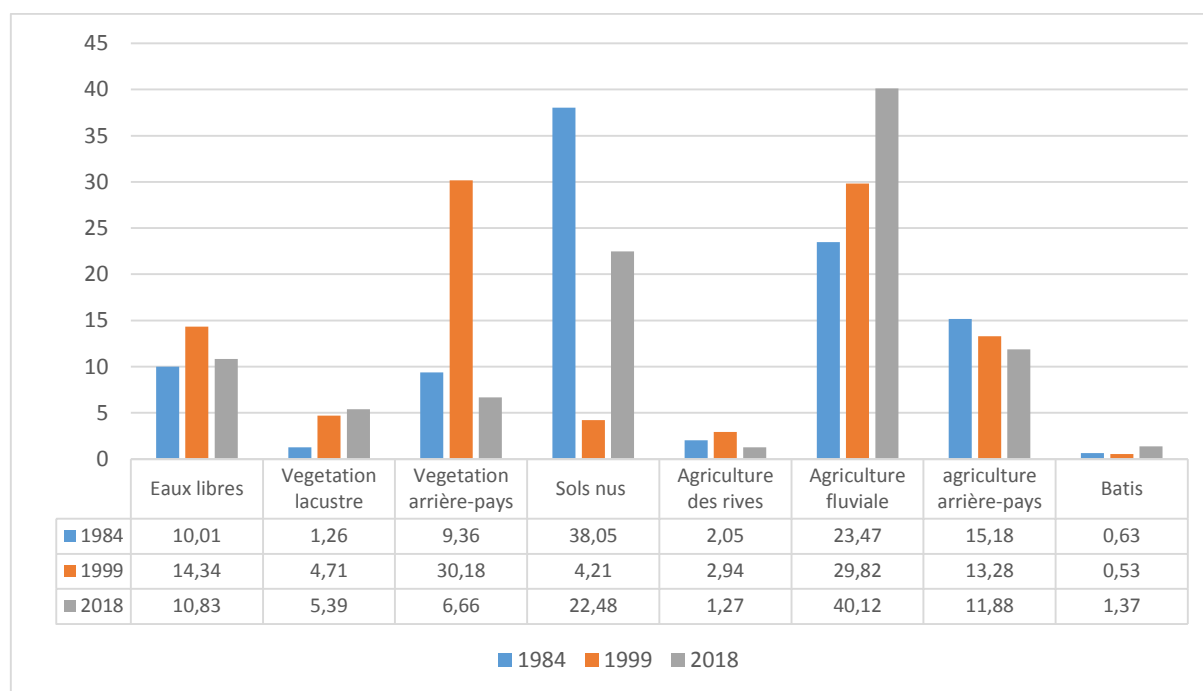


Figure 126 : Variabilités de l’utilisation des sols aux berges des fleuves en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

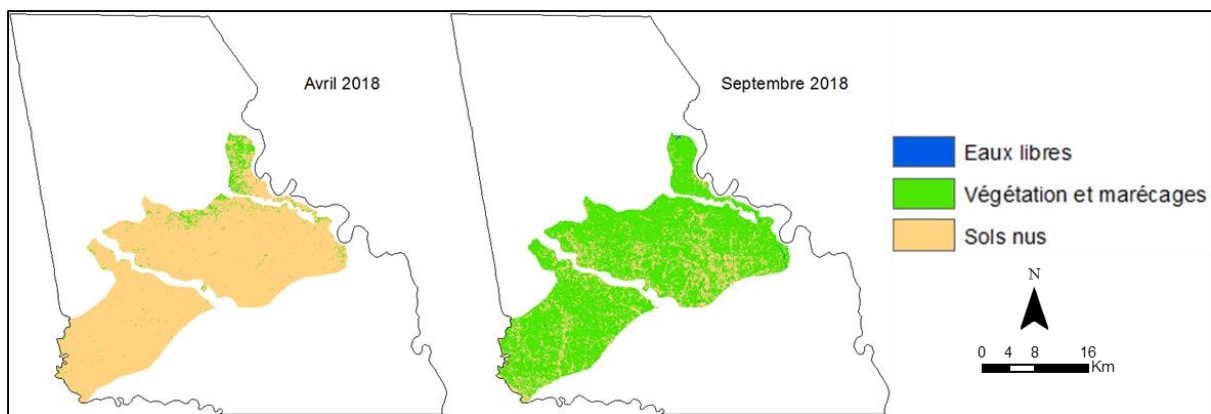
4.2.2. Occupation et utilisation des sols dans l’arrière-pays sableux et analyses des dynamiques spatio-temporelles entre 1973 et 2018

Pour la zone occupée par l’arrière-pays sableux, il s’agit des terres exondées qui longent les marges de l’espace lacustre (figure 124). Ce sont en réalité des plaines sableuses et des cuvettes de décantation essentiellement constituées de sols à texture sableuse, sablo-argileuse, ou argileuse.

Le couvert végétal ligneux y est très diversifié et les essences majoritaires sont *Balanites aegyptiaca*, *Acacia senegal*, *Ziziphus mauritiana*, *Mitragyna inermis*, et *Salvadora persica*. Les herbacés sont essentiellement les *Poaceae* (*Echinochloa colonum*, *Panicum laetum*, *Brachiaria lata*, *Hyperthelia dissoluta*).

Nos résultats cartographiques montrent pourtant une couverture végétale inexistante en saisons sèches et même pendant les saisons pluvieuses des années arides (figure 127), avec les sols nus présents sur près de 90% de la zone. Seuls les périmètres en bordure de l’espace lacustre disposent d’un couvert végétal.

Avec l'amélioration des précipitations (saison pluvieuse et année humide), c'est plus de 75% des espaces occupés par les sols nus qui sont couverts de végétation. Ce changement entre saison sèche et saison des pluies (figure) prouve que malgré la diversité des essences ligneuses, l'essentiel de la végétation dans cette zone est constitué par les herbacés. Mais puisque ces plantes sont annuelles et ne traversent pas les périodes arides, les sols sont complètement dénudés après le départ des pluies. Pour voir l'influence des ligneux sur la couverture végétale, il faut s'intéresser à la carte de Mann-kendall (figure 128).



La carte de tendance d'évolution du couvert végétal (corrélation de Mann-kendall) montre une dominance des tendances stables et progressives du couvert végétal sur plus de 80% des superficies de cette zone entre 2000 et 2018. Ainsi, la diversité de la végétation ligneuse se conjugue à la nature sableuse des sols, et à la proximité des espaces humides lacustres pour assurer une disponibilité de la végétation dans cette zone. La nature des sols et leur proximité aux espaces lacustres n'influencent pas que le couvert végétal.

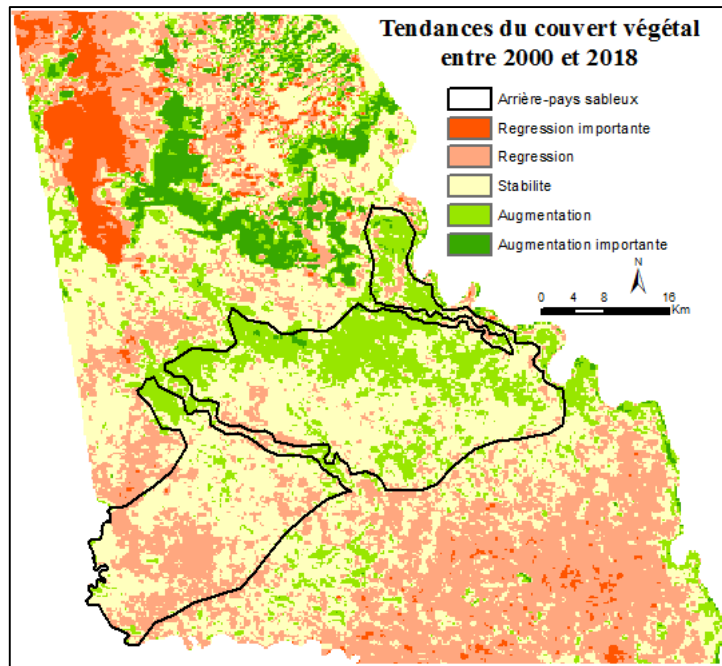


Figure 128 : Tendance d'évolution du couvert végétal dans l'arrière-pays sableux.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

En effet, Seignobos et Iyébi-Mandjek, (2000) décrivent au début des années 2000 les sols de cette zone appartenant au terroir de Makari comme étant légers et donc propices aux exploitations agricoles, tout en notant la présence des pâturages. Dans ce terroir ils recensent les cultures du maïs, du niébé et de cucurbitacées mais précisent que l'agriculture à grande échelle est faible et les cultures se limitent à de petites exploitations autour des maisons.

Nos résultats cartographiques confirment cette description mais montrent une évolution croissances des surfaces agricoles depuis 1984. En effet, si on s'intéresse uniquement à l'agriculture de l'arrière-pays qui occupe les surfaces agricoles les plus importantes, on observe que ses superficies ont triplé entre 1984 et 2018 et doublent entre 1999 et 2018 (figure 129).

Les influences de la nature des sols et de la diversité des ligneux sur l'occupation et l'utilisation des sols sont particulièrement visibles dans la troisième zone.

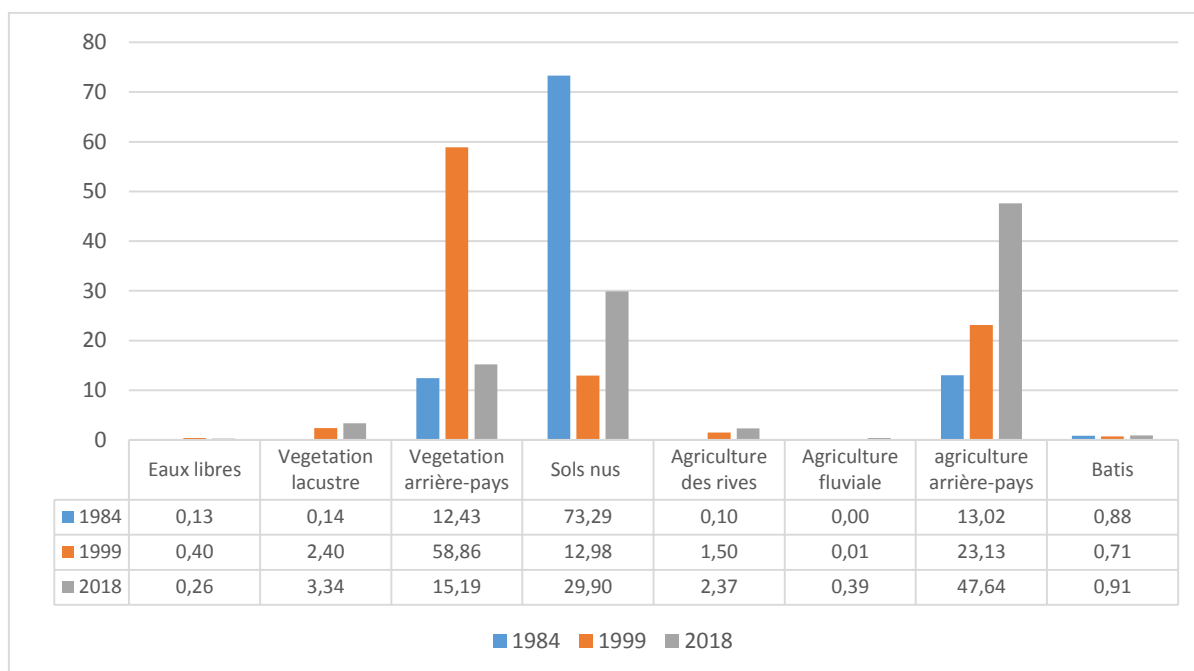


Figure 129 : Variabilités de l'utilisation des sols dans l'arrière-pays sableux en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

4.2.3. Occupation et utilisation des sols dans l'arrière-pays argileux et analyses des dynamiques spatio-temporelles entre 1973 et 2018

L'Arrière-pays argileux regroupe les terres émergées situées loin du lac Tchad et principalement constituées des vertisols hydromorphes lourds. La texture des sols est argileuse ou sablo-argileuse en raison de la forte teneur en argile. Par endroit les sols de cette zone sont compacts, particulièrement dénudés, et laissent apparaître des affleurements rocheux (Seignobos et Iyébi-Mandjek, 2000).

La couverture végétale ligneuse moins diversifiée que dans l'arrière-pays sableux est plus ou moins homogène et particulièrement dominée par l'*Acacia nilotica* et l'*Acacia seyal* que complètent les Palmeraies de *Borassus aethiopum* et d'*Hyphaene thebaica*. La végétation basse est essentiellement dominée par les Poaceae (*Echinochloa colonum*, *Panicum laetum*, *Brachiaria lata*, *Hyperthelia dissoluta*).

Comme avec les deux précédentes zones, les cartes d'occupation des sols (figure 130) montrent que cette diversité floristique n'empêche pas l'amenuisement considérable du couvert végétal en périodes sèches (saison sèche ou année aride), avec des sols nus présents sur plus de 90% de la zone.

Par ailleurs, contrairement aux deux précédentes zones, l'amélioration du couvert végétal suite au retour des précipitations est moins importante. Seulement 58% de

l'espace est converti de sols nus en végétation, et près de 40% de la surface reste occupée par les sols nus. Ce qui montre que l'influence des herbacées sur le recouvrement végétal en saison des pluies est moins importante dans cette zone. Cette observation est confirmée par la carte de tendances du couvert végétal (figure 131).

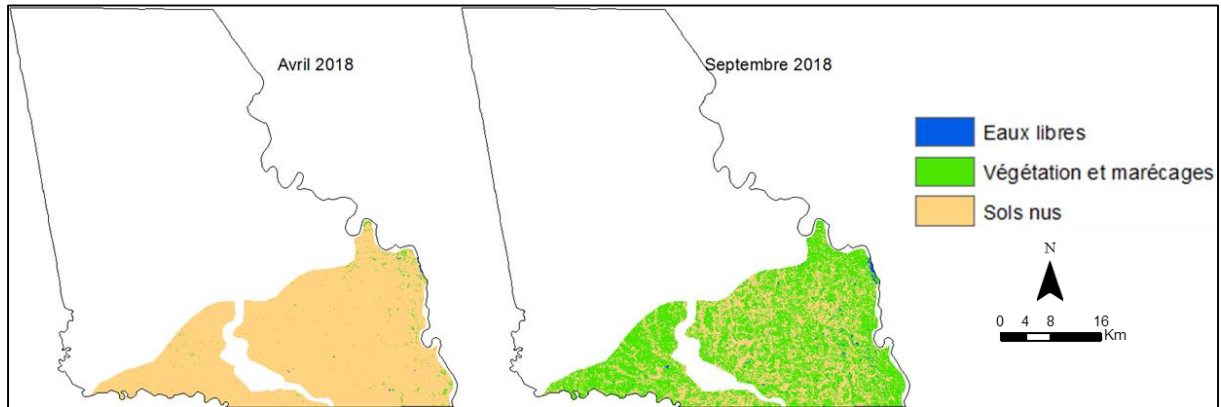


Figure 130 : Occupation des sols dans l'arrière-pays argileux. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Entre 2000 et 2018, l'évolution du couvert végétal est régressive sur plus de 60% de cette zone, et seuls les périmètres des berges de fleuves ou de l'arrière-pays sableux ont des tendances progressives ou stables. L'une des explications de cette évolution de la végétation se trouve dans la nature des sols qui sont décrits par Seignobos et Iyébi-Mandjek, (2000) comme étant compacts particulièrement dénudés, et laissant apparaître des affleurements rocheux. La seconde explication est liée à la nature même du couvert ligneux qui est moins diversifié et dominé par les Acacia qui sont pourtant des caducifoliées. L'utilisation des sols de cette zone pour les cultures de contre saisons justifie également cette évolution de la couverture végétale.

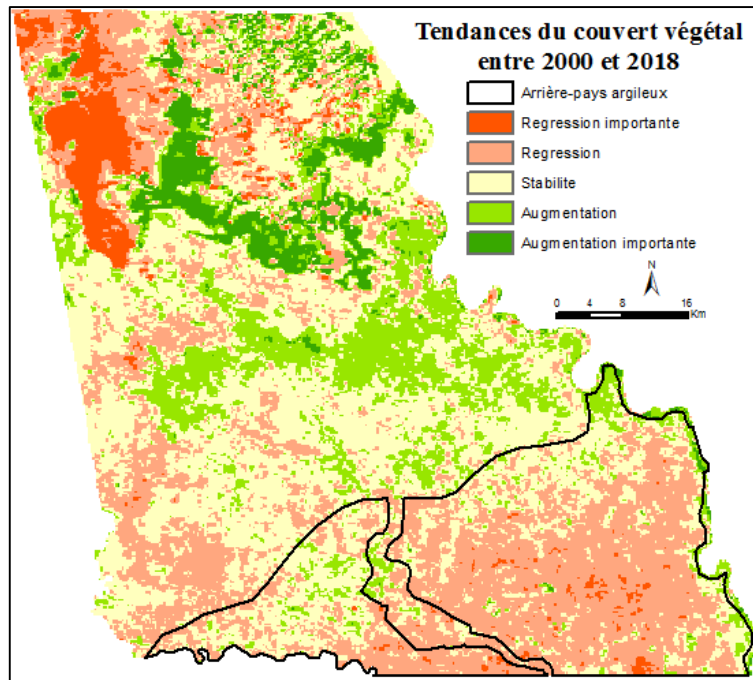


Figure 131 : Tendence d'évolution du couvert végétal dans l'arrière-pays argileux.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

En effet, les terres argileuses de l'arrière-pays constituent l'essentiel du terroir du lac Tchad dont les sols sont en majorité dédiés à la culture du sorgho de contre saison (Muskwari) et servent également de pâturage (Seignobos et Iyébi-Mandjek, 2000).

Par conséquent, l'agriculture de l'arrière-pays dans cette zone représente en réalité les espaces de cultures du Muskwari. Nos résultats montrent donc qu'entre 1984 et 1999 ces espaces ont presque triplé (figure 132). Ce qui montre l'augmentation des pressions anthropiques sur les sols. En revanche, contrairement aux deux précédentes zones l'agriculture dominante (agriculture de l'arrière-pays) dans cette zone se stabilise après 1999 (figure 132).

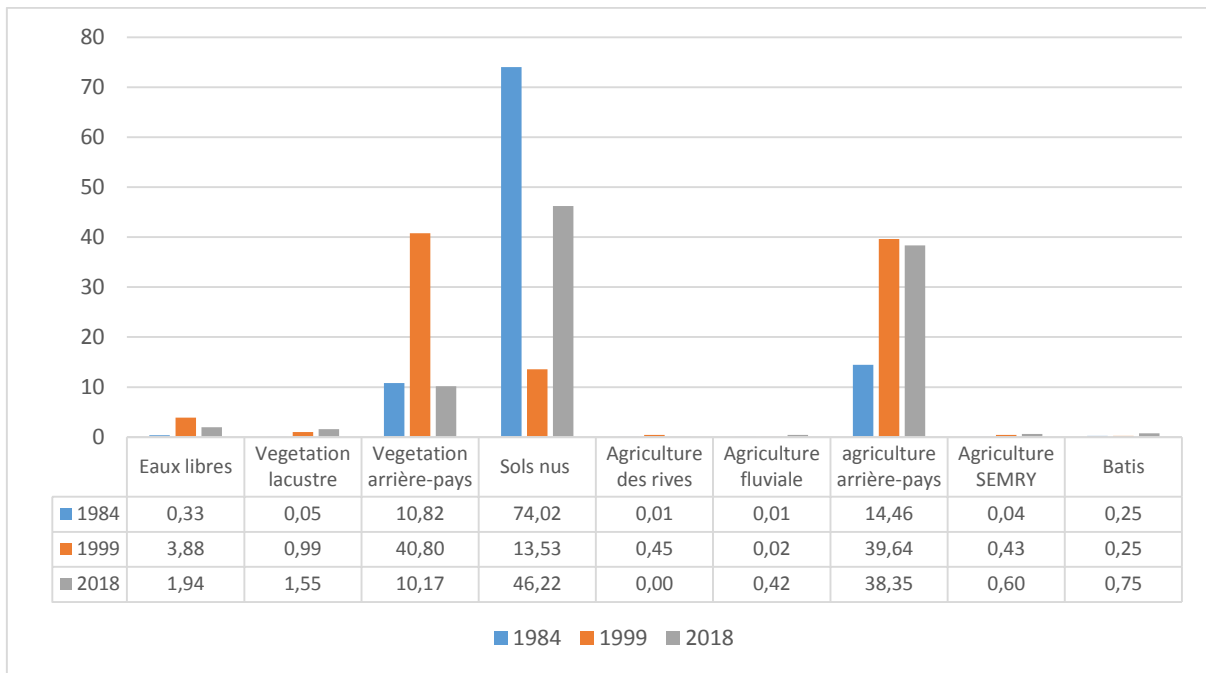


Figure 132 : Variabilités de l'utilisation des sols dans l'arrière-pays argileux en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Synthèse des dynamiques spatiales d'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols

L'occupation des sols de notre territoire d'étude est répartie entre les sols nus qui couvrent environ 50 % de l'espace, la végétation et marécages 35%, et les eaux libres qui occupent en moyenne 15%. Les analyses saisonnières de cette occupation mettent en évidence les influences des conditions climatiques sur la répartition des classes d'occupation.

En effet, les résultats montrent que les surfaces des classes d'occupation ne varient pratiquement pas entre deux saisons sèches. En Mars 1987, Avril 2000 et Avril 2018, l'occupation des sols est plus ou moins semblable avec les eaux libres sur environ 11% de l'espace, la végétation et marécages sur presque 28% et les sols nus sur 61% en moyenne. D'autre part, pendant les années arides comme en 1987, le passage de la saison sèche à la saison de pluies n'affecte pas sensiblement les superficies des classes d'occupations puisqu'en Mars comme en Octobre 1987, les eaux libres représentent presque 10% de l'espace, la végétation et marécages 30% et les sols nus sur 60%.

Par contre entre une année aride (1973, 1975 et 1987) et une année humide (2000 et 2018) ou entre la saison sèche et la saison des pluies d'une année humide, les changements de l'occupation des sols sont très importants. Par exemple entre Octobre 1987 et Août 2000 les superficies des eaux libres et celles de la végétation et marécages augmentent respectivement de 30% et 145%, pendant que celles de sols nus diminuent de 82%. C'est pareil entre Avril 2000 et Août 2000 où les eaux libres augmentent de 31%, la végétation et marécages de 162%, pendant que les sols nus régressent de 82%.

Ces résultats démontrent d'une part que les classes d'occupation des sols sont de très bon marqueurs géographiques de l'évolution de l'occupation des sols dans notre espace d'étude au même titre que les classes de végétations obtenues précédemment. D'autre part ils montrent que les conditions climatiques (les précipitations en particulier) conditionnent considérablement l'occupation des sols en améliorant la couverture végétale des sols lors du passage de la saison sèche à la saison des pluies ou entre une année aride et une année humide.

Par conséquent, ces résultats se complètent à ceux de l'évolution du couvert végétal entre 2000 et 2018 pour démontrer que le reverdissement observé au Sahel pendant les années 1990 (Eklundh et Olsson, 2003; Anyamba et Tucker, 2005; Heumann et al., 2007) suite à l'amélioration de la pluviométrie au Sahel se produit également dans notre espace d'étude, ce qui valide notre première hypothèse de recherche.

La cartographie de l'utilisation des sols met en évidence les modes de valorisation des ressources dans notre espace d'étude et montre qu'entre 1984 à 2018, les superficies des espaces agricoles ne cessent de croître. En 1984 elles correspondent à 13,3% du territoire d'étude, en 1999 ce pourcentage est de 25,58, et en 2018 il passe à 34,23. Dans ces

pourcentages, l'agriculture de l'arrière-pays pèse pour plus de 70% de l'espace totale agricole, suivie par l'agriculture de crue et de décrue sur les rives du lac Tchad, et de l'agriculture sur les bords des fleuves. Les superficies de l'agriculture de l'arrière-pays passent de 48827 Ha en 1984 à 120566,09 Ha en 2018, celles de l'agriculture des rives passent de 7298,28 Ha en 1984 à 26 884,36 Ha en 2018, et l'agriculture aux bords des fleuves passe de 6755 Ha en 1984 à 13635,26 Ha en 2018.

Les analyses diachroniques par surfaces agricoles et celle de l'agriculture de l'arrière-pays en particulier, montrent qu'entre l'année aride (1984) et l'année plus favorable en termes de précipitation (1999), les sols dénudés sont particulièrement mis à contribution pour l'expansion des surfaces agricoles. En revanche, entre deux années humides (1999 et 2018), c'est davantage la végétation naturelle qui est réduite au profit des surfaces agricoles. Par ailleurs, au niveau des rives du lac Tchad et des fleuves, la montée des eaux favorise la progression du front agricole vers les terres émergées, et accroît la disponibilité des espaces agricoles sur les rives et aux bords des fleuves. Par conséquent, l'agriculture des rives et celle des fleuves apparaissent comme étant les marqueurs des pressions anthropiques aux marges des espaces humides, et l'agriculture de l'arrière-pays est quant à elle est l'indicateur de ces pressions sur les terres émergées de l'arrière-pays.

Les dynamiques des surfaces agricoles s'accompagnent de celles des surfaces Bâties et pastorales. La superficie totale des espaces bâtis passe de 2115,18 hectares en 1984 à 2260,2 hectares en 2018. Et l'estimation des surfaces pastorales montre que leur disponibilité ne cesse de s'améliorer depuis 1984.

Ces résultats démontrent que le reverdissement de la zone d'étude favorisé par l'amélioration des conditions climatiques a impulsé l'accentuation des pressions anthropiques sur le milieu. Ils valident par conséquent notre deuxième hypothèse de recherche puisqu'ils prouvent que l'accroissement des pressions anthropiques sur les ressources lacustres du lac Tchad observé par Lemoalle et Magrin, (2014); Rangé (2016), s'exerce également dans les terres émergées de l'arrière-pays.

L'analyse des évolutions spatio-temporelles de l'occupation et de l'utilisation des sols en fonctions des facteurs géographiques (type de sols, essences végétales, etc.) montre les influences diverses et variées que peuvent avoir les composantes de l'environnement sur les modes de valorisation de l'espace. C'est pourquoi dans le chapitre suivant, nous intégrons dans un modèle d'analyse du paysage, les composantes identifiées comme étant les plus influentes pour mieux décrire la structuration du paysage du territoire d'étude.

Chapitre 5 : Modèles de structurations paysagères et de simulation des dynamiques territoriales

Introduction

Les deux chapitres qui précèdent ont servi à cartographier notre espace d'étude (couvert végétal, occupation et utilisation des sols), à comprendre les dynamiques spatiales environnementales et socio-environnementales en cours depuis 1973, et à analyser les liens et les corrélations entre ces dynamiques et les facteurs géographiques (types de sols, températures, humidité relative de l'air, etc.) pour établir les diverses influences de ces composantes de l'environnement sur la disposition de l'occupation et de l'utilisation des sols de la zone d'étude. Les influences de ces facteurs géographiques se conjuguent à la répartition de l'occupation et de l'utilisation des sols (dont les différentes classes servent également d'observables géographiques des dynamiques d'évolutions) pour conditionner dans ce milieu la mise en valeur ou pas des ressources. Il est donc possible en utilisant les approches par modélisation spatiale d'identifier les grands ensembles territoriaux présents sur notre site d'étude et les analyser.

Ce chapitre a pour objectif de développer aussi bien sur le plan conceptuel que méthodologique, une nouvelle approche opérationnelle en géomatique de délimitation et d'évaluation fonctionnelle des grands ensembles paysagers en région aride, en prenant pour objet d'étude notre zone d'étude.

La première étape de cette approche basée exclusivement sur les images satellitaires est l'identification (parmi les résultats cartographiques obtenus précédemment) des paramètres environnementaux à intégrer pour modéliser la structuration du paysage (figure 133). La seconde étape vise à analyser les interrelations spatiales entre ces paramètres environnementaux à partir des algorithmes statistiques (ACP) et de description morpho structurale (MNF, réseaux neuronaux, etc.). En fin, la dernière étape permet de délimiter les grands ensembles territoriaux en regroupant les espaces aux caractéristiques spatiales communes et aux fonctions partagées.

La simulation prospective des changements des ensembles territoriaux identifiés permet ensuite de prédire leurs dispositions futures.

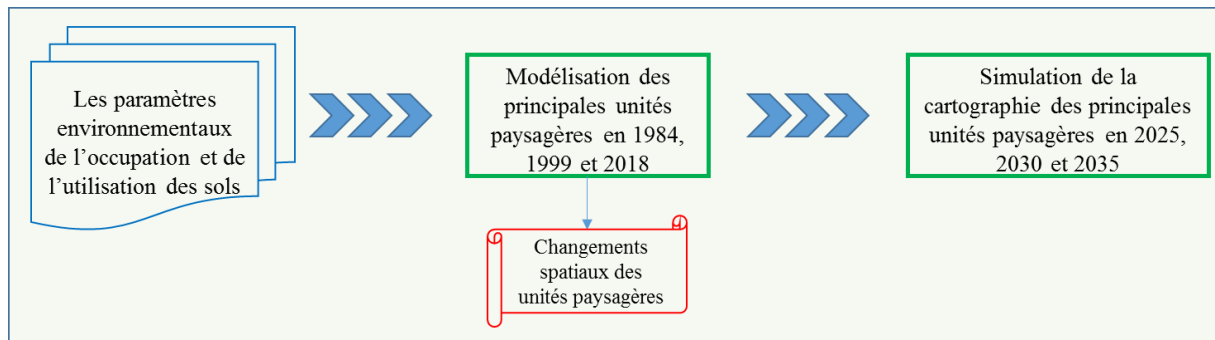


Figure 133 : Etapes de modélisation de la structure paysagère et de simulation des changements spatio-temporels. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

5.1. Modélisation de la structuration paysagère

Modéliser en géographie c'est simuler le fonctionnement d'un espace pris comme objet d'étude et qui par conséquent devient un objet scientifique, pour lequel on va s'intéresser aux interrelations entre ses éléments constitutifs (Chamussy, 1989; Gadai, 2011b). Dès lors, la modélisation en géographie produit des modèles d'analyses spatiales qui sont en fait des schémas représentatifs des réalités matérielles et immatérielles, permettant de ressortir et prévoir les mécanismes généraux d'organisation des phénomènes divers dans l'espace (étalement urbain, métropolisation etc...) (Gadai, 2011b).

Pour modéliser un objet géographique il est donc nécessaire de bien identifier les éléments du milieu à prendre en considération. Dans les régions sahéliennes où la moindre variabilité spatiale et temporelle des conditions du milieu entraîne de profondes dynamiques environnementales et socio-environnementales (dans notre espace d'étude les cartographies du couvert végétal, de l'occupation et de l'utilisation des sols montrent par exemple le reverdissement suite à l'amélioration de la pluviométrie, et l'augmentation des surfaces agricoles et bâties, etc.), l'identification des paramètres environnementaux à intégrer à la modélisation est particulièrement délicate. Les paramètres environnementaux sont très liés entre eux ce qui implique de les étudier dans leur globalité grâce aux algorithmes de modélisation permettant des analyses intégrées. Par conséquent, la méthodologie de modélisation repose sur le choix des paramètres environnementaux et sur la méthode de modélisation adoptée.

5.1.1. Les facteurs géographiques de la structure du paysage

Nous modélisons la structure paysagère de notre espace d'étude en combinant aux observables géographiques de l'occupation et de l'utilisation des sols, les facteurs géographiques responsables des changements spatio-temporels observés. Ils sont choisis en fonction des résultats cartographiques des dynamiques spatiales d'évolution du couvert végétal, de l'occupation et de l'utilisation des sols (chapitre 3 et 4). Leur choix repose également sur l'intérêt des aspects descriptifs et fonctionnels des informations contenues dans les résultats cartographiques, et qui sont indispensables à la compréhension de la structuration du paysage du milieu d'étude.

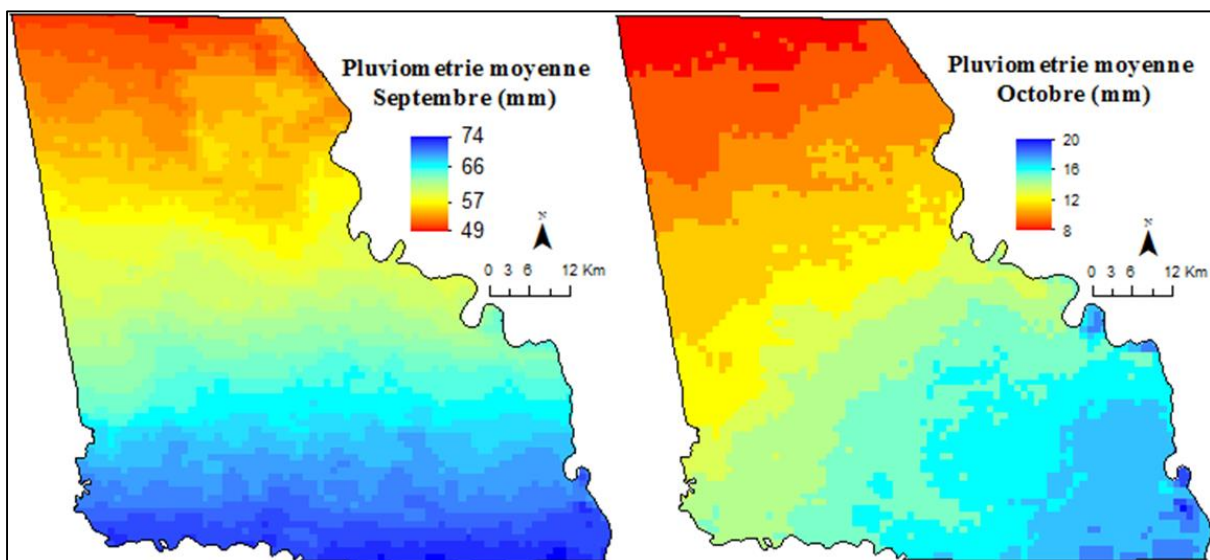
En effet, les cartes d'occupation et d'utilisation des sols présentent la répartition des espaces mis en valeur (agriculture et répartition du bâti) dans la zone d'étude et montrent une accentuation des pressions anthropiques depuis les grandes sécheresses sahéliennes (1984) (figures 95 et 105). Les surfaces agricoles et urbanisées n'ont cessé de croître dans l'arrière-pays comme dans l'espace lacustre, au détriment des sols nus et de la végétation naturelle.

Nous avons pu établir par la cartographie des dynamiques spatiales d'évolution du couvert végétal que c'est le reverdissement de l'espace d'étude observé à partir des années 2000 qui impulse l'accroissement des pressions anthropiques. En effet, en plus

des cartes diachroniques d'occupation des sols (figure 95 chapitre 4), l'indice de végétation LAI (cf chapitre 4 pour la formule de calcul et les caractéristiques) utilisé pour estimer les surfaces pastorales, met en évidence l'amélioration de la couverture végétale et montre l'augmentation de la disponibilité des pâturages en saison des pluies notamment (figure 122).

La littérature attribue ce reverdissement à l'amélioration de la pluviométrie au Sahel pendant la décennie 1990 (Ali et Lebel, 2009; Descroix et al., 2016). En plus, nos résultats de corrélations linéaires entre l'indice de végétation NDVI MOD13Q1, et les paramètres climatiques (précipitation, température, humidité de l'air, indice d'aridité, évapotranspiration) sur la période 2000-2015 montrent justement que la pluviométrie et l'humidité relative de l'air sont les facteurs climatiques les plus influents sur l'indice de végétation avec des coefficients de corrélations de 0,68 et 0,79 respectivement.

Les cartes de pluviométrie sont par conséquent intégrées à cette modélisation, et les images satellites CHIRP'S sont utilisées pour visualiser la distribution moyenne des précipitations sur l'ensemble du territoire d'étude pour les mois de Septembre et d'Octobre (figure 134). Septembre et Octobre sont choisis pour faire correspondre la pluviométrie avec l'utilisation des sols et la répartition des pâturages. On observe que les faibles valeurs de précipitations dominent au nord de la région d'étude et les fortes valeurs sont enregistrées dans l'arrière-pays au sud. A mesure que la saison sèche s'installe, les faibles valeurs de précipitation progressent vers les zones de l'arrière-pays, et les précipitations se retirent.



Concernant l'humidité relative de l'air (qui est également fortement corrélé à la pluviométrie et doit par conséquent être intégrée à la modélisation), les valeurs utilisées jusqu'ici sont des relevés *in situ* de station météorologique. Il est donc nécessaire de les

obtenir sous forme de cartes. Pour cela, nous calculons les températures de brillance des sols (figure 135). Elles nous permettent en effet, de distinguer les zones humides des zones moins humides, dans la mesure où les faibles valeurs correspondent justement aux zones humides de l'espace lacustre, et les valeurs élevées sont situées dans les terres émergées de l'arrière-pays (figure 135).

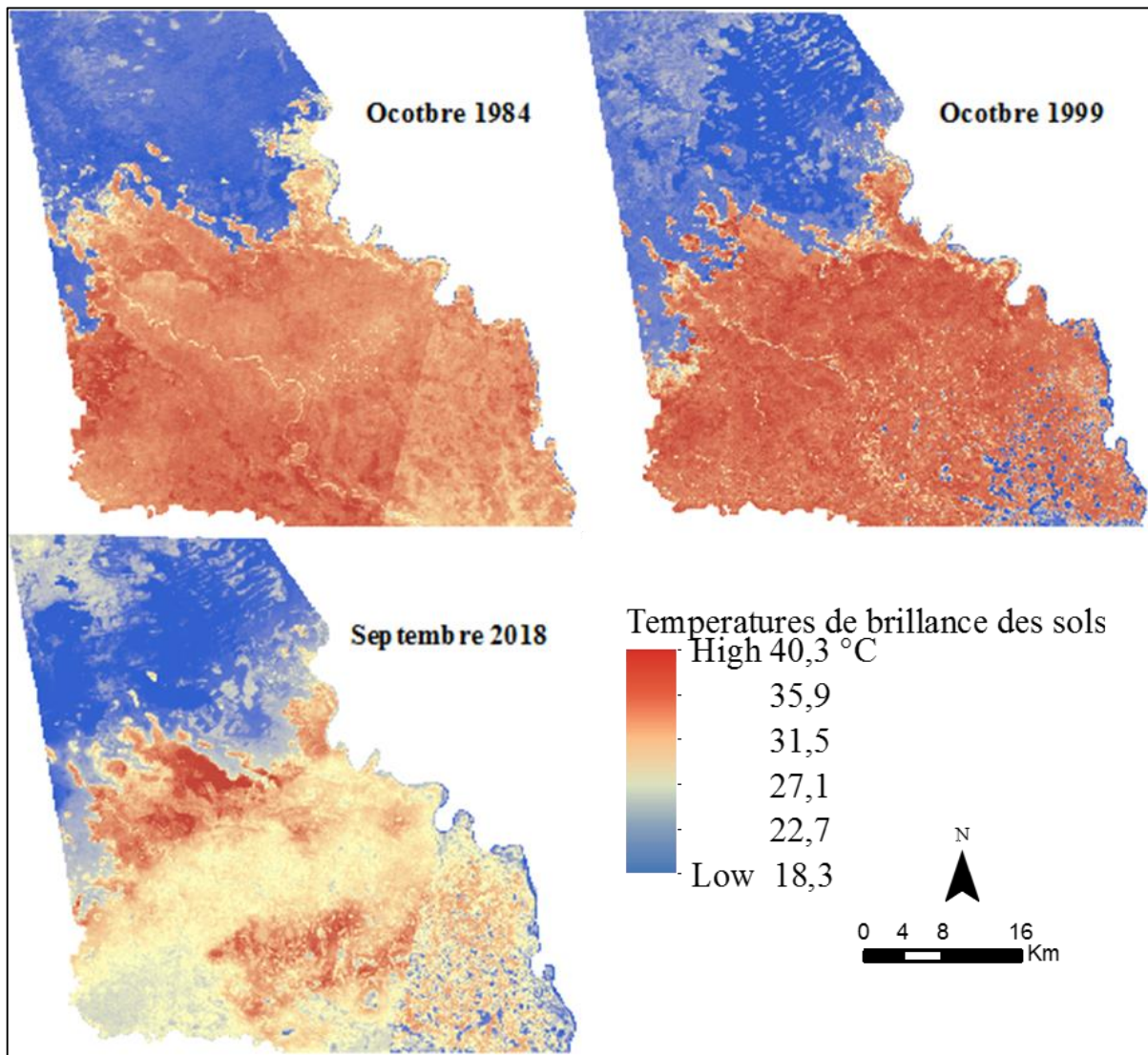


Figure 135 : Distribution spatiale des températures de sols en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

En fin, les cartes de couverture végétale, d'occupation et d'utilisation des sols, superposées par analyse spatiale à celles de la géomorphologie des sols et des terroirs agricoles ont permis d'établir les influences du substrat pédologique sur la couverture végétale des sols et leurs utilisations. Les sols sableux en proximité des espaces lacustre et humide ont un couvert végétal stable ou en augmentation contrairement aux vertisols argileux où cette végétation est régressive. La texture des sols est donc déterminante pour cette modélisation.

Cependant, les cartes de géomorphologie des sols et de répartition des terroirs agricoles utilisées pour les analyses spatiales (chapitre 4 et 5) ne couvrent qu'une partie de l'espace d'étude. C'est la raison pour laquelle nous faisons recours aux indices spectraux de sols pour avoir la texture des sols sur l'ensemble de la zone d'étude.

L'indice utilisé est le GSI (topsoil Grain Size Index) ou indice de granulométrie de la couche arable, élaboré à partir de la courbe de réflectance des sols pour caractériser la texture de la surface des sols (Xiao et al. 2006).

$$GSI = \frac{(R - B)}{(R + B + V)}$$

R V B sont les bandes spectrales Rouge, Verte et Bleue

Cet indice caractérise la texture de la surface des sols en indiquant la grosseur des grains de leur couche superficielle (Madeira Netto, 1991). Les valeurs élevées indiquent la dominance des particules de tailles grossières (Ngandam et al., 2016; Oliveira et al., 2016). Sur la carte d'Octobre 1984 par exemple on observe très bien dans l'arrière-pays la distinction entre les sols sableux en gris clair (dont les valeurs d'indice sont élevées) en périphérie de l'espace lacustre, et les sols argileux plus sombres dans l'arrière-pays lointain (indice plus faibles) (figure 136).

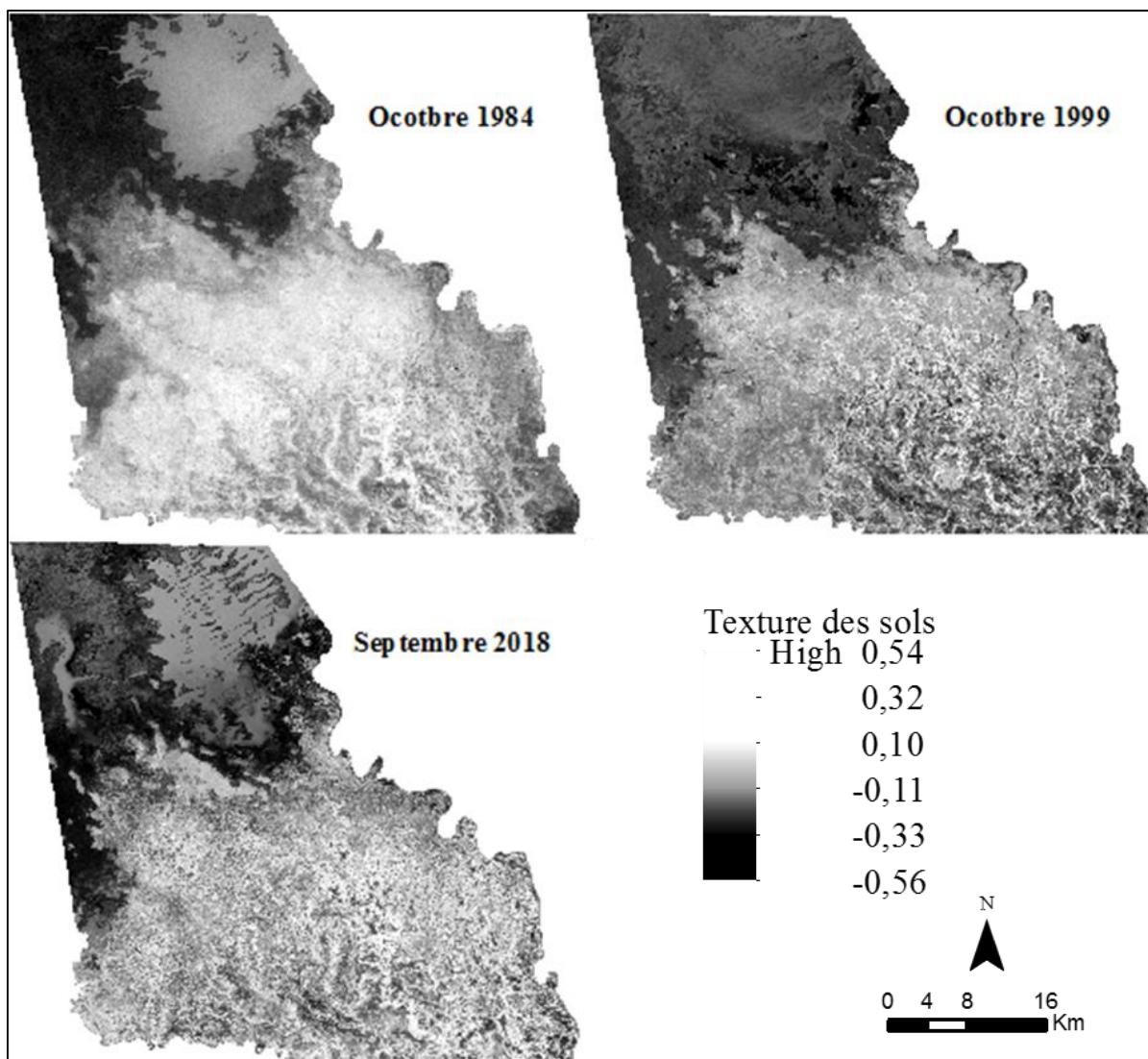


Figure 136 : L'indice de texture des sols en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Par conséquent les paramètres environnementaux à considérer pour modéliser la structuration du paysage de notre espace d'étude sont : la couverture végétale ; la pluviométrie ; l'utilisation des sols ; l'humidité relative de l'air à travers la température de brillance des sols ; et la texture des sols.

De ce fait les images satellites utilisées sont celles de Landsat-5 d'Octobre 1984, Landsat-7 d'Octobre 1999, et Sentinel-2 de Septembre 2018. Au-delà du contexte climatique qui justifie le choix des années (1984 année aride, 1999 et 2018 années humides) et des mois (saison des pluies notamment), elles permettent d'utiliser les résultats cartographiques déjà obtenus (répartition des surfaces agricoles, des espaces bâtis, des pâturages, etc.)

5.1.2. Méthodologie de modélisation de la structure paysagère du territoire d'étude

Dans cette thèse, nous cherchons à modéliser les relations structurales et morpho structurales entre les paramètres importants de l'occupation et de l'utilisation des sols pour identifier les grandes unités paysagères de notre site d'étude (figure 137).

Parker et al., (2003) (dans Corgne, (2004a) synthétisent les méthodes de modélisation de l'environnement en sept groupes à savoir : les modèles mathématiques ; les modèles systémiques ; les modèles statistiques ; les modèles experts ; les modèles d'évolution ; les modèles cellulaires ; et les modèles multi-agents (cf chapitre 2).

Pour modéliser les relations structurales et morpho structurales entre les paramètres importants de l'occupation et de l'utilisation des sols, nous utilisons l'algorithme d'intelligence artificielle par MNF (Minimum Noise Fraction). C'est un algorithme appartenant au modèle mathématique d'intelligence artificielle, qui est simple d'utilisation et a montré ses capacités pour de telles analyses (Lu et al., 2008; Wong et al., 2017).

Cet algorithme est une double transformation qui calcul les combinaisons linéaires normalisées sur les images qui maximisent le rapport entre le bruit et la qualité du signal (Green et al., 1988), pour supprimer le bruit (redondance ou dégradation d'information) sur ces images ou sélectionner celles qui contiennent le plus d'information. La première transformation détermine les images ou bandes spectrales qui contiennent les informations les plus pertinentes et la seconde transformation lisse les bandes bruitées (spectralement) (cf chapitre 2).

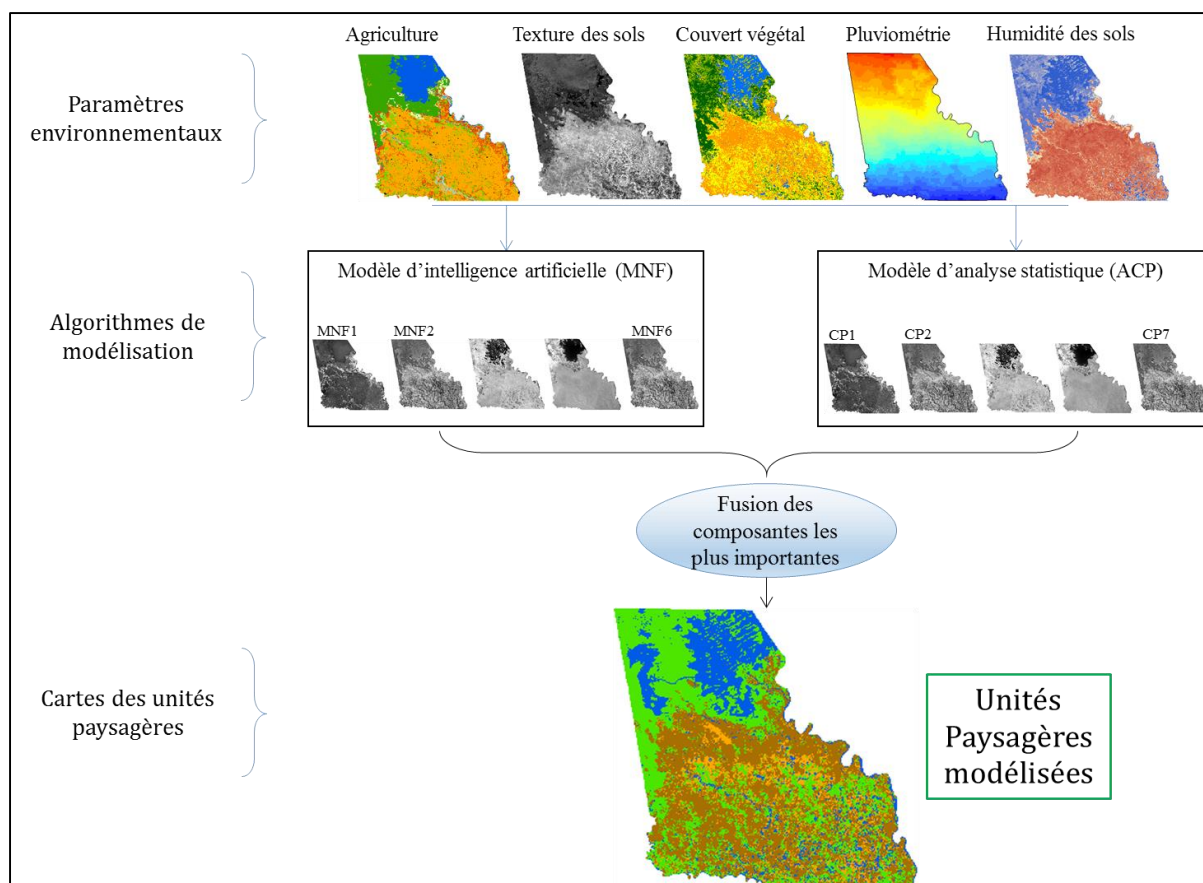


Figure 137 : Les principales étapes de modélisation des unités paysagères. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Parallèlement à l'approche par MNF, une Analyse en Composante Principale (ACP) est appliquée à nos cartes pour établir les liens statistiques entre les paramètres environnementaux à modéliser (figure 137).

Cet algorithme (décrit dans le chapitre 3) est une méthode de fusion de l'information dans un espace de dimension réduite de façon à maximiser du point de vue statistique la quantité d'information contenue dans les cartes des paramètres environnementaux, dans un nombre limité de composantes (Chitroub, 2007; Estornell et al., 2013). La matrice de corrélation est utilisée sans rotation des axes pour traiter chaque pixel des images originales comme des variables spatiales (cf chapitre 3)

Les algorithmes sont appliqués sur les cartes des paramètres environnementaux pour chaque année. En d'autres termes, l'algorithme d'intelligence artificielle par MNF et l'analyse en composante principale sont appliqués sur les cartes de 1984, ensuite aux cartes de 1999, et en fin aux cartes de 2018 (figure 137). Cette méthode permet le suivi diachronique des structures paysagères mises en évidence par les composantes principales obtenues.

5.1.3. Les structures paysagères mises en évidence

Les composantes principales obtenues des modélisations par MNF et par l'ACP mettent en évidence plusieurs structures paysagères, qui sont ci-dessous présentées et décrites. Les classifications des composantes principales (MNF et ACP) les plus importantes permettent ensuite d'identifier les principales unités paysagères.

5.1.3.1. Une bonne différenciation de l’empreinte des modes de valorisation de l’espace

La première structuration spatiale qui se dégage des composantes principales obtenues est la discrimination fonctionnelle des surfaces de sols. Les zones mises en valeur sont distinguées de celles non exploitées ou peu exploitées.

En effet, sur les composantes MNF 5 de 1984, ACP 3 de 1999, et ACP 4 de 2018, la distinction est très nette entre les surfaces exploitées (espaces mis en valeur) qui apparaissent en gris clair sur les cartes, et les surfaces non exploitées (espaces mis non en valeur) qui sont plus sombres (figure 138). Les surfaces exploitées regroupent essentiellement les périmètres agricoles et bâtis, et les espaces non exploités présents aussi bien dans la zone lacustre que dans les terres émergées regroupent les eaux libres, une partie de la végétation et des sols nus (figure 138).

Par conséquent, ces trois composantes s'intéressent particulièrement à la dimension fonctionnelle des espaces en distinguant les surfaces exploitées de celles non exploitées, et permettent une fois de plus de constater l'exploitation croissante des espaces dans notre territoire d'étude entre 1984 et 2018.

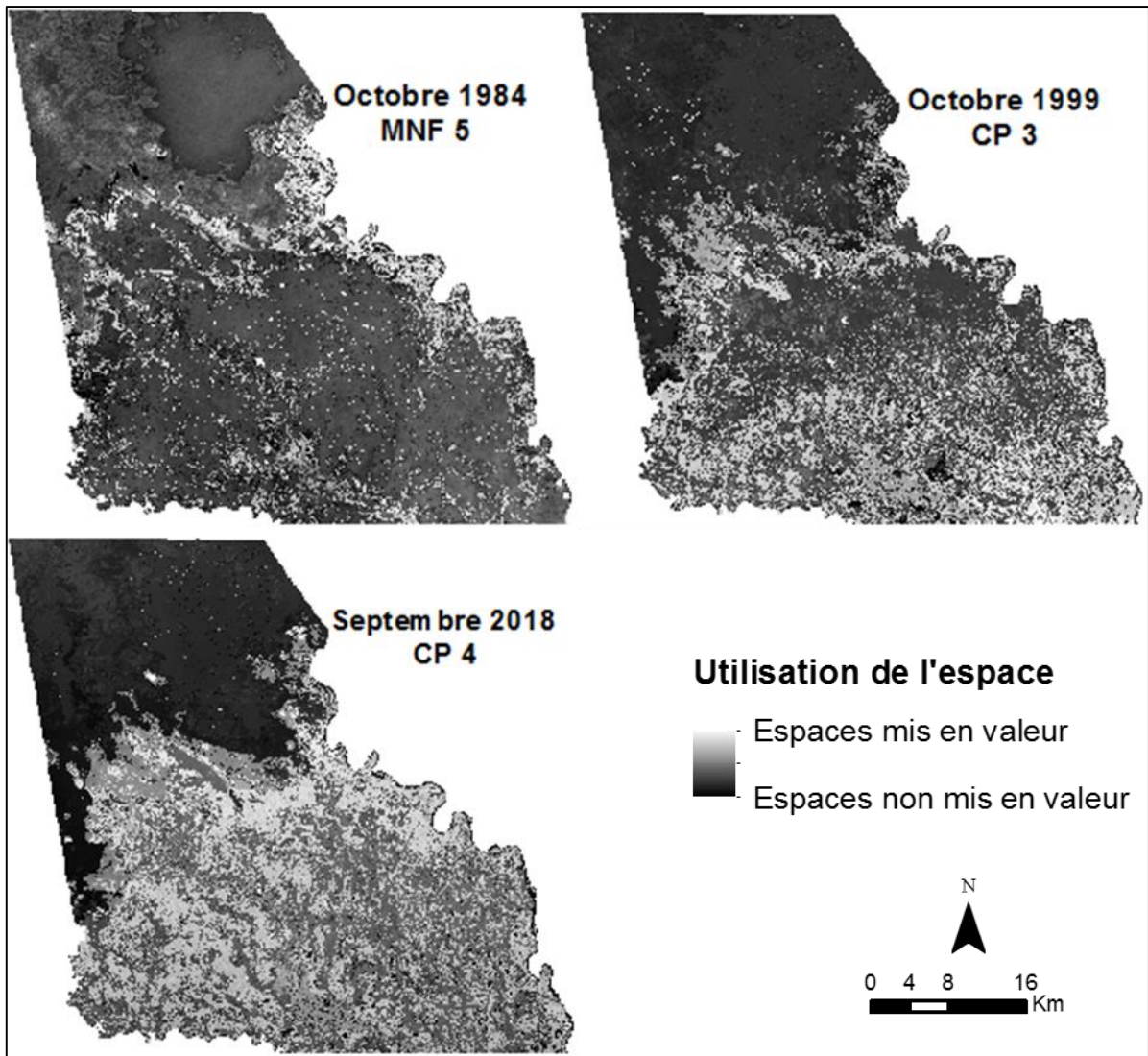


Figure 138 : La différenciation de l’empreinte des modes de valorisation de l’espace.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

5.1.3.2. La distribution des surfaces habitées conditionnée par la morphologie du territoire

La seconde observation sur la structure spatiale concerne la distribution de l’habitat. En effet, les cartes des composantes principales permettent de constater que la répartition des surfaces bâties dans la zone d’étude est fonction de la morphologie du territoire.

Sur les cartes des composantes MNF 5 de 1984, ACP 3 de 1999, et ACP 4 de 2018, les surfaces bâties apparaissent plus claires que les autres surfaces exploitées, et l’influence des cours d’eau sur l’évolution de l’habitat est perceptible (figure 139). Les cas les plus illustratifs sont ceux des villes de Blangwa et de Makary où les surfaces bâties ont évolué entre 1984 et 2018 en épousant les tracés des fleuves situés dans leurs périphéries. A Blangwa la ville s’allonge et l’habitat progresse le long du fleuve Chari, et à Makary les

périmètres ouest de la ville épousent les contours du fleuve Serbewel (figure 139). Cette disposition s'explique en partie par la nécessité d'exploiter pour les besoins agricoles notamment les terres arables disposées le long des fleuves.

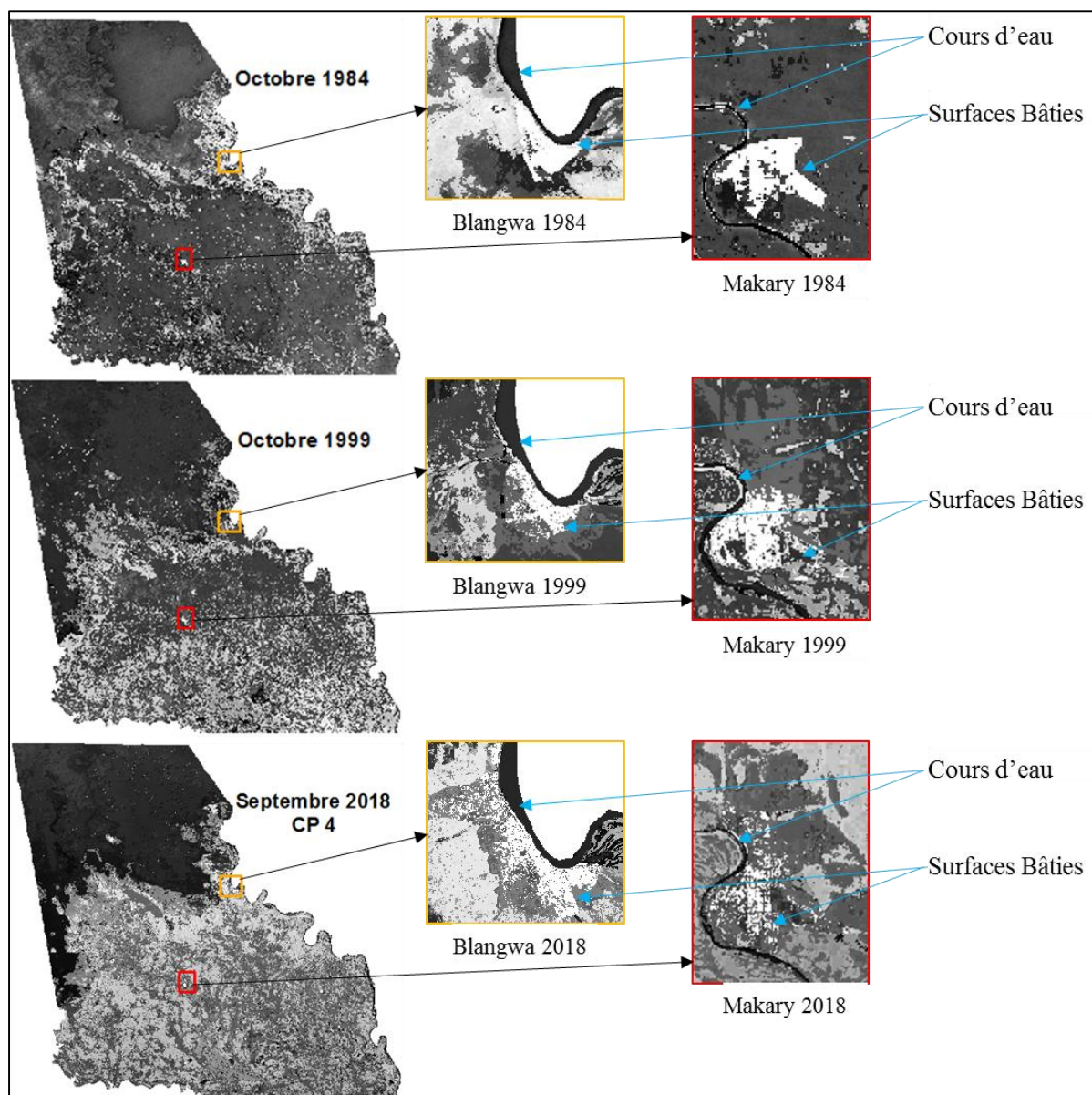


Figure 139 : Evolutions des surfaces bâties en fonction de la morphologie du territoire.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Par ailleurs, la composante MNF 4 de 2018 (figure 140), confirme que la répartition des périmètres habités dans l'arrière-pays est loin d'être aléatoire et montre des villages essentiellement disposés à proximité des bras de cours d'eau fonctionnels ou d'anciens cours d'eau. Les surfaces artificialisées observées en gris claire sont toutes regroupées et alignées aux abords des dépressions (figure 140).

C'est une nouvelle remarque qui vient compléter les informations sur la distribution du bâti, puisque sur nos cartographies de l'utilisation des sols (chapitre 4), cette

disposition particulière du bâti en fonction de la morphologie du territoire est difficilement perceptible.

La répartition observée des surfaces urbanisées à proximité des bras de cours d'eau fonctionnels ou d'anciens cours d'eau est également liée à la nécessité pour les populations de disposer de terres viables pour les besoins agricoles notamment. Les lits majeurs des cours d'eau fonctionnels sont mis en exploitation pour les cultures maraîchères, et dans les cours d'eau temporaires, les canaux d'irrigation sont construits pour retenir les eaux et les canaliser ensuite dans les exploitations agricoles.

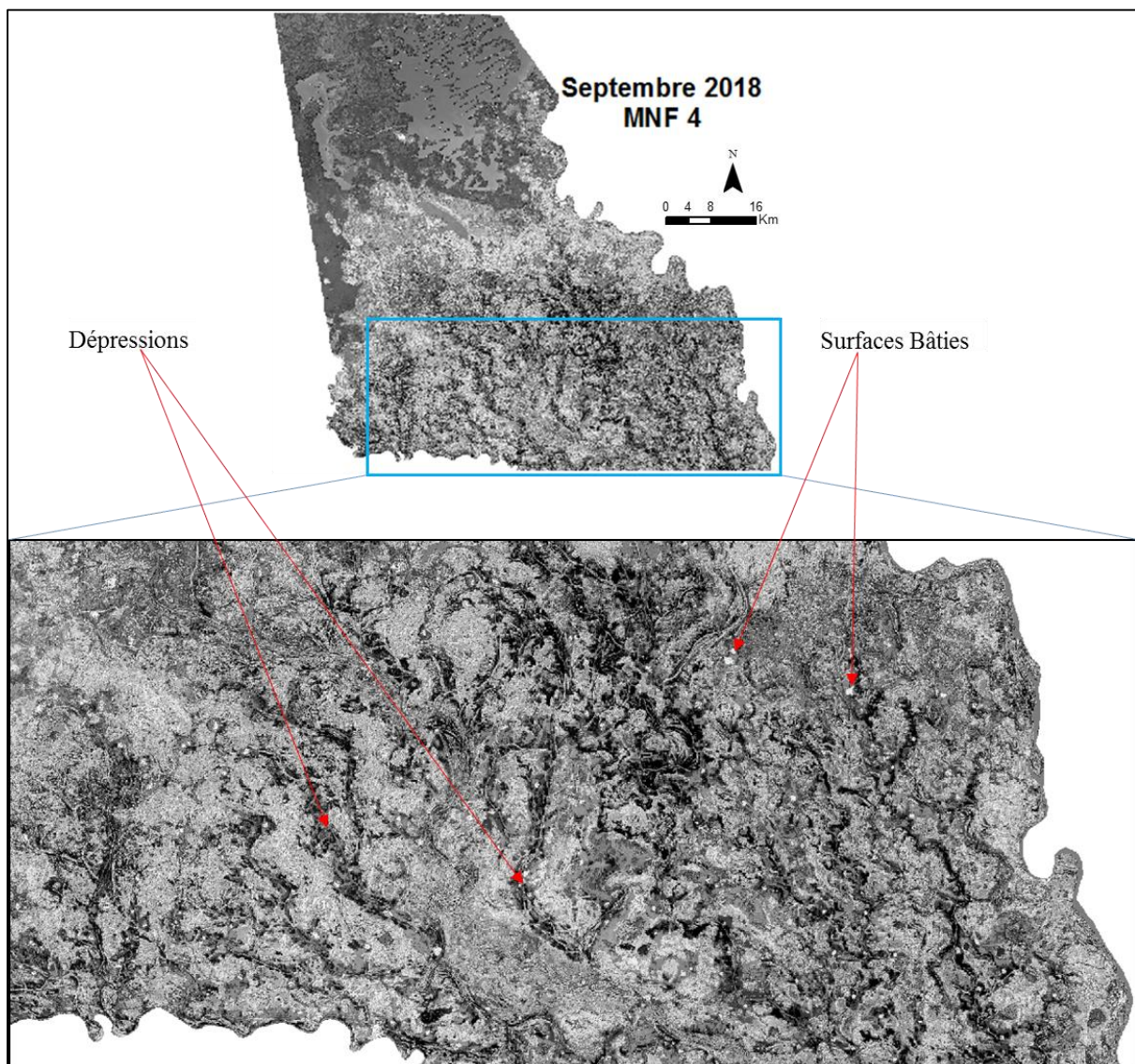


Figure 140 : Distribution des surfaces bâties le long des dépressions. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

5.1.3.3. Une organisation spatiale qui discrimine plusieurs états de surfaces

Les composantes principales (MNF et ACP) permettent également de séparer l'espace d'étude en fonction de la teneur en eau de surface. Sur les cartes des composantes ACP 2 de 1984, MNF 1 de 1999, et ACP 4 de 2018, on observe en effet que les terres humides gorgées d'eau et présentes aussi bien dans l'espace lacustre que dans l'arrière-pays (1999) apparaissent en noir à cause de leur forte contenance en eau de surface (figure 141). Les chenaux de décantation, les berges des cours d'eau et les rivières temporaires sont également illustrés en noir.

En revanche, les zones en couleur gris clair majoritaires dans l'arrière-pays montrent les milieux faiblement humides et secs (figure 141).

Ces composantes ont sans doute capitalisé les informations apportées par la température de brillance des sols et les précipitations pour discriminer ces états de surfaces. Elles montrent une fois de plus les dynamiques spatiales d'évolutions des espaces lacustres entre 1984 et 2018, déjà observés à partir des cartographies de l'occupation des sols (chapitre 4).

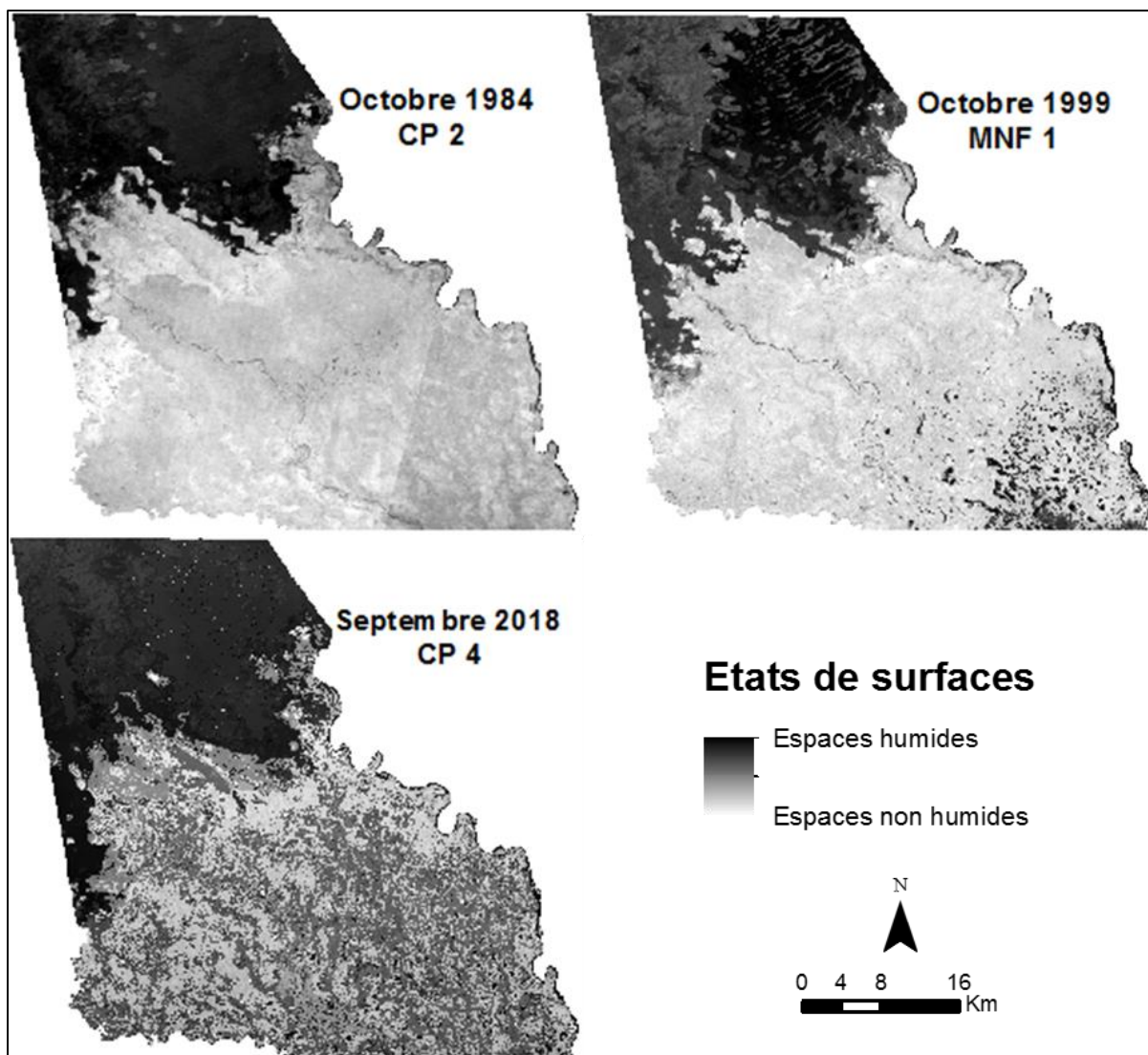


Figure 141 : Différenciation entre les espaces humides et les sols nus secs. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Par ailleurs, pour les trois dates (1984, 1999 et 2018), les cartes des troisièmes composantes MNF séparent également l'espace d'étude en fonction de la teneur en eau de surface, sauf que pour cette fois ce sont les eaux libres qui sont différenciées du reste de l'espace d'étude (figure 142).

Les eaux libres sont en effet illustrées en couleurs sombres et se distinguent des terres émergées qui apparaissent en gris clair. Cette représentation sur ces trois cartes montrent bien leurs dynamiques spatiales dévolution entre 1984 et 2018, déjà observés à partir des cartographies de l'occupation des sols (chapitre 4).

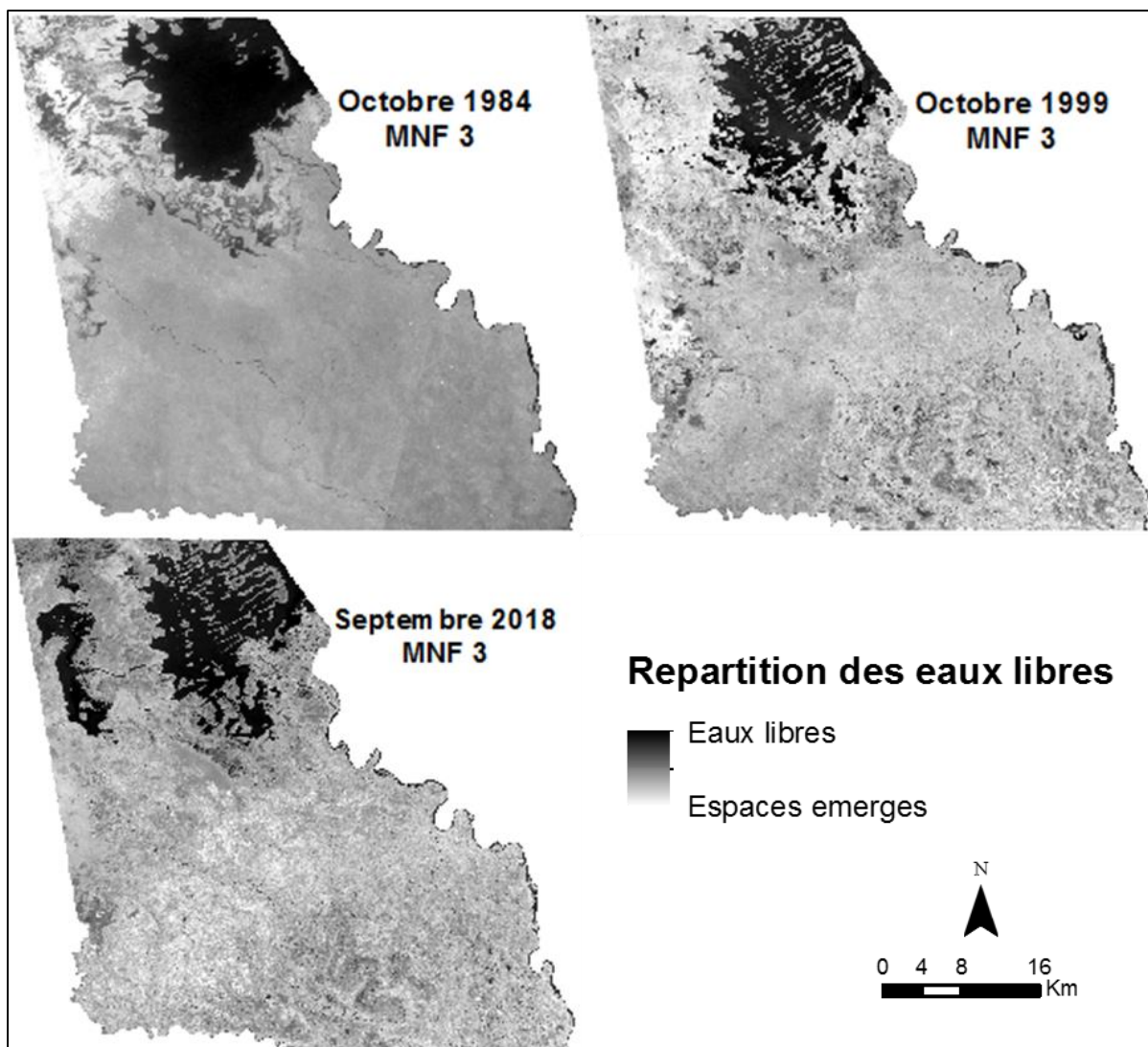


Figure 142 : Différenciation entre les eaux libres et le reste de l'espace d'étude.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Tableau 32. Poids des composantes des ACP et des MNF en 1984, 1999 et 2018.

1984		
	PCA S-MODE COMPONENT	MNF
C1	99,955609	98,915394
C2	0,041533	0,647912
C3	0,00199	0,381243
C4	0,000871	0,054986
C5	0,000003	0,000217
C6	0,000001	0,000109
C7	0,000001	
1999		
	PCA S-MODE COMPONENT	MNF

C1	99,742181	99,996233
C2	0,253516	0,001909
C3	0,002676	0,001628
C4	0,001617	0,000229
C5	0,000006	0,000002
C6	0,000004	0,000001
C7	0,000001	
2018		
	PCA S-MODE COMPONENT	MNF
C1	99,754383	99,998325
C2	0,241997	0,000852
C3	0,002686	0,00068
C4	0,000922	0,000141
C5	0,000012	0,000001
C6	0,000001	0,000001
C7	0,000001	

5.1.4. Répartition spatiales des principales unités paysagères

Le résumé en une image des informations contenues dans les composantes principales des ACP et des MNF, permet de fusionner les spécificités géographiques décrites par les composantes principales les plus importantes. Les cartes qui en résultent (figure 143) permettent de cette manière de reconstituer les grands ensembles territoriaux que nous désignons par « Unités Paysagères ». En effet, les analyses des cartes des composantes principales (MNF et ACP) montrent qu'il est possible de modéliser les structures spatiales de notre territoire d'étude en fonction de trois critères au minimum : l'usage des sols ; la teneur en eau de surface ; et la répartition des eaux libres.

Cependant, ces structures spatiales décrites précédemment ne sont pas toutes contenues dans les mêmes composantes d'une date à l'autre (tableau 33). Il est donc nécessaire de fusionner pour chaque date les composantes principales les plus importantes (figure 137) afin d'obtenir les cartographies des unités paysagères. Les combinaisons des composantes principales pour obtenir l'image de synthèse diffèrent d'une date à l'autre en raison du poids des composantes, et des informations spatiales contenues dans chacune d'elles (tableau 33).

Pour l'année 1984, la composante MNF 5 qui renseigne sur l'exploitation des espaces est combinée à la composante ACP 2 qui met en évidence l'humidité des sols et à la composante MNF 3 qui distingue les eaux libres du reste du territoire (tableau 33). En 1999, ces trois structures spatiales sont prises en compte en combinant respectivement les composantes 3 de l'ACP, et les composantes 1 et 3 de MNF (tableau 33). En 2018, la composante 4 de l'ACP qui permet de tenir compte aussi bien de l'exploitation des espaces

et de l'humidité des sols, est combinée à la composante MNF 3 qui renseigne sur les eaux libres (tableau 33).

Tableau 33. Les composantes principales retenues pour la modélisation des structures paysagères.

Dates	Structures paysagères mises en évidence		
	Exploitation des espaces	Humidité des sols	Eaux libres
Octobre 1984	MNF 5	CP 2	MNF 3
Octobre 1999	CP 3	MNF 1	MNF 3
Septembre 2018	CP 4	CP 4	MNF 3

Chaque unité paysagère obtenue est alors un espace homogène en termes d'éléments constitutifs, de fonction, de structures, et de représentations. Par conséquent, les cartes de structures paysagères (figure 143) ne sont pas des classifications classiques de l'occupation du sol au sens ordinaire du terme, mais davantage une catégorisation des grands ensembles homogènes de notre territoire d'étude.

En fonction des trois critères de modélisation qui se dégagent des composantes principales (MNF et ACP), quatre unités paysagères sont obtenues sur les cartes de modélisation des structures paysagères : les « **Eaux libres** » ; l'« **Espace lacustre** » ; les « **Terres émergées valorisées** » ; et les « **Terres émergées non valorisées** ». La figure (143) illustre donc entre 1984 et 2018 la distribution et les dynamiques spatiales des grands ensembles territoriaux (unités paysagères) identifiées dans notre zone d'étude.

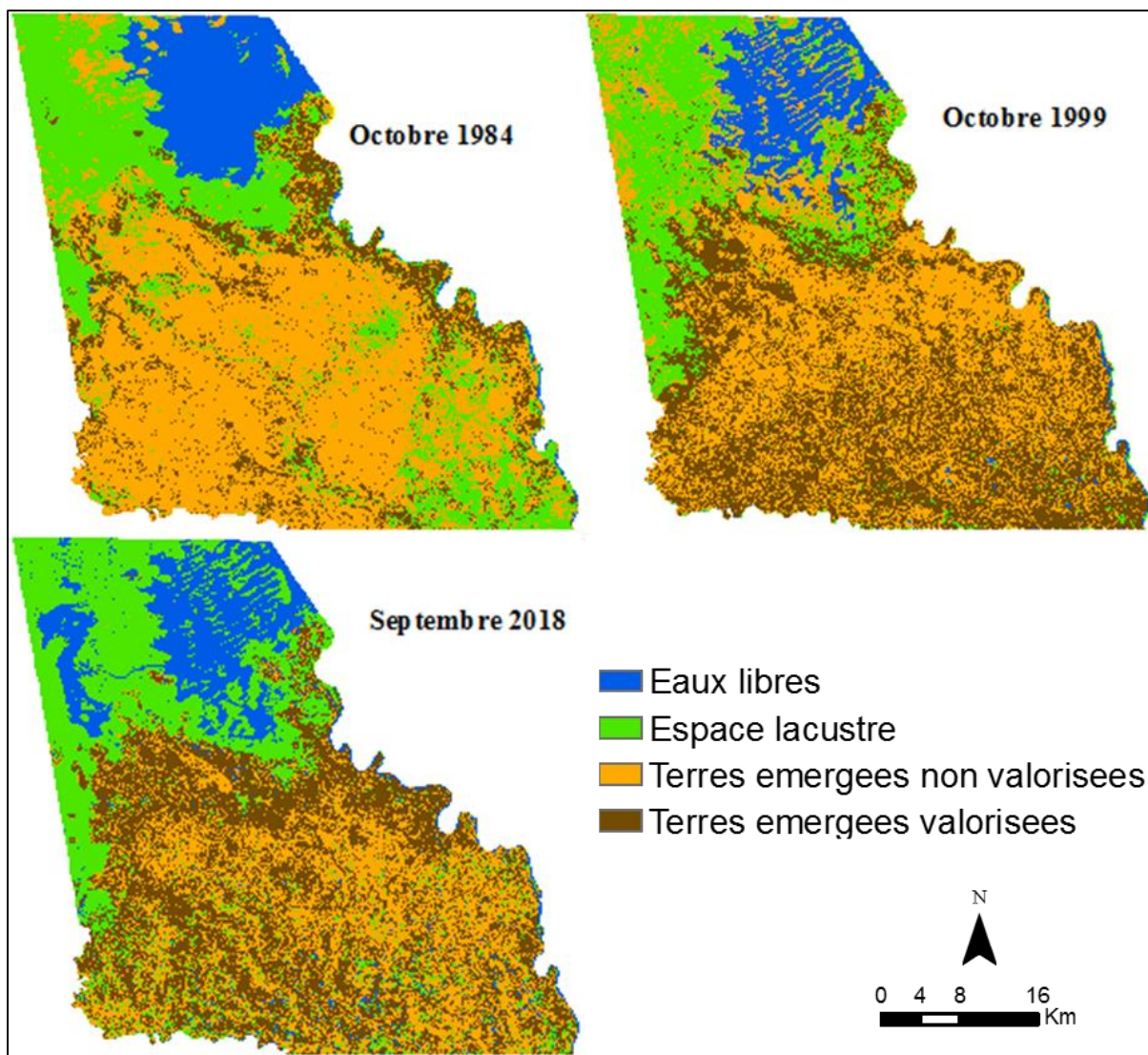


Figure 143 : Cartes des unités paysagères modélisées en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

L'unité paysagère 1 : ce sont principalement les « **Eaux libres** » de la cuvette sud du lac Tchad présent sur le territoire du Cameroun. Cette unité paysagère contient également les fleuves (permanents et temporaires) qui traversent l'arrière-pays, et les sols émergés de l'arrière-pays temporairement inondés en saison des pluies.

L'unité paysagère 2 : située essentiellement dans l'« **Espace lacustre** », désigne les marécages présents au tour des eaux libres et qui occupent les terres inondables de la partie lacustre jusqu'aux rives extérieures. C'est dans cette unité paysagère que les densités de couverture végétale sont les plus fortes, et la végétation majoritairement aquatique est constituée de *Polygonum senegalense*, *Mimosa pigra*, *Aeschynomene elaphroxylon*, *Vossia cuspidata*, *Cyperus papyrus*, *Cyperus maculatus*, etc.

La végétation dans cette unité paysagère sert surtout de pâturage. Les sols qui y sont présents sont en permanence gorgés d'eaux, et à cause de la hauteur de ces eaux les cultures de décrues y sont difficilement pratiquées.

L'unité paysagère 3 : concentre toutes les « **Terres émergées valorisées** » regroupant principalement les surfaces bâties (les chefs-lieux d'arrondissement et les petits villages présents aussi bien dans les terres émergées que dans l'espace lacustre), et l'ensemble des espaces agricoles (agriculture de décrue sur les rives du lac Tchad, agriculture aux berges des fleuves, agriculture pluviale et de contre saison sur les terres émergées). Entre 1984 et 2018, cette unité domine progressivement l'étendue des terres émergées de l'arrière-pays et s'étend des sols sableux présents aux rives extérieures de l'espace lacustre jusqu'aux sols hydromorphes de sud de l'arrière-pays. La couverture végétale est majoritairement annuelle. Les pâturages sont de tout type mais dominés par les pâturages annuels et de savane. Cet ensemble représente l'étendue spatiale de l'anthropisation de notre territoire d'étude.

L'unité paysagère 4 : qui regroupe les « **Terres émergées non valorisées** » est également présente essentiellement dans l'arrière-pays. Cette unité paysagère englobe le reste des espaces émergés de l'arrière-pays où les habitations ne sont pas présentes, et où les sols ne sont pas mis en exploitation pour les cultures. Les sols de cette unité paysagère sont caractérisés par une teneur en eau de surface faible, une couverture végétale essentiellement annuelle et moins dense que celle des marécages lacustres. Les pâturages sont essentiellement annuels.

Tableau 34. Superficies des Unités Paysagères en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018.

		Superficies en hectares		
		Octobre 1984	Octobre 1999	Septembre 2018
Unités Paysagères	Eaux libres	51943,5	41810,8	62048,2
	Espace lacustre	113686	84103,5	119118
	Terres émergées valorisées	64181,9	162831	163027
	Terres émergées non valorisées	243725	184805	129351

Les évolutions spatiales des unités paysagères entre 1984 et 2018 (figure 143, tableau 34) sont conformes aux dynamiques de l'occupation et de l'utilisation des sols observées jusqu'ici dans notre zone d'étude. Les eaux libres et la végétation lacustre sont restées plus ou stables entre 1984 et 2018, contrairement à l'utilisation des sols qui est croissante. En effet, les superficies des terres émergées valorisées augmentent de 64181,9 hectares

en 1984 à 163027 hectares en 2018, tandis que celles des terres émergées non valorisées régressent de 243725 hectares en 1984 à 129351 hectares en 2018 (figure 144).

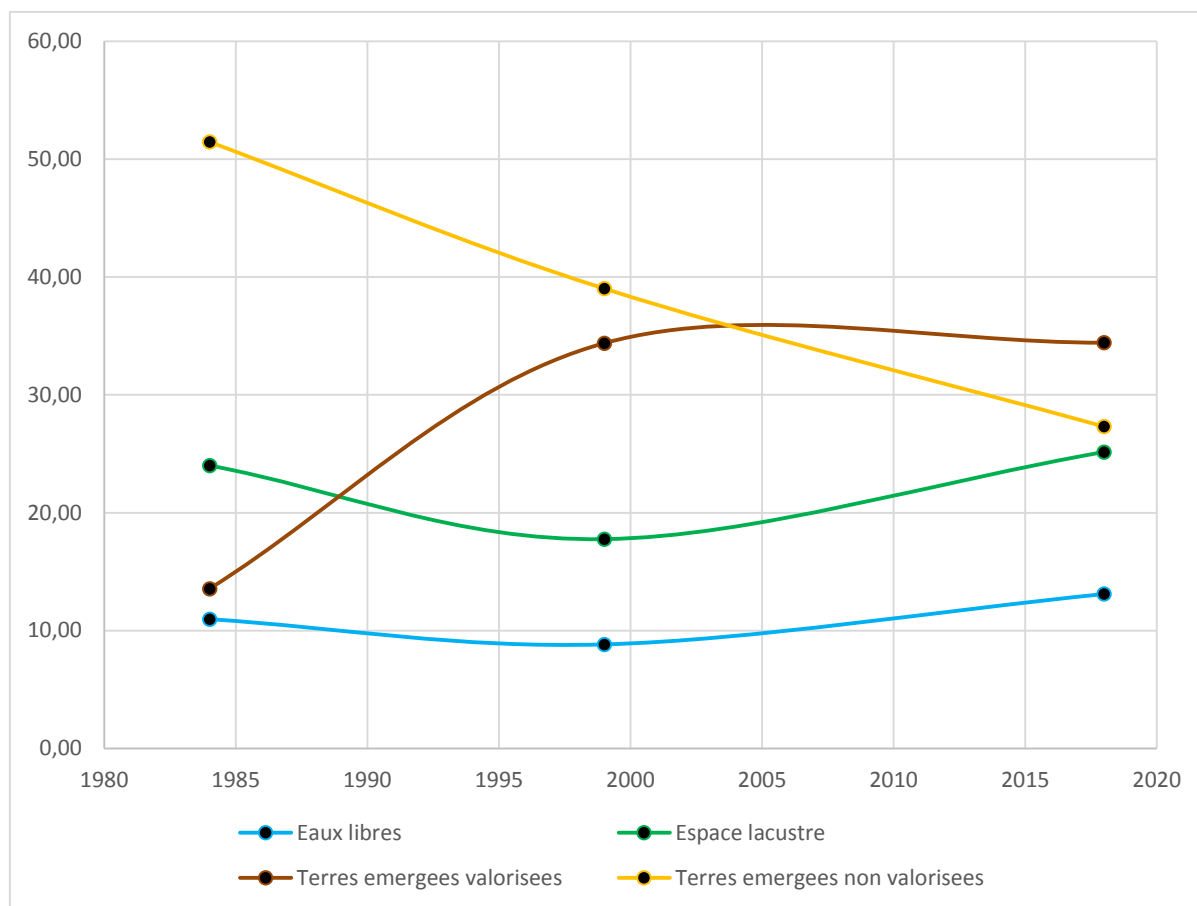


Figure 144 : Evolutions spatio-temporelles des unités paysagères modélisées en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Ces dynamiques spatiales montrent surtout l'accroissement de l'anthropisation de notre territoire d'étude. L'évolution des surfaces terres émergées valorisées (figure 145) montre que de plus en plus d'espaces aussi bien dans la zone lacustre que dans l'arrière-pays sont utilisés comme surfaces agricoles, pastorales ou bâties.

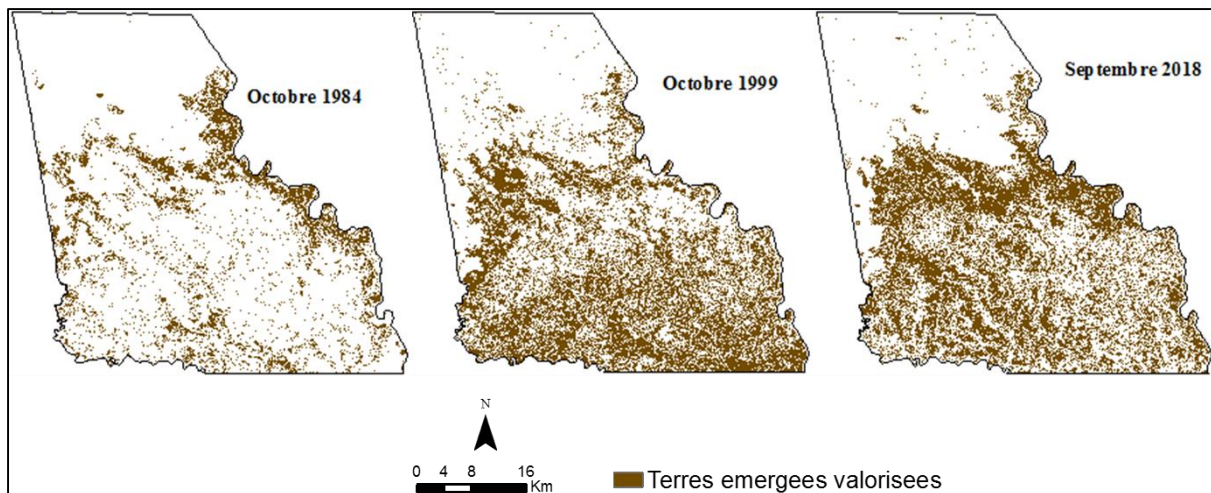


Figure 145 : Evolutions spatiales de l’anthropisation de l’espace d’étude. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

5.2. Simulation prospective de la structure paysagère

Les cartographies du couvert végétal, de l’occupation et de l’utilisation des sols permettent d’une part d’identifier les paramètres de l’occupation et de l’utilisation des sols, et d’autre part de comprendre les processus et dynamiques environnementales et socio-environnementales en cours dans notre zone d’étude depuis 1973 (reverdissement, augmentation des surfaces agricoles et bâties, etc.), grâce aux indicateurs géographiques naturels et anthropiques de l’occupation et de l’utilisation des sols (végétation lacustre, sols nus, surfaces agricoles, etc.). La modélisation des relations structurales et morpho structurales entre les paramètres importants de l’occupation et de l’utilisation des sols montre qu’il est possible de regrouper les structures spatiales de notre territoire au sein de grandes unités paysagères (ou ensembles paysagers).

Il est par conséquent possible de construire des modèles prédictifs de simulation de la répartition de ces ensembles paysagers présents dans la fenêtre lacustre camerounaise du lac Tchad et son arrière-pays. Cette simulation permet de prédire les changements futurs pour donner un aperçu des dynamiques à venir dans les évolutions spatio-temporelles des unités paysagères dans notre territoire d’étude.

5.2.1. Méthodologie de simulation

Les modèles les plus employés en analyse prospective s’appuient généralement soit sur des outils stochastiques à l’exemple des chaînes de Markov et des modèles logistiques, ou alors sur des modèles à base d’intelligence artificielle comme les automates cellulaires, les systèmes multi-agents ou les réseaux de neurones (Maria Camacho Olmedo et al, 2014). Dans cette thèse, l’approche utilisée pour simuler les évolutions spatio-

temporelles des unités paysagères et prédire les dynamiques futures combine ces deux modèles grâce aux chaînes de Markov et aux automates cellulaires (la méthodologie de simulation mise en place dans cette thèse est détaillée dans le chapitre 2).

Les chaînes de Markov déterminent et décrivent par pixel, les probabilités de changement d'une unité paysagère à une autre entre deux dates grâce à une matrice de probabilité de transition. Cette matrice de transition est construite à partir des valeurs de pixel en croisant deux images entre deux dates (par exemple la carte de 1984 est croisée à celle de 1999 pour obtenir la matrice de transition entre 1984 et 1999) (figure 146). Pour un pixel donné en 1984, la valeur de probabilité obtenue à partir de la matrice correspond par conséquent à sa probabilité de transition d'une unité paysagère à cette date pour une autre unité 1999 (cf chapitre 2).

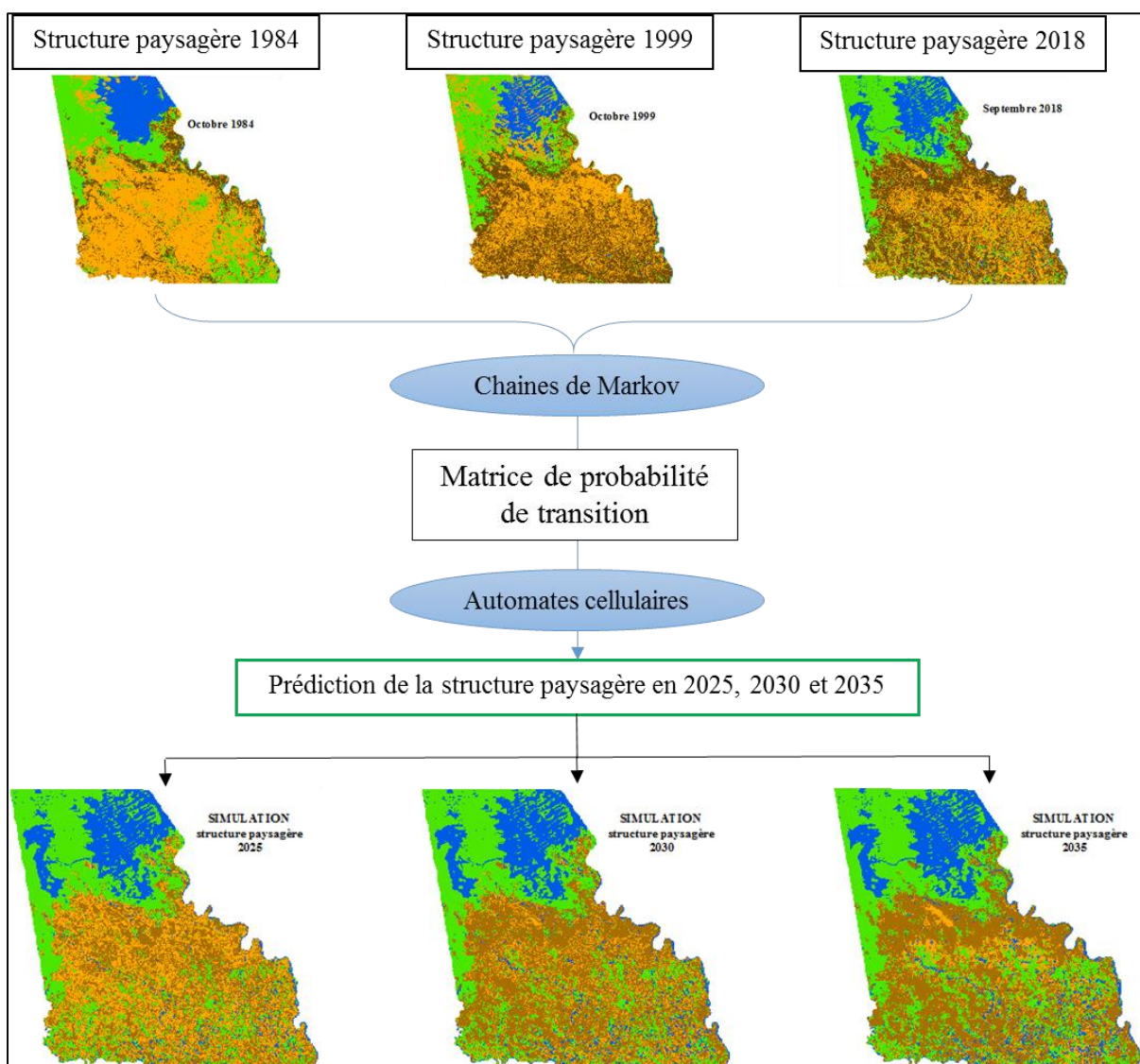


Figure 146 : Les principales étapes de la simulation prédictive des unités paysagères.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

Les valeurs de probabilité de transition sont ensuite utilisées par les automates cellulaires pour prédire la répartition future des unités paysagères. En effet, les automates cellulaires permettent de simuler l'occupation des sols en affectant des valeurs aux pixels à partir d'une fonction de transition prenant comme arguments la valeur mesurée du pixel et celles des pixels voisins en fonction du temps (cf chapitre 2).

5.2.2. Cartographies des unités paysagères en 2025, 2030 et 2035

En utilisant les cartes de 1999 et de 2018, nous simulons la disposition spatiale des unités paysagères en 2025, 2030 et 2035 sur notre zone d'étude. Le scénario considéré repose sur les mêmes paramètres de l'occupation et de l'utilisation des sols utilisés pour la modélisation, et s'attèle à prédire quelle sera la répartition des unités paysagères à ces dates (2025, 2030 et 2035) si les conversions et les transformations environnementales influencées par les activités humaines et les conditions climatiques se poursuivent tel que c'est le cas à présent jusqu'en 2035.

Les matrices de probabilités de changements obtenues (tableau 35) avec ce scénario donnent pour chaque pixel appartenant à une unité paysagère précise, sa possibilité de transiter de cette unité à la date de 2018, pour une autre unité en 2025, 2030, et 2035. Par exemple, la probabilité pour que les pixels des eaux libres en 2018 deviennent des terres émergées valorisées en 2025, 2030, ou 2035 est nulle. En revanche les probabilités pour que les pixels des terres émergées non valorisées en 2018 transitent pour les terres émergées valorisées en 2025, 2030, ou 2035 sont respectivement de 0,24, 0,29, et 0,33.

Tableau 35. Matrice de probabilité de transitions en 2025, 2030, et 2035.

	Eaux libres	Espace lacustre	Terres émergées valorisées	Terres émergées non valorisées
2018-2025				
Eaux libres	0,95	0,04	0,00	0,00
Espace lacustre	0,04	0,90	0,00	0,06
Terres émergées valorisées	0,00	0,00	0,93	0,07
Terres émergées non valorisées	0,04	0,18	0,24	0,55
2018-2030				
Eaux libres	0,93	0,07	0,00	0,00
Espace lacustre	0,07	0,85	0,00	0,09
Terres émergées valorisées	0,00	0,00	0,86	0,14
Terres émergées non valorisées	0,05	0,19	0,29	0,47

2018-2035				
Eaux libres	0,90	0,09	0,00	0,01
Espace lacustre	0,09	0,80	0,03	0,09
Terres émergées valorisées	0,01	0,03	0,76	0,20
Terres émergées non valorisées	0,06	0,21	0,33	0,41

Les cartes de simulation obtenues à partir des matrices de probabilités de transitions ci-dessus permettent alors de visualiser les distributions spatiales probables des unités paysagères en 2025, 2030 et 2035 (figure 147).

Elles montrent la stabilité des eaux libres jusqu'en 2025, puis l'augmentation de cette unité paysagère dans l'arrière-pays notamment à partir de 2030 (figure 147). La végétation de l'espace lacustre également reste stable jusqu'en 2025 mais commence à croître dans l'arrière-pays à partir de 2030 également. En 2025 il y a régression des terres valorisées au profit des terres non valorisées. Ensuite les superficies des terres valorisées augmentent de nouveau et à partir de 2030 cette unité entraîne pratiquement la disparition des terres non valorisées.

Cette simulation montre que dans 10 ans et plus l'augmentation des pressions anthropique pour la valorisation des ressources naturelles dans ce milieu sera probablement plus accrue.

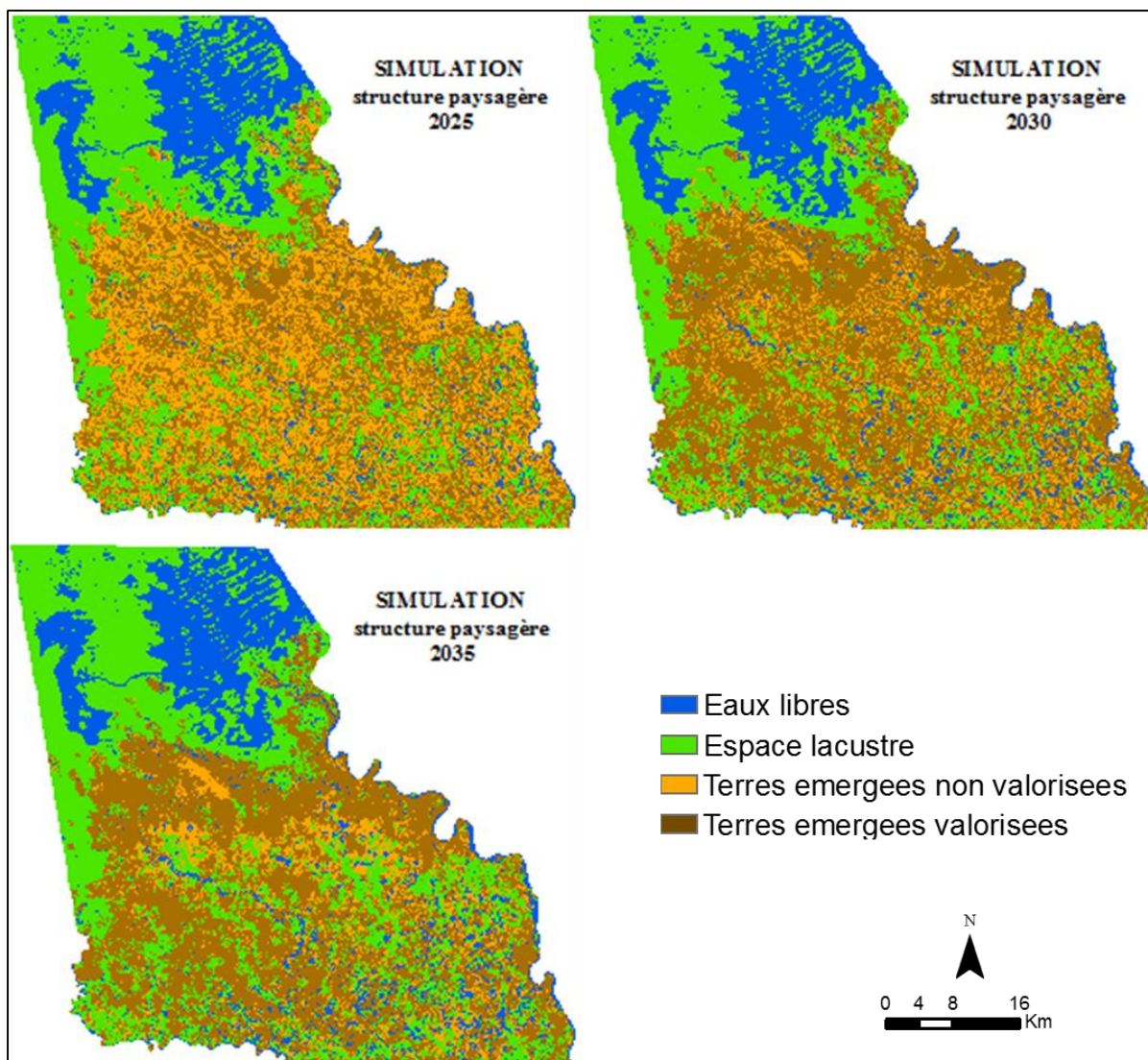


Figure 147 : Prédiction de la distribution spatiale des unités paysagères en 2035.
Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

5.2.3. Validation du modèle de simulation

Pour valider le modèle de simulation, nous utilisons la carte de modélisation des unités paysagères en 2018. Ensuite nous établissons une nouvelle carte de simulation des unités paysagères en 2018. Par conséquent, nous avons en 2018 une carte issue du processus de modélisation de la structuration paysagère, et une carte qui résulte du processus de simulation de la structure paysagère (figure 148). Les deux cartes sont comparées par analyse spatiale en calculant la matrice de confusion (les détails sur le calcul de la matrice de confusion sont donnés au chapitre 4). La carte de modélisation de la structure paysagère nous sert de vérité de terrain.

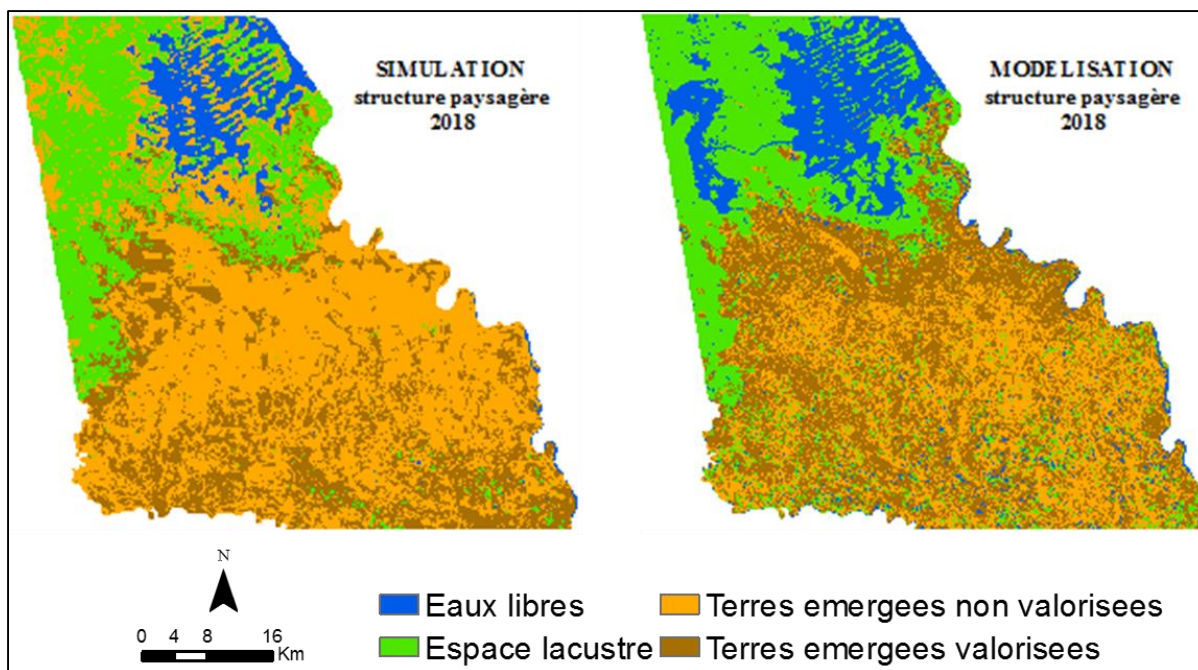


Figure 148 : Carte de modélisation des unités paysagères en 2018 et carte de prédiction des unités paysagères en 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.

La matrice de confusion ici permet d'établir le degré de correspondance entre les unités paysagères modalisées et celles simulées en calculant le pourcentage de correspondance entre les valeurs de pixels appartenant à chaque d'unité paysagères. Les erreurs d'omission et de commission pour chaque unité paysagère montre que la performance du modèle est variable (tableau 36).

En effet, pour les eaux libres les erreurs d'omission et de commission sont respectivement de 0,52 et de 0,05. Ce qui permet de dire que les prédictions pour cette unité paysagère sont moyennes. C'est pareil pour l'unité « Espace lacustre » avec l'erreur d'omission égale à 0,45 et l'erreur de commission qui est de 0,30. En revanche pour les deux autres unités paysagères (terres émergées valorisées et terres émergées non valorisées), les erreurs d'omission et de commission sont supérieures à 0,6.

L'explication de ces différents taux d'erreurs se trouve dans les dynamiques des unités paysagères entre 1984 et 2018. Les eaux libres et l'espace lacustre sont les deux unités paysagères plus stables entre 1984 et 2018, contrairement aux terres émergées valorisées qui augmentent considérablement et aux terres émergées non valorisées qui ne cessent de régresser entre 1984 et 2018.

Par conséquent, les prédictions du modèle pour les unités paysagères où les dynamiques sont faibles ou stables sont bien meilleures que celles des unités où les changements sont rapides et importants.

Tableau 36 .Matrice de confusion entre la carte de modélisation de 2018 et la carte de simulation de 2018.

		SIMULATION structure paysagère 2018					Erreur de Commission
		Eaux libres	Espace lacustre	Terres émergées valorisées	Terres émergées non valorisées	Total	
MODELISATION structure paysagère 2018	Eaux libres	377703	20363	1225	343	399634	0,05
	Espace lacustre	156142	921327	161488	70843	1309800	0,30
	Terres émergées valorisées	49619	185104	717349	2965611	3917683	0,82
	Terres émergées non valorisées	195747	558425	1129533	1005946	2889651	0,65
	Total	779211	1685219	2009595	4042743	8516768	
Erreur d'Omission		0,52	0,45	0,64	0,75		0,65

Résumé de la modélisation du paysage

La méthode de modélisation morpho structurale que nous implémentons dans cette thèse combine l'algorithme d'intelligence artificielle (MNF) à celui de l'analyse statistique (ACP), pour identifier dans l'espace d'étude les principaux ensembles paysagers aux caractéristiques spatiales communes et aux fonctions partagées.

La discrimination fonctionnelle des surfaces de sols par les composantes principales obtenues (MNF 5 de 1984, ACP 3 de 1999, et ACP4 de 2018) permet de distinguer les zones mises en valeurs de celles non exploitées ou peu exploitées. Dans cette distinction, les zones exploitées concentrent essentiellement les surfaces agricoles et bâties, et les zones non exploitées regroupent les eaux libres, une partie de la végétation et des sols nus. Au sein des zones exploitées on observe par ailleurs que le bâti se concentre à proximité des bras de cours d'eau fonctionnels ou d'anciens cours d'eau. La répartition observée des surfaces urbanisées s'explique par la nécessité pour les populations de disposer de terres viables pour les besoins agricoles notamment.

Les composantes principales (ACP 2 de 1984, MNF 1 de 1999 et ACP 4 de 2018) permettent ensuite de séparer l'espace d'étude en fonction de la teneur en eau de surface en distinguant les terres humides gorgées d'eau majoritairement présentes dans l'espace lacustre, et les terres peu humides de l'arrière-pays. Les composantes MNF 3 des trois dates (1984, 1999 et 2018) permettent ensuite de séparer au sein des zones humides les eaux libres et les espaces humides émergés.

Ces composantes principales mettent alors en évidence dans notre territoire d'étude trois critères de modélisation (l'usage des sols ; la teneur en eau de surface ; et la répartition des eaux libres), permettant ainsi de définir dans cet espace quatre unités paysagères : les « **Eaux libres** » ; l' « **Espace lacustre** » ; les « **Terres émergées valorisées** » ; et les « **Terres émergées non valorisées** ».

Les dynamiques spatiales de ces unités paysagères entre 1984 et 2018 confirment l'accroissement de l'anthropisation déjà observées par la cartographie de l'utilisation des sols. Les dynamiques spatiales d'évolution des terres émergées valorisées montrent en effet que de plus en plus d'espaces aussi bien dans la zone lacustre que dans l'arrière-pays sont utilisés comme surfaces agricoles, pastorales ou bâties.

La prédiction des dynamiques futures des unités paysagères grâce aux chaînes de Markov et aux automates cellulaires montre au-delà de 2030, l'augmentation des pressions anthropique pour la valorisation des ressources naturelles.

Conclusions et perspectives

1. Les principaux résultats de cette thèse

1.1. La répartition de l'occupation des sols

Le territoire d'étude est partagé entre la zone humide lacustre, et les terres émergées de l'arrière-pays. Trois principales classes d'occupation des surfaces dominent cet espace en termes de superficie :

- les eaux libres qui sont présentes essentiellement dans la partie lacustre, auxquelles s'ajoutent dans l'arrière-pays les marres temporairement inondées et les cours d'eau qui serpentent cette partie notamment le Serbewel au centre et le Chari à l'est ;
- le couvert végétal constitué d'une part de végétation inondée ou marécage présente aux marges des eaux libres, le long des cours d'eaux, et sur les quelques espaces hydromorphes de l'arrière-pays, et d'autre part de végétation émergée qui recouvre les sols non soumis aux inondations ;
- les sols nus sont pour l'essentiel présents dans l'arrière-pays au niveau des terres émergées.

À ces trois classes s'ajoute les surfaces habitées disséminées dans les deux parties et qui représentent environ 0,4 % de la superficie totale de la zone étudiée soit environ 1898,64 hectares. En moyenne, les eaux libres occupent 15 % de l'espace d'étude. Les occupations moyennes des sols et de la végétation sont en revanche délicates à déterminer car elles dépendent étroitement des conditions climatiques. Pendant les années arides (1973, 1975, 1984, 1987), ou lors des saisons sèches (Mars et Avril) les sols nus couvrent plus de 50 % de l'espace. Mais dès le retour des pluies, en saison pluvieuse (notamment à partir des années 2000 suite à l'amélioration de la pluviométrie au Sahel) l'augmentation de la végétation annuelle fait en sorte que le couvert végétal soit dominant sur plus de 50 % de cet espace (figure 95).

1.2. Les principales classes de végétation

La cartographie du couvert végétal dans notre espace d'étude à partir d'images MODIS MOD13Q1 acquises entre 2000 à 2018 permet de distinguer 7 principales classes de végétations réparties en trois catégories : les végétations dont le cycle saisonnier est influencé par les variations en eau du lac Tchad (la végétation de décrue des rives immédiates) ; les végétations dont le cycle saisonnier est fortement lié à la pluviométrie (la végétation annuelle de l'arrière-pays, les végétations annuelles des rives intérieures et

des rives extérieures, les végétations annuelles de l'arrière-pays aux faibles et aux fortes variations saisonnières) ; et celles qui bénéficient des influences des pluies et des eaux du lac (la végétation pérenne lacustre) (figure 67). Les trois classes de végétation annuelles occupent près de 60% de l'espace d'étude ce qui est cohérent avec les résultats cartographiques de l'occupation des sols (figures 67 et 95) qui montrent que plus de la moitié de la couverture végétale de notre zone d'étude se développe pendant les saisons pluvieuses.

1.3. Les modes de valorisation des sols

Les cartographies de l'utilisation des sols par classification supervisée SVM des images Landsat 5 d'Octobre 1984, Landsat 7 d'Octobre 1999 et Sentinel-2 de Septembre 2018 répartissent la mise en valeur des sols de l'espace d'étude en : Agriculture des rives du lac Tchad ; Agriculture aux bords des fleuves ; Agriculture de l'arrière-pays ; périmètres rizicoles de la SEMRY ; et les surfaces Bâties.

Dans le contexte aride des années 1984 marqué par les sécheresses, les activités agricoles sont très peu pratiquées et l'ensemble des surfaces agricoles occupent 62936,73 hectares soit 13,29% du territoire. Dans ce total, 48827,88 hectares sont exploités comme agriculture de l'arrière-pays, 7298,28 hectares comme agriculture aux rives du lac Tchad ; et 6755,13 hectares comme agriculture aux rives des fleuves. En 1999, les surfaces agricoles augmentent en superficie et occupent un total de 121132,68 Ha soit l'équivalent de 25,57% du territoire, répartie en : agriculture de l'arrière-pays avec 92204,61 Ha ; agriculture aux rives du lac 19817,55 Ha ; et agriculture aux abords des fleuves 8777,22 Ha. En 2018 le total des superficies agricoles est de 162107,76 Ha soit 34,23% du territoire d'étude avec 120566,09 Ha d'agriculture de l'arrière-pays ; 26884,36 Ha d'agriculture aux rives du lac ; et 13635,26 Ha d'agriculture aux bords des fleuves.

Les surfaces bâties occupent 2115,18 hectares en 1984, 2260,2 hectares en 1999, et 2878,46 hectares en 2018.

1.4. Les facteurs géographiques responsables des dynamiques spatiales d'évolutions environnementales et socio-environnementales

Dans notre zone d'étude, de nombreux facteurs géographiques (climatiques, édaphiques, etc.) conditionnent la disponibilité de l'occupation et de l'utilisation des sols, et influencent les dynamiques spatiales et temporelles visibles sur les cartographies ci-dessus.

Les précipitations, l'indice d'aridité et l'humidité relative de l'air sont les facteurs climatiques les plus corrélées à la couverture végétale avec des coefficients de corrélation supérieurs à 0,6. Ils décrivent des cycles saisonniers étroitement semblables à celui du couvert végétal avec un début d'activité observé en moyenne en Juin, un optimum enregistré en Août, et une fin d'activité en Octobre (figure 81, chapitre 3).

Les corrélations entre les précipitations et la végétation sont également mises en évidence par les cycles saisonniers des principales classes de végétation qui montrent que l'amélioration de la pluviométrie au Sahel s'accompagne du rallongement (de deux semaines à partir de fin Août) de l'activité chlorophyllienne (figure 71, chapitre 3). Les précipitations influencent également l'occupation des sols puisque l'amélioration des conditions climatiques à la fin des années 1990 (Nicholson, 2005; Ali et Lebel, 2009; Vischel et al., 2015) est à l'origine de l'accroissement du couvert végétal annuel dans notre territoire d'étude.

Comme autres facteurs géographiques, les fluctuations des eaux du lac Tchad influencent la répartition de l'occupation des sols dans l'espace lacustre et conditionnent les valorisations des espaces. Dans l'arrière-pays, la proximité des terrains sableux avec le lac Tchad ou avec les cours d'eau qui serpentent l'arrière-pays favorise l'amélioration du couvert végétal et la pratique de l'agriculture irriguée sur les bords des fleuves ou de l'agriculture de décrue aux rives du lac. Par contre sur les terrains argileux et par endroit dénudés et compacts situés loin du lac, le couvert végétal est régressif et les sols sont dédiés à l'agriculture de contre saison.

1.5. Les principaux ensembles territoriaux

La compréhension des influences de ces facteurs géographiques sur la répartition de l'occupation et de l'utilisation des sols, permet d'utiliser les approches par modélisation spatiale pour identifier les grands ensembles territoriaux présents sur notre site d'étude et les analyser. Le but est alors de regrouper les espaces du territoire d'étude en unités paysagères qui partagent les mêmes caractéristiques spatiales et fonctionnelles.

L'algorithme d'intelligence artificielle (MNF) combiné à celui de l'analyse statistique (ACP) sont appliqués à nos résultats cartographiques pour la modélisation morpho structurale des principaux paramètres environnementaux (couverture végétale, pluviométrie utilisation des sols humidité relative de l'air, la température de brillance des sols et texture des sols).

Quatre unités paysagères sont alors mise en évidence à partir de cette approche : les « **Eaux libres** » ; l' « **Espace lacustre** »; les « **Terres émergées valorisées** » ; et les « **Terres émergées non valorisées** ».

2. Les enseignements de l'évolution des écosystèmes du lac Tchad dans le contexte sahélien

La longue période de déficits pluviométriques survenue au niveau de la bande sahélienne dans les années 1970 et 1980 a eu des conséquences très graves sur les écosystèmes du Sahel et des impacts importants sur les populations locales (grandes sécheresses, famines, migrations, pertes de bétails, amenuisement du couvert végétal, réduction des rendements agricoles, etc. (Bonnecase, 2010; Fall, 2014). Elle a également

mis au goût du jour le débat au tour de la désertification progressive du Sahel par l'avancée du désert du Sahara situé au nord du Sahel.

L'apparition des images des satellites Landsat MSS à partir des années 1970 va jouer un rôle déterminant dans l'étude de cet espace. Elles vont servir à étudier cet espace aussi bien aux échelles régionales que locales et sur de longues périodes d'observations (les tendances d'évolutions du couvert végétal sont étudiées sur l'ensemble du Sahel (Cécile Dardel, 2014), ou sur des espaces moins vastes à l'exemple du bassin du Nakanbé au Burkina Faso (Diello et al., 2005), et les périodes d'observations sont régulièrement supérieures à 10 ans). Si les études régionales diachroniques du couvert végétal révèlent le reverdissement du Sahel à compter de la fin de la décennie 1990 (Eklundh et Olsson, 2003; Olsson, Eklundh, et Ardö, 2005), les mêmes analyses aux échelles locales sont sur certaines zones contradictoires et mettent en évidence la nécessité de tenir compte des spécificités locales dans l'étude des milieux sahéliens. Les contradictions observées sont expliquées entre autres la nature des données utilisées (les images aux résolutions spatiales basses tels que NOAA AVHRR couvrent de grandes superficies mais sont peu précises), et la paramètres environnementaux (pratiques agricoles, méthodes de conservation et de restauration des sols,).

Nous nous sommes servi d'une part des images satellitaires MODIS MOD13Q1 pour les analyses temporelles du couvert végétal, et d'autre part des images satellites Sentinel-2 ; Landsat 5, et 7 ; et SPOT 6, pour analyser l'occupation et l'utilisation des sols entre 1973 et 2018. L'objectif était de déterminer les dynamiques spatiales d'évolution des écosystèmes de la zone du lac Tchad dans le contexte des évolutions environnementales au Sahel, et plus particulièrement dans la fenêtre lacustre camerounaise du lac Tchad et son arrière-pays. Ce milieu a été choisi pour l'étude en raison de son hétérogénéité spatiale (présence des eaux libres, des marécages et des terres émergées), de son poids démographique (entre les espaces lacustres des quatre pays qui se partagent le lac Tchad, l'espace camerounais est l'un des plus peuplés), et de son importance pour les activités halieutiques, pastorales et agricoles (la permanence des eaux libres et des marécages assure les conditions de production et en fait un carrefour d'échange).

Il en ressort qu'à l'instar de plusieurs écosystèmes sahéliens, l'occupation du sol dans cet espace est étroitement lié aux variations climatiques (saisonniers ou annuelles).

En effet, dans l'arrière-pays, l'occupation des sols est la plupart du temps dominée par les sols nus principalement pendant les saisons sèches. Cette superficie ne change pas entre deux saisons sèches ou entre deux années arides. En revanche, le passage de la saison sèche à la saison des pluies améliore la pluviométrie et est à l'origine de l'augmentation du couvert végétal au détriment des sols nus. La végétation alors quasi inexistante sur les terres émergées de l'arrière-pays en saison sèche, recouvre les espaces dénudés qui s'étendent jusqu'aux limites sud de la zone d'étude (cf cartographie de l'occupation des sols chapitre 4). C'est pourquoi les proportions de variation de la végétation avec l'amélioration de la pluviométrie sont plus importantes comparées aux

eaux libres et aux sols nus. Pour exemple, dans l'année 2000 le couvert végétal passe de 28% de surfaces occupées en Avril à 75 % en Août. Les influences de la pluviométrie sur l'occupation des sols s'observent également en comparant le couvert végétal de saison pluvieuse des décennies de sécheresses (1970 et 1980) à celui des décennies 2000 et 2010. En effet, entre l'année 1973 marquée par les déficits pluviométriques au Sahel et 2018 où la pluviométrie s'améliore, le taux de couverture végétal pendant les saisons pluvieuses, passe de 30 % d'occupation des sols en Octobre 1975, à 75 % en Octobre 2000 puis à 70 % en Septembre 2018.

Les séries temporelles d'images MODIS MOD13C1 confirment ces observations et montrent que le cycle chlorophyllien des classes de végétation présentent dans l'arrière-pays sont fortement influencés par les précipitations. En effet, dans l'arrière-pays la période de croissance végétative débute à partir de Juin, le maximum est atteint pendant la première quinzaine du mois d'Août, la senescence démarre en fin Août et dure jusqu'en Décembre. Ce qui montre que la végétation de l'arrière-pays est essentiellement annuelle.

L'occupation des sols dans notre espace d'étude est également influencée par les fluctuations des eaux du lac Tchad.

Dans la partie lacustre, l'antagonisme spatial entre la végétation et les eaux libres témoigne de l'état et de la disponibilité des eaux libres au sein du lac Tchad. En effet, les sécheresses des années 1970 et 1980 marquées par les déficits pluviométriques (Sircoulon, 2014; Janicot et al., 2015) ont entraîné une intensification de l'aridité au Sahel et réduit la superficie des eaux libres du lac Tchad (L'Hôte et al., 2002; Lebel, Diedhiou, et Laurent, 2003; Magrin, Lemoalle et Pourtier, 2015). Sur les images Landsat MSS de Mars 1973 et Landsat TM de Mars 1987 ce changement est parfaitement mis en évidence (figure 95, chapitre 4) puisqu'on peut y observer la réduction importante de l'étendue des eaux libres au profit de la végétation et des marécages. Les multiples recherches menées dans cet espace ont identifié l'année 1973 comme celle du passage du lac Tchad dans son état de « Petit Tchad » (Lemoalle et Magrin, 2014; Magrin, Lemoalle et Pourtier, 2015). La réduction des eaux libre entraine l'extension de la végétation inondée et depuis lors l'espace lacustre est occupé par les eaux libres et les marécages, dont les superficies sont plus ou moins stables et oscillent respectivement autour de 5000 et 130000 hectares quel que soit la saison.

Les séries temporelles d'images MODIS MOD13C1 également montrent que l'occupation des sols dans l'espace lacustre dépend des fluctuations des eaux du lac Tchad et des pluies (cf cartographie des principales classes de végétation chapitre 4). Les couverts végétaux dont les cycles chlorophylliens dépendent essentiellement des variations des eaux du lac, connaissent leur période de croissance pendant la seconde quinzaine du mois de Janvier, le maximum est atteint en fin Juillet, ensuite la période de décroissance débute immédiatement avec la montée des eaux et dure jusqu'en début Septembre (cf cartographie des principales classes de végétation chapitre 4). Pour les végétations dont les cycles sont soumis aux variations des eaux du lac et à la pluviométrie,

la phase de croissance débute en Juin et les valeurs de l'indice de végétation restent maximales jusqu'en Novembre, et ensuite a lieu la phase de senescence qui commence à Décembre (cf cartographie des principales classes de végétation chapitre 4).

Ces observations montrent le rôle déterminant que joue le couvert végétal dans l'occupation des sols de notre espace d'étude, et confirment que les dynamiques spatiales d'évolutions de la végétation sont particulièrement intéressantes pour les études des milieux sahéliens comme l'ont démontré Eklundh et Olsson, (2003); Anyamba et Tucker, (2005); Heumann et al., (2007). Dans notre cas, les analyses des tendances d'évolution de l'indice de végétation NDVI entre 2000 et 2018, à partir des images MODIS MOD13Q1 permettent de constater que sur 65,08% de la zone d'étude, le couvert végétal reste « Stable ». En revanche, si on considère les changements d'occupation opérés entre 1973 et 2018 pendant les saisons pluvieuses notamment, on constate à partir de l'année 2000 l'augmentation spatiale considérable de la couverture végétale dans l'arrière-pays suite à l'amélioration des conditions pluviométriques au Sahel. Par ailleurs, à partir de 2010 l'amélioration de la pluviométrie entraîne aussi pour les végétations annuelles, un rallongement sur deux semaines (deuxième moitié du mois d'Août) du maximum de l'activité végétative et d'autre part à une légère reprise de la croissance végétale au début du mois de Novembre.

Ces résultats permettent de valider la première hypothèse de cette recherche dans la mesure où ils démontrent qu'après l'aridification des écosystèmes sahéliens pendant les grandes sécheresses et qui a conduit par exemple au rétrécissement des surfaces en eaux libres du lac Tchad, on observe à partir des années 2000 à un reverdissement du milieu d'étude. Dans la partie lacustre il se produit une légère augmentation des surfaces en eaux et des marécages, et dans l'arrière-pays les cartes d'occupation des sols montrent la recolonisation des sols nus par le couvert végétal annuel notamment (cf cartographie de l'occupation des sols chapitre 4). Nous pouvons par conséquent affirmer que les espaces lacustres du lac Tchad et leurs arrière-pays suivent comme tous les autres écosystèmes sahéliens une dynamique de reverdissement depuis la fin de la décennie 1990.

3. Quels impacts sur la valorisation des ressources ?

La réduction des eaux libres en 1973 va entraîner une extension nette des espaces de décrues et favoriser le boom des activités agropastorales dans la zone lacustre. Les espaces fertiles découverts à la suite du retrait des eaux ont en effet été colonisé par la végétation et les marécages, créant ainsi des conditions propices aux valorisations agropastorales (cf cartographie de l'occupation des sols chapitre 4). Lemoalle et Magrin, (2014); Rangé, (2016); Zieba, Yengoh, et Tom (2017), démontrent que pour optimiser les productions et s'adapter à la disponibilité des ressources, les systèmes productifs mise en place dans l'espace lacustre après le retrait des eaux associent les mobilités humaines à la multi activité de la main d'œuvre et à la multifonctionnalité des espaces. Cette logique d'exploitation des espaces lacustres où la rotation des cultures occupe une place centrale permet donc aux populations de s'adapter aux conditions du milieu.

Ces sont les dynamiques spatiales de l' « Agriculture des rives » (ou agriculture de décrues) dont le calendrier est rythmé par les fluctuations des eaux du lac Tchad qui nous renseignent sur l'exploitation des espaces lacustre dans notre territoire d'étude. En 1984 lors des grandes sécheresses, cette forme d'agriculture occupe environ 1,54% de l'espace d'étude (soit 7298,28 hectares), en 1999 cette proportion est de 4,18% (soit 19817,55 hectares), et en 2018 elle est de 5,67% (soit 26884,36 hectares). Ce qui montre que l'exploitation agricole des espaces lacustres est de plus en plus importante entre 1984 et 2018.

Dans les terres émergées de l'arrière-pays l'augmentation des surfaces agricoles est également observée. En effet, entre 1984 (année aride) et 1999 (plus favorable en termes de pluviométrie), les superficies de l' « Agriculture de l'arrière-pays », passent de 10,31% de l'espace d'étude (48827,88 hectares) à 19,47% (92204,6175 hectares). Les analyses des changements spatio-temporels des classes d'utilisation ont révélé que les sols dénudés sont particulièrement mis à contribution pour l'expansion des surfaces agricoles entre ces deux dates (cf les changements dans l'agriculture de l'arrière-pays entre 1984 et 2018, chapitre 4). En 2018, ces superficies atteignent le quart de l'espace d'étude (soit environ 120566,09 hectares). En revanche, entre 1999 et 2018 (après le reverdissement), c'est davantage la végétation naturelle qui est réduite au profit des surfaces agricoles.

Les augmentations des surfaces bâties entre 1984 et 2018, accompagnent cet accroissement des superficies agricoles. En effet, la figure 121 du chapitre 4 montre une densification de la répartition des périmètres urbanisés aussi bien dans l'espace lacustres que dans l'arrière-pays avec les surfaces bâties qui passent de 2115,18 hectares en 1984 à 2260,2 hectares en 2018.

Ces observations qui démontrent que le reverdissement de la zone d'étude a créé les conditions favorables à l'accentuation des pressions anthropiques sur le milieu, valident par conséquent notre deuxième hypothèse de recherche dans la mesure où ils prouvent que l'accroissement des pressions anthropiques sur les ressources lacustres du lac Tchad observé par Lemoalle et Magrin, (2014) et par Rangé, (2016), s'exerce également dans les terres émergées de l'arrière-pays.

4. Que retenir des facteurs déterminants de l'occupation et de l'utilisation des sols dans la fenêtre lacustre camerounaise du lac Tchad et son arrière-pays ?

Les dynamiques spatiales du couvert végétal, de l'occupation et de l'utilisation des sols sont jusqu'ici expliquées par la pluviométrie et par les variations des eaux du lac Tchad (pour ce qui est de l'espace lacustre). Cependant, les disparités spatiales de ces dynamiques dans l'arrière-pays (figure 72, chapitre 3), montrent que ces deux paramètres seuls ne suffisent pas à analyser notre espace d'étude. C'est pourquoi l'un des objectifs secondaires de ce travail va alors porter sur l'analyse de l'influence des facteurs géographiques du milieu, dans la disposition spatiale des surfaces d'occupation et

d'utilisation. Le but de cette démarche étant d'apporter des éléments d'analyse nécessaires à la compréhension des évolutions observées, et permettant d'expliquer les origines des différentes dynamiques spatiales.

Notre analyse a à ce propos pris en compte plusieurs éléments du climat à savoir : les précipitations, les températures, l'humidité relative de l'air, l'évapotranspiration, l'indice d'aridité. Mais elle a également tenu compte des composantes physiques comme la nature des sols, la répartition des essences végétales et l'utilisation des terres.

On retient que les corrélations entre les variations de la couverture végétale et les variations des éléments climatiques sont davantage significatives avec les valeurs mensuelles qu'avec les valeurs annuelles (cf Influences des paramètres climatiques, chapitre 3). Toutes les valeurs de coefficients de corrélations obtenues entre les valeurs annuelles de l'indice de végétation et celles des paramètres climatiques sont inférieures à 0,4, alors que pour les valeurs mensuelles ces coefficients sont supérieurs à 0,3 excepté pour l'évapotranspiration. Les premières en fait dressent le profil des variabilités des éléments du climat en fonction des changements des saisons dans l'année contrairement aux secondes qui sont surtout des bilans (cumuls ou moyennes) sur douze mois.

Les éléments du climat les mieux corrélés à l'indice de végétation sont les précipitations (0,68), l'indice d'aridité (0,69) et l'humidité relative de l'air (0,79) dont les variations au cours de l'année sont semblables aux variations mensuelles de l'activité végétative. Pour le cas des précipitations, le léger décalage entre la reprise des pluies et le début de l'activité végétative montre l'influence décalée des précipitations sur le couvert végétal. Le coefficient de corrélation entre les précipitations du mois précédent et l'indice de végétation du mois en cours est de 0,79 (par exemple précipitations de Mai et NDVI de Juin). Celui entre les précipitations des deux mois précédents et l'indice de végétation du mois en cours est de 0,57 (précipitations de Mai plus de Juin et NDVI de Juillet). Ce qui démontre que les pluies du mois n-1 sont plus importantes pour la couverture végétale du mois n, que les pluies du mois n. Cette influence concerne également le mois n-2. La température du sol et l'évapotranspiration potentielle en revanche sont faiblement corrélées à la variabilité mensuelle du couvert végétal avec des coefficients de corrélations respectifs de -0,3 et -0,09 (cf Influences des paramètres climatiques, chapitre 3).

La zone d'étude est extrêmement hétérogène en termes de répartition des essences végétales ce qui rend improbable l'établissement d'un lien direct entre les évolutions de la couverture végétale et la répartition spatiale des essences végétales. Toutefois, la différence dans l'évolution temporelle de ces espèces de végétation se trouve dans leur localisation à la surface de la zone d'étude et notamment dans leur proximité avec les espaces humides (figure 87, chapitre 3). Les taux de progression, et les superficies les plus importantes d'amélioration du couvert végétal sont situés dans les zones lacustres et sur les berges des cours d'eau qui serpentent l'arrière-pays (figure 88, chapitre 3).

Concernant le type de sols, les meilleurs taux d'augmentation de la couverture végétale sont observés dans les formations sableuses situées en proximité du lac (figure 85, chapitre 3). Par contre, dans les formations argileuses hydromorphes temporairement inondées situées dans l'arrière-pays, à l'exemple des Karals du troisième delta, l'évolution du couvert végétal est régressive (figure 85, chapitre 3). L'analyse de l'évolution du couvert végétal en fonction du découpage de l'espace en terroirs agricole confirme ce constat (figure 90, chapitre 3). En effet, seul le terroir de Makari bien disposé aux abords du lac présente une proportion importante de progression du couvert végétal. C'est par ailleurs, le seul terroir à être décrit comme bien drainé. Les terroirs de Bodo Kouda et du lac Tchad, plus éloignés du lac et mal drainés sont dominés par la « Stabilité » et la « Régression » de leur couverture végétale (figure 91, chapitre 3).

Cette interprétation démontre qu'en dehors des précipitations, l'humidité relative de l'air et l'indice d'aridité sont également des paramètres climatiques à considérer dans l'analyse de l'évolution du couvert végétal. Elle démontre également que les fluctuations des niveaux d'eau du lac Tchad, doivent être conjuguées à la nature des sols et à leurs modes d'utilisations pour analyser les changements d'occupation et d'utilisation des sols dans notre espace d'étude.

5. Les leçons de l'observation des grands ensembles paysagers et de leurs dynamiques territoriales

Dès lors que les processus et dynamiques environnementales et socio-environnementales (reverdissement à partir de 2000, augmentation des surfaces agricoles et bâties, etc.) en cours dans notre zone d'étude depuis 1973 sont démontrés, et les influences des facteurs géographiques sur les dynamiques spatiales d'évolution sont prouvées, il devient possible de modéliser les relations structurales et morpho structurales entre les paramètres importants de l'occupation et de l'utilisation des sols pour regrouper les structures spatiales de notre territoire au sein de grandes unités paysagères. Pour cette raison, les traitements, se sont recentrés sur la troisième et dernière problématique de l'étude à savoir la modélisation morphologique et fonctionnelle du paysage de notre territoire d'étude.

L'objectif de cette démarche est de déterminer les grands ensembles territoriaux permettant de discriminer le paysage de la zone d'étude selon les fonctions environnementales des occupations des éléments de surface. Une nouvelle approche de modélisation spatiale intégrant les analyses statistiques et les modèles d'analyse de la morpho structure du paysage a été développé et implémentée dans le territoire d'étude. Cette approche basée exclusivement sur les images satellitaires, a pour objectif la délimitation et l'évaluation fonctionnelle des grands ensembles paysagers, et comme intérêt de tenir compte de la répartition de l'utilisation et de l'occupation des sols ainsi que des influences des facteurs géographiques.

En effet, le choix et la sélection des paramètres environnementaux à intégrer à la modélisation se basent d'une part sur les résultats cartographiques de l'occupation et de l'utilisation des sols, et d'autre part sur les corrélations linéaires et spatiales faisant appel aux modèles d'analyses spatiales et statistiques, pour retenir 5 descripteurs environnementaux jugés importants : l'utilisation des sols ; la couverture végétale ; la pluviométrie ; l'humidité relative de l'air à travers la température de brillance des sols ; et la texture des sols. Ils renseignent sur les utilisations anthropiques des terres ; sur le climat ; sur la couverture végétale ; et sur la texture, l'état et la morphologie des sols.

Quatre ensembles territoriaux principaux (unités paysagères) sont délimités dans notre espace par cette approche, et en fonction de trois critères au minimum : l'usage des sols ; la teneur en eau de surface ; et la répartition des eaux libres (figure 143, chapitre 5). Le premier ensemble à savoir les « **Eaux libres** », contient principalement les eaux du lac Tchad et les fleuves qui traversent l'arrière-pays. Le second ensemble c'est l'« **Espace lacustre** » qui comprend les marécages présents au tour des eaux libres du lac Tchad. C'est dans cette unité paysagère que les densités de végétations sont les plus importantes. La troisième unité paysagère dénommée « **Terres émergées valorisées** » représente l'étendue spatiale de l'anthropisation de notre territoire d'étude puisqu'elle concentre essentiellement l'ensemble des espaces agricoles et des surfaces bâties. Dans la dernière unité paysagère sont regroupées les « **Terres émergées non valorisées** » c'est-à-dire le reste des surfaces émergées où les habitations sont inexistantes, et où les sols ne sont pas exploités pour les cultures. Les dynamismes des deux dernières unités paysagères permettent de mesurer la pression anthropique, les modes de territorialisation et leur évolution.

En effet, les analyses spatio-temporelles de ces différentes unités paysagères montrent que les superficies des terres émergées valorisées augmentent au détriment de celles des terres émergées non valorisées. Leurs superficies passent de 64181,9 hectares en 1984 à 163027 hectares en 2018. Celles des terres émergées non valorisées régressent de 243725 hectares en 1984 à 129351 hectares en 2018 (figure 144, chapitre 5). Ces dynamiques démontrent et confirment grâce à l'augmentation progressive des surfaces des terres émergées valorisées (espaces agricoles et des surfaces bâties), l'accentuation des pressions anthropiques sur les ressources du milieu d'étude depuis les années 1980.

Le regroupement des surfaces des sols en de grands ensembles paysagers permet de discriminer le paysage de la zone d'étude selon les fonctions environnementales des occupations et des utilisations des éléments de surface. Ce qui permet de décrire l'espace d'étude non point en fonction des classes d'occupation et d'utilisation mais également selon la structure morphologique et les caractéristiques fonctionnelles et nous permet de valider la dernière hypothèse de cette recherche.

A partir de ces indicateurs et connaissances géographiques, nous avons la possibilité de mettre en place un modèle de simulation de l'évolution de l'occupation et de l'utilisation des sols qui se base sur les chaînes de Markov (méthodes stochastiques) et les

automates cellulaires (modèles à base d'intelligence artificielle) pour prédire les dynamiques futures.

En considérant que les dynamiques environnementales et socio-environnementales influencées par les activités humaines et les conditions climatiques se poursuivaient tel que c'est le cas à présent, la simulation de la disposition des unités paysagères prédit l'accroissement continu des surfaces artificialisées en 2030 et en 2035 (figure 147, chapitre 5). Cependant, la marge d'erreur de cette prédiction reste tout de même considérable puisque la validation du modèle donne des erreurs d'omission et de commission importantes par unité paysagères (tableau 36).

6. Les axes de recherches à explorer

6.1. Travailler sur l'ensemble du lac

Ces travaux de recherche permettent d'affirmer que le dynamisme spatial du couvert végétal du lac Tchad et de ses écosystèmes alentours depuis les grandes sécheresses sahéliennes va dans le sens du reverdissement observé sur l'ensemble du Sahel, même si cette dynamique s'est stabilisée à partir des années 2000. Toutefois sur certains espaces de la zone d'étude notamment les terres lessivées de l'arrière-pays, les tendances à la régression du couvert végétal continuent d'être observées (cf Les tendances d'évolution du couvert végétal, chapitre 3). Il serait par conséquent intéressant d'étudier le lac dans son ensemble pour une description globale de la dynamique d'évolution et plus détaillée, qui tiendrait par ailleurs compte des caractéristiques des surfaces physiques sur l'ensemble de cet espace tant on sait que la répartition spatiale des éléments de surfaces (eau, sols nus, végétation) est irrégulière et hétérogène entre la cuvette sud et la cuvette nord.

6.2. Intégrer d'autres indicateurs

Cette recherche a montré que le reverdissement observé du territoire d'étude est particulièrement causé par l'amélioration des précipitations comme c'est le cas pour les autres espaces sahéliens. Cependant, les connaissances produites démontrent que dans cette région densément exploitée et qui sert de refuge pendant les grandes crises environnementales, la disponibilité et l'utilisation des ressources naturelles ne peuvent être uniquement expliquées par les précipitations. Les facteurs comme la nature des sols et leur morphologie, les fluctuations de niveaux du lac, l'humidité des sols etc., rentrent également en considération. Il est probable également qu'en sus de ces facteurs, l'évolution des modes d'exploitation des terres ou la démographie récente soient importantes pour comprendre l'évolution des surfaces, tout comme les déplacements des populations suite à la crise sécuritaire liée à Boko Haram.

En ce sens, l'intégration d'indicateur comme la densité démographique après la crise sécurité serait pertinent, ainsi que le développement de méthodes d'analyse basées sur l'apprentissage profond (deep learning). En effet, la masse de connaissance acquise par

les mesures de télédétection de plus en importantes et régulières peut permettre la mise en place d'un modèle de suivi multi temporelle des dynamiques spatiales d'évolution de ces écosystèmes.

6.3. Les méthodologies développées peuvent-être reproduite sur les autres espaces sahéliens et arides

L'augmentation du nombre d'indicateurs géographiques et spatiaux pourrait améliorer la capacité des descripteurs environnementaux à fournir une discrimination plus affinée des unités paysagères identifiées dans le but de décrire les paysages selon les fonctions environnementales des occupations des éléments de surface.

Références Bibliographiques

- Achard, Frédéric. 1989. « Etude des rythmes saisonniers de la végétation en Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale ». These de doctorat, Toulouse 3.
- Adam, Mohammed, Ulrich Braukämper, Peter Breunig, Karsten Brunk, Detlef Gronenborn, Nikolaus Schareika, Gisela Seidensticker-Brikay, et Heinrich Thiemeyer. 2004. *Living with the Lake: Perspectives on History, Culture and Economy of Lake Chad*. Édité par Matthias Krings et Editha Platte. 1st edition. Köln: Rüdiger Köppe.
- Ait Lamqadem, Atman, Biswajeet Pradhan, Hafid Saber, et Abdelmejid Rahimi. 2018. « Desertification Sensitivity Analysis Using MEDALUS Model and GIS: A Case Study of the Oases of Middle Draa Valley, Morocco ». *Sensors* 18 (7): 2230.
- Albarakat, Reyadh, et Venkataraman Lakshmi. 2019. « Comparison of Normalized Difference Vegetation Index Derived from Landsat, MODIS, and AVHRR for the Mesopotamian Marshes Between 2002 and 2018 ». *Remote Sensing* 11 (10): 1245.
- Albergel, J., et C. Valentin. 1989. « « Sahelisation » d'un petit bassin versant soudanien : kognere-boulsa au Burkina-Faso ». Dans *Les Hommes face aux sécheresses*, édité par Bernard Bret, 179-90. Éditions de l'IHEAL.
- Ali, Abdou. 2010. « Variabilité et changements du climat au Sahel : ce que l'observation nous apprend sur la situation actuelle », 2.
- Ali, Abdou, et Thierry Lebel. 2009. « The Sahelian Standardized Rainfall Index Revisited: THE SAHELIAN STANDARDIZED RAINFALL INDEX REVISITED ». *International Journal of Climatology* 29 (12): 1705-14.
- Andrieu, Julien. 2018. « Analyse de la cinématique de la végétation en Côte d'Ivoire pendant les conflits, à travers une metrique phénologique et la corrélation de Kendall de deux series temporelles de NDVI ». *Tropicultura*, 13.
- Anyamba, A., et C.J. Tucker. 2005. « Analysis of Sahelian Vegetation Dynamics Using NOAA-AVHRR NDVI Data from 1981-2003 ». *Journal of Arid Environments* 63 (3): 596-614.
- Astrium. 2013. « SPOT 6/7 Imagery - User Guide ».
- Aubréville, André (1897-1982) Auteur. 1949. *Climats : forêts et désertification de l'Afrique tropicale*. Société d'éditions géographiques, maritimes et coloniales. Paris.
- Badjana, Hèou Maléki, Jörg Helmschrot, Peter Selsam, Kpérkouma Wala, Wolfgang-Albert Flügel, Abel Afouda, et Koffi Akpagana. 2015. « Land Cover Changes Assessment

- Using Object-Based Image Analysis in the Binah River Watershed (Togo and Benin) ». *Earth and Space Science* 2 (10): 403-16.
- Bailis, R. 2005. « Mortality and Greenhouse Gas Impacts of Biomass and Petroleum Energy Futures in Africa ». *Science* 308 (5718): 98-103.
- Balarabe, O. 2012. « Capital sol et arrangements institutionnels dans les agrosystemes du Nord-Cameroun ». These, These de doctorat -- Sciences Economiques, These de doctorat -- Sciences Economiques.
- Bambara, Dasmané, Jacques Sawadogo, Oumar Kaboré, et Ablassé Bilgo. 2019. « Variabilité de certains paramètres climatiques et impacts sur la durée des périodes humides de développement végétal dans une station au centre et une autre au nord du Burkina Faso ». *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, n° Volume 19 Numéro 1 (juillet).
- Bannari, A., A. R. Huete, D. Morin, et F. Zagolski. 1996. « Effets de La Couleur et de La Brilliance Du Sol Sur Les Indices de Végétation ». *International Journal of Remote Sensing* 17 (10): 1885-1906.
- Barbé, L. Le, et T. Lebel. 1997. « Rainfall Climatology of the HAPEX-Sahel Region during the Years 1950–1990 ». *Journal of Hydrology* 188-189 (février): 43-73.
- Bardinet, Claude. 1981. « Télédétection des paysages africains par Landsat et Météosat. » *Annales de géographie* 90 (499): 354-80.
- Baret, F., G. Guyot, et D.J. Major. 1989. « TSAVI: A Vegetation Index Which Minimizes Soil Brightness Effects On LAI And APAR Estimation ». Dans *12th Canadian Symposium on Remote Sensing Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 3:1355-58.
- Bargués Tobella, A., H. Reese, A. Almaw, J. Bayala, A. Malmer, H. Laudon, et U. Ilstedt. 2014. « The Effect of Trees on Preferential Flow and Soil Infiltrability in an Agroforestry Parkland in Semiarid Burkina Faso ». *Water Resources Research* 50 (4): 3342-54.
- Barona, Pablo Cabrera, et Carlos Mena. 2014. « Using Remote Sensing and a Cellular Automata-Markov Chains-GEOMOD model for the Quantification of the Future Spread of an Invasive Plant: A Case Study of Psidium guajava in Isabela Island, Galapagos », 20.
- Beaudoin, Milene. 2010. « Cartographie des zones de végétation aquatique du lac Tchad à l'embouchure du fleuve Chari par l'utilisation d'images satellitaires ».
- Bégué, Agnès, Elodie Vintrou, Denis Ruelland, Maxime Claden, et Nadine Dessay. 2011. « Can a 25-Year Trend in Soudano-Sahelian Vegetation Dynamics Be Interpreted in Terms of Land Use Change? A Remote Sensing Approach ». *Global Environmental Change, Special Issue on The Politics and Policy of Carbon Capture and Storage*, 21 (2): 413-20.
- Boegh, Eva, H. Soegaard, N. Broge, C.B. Hasager, N.O. Jensen, K. Schelde, et A. Thomsen. 2002. « Airborne Multispectral Data for Quantifying Leaf Area Index, Nitrogen

- Concentration, and Photosynthetic Efficiency in Agriculture ». *Remote Sensing of Environment* 81 (2-3): 179-93.
- Bonnecase, Vincent. 2010. « Retour sur la famine au Sahel du début des années 1970 : la construction d'un savoir de crise ». *Politique africaine*, octobre, 23-42.
- Bonnefoy, Jean-Luc, François Bousquet, et Juliette Rouchier. 2001. « Modélisation d'une interaction individus, espace et société par les systèmes multi-agents : pâture en forêt virtuelle ». *Espace Géographique* 1 (1): 13-25.
- Boulain, Nicolas, Manon Rabanit, Franck Timouk, Luc Descroix, C. Lloyd, Bernard Cappelaere, et International Conference: African Monsoon Multidisciplinary Analyses, 1., Dakar (SEN), 2005/11/28 ; 2005/12/04. 2006. « Interactions végétation/hydrologie/climat du Sahel, modélisation et résultats de terrain dans le cadre de AMMA-Niger ». Dans *African monsoon multidisciplinary analyses: extended abstracts*, édité par I. Genau, S. Marsh, J. McQuaid, J.L. Redelsperger, C. Thorncroft, et E. Van Den Akker, 456-57. Paris: AMMA.
- Boureima, Yacouba K., Zhanqi Wang, et Yamba Boubacar. 2016. « Land-Use and Land-Cover Change in the Sahel Area of Keita Valley, Republic of Niger ». *Journal of Environmental Protection* 7 (4): 720-26.
- Brabant, P, V Simonneaux, et K Egue. 1996. « Etat actuel de dégradation des terrets de l'environnement au Togo déterminé à l'aide de la télédétection. », 20.
- Brabant, Pierre, et Michel Gavaud. 1985. *Les sols et les ressources en terres du Nord-Cameroun (Provinces du Nord et de l'Extrême Nord) : cartes à : 1:500000 Feuille Nord : Maroua-Kousseri Feuille Sud : Garoua*. Notice Explicative 103. Paris: ORSTOM.
- Brunet, Roger. 1980. « La composition des modèles dans l'analyse spatiale ». *L'Espace géographique* 9 (4): 253-65.
- Cabral, Pedro, et Alexander Zamyatin. 2009. « Markov processes in modeling land use and land cover changes in sintra-cascais, Portugal ». *DYNA* 76 (158): 191-98.
- Caloz, Régis, et Claude Collet. 2001. *Précis de télédétection - Volume 3: Traitements numériques d'images de télédétection*. 1^{re} éd. Presses de l'Université du Québec.
- Campbell, David J., David P. Lusch, Thomas A. Smucker, et Edna E. Wangui. 2005. « Multiple Methods in the Study of Driving Forces of Land Use and Land Cover Change: A Case Study of SE Kajiado District, Kenya ». *Human Ecology* 33 (6): 763-94.
- Casenave, A., et C. Valentin. 1992. « A Runoff Capability Classification System Based on Surface Features Criteria in Semi-Arid Areas of West Africa ». *Journal of Hydrology* 130 (1-4): 231-49.
- Casenave, Alain, et Christian Valentin. 1989. *Les états de surface de la zone sahélienne : influence sur l'infiltration*. Didactiques. Paris: ORSTOM.

- CBLT. 2015. « Rapport sur l'état de l'écosystème du bassin du lac Tchad ».
- Chamard, Ph.C, M.C Guenegou, Jeannine Lerhun, J. Levasseur, et M. Togola. 1991. « Utilisation des bandes spectrales du vert et du rouge pour une meilleure évaluation des formations végétales actives ». Dans *Congrès AUPELF-UREF*, édité par Marie-Françoise Courel, 6. Sherbrooke, Canada.
- Chamussy, Henri. 1989. « La modélisation des systèmes dynamiques en Géographie. Problèmes théoriques et méthodologique », 22.
- Chander, Gyanesh, Brian L. Markham, et Dennis L. Helder. 2009. « Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors ». *Remote Sensing of Environment* 113 (5): 893-903.
- Chandoul, Ibtissem Riahi, Samir Bouaziz, et Hamed Ben Dhia. 2014. « Utilisation des SIG pour l'évaluation de la sensibilité à la désertification par l'approche MEDALUS Application « région de Gabès » | Publications Géographie & Sciences », 12.
- Chappell, Adrian, et Clive T. Agnew. 2004. « Modelling Climate Change in West African Sahel Rainfall (1931–90) as an Artifact of Changing Station Locations ». *International Journal of Climatology* 24 (5): 547-54.
- Cheng, Qian. 2006. « Multisensor Comparisons for Validation of MODIS Vegetation Indices ». *Pedosphere* 16 (3): 362-70.
- Chitroub, Salim. 2007. « Analyse en composantes indépendantes d'images multibandes : faisabilité et perspectives » 7: 541-55.
- Chouret, Alfred, et Jacques Lemoalle. 1975. « Evolution hydrologique du lac Tchad (juillet 1974-octobre 1975) ». N'Djamena: ORSTOM. Centre IRD de Bondy.
- Cissé, Soukèye. 2016. « Etude de la variabilité intra saisonnière des précipitations au Sahel : impacts sur la végétation (cas du Ferlo au Sénégal) ». Phdthesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI ; Université Cheikh Anta Diop de Dakar.
- Clevers, J.G.P.W. 1988. « The Derivation of a Simplified Reflectance Model for the Estimation of Leaf Area Index ». *Remote Sensing of Environment* 25 (1): 53-69.
- Coe, Michael T., et Jonathan A. Foley. 2001. « Human and Natural Impacts on the Water Resources of the Lake Chad Basin ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 106 (D4): 3349-56.
- Corgne, Samuel. 2004a. « Modélisation prédictive de l'occupation des sols en contexte agricole intensif : application à la couverture hivernale des sols en Bretagne ». These de doctorat, Rennes 2.
- . 2004b. « Hiérarchisation des facteurs structurant les dynamiques pluriannuelles des sols nus hivernaux. Application au bassin versant du Yar (Bretagne) ». *Norois. Environnement, aménagement, société*, n° 193 (décembre): 17-29.

- . 2014. « Étude des changements d'occupation et d'usage des sols en contexte agricole par télédétection et fusion d'informations. » Habilitation à diriger des recherches, Université Rennes 2.
- Cornet, Antoine, et S. Rambal. 1981. « Simulation de l'utilisation de l'eau par une phytocénose de la zone sahéenne au Sénégal : test de deux modèles ». Dans *Hydrologie, cycle de l'eau et informatique*, 21-23; 156-78. Paris: Informatique et Biosphère.
- Courel, Marie-Françoise. 1984. « Étude de l'évolution récente des milieux sahéens à partir des mesures fournies par les satellites ». Phdthesis, Université Panthéon-Sorbonne - Paris I.
- Dai, Aiguo, Kevin E. Trenberth, et Taotao Qian. 2004. « A Global Dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with Soil Moisture and Effects of Surface Warming ». *Journal of Hydrometeorology* 5 (6): 1117-30.
- D'Amato, N, et T Lebel. 1998. « On the Characteristics of the Rainfall Events in the Sahel with a View to the Analysis of Climatic Variability ». *Int. J. Climatol.*, 20.
- Dardel, C., L. Kergoat, P. Hiernaux, E. Mougou, M. Grippa, et C.J. Tucker. 2014. « Re-Greening Sahel: 30years of Remote Sensing Data and Field Observations (Mali, Niger) ». *Remote Sensing of Environment* 140 (janvier): 350-64.
- Dardel, Cécile. 2014. « Entre désertification et reverdissement du Sahel : Diagnostic des observations spatiales et in situ ». Phdthesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- De Pina Tavares, Jacques, Isaurinda Baptista, António J.D. Ferreira, Philippe Amiotte-Suchet, Celeste Coelho, Samuel Gomes, Regla Amoros, et al. 2015. « Assessment and Mapping the Sensitive Areas to Desertification in an Insular Sahelian Mountain Region Case Study of the Ribeira Seca Watershed, Santiago Island, Cabo Verde ». *CATENA* 128 (mai): 214-23.
- Descroix, Luc, et Arona Diedhiou. 2012. « État des sols et évolution dans un contexte de changements climatiques ». Dans *La Grande Muraille Verte*, édité par Abdoulaye Dia et Robin Duponnois, 161-98. IRD Éditions.
- Descroix, Luc, Aïda Diongue Niang, Gérémy Panthou, Ansoumana Bodian, Youssouph Sane, Honoré Dacosta, Moussa Malam Abdou, Jean-Pierre Vandervaere, et Guillaume Quantin. 2016. « Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'ouest à travers deux régions : la Ségambie et le Bassin du Niger Moyen ». *Climatologie*, n° Volume 12 (mars).
- D'Herbès, Jean-Marc, et C. Fezzani, éd. 2004. *Indicateurs écologiques ROSELT/OSS : une première approche méthodologique pour la surveillance de la biodiversité et des changements environnementaux*. Collection ROSELT/OSS - Document Scientifique 4. Montpellier: ROSELT.

- Diallo, O., A. Diouf, N. P. Hanan, A. Ndiaye, et Y. Prévost. 1991. « AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa: 1987-1988 ». *International Journal of Remote Sensing* 12 (6): 1259-79.
- Diello, Pierre, Gil Mahe, Jean-Emmanuel Paturel, Alain Dezetter, François Delclaux, Eric Servat, et Frederic Ouattara. 2005. « Relations indices de Végétation-Pluie au Burkina Faso: Cas du Bassin Versant du Nakambé/Relationship between Rainfall and Vegetation Indexes in Burkina Faso: A Case Study of the Nakambé Basin ». *Hydrological Sciences Journal* 50 (2): 2.
- Djoret, D., et Guillaume Favreau. 2014. « Ressources en eaux souterraines et relations avec le lac ». Dans *Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles*, 59-78 (sur la clé USB). Expertise Collégiale. Marseille: IRD Éditions.
- Dregne, H. E. 1986. « Desertification of Arid Lands ». Dans *Physics of Desertification*, édité par Farouk El-Baz et M. H. A. Hassan, 4-34. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Duminil, Tristan. 2007. « Exploitation de données de Télédétection en vue d'étudier la mise en place de l'Ecotourisme dans la Région de ANDAVADOAKA (Madagascar) », 19.
- Durand, Jacques-Henri. 1977. « A propos de la sécheresse et ses conséquences au Sahel ». *Les Cahiers d'Outre-Mer* 30 (120): 383-403.
- Dusseux, Pauline. 2014. « Exploitation de séries temporelles d'images satellites à haute résolution spatiale pour le suivi des prairies en milieu agricole ». Phdthesis, Université Rennes 2.
- Edea, Emile O., Ibouraïma Yabi, Vincent Orekan, et Michel BOKO. 2016. « Variations saisonnière et interannuelle de NDVI mises en évidence à partir d'images MODIS 250 m dans le bassin versant de l'Ouémé Supérieur [Seasonal and interannual variations of NDVI identified from MODIS 250 m in the catchment of Upper Ouémé] » 25 (1): 52-66.
- Eklundh, Lars, et Lennart Olsson. 2003. « Vegetation Index Trends for the African Sahel 1982-1999 ». *Geophysical Research Letters* 30 (8).
- Engelen, Guy, Roger White, et Ton Nijs. 2003. « Environment Explorer: Spatial Support System for the Integrated Assessment of Socio-Economic and Environmental Policies in the Netherlands ». *Integrated Assessment* 4 (2): 97-105.
- EQUIPEX GEOSUD. 2014. « BULLETIN D'INFORMATION GEOSUD ».
- ESA Standard Document. 2015. « Sentinel-2_User_Handbook », n° 1: 64.
- Escadafal, Richard. 2012. « Observation à long terme des environnements arides par satellites : retour d'expériences et perspectives », 29.
- Escadafal, Richard, et A. Huete. 1991. « Etude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection ». *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences.Série 2 : Mécanique...* 312: 1385-91.

- Estornell, Javier, Jesus M. Martí-Gavliá, M. Teresa Sebastiá, et Jesus Mengual. 2013. « Principal component analysis applied to remote sensing ». *Modelling in Science Education and Learning* 6 (juin): 83.
- Fall, Ababacar. 2014. « Le Ferlo sénégalais : approche géographique de la vulnérabilité des anthroposystèmes sahéliens ». Thèse de doctorat, France: Université Paris 13.
- Fensholt, Rasmus, Kjeld Rasmussen, Per Kaspersen, Silvia Huber, Stephanie Horion, et Else Swinnen. 2013. « Assessing Land Degradation/Recovery in the African Sahel from Long-Term Earth Observation Based Primary Productivity and Precipitation Relationships ». *Remote Sensing* 5 (2): 664-86.
- Fernández-Buces, N., C. Siebe, S. Cram, et J.L. Palacio. 2006. « Mapping Soil Salinity Using a Combined Spectral Response Index for Bare Soil and Vegetation: A Case Study in the Former Lake Texcoco, Mexico ». *Journal of Arid Environments* 65 (4): 644-67.
- Fezzani, Chedli. 1995. « L'Observatoire du Sahara et du Sahel et la convention sur la désertification », 4.
- Fick, Stephen E., et Robert J. Hijmans. 2017. « WorldClim 2: New 1-Km Spatial Resolution Climate Surfaces for Global Land Areas ». *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302-15.
- Fils, S. C. Nguemhe, J. Etouna, et Mustapha Hakdaoui. 2014. « Contribution of EO and GIS to the mapping of water-erosion risk areas in the productive Sanguéré watershed, North-Cameroon, Central Africa ». *International Journal of Innovation and Applied Studies* 9 (1): 449-79.
- Fluet, Marie-Joëlle. 2006. « Impacts des changements climatiques sur les agriculteurs de la province du Zondoma au Burkina Faso : adaptation, savoir et vulnérabilité ». MONTREAL.
- Franklin, J. 1991. « Land Cover Stratification Using Landsat Thematic Mapper Data in Sahelian and Sudanian Woodland and Wooded Grassland ». *Journal of Arid Environments* 20 (2): 141-63.
- Frappart, Frédéric, Pierre Hiernaux, Françoise Guichard, Eric Mougin, Laurent Kergoat, Marc Arjounin, François Lavenu, Mohamed Koité, Jean-Emmanuel Paturel, et Thierry Lebel. 2009. « Rainfall Regime across the Sahel Band in the Gourma Region, Mali ». *Journal of Hydrology* 375 (1-2): 128-42.
- Funk, Chris, Peterson Pete J., Landsfeld Martin F., Pedreros Diego H., Verdin James P., James Rowland, Romero Bo E., Husak Gregory J., Michaelsen Joel C., et Verdin Andrew P. 2014. « A Quasi-Global Precipitation Time Series for Drought Monitoring ». Data Series. Data Series.
- Funk, Chris, Pete Peterson, Martin Landsfeld, Diego Pedreros, James Verdin, Shraddhanand Shukla, Gregory Husak, et al. 2015. « The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations—a New Environmental Record for Monitoring Extremes ». *Scientific Data* 2 (1): 21.

- Gac, Jean-Yves, et Y. Tardy. 1980. « Géochimie d'un paysage tropical : le bassin du lac Tchad ». Dans *Géochimie des interactions entre les eaux, les minéraux et les roches*, édité par Y. Tardy, 199-239. Tarbes: SARL Eléments.
- Gadal, Sébastien. 2011a. « Systèmes spatio-temporels de suivi de l'urbanisation littorale ouest-africaine et des impacts socio-environnementaux ». Dans *ITP Symposium, "New Horizon of the Interdisciplinary Approaches to the Asian and African Area Studies"*, 5. Kyoto, Japan: ASAFAS, Kyoto University.
- . 2011b. « Métropolisations, Territoires émergents et Systèmes géographiques d'information et de modélisation territoriale ». Thesis, Université Paris Diderot Paris 7 ; Institut d'études doctorales.
- Gadal, Sébastien, Herve Gazel, et Jurgita Lekaviciute. 2006. « Geographical Information and Decision Making System Design to Optimize the Management of Forest Ressources », 17.
- Gadal, Sébastien, et Walid Ouerghemmi. 2019. « Multi-Level Morphometric Characterization of Built-up Areas and Change Detection in Siberian Sub-Arctic Urban Area: Yakutsk ». *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8 (3): 129.
- Gbetkom, Paul Gérard, Sébastien Gadal, Ahmed El Aboudi, Alfred Homère Ngandam Mfondoum, et Mamane Barkawi Mansour Badamassi. 2018. « Mapping Change Detection of LULC on the Cameroonian Shores of Lake Chad and Its Hinterland through an Inter-Seasonal and Multisensor Approach ». *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS* 7 (1): 2835-49.
- Gebremedhin, Mewcha Amha, Gebrerufael Hailu Kahsay, et Hailemariam Gebrewahed Fanta. 2018. « Assessment of Spatial Distribution of Aridity Indices in Raya Valley, Northern Ethiopia ». *Applied Water Science* 8 (8): 217.
- Genesis, T. Yengoh, Lennart Olsson, Anna Tengberg, Gonzalez-Roglich Mariano, et Alex Zvoleff. 2016. « Évaluer la dégradation des terres pour soutenir le développement durable en Afrique Contexte pour l'utilisation de l'outil de suivi de la dégradation des terres du FEM (FEM-LDMP) ».
- Ghosh, Ashish, Niladri Shekhar Mishra, et Susmita Ghosh. 2011. « Fuzzy Clustering Algorithms for Unsupervised Change Detection in Remote Sensing Images ». *Information Sciences* 181 (4): 699-715.
- Giglio, Louis, Wilfrid Schroeder, et Joanne V Hall. 2018. « MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide Revision B », 64.
- GIZ. 2015. « Audit Environnemental Conjoint sur l'Assèchement du Lac Tchad ». Afrique du Sud. <https://www.giz.de/en/downloads/giz2015-fr-audit-environnemental-conjoint-lac-tchad.pdf>.
- Gnankambary, Z., U. Ilstedt, G. Nyberg, V. Hien, et A. Malmer. 2008. « Nitrogen and Phosphorus Limitation of Soil Microbial Respiration in Two Tropical Agroforestry

- Parklands in the South-Sudanese Zone of Burkina Faso: The Effects of Tree Canopy and Fertilization ». *Soil Biology and Biochemistry* 40 (2): 350-59.
- Green, A.A., M. Berman, P. Switzer, et M.D. Craig. 1988. « A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 26 (1): 65-74.
- Gressin, Adrien. 2014. « Mise à jour d'une base de données d'occupation du sol à grande échelle en milieux naturels à partir d'une image satellite THR ». These de doctorat, Paris 5.
- Guérin, Réounodji, et Rangé. 2014. « Dynamiques d'élevage : de la compréhension des systèmes et dynamiques d'élevage à la définition des mesures d'accompagnement pour davantage de sécurité et de productivité ». Dans *Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles*, 312-369 (clé USB). Expertise Collégiale. Marseille: IRD Éditions.
- Guerrien, Marc. 2003. « L'intérêt de l'analyse en composantes principales (ACP) pour la recherche en sciences sociales: Présentation à partir d'une étude sur le Mexique ». *Cahiers des Amériques latines*, n° 43 (juillet): 181-92.
- Hagenlocher, Michael, Stefan Lang, Daniel Hölbling, Dirk Tiede, et Stefan Kienberger. 2014. « Modeling Hotspots of Climate Change in the Sahel Using Object-Based Regionalization of Multidimensional Gridded Datasets ». *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 7 (1): 229-34.
- Hatem, Fabrice, Bernard Cazes, et Fabrice Roubelat. 1993. *La prospective: pratiques et méthodes*. Economica.
- Hellden, U. 1984. « Remote Sensing for Drought Impact Assessment — A Study of Land Transformation in Kordofan, Sudan ». *Advances in Space Research* 4 (11): 165-68.
- . 1988. « Desertification Monitoring: Is the Desert Encroaching? » *Desertification Control Bulletin*, 7.
- Helldén, Ulf, et Christian Tottrup. 2008. « Regional Desertification: A Global Synthesis ». *Global and Planetary Change* 64 (3-4): 169-76.
- Herbès, J.M. d', et C. Valentin. 1997. « Land Surface Conditions of the Niamey Region: Ecological and Hydrological Implications ». *Journal of Hydrology* 188-189 (février): 18-42.
- Herrmann, Stefanie M., Assaf Anyamba, et Compton J. Tucker. 2005. « Recent Trends in Vegetation Dynamics in the African Sahel and Their Relationship to Climate ». *Global Environmental Change* 15 (4): 394-404.
- Hessas, Nassima. 2005. « Évaluation cartographique et évolution diachronique par télédétection du risque incendie de forêt : simulation de la propagation du feu dans le bassin versant du Paillon, Nice, Alpes-Maritimes ». These de doctorat, Grenoble 1.

- Heumann, B.W., J.W. Seaquist, L. Eklundh, et P. Jönsson. 2007. « AVHRR Derived Phenological Change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982–2005 ». *Remote Sensing of Environment* 108 (4): 385-92.
- Hiernaux, Pierre, Augustine Ayantunde, Adamou Kalilou, Eric Mougin, Bruno Gérard, Frédéric Baup, Manuela Grippa, et Bakary Djaby. 2009. « Trends in Productivity of Crops, Fallow and Rangelands in Southwest Niger: Impact of Land Use, Management and Variable Rainfall ». *Journal of Hydrology* 375 (1-2): 65-77.
- Hiernaux, Pierre, et Henry Noël Le Houérou. 2006. « Les parcours du Sahel ». *Science et changements planétaires / Sécheresse* 17 (1): 51-71.
- Hoscilo, A., H. Balzter, E. Bartholomé, M. Boschetti, P. A. Brivio, A. Brink, M. Clerici, et J. F. Pekel. 2015. « A Conceptual Model for Assessing Rainfall and Vegetation Trends in Sub-Saharan Africa from Satellite Data ». *International Journal of Climatology* 35 (12): 3582-92.
- Houet, Thomas, Laurence Hubert-Moy, Samuel Corgne, et Jean-Pierre Marchand. 2008. « Approche systémique du fonctionnement d'un territoire agricole bocager ». *Espace Géographique*, n° 3 (septembre): 270-86.
- Houet, Thomas, Laurence Hubert-Moy, et Cyril Tissot. 2008. « Modélisation prospective spatialisée à l'échelle locale : approche méthodologique. Application à la gestion de l'eau en Bretagne. » *Revue Internationale de Géomatique*, 345-74.
- Hountondji, Yvon-Carmen Houéhanou. 2008. « Dynamique environnementale en zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest : Analyse des modifications et évaluation de la dégradation du couvert végétal ». Liège: Université de Liège.
- Huber, Silvia, Rasmus Fensholt, et Kjeld Rasmussen. 2011. « Water Availability as the Driver of Vegetation Dynamics in the African Sahel from 1982 to 2007 ». *Global and Planetary Change* 76 (3): 186-95.
- Huete, A. 1997. « A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS ». *Remote Sensing of Environment* 59 (3): 440-51.
- Ickowicz, A., I. Garba, B. Toutain, J.-D. Cesaro, P. Gerber, et I. Touré. 2014. « Plaidoyer pour un système d'information sur le pastoralisme au Sahel ». *Afrique contemporaine* 249 (1): 90.
- Janicot, Serge, Catherine Aubertin, Martial Bernoux, Edmond Dounias, Jean-François Guégan, Thierry Lebel, Hubert Mazurek, Benjamin Sultan, et Magali Reinert, éd. 2015. « Chapitre 10. Zones semi-arides : le Sahel sensible aux variations de pluies ». Dans *Changement climatique*, 115-27. IRD Éditions.
- Jaume, Fons-Esteve, et Ferran Páramo. 2003. « Mapping Sensitivity to Desertification (DISMED) ».

- Justice, C. O., et P. H. Y. Hiernaux. 1986. « Monitoring the grasslands of the Sahel using NOAA AVHRR data: Niger 1983 ». *International Journal of Remote Sensing* 7 (11): 1475-97.
- Kadović, Ratko, Yousef Ali Mansour Bohajar, Veljko Perović, Snežana Belanović Simić, Mirjana Todosijević, Sonja Tošić, Milosav Anđelić, Dragan Mlađan, et Una Dovezenski. 2016. « Land Sensitivity Analysis of Degradation using MEDALUS model: Case Study of Deliblato Sands, Serbia ». *Archives of Environmental Protection* 42 (4): 114-24.
- Karlson, Martin, et Madelene Ostwald. 2016. « Remote Sensing of Vegetation in the Sudano-Sahelian Zone: A Literature Review from 1975 to 2014 ». *Journal of Arid Environments* 124 (janvier): 257-69.
- Karnieli, A. 1997. « Development and Implementation of Spectral Crust Index over Dune Sands ». *International Journal of Remote Sensing* 18 (6): 1207-20.
- Kauth, R., et G. Thomas. 1976. « The Tasselled Cap -- A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT ». *LARS Symposia*, janvier.
- Kiari, FOUYOU Hadiza. 2014. « Impacts des variations du niveau du lac Tchad sur les activités socio-économiques des pêcheurs de la partie nigérienne ». Niger): UNIVERSITÉ ABDOU MOUMOUNI DE NIAMEY.
- Kindler, Janusz, Peter Warshall, Eric Arnould, Charles Hutchinson, et Robert Varady. 1990. « Le bassin conventionnel du lac tchad: une étude diagnostic de la dégradation de l'environnement ». N'Djamena.
- Kirkby, Kosmas, et Geeson. 1999. « Methodology for Mapping Environmentally Sensitive Areas (ESAs) to Desertification ».
- Kirscht, Holger, et Katja Werthmann. 2000. « Twenty Years Later: Migration, Inter-Ethnic Relations and Land Rights in New Settlements in Burkina Faso and Nigeria », 467-72.
- Kolawole, Are. 1988. « Cultivation of the Floor of Lake Chad: A Response to Environmental Hazard in Eastern Borno, Nigeria ». *The Geographical Journal* 154 (2): 243-50.
- Lahloui, Hicham, Hassan Rhinane, Atika Hilali, Said Lahssini, et Said Moukrim. 2017. « Desertification Assessment Using MEDALUS Model in Watershed Oued El Maleh, Morocco ». *Geosciences* 7 (3): 50.
- Lavergne, Marc. 2017. « Le lac Tchad, entre l'assèchement et l'intrusion de Boko Haram : la faute au changement climatique, ou à l'immobilité politique? » Research Report. Sawaconsulting.
- Lebel, Thierry, Arona Diedhiou, et Henri Laurent. 2003. « Seasonal Cycle and Interannual Variability of the Sahelian Rainfall at Hydrological Scales ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108 (D8): 11.

- Leblanc, Marc, Guillaume Favreau, Jean Maley, Yahaya Nazoumou, Christian Leduc, Frank Stagnitti, Peter J. van Oevelen, François Delclaux, et Jacques Lemoalle. 2006. « Reconstruction of Megalake Chad Using Shuttle Radar Topographic Mission Data ». *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 239 (1-2): 16-27.
- Leblanc, Marc J., Guillaume Favreau, Sylvain Massuel, Sarah O. Tweed, Maud Loireau, et Bernard Cappelaere. 2008. « Land Clearance and Hydrological Change in the Sahel: SW Niger ». *Global and Planetary Change* 61 (3-4): 135-50.
- Lecerf, Rémi. 2008. « Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (application à la Bretagne) ». These de doctorat, Rennes 2.
- Lee, Eun Jung, Dongfan Piao, Cholho Song, Jiwon Kim, Chul-Hee Lim, Eunji Kim, Jooyeon Moon, et al. 2019. « Assessing environmentally sensitive land to desertification using MEDALUS method in Mongolia ». *Forest Science and Technology* 15 (4): 210-20.
- Lefebvre, Antoine. 2011. « Contribution de la texture pour l'analyse d'images à très haute résolution spatiale : application à la détection de changement en milieu périurbain ». Phdthesis, Université Rennes 2 ; Université Européenne de Bretagne.
- Lemoalle, J., et Géraud Magrin, éd. 2014. *Le développement du lac Tchad: situation actuelle et futurs possibles*. Expertise collégiale. Marseille: IRD éditions.
- Lemoalle, Jacques. 2014a. « Apports sédimentaires et ensablement ». Dans *Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles*, 115-122 (sur la clé USB). Expertise Collégiale. Marseille: IRD Éditions.
- . 2014b. « La pêche : à la recherche d'une gestion intégrée ». Dans *Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles*, 370-394 (sur la clé USB). Expertise Collégiale. Marseille: IRD Éditions.
- . 2014c. « Le fonctionnement hydrologique du lac Tchad ». Dans *Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles*, 16-58 (sur la clé USB). Expertise collégiale. Marseille: IRD Éditions.
- Leroux, Louise, Agnès Bégué, Danny Lo Seen, Audrey Jolivot, et Francois Kayitakire. 2017. « Driving Forces of Recent Vegetation Changes in the Sahel: Lessons Learned from Regional and Local Level Analyses ». *Remote Sensing of Environment* 191 (mars): 38-54.
- Leruth, François. 2000. « Les mosaïques d'images ». *BSGLg*, janvier, 12.
- L'Hôte, Yann, Gil Mahé, Bonaventure Somé, et Jean Pierre Triboulet. 2002. « Analysis of a Sahelian Annual Rainfall Index from 1896 to 2000; the Drought Continues ». *Hydrological Sciences Journal* 47 (4): 563-72.
- Loireau, Maud. 1998. « Espaces, ressources, usages : spatialisation des interactions dynamiques entre les systèmes sociaux et les systèmes écologiques au Sahel nigérien ». These de doctorat, Montpellier 3.

- Long, G., G. Debussche, B. Lacaze, André Le Cocq, E. Le Floc'h, Roger Pontanier, et Journées de Télédétection du GDTA, Saint-Mandé (FR), 1977/09/21-23. 1977. « Expérience ARZOTU : résultats obtenus à partir des données Landsat acquises en 1975 et 1976 ». Dans *Journées de télédétection*. Montpellier: CEPE L. Emberger.
- Lu, Dongmei, Kaishan Song, Lihong Zeng, Dianwei Liu, Shahbaz Khan, Bai Zhang, Zongming Wang, et Cui Jin. 2008. « Estimating Impervious Surface for the Urban Area Expansion: Examples from Changchun, Northeast China », 8.
- Madeira Netto, José. 1991. « Etude quantitative des relations constituants minéralogiques-réflectance diffuse des latosols brésiliens : application à l'utilisation pédologique des données satellitaires TM (région de Brasilia) ». Bondy: ORSTOM. Centre IRD de Bondy.
- Maeda, Eduardo Eiji, David A. Wiberg, et Petri K.E. Pellikka. 2011. « Estimating Reference Evapotranspiration Using Remote Sensing and Empirical Models in a Region with Limited Ground Data Availability in Kenya ». *Applied Geography* 31 (1): 251-58.
- Magrin, G. 2015. « Atlas du lac Tchad ». Édité par G. Magrin, Jacques Lemoalle, et R. Pourtier. *Passages* numero spécial 183.
- Magrin, G., Marc-Antoine Pérouse de Montclos, Christian Seignobos, et Pauline Gluski. 2018. *Crise et développement : la région du lac Tchad à l'épreuve de Boko Haram*. Paris: AFD.
- Magrin, Géraud. 1996. « Crise climatique et mutations de l'agriculture : l'émergence d'un grenier céréalier entre Tchad et Chari ». *Annales de Géographie* 105 (592): 620-44.
- . 2009. *De longs fleuves tranquilles ? Des fleuves entre conflits et compromis*. Editions Karthala.
- Magrin, Géraud, et Christine Raimond. 2018. « La région du lac Tchad face à la crise Boko Haram : interdépendances et vulnérabilités d'une charnière sahélienne ». *Bulletin de l'association de géographes français. Géographies* 95 (95-2): 203-21.
- Magrin, Géraud, Frédéric Réounodji, Goltob Mbaye Ngaressem, Audrey Mbagogo, et Mahamat Assouyouiti. 2009. « Le lac Tchad et N'Djaména une relation porteuse de développement ? » Dans, 11. CAMEROUN.
- Mahamane, Ali Elhaji, Saadou Mahamane, Bakasso Yacoubou, Abassa Issaka, Aboubacar Ichaou, et Karim Saley. 2007. « Analyse diachronique de l'occupation des terres et caractéristiques de la végétation dans la commune de Gabi (région de Maradi, Niger) ».
- Mainguet, Monique. 1994. *Desertification: Natural Background and Human Mismanagement*. 2^e éd. Springer Study Edition. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Malunda, Kasongo Benjamin, et Kudzanai Rosebud Marembo. 2018. « Optimising the de Martonne Aridity Index Using Adjustment Values », 5.

- Manning, Adrian D., Philip Gibbons, et David B. Lindenmayer. 2009. « Scattered Trees: A Complementary Strategy for Facilitating Adaptive Responses to Climate Change in Modified Landscapes? » *Journal of Applied Ecology* 46 (4): 915-19.
- Marega, Oumar. 2016. « Changements socio-environnementaux et évolution des pratiques agropastorales en Afrique sahéenne : étude comparée entre le Ferlo (Sénégal), le Gourma (Mali) et le Fakara (Niger). » These de doctorat, Sorbonne Paris Cité.
- Masse, Antoine. 2013. « Développement et automatisation de méthodes de classification à partir de séries temporelles d'images de télédétection - Application aux changements d'occupation des sols et à l'estimation du bilan carbone ». Phdthesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- Mazzucato, Valentina. 2001. « Le Sahel : une dégradation des terres exagérée, un potentiel paysan sous-estimé », 30.
- Met Office. 2010. « Climat sahéen : rétrospective et projections ». Fitz Roy Road Exeter Devon EX1 3PB, United Kingdom.
- Mohamed, Elsayed Said. 2013. « Spatial Assessment of Desertification in North Sinai Using Modified MEDLAUS Model ». *Arabian Journal of Geosciences* 6 (12): 4647-59.
- Mokhtari, Nouredine. 2016. « ETUDE DE LA DYNAMIQUE DE LA DESERTIFICATION DANS LE BASSIN VERSANT DE LA MOULOUYA EN INTEGRANT LES DONNEES ISSUES DE LA TELEDETECTION ET LES DONNEES SOCIO-ECONOMIQUES ». Université de Liège, Liège, Belgique.
- Msofe, Nangware Kajia, Lianxi Sheng, et James Lyimo. 2019. « Land Use Change Trends and Their Driving Forces in the Kilombero Valley Floodplain, Southeastern Tanzania ».
- Mugélé, R., et Jacques Lemoalle. 2014. « L'importance inégale des activités liées à l'exploitation des autres ressources naturelles ». Dans *Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles*, 395-422 (sur la clé USB). Expertise Collégiale. Marseille: IRD Éditions.
- Ndong, Aissatou Thiam, Ousmane Ndiaye, Moustapha Bassimbé Sagna, Aly Diallo, Didier Galop, et Aliou Guisse. 2016. « Caractérisation de la végétation ligneuse sahéenne du Sénégal: cas du Ferlo ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 9 (6): 2582.
- Ngandam, Mfondoum Alfred Homère, Alfred Homère Ngandam Mfondoum, Joachim Etouna, Laboratory of Remote Sensing and Spatial Analysis, National Institute of Cartography, Yaoundé, Cameroon, Buji Kindess Nongsi, Technical Committee of Geospatial Techniques, ILG Asso., Centre of Handicapped Street, Yaoundé, Cameroon, Fabrice Armel Mvogo Moto, et al. 2016. « Assessment of Land Degradation Status and Its Impact in Arid and Semi-Arid Areas by Correlating Spectral and Principal Component Analysis Neo-Bands ». *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS* 5 (1): 1539-60.

- Ngatcha, B. NGOUNOU, et J. Lemoalle. 2014. « I-4. Variabilité des paysages et de la biodiversité du Petit lac Tchad ». 2014.
- Niasse, Madiodio, Abel Afouda, Abou Amani, et Regional Office for Western Africa UICN. 2004. *Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification: éléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation*. Gland; Cambridge: UICN-Union mondiale pour la nature.
- Nicholson, S. 2005. « On the Question of the "Recovery" of the Rains in the West African Sahel ». *Journal of Arid Environments* 63 (3): 615-41.
- Nicholson, Sharon E., et Andrew R. Lare. 1990. « A Climatonic Description of the Surface Energy Balance in the Central Sahel. Part II: The Evapoclimatology Submodel ». *Journal of Applied Meteorology (1988-2005)* 29 (2): 138-46.
- Northrop, Amy. 2015. « IDEAS – LANDSAT Products Description Document ».
- Oliveira, Pedro D. de, Michel K. Sato, Sueli Rodrigues, Herdjanía V. de Lima, Pedro D. de Oliveira, Michel K. Sato, Sueli Rodrigues, et Herdjanía V. de Lima. 2016. « S-Index and Soybean Root Growth in Different Soil Textural Classes ». *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 20 (4): 329-36.
- Olivry, J.-C., Alfred Chouret, Gabriel Vuillaurre, Jacques Lemoalle, et Jean-Pierre Bricquet. 1996. *Hydrologie du lac Tchad*. Monographie hydrologique, no 12. Paris: Editions de l'ORSTOM.
- Olmedo, María Teresa Camacho, Martin Paegelow, et Pilar García Martínez. 2007. « Modélisation géomatique rétrospective des paysages par évaluation multicritères et multiobjectifs ». *Cybergeo : European Journal of Geography*, mars.
- Olsson, L., L. Eklundh, et J. Ardö. 2005. « A Recent Greening of the Sahel—Trends, Patterns and Potential Causes ». *Journal of Arid Environments* 63 (3): 556-66.
- Olsson, Lennart. 1985. « An integrated study of desertification applications of remote sensing, GIS and spatial models in semi-arid Sudan ». Lund, Sweden University of Lund, Sweden, Dept. of Geography.
- ORSTOM. 1978. *Livre : Analyse multivariable procédure Loterie - ORSTOM*. Paris.
- Ouedraogo, Mahaman, Jean-Emmanuel Paturel, Gil Mahe, et Eric Servat. 2002. « Conséquences de la sécheresse observée depuis le début des années 1970 en Afrique de l'Ouest et centrale: normes météorologiques et hydrologiques », 7.
- Ozer, André, et Pierre Ozer. 2005. « Désertification au Sahel: Crise climatique ou anthropique ? » *Bulletin des Séances de l'Académie Royale des Sciences d'Outre-Mer* 51 (4).
- Ozer, Pierre, et Michel Erpicum. 1995. « Méthodologie pour une meilleure représentation spatio-temporelle des fluctuations pluviométriques observées au Niger depuis 1905 ». *Science et changements planétaires / Sécheresse* 6 (1): 103-8.

- Ozer, Pierre, Michel Erpicum, Gaston Demarée, et Marc Vandiepenbeeck. 2003. « The Sahelian Drought May Have Ended during the 1990s ». *Hydrological Sciences Journal* 48 (3): 489-92.
- Ozer, Pierre, Jean Gassani, Yvon-Carmen Hountondji, Abdoul Jelil Niang, et Karimou Ambouta. 2007. « La Désertification Est-Elle En Recul Au Sahel ? » *Bois Et Forêts Des Tropiques* Vol. 293 (2007): 23-28.
- Ozer, Pierre, Yvon-Carmen Hountondji, Abdoul Jelil Niang, Salifou Karimoune, Ousmane Laminou Manzo, et Marc Salmon. 2010. « DÉSERTIFICATION AU SAHEL : HISTORIQUE ET PERSPECTIVES ».
- Panthou, G., T. Vischel, et T. Lebel. 2014. « Recent Trends in the Regime of Extreme Rainfall in the Central Sahel: RECENT TRENDS OF EXTREME RAINFALL IN THE WEST AFRICAN SAHEL ». *International Journal of Climatology* 34 (15): 3998-4006.
- Parker, Dawn C., Steven M. Manson, Marco A. Janssen, Matthew J. Hoffmann, et Peter Deadman. 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): 314-37.
- Payet, Evelyne, Pascal Dumas, et Gwenaëlle Pennober. 2012. « Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana ». *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, n° Volume 11 Numéro 3 (février).
- Pereira, Antonio Roberto, et William Oregon Pruitt. 2004. « Adaptation of the Thornthwaite Scheme for Estimating Daily Reference Evapotranspiration ». *Agricultural Water Management* 66 (3): 251-57.
- Pérouse de Montclos, Marc-Antoine, Christian Seignobos, et Pauline Gluski. 2018. « L'émergence de Boko Haram et la diffusion progressive du conflit ». Dans *Crise et développement : la région du lac Tchad à l'épreuve de Boko Haram*, édité par G. Magrin et Marc-Antoine Pérouse de Montclos, 128-64. Paris: AFD.
- Pesche, Denis, Bruno Losch, Jacques Imbernon, NEPAD Rural Futures Programme, et CIRAD (Organization). 2016. « Une nouvelle ruralité émergente: regards croisés sur les transformations rurales africaines ».
- Pierre, C., M. Grippa, E. Mougin, F. Guichard, et L. Kergoat. 2016. « Changes in Sahelian Annual Vegetation Growth and Phenology since 1960: A Modeling Approach ». *Global and Planetary Change* 143 (août): 162-74.
- Pierre, Caroline, Gilles Bergametti, Béatrice Marticorena, Eric Mougin, Thierry Lebel, et Abdou Ali. 2011. « Pluriannual Comparisons of Satellite-Based Rainfall Products over the Sahelian Belt for Seasonal Vegetation Modeling ». *Journal of Geophysical Research* 116 (D18): D18201.
- PNDP. 2011. « Plan Communal de Développement (GOULFEY) ».

- Poisson. 2003. « Modélisation de l'évolution du paysage - état de l'art ».
- Pouyaud, B., et J. Colombani. 1989. « Les variations extrêmes au lac Tchad : l'assèchement est-il possible ? » *Annales de Géographie* 98 (545): 1-23.
- Puissant, Anne. 2003. « Information géographique et images à très haute résolution utilité et applications en milieu urbain ». Phdthesis, Université Louis Pasteur - Strasbourg I.
- Qi, J., A. Chehbouni, A.R. Huete, Y.H. Kerr, et S. Sorooshian. 1994. « A Modified Soil Adjusted Vegetation Index ». *Remote Sensing of Environment* 48 (2): 119-26.
- Raimond, C., C. Range, et H. Guerin. 2014. « La multi-activité et la multifonctionnalité, principes d'un développement durable pour le Lac ? » Dans *Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles*, 423-74. Expertise Collégiale. Marseille: IRD Éditions.
- Raimond, Christine, Charline Rangé, et Frédéric Réounodji. 2014. « Le dynamisme des agricultures au Lac ». Dans *Le développement du lac Tchad : situation actuelle et futurs possibles*, p.254-311. Expertise Collégiale. Marseille: IRD Editions.
- Raimond, Christine, et Florence Sylvestre. 2019. *Le Tchad des lacs : Les zones humides sahéliennes au défi du changement global. Le Tchad des lacs : Les zones humides sahéliennes au défi du changement global*. Synthèses. Marseille: IRD Éditions.
- Rangé, Charline. 2016. « Multi-usage des ressources et mobilités : l'intensification dans une zone humide sahélienne. Le lac Tchad vu par sa fenêtre camerounaise ». These de doctorat, Paris, AgroParisTech.
- Rasmussen, Kjeld, Rasmus Fensholt, Bjarne Fog, Laura Vang Rasmussen, et Isidore Yanogo. 2014. « Explaining NDVI trends in northern Burkina Faso ». *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography* 114 (1): 17-24.
- Réchal, David. 2008. « Analyse du potentiel des classifications de type SVM pour l'identification des parcelles arborées dans les images de télédétection à très haute résolution spatiale : rapport de stage du 17 mars 2008 au 12 septembre 2008 ».
- Rechner, Daina. 2003. « Indigo, photothèque de l'IRD : », 2.
- Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool, et D. C. Yoder. 1997. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. US Government Printing Office.
- Réounodji, F, Florence Sylvestre, S Issa, C Range, et B Amadou. 2014. « Histoire du peuplement et logiques de mobilité », 41.
- Richardson, Arthur J., et Craig L. Wiegand. 1977. « Distinguishing Vegetation from Soil Background Information. [by Gray Mapping of Landsat MSS Data] ».

- Robin, Amandine, Lionel Moisan, et Sylvie Le Hégarat-Masclé. 2005. « Approche a contrario pour la détection de changements à partir d'images satellite basse résolution ». Dans *GRETSI 2005*, 1-4. France.
- Rougier, Simon. 2016. « Apport des images satellites à très haute résolution spatiale couplées à des données géographiques multi-sources pour l'analyse des espaces urbains ». Thèse de doctorat, Strasbourg.
- Rouse, John Wilson, R. H. Haas, John A. Schell, et Donald W. Deering. 1973. « Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS », 309-17.
- Ruiz Sinoga, J.D., A. Romero Diaz, E. Ferre Bueno, et J.F. Martínez Murillo. 2010. « The Role of Soil Surface Conditions in Regulating Runoff and Erosion Processes on a Metamorphic Hillslope (Southern Spain) ». *CATENA* 80 (2): 131-39.
- Saleh, Ahmed, Abdelaziz Belal, et Mohamed Jalhoum. 2018. « Quantitative Assessment of Environmental Sensitivity to Desertification in Sidi Abdel-Rahman area, Northern West Coast of Egypt ». *Egyptian Journal of Soil Science* 58 (1): 13-26.
- Sanogo, Souleymane, Andreas H. Fink, Jerome A. Omotosho, Abdramane Ba, Robert Redl, et Volker Ermert. 2015. « Spatio-Temporal Characteristics of the Recent Rainfall Recovery in West Africa: RECENT RAINFALL RECOVERY IN WEST AFRICA ». *International Journal of Climatology* 35 (15): 4589-4605.
- Sarch, Marie-Thérèse, et Charon Birkett. 2000. « Fishing and Farming at Lake Chad: Responses to Lake-Level Fluctuations ». *The Geographical Journal* 166 (2): 156-72.
- Sarr, Mamadou Adama. 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*, octobre, 17.
- Sède, Marie-Hélène, et Alexandre Moine. 1999. « L'approche systémique comme outil de structuration de bases de données spatio-temporelles », 13.
- Seignobos, Christian, et Olivier Iyébi-Mandjek. 2000. « Atlas de la province Extrême-Nord Cameroun ». Paris : Yaoundé: Institut de recherche pour le développement ; République de Cameroun, Ministère de la recherche scientifique et technique, Institut national de cartographie.
- Sellin, Vanessa, Sylvie Magnanon, Françoise Gourmelon, Françoise Debaine, et Jean Nabucet. 2015. « Experimental vegetation mapping study using remote sensing ». *Cybergeo : Revue européenne de géographie / European journal of geography*, juin, 32.
- Sinare, Hanna, et Line J. Gordon. 2015. « Ecosystem Services from Woody Vegetation on Agricultural Lands in Sudano-Sahelian West Africa ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 200 (février): 186-99.
- Sircoulon, Jacques. 1976. « La récente sécheresse des régions sahéliennes ». *La Houille Blanche*, n° 6-7 (octobre): 537-48.

- . 2014. « Bilan hydropluviométrique de la sécheresse 1968-84 au Sahel et comparaison avec les sécheresses des années 1910 à 1916 et 1940 à 1949 ». Dans *Les Hommes face aux sécheresses: Nordeste brésilien, Sahel africain*, édité par Bernard Bret, 107-14. Travaux et mémoires. Paris: Éditions de l'IHEAL.
- Solano, Ramon, Didan Kamel, et Jacobson Andree. 2010. « MODIS VI (MOD13) C5 User's Guide », 42.
- Solefack, Marie Caroline Momo, Olivier Chabrierie, Emilie Gallet-Moron, Bernard-Aloys Nkongmeneck, Olivier Noël Leumbe Leumbe, et Guillaume Decocq. 2012. « Analyse de la dynamique de déforestation par télédétection couplée aux modèles d'équations structurales: exemple de la forêt néphéophile du mont Oku (Cameroun) ». *Acta Botanica Gallica* 159 (4): 451-66.
- Sori, N. Dinsa. 2012. *Identifying and Classifying Slum Development Stages from Spatial Data*. University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC).
- Srivastava, Prashant K., Dawei Han, Miguel A. Rico-Ramirez, Michaela Bray, et Tanvir Islam. 2012. « Selection of Classification Techniques for Land Use/Land Cover Change Investigation ». *Advances in Space Research* 50 (9): 1250-65.
- Sultan, Benjamin, et Serge Janicot. 2003. « The West African Monsoon Dynamics. Part II: The "Preonset" and "Onset" of the Summer Monsoon ». *JOURNAL OF CLIMATE* 16: 21.
- Sylvestre, Florence. 2014. « Variabilité paléo-hydrologique et changement climatique ». Dans *Le développement du lac Tchad: situation actuelle et futurs possibles*, 79-92 (sur la clé USB). Expertise Collégiale. Marseille: IRD Éditions.
- Tamene, Lulseged, et Bao Le Quang. 2015. « Estimating Soil Erosion in Sub-Saharan Africa Based on Landscape Similarity Mapping and Using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) ». *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 102 (1): 17-31.
- Tappan, Gray, et Suzanne Cotillon. 2014. « Mapping Conservation Practices And Tree Cover in the Sahel ».
- Taubenböcka, Wegmannb, Rotha, Mehlab, et Decha. 2009. « Analysis of urban sprawl at mega city Cairo, Egypt using multisensoral remote sensing data, landscape metrics and gradient analysis ».
- Tewelde, Mussie G., et Pedro Cabral. 2011. « Urban Sprawl Analysis and Modeling in Asmara, Eritrea ». *Remote Sensing* 3 (10): 2148-65.
- Thiaw, Ibrahima, et Honoré Dacosta. 2018. « Mapping of Soil Erosion Risk in the Diarha Watershed Using Rusle, RS and GIS ». *American Journal of Remote Sensing* 5 (4): 30.
- Thinon, P., C. Martignac, Pascale Metzger, et J.P. Cheylan. 2007. « Analyse géographique et modélisation des dynamiques d'urbanisation à La Réunion ». *Cybergeo*, n° 389.

- Tidjani, Ozer, et Karimoune. 2009. « Apports de la télédétection dans l'étude de la dynamique environnementale de la région de Tchago (nord-ouest de Gouré, Niger) », 69-80.
- Tilho, Jean. 1928. « Variations et disparition possible du Tchad ». *Annales de Géographie* 37 (207): 238-60.
- Touré, Amadou Abdourhamane. 2011. « Erosion en milieu sableux cultivé au Niger : dynamique actuelle et passée en liaison avec la pression anthropique et les changements climatiques ». Phdthesis, Université de Bourgogne.
- Touré, Amadou Abdourhamane, Rodrigue Guillon, Zibo Garba, Jean-Louis Rajot, Christophe Petit, Vincent Bichet, Alain Durand, et David Sebag. 2010. « Evolution des paysages Sahéliens au cours des six dernières décennies dans la région de Niamey: de la disparition de la brousse tigrée à l'encroustement de surface des sols. Sahelian landscape evolution during the six last decades in the Niamey vicinity: from the tiger bush disappearing to the soil crusting. » *Pangea infos* 47/48: 35-40.
- Tra Bi, Z.A., Z.K. Bi, Téléphore Yao Brou, Gil Mahé, et A. Emran. 2013. « Télédétection et analyse statistique de la dynamique de la végétation dans un contexte de variabilité climatique sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc) ». Dans *Climate and land surface changes in hydrology: proceedings of H01, IAHS-IAPSO-IASPEI assembly*, édité par E. Boegh, E. Blyth, D.M. Hannah, H. Hisdal, H. Kunstmann, B. Su, et K.K. Yilmaz, 403-10. Publication - AISH 359. Wallingford: AISH.
- Tsegaye, Diress, Stein R. Moe, Paul Vedeld, et Ermias Aynekulu. 2010. « Land-Use/Cover Dynamics in Northern Afar Rangelands, Ethiopia ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 139 (1-2): 174-80.
- Tucker, C. J., H. E. Dregne, et W. W. Newcomb. 1991. « Expansion and Contraction of the Sahara Desert from 1980 to 1990 ». *Science (New York, N.Y.)* 253 (5017): 299-300.
- Tucker, C, C Vanpraet, E Boerwinkel, et A Gaston. 1983. « Satellite Remote Sensing of Total Dry Matter Production in the Senegalese Sahel ». *Remote Sensing of Environment* 13 (6): 461-74.
- Tucker, C.J., C.L. Vanpraet, M.J. Sharman, et G. Van Ittersum. 1985. « Satellite Remote Sensing of Total Herbaceous Biomass Production in the Senegalese Sahel: 1980-1984 ». *Remote Sensing of Environment* 17 (3): 233-49.
- Tucker, Compton J., et Sharon E. Nicholson. 1999. « Variations in the Size of the Sahara Desert from 1980 to 1997 ». *Ambio* 28 (7): 587-91.
- Tzotsos, Angelos. 2006. « A Support Vector Machine Approach for Object Based Image Analysis », 6.
- UNCCD. 1996. « Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification ». Paris.
- USGS. 2016. « Landsat—Earth Observation Satellites ». Fact Sheet. Fact Sheet.

- Vacquié, Laure, et Thomas Houet. 2012. « Cartographie des zones humides de montagne par télédétection. Potentialités des images à très haute résolution spatiale ». *Revue internationale de géomatique* 22 (4): 497-518.
- Vannier, Clémence. 2011. « Observation et modélisation spatiale de pratiques agricoles territorialisées à partir de données de télédétection : application au paysage bocager ». Phdthesis, Université Rennes 2.
- Veldkamp, A., et L.O. Fresco. 1996. « CLUE: A Conceptual Model to Study the Conversion of Land Use and Its Effects ». *Ecological Modelling* 85 (2-3): 253-70.
- Venter, Z. S., M. D. Cramer, et H.-J. Hawkins. 2018. « Drivers of Woody Plant Encroachment over Africa ». *Nature Communications* 9 (1): 2272.
- Vermote, Prepared E F, J C Roger, et J P Ray. 2015. « MODIS Land Surface Reflectance Science Computing Facility Principal Investigator: Dr. Eric F. Vermote Web Site:
- Vischel, Théo, Thierry Lebel, Gérémy Panthou, Guillaume Quantin, Aurélien Rossi, et Maxime Martinet. 2015. « Chapitre 2. Le retour d'une période humide au Sahel ? » Dans *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest*, édité par Benjamin Sultan, Richard Lalou, Mouftaou Amadou Sanni, Amadou Oumarou, et Mame Arame Soumaré, 43-60. IRD Éditions.
- Vos, Kilian, Mitchell D. Harley, Kristen D. Splinter, Joshua A. Simmons, et Ian L. Turner. 2019. « Sub-Annual to Multi-Decadal Shoreline Variability from Publicly Available Satellite Imagery ». *Coastal Engineering* 150 (août): 160-74.
- Warren, Andrew, et Clive Agnew. 1988. *An Assessment of Desertification and Land Degradation in Arid and Semi-Arid Areas*. IIED Dryland Programme.
- Whiteside, Timothy G., Guy S. Boggs, et Stefan W. Maier. 2011. « Comparing Object-Based and Pixel-Based Classifications for Mapping Savannas ». *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13 (6): 884-93.
- Wischmeier, Walter H., et Dwight David Smith. 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- Wong, Kapo, Yuanzhi Zhang, Jin Yeu Tsou, et Yu Li. 2017. « Assessing Impervious Surface Changes in Sustainable Coastal Land Use: A Case Study in Hong Kong ». *Sustainability* 9 (6): 1-20.
- Wu, Weicheng. 2003. « Application de la géomatique au suivi de la dynamique environnementale en zones arides : exemple de la région de Nouakchott en Mauritanie, du Ningxia nord et du Shaanxi nord en Chine du nord-ouest ». These de doctorat, Paris 1.
- Xiao, J., Y. Shen, R. Tateishi, et W. Bayaer. 2006. « Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing ». *International Journal of Remote Sensing* 27 (12): 2411-22.

- Xiong, Jun, Prasad S. Thenkabail, Murali K. Gumma, Pardhasaradhi Teluguntla, Justin Poehnelt, Russell G. Congalton, Kamini Yadav, et David Thau. 2017. « Automated Cropland Mapping of Continental Africa Using Google Earth Engine Cloud Computing ». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 126 (avril): 225-44.
- Yesuph, Asnake Yimam, et Amare Bantider Dagneu. 2019. « Soil Erosion Mapping and Severity Analysis Based on RUSLE Model and Local Perception in the Beshillo Catchment of the Blue Nile Basin, Ethiopia ». *Environmental Systems Research* 8 (1): 17.
- Yue, Sheng, et Paul Pilon. 2004. « A comparison of the power of the t test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend detection / Une comparaison de la puissance des tests t de Student, de Mann-Kendall et du bootstrap pour la détection de tendance ». *Hydrological Sciences Journal* 49 (1): 21-37.
- Zairi, Rim. 2008. « Etude géochimique et hydrodynamique de la nappe libre du bassin du lac Tchad dans les régions de Diffa (Niger oriental) et du Bornou (nord-est du Nigeria) », 212.
- Zewdie, Worku, et Elmar Csaplovics. 2015. « Remote Sensing based multi-temporal land cover classification and change detection in northwestern Ethiopia ». *European Journal of Remote Sensing* 48 (1): 121-39.
- Zieba, Felix Watang, Genesis Tambang Yengoh, et Abdouraman Tom. 2017. « Seasonal Migration and Settlement around Lake Chad: Strategies for Control of Resources in an Increasingly Drying Lake ». *Resources* 6 (3): 41.

Listes des figures

Figure 1 : Organisation générale du manuscrit.....	20
Figure 2 : Localisation du Sahel. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université ; source : Open Street Map, fond de carte Google Earth.	22
Figure 3 : Déplacement de l'équateur méridional (sources : (Seignobos et Iyébi-Mandjek 2000).	25
Figure 4 : Indice standardisé de précipitations calculé en référence à la période 1950-1989 sur le Sahel occidental et central (Source : (Ali et Lebel, 2009).	26
Figure 5 : Évolution décennale du signal saisonnier sur le Sahel central et occidental (source : (Vischel et al. 2015) D'après Ali et Lebel 2009).	27
Figure 6 : Tendances temporelles du NDVI au Sahel entre Juillet et Octobre de 1981 à 2011. (Source : (C. Dardel et al., 2014)).	29
Figure 7 : Carte descriptive du lac Tchad (source : Magrin, Lemoalle et Pourtier, (2015).	35
Figure 8 : Distribution moyenne des précipitations au-dessus du lac Tchad entre 1970 et 2000, et entre 2001 et 2015. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	37
Figure 9 : Distribution moyenne des températures au-dessus du lac Tchad entre 1970 et 2000, et entre 2001 et 2015. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	38
Figure 10 : Diagramme ombrothermique au-dessus du lac Tchad entre 1970 et 2000, et entre 2001 et 2015. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	38
Figure 11 : Evolution temporelle du lac Tchad de Janvier 1973 à Février 2007, source : D'après Pierre GENTHON, 2012.	40
Figure 12: Répartition des populations du lac Tchad en 2015 (source : Seignobos 2015, dans Magrin, Lemoalle et Pourtier, (2015)).	43
Figure 13 : Utilisation des espaces du lac Tchad (source : Raimond et Rangé 2015, dans dans Magrin, Lemoalle et Pourtier, (2015)).	45
Figure 14 : Principaux échanges commerciaux autour du lac Tchad (source : Magrin 2015, dans Magrin, Lemoalle et Pourtier, (2015)).	47
Figure 15 : Activités halieutiques et commercialisation des produits de pêche autour du lac Tchad (source : Ngaressem et Kiari, 2015, dans Magrin, Lemoalle et Pourtier, (2015)).	49
Figure 16 : Les espaces agricoles dans le lac Tchad (D'après C. Raimond, 2014, dans Lemoalle et Magrin (2014)).	51
Figure 17 : Activités pastorales autour du lac Tchad (source : Réounodji, Rangé et Guérin, 2015, dans Magrin, Lemoalle et Pourtier, (2015)).	53

Figure 18 : Déplacements des réfugiés de la crise sécuritaire (source : https://shoring-up-stability.org/fr/maps-infographics/).....	56
Figure 19 : Découpage agro écologique du Cameroun. Source: IRAD, 2000	59
Figure 20 : Les densités de population autour du lac Tchad en 2013 (source : Magrin, 2015, in Magrin, Lemoalle et Pourtier 2015. Atlas du lac Tchad, 2015).....	61
Figure 21 : Localisation de la partie camerounaise du lac Tchad et de son arrière-pays. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	62
Figure 22 : Aspect physique de la partie camerounaise du lac Tchad et de son arrière-pays. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université, source : Image Landsat Avril 2015 et CCI land cover - S2 prototype land cover 20M map of Africa 2016.....	64
Figure 23 : Différence d'occupation des surfaces entre la saison sèche (gauche) et la saison pluvieuse (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	65
Figure 24 : Géomorphologie des sols de l'arrière-pays camerounais du lac Tchad. (Source : adapté de Morin, 2000, in Seignobos, et Mandjeck 2000. Atlas de la Province Extrême-Nord Cameroun, 2000).....	66
Figure 25 : Géomorphologie des sols de l'arrière-pays camerounais du lac Tchad. (Source : adapté de Seignobos et Moukouri, 2000, in Seignobos, et Mandjeck 2000. Atlas de la Province Extrême-Nord Cameroun, 2000).....	69
Figure 26 : Reliefs et pentes des sols dans le territoire d'étude. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	71
Figure 27 : Evolution du relief des sols de la partie inondée vers l'arrière-pays camerounais du lac Tchad. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	72
Figure 28 : Répartition des essences végétales sur le territoire d'étude en 1998. (Source : adapté de Seignobos, 1998, in Seignobos, et Mandjeck 2000. Atlas de la Province Extrême-Nord Cameroun, 2000).....	73
Figure 29 : Résolution spatiale des capteurs spatiaux d'observation de la Terre (extrait d'une image SPOT 6 initialement à 1,5m de résolution, dégradée à des résolutions spatiales plus faibles) Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	95
Figure 30 : Résolution temporelle des capteurs spatiaux d'observation de la Terre (MODIS, Sentinel-2, Landsat-8, etc.) (Source : Gregory Giuliani, 2019).....	96
Figure 31 : Comparaison des résolutions spectrales des capteurs Sentinel-2 et Landsat 7 et 8 (source : https://www.usgs.gov/media/images/comparison-landsat-7-and-8-bands-sentinel-2).	97
Figure 32 : Evolution de l'offre en satellites spatiaux optiques. (Sources (Vos et al. 2019).	99
Figure 33 : Couverture terrestre d'une scène MODIS végétation MOD13Q1. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	102
Figure 34 : Couverture terrestre des scènes Landsat-8. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	103

Figure 35 : Couverture terrestre des scènes Sentinel-2. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	106
Figure 36 : Couverture terrestre des scènes SPOT. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	108
Figure 37 : Couverture temporelle des images utilisées. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	110
Figure 38 : Figure 38 : Synthèse des caractéristiques des images utilisées. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	112
Figure 39 : Description des classes retenues pour la cartographie de l'occupation des sols. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université. ...	116
Figure 40 : Processus de Classification des images MODIS NDVI. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	119
Figure 41 : Etapes de la cartographie de l'occupation et de l'utilisation des sols. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	120
Figure 42 : Corrélation de Mann-kendall. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	123
Figure 43 : Méthode de suivi de changements de l'occupation et de l'utilisation des sols. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	125
Figure 44 : Etapes des corrélations linéaires entre l'indice de végétation et les composantes du milieu. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	129
Figure 45 : Etapes des corrélations spatiales entre l'indice de végétation et les composantes du milieu. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	131
Figure 46 : Processus de modélisation de la structuration paysagère par les modèles intelligents. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	136
Figure 47 : Méthodologie de simulation des changements. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	139
Figure 48 : Schéma générale de la thèse. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	141
Figure 49 : Etapes de l'analyse de l'évolution du couvert végétal entre 2000 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	144
Figure 50 : Processus de classification des principales classes de végétation. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	145
Figure 51 : L'approche de l'Analyse en Composante Principale. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	146
Figure 52 : Les composantes principales obtenues des images MODIS NDVI. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	148
Figure 53 : Résultats de la CP I : Classe de végétation (gauche) évolution annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	150

Figure 54 : Variations bihebdomadaires du NDVI des classes de végétation de la CP1 (2000-2018). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	151
Figure 55 : Résultats de la CP II : Classe de végétation (gauche) évolution annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	152
Figure 56 : Variations bihebdomadaires du NDVI des classes de végétation de la CP2 (2000-2018). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	153
Figure 57 : Résultats de la CP III : Classe de végétation (gauche) évolution annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	154
Figure 58 : Variations bihebdomadaires du NDVI des classes de végétation de la CP3 (2000-2018). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	155
Figure 59 : Résultats de la CP IV : Classe de végétation (gauche) évolution annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	156
Figure 60 : Variations bihebdomadaires du NDVI des classes de végétation de la CP4 (2000-2018). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	157
Figure 61 : Résultats de la CP V : Classe de végétation (gauche) évolution annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	158
Figure 62 : Variations bihebdomadaires du NDVI des classes de végétation de la CP5 (2000-2018). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	159
Figure 63 : Résultats de la CP VI : Classe de végétation (gauche) évolution annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	160
Figure 64 : Variations bihebdomadaires du NDVI des classes de végétation de la CP6 (2000-2018). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	161
Figure 65 : Résultats de la CP VII : Classe de végétation (gauche) évolution annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	161
Figure 66 : Variations bihebdomadaires du NDVI des classes de végétation de la CP6 (2000-2018). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	162
Figure 67 : Carte des principales classes de végétation. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	165
Figure 68 : Superficies des principales classes de végétation entre 2000 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	167

Figure 69 : Moyennes saisonnières du NDVI des principales classes de végétation entre 2000 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	168
Figure 70 : Variations bihebdomadaires du NDVI des principales classes de végétation entre 2000 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	170
Figure 71 : Moyennes saisonnières du NDVI des principales classes de végétation de 2000 à 2009 (gauche), et de 2010 à 2018 (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	171
Figure 72 : Tendances d'évolution du couvert végétal entre Février 2000 et Décembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	174
Figure 73 : Méthodes d'analyse des influences des facteurs géographiques sur l'évolution du couvert végétal. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	176
Figure 74 : Comparaison des évolutions des courbes de NDVI et de précipitations entre Janvier 2000 et Décembre 2015 : moyennes mensuelles (gauche), courbes annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	178
Figure 75 : Corrélation entre l'indice de végétation et la pluviométrie du mois précédent. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	179
Figure 76 : Corrélations entre l'indice de végétation et le cumul pluviométrique des mois précédents. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	181
Figure 77 : Comparaison des évolutions des courbes de NDVI et de températures : moyennes mensuelles (gauche), courbes annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	182
Figure 78 : Comparaison des évolutions des courbes de NDVI et de l'indice d'aridité : moyennes mensuelles (gauche), courbes annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	183
Figure 79 : Comparaison des évolutions des courbes de NDVI et de l'évapotranspiration : moyennes mensuelles (gauche), courbes annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	184
Figure 80 : Comparaison des évolutions des courbes de NDVI et de l'humidité de l'air : moyennes mensuelles (gauche), courbes annuelles (droite). Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	185
Figure 81 : Variations mensuelles de l'indice de végétation NDVI et des paramètres climatiques entre 2000 et 2015. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	186
Figure 82 : Les cinq principales classes de tendances d'évolution du couvert végétal dans l'espace lacustre camerounais du lac Tchad et son arrière-pays entre Février 2000 et Décembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	188

Figure 83 : Géomorphologie des sols de l'arrière-pays camerounais du lac Tchad. (Source : adapté de Morin, 2000, in Seignobos, et Mandjeck 2000. Atlas de la Province Extrême-Nord Cameroun, 2000).....	189
Figure 84 : Principales tendances d'évolution du couvert végétal dans : les deltas ; le cordon littoral ; et les chenaux et cuvettes de décantation. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	190
Figure 85 : Superficies des classes d'évolution du couvert végétal en fonction des formations géologiques. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	193
Figure 86 : Répartition des essences végétales sur le territoire d'étude en 1998. (Source : adapté de Seignobos, 1998, in Seignobos, et Mandjeck 2000. Atlas de la Province Extrême-Nord Cameroun, 2000).....	196
Figure 87 : Principales tendances d'évolution du couvert végétal dans l'espace lacustre camerounais du lac Tchad en fonction de la répartition des espèces végétales. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	197
Figure 88 : Superficies des classes d'évolution du couvert végétal en fonction de la répartition des essences végétales. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	205
Figure 89 : Géomorphologie des sols de l'arrière-pays camerounais du lac Tchad. (Source : adapté de Seignobos et Moukouri, 2000, in Seignobos, et Mandjeck 2000. Atlas de la Province Extrême-Nord Cameroun, 2000).....	208
Figure 90 : Principales tendances d'évolution du couvert végétal dans le Terroir de Makari. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	209
Figure 91 : Superficies des classes d'évolution du couvert végétal en fonction des potentialités agronomiques et des modes d'utilisation des sols. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	211
Figure 92 : Etapes de l'analyse multi-échelle, multi-capteurs et multi-temporelle de l'occupation et de l'utilisation des sols des rives camerounaises du lac Tchad et de leur arrière-pays. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	218
Figure 93 : Illustration de la mosaïque et de l'extraction de deux scènes Landsat à l'échelle de la zone d'étude. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	220
Figure 94 : Typologie de l'occupation des sols. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	221
Figure 95 : Occupation des sols de la fenêtre lacustre camerounaise du lac Tchad et de son arrière-pays entre Mars 1973 et Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	227
Figure 96 : Variabilités des classes d'occupation entre Mars 1973 et Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	228
Figure 97 : Evolutions annuelles de l'occupation des sols en 1987, 2000 et 2015. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	231

Figure 98 : Carte des changements annuels de l'occupation du sol en 1987, 2000 et 2015. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	232
Figure 99 : Evolutions de l'occupation du sol entres saisons sèches. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	233
Figure 100 : Carte des changements de l'occupation du sol entre saisons sèches. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	234
Figure 101 : Evolutions de l'occupation du sol entres saisons pluvieuses. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	235
Figure 102 : Carte des changements de l'occupation du sol entre saisons pluvieuses. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	237
Figure 103 : Extraction des masques agricoles et classification de l'utilisation des sols. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	241
Figure 104 : Répartition des masques agricoles et de bâtis sur la zone d'étude. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	241
Figure 105 : Les types de cultures et les surfaces agricoles en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	243
Figure 106 : Variabilités des classes d'utilisation en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	244
Figure 107 : Evolutions en pourcentage des espaces agricoles entre 1984 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	245
Figure 108 : Carte des changements des utilisations des sols entre 1984 et 1999. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	246
Figure 109 : Carte des changements des utilisations des sols entre 1999 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	248
Figure 110 : Carte des changements dans l'Agriculture des rives entre 1984 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	250
Figure 111 : Changements dans l'Agriculture des rives entre 1984 et 1999. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	251
Figure 112 : Changements dans l'Agriculture des rives entre 1999 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.....	252
Figure 113 : Carte des changements dans l'agriculture fluviale entre 1984 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	253
Figure 114 : Changements dans l'agriculture fluviale entre 1984 et 1999. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	254
Figure 115 : Changements dans l'agriculture fluviale entre 1999 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	255
Figure 116 : Carte des changements dans l'agriculture de l'arrière-pays entre 1984 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	256
Figure 117 : Changements dans l'agriculture de l'arrière-pays entre 1984 et 1999. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	257

Figure 118 : Changements dans l'agriculture de l'arrière-pays entre 1999 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	258
Figure 119 : Evolutions des périmètres rizicoles de la SEMRY entre 1984 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	258
Figure 120 : Evolutions en hectares des surfaces bâties entre 1984 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	259
Figure 121 : Evolutions spatiales des surfaces bâties entre 1984 et 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	260
Figure 122 : Les surfaces pastorales en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	262
Figure 123 : Variabilités des surfaces pastorales en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	263
Figure 124 : Découpages de l'arrière-pays en zones homogènes. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	265
Figure 125 : Occupation des sols aux berges des fleuves. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	266
Figure 126 : Variabilités de l'utilisation des sols aux berges des fleuves en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	267
Figure 127 : Occupation des sols dans l'arrière-pays sableux. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	268
Figure 128 : Tendances d'évolution du couvert végétal dans l'arrière-pays sableux. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	269
Figure 129 : Variabilités de l'utilisation des sols dans l'arrière-pays sableux en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	270
Figure 130 : Occupation des sols dans l'arrière-pays argileux. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	271
Figure 131 : Tendances d'évolution du couvert végétal dans l'arrière-pays argileux. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	272
Figure 132 : Variabilités de l'utilisation des sols dans l'arrière-pays argileux en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	273
Figure 133 : Etapes de modélisation de la structure paysagère et de simulation des changements spatio-temporels. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	278
Figure 134 : Distribution moyenne spatiale des précipitations en Septembre et en Octobre. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	280
Figure 135 : Distribution spatiale des températures de sols en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	281

Figure 136 : L'indice de texture des sols en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	283
Figure 137 : Les principales étapes de modélisation des unités paysagères. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	285
Figure 138 : La différenciation de l'empreinte des modes de valorisation de l'espace. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	287
Figure 139 : Evolutions des surfaces bâties en fonction de la morphologie du territoire. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	288
Figure 140 : Distribution des surfaces bâties le long des dépressions. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	289
Figure 141 : Différenciation entre les espaces humides et les sols nus secs. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	291
Figure 142 : Différenciation entre les eaux libres et le reste de l'espace d'étude. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	292
Figure 143 : Cartes des unités paysagères modélisées en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	295
Figure 144 : Evolutions spatio-temporelles des unités paysagères modélisées en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	297
Figure 145 : Evolutions spatiales de l'anthropisation de l'espace d'étude. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	298
Figure 146 : Les principales étapes de la simulation prédictive des unités paysagères. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	299
Figure 147 : Prédiction de la distribution spatiale des unités paysagères en 2035. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	302
Figure 148 : Carte de modélisation des unités paysagères en 2018 et carte de prédiction des unités paysagères en 2018. Réalisation : P. G. Gbetkom, CNRS ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Université.	303

Liste des tableaux

Tableau 1. Récapitulatif des caractéristiques du milieu d'étude.....	77
Tableau 2. Caractéristiques des images satellites optiques et radars	97
Tableau 3. Extrait des caractéristiques d'image MODIS TERRA MOD11C3.....	100
Tableau 4. Extrait des caractéristiques d'images MODIS TERRA MOD13Q1.	101
Tableau 5. Caractéristiques des scènes du capteur MSS.	104
Tableau 6. Caractéristiques des scènes du capteur TM.	104
Tableau 7. Caractéristiques des scènes du capteur ETM+.....	105
Tableau 8. Caractéristiques des scènes du capteur Sentinel-2.	107
Tableau 9. Caractéristiques des scènes du capteur SPOT6.	109
Tableau 10. Avantages et limites des images satellites utilisées.....	110
Tableau 11. Poids des composantes principales obtenues des images MODIS NDVI.	147
Tableau 12. Superficies des classes de la CP1.....	150
Tableau 13. Superficies des classes de la CP2.....	153
Tableau 14. Superficies des classes de la CP3.....	154
Tableau 15. Superficies des classes de la CP4.....	156
Tableau 16. Superficies des classes de la CP5.....	158
Tableau 17. Superficies des classes de la CP6.....	160
Tableau 18. Superficies des classes de la CP7.....	161
Tableau 19. Corrélations entre l'indice de végétation et les cumuls de précipitations.	180
Tableau 20. Les images satellites utilisées pour classifier l'occupation et l'utilisation des sols.....	219
Tableau 21. Calcul de la séparabilité des sites d'entraînements.	221
Tableau 22. Présentation de la matrice de confusion.....	222
Tableau 23. Les images satellites utilisées pour classifier l'occupation des sols.....	224
Tableau 24. Résultat de la séparabilité des sites d'entraînements pour les classifications.....	225
Tableau 25. Étendue spatiale des principales classes d'occupations du sol.....	229
Tableau 26. Valeurs de précision globale et de Kappa pour les classifications.....	230
Tableau 27. Superficies des changements d'occupation du sol entre saisons sèches.	233
Tableau 28. Superficies des changements d'occupation du sol entre saisons pluvieuses.....	236
Tableau 29. Description des classes d'utilisation des sols.....	239

Tableau 30. Matrice de transition des classes d'utilisation des sols entre 1984 et 1999.	246
Tableau 31. Matrice de transition des classes d'utilisation des sols entre 1999 et 2018.	248
Tableau 32. Poids des composantes des ACP et des MNF en 1984, 1999 et 2018.	292
Tableau 33. Les composantes principales retenues pour la modélisation des structures paysagères.....	294
Tableau 34. Superficies des Unités Paysagères en Octobre 1984, Octobre 1999 et en Septembre 2018.....	296
Tableau 35. Matrice de probabilité de transitions en 2025, 2030, et 2035.....	300
Tableau 36 .Matrice de confusion entre la carte de modélisation de 2018 et la carte de simulation de 2018.	304

ANNEXES

Annexe 1 :

Caractéristiques de la méthode de modélisation développée dans cette thèse

L'objectif de la modélisation dans cette thèse, est de développer une nouvelle approche opérationnelle en géomatique de délimitation et d'évaluation fonctionnelle des grands ensembles paysagers en région aride, en prenant pour objet d'étude notre zone d'étude.

La méthode de modélisation implémentée dans cette thèse est une méthode hybride (à l'exemple du modèle CLUE), car elle permet d'une part de combiner les méthodes mathématiques d'intelligence artificielle (MNF) et les méthodes statistiques (ACP), et d'autre part parcequ'elle est semi automatique pour permettre l'intégration variable des composantes du milieu aux modèles de calcul.

En effet, la première étape de cette approche basée exclusivement sur les images satellitaires est l'identification des paramètres environnementaux à intégrer pour modéliser la structuration du paysage. Cette phase de sélection permet de prendre en compte les paramètres naturels (pluviométrie, températures, types de sols, etc.) et anthropiques (agriculture et répartition du bâti, etc.) les plus importants dans les dynamiques d'évolution.

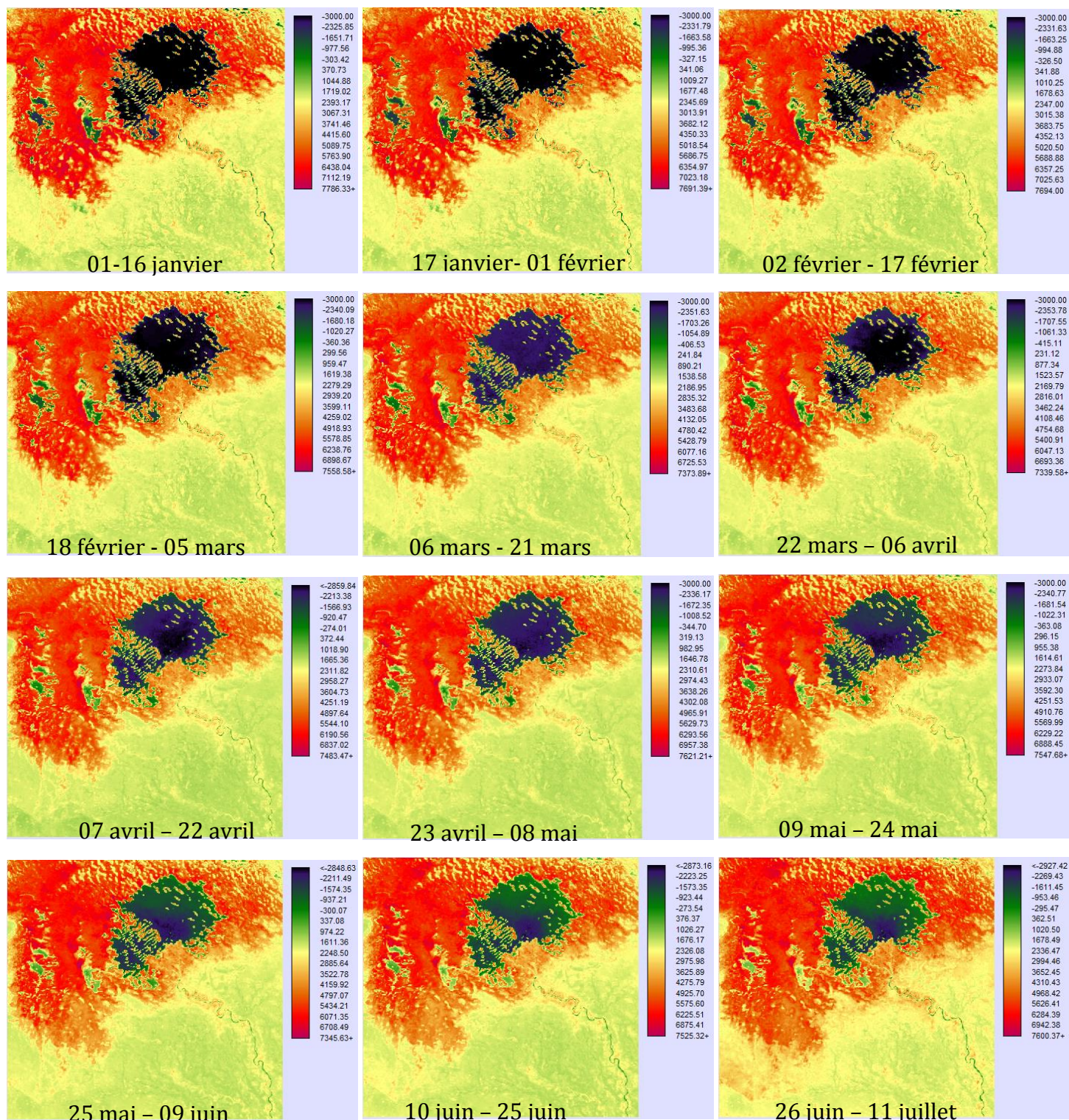
L'avantage de cette combinaison de méthode est surtout perceptible dans la seconde étape de cette approche, lors de l'analyse des interrelations spatiales entre ces paramètres environnementaux (chapitre 5). L'utilisation des algorithmes statistiques (ACP) et de description morpho structurale (MNF) a pour intérêt l'analyse descriptive et fonctionnelle de la structuration du paysage du milieu (chapitre 5). Au terme de cette étape, les grands ensembles territoriaux sont délimités en regroupant les espaces aux caractéristiques spatiales communes et aux fonctions partagées (chapitre 5).

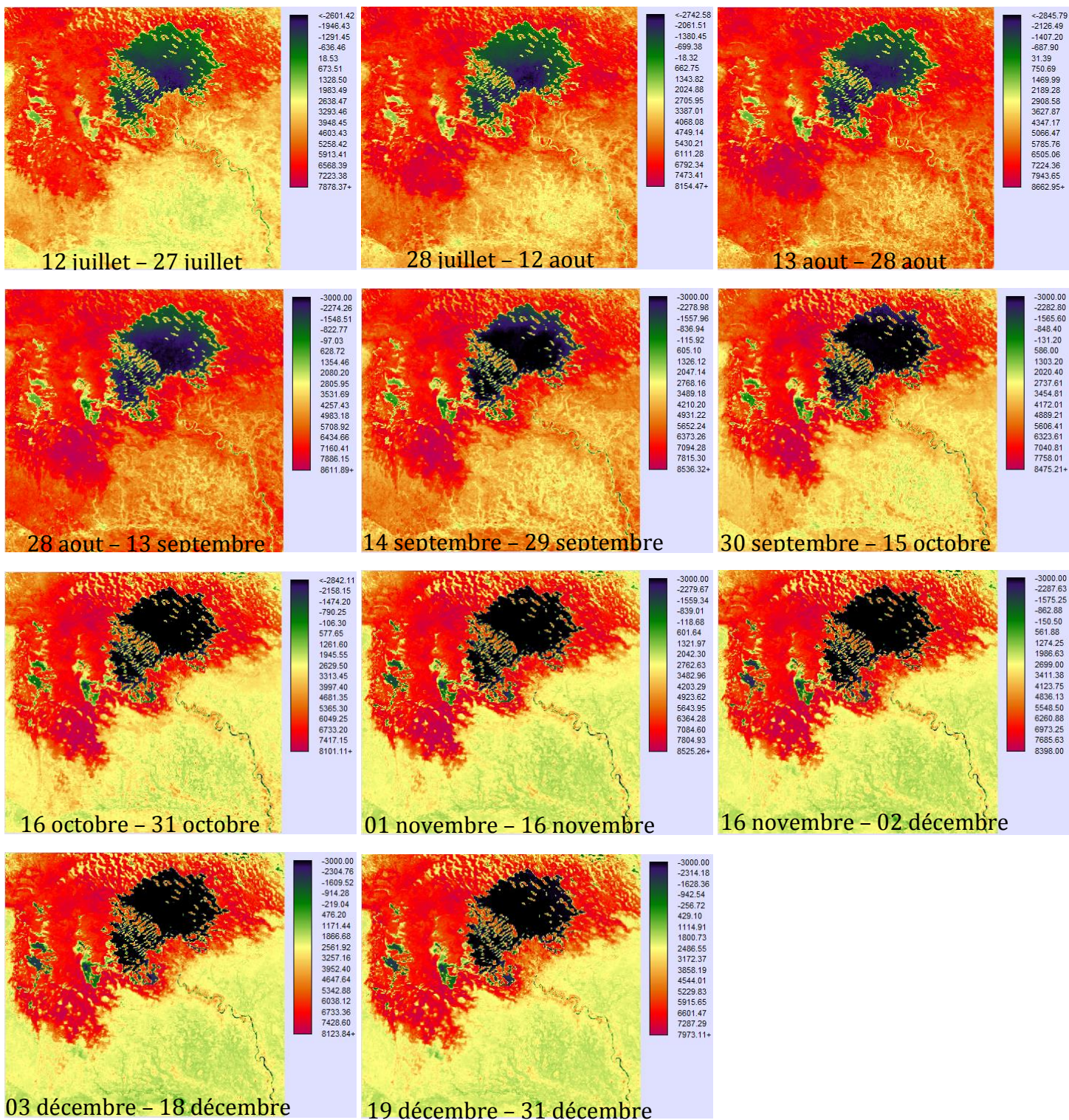
Les résultats de cette modélisation permettent ensuite de prédire l'occupation future. Dans cette thèse, l'approche de simulation utilisée pour prédire les évolutions spatio-temporelles de l'occupation des sols combine les modèles de chaînes de Markov et les automates cellulaires.

Annexe 2 :

Evolution moyenne bihebdomadaire de l'indice de végétation NDVI entre 2000 et 2018.

Chaque image correspond à la moyenne des valeurs de NDVI de la période indiquée. Par exemple l'image du « 06-21 Mars » est obtenue en faisant la moyenne de toutes les images acquises à cette date (soit 23 images).



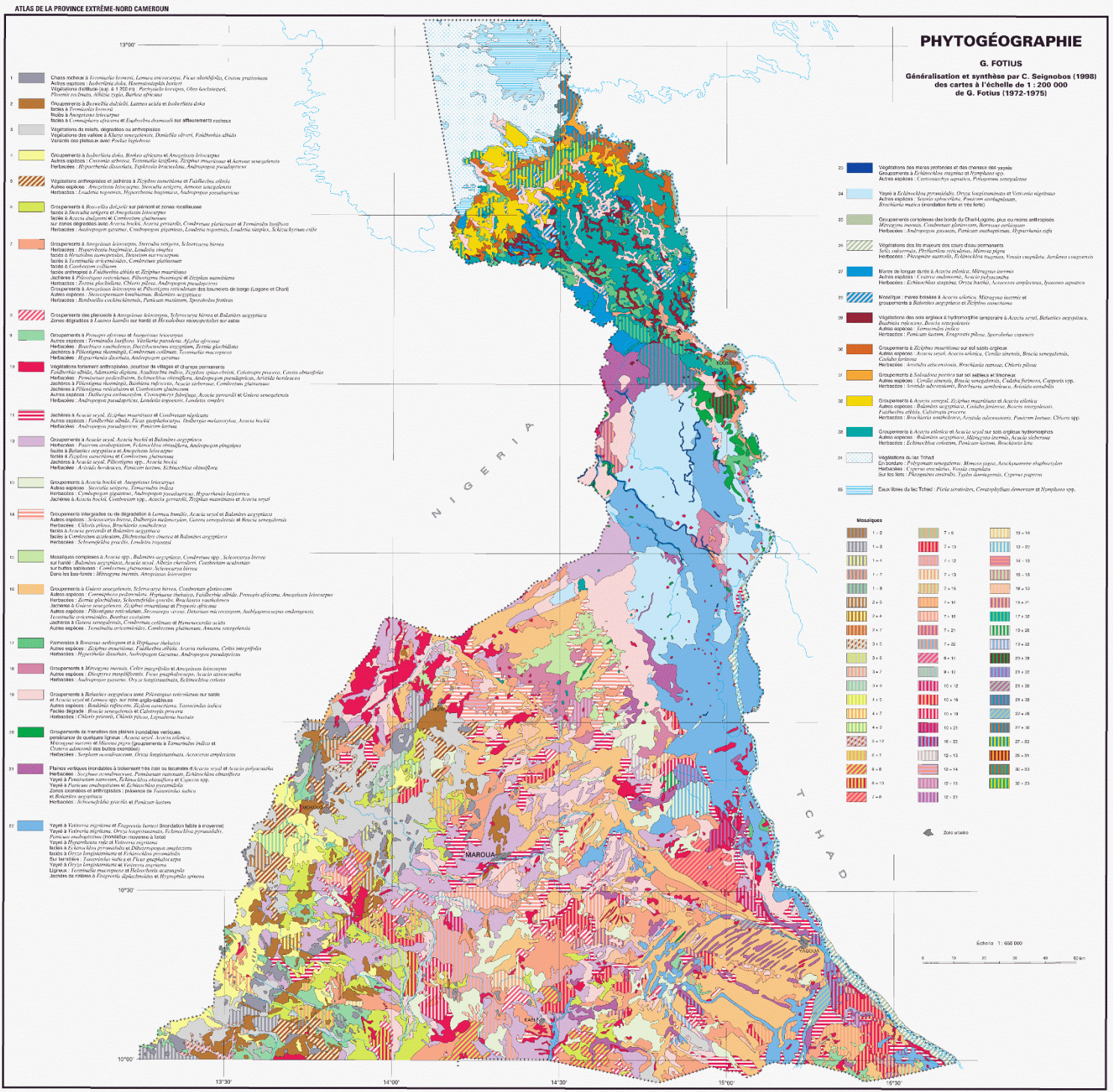


Annexe 3 :

Les cartes d'occupation des surfaces de la région de l'extrême nord Cameroun

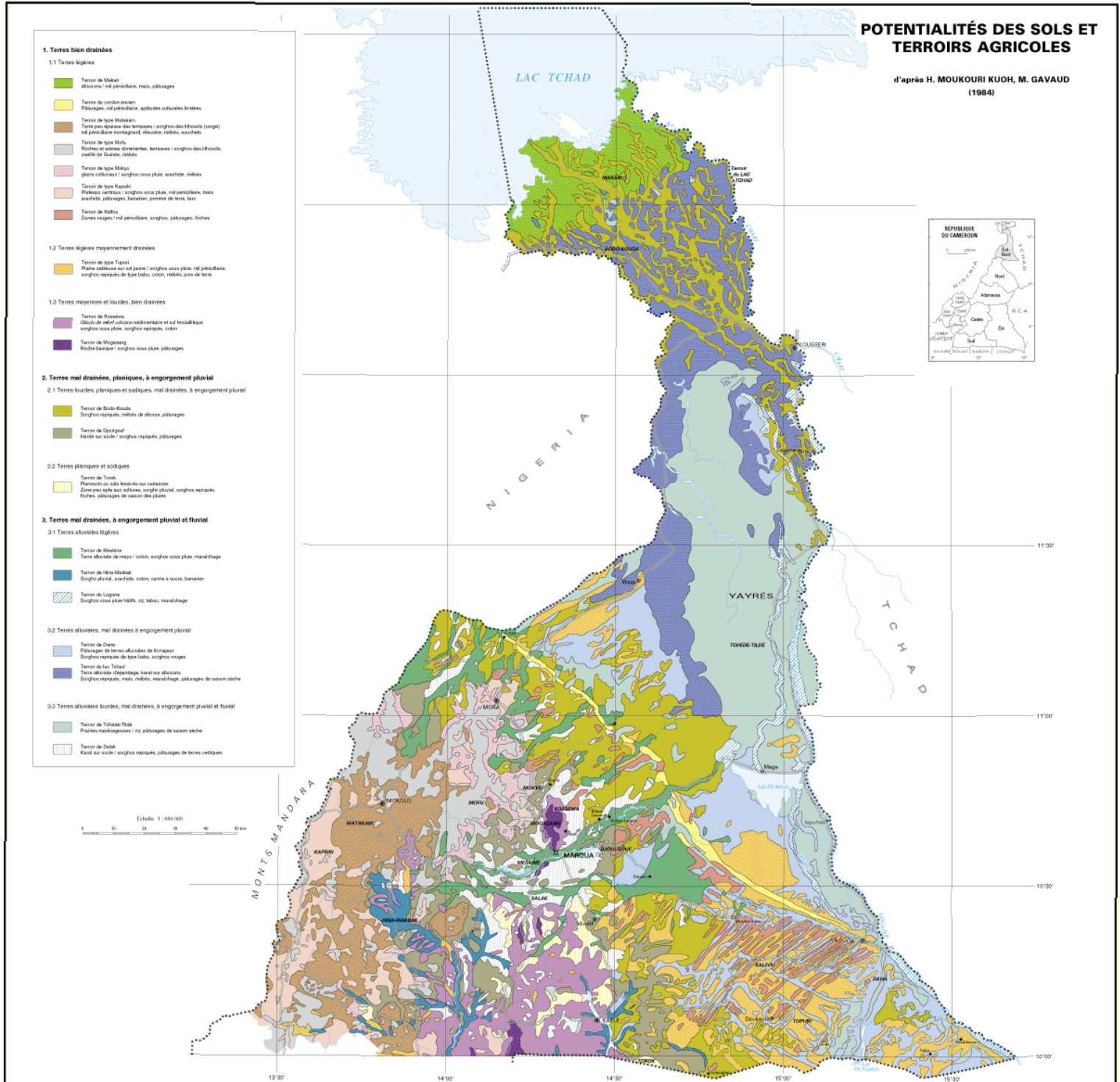
Elles résultent des travaux de l'Institut de Recherche pour le Développement, et sont publiées en 2000 dans l'ouvrage « Atlas de la Province Extrême-Nord Cameroun » (Seignobos et Iyébi-Mandjek 2000). Il s'agit des cartes de la phytogéographie, des potentialités agricoles des sols et de la géomorphologie des sols.

3.1. Carte de la phytogéographie de la province de l'extrême-nord Cameroun



3.2. Carte des potentialités agricoles des sols de la province de l'extrême-nord Cameroun

ATLAS DE LA PROVINCE EXTRÊME-NORD CAMEROUN



© IRD - Editions / LCA - MINREST / INC - 1999

Rédaction numérique : S. Barraud, M. Davard, F. Coppey (ICAN)



Annexe 4 :

Production scientifique dans le cadre de cette recherche.

Il s'agit de posters scientifiques présentés lors des conférences internationales

- GEOBIA 2018 Montpellier
- PECORA 2019 Baltimore
- ILUS 2019 Paris

Et des articles scientifiques publiés dans les revues internationales.

- International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS
- Jour of Adv Research in Dynamical & Control Systems
- The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences
- Journal of Geographic Information System

4.1. Les posters scientifiques présentés lors des conférences

Mapping of built up areas in the Cameroonians shores of Lake Chad and its hinterland through based object classification of sentinel 2 images



through based object classification of sentinel 2 images



GEOBIA 2018 Montpellier 18-22 June 2018

GBETKOM Paul Gérard^{1,2*}, GADAL Sébastien¹, EL ABOUDI Ahmed², NGANDAM Homère³

1. Aix-Marseille Univ, CNRS, ESPACE UMR 7300, Univ Nice Sophia Antipolis, Avignon Univ, 13545 Aix-en-Provence, France, paul-gerard.gbetkom@etu.univ-amu.fr; sebastien.gadal@univ-amu.fr
2. Laboratory of Botanic, Mycology and Environment, University Mohammed V Rabat, 1014, 4 avenue ibn battouta Rabat Morocco; elaboudi@gmail.com
3. Laboratory of Image Processing, Stats N' Maps, Private Consulting Firm, 13015 Audelia road, suite 9128, Dallas; ngandamh@yahoo.com

1. Context

In the Cameroonian side of lake Chad and hinterland, the data of population census in Cameroon show that the demography of the Logone and Chari administrative division, has steadily increased from 276 170 to 486 997 inhabitants between 1987 and 2005 (2010). The growing urbanization observed in this zone increases the need of control resources exploitation. However, the rural settlement is dominant, more expanded, characteristic of built-up is patchwork of huts constructed with ground, covered with gramineous grasses. Consequently, it is important to focus on the distribution and of the built-up, to further considering its impact on the biological and physical environment

Data availability?

According to the spatial resolution of the image available (Corona, Landsat MSS, Sentinel 2), it is then difficult to map the built up areas for the previous dates. Therefore, these constraints do not enable a diachronic study of the built up areas.

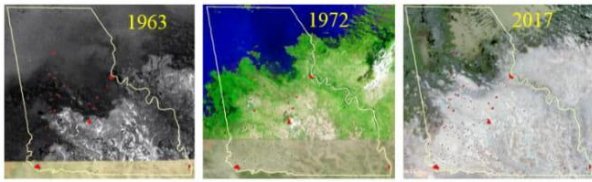


Figure 1: Data evolution and spatial variation of built up area extent

2. Methodology

The study area (figure 2) is located in the Far north administrative region of Cameroon and shares borders with the Republic of Chad to the north and east, the Federal Republic of Nigeria to the west and the rest of country to the south. For the purpose of the study, two Sentinel 2 satellite images acquired on April 29, 2017 are used. These images have 13 bands, but for this study, we only use the four bands at 10 meters in addition to the band eleven and the band twelve.

The study was carried out in two phases: (1) pre-processing of satellite consist in a simple atmospheric scattering correction by using the processor sen2core (Müller-Wilm *et al.*, 2013); (2)

classification of the main occupation classes follows by the characterization of the built up areas. However, the built up area in this territory is constituted of several types of housing principally houses built with local materials (huts of ground covered with stalk of millet or gramineous grasses) and are difficult to differentiate at this spatial resolution with other class like bare soil. To highlight the difference between

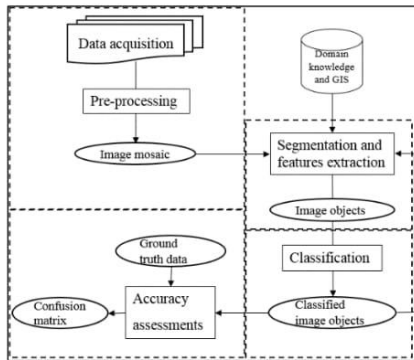


Figure 3: Flowchart of the methodology

built up area with other classes, NDBI and UI index, and component 3 and 6 of PCA are computed as neo bands and merged with the original bands. The new image is then classified according to the SVM's method which is a supervised learning algorithms based on statistical learning theory, and his aim for classification is to determine a hyperplane that optimally separates classes (Srivastava *et al.*, 2012), (Gunn, 1998), (Zhang, 2012).

3. Results

3.1 classification

The land cover at this time of the year is dominated by the soil class with 65,53% (311195,61 hectares) of the total extern of the study area. Water covers an area of 52627,81 hectares, with a rate of 11,08% and vegetation covers 108349,09 hectares (22,81%). The built up area occupies an area of 2669,76 hectares which represents 0,56% of the total surface of the zone studied.

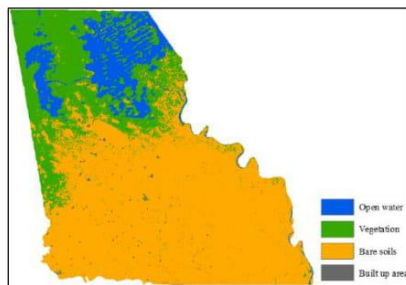


Figure 4: global classification map

References.

- Gunn, Steve R. (1998). "Support Vector Machines for Classification and Regression". *JSS Technical Report*, vol. 14, n° 1, p. 5-16.
- Müller-Wilm, Uwe, Jerome Louis, Rudolf Richter, Ferran Gascon, and Marc Nizette. (2013). "Sentinel-2 Level-2A Prototype Processor: Architecture, Algorithms and First Results". *ESA Living Planet Symposium 2013*, Edinburgh, UK.
- Srivastava, Prashant K., Dawei Han, Miguel A. Rico-Ramirez, Michaela Bray, and Tanvir Islam. (2012). "Selection of Classification Techniques for Land Use/Land Cover Change Investigation". *Advances in Space Research* vol. 50, n° 8, p. 1250-1265.
- Zhang, Yongli. (2012). "Support Vector Machine Classification Algorithm and Its Application". In *International Conference on Information Computing and Applications*, p. 179-186.

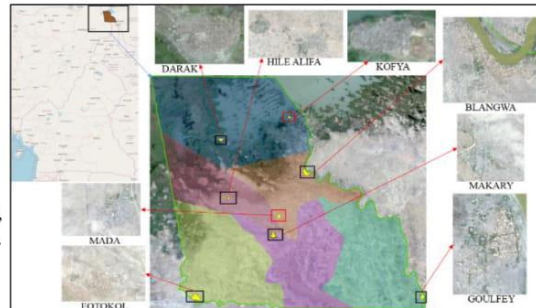


Figure 2: principal localities (framed in black) and rural space (framed in red)

(BUCREP 1992, on the natural and the stalk of millet or the quantification processes of the

3.2 Built up area extraction

The built up areas obtained for principals city after classification are distributed as follows: (a)Fotokol 942350,42 m², (b)Makari 673418,24 m², (c)Blangwa 663516 m², (d)Darak 474245,82 m², (e)Goulfey 251491,68 m², (f)Hile alifa 143137,32 m²

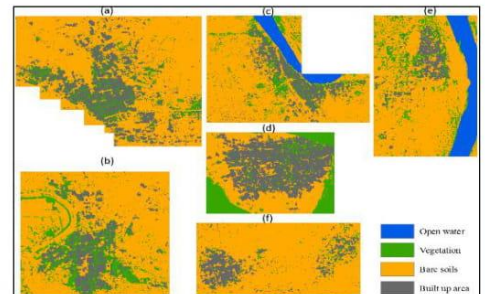


Figure 5: built up area in the principal localities

3.3. Morphology and structure of built up area

3.3.1. At the internal shores

The built up area is less important in Kofya (127187,92 m²) and appears less compact compared to Darak (474245,82 m²). The extension of the inhabited areas of Darak has reached its limit at the east of the city and continues towards the north, at the west and south of the city where

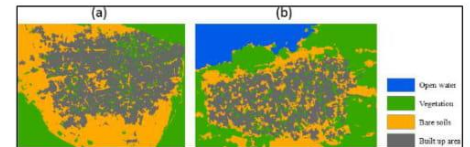


Figure 6: built up area at the internal shores of Lake Chad

the built up area becomes more scattered and where there are still open spaces not occupied (figure 6). At Kofya the built up area extension also continues to the bare soil areas especially to the north and south (figure 6).

3.3.2. In the hinterland

The Makari built up area (673418,24 m²) is more important than Mada (322458,21 m²) and the road network is difficult to identify in the both localities. However, following the line drawn by the trees it is possible to stand out the road network in the city of Makari (figure 7).

Moreover, the organization of the neighborhood also appears more structured in Makari thanks to the trees planted in the heart of the city and which cuts it into neighborhood. The extension of built up area to Makari and Mada takes place on the unoccupied open spaces of their peripheries (bare soil).

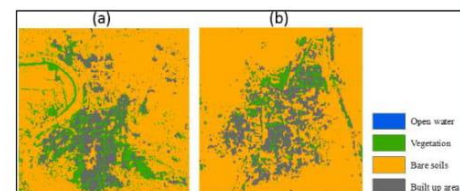


Figure 7: built up area in the hinterland of Lake Chad

4. Conclusion

The sequential image processing developed in this study provides a classification and a good analysis of the distribution of built up area and other occupation classes from Sentinel 2 image of April 29, 2017. Thanks to combined techniques of image processing as indices calculation, stacking and SVMs classification, added to statistics methods as principal component analysis, the problem of class confusion has been skirted and the built-up highlighted. The results obtained show the low rate of spatial extern of built up area throughout the study area (0, 56%), the variability in the size of cities and villages, and the differences in organization and distribution of the built up area according to their proximity to the lake.

Combining spectral indices and statistics analysis to proposed a new risk of soil degradation method – application to the Cameroonians shores of lake Chad and its hinterland



PECORA 2019, BALTIMORE 05-11 October 2019



GBETKOM Paul Gérard^{1,2*}, GADAL Sébastien¹, EI ABOUDI Ahmed², NGANDAM MFONDOUM Alfred Homère³, Mamane Barkawi MANSOUR BADAMASSI³

1. Aix-Marseille Univ, CNRS, ESPACE UMR 7300, Univ Nice Sophia Antipolis, Avignon Univ, 13545 Aix-en-Provence, France, paul-gerard.gbetkom@etu.univ-amu.fr; sebastien.gadal@univ-amu.fr
 2. Laboratory of Botanic, Mycology and Environment, University Mohammed V Rabat, 1014, 4 avenue ibn battouta Rabat Morocco; elaboudi@gmail.com
 3. Stats N' Maps, Private Consulting Firm, 19002 Dallas Parkway, suite 1536, Dallas, Texas 75287, USA; stats.n.maps.expertise@gmail.com; ngandamh@yahoo.com

1. The study area context

In the far northern part of Cameroon, the shores of Lake Chad are in the most exposed zone to the risks of soil degradation due to environmental conditions, more severe climatic conditions and modes of uses and exploitation of natural resources (National Action Plan to combat It is an area marked by degradation and decline of soil fertility, unsuitable cultivation practices, erosion, runoff, and decrease of fallows, pollution (Elias Symeonakis and Drake 2010, 2000.



Figure 1: Cattle herd in pasture in far north Cameroon (source: La Tribune Afrique)

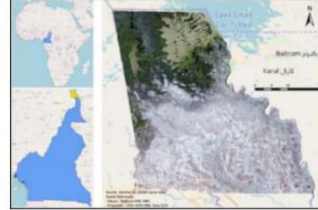


Figure 4 : Localisation of the study area

Desertification (PAN/LCD) 2006). high extension of barren land, overgrazing, and pesticides Seignobos and Iyébi-Mandjek

Background

Several methods help quantifying and mapping soil degradation at different spatial and temporal scales (Terrence and Timothy, 2017). But most of them include several ancillary data as topography map, geology map or land use map, and also need to have field samples of study area (Daniel et al, 2018). Most of these data are not available at the all extend of our study area, that's why we need to developed a new and simple approach to highlighted soils degradation through remote sensing capacity.

2. An approach based on sentinel 2

Two Sentinel 2 satellite images acquired on April 29, 2017 were used. These images have 13 bands, but only six of them were staked, that is Bands corresponding to blue, green, red, near infrared, Short Wave Infrared1 and 2. To carry out this study, a total of four vegetation spectral indices and nine soils spectral indices are generated and combined to describe bare soils states, soils properties and vegetation cover.

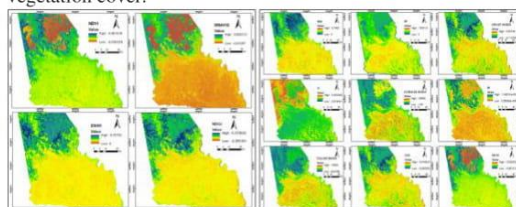


Figure 2: (a) the vegetation indices and (b) the soil indices

Then, all these indices are aggregate as one image (independent variable) and correlated with individual indices (dependent variable) to have correlations and determinations coefficients. Next, principal Component Analysis and factorial analysis are applied to all spectral indices to summarize information, have factorials coordinates and to detect positive and negative correlation. Finally, the model equation is obtained by index weighting with the respective values of the coefficient of determination and factorials coordinates.

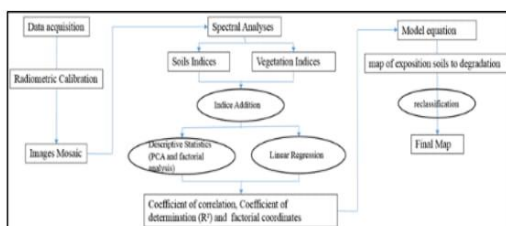


Figure 3: the flowchart of the methodology

References

Daniel Zizala, Anna Juhová, Tereza Zádorová, Kateřina Zeleníková & Robert Míniřík (2019) Mapping soil degradation using remote sensing data and ancillary data: South-East Moravia, Czech Republic, European Journal of Remote Sensing, 52:sup1, 108-122.
 Plan d'Action National de Lutte Contre La Désertification (PAN/LCD). 2006, 174p
 Seignobos, Christian, and Olivier Iyébi-Mandjek. 2006. "Atlas de La Province Extrême-Nord Cameroun". Paris : Yaoundé: Institut de recherche pour le développement, République de Cameroun, Ministère de la recherche scientifique et technique, Institut national de cartographie.
 Symeonakis, Elias, and Nick Drake. 2010. "10-Daily Soil Erosion Modelling over Sub-Saharan Africa". Environmental Monitoring and Assessment 161 (1-4): 369-87
 Terrence Keena Sepuru, Timothy Dube. (2017) An appraisal on the progress of remote sensing applications in soil erosion mapping and monitoring. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 9, p.9.

3. Accuracy analysis and final map of soil's degradation risk

3.1 Linear regression

The purpose is to highlight the potential regressions between the synthetic image used here as an explanatory variable, and each of the spectral indices used as variables to explain. It thus appears that NDVI, DSWI, NDGI, TI and the redness index are negatively correlated to the synthetic image. The index most strongly determined by the synthesis image is the brightness index. For vegetation indices, the R² values are contained between 0,007 and 0,592.

Table 1: Statistics relations between synthetic image and indices

Indices	Correlation Coefficient	Determination Coefficient	Threshold	Test
NDVI	-0,119	R ² =0,014	P < 0,0001	Important
MSAVI2	0,081	R ² =0,007	P < 0,0001	Important
DSWI	-0,747	R ² =0,558	P < 0,0001	Important
NDGI	-0,769	R ² =0,592	P < 0,0001	Important
MSI	0,743	R ² =0,552	P < 0,0001	Important
BI	0,953	R ² =0,909	P < 0,0001	Important
Crust index	0,662	R ² =0,438	P < 0,0001	Important
TI	-0,606	R ² =0,367	P < 0,0001	Important
Cuirass index	0,942	R ² =0,887	P < 0,0001	Important
Redness index	-0,827	R ² =0,684	P < 0,0001	Important
Colour index	0,662	R ² =0,438	P < 0,0001	Important
GSI	0,685	R ² =0,470	P < 0,0001	Important
NDSI	0,119	R ² =0,014	P < 0,0001	Important

3.2 Descriptive statistics

The first two factors of PCA and factorial analysis explain respectively 87.54% and 85.62% of the common variability of the characteristics measured. The first factor contains soil information and the second factor focuses information on vegetation.

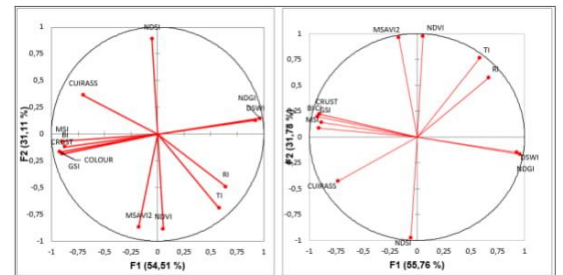


Figure 5: correlations between variables and factors

3.3 Model equation of potential soil's degradation risk modelling

The index maps are weighting with their coefficient of determination to highlight the individual contribution of each index, and their highest values of factorial coordinates obtained through the factorial analysis and the PCA in order to preserve the best information provided by each of these methods of analysis. This information is combined to compose the following equation:

$$ndvi*(xmax+Ymax)*R^2 + msavi2*(xmax+Ymax)*R^2 + dswi*(xmax+Ymax)*R^2 + ndgi*(xmax+Ymax)*R^2 + msi*(xmax+Ymax)*R^2 + bi*(xmax+Ymax)*R^2 + crust\ index*(xmax+Ymax)*R^2 + ti*(xmax+Ymax)*R^2 + cuirass\ index*(xmax+Ymax)*R^2 + redness\ index*(xmax+Ymax)*R^2 + colour\ index*(xmax+Ymax)*R^2 + gsi*(xmax+Ymax)*R^2 + ndsi*(xmax+Ymax)*R^2 = \text{RISK OF SOILS DEGRADATION}$$

3.4 Modelling results of the soil's risk of degradation

The result of this modelling is a map of risk exposition soils degree to agents and degradation factors. The potential soils exposition state is classified on the map below in five levels of exposition risk from the lower level to the higher.

The "Lower" and "Moderate to low" levels cover respectively 25,214.35 hectares and 130,717.19 hectares. The "Moderate" level of exposition spreads sparsely over an area of 137,404.34 hectares. With 152371.91 hectares, the "High to moderate" level represents the most widespread state of exposition. The "Higher" level occupies 29175.73 hectares.

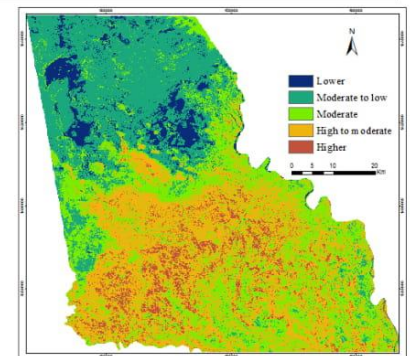


Figure 6: map of soils exposition risk to degradation

4. Conclusion

The sequential image processing developed in this study allows to model, classify and analyse the soils potentially exposed to the risk of degradation from Sentinel 2 image of April 29, 2017. Thanks to combined techniques of image processing as indices calculation, linear regression, factorial analysis and principal component analysis, the problem of ancillary data and field samples has been skirted and the potential soil degraded highlighted. The results obtained show the spatial distribution of different soil's risk level of degradation throughout the study area, the soil and vegetation influence for each level of risk, and the distribution of these level of risk according to their proximity to the lake.

Vegetation dynamics: Re-greening

Since the great droughts of the 1970s, the monitoring of vegetation cover in arid regions is a major environmental challenge. Satellite images played an important role in the study of these droughts. In 90s, images of NOAA (1981) and MODIS (2000) sensors have been coupled with weather data to study the "re-greening" of Sahel started with the improvement of climatic conditions. However, observations carried out at local scales show trends of evolution sometimes different from the results obtained in the Sahel. This study explores the quantification of changes in vegetation cover at the Cameroonian shores of Lake Chad and its hinterland. Its two complementary goals are the mapping of vegetation cover; and the statistical changes analysis to assess the degree of correlation between visual, quantified trends, and environmental parameters.

Paul Gérard GBETKOM^{1,2*}, Sébastien GADAL¹, Ahmed El ABOUDÉ¹, Julien ANDRIEU³, Alfred Homère NGANDAMFONDOUNG⁴, Mamane Barkawi MANSOUR BADAMASSI²

¹ Aix-Marseille Univ, CNRS, ESPACE UMR 7300, Univ Nice Sophia Antipolis, Avignon Univ, 13545 Aix-en-Provence, France, paul.gerard.gbetkom@etu.univ-amu.fr; sebastien.gadal@univ-amu.fr; ² Laboratory of Botanic, Mycology and Environment, University Mohammed V Rabat, 2014, 4 avenue Ibn Battouta Rabat Morocco; elaboudf@gmail.com, barkawimansour@yahoo.com; ³ Univ Nice Sophia Antipolis, CNRS, ESPACE UMR 7300, Aix-Marseille Univ, Avignon Univ, Nice, France, 3, StarsVMaps, Private Consulting Firm, 19002 Dallas Parkway, suite 1536, Dallas, Texas 75287, USA; stars.v.maps.expertise@gmail.com, ngandamh@yahoo.com

Area and Remote Sensing Data

The data used are the MODIS NDVI MOD13Q1 reference images corresponding to a bi-weekly summary of the best records in terms of data quality. The LP DAAC operator in charge of the MODIS sensor propose them. 434 granules of 250 meters of spatial resolution and covering the period from 2000 to 2018 are used. The map of soils potentialities and agricultural lands, of the far north Cameroon (IRD Cameroon) is also used for spatial correlations.

Experimental site

This space is marked by a strong spatial and spectral variation of the vegetation cover between the dry and the rainy season.

Man Kendall Correlation

The significance test measuring non-zero changes is applied by the probability measure $p < 0.001$. The progression means the transformation of water or bare soils spaces into vegetation. The opposite refers to regression.

- Positive trends: 13, 29%
- Negative trends: 21, 61%
- Stability: 65, 08 %

Strongest evolutions trends in the lake part. Regression and stability dominate in the hinterland where trends are weak.

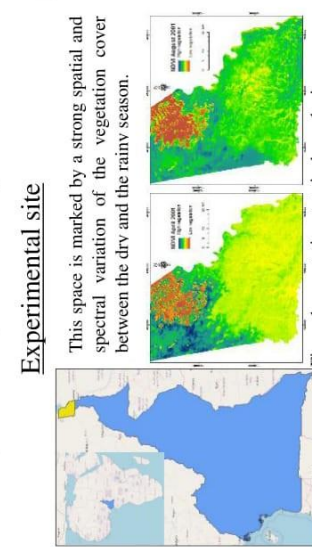


Figure 1 : vegetation state in dry and rainy season

A. Man Kendall Correlation

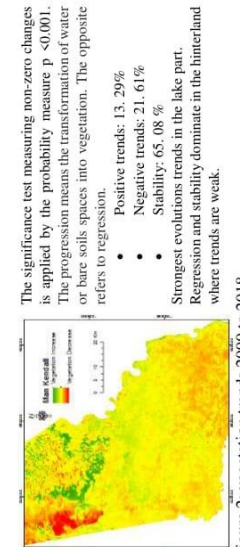


Figure 2: vegetation trends 2000 to 2018

The landscape of Makari well-drained, is dominated by stable and progressive trends (83.1%). The landscape units of Bodo Kouda and Lake Chad poorly drained, are dominated by stable and regressive trends (87.47% and 93.3% respectively). The landscape of Dana witch is also poorly drained is dominated by stable and progressive trends 78.43 %.

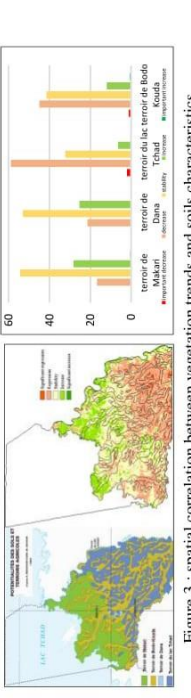


Figure 3 : spatial correlation between vegetation trends and soils characteristics

B. Principals Components Analysis

The principal component analysis applied to the 434 images summarizes the information of these images into 8 principal components, the second 3.15%, the third 2.2%, the fourth 1.44%, the fifth 0.9%, and the sixth 0.46%.

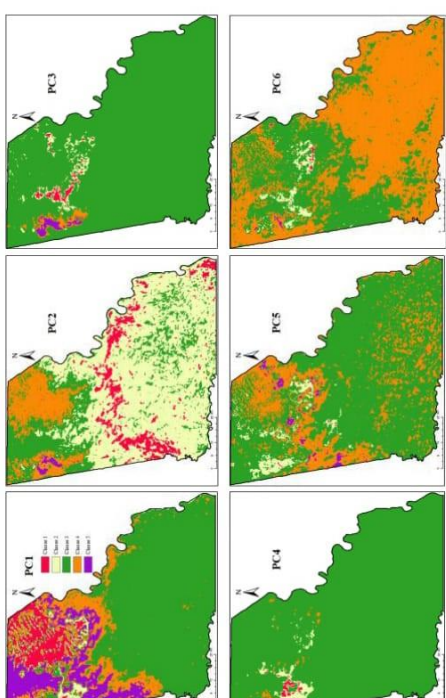


Figure 4 : principals components

C. Annuals evolutions

The profiles below represent seasonal variations in the chlorophyll activity of the 5 vegetation classes of principal component. These are results are based on the mean values of each granule over the entire observed period.

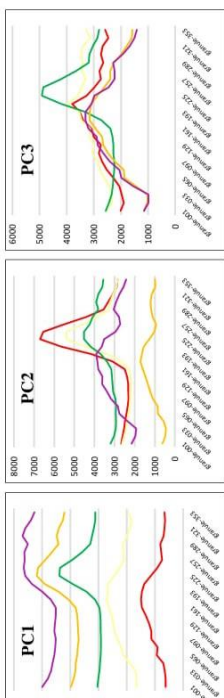


Figure 5 : variations in chlorophyll activity of different types of vegetation

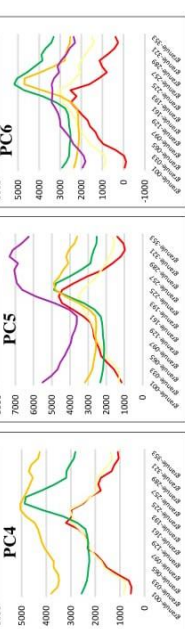


Figure 6 : variations in chlorophyll activity of vegetation classes

D. Classification of Principals Components Analysis

The reclassification of all principal components by the unsupervised's Kmeans algorithm has helped to categorize vegetation according to their seasonal cycle and their proximity to the lake. Annual vegetation dominates the northern part of the lake, the outer shores and the hinterland. Flood and permanent vegetation are present in the rest of the lake part.

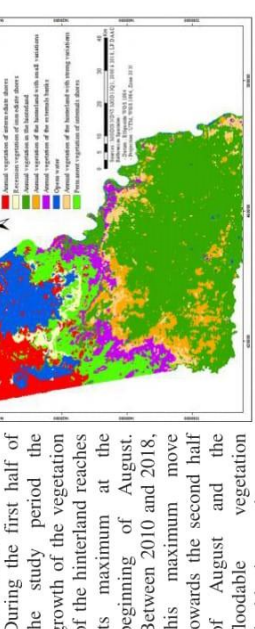


Figure 7 : different types of vegetation

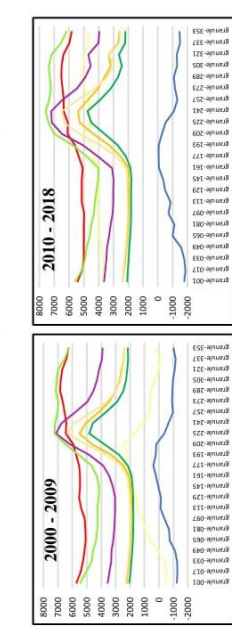


Figure 8 : variations in chlorophyll activity of different types of vegetation

Conclusion

The three trends in vegetation cover are observed in the lake part, while the hinterland of the study area is dominated by stable and regressive trends. The vegetation trends of well drained landscape are stable and progressive unlike of the poorly drained landscape where the trends are stable and regressive. The classification of the principal components shows that the vegetation of the hinterland is essentially composed of annual vegetation while floodable and perennial vegetation is located in lake part.

References

Seignobos, Christian, and Olivier Iyeh-Mandjek. 2006. 'Atlas de La Province Extrême-Nord Cameroun'. Paris : Yaoundé: Institut de recherche pour le développement.
Cécile Dardel. Entre désertification et reverdissement du Sahel : Diagnostic des observations spatiales et in situ. Géophysique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2014.

4.2. Articles scientifiques publiés comme premier auteur

Research Article

Mapping Change Detection of LULC on the Cameroonian Shores of Lake Chad and its Hinterland through an Inter-Seasonal and Multisensor Approach

Paul Gérard Gbetkom^{1, 2}, Sébastien Gadal¹, Ahmed El Aboudi², Alfred Homère Ngandam Mfondoum³, Mamane Barkawi Mansour Badamassi²

¹Aix-Marseille Univ, CNRS, ESPACE UMR 7300, Univ Nice Sophia Antipolis, Avignon Univ, 13545 Aix-en-Provence, France

²Laboratory of Botanic, Mycology and Environment, University Mohammed V Rabat, 1014, 4 avenue ibn battouta Rabat, Morocco

³Stats N' Maps, Private Consulting Firm, 13015 Audelia road, suite 9128, Dallas, Texas, USA

Publication Date: 12 September 2018

Correspondence should be addressed to *Paul Gérard Gbetkom*, paul-gerard.gbetkom@etu.univ-amu.fr

DOI: <https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.381>

Copyright © 2018 Paul Gérard Gbetkom, Sébastien Gadal, Ahmed El Aboudi, Alfred Homère Ngandam Mfondoum, Mamane Barkawi Mansour Badamassi. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract The aim of this study is to assess the land use/land cover (LULC) inter-seasonal changes along the Cameroonian shores of Lake Chad and its hinterland using the four generations of Landsat sensors images of MSS, TM, ETM+ and OLI. Identification of land use/land cover inter-seasonal changes is based on classification by Support Vector Machines (SVMs) algorithm. Three major spatial classes of objects are identified: open water, vegetation and marshlands, and bare soils. The results show that, bare soils class has the higher rate, and can reach 67.57% of the study area extent. Moreover, land use/land cover change from one season to another or from one decade to another can be closely linked to evolution of climate conditions. Then open water areas vary little with rate of 1.94% and 7.6% for inter-seasonal changes, and rate of 5.62% and 63.05% for inter-annual changes. Compared to open water, vegetation and marshlands has the most important variation, that is 583.59%. In addition, proportions of bare soils that vary are different between dry seasons and rainy seasons, with a lower and a higher rate of 5.38% and 82.8%. This leads to the conclusion that occupation in the study area is dominated by bare soils principally; occupation class that is most affected by changes is vegetation and marshlands followed by bare soils and then open water and marshlands.

Keywords *Inter-seasonal changes; LULC; Lake Chad; Support vector machines*

1. Introduction

Land use/land cover (LULC) changes play a major role in the study of environment change (Reis, 2008), (Vitousek, 1992). Changes in land cover and the way people use the land have some modifications on the state of natural resources. Some of these modifications are deforestation, desertification, biodiversity loss, global warming and increase of natural disaster-flooding (Reis, 2008). During the last four decades, remote sensing and GIS technology has enabled ecologists and natural

resources managers to acquire timely data (Billingsley, 1984) and observe periodical changes in ecosystems with their habitats and associated components (Muzein, 2006), (Mobaied et al., 2011). Data from satellite sensors has become an important tool for researchers studying land use and land cover change (Szuster, Chen and Borger, 2011); and remote sensing is a valuable data source from which land-use/land-cover change information can be extracted efficiently (Chen et al., 2003).

The Lake Chad has experienced a long history of wet and dry periods covering several timescales, ranging from the geological, to the annual and to the seasonal (J. Lemoalle, Magrin, and Institut de recherche pour le développement (France) 2014). Despite the physiognomic analysis of the lake by scientists, using hydrological data, field observation and satellite imagery (Rangé, 2016), (Olivry, 1996), (Magrin 2015), (Geerken, Vassolo, and Bila, 2010), some interpretations of evolution of the lake Chad land cover are still inaccurate (Lemoalle, 2014). This is the case of marshland flooded, which are difficult to identify on satellite imagery and therefore, not sufficiently taken into account when estimating the lake surface (Rangé, 2016). Actually, concerning « Little Chad » (Tilho, 1928), (Olivry 1996), (Magrin 2015), draws schematic map of lake Chad's average situation around 2010, on which it can be observed that Cameroonian side is occupied by permanent open water, almost permanent marshland, marshland that is irregularly flooded and areas not flooded since 1963.

The cartography of land use/land cover evolution of the said side proposed by Rangé between 1950 to 2000 enabled to observe that main land use/land cover classes are constituted by open water, marshland, non-flooded land, and dry land.

Therefore, this paper's aim is to classify the land use/land cover in the Cameroonian shores of Lake Chad and its hinterland during wet and dry seasons for decades 1970, 1980, 2000 and 2010.

2. Materials and Methods

The study area

The Cameroonian shore of lake Chad and its hinterland are located in the northern part of the country, between latitude 12°N to 13°N and meridian 14°E to 15°E, and cover a total land area of 474902 Ha. The northern and eastern boundaries of study area are with Chad republic, the western boundaries are share with federal republic of Nigeria, and the southern area is in Cameroon (Figure 1). This part of the Sahel is a semi-arid region (Okonkwo, Demoz, and Gebremariam, 2014) with a dry tropical climate. The annual seasonality is divided in a rainy season from June to October and a dry season from November to may (RIM, 2008). The annual rainfall ranges around 400mm, the thermal amplitude is 7.7°C, while the average monthly temperature is 28°C (Seignobos and Iyébi-Mandjek, 2000).

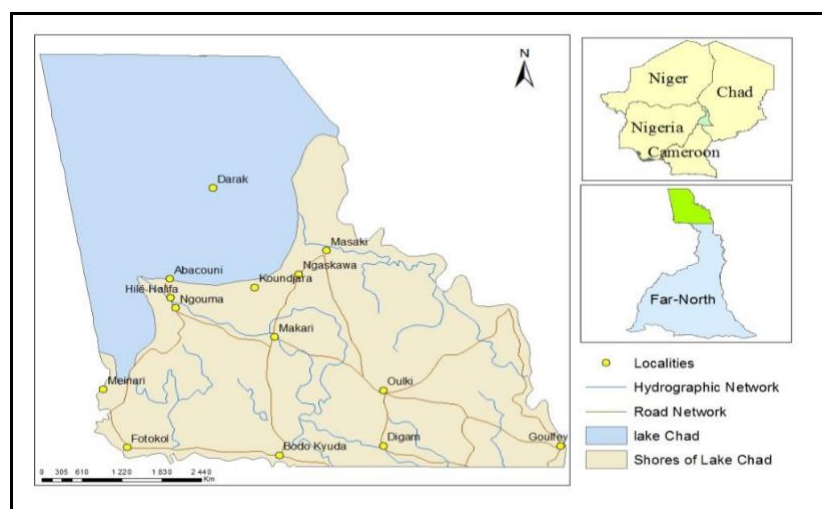


Figure 1: Location of the study area

Data description

Two types of data source are used to:

- The vector layer of national, regional and department boundaries, hydrography system, localities repartitions, and road network of the study area. Some of these layers are the propriety of GADM developed by Robert Hijmans (University of California), and other layers were found in the topographic map of Cameroon far north region at scale 1/650,000, sourced from French Research Institute for Development (Seignobos and Iyébi-Mandjek, 2000). These vector layers serve to delimit the study area.
- The Landsat satellite images of the study area at 60m and 30m of spatial resolution (path and row: 185/051 and 185/052). These images are from MSS (March 1973 and October 1975), TM (March and October 1987), ETM+ (April and August 2000) and OLI (April and September 2015) sensors, and were downloaded from the website of USGS (Table 1). All visible and infrared bands were included for the analysis. Their selection is done such a way that dry season and rainy season images can enhance the assessment of inter-seasonal changes for the same year (1987, 2000 and 2010), and diachronic or inter-annual changes from one year to another. However, the unavailability and quality (clouds cover) of some images to match the exact month of a season between two years or decades, has influenced the choice of data from different years (for example: March 1973 and October 1975). Intervals amongst satellites images vary from four months to seven months for data used to show inter-seasonal land cover changes. Concerning images used for inter-annual land cover changes, the intervals are between twelve to fifteen years.

Table 1: *Characteristics of scenes used*

Sensors	MSS	TM	ETM+	OLI
Date of Acquisition	March 1973 and October 1975	March 1987 and October 1987	April and August 2000	April and September 2015
Projection	UTM, WGS84_zone 33N	UTM, WGS84_zone 33N	UTM, WGS84_zone 33N	UTM, WGS84_zone 33N
Pixel Size	60 m	30 m	30 m	30 m
Path/Row	198/051, 199/051	184/051, 185/051	184/051, 185/051	184/051, 185/051

Processing

Software Erdas Imagine 2015 and Arcgis 10.5 have been used for the processing. First off, the radiometric calibration and atmospheric corrections have been done using (Chavez, 1996) low COST method (Chander, Markham and Helder, 2009); then a mosaic of the concerned scenes; and the spectral grouping of spatial objects known as classification, using its internal algorithm.

On the other hand, software has been mainly used for the layout of data on readable format. Concerning the diachronic mapping, many images data sources should be combined to show the level of land change at vastly different temporal scales (Salvati and Tombolini, 2014), (Olokeogun, Iyiola and Iyiola, 2014). In this study eight images data have been used at eight sequences of time, wet season and dry season in decades 1970, 1980, 2000 and 2010. The representation of lake Chad by using satellite imagery offer the possibility to distinguish open water, dune archipelago, marshland, dried surfaces resulting of falling water level (Rangé, 2016).

For this study, the dynamic of land use/land cover within the study area is done by mapping three main classes of land use/land cover, open water, vegetation and marshland, and bare soils. Open water are constituted of water observed at any time of the year and are principally located in the north west of the study area. The class of vegetation and marshland class is constituted with aquatic grasses meadows, which grow on hydromorphic soils and vegetated by submerged plant species. This class

also includes all types of vegetation cover from the dense to the most scattered, dominated by meadows and grassy savannas (Martin, 1962). Bare soils are areas where vegetation does not exist or is very weakly present.

We have used the process of spectral parametric classification through Support Vector Machines (SVM) algorithm, and then follow by the post-classification comparison.

Indeed SVMs are supervised learning algorithms based on statistical learning theory, and his aim for classification is to determine a hyperplane that optimally separates classes (Srivastava et al., 2012), (Gunn, 1998), (Zhang, 2012). They have often been found to provide better classification results than other widely used pattern recognition methods, such as the maximum likelihood and neural network classifiers (Melgani and Bruzzone, 2004), (Theodoridis and Koutroumbas, 2008), (Tzotsos and Argialas, 2008).

The step-by-step approach (methodology) taken to achieve the stated objectives of this project are the following (Figure 2).

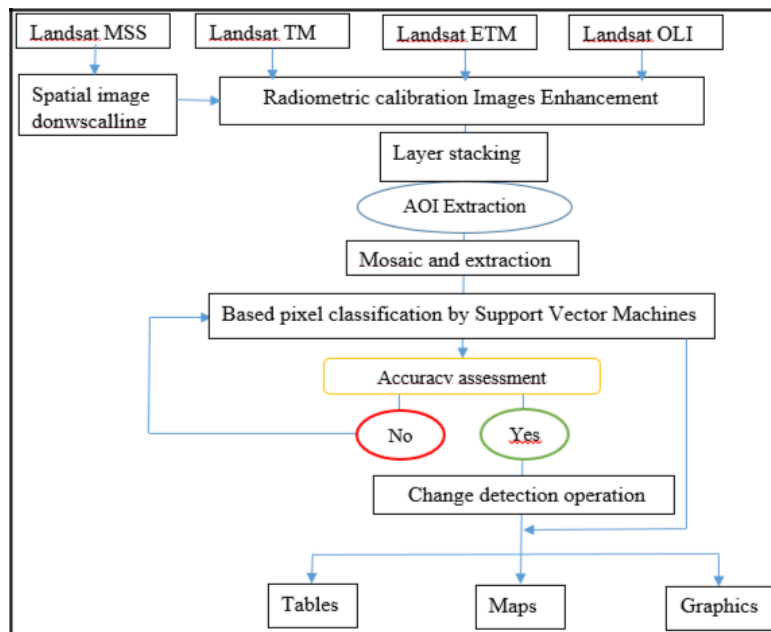


Figure 2: Flowchart of the methodology

3. Results

Land use/land cover mapping and distribution

The final classification maps provide an overview of the major land use/land cover features of Cameroonian shores of Lake Chad and its hinterland for the periods of March 1973, October 1975, March 1987, October 1987, April 2000, August 2000, April 2015 and September 2015. Three classes of land use/land cover were identified (open water; vegetation and marshland; and bare soils) and the Support Vector Machines classification were implemented for all of the concerned images. Figure 3 illustrate the land use/land cover maps of Cameroonian part of Lake Chad at the dry season (March 1973, march 1987, April 2000 and April 2015), and Figure 4 illustrates it at the wet season (October 1972, October 1987, August 2000 and September 2015).

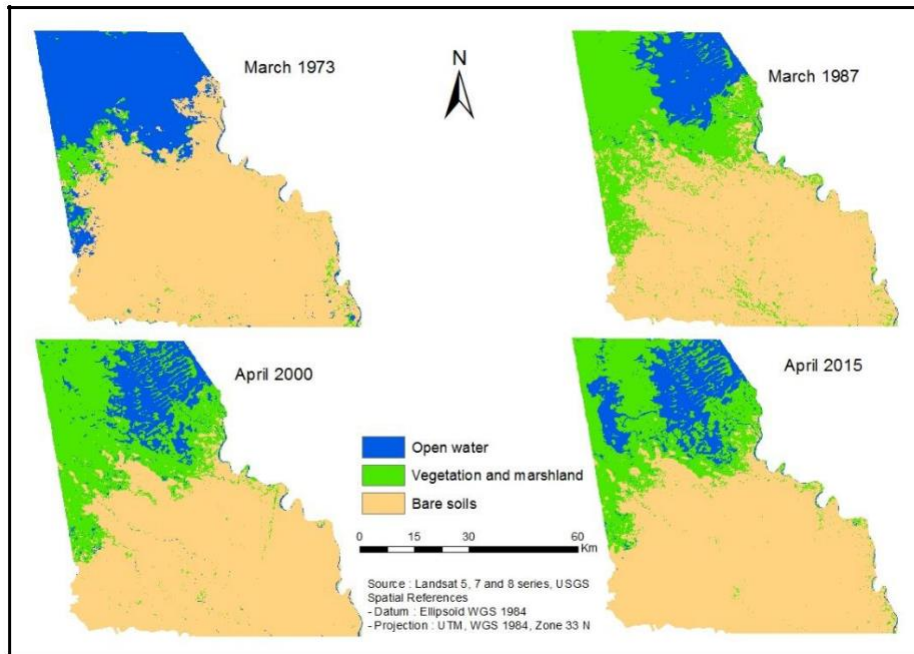


Figure 3: Dry seasons classification maps

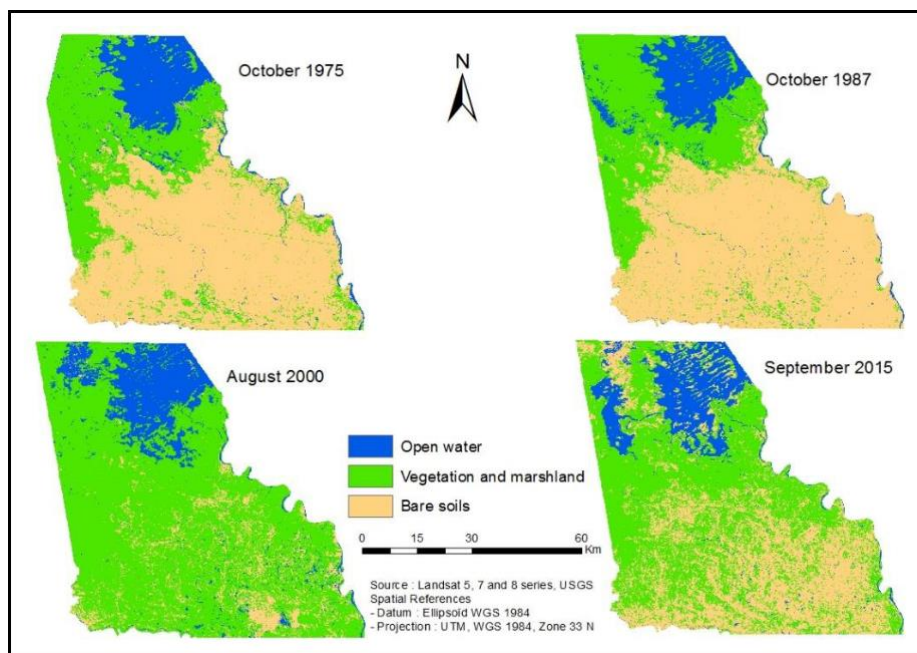


Figure 4: Rainy seasons classification maps

It appears in Table 2 the spatial extent of land cover in hectares and in percentages, for rainy and dry season. Open water has an average coverage between 49714,56 Ha (10.47%) to 69008,76 Ha (14.53%) except in march 1973 when this coverage increased to 134554,95 Ha (28.33%). Except in March 1973, vegetation, occupies more than one quarter of LULC during the rainy season and the dry season, with areas extent between 120519,6 Ha to 356612,3 Ha, which corresponds to percentages between 25.38% to 75.09%.

Bare soils largely dominate land use/land cover whatever the season except in August 2000 with 49281,03 Ha (10.38%) and September 2015 with 174969 Ha (36.84%). For the rest, the extent of this class is more than half of the study area with an occupation exceeding 56.85% (265929,03 Ha).

Table 2: Spatial extent of land cover

Land cover type	October 1975		October 1987		August 2000		September 2015	
	Area (Ha)	Area (%)	Area (Ha)	Area (%)	Area (Ha)	Area (%)	Area (Ha)	Area (%)
Open water	58665,78	12.54	53229,33	11.21	69008,76	14.53	59244,57	12.48
Vegetation and marshland	143162,37	30.61	145226,61	30.58	356612,3	75.09	240688,53	50.68
Bare soils	265929,03	56.85	276446,16	58.21	49281,03	10.38	174969	36.84

Land cover type	March 1973		March 1987		April 2000		April 2015	
	Area (Ha)	Area (%)	Area (Ha)	Area (%)	Area (Ha)	Area (%)	Area (Ha)	Area (%)
Open water	134554,95	28.33	49714,56	10.47	52513,29	11.06	60417	12.72
Vegetation and marshland	19456,02	4.10	133001,01	28.01	135817,6	28.60	120519,6	25.38
Bare soils	320891,13	67.57	292186,53	61.53	286571,3	60.34	293965,5	61.90

Land change mapping and evolution

- Land use/land cover change mapping

The following graph on Figure 5, represents the statistics of the inter-seasonal evolution of LULC. To realize this, two different seasonal images are combined. The images of dry season (March and April) and those from rainy season (August September and October). Consequently, for these three periods, the results enhance the changes from dry season to rainy season (Figure 6).

It is observed that there was a slight increase in size of open water and marshland area by 7% between March 1987 to October 1987 and 31.41% in year 2000. In 2015, the size of open water and marshland didn't change significantly but corresponds to a decrease of 1.94%. In terms of spatial extent, the variations of open water and marshland for these three periods correspond respectively to: an augmentation of 3514,77 Ha, an increase of 16495,47 Ha, and a decrease of 1172,43 Ha.

The size of vegetation area is logically increased from dry season to rainy season. In numerical terms this translate by an enhance of 9.19% in 1987, 162.56% and 99.7% respectively between, April 2000 to August 2000 and April 2000 to September 2015. In others words, the difference in spatial surface of vegetation between March and October 1987 represents an increase of 12225,6 Ha. This difference corresponds to a supplement of 220794,75 Ha from April to August 2000 and 120168,9 Ha from April to September 2015.

Concerning bare soils, they decrease from dry season to rainy season. Particularly in 2000 and 2015 where the reduction of their surfaces is more than 80% in 2000 and more than 40% in 2015. Concretely, for these three periods of time the surface of bare soils decreases by: 15740,37 Ha between March and October 1987; 237290,22 Ha between April and August 2000 and 118996,47 Ha from April to September 2015.

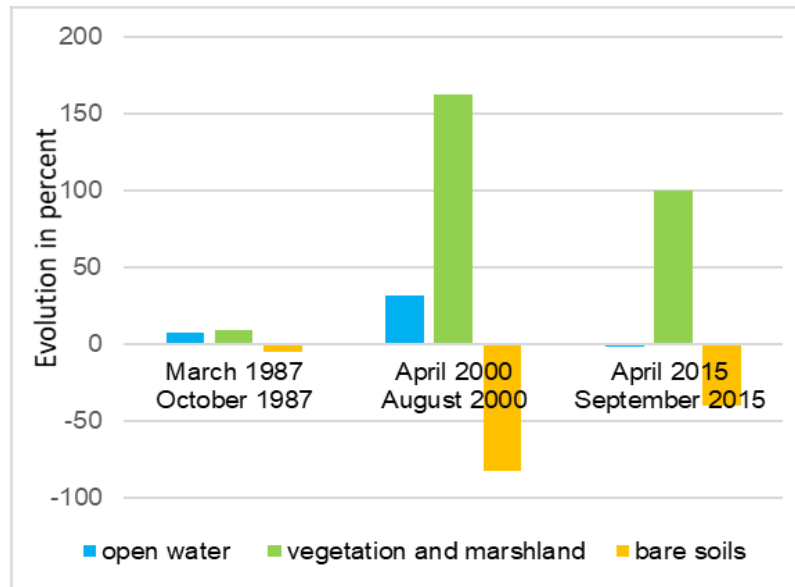


Figure 5: Graph of the inter-seasonal evolution of LULC

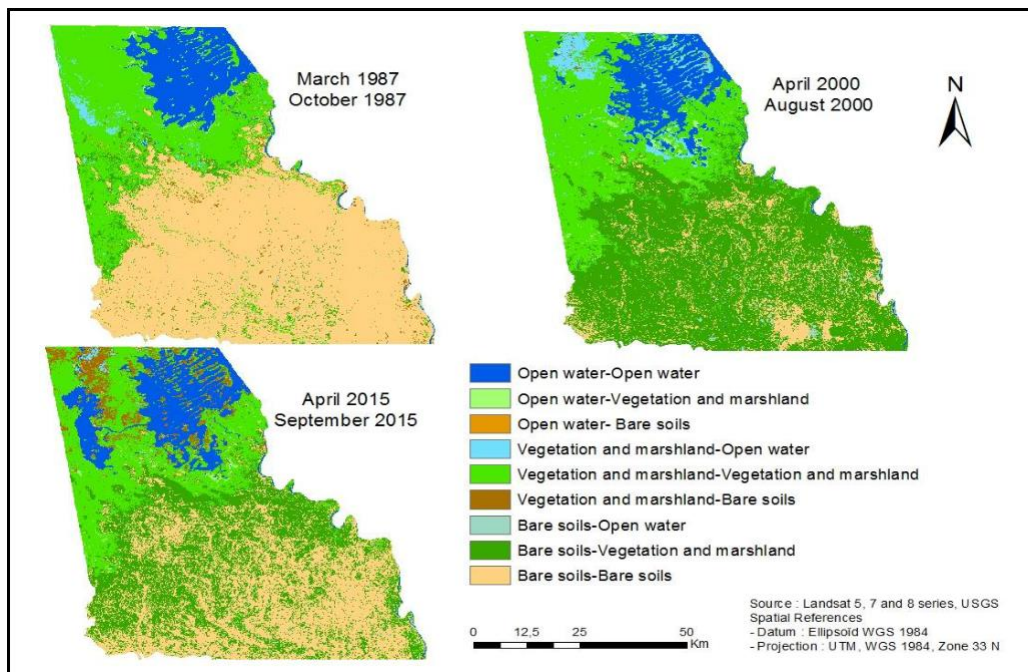


Figure 6: Map of the inter-seasonal evolution of LULC

- Land use/land cover change evolution between dry season

The area extent of the Land use/land cover change and its evolution between dries seasons is shown in the three periods (Figure 7). At the first period between March 1973 to March 1987, it was principally observed a large increase in size of vegetation area by 583.5% (113544,99 Ha), and a reduce of open water and marshland area by 63.05% (84840,39 Ha).

The two others periods (March 1987-April 2000; and April 2000-April 2015) are more stables, with changes of not more than 15% per classes. Thus, from March 1987 to April 2000 there are an increase of size of open water and marshland and vegetation area by 5.62% (2798,73 Ha) and 2.11% (2816,55 Ha) respectively, and a slight decrease of bare soils surface by 1.9% (5615,28 Ha). During the last interval from April 2000 to April 2015, there is a raise of open water and marshland area by

15.05% (7903,71 Ha), drop of vegetation area by 11.26% (15297,93 Ha) and low increase of bare soils surface by 2.58% (7394,22 Ha).

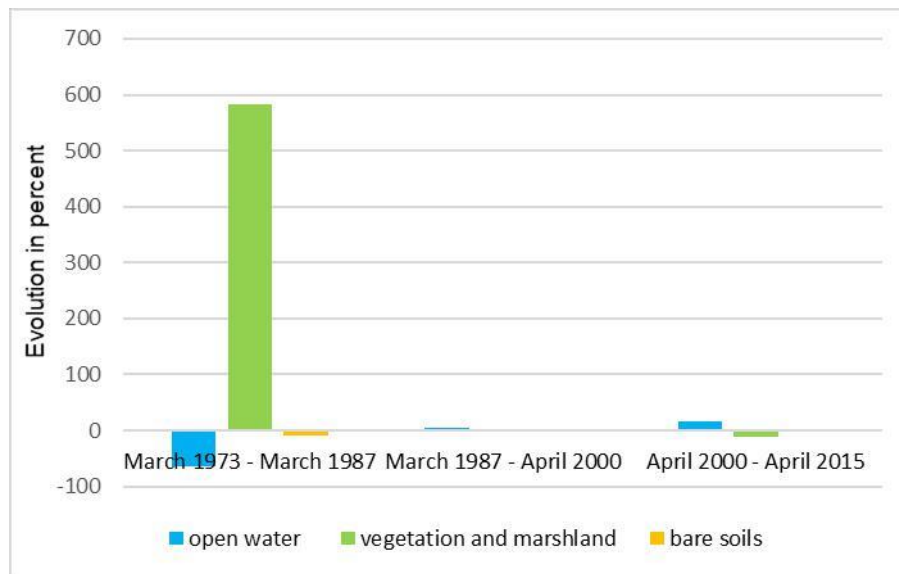


Figure 7: Graph of LULC change evolution between dry seasons

The maps of changes detections of the dries seasons can be seen in Figure 8 and values contained in Table 3 are used to illustrate these changes. At the interval corresponding from March 1973 to March 1987, the most important changes concern transformation of: open water and marshland to vegetation for 82007,28 Ha; bare soils to vegetation for 37488,51 Ha; vegetation to bare soils for 5833,62 Ha; and open water and marshland to bare soils for 3306,33 Ha. That is respectively a rate of change of 17.27%; 7.89%; 1.23% and 0.70%.

Table 3: Spatial extent of land cover change between dry season

Classes	March 1973		March 1987		April 2000		April 2015	
	Area (Ha)	Area (%)	Area (Ha)	Area (%)	Area (Ha)	Area (%)	Area (Ha)	Area (%)
Open water - Open water	49241,34	10.37	39936,87	8.41	42986,34	9.05		
Open water - Vegetation and marshland	82007,28	17.27	9689,31	2.04	8706,87	1.83		
Open water - Bare soils	3306,33	0.70	88,38	0.02	820,08	0.17		
Vegetation and marshland - Open water	117,18	0.02	11447,82	2.41	17290,89	3.64		
Vegetation and marshland -Vegetation and marshland	13505,22	2.84	108408,24	22.83	106337,7	22.39		
Vegetation and marshland -Bare soils	5833,62	1,23	13144,95	2,77	12188,97	2,57		
Bare soils-Open water	356,04	0,07	1128,6	0,24	139,77	0,03		
Bare soils-Vegetation and marshland	37488,51	7,89	17720,01	3,73	5475,06	1,15		
Bare soils-Bare soils	283046,58	59,60	273337,92	57,56	280956,42	59,16		

Then, between March 1987 to April 2000 (13 years), principals' modifications are transformation of bare soils to vegetation 17720,01 Ha (which represent 3.73%), transformation of vegetation to bare soils with 13144,95 Ha (2.77%), transformation of vegetation to open water and marshland with 11447,82 Ha (2.41%), transformation of open water and marshland to vegetation for 9689,31 Ha (2.04%).

Changes happen during April 2000 to April 2015 are principally transformation of vegetation to open water and marshland, transformation of vegetation to bare soils, transformation of open water and marshland to vegetation, and transformation of bare soils to vegetation. Then, these transformations correspond respectively at the rate of changes of 3.64% (17290,89 Ha), 2.57% (12188,97 Ha), 1.83% (8706,87 Ha) and 1.15% (5475,06).

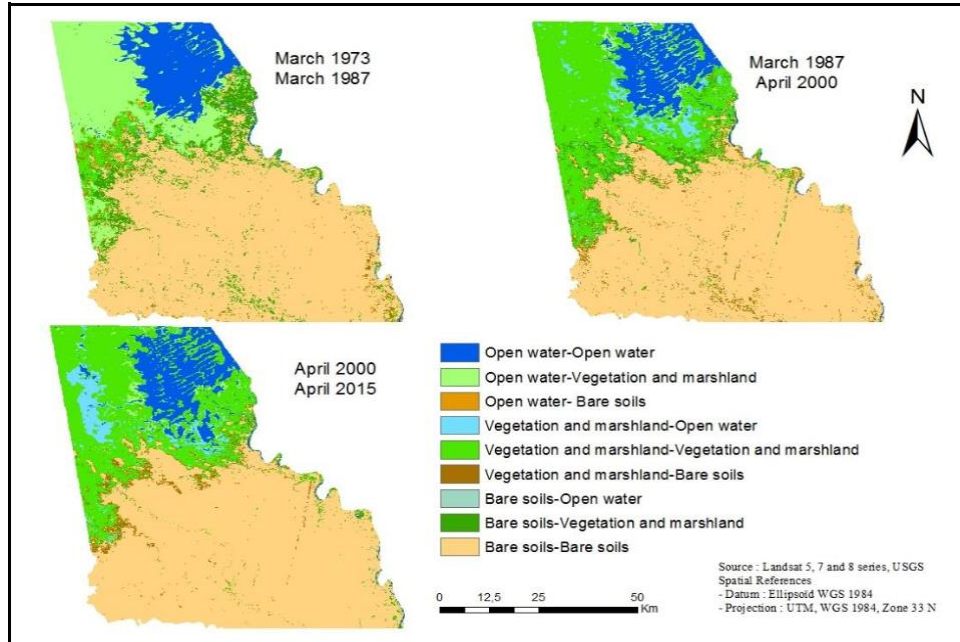


Figure 8: Map of LULC change evolution between dry seasons

- Land use/land cover change evolution between rainy season

The evolution trends of LULC surface area during rainy season in the study area during the three periods of observations shows what follows (Figure 9). The open water and marshland surface affected by changes is the least variable compared with the surface of other classes of occupation. So between October 1975 and October 1987 open water and marshland surface decrease by 5436,45 Ha, this surface increase by 15779,43 Ha between October 1987 to august 2000 and decrease again by 9764,19 Ha between August 2000 to September 2015. In terms of percentages this corresponds to a decrease of 9.02%, an increase of 29.64%, and a diminution of 14.14% of open water and marshland.

Concerning vegetation, the surfaces affected by changes have more varied proportions than those of open water and marshland. There was a slight increase of surface by 2064,24 Ha (1.4%) between October 1975 to October 1987, an enhanced of 211385,7 Ha (145.55%) between October 1987 to August 2000 and finally, a decrease of 115923,78 Ha (32.50%) during period from August 2000 to September 2015.

Unlike to the vegetation, the surface of bare soils concerned by changes increase over time. It can be observed that an augmentation of 10517,13 Ha (3.95%) at the first period, a decrease of 227165,13 Ha (82.17%) at the second period and an enhance of 125687,97 Ha (255.04%) at the third period.

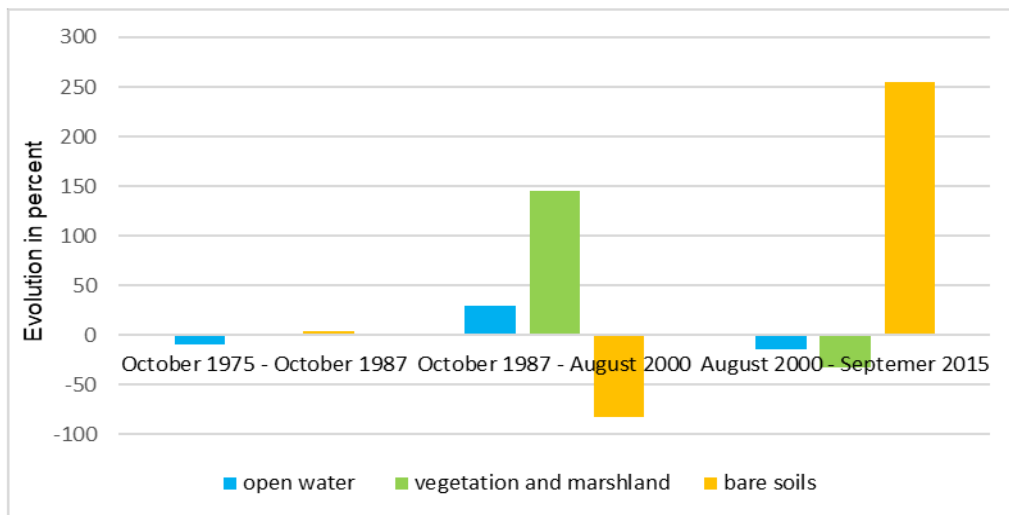


Figure 9: Graph of LULC change evolution between rainy seasons

Table 4: Spatial extent of land cover change between rainy season

Classes	October 1975 October 1987		October 1987 August 2000		August 2000 September 2015	
	Area (Ha)	Area (%)	Area (Ha)	Area (%)	Area (Ha)	Area (%)
Open water - Open water	46484,28	9.94	43649,82	9.19	44974,08	9.47
Open water - Vegetation and marshland	9552,06	2.04	9437,94	1.99	10843,02	2.28
Open water - Bare soils	2611,44	0.56	141,57	0.03	13191,66	2.78
Vegetation and marshland - Open water	5119,29	1.09	21462,66	4.52	13912,74	2.93
Vegetation and marshland - Vegetation and marshland	112921,2	24.15	121830,66	25.65	220133,34	46.35
Vegetation and marshland - Bare soils	25074,63	5.36	1933,29	0.41	122566,23	25.81
Bare soils - Open water	1233,72	0.26	3896,28	0.82	357,75	0.08
Bare soils - Vegetation and marshland	16125,75	3.45	225343,71	47.45	9712,17	2.05
Bare soils-Bare soils	248480,19	53.14	47206,17	9.94	39211,11	8.26

Figure 10 and Table 4 describe respectively the map evolutions of Land use/land cover change between rainy seasons and statistics of these changes. During the interval from October 1975 to October 1987, changes between the three LULC classes are slight compared with the two other intervals. This results into more or less balanced changes from one occupation class to another. The most important changes are transformation of 25074,63 Ha of vegetation to bare soils, transformation of 16125,75 Ha of bare soils to vegetation, transformation of 9552,06 Ha of open water and marshland to vegetation and transformation of 5119,29 Ha of vegetation to open water and marshland. In percent, these transformations correspond respectively to 5.36%, 3.45%, 2.04% and 1.09%.

At the second period (from October 1987 to August 2000), important changes concerning transformation of bare soils to vegetation with 225343,71 Ha (47.45%), transformation from vegetation to open water and marshland with 21462,66 Ha (4.52%), and transformation from open water and marshland to vegetation with 9437,94 Ha (1.99%).

The period during which the changes are most prominent is the third. Because record 122566,23 Ha of vegetation which become Bare soils, 13912,74 Ha of vegetation become open water and marshland,

13191,66 Ha of open water and marshland become bare soils, 10843,02 Ha of open water and marshland become vegetation and 9712,17 Ha of bare soils become vegetation. In rate of transformation, these changes correspond respectively to 25.81%, 2.93%, 2.78%, 2.28% and 2.05%.

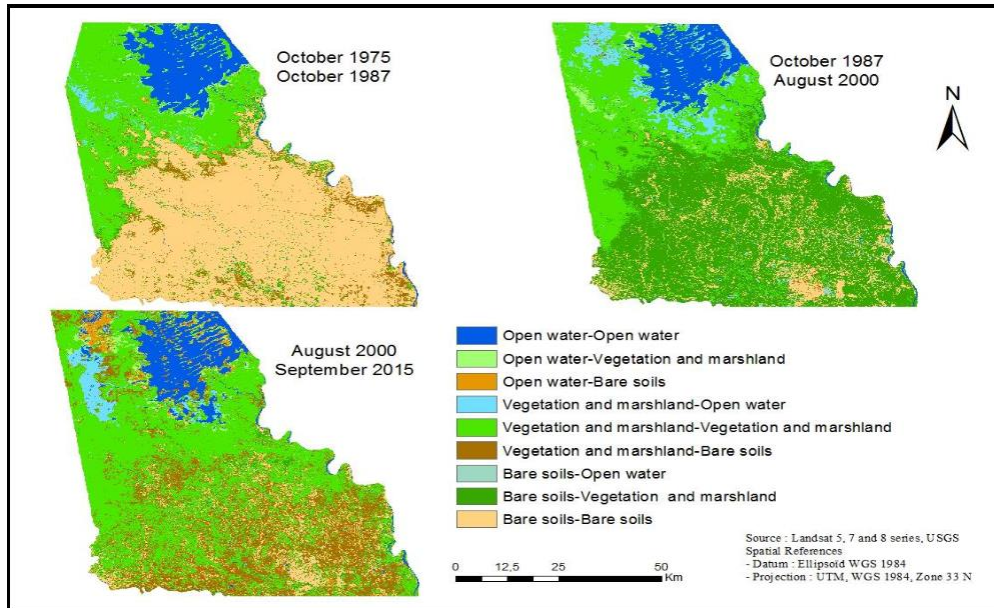


Figure 10: Map of LULC change evolution between rainy season

4. Discussion

The most important limitation of the study is the unavailability of some images for exact match. That is why for decade 1970 the images used are from two different years. It is also the reason why the inter-seasonal evolution of LULC was not performed in the same decade to avoid presenting inconsistent results. The two images used in this decade are separated by more than three years. The unavailability of images data also impedes to cover the whole area of study especially in October 1975.

Another consequent is the inaccuracy of some results concerning the occupation and the evolution in LULC changes. For instance, in 2000 and 2015 the changes are almost similar because the images used are from the same year and show the difference from dry season to rainy season. The same limitation concerns the months of images acquisition. In fact the environment of study area is very sensitive to climatic conditions. As results, from one month to the next, significant changes can occur in LULC. Consequently, the changes noted during these periods are not the same, and are then interpreted with much delicacy.

5. Conclusion

The application of remote sensing and Geographic Information System in land natural resources management through the identification, classification and interpretation of different land use/land cover classes has been largely demonstrated. Monitoring land use/land cover to detect development trends is, therefore, highly useful in this context and remote sensing technology have played an important role in this analysis. The aim of this paper was to assess inter-seasonal and diachronic LULC changes occurring on Cameroonian shores of lake and its hinterland Chad using remote sensing and GIS, through landsat images data. The land use /land cover changes were analyzed according to post-classification method such as classifications maps and change maps. Thus, the following conclusions are drawn:

The land use/land cover occupation in the study area is dominated by bare soils principally during the dry season and sometimes during the rainy season as is the case in October 1975 and October 1987. Vegetation covers the immediate shores of lake (wetlands) and also the bare soils until the south of study area during the rainy season. During the drought in the 1970s and 1980s (Ahidjo, 2010), (GIZ 2015), (CBLT 2015), (Bretaudeau, SARR, and Traoré 2011), climatic deficits have resulted in an intensification of aridity in the sahelian zone. Therefore, open water and marshland have been reduced and now more or less stable surfaces around 5000 Ha, both in rainfall and in dry season. Indeed, according to (Alfa, Adeofun, and Ologunorisa, 2010), between 1972 and 1987, the greatest reduction in the lake size (which corresponds to open water and marshland for this paper) occurred i.e. a drastic loss of about 15138 km². This coinciding with the drought periods 1972 to the 1980s in this region and indicated between the satellite images of October 1972 and October 1987 (Alfa, Adeofun, and Ologunorisa, 2010), (Ouedraogo et al., 2002), (Jacques Lemoalle, Bader, and Leblanc, 2008).

Changes in land use/land cover from one season to another do not manifested in the same way and are closely linked to climatic conditions and human exploitation of natural resource present. Thus, changes from rainy season are probably different to changes from dry season to rainy season. This paper is only studies changes from dry season to rainy season. It is logically notice in this interval, the increase of the vegetation surface to the detriment of bare soils, and the more or less slight increase of open water and marshland surface to the detriment of vegetation.

During diachronic changes, the proportions of open water and marshland that vary between two rainy seasons are larger than the ones that vary between two dry season. However, water areas vary little compared to variations in other occupation. This is due to the fact that the lake has entered its "Little Chad" phase since 1973 (NGATCHA and LEMOALLE 2014), (J. Lemoalle, Magrin, and Institut de recherche pour le développement (France) 2014). Vegetation is occupation class with greater variation compared with others classes. As for bare soils, they are more than more variant from one dry season to another, but can vary considerably in terms of area between two rainy season.

However, the study does not reveal other significant changes observed in the study area before and during the dry periods of the 1970s and 1980s. Indeed, in the April 1973 image, we have an overview of land cover in lake Chad before the drought of 1970s, and we can see a completely different land cover than in the others years. This occupation is due to the fact that this period is marked by the flood in the lake Chad (Durand, 1980), (Gao et al., 2011), (Jacques Lemoalle, Bader, and Leblanc, 2008) made possible by the fluvial inputs whose annual average flows were estimated at 537 m³/s during this period (Pouyaud and Colombani, 1989).

Nevertheless, the increase in vegetation areas, combined with the decrease in water surfaces and the bare soils area, observed in March 1987 can be explained by the level of the water in the lake. Indeed, according to (NGATCHA and LEMOALLE 2014), may 1985 corresponds to the minimum surface of the lake observed (17000 km²). Consequently, the reduction of water level allowed the germination of the seeds contained in the sediments.

Acknowledgement

The laboratory of UMR CNRS ESPACE 7300 contribute in this study by providing a technical and critical assistance in the main objective of improving the quality of work. The participation of others PhD candidate from the University of Mohammed V was also important thank to the sharing of experience from others different study.

Author Contribution

Paul Gerard Gbetkom is the main author who co-initiated the idea and wrote the manuscript. Sébastien Gadal and Ahmed El Aboudi co-initiated the idea, gave orientation, provided review,

advises and comments. Alfred Homère Ngandam Mfondoum provided review, comments and technical assistance.

References

Ahidjo, P. 2010. Lake Tchad: stakes of sub-regional cooperation. *The yearbook of the "Gh. Zane". Institute of economic researches*, pp.69-78.

Alfa, N., Co, A. and Et, O. 2008. Assessment of changes in aerial extent of lake chad using satellite remote sensing data. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 12(1), pp.101-107.

Billingsley, F.C. 1984. Remote sensing for monitoring vegetation: an emphasis on satellites. *The Role of Terrestrial Vegetation in the Global Carbon Cycle: Measurement by Remote Sensing*. SCOPE. John Wiley & Sons Ltd., pp.161-180.

Bretraudeau, A., Benoît, S. and Seydou, T. 2011. Évaluation Du Changement Climatique En Afrique de l'Ouest. Available from: <http://www.agrhymet.ne/portailCC/images/pdf/cc-cilss.pdf>

CBLT. 2015. Plan de Développement et d'adaptation Au Changement Climatique Du Lac Tchad. Commission du Bassin du Lac Tchad (CBLT) Cameroun, Libye, Niger, Nigeria, République Centrafricaine, Tchad.

Chander, G., Markham, B.L. and Helder, D.L. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), pp.893-903.

Chavez, Jr, P. 1996. Image-based atmospheric corrections - revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), pp.1025-1036.

Chen, J., Peng, G. and Peijun, S. 2003. Land-use/land-cover change detection using improved change-vector analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(4), pp.369-379.

Jean-René, D. 1980. Evolution Des Captures Totales (1962-1977) et Devenir Des Pecheries de La Region Du Lac Tchad. *Cahiers ORSTOM Series Hydrobiologie*, 13(1-2), pp.93-111.

Gao, H., McDonald, K.C. and Lettenmaier, D.P. 2011. On the causes of the shrinking of lake chad. *Environmental Research Letters*, 6(3), pp.1-7.

Geerken, R., Sara, V. and Mohamed, B. 2010. Impacts of climate variability and population pressure on water resources in the lake chad basin. *The Global Dimensions of Change in River Basins*. Conference of the Global Catchment Initiative (GCI), pp.27-33.

GIZ. 2015. 25 Ans de Réhabilitation et de Conservation Des Sols Au Sahel. Soutien Aux Efforts Des Populations Rurales Du Niger.

Gunn, S.R. 1998. Support vector machines for classification and regression. *ISIS Technical Report*, 14, pp.5-16.

Lemoalle, J., Géraud, M. and Institut de recherche pour le développement (France), eds. 2014. *Le développement du lac Tchad: situation actuelle et futurs possibles*. Expertise collégiale. Marseille: IRD éditions, Institut de recherche pour le développement.

Lemoalle, J. 2014. I-1. Le Fonctionnement Hydrologique Du Lac Tchad.

Lemoalle, J., Jean-Claude B. and Marc, L. 2008. The variability of lake chad: hydrological modelling and ecosystem services. In *Proceedings of the 13th World Water Congress, Global Changes and Water Resources*, 1-15. International Water Resources Association.

Magrin, G. 2015. Atlas du lac Tchad. Edited by Magrin, G. Jacques, L. and Pourtier, R. *Passages* numero spécial 183. Martin, Dominique. 1962. Etude Pédologique Des Rives Camerounaises Du Lac Tchad, p.15.

Melgani, F., and L. Bruzzone. 2004. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(8), pp.1778-1790.

Mobaied, S., Bernard, R., Arnault, L., Michel, B. and Nathalie, M. 2011. The use of diachronic spatial approaches and predictive modelling to study the vegetation dynamics of a managed heathland. *Biodiversity and Conservation*, 20(1), pp.73-88.

Muzein, B.S. 2006. Remote sensing & GIS for land cover/ land use change detection and analysis in the semi-natural ecosystems and agriculture La. PhD Thesis, Technische Universität Dresden Fakultät Forst- Geo- und Hydrowissenschaften.

Ngounou, N.B. and Lemoalle, J. 2014. I-4. Variabilité Des Paysages et de La Biodiversité Du Petit Lac Tchad.

Okonkwo, C., Belay, D. and Sium, G. 2014. Characteristics of lake chad level variability and links to enso, precipitation, and river discharge. *The Scientific World Journal*, pp.1-13.

Olivry, J.C. 1996. *Hydrologie Du Lac Tchad*. Monographie Hydrologique, no 12. Editions de l'ORSTOM, Paris.

Olokeogun, O.S., Iyiola, K. and Iyiola, O.F. 2014. Application of remote sensing and gis in land use/land cover mapping and change detection in Shasha forest reserve, Nigeria. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XL-8, pp.613-616.

Ouedraogo, M. and Eric, S. 2002. Conséquences de La Sécheresse Observée Depuis Le Début Des Années 1970 En Afrique de l'Ouest et Centrale: Normes Météorologiques et Hydrologiques, p.8.

Pouyaud, B. and Colombani, J. 1989. Les variations extrêmes au lac Tchad: l'assèchement est-il possible ?' *Annales de Géographie*, 98(545), pp.1-23.

Rangé, C. 2016. Multi-Usage Des Ressources et Mobilités: L'intensification Dans Une Zone Humide Sahélienne. Le Lac Tchad vu Par Sa Fenêtre Camerounaise. PhD Thesis, AgroParisTech.

Reis, S. 2008. Analyzing land use/land cover changes using remote sensing and GIS in Rize, North-East Turkey. *Sensors*, 8(10), 6188-6202.

Rim, Z. 2008. Etude Géochimique et Hydrodynamique de La Nappe Libre Du Bassin Du Lac Tchad Dans Les Régions de Diffa (Niger Oriental) et Du Bornou (Nord-Est Du Nigeria). PhD Thesis, Université de Montpellier II.

Salvati, L. and Tombolini, I. 2014. A Diachronic Classification of Peri-Urban Forest Land Based on Vulnerability to Desertification'. *International Journal of Environmental Research*, 8(2), pp.279-284.

Seignobos, C. and Iyébi-Mandjek, O. 2000. Atlas de La Province Extrême-Nord Cameroun'. Paris : Yaoundé: Institut de recherche pour le développement; République de Cameroun, Ministère de la recherche scientifique et technique, Institut national de cartographie.

Srivastava, P.K., Dawei, H. and Rico-Ramirez, M.A. 2012. Selection of classification techniques for land use/land cover change investigation. *Advances in Space Research*, 50(9), 1250-1265.

Szuster, B.W., Qi, C. and Michael, B. 2011. A comparison of classification techniques to support land cover and land use analysis in tropical coastal zones. *Applied Geography*, 31(2), pp.525-532.

Theodoridis, S. and Konstantinos, K. 2008. Pattern recognition (Theodoridis, S. and Koutroumbas, K. 2006). *Neural Networks, IEEE Transactions*, pp.376-376.

Tilho, J. 1928. Variations et disparition possible du Tchad. *Annales de Géographie*, 37(207), pp.238-260.

Tzotsos, A. and Demetre, A. 2008. Support vector machine classification for object-based image analysis. *Object-Based Image Analysis*, pp.663-677.

Vitousek, P.M. 1992. Global environmental change: an introduction. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 23(1), pp.1-14.

Zhang, Y. 2012. Support vector machine classification algorithm and its application. *International Conference on Information Computing and Applications*, pp.179-186.

Mapping of Built up Areas in the Cameroonians Shores of Lake Chad and its Hinterland through based Object Classification of Sentinel 2 Data

Paul Gérard Gbetkom, Aix-Marseille Univ, CNRS, ESPACE UMR 7300, Univ Nice Sophia Antipolis, Avignon Univ, Aix-en-Provence, France.*

Laboratory of Botanic, Mycology and Environment, University Mohammed V Rabat, 4 Avenue IBN Battouta Rabat Morocco. E-mail: paul-gerard.gbetkom@etu.univ-amu.fr

Sébastien Gadal, Aix-Marseille Univ, CNRS, ESPACE UMR, Univ Nice Sophia Antipolis, Avignon Univ, Aix-en-Provence, France. E-mail: sebastien.gadal@univ-amu.fr

Ahmed El Aboudi, Laboratory of Botanic, Mycology and Environment, University Mohammed V Rabat, 4 Avenue IBN Battouta Rabat Morocco. E-mail: elaboudi@gmail.com

Alfred Homère Ngandam Mfondoum, Stats N'Maps, Private Consulting Firm, Audelia Road, Suite, Dallas. E-mail: ngandamh@yahoo.com

Mamane Barkawi Mansour Badamassi, Laboratory of Botanic, Mycology and Environment, University Mohammed V Rabat, 4 Avenue IBN Battouta Rabat Morocco.

Abstract--- The objective of the paper is to carry out the spatial distribution of the built-up areas in the Cameroonian shores of the Lake Chad and its hinterland through orientated-object classification. The methods used combines spectral and statistical processing's. For the Principal Component Analysis (PCA) performed, the first component contains 87% of information. The built up areas indices have also computed, like Urban Index (UI) and Normalized Difference Built-up Index (NDBI) based on sentinel 2 satellite images of April 2017. The components 3 and 6 of PCA and the built up indices are stacked with originals spectral bands to generate a new composite image. This new image is then segmented and classified by Support Vector Machines (SVMs) algorithm, submitted to a threshold analysis. The result is a classified image on which the identification of built-up areas from the others spatial objects is possible and the spatial distribution of built-up areas is countable.

Keywords--- Built-up Areas, Support Vector Machines, Cameroon, Lake Chad.

I. Context

The lake Chad with its associated ecosystems constitute one of the few sahelian rural regions to have a positive migratory balance during the last decades (Lemoalle et al 2014) . Compared with surrounding arid spaces, the demographic densities of this area are relatively high and amount approximately to 50 people/km² (CBLT 2014, Pesche et al. 2016, Rangé 2016). On the Cameroonian side of this space, the population's growing is very fast, and for the Logone and Chari administrative divisions mainly concerned here, the increase was almost doubling from 276 170 to 486 997 inhabitants between 1987 and 2005 (BUCREP 1992, 2010). As the urban areas grow, there is a growing need about the control of natural resources exploitation. Then, the rurals settlements already dominant here, are increase. Main of the built-up are patchwork of huts made with ground, and covered by the stalk of millet or gramineous grasses.

Because of the spatial resolution of the satellites images available, the types of materials used for the construction and the size of cities, it is then complex or unpredictable to highlight the built up distribution of the previous years. These limits therefore reduce the possibility of making a retrospective analysis of the evolution of the built up areas in this place. However, a recent mapping of the built-up in the study area made by Rangé (2016) gives a distribution of villages in the internal shores and part of the external shores of the lake but do not provide information on the areas occupied by them. Therefore, it becomes important to focus on the quantification of the spatial distribution of the built-up area, in order to better take into account its impact on the physical and biological processes on the environment.

The increase planned of the population in this region will accentuate the expansion of the built-up task and increase human pressures on the exploitation of natural resources (Malik, 2014). The insecurity crisis in the lake region and its hinterland has caused a migration of population to more stable and productive areas, such a way that it is now important to update the spatial distribution data of the built up in this area. Therefore, this article aim to bring out the built-up along the Cameroonian part of the Lake Chad its shores and its hinterland, through an up- to-date map of its built-up, highlighting the morphology and the structure of buildings in the main cities. The term city is used to name the head of the sub-division (administrative division) the other built up areas are designated by the term village.

II. The Applied Methodology

2.1 The Experimental Site

The experimental site of this study is situated in the Far north region of Cameroon. The north and east borders are shared with the Republic of Chad, the west borders are shared with the Federal Republic of Nigeria and the south with the rest of the country. It is located between 12° to 13° of North latitude and 14° to 15° of East longitude and covers six main localities. The climate is dry tropical. From June to October there are three, four or five months of rainy season, followed by a long dry season, from October or November to May (RIM 2008). The thermal amplitude is around 7.7°C, the annual total rainfall is about around 400mm, and the mean monthly temperature is 28°C (Seignobos and Iyébi- Mandjek 2000). The population is composed of many ethnic groups among which Mousgoum, Kotoko, Arab Showa, Kanuri, Haussa and Mada are numerically dominant.

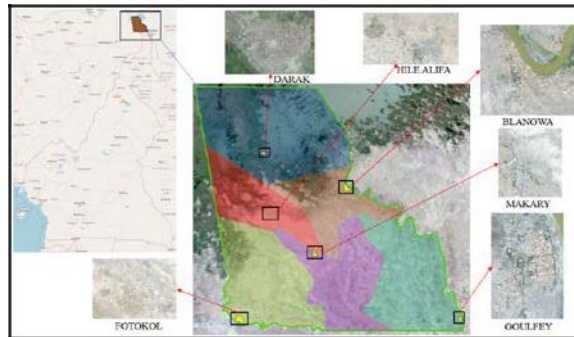


Figure 1: The Experimental Site with Principal Localities Framed in Black

2.2 Data, Tools and Methods

For this study, we have used two Sentinel 2 satellite images both acquired the 29 April, 2017. They are the property of the European Space Agency (ESA) and have been uploaded to the ESA website <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>. Sentinel 2 images have 13 spectral bands at 10, 20 and 60 meters of spatial resolution. In this study, only the four spectral bands at 10 meters added to the eleventh band and the twelfth band at 20 meters are used.

Table 1: Characteristics of the Sentinel 2 Scenes Used

Pixel Size	Band	Name	Wavelength
10 meters	Band 02	Blue	490 μm
	Band 03	Green	560 μm
	Band 04	Red	665 μm
	Band 08	Nir	842 μm
20 meters	Band 05	Red Edge 1	705 μm
	Band 06	Red Edge 2	740 μm
	Band 07	Red Edge 3	783 μm
	Band 08A	Red Edge 4	865 μm
	Band 11	SWIR 1	1610 μm
	Band 12	SWIR2	2190 μm
60 meters	Band 01	Aerossol	443 μm
	Band 09	Water Vapor	940 μm
	Band 10	Cirrus	1375 μm

The first step has been the atmospheric calibration of satellite images by using the sen2core processor (Müller-Wilm et al., 2013). Then, the spectral bands at 20m are pan-sharpened to those at 10m to improve and homogenize their spatial resolutions. Further came the classification known as the grouping of the spectrally similar pixels, with a focus on characterizing built-up areas. The four main classes of occupation defined for this study are water, vegetation, bare soil, and built up areas. The water class includes the permanent open water of the lake as well as the rivers that cross the study area and which serve for some, of the borders with the Republic of Chad. In the vegetation class, are grouped marshlands or aquatic grasslands which are located for the most part in the immediate borders of the permanent waters. This class also includes all other forms of vegetation type including forests, savannahs and steppes. Bare soils refers to areas with no vegetation cover at this time of the year (dry season). Some of these bare soils are serve for agriculture and pastoralism activities. The spatial distribution of the built-up areas in this space is constituted of several different types of housing including principally houses built with local materials (like ground, stalk of millet or gramineous grasses).

This increase the difficulty to differentiate at this spatial resolution, the built up areas with the others class of occupation like vegetation or bare soils. To highlight the difference between the three others classes of occupation and the built-up areas, we compute the Normalized Difference Built-up Index (NDBI) and the Urban index (UI). We also compute a Principal Component Analysis. Then we stack NDBI an UI image with component 3 and 6 of PCA and merged them with the originals bands. Segmentation is applied to this new image using the spectral, spatial and textural attributes, to subdivide the image into objects or regions necessary for classification (Patil and Shaikh 2016).

Then, the resulting image is classified using the Super Vector Machine’s algorithms which is a based on statistical learning theory. The aim of tis supervised classification is to separate classes of occupation through a hyperplane that optimally classes them (Gunn 1998), (Zhang 2012), (Srivastava et al. 2012). It have often been found that this classification algorithm provide better results than other widely used supervised classification, such as the maximum likelihood and neural network classifiers (Melgani and Bruzzone 2004), (Theodoridis & Koutroumbas 2008; Tzotsos & Argialas 2008). The validation of the classification is performed by using the current method of the confusion matrix which calculates the overall accuracy and the kappa coefficient. Ground truth data used to assess the quality of classification was extract from google earth images. The classification obtained for this study gives an overall accuracy of 94,77% and a kappa coefficient of 60,33%. The last step has been the comparison between main cities and some rural areas to describe the spatial distribution of the built up areas.

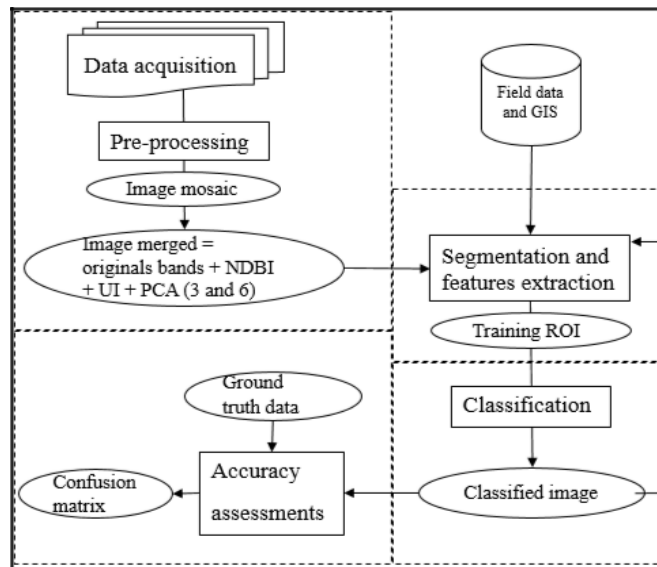


Figure 2: The Flowchart of the Methodology

III. Results

3.1 Classification

The first map shows the land cover in April 2017, by the four classes water, vegetation, bare soils, and built up areas. (Figure 3). The class constituted by the built-up areas contains all the types of housing identifiable at the

satellite image spatial resolution. Indeed in this space, house are built with several different types of materials (aluminium roof, ground, stalk of millet or gramineous grasses) which are not easy to differentiate at the spatial resolution of images used.

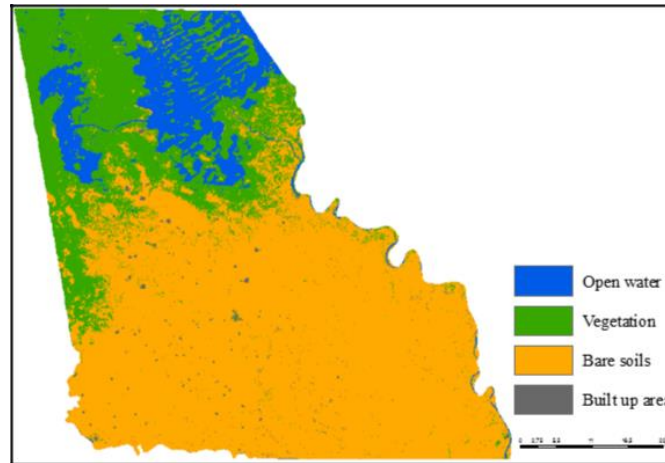


Figure 3: Land Cover Map

At this time of the year (dry season), the land cover is dominated by the soil class which occupies 311195.61 hectares corresponding to 65.53% of the total extent of the experimental site. Water have a total extent of 52.627.81 hectares, equivalent to 11.08% and vegetation have a surface of 108,349.09 hectares (22.81%). Concerning the built-up area the total area is 2669.76 hectares, and this correspond to 0.56% of the total area. Considering their low spatial cover (0.56%), built-up areas do not appear clearly on the classification map; hence the need to focus more on the main cities in the study area for better comparison of the morphology and the structuration of the building.

3.2 Built-up Area Extraction

The morphological and socio-economic features serve to extract the built-up areas. Morphological indicators include the extension of the building, the morphology of the parcel (or neighbourhoods), the quantity and quality of the building, and the organization and structuring of the building. To these indicators is added another socio-economic indicator that is the presence and distribution of green spaces. The spatial extent of built-up areas in the principal's localities are distributed as follows: Fotokol (a) 942350,42 m², Makari (b) 673418,24 m², Blangwa (c) 663516 m², Darak (d) 474245,82 m², Goulfey (e) 251491,68 m², Hile Alifa (f) 143137,32 m². The city of Fotokol is the largest in terms of space, which is partly explained by the importance of economic activities in this city. Indeed, in addition to being located on the border between Cameroon and Nigeria, Fotokol is the only one of these six city (figure 4) to be located on the axis connecting the two largest cities in the region Maiduguri (Nigeria) and N'Djamena (Tchad). It plays an important role in trade between Nigeria, Cameroon and Chad, and therefore between West Africa (Nigeria) and Central Africa (Cameroon and Chad).

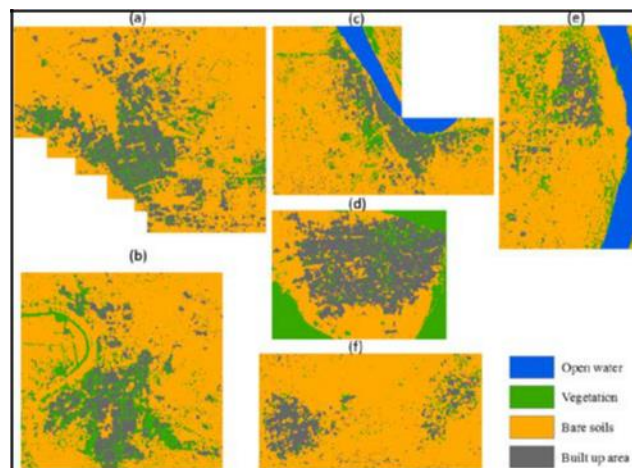


Figure 4: Built up Area in the Principals' Localities

Cities such as Blangwa, Fotokol and Makary are organised along the river (figure 4). This distribution becomes sparse when one moves away from the river towards the internal spaces. However, the city of Goulfey, located on the border of Chari River does not obey to this type of buildings distribution. The cities of Darak and Hile Alifa come in a more or less circular form, as is the case for some other villages, mainly in the internal and external shores.

3.3 Spatial Distribution and Morphology of Built-up Area

The morphological and structural analysis is usually made through architecture, shape, area and spatial relationship. The last criteria will be more detailed in the in this work by studying in particular the neighbourhood, the road network, the building and the green spaces. In other words, the comparison of built up area will focus on: the organization of the neighbourhood, the extension of cities and villages, the quantity of building, the form of the urban task, and the distribution of green spaces.

a. At the Internal Shores

Internal shores form a band situated on the immediate shores of open waters and / or near to the permanent marshland (Lemoalle et al, 2014, Magrin et al, 2015). For the most part, they are fishing villages whose population growth for the most part depends on seasonal migrations of fishermen and some farmers (Rangé 2016). The built up area in this part of the study area is constituted by small and sometimes compact villages, which could make it easy to identify the contours of inhabited areas.

However, as houses are built with locals materials, it is almost impossible to delineate habitations in some places, especially in marshland and fishing camps. Moreover, because of the compaction of the building and the images spatial resolution, it is not possible to highlight the organization of the built up area and roads network inside the villages. These villages are in a more or less circular form and are mostly delimited by green spaces. Inside the villages, green spaces consist of trees planted and scattered throughout the village.

In Kofya, the area of built-up (127187, 92 m²) and the compactness of the built-up area are less important compared to Darak (474245,82 m²). On the east side of Darak, the limits of inhabited areas are closed to vegetation. So the extension of the city continuous towards the south, the west and the north part of the city. Because here the built-up area is more scattered and there are still open spaces without occupation (figure 5). Concerning Kofya, the built-up area progress to the bare soil situated in the north and the south of the city (figure 5).

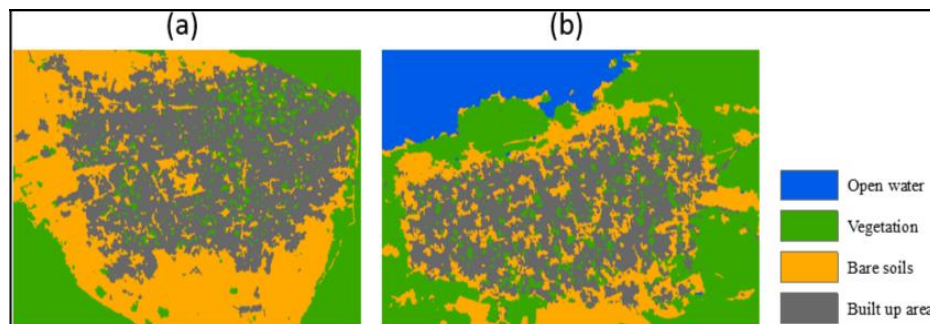


Figure 5: The Spatial Distribution of the Built-up Area at the Internal Shores (a) Darak (b) Kofya

3. In the Hinterland

The hinterland represents all the space dominated by bare soil (fig.) and it is located beyond the external shores. These are less landlocked areas than the internal shores and provide favourable conditions for livestock farming and commercial activities. The built-up area in this zone also consists of villages of varying sizes, compact for some but scattered for others and which are mostly easy to delineate because surrounded by bare soil. In this part, the habitat in modern materials is more identifiable on the satellite images. Nevertheless, the presence of constructions in gramineous grasses also makes it difficult to map built-up area.

The morphology of the city of Makari follows the shape of the river (dry in the dry season) which is located on its western periphery and becomes more dispersed in the east unlike Mada, which has a less homogeneous morphology and less compact. The spatial extent of the built-up area is more important in Makari (673418.24 m²) than Mada where built up correspond to 322458.21 m². In the two localities, the road network is also difficult to identify. But the different lines drawn by the trees in the classified images can allow to stand out the road network particularly in the city of Makari (figure 6). The neighbourhood organization also appears more structured in city of

Makari because of the trees planted in particular at the central part of the city. The sprawl of built-up at Makari and Mada is growing through the unoccupied open spaces (bare soil) situated at the peripheries of the two cities.

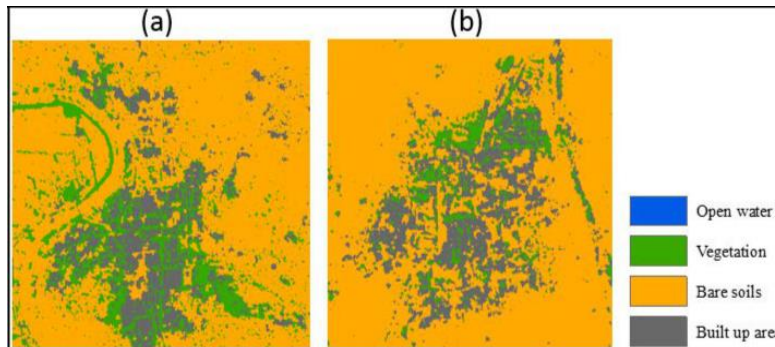


Figure 6: The Spatial Distribution of the Built-up Area in the Hinterland (a) Makari (b) Mada

IV. Conclusion

The calculation of indices and neo-bands like NDBI, UI and PCA, and the using of methods as Segmentation and classification, through the spectral, spatial and textural attributes of images have been helpful to skirt the problem link to spatial resolution of Sentinel 2 and the built-up material. The classification of satellites images allow us to see the low spatial extern of built-up area distribution throughout the experimental area (only 0, 56%), the difference in the size of principals localities and rural areas, and the differences in distribution, spatial organization or morphology of the built up area in the different types of shores according to their proximity to the lake.

However, the kappa coefficient of 60, 33%, obtained for the classification of the image, reflects difficulties to obtain an exact distribution of occupation classes. This difficulty is due to the fact that at this spatial resolution, despite the exhaustive use of spectral, spatial and textural attributes, to classify the image, the results are very variable from one occupation class to another. The illustration of this variability in the results is observed by the values of omission rate obtained (in percentage): water 0, 63; vegetation 2, 3; bare floors 5, 4; battens 1, 82. The other difficulty is the inability to distinguish habitat types (modern or traditional) at this spatial resolution. Indeed, the entities that constituted the built up area in this region correspond to a very variety of elements. The hinterland localities, such as Fotokol, Makari or Mada, have a greater variety in terms of building materials, dimensions and building arrangement than the localities in the internal shores. It should also be noted that in the internal shores area, some of the fishing camps located by (Rangé 2016), appear in the vegetation class (which includes all vegetated areas and marshland). Moreover, the classification obtained does not make it possible to delimit and distinguish the shores typology, which is nevertheless important for the characterization of built up area in this region. This emphasize the need of pan -sharpening the Sentinel 2 image with a more higher resolution like spot images at 1, 5 meters, in order to improve the results.

Finally, as ground truth data used to assess the quality of classification was extract from google earth images, it is necessary to collect ground control point of critical places, difficult to identify in the field. In order to follow the evolution of spatial distribution of built up areas and to improve the quality of cartographic results.

Bibliography

- Bucrep, (1992). ‘Deuxième Recensement Général de la Population et de l’Habitat du Cameroun, Vol 2 Tome 2, 221p
- ———, (2010). ‘Rapport de Présentation des résultats définitifs du troisième Recensement Général de la Population et de l’Habitat du Cameroun, 67p.
- CBLT. 2014. ‘Terrorisme Et Contre-Terrorisme EN Afrique Centrale: Quelle Vision Stratégique Pour Le Tchad Et Le Cameroun ?’ 18p.
- Congalton, Russell G. 1991. ‘A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data’. *Remote Sensing of Environment* 37 (1): 35–46.
- Foody, Giles M. 2004. ‘Thematic Map Comparison: Evaluating the Statistical Significance of Differences in Classification Accuracy’. *Photogrammetric Engineering*, 7.
- Gunn, Steve R. 1998. ‘Support Vector Machines for Classification and Regression’. *ISIS Technical Report* 14 (1): 5–16.

- Lemoalle, J., Géraud Magrin, and Institut de recherche pour le développement (France), eds. 2014. Le développement du lac Tchad: situation actuelle et futurs possibles. Expertise collégiale. *Marseille: IRD éditions, Institut de recherche pour le développement*.
- Magrin, G. 2015. 'Atlas du lac Tchad'. Edited by G. Magrin, Jacques Lemoalle, and R. Pourtier. *Passages numero spécial* 183.
- Malik, Khalid, and United Nations Development Programme. 2014. Pérenniser le progrès humain: réduire les vulnérabilités et renforcer la résilience. New York: PNUD.
- Melgani, F., and L. Bruzzone. 2004. 'Classification of Hyperspectral Remote Sensing Images with Support Vector Machines'. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42 (8): 1778–90.
- Müller-Wilm, Uwe, Jerome Louis, Rudolf Richter, Ferran Gascon, and Marc Niezette. 2013. 'Sentinel-2 Level-2A Prototype Processor: Architecture, Algorithms and First Results'.
- Okonkwo, Churchill, Belay Demoz, and Sium Gebremariam. 2014. 'Characteristics of Lake Chad Level Variability and Links to ENSO, Precipitation, and River Discharge'. *The Scientific World Journal* 2014: 1– 13.
- Patil, AB, and JA Shaikh. 2016. 'Segmentation and Feature Extraction of Flowers Intended for Image Retrieval: A Survey' 5 (1): 4.
- Pesche, Denis, Bruno Losch, Jacques Imbernon, NEPAD Rural Futures Programme, and CIRAD (Organization). 2016. 'Une nouvelle ruralité émergente: regards croisés sur les transformations rurales africaines'.
- Rangé, Charline. 2016. 'Multi-Usage Des Ressources et Mobilités: L'intensification Dans Une Zone Humide Sahélienne. Le Lac Tchad vu Par Sa Fenêtre Camerounaise'. PhD Thesis, AgroParisTech.
- RIM, ZAIRI. 2008. 'Etude Géochimique et Hydrodynamique de La Nappe Libre Du Bassin Du Lac Tchad Dans Les Régions de Diffa (Niger Oriental) et Du Bornou (Nord-Est Du Nigeria)'. PhD Thesis, Université de Montpellier II.
- Seignobos, Christian, and Olivier Iyébi-Mandjek. 2000. 'Atlas de La Province Extrême-Nord Cameroun'. Paris : Yaoundé: Institut de recherche pour le développement ; République de Cameroun, Ministère de la recherche scientifique et technique, Institut national de cartographie.
- Smits, P. C., S. G. Dellepiane, and R. A. Schowengerdt. 1999. 'Quality Assessment of Image Classification Algorithms for Land-Cover Mapping: A Review and a Proposal for a Cost-Based Approach'. *International Journal of Remote Sensing* 20 (8): 1461–86.
- Srivastava, Prashant K., Dawei Han, Miguel A. Rico-Ramirez, Michaela Bray, and Tanvir Islam. 2012. 'Selection of Classification Techniques for Land Use/Land Cover Change Investigation'. *Advances in Space Research* 50 (9): 1250–65.
- Theodoridis, S, and Konstantinos Koutroumbas. 2008. 'Pattern Recognition (Theodoridis, S. and Koutroumbas, K.; 2006)'. *Neural Networks, IEEE Transactions on* 19 (March): 376–376.
- Tzotsos, Angelos, and Demetre Argialas. 2008. 'Support Vector Machine Classification for Object-Based Image Analysis'. In *Object-Based Image Analysis*, 663–77.
- UNESCO. 1984. 'Etudes et Documents Sur Le Patrimoine Culturel: Méthodes d'analyses Morphologique Des Tissus Urbains Traditionnels'. 1984.
- Zhang, Yongli. 2012. 'Support Vector Machine Classification Algorithm and Its Application'. In *International Conference on Information Computing and Applications*, 179–186. Springer.

4.3. Articles publiés dans le cadre de collaboration scientifiques

IMPROVING THE LAND SURFACE GENERAL DROUGHT INDEX MODEL

Alfred Homère Ngandam Mfondoum^{*1, 2}, Paul Gérard Gbetkom³ Ryan Cooper⁴, Sofia Hakdaoui⁵,
Mamane Barkawi Mansour Badamassi⁶

¹ StatsN'Maps, Private Consulting Firm, Dallas, Texas 75287, USA. stats.n.maps.expertise@gmail.com

² Department of Geography, University of Yaoundé I, Yaoundé, Cameroon. Alfred.homere@gmail.com

³ Department of Geography, University of Aix-Marseille, Marseille, France. Paul-gerard.gbetkom@etu.univ-amu.fr

⁴ Erik Jonsson School of Engineering and Computer Science, University of Texas in Dallas, Dallas, Texas 75080, USA.
Rdc190001@utdallas.edu

⁵ Earth Observation department, Geo-Biodiversity and Natural Patrimony Laboratory, Geophysics, Natural Patrimony and Green Chemistry Research Center, Scientific Institute, Mohamed V University, Rabat, Morocco.
s.hakdaoui@gmail.com

⁶Laboratory of Botanic, Mycology and Environment, Mohammed V University, Rabat, Morocco.

barkawimansour@yahoo.fr

Keywords: Drought, Remote Sensing, Spectral index, Improved Land Surface General Drought Index, Vegetation Moisture Index, Normalized Difference Soil Drought Index, Landsat, Semi-arid regions.

ABSTRACT

Drought affects all human activities and ecosystems. Nearly 40 percent of the world's population inhabit Drylands, and they depend on agriculture for their food, security and livelihoods. Among the remote sensing indices developed, the Land Surface General Drought Index (LSGDI) was recently proposed. This paper proposes an improved model of LSGDI to face the issue of drought in semi-arid and arid regions. The experiment was conducted for the Maga's floodplain, in North-Cameroon. The method uses satellite images of Landsat in 1987, 2003 and 2018, for January and March or April, corresponding to the middle and the end of the dry season. A Vegetation Moisture Index (VMI) and a Normalized Difference Soil Drought Index (NDSoDI) are both developed. On an orthogonal plan, their projections give a drought line that expresses the improved LSGDI (LSGDI2) as the root sum square of the NDSoDI and the VMI. The LSGDI2 results are ranged in [0.09 – 0.14] interval, which is used to define the threshold and ease the qualifiers for drought classes. The visual patterns easily match the sandy areas of the original Landsat images with the highest values, while the vegetation and water areas match the lowest values. Compared with the LSGDI and Second Modified Perpendicular drought Index (MPDI1), the new index reflectance values are higher. Finally, although LSGDI2 curve's evolution follows the NDSoDI one at 94%, the new spectral index values depends on the both components, helping to map highest values of drought and moisture in Maga's floodplain, for a sustainable rice culture expansion.

A New Agricultural Drought Index to Better Detect and Monitor Millet Crop by Remote Sensing in West Africa: Case of Niger

*Mansour Badamassi Mamane Barkawi**, Ph.D. Student in the Third Year Department of Biology Faculty of Science, Mohammed University, Ibn Batouta Avenue, Rabat, Morocco. E-mail: barkawimansour@gmail.com

El-Aboudi Ahmed, Professor of Higher Education (PES) Department of Biology Faculty of Science, Mohammed University, Rabat, Morocco.

Gbetkom Paul Gerard, Ph.D Student, Department of Geographic, Faculty of Arts, Letters, Languages, and Human Sciences, Aix Marseille University, Marseille, France.

Abstract--- In this paper, we propose to establish a remote sensing-based agricultural drought indicator named Agricultural Drought Condition Index (ADCI) that will detect agricultural drought linked mainly to millet crops in the agricultural area of Niger. It is obtained by combining four key parameters: Precipitation Condition index (PCI), Evapotranspiration Condition Index (ETCI), Vegetation Condition Index (VCI) and Temperature Condition Index (TCI). PCI is used to reflect precipitation deficit (Du et al., 2013), VCI is used to reflect variations in the health status of vegetation, TCI is used to identify vegetation stress produced by high temperatures or excessive humidity and ETCI is used to reflect crop shortage. ADCI is calculated over the crop growth period (June to October) from 2003 to 2017 in the agricultural area of Niger. Then, a comparison analysis between the ADCI results and the millet crop yield was carried out. Based on these results, ADCI shows a very statistically significant correlation with the millet crop yield throughout the millet growth period (June-October) and it is strongly correlated with the VHI index but provided better drought conditions than VHI. This new index is quite powerful and capable to identify and monitor the agricultural drought related to the cultivation of millet.

Keywords--- Agricultural Drought, Agricultural Drought Condition Index (ADCI), Chirps, Modis, Principal Component Analysis, Niger.

Modelling Best Oil Palm Site Planting in Njimom, West-Cameroon: A GIS-Analysis Combining Weighted Linear Combination, Fuzzy Analytical Hierarchy Process and Utility Function

Alfred Homère Ngandam Mfondoum^{1,2*}, Roland Bruno Ngouyamsa Mfondoum³,
Pauline Ngùet Wokwenmendiam⁴, Paul Gérard Gbetkom⁵, Marthe Ntengo⁶

¹Stats N' Maps, Private Consulting Firm, Dallas, Texas, USA

²Department of Geography, Laboratory of Natural Resources Management, University of Yaoundé, Yaoundé, Cameroon

³Department of Computer and Data Sciences, University of Prague, Prague, Czech Republic

⁴Mining and Geological Research Institute, Volcanological and Geophysical Unit, Yaoundé, Cameroon

⁵Department of Geography, University of Aix-Marseille, Marseille, France

⁶Department of Sciences, Laboratory of Geology, Richland College, Dallas, Texas, USA

Email: *ngandamh@yahoo.com, mfondoum2000@gmail.com, nguetaulaine@yahoo.fr, paul-gerard.gbetkom@etu.univ-amu.fr, ntengo.marthe@yahoo.com

How to cite this paper: Mfondoum, A.H.N., Mfondoum, R.B.N., Wokwenmendiam, P.N., Gbetkom, P.G. and Ntengo, M. (2019) Modelling Best Oil Palm Site Planting in Njimom, West-Cameroon: A GIS-Analysis Combining Weighted Linear Combination, Fuzzy Analytical Hierarchy Process and Utility Function. *Journal of Geographic Information System*, **11**, 138-165.

<https://doi.org/10.4236/jgis.2019.112011>

Received: March 14, 2019

Accepted: April 13, 2019

Published: April 16, 2019

Copyright © 2019 by author(s) and Scientific Research Publishing Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Abstract

Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) has recorded a boom production the last decades and its main productive zone is inside the tropics that meet the best biophysical conditions. Investors as well as geospatial practitioners are increasingly interested on the best growing and harvesting conditions. So said, the aim of this paper is to select the best oil palm planting site through the best methods combination. The study area is the district of Njimom located in the west-Cameroon, transitional between the equatorial and the climatic zones. In the same GIS environment, the Weighted Linear Combination (WLC) and Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) respectively highlight the subtle differences between capability and suitability, while the Utility Function (UF) helps to assess the consideration of sustainability aspects. The first results consist in eight layers representing natural conditions, that is rainfall, temperatures, sunshine, slope, elevation, soil richness, soil moisture and forest cover, recoded in six classes ranked from 5 to 0 according to the FAO standardised scale. They are crossed using the straightforward method of WLC to give the “Capability layer”. The second results consist in three layers related to the social-economical constraints for production, as built-up

area, distance to road and distance to rivers. These layers are recoded in bi-nary with 1 and 0, they are weighted by the FAHP priority vector and membership approach to give the “suitability layer”. Then, the number of occurrences of each aspect of the sustainability is counted in each of the two preceding processes to perform the UF. The resulting value, that is 0.542 for the capability process and 0.315 for the suitability process, serves to weight their respective layers, and their sum gives the final map with the best oil palm site planting in the northern part of the study area, on about 34,950 ha, representing 44.8% of Njimom district.

Keywords

Oil Palm, GIS, WLC, FAHP, UF, Capability, Suitability, Sustainability
